

Caractérisation de la dégradation spécifique des sols pour la région septentrionale du Maroc

A. EL BOUKHARI¹, M. NAIMI¹, M. CHIKHAOUI¹, D. RACLOT²

(Reçu le 13/12/2018; Accepté le 05/03/2019)

Résumé

L'érosion hydrique est un processus majeur de dégradation des sols. Au Maroc, elle est considérée comme la principale cause de désertification. Elle entraîne une réduction du potentiel productif des sols et l'envasement des retenues de barrages conduisant à une perte du volume d'eau mobilisable et remettant en cause la durabilité de ces ouvrages hydrauliques. Des effets négatifs sont répercutés dans les domaines de la production de l'énergie électrique, de l'approvisionnement en eau potable et de l'irrigation. Face à l'ampleur de ce fléau, le Maroc doit multiplier ses interventions pour évaluer les conséquences de la dégradation des sols et mettre au point des programmes de conservation appropriés. Dans ce contexte, un échantillon de 15 bassins versants localisés au niveau de la région septentrionale du Maroc a été sélectionné en vue d'analyser l'envasement sur des périodes de 8 à 47 ans. Les données bathymétriques ont été fournies par la DRPE (Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau). Le présent papier a pour objectifs de i) caractériser la Dégradation Spécifique (DS) de la région septentrionale du Maroc à travers l'étude de 15 bassins versants; ii) d'en déduire une gamme de variabilité de la DS dans cette région et iii) d'évaluer la pertinence de modèles simples basés sur la surface du bassin, ou la combinaison de la surface et de la lame écoulée moyenne annuelle, pour prédire la DS. L'approche adoptée repose sur la confrontation d'une mesure actualisée de la Dégradation Spécifique (DS) dérivée des levés bathymétriques avec des évaluations de cette dernière à l'aide de modèles établis pour prédire l'envasement des barrages au Maroc. L'analyse de l'alluvionnement des retenues de barrages par le dépouillement des levés bathymétriques sur des périodes allant de 8 à 47 ans montre un envasement total moyen annuel d'environ $0,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, soit 13 % de la capacité totale initiale qui est de l'ordre de $4,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ et une variabilité de la dégradation spécifique allant de 172 à 5 365 $\text{t km}^{-2}\text{an}^{-1}$, soit un rapport de 1 à 31. Enfin, cette étude montre la très forte variabilité des performances de prédiction de la dégradation spécifique basées sur des modèles simples utilisant la surface de bassin et la lame écoulée.

Mots clés : Érosion hydrique, Barrages, Envasement, Dégradation Spécifique, Maroc.

Characterization of soil specific degradation for the northern region of Morocco

Abstract

Water erosion is a major process of soil degradation. In Morocco, it is regarded as the principal cause of desertification. It involves a reduction of the production potential of soils and as the silting of dam reservoirs leading to a loss of the amount of mobilizable water and brings up the issue of resilience of these hydraulic infrastructures. Adverse effects are reflected in the domains of energy production and irrigation and drinking water supplies. To face this challenge, Morocco must multiply its interventions to assess the consequences of soil degradation and to develop suitable programs of soil conservation. In this context, a sample of 15 catchment area located in the northern part of Morocco was selected in order to analyze the silting over periods of 8 to 47 years. The bathymetric data was provided by the DRPE (Direction of the Research and the Planning of Water). This paper aims i) to characterize the Specific Degradation (DS) of the northern part of Morocco through the study of 15 catchment areas; ii) to deduce a range of variability from the DS in this area and iii) to assess the relevance of simple models based on basin area, or the combination of basin area and the annual average flow, to predict the DS. The adopted approach is based on the confrontation of a current measurement of the Specific Degradation (DS) derived from the bathymetric surveys with assessments of the latter using models established to predict the silting of dams in Morocco. The analysis of siltation in dam reservoirs by the investigation of bathymetric data over periods from 8 to 47 years, shows an annual average total silting of approximately $0.6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, that is 13% of the initial total capacity which is about $4.6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ and a variability of the specific degradation ranging from 172 to 5 365 $\text{t km}^{-2}\text{yr}^{-1}$, that is a ratio of 1 to 31. To end with, this study shows a significant variability of the performances of prediction of specific degradation based on simple models using the area of watershed and water flow.

Key words: Water erosion, Dams, Silting, Specific degradation, Morocco.

INTRODUCTION

L'eau constitue une ressource naturelle incontournable et un enjeu mondial contemporain. Elle représente une composante essentielle du bien-être de l'Homme et du développement socio-économique durable. Les trois quarts de la totalité de la main d'œuvre mondiale dépendent de l'eau. Les secteurs de l'agriculture, de la pêche et de la sylviculture à eux seuls, qui sont parmi les plus gourmands en eau, emploient quasiment un milliard de personnes (WWDR, 2016). Conscient de l'importance de l'eau dans le développement socio-économique et

de son rôle déterminant dans la sécurité hydrique du pays, et pour mieux profiter des apports pluviométriques globalement insuffisants et spatialement hétérogènes (Figures 1 et 2), les pouvoirs publics au Maroc accordent un intérêt particulier au secteur de l'eau.

Ce secteur tire profit d'une stratégie à long terme basée sur la mobilisation des ressources hydriques par une politique volontariste et avant-gardiste d'édification de barrages (SNE, 2009). Cette politique a permis de progressivement doter le pays d'importantes infrastructures hydrauliques constituées de 135 grands barrages (Figure 3).

¹ Département des Ressources Naturelles et Environnement - IAV Hassan II, Rabat, Maroc

² Institut de Recherche pour le Développement (IRD), UMR LISAH, Montpellier, France

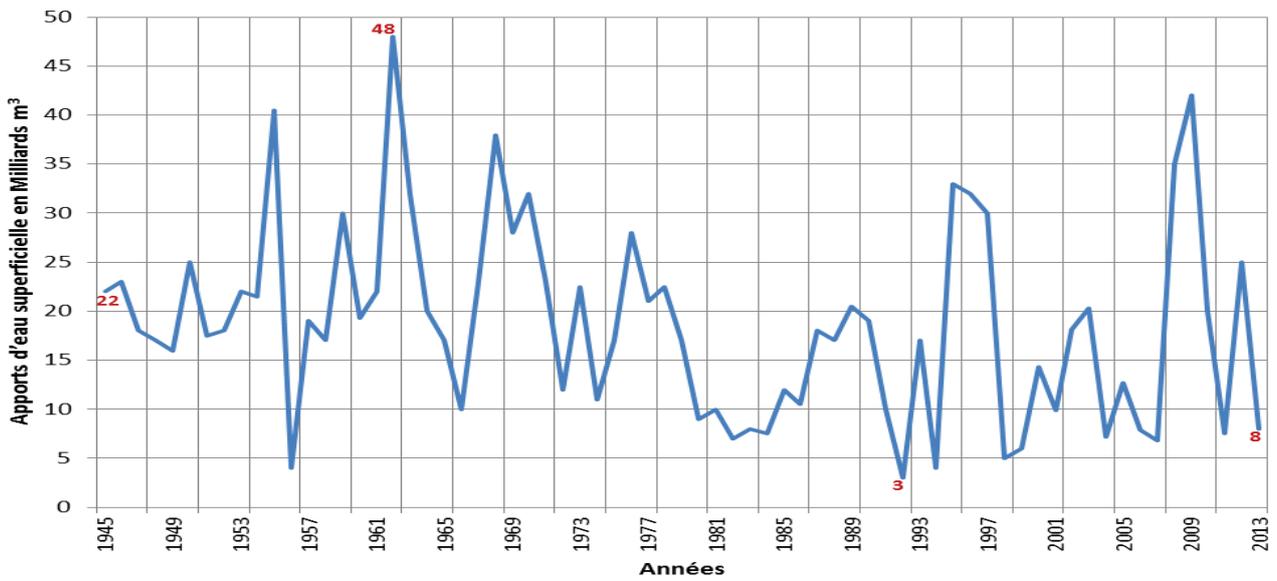


Figure 1 : Évolution des apports d'eau superficielle en Milliards m³ sur l'ensemble du Maroc (Période : 1945-2013) (Département de l'Eau, Maroc – 2013)

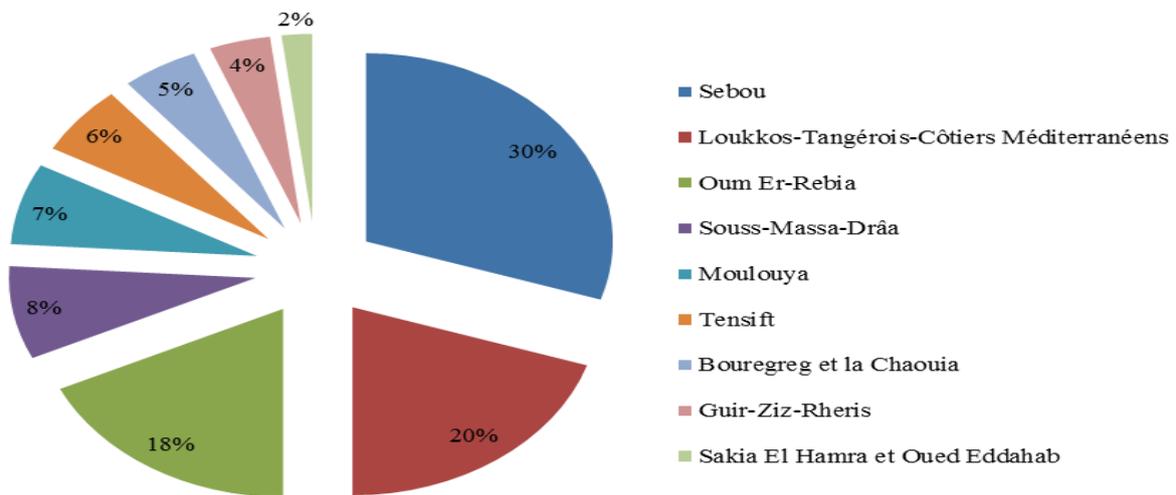


Figure 2 : Répartition spatiale des apports d'eau superficielle au Maroc (Département de l'Eau, 2013)

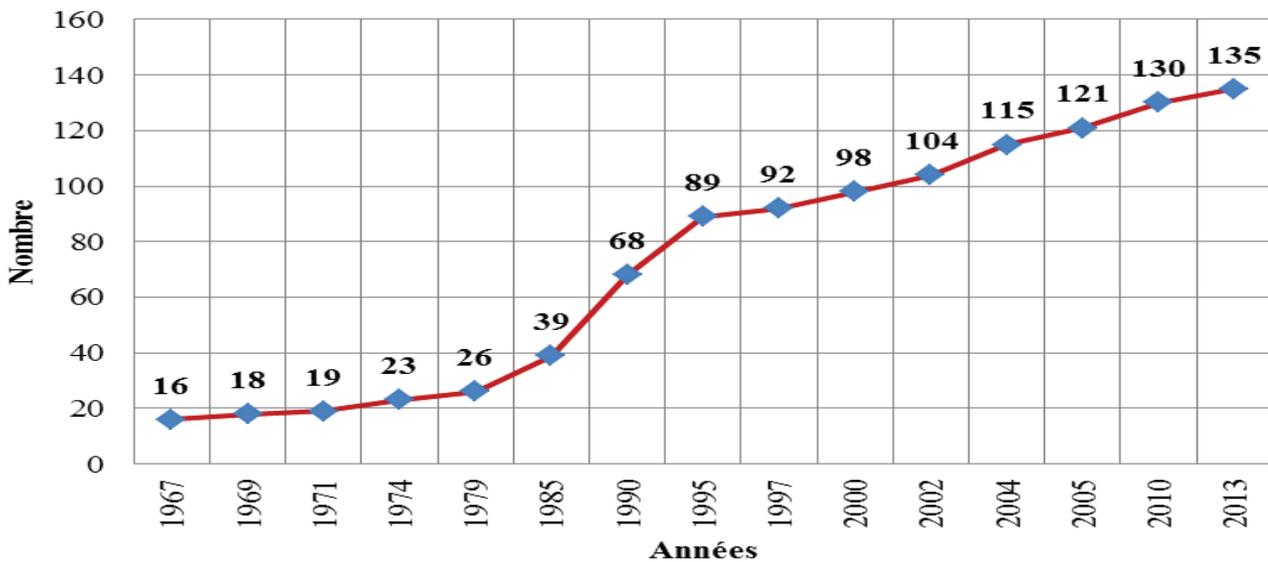


Figure 3 : Évolution du nombre de grands barrages du Maroc depuis 1967

Avec un potentiel hydraulique mobilisable estimé à environ 22 milliards m³/an, le secteur de l'eau du Maroc est confronté actuellement à plusieurs contraintes naturelles et anthropiques, dont l'érosion hydrique qui est considérée comme la principale cause de dégradation des sols au Maroc. Les enjeux liés aux phénomènes d'érosion sont perçus tant à l'amont, au niveau de la dégradation des sols, base de toute production agricole, pastorale ou forestière, qu'à l'aval au niveau de la mobilisation de la ressource eau, élément vital pour le développement socio-économique du pays. Au niveau des ressources en eau, l'érosion hydrique entraîne une perte de la capacité des retenues des barrages, du fait de leur envasement. Elle engendre également des effets négatifs dans les domaines de la production de l'énergie électrique, de l'approvisionnement en eau potable et de l'irrigation. Selon les estimations, 75 Millions de m³ de capacité sont perdus chaque année à cause de l'envasement, ce qui correspond à une baisse annuelle de 0,5 % de la capacité des barrages et une perte du potentiel d'irrigation estimé à 5000 hectares (GEF, 2016).

Le présent papier a pour objectifs de i) quantifier la dégradation spécifique (DS) de la région septentrionale du Maroc à travers l'étude de 15 bassins versants; ii) de caractériser la gamme de variabilité de la DS dans cette région et iii) d'évaluer la pertinence de lois simples basées sur la seule surface du bassin, ou une combinaison de la surface et de la lame écoulée moyenne annuelle, pour prédire la DS dans cette région. Le choix de cette région trouve amplement sa justification dans le fait qu'elle assure plus de 60 % des apports d'eau superficielle au Maroc.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Zone d'étude

La zone d'étude englobe les bassins versants de 15 barrages répartis sur sept bassins hydrauliques (Tableau 1). Elle concerne les bassins du Bouregreg, du Côtier Atlantique, de la Moulouya, du Sebou, en plus de ceux constituant la région rifaine, marquée par un taux de dégradation des sols considérés parmi les plus forts au Monde (Balaghi *et al.*, 2011), à savoir le Tangérois, le Côtier méditerranéen et le Loukkos.

Tableau 1: Présentation des barrages étudiés

Bassin hydraulique	Barrage	Oued	Fonction	Superficie (km ²)
Tangérois	9 Avril 1947	Hachef	AEPI	220
	Ibn Batouta	M'harhar	I, AEPI	180
Loukkos	Oued El Makhazine	Loukkos	E, I, AEPI	1820
Côtier Méditerranéen	Mohamed B. A. El Khattabi	Neckor	I, AEPI	780
	Nakhla	Nakhla	AEPI	110
	Smir	Smir	AEPI	75
	Joumoua	Joumoua	AEPI	51
Sebou	Idriss 1er	Inaouène	E, I	3300
	Allal El Fassi	Sebou	E, I, AEPI	5400
	El Kansera	Beht	E, I, AEPI	4500
	Sidi Echahed	Mikkès	AEPI, I	1010
Moulouya	Sidi Said	Moulouya	I, AEP, PI	3300
	Hassan II	Za	I, AEPI, PE	8000
Bouregreg	S. M. B. Abdellah	Bouregreg	AEPI, PI	9500
Côtier Atlantique	Mellah	Mellah	PI	1800

AEPI : Alimentation en Eau Potable et Industrielle ; I : Irrigation ; E : Énergie ; PE : Protection contre l'Envasement ; PI : Protection contre les Inondations

La carte (Figure 4) illustre la limite de la zone d'étude ainsi que la localisation des barrages étudiés.

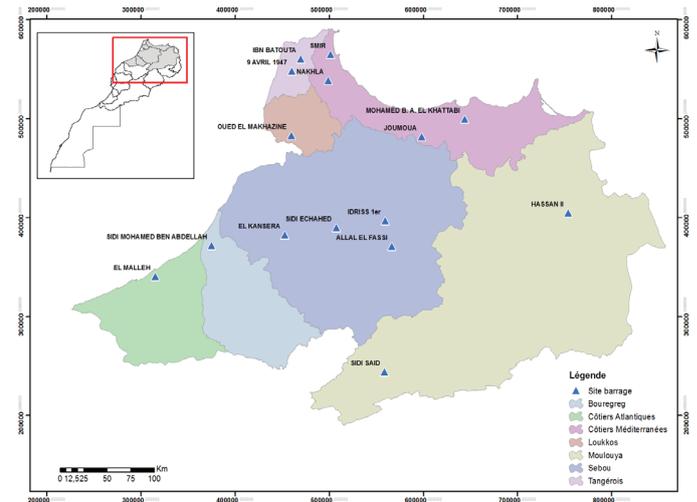


Figure 4: Situation géographique de la zone d'étude et des barrages étudiés

Étude de la sédimentation des retenues des barrages

L'envasement d'une retenue de barrage engendre une réduction de sa capacité de stockage résultant de l'accumulation des sédiments. La sédimentation dans les retenues de barrages au Maroc pose fréquemment d'importants problèmes qui réduisent la rentabilité de l'ouvrage (Boutaieb, 1988), ce qui représente un grand danger pour les investissements effectués pour la mobilisation des eaux de surface et la satisfaction des besoins. En effet, l'envasement affecte les performances d'une retenue de barrage en réduisant sa capacité de régularisation et sa durée de vie, il entrave l'efficacité de sa gestion et constitue une menace latente et permanente pour sa sécurité (PDAIRE-Loukkos, 2007). C'est un phénomène qui exige un contrôle régulier des volumes de dépôt pour la mise à jour des courbes d'étalonnage et pour déterminer le taux d'envasement et par conséquent sa capacité utile et sa durée de vie (Abdellaoui *et al.*, 2002).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer le taux d'envasement des retenues des barrages. Parmi les

méthodes les plus déployées au Maroc pour déterminer l'érosion et l'alluvionnement des retenues, figure le recours aux levés bathymétriques (Lahlou, 1994; Marzouki, 1992; Tayaa, 1997). C'est cette méthode éprouvée qui a été utilisée pour déterminer l'envasement des barrages objet du présent travail. Ainsi, les levés bathymétriques établis pour les 15 barrages étudiés ont été dépouillés afin de quantifier le taux d'envasement des barrages au niveau de la région septentrionale du Maroc, et la comparaison des résultats obtenus avec les lois établies dans les anciens travaux de recherche prédisant l'envasement propre au Maroc.

Le calcul des valeurs des DS a été effectué sur la base d'une densité de vase égale à 1,3 et sur la base d'un taux de piégeage des sédiments au niveau des retenues calculées selon la méthode de Brune (1953). Cette méthode repose sur une courbe d'étalonnage qui permet de déterminer le taux de piégeage d'une retenue en fonction du rapport entre la capacité du barrage et l'apport moyen annuel en eau.

Les valeurs de la DS ainsi établies sont ensuite comparées avec celles obtenues par l'application des deux équations préconisées dans le cadre de l'étude de l'envasement des barrages au Maroc (Lahlou, 1994). Ces deux équations reposent sur la superficie du bassin versant amont (S) seulement, ou la combinaison de la superficie du bassin et de la lame d'eau écoulée moyenne interannuelle (L):

$$DS = 33,7 * 10^3 * S^{-0,498} \quad (\text{eq. 1})$$

$$DS = 10^{1,53} * S^{-0,111} * L^{0,821} \quad (\text{eq. 2})$$

Par ailleurs, une base de données sous une interface SIG des barrages étudiés ainsi que la caractérisation de leurs bassins versants a été construite afin d'approfondir l'analyse et l'étude de la problématique de l'envasement des retenues des barrages appartenant à ladite région.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

En se référant à la courbe de Brune, les taux de piégeage des barrages étudiés sont compris entre 87 et 97 %. Les résultats issus de l'analyse des levés bathymétriques ont alors permis d'établir la DS pour chaque bassin versant alimentant les barrages étudiés (Figure 5).

L'analyse comparée de la DS au sein de la région d'étude fait apparaître une forte variabilité entre les bassins avec

une DS assez importante au niveau du territoire de la zone d'action du bassin hydraulique du Loukkos où on observe une DS maximum de l'ordre de 5365 t km⁻²an⁻¹ pour le barrage Smir (Côtier Méditerranéen) mis en service en 1991 et qui sert exclusivement à l'alimentation en eau potable et industrielle de la région de M'diq.

La figure 6 illustre la caractérisation spatiale de la zone d'étude en termes de DS.

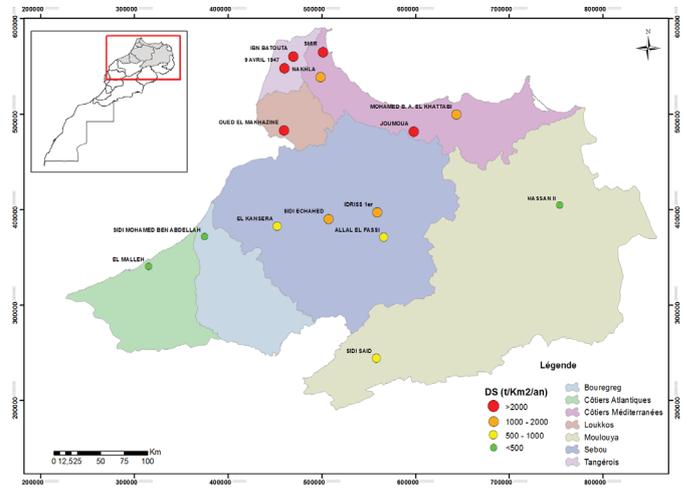


Figure 6 : Caractérisation de la zone d'étude en termes de DS

Si l'on cumule les apports de sédiments des quinze barrages de la région septentrionale du Maroc étudiés, nous comptabilisons un apport moyen annuel d'environ 0,6*10⁹ m³, soit 13% de la capacité totale initiale de ces barrages (environ 4,6*10⁹ m³).

La figure 7 présente la comparaison de la DS établie sur la base de la bathymétrie mesurée pour les barrages étudiés avec les valeurs de DS obtenues par l'application des deux équations 1 et 2. Ci-dessous, nous analysons les performances de ces équations prédictives par bassin hydraulique.

• **Bassin hydraulique du Loukkos:** L'analyse faite sur les sept barrages appartenant au grand bassin hydraulique du Loukkos, soit 24 % de la superficie totale de l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (ABHL), a permis de déceler une différence notable entre la DS obtenue à partir des mesures bathymétriques et celle estimée à partir

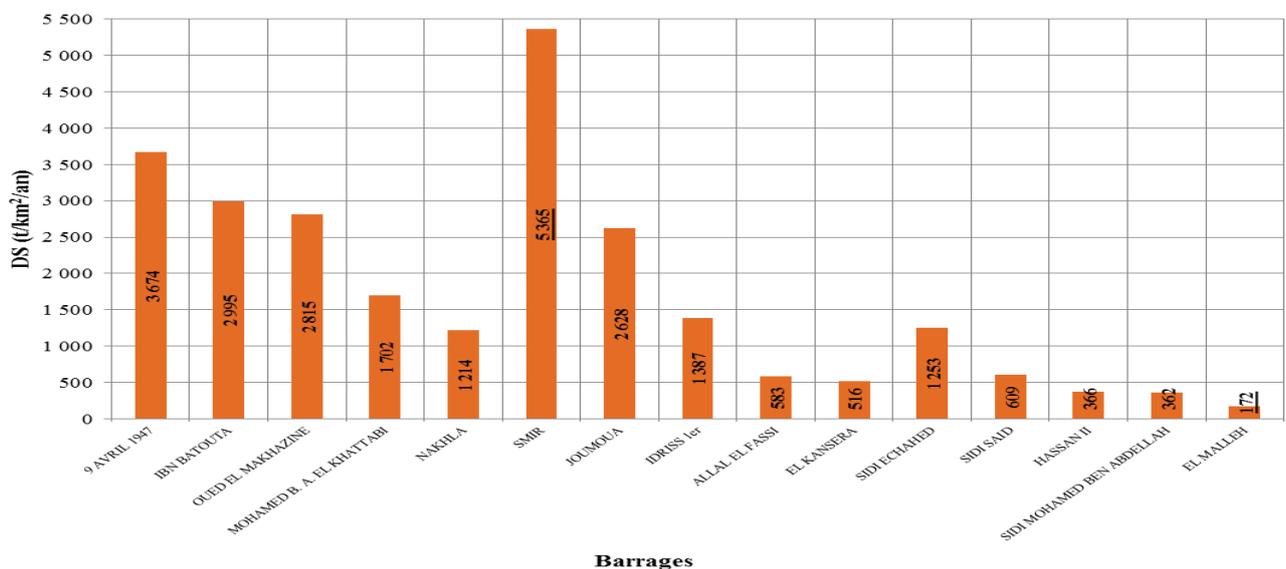


Figure 5 : DS obtenues à partir des levés bathymétriques actualisés des 15 barrages étudiés

des équations citées ci-dessus. On voit clairement que ces équations sous-estiment la perte réelle comme c'est le cas pour les barrages du 9 avril 1947, Ibn Batouta, Oued El Makhazine, Mohamed B. A. El Khattabi, et Smir. En effet, la DS obtenue par la moyenne calculée à partir de ces deux équations est sous-estimée respectivement de 34, 24, 49, 54 et 38 % par rapport à la dégradation actuelle tirée à partir de la bathymétrie. Par contre, ces équations surestiment la perte réelle pour les barrages du Nakhla et Joumoua.

• **Bassin hydraulique du Sebou:** Les quatre barrages étudiés englobent une superficie de 14 210 Km², soit 36% de la superficie totale du grand bassin hydraulique du Sebou. Il en ressort que les équations sous-estiment la dégradation réelle pour les barrages d'Idriss 1er, Allal El Fassi, El Kansera et Sidi Echahed. La DS obtenue par la moyenne calculée à partir des équations 1 et 2 est sous-estimée respectivement de 46, 8, 5, et 43 % par rapport à la dégradation actuelle obtenue à partir du dépouillement des levés bathymétriques actualisés.

• **Bassin hydraulique du Moulouya:** Les deux bassins versants étudiés englobent une superficie de 11 300 Km², soit 23 % de la superficie totale du grand bassin hydraulique du Moulouya. Les équations testées sous-estiment toutes deux la dégradation réelle pour les barrages de Sidi Said et Hassan II. La DS obtenue par la moyenne calculée à partir de ces deux équations est sous-estimée respectivement de 15 et 33 % par rapport à la dégradation actuelle obtenue à partir du dépouillement des levés bathymétriques actualisés.

• **Bassin hydraulique du Bouregreg-Côtier Atlantique:** La superficie totale des bassins versants alimentant les deux barrages de SMBA et Mellah est de l'ordre de 11 300 Km², soit 55 % de la superficie totale de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg-Chaouia. La confrontation des résultats des DS trouvées par rapport aux équations testées a fait ressortir que lesdites équations surestiment la dégradation réelle pour les deux barrages examinés. La DS obtenue par la moyenne calculée à partir de ces deux équations est surestimée respectivement de 3 et 219 % par rapport à la dégradation actuelle obtenue à partir de l'analyse bathymétrique actualisée.

CONCLUSION

Les résultats présentés dans cet article confirment l'ampleur du phénomène d'érosion hydrique dans la région septentrionale du Maroc, qui impacte significativement la durée de vie des barrages avec des apports en sédiments correspondant à des dégradations spécifiques allant de 12 à plus de 53 t ha⁻¹an⁻¹ au niveau du territoire rifain. Ainsi, des barrages comme Oued El Makhazine, mis en service en 1979 et considéré comme pièce maîtresse de l'aménagement hydraulique de la région du Loukkos en matière d'irrigation, d'alimentation en eau potable, de production d'énergie et de protection contre les inondations, s'envase à une vitesse de plus de 28 t ha⁻¹an⁻¹.

Les bassins hydrauliques étudiés peuvent être classés selon leur DS comme suit : une DS inférieure à 500 t km⁻²an⁻¹ dans les bassins du Côtier-atlantique et de Bouregreg; une DS comprise entre 500 et 1500 t km⁻²an⁻¹ au niveau des bassins de la Moulouya et du Sebou et enfin une DS supérieure à 1500 t km⁻²an⁻¹ dans les bassins de la région Rifaine, avec une valeur avoisinante 3000 t km⁻²an⁻¹ pour les bassins du Tangérois et du Loukkos et une valeur maximale de plus de 5300 t km⁻²an⁻¹, enregistrée au niveau du barrage Smir (Côtier Méditerranéen Ouest).

La divergence nette remarquée entre les DS évaluées dans ce travail sur la base de la bathymétrie et les DS calculées sur la base des formules simples de prévision, nous amène à poser la question de la pertinence de ces équations pour la prédiction du taux d'envasement au niveau de la région septentrionale du Maroc.

Tenant compte de l'importance des investissements programmés dans le futur, en matière de construction de grands barrages au niveau de cette région et à la lumière des résultats du présent travail, nous pouvons conclure que la recherche dans le domaine de l'envasement des barrages au Maroc a besoin d'une nouvelle impulsion de Recherche et Développement sous une démarche intégrant à la fois des données actualisées des levés bathymétriques pour l'ensemble des barrages marocains et une meilleure prise en compte des changements globaux en cours.

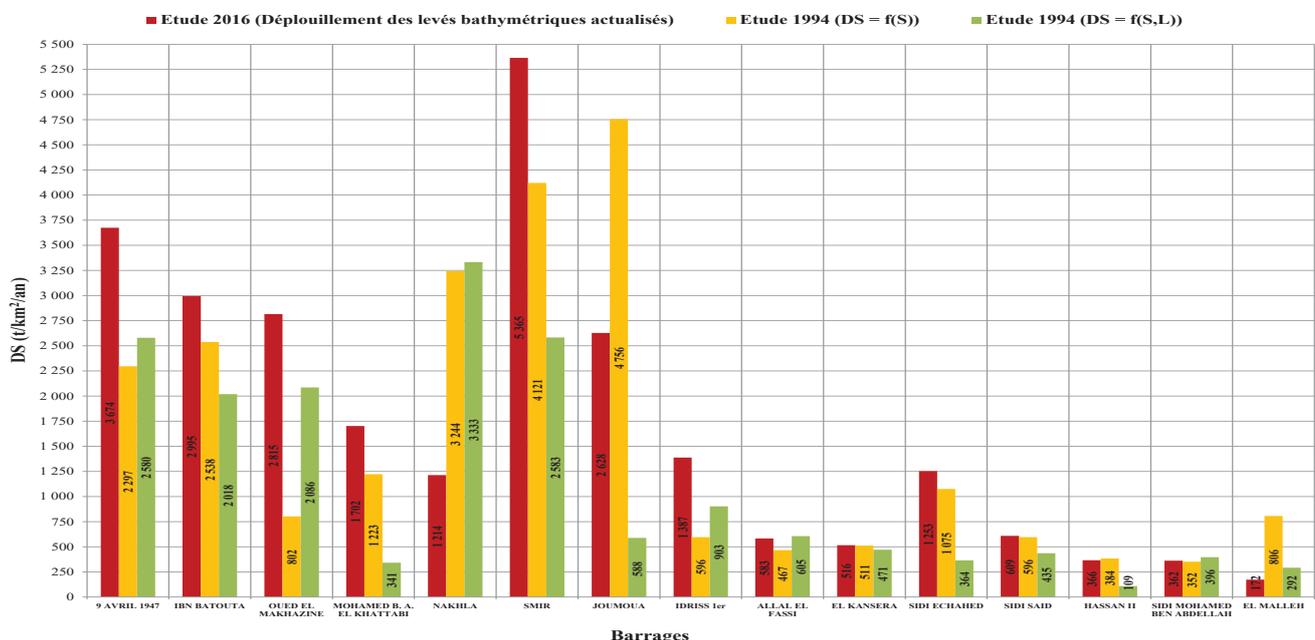


Figure 7 : Comparaison des DS mesurées avec celles estimées à partir des équations de l'étude de 1994

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau, l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos, la Direction Régionale de l'Agriculture de Tanger-Tétouan-Al Hoceïma, la Direction Régionale des Eaux et Forêts et de la Lutte contre la Désertification du Rif-Tétouan et le Projet JEAI - Vecteur Maroc.

RÉFÉRENCES

Abdellaoui B., Merzouk A., Aberkan M., Albergel J. (2002). Bilan hydrologique et envasement du barrage Saboun (Maroc). *Rev. Sci. Eau*, 15: 737-748.

Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos - ABHL. (2007). Étude d'actualisation du Plan Directeur d'aménagement intégré des ressources en eau (PDAIRE) des bassins Loukkos, Tangérois et Côtiers-méditerranéens, 2007. Volet : Ressources en eau superficielles. 192p.

Balaghi R., Jlibene M., Kamil H. et Benaouda H. (2011). Étude Cadre de l'Impact Environnemental et Social, Projet d'Intégration du Changement Climatique dans la mise en œuvre du Plan Maroc Vert (PICCPMV). 83p.

Boutaieb M. (1988). Impacts économiques de l'envasement des barrages au Maroc. Acte du séminaire international sur l'aménagement des bassins versants. Direction des Eaux et Forêts, Rabat.

Brune G.M. (1953). Trap efficiency of reservoirs. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 34: 407-448.

Conseil Économique, Social et Environnemental (CESE) Maroc (2014). La gouvernance par la gestion intégrée des ressources en eau au Maroc: Levier fondamental de développement durable. Auto-Saisine n°15/2014. 79p.

Département de l'Eau-Maroc (2013). Le secteur de l'eau en chiffres. Brochure, 6p.

Global Environment Facility (GEF) (2016). Rapport «Évaluation du portefeuille du Pays: Maroc 1997-2015». 156p.

Lahlou A. (1994). Envasement des barrages au Maroc. WALADA, Casablanca, 120p.

Machouri L., Pépin Y., Sabir M., Nafaa R. (2012). Comparaison de l'envasement dans trois barrages du Maroc. Actes du colloque international sur l'érosion hydrique et la vulnérabilité des sols au Maghreb: État des lieux et perspectives. 95p.

Marzouki T. (1992). Diagnostic de l'envasement des grands barrages au Maroc. *Revue Marocaine du Génie Civil*, 38: 46-53.

Secrétariat d'État Chargé de l'Eau et de l'Environnement (SEEE-Maroc) (2009). Stratégie Nationale de l'Eau (SNE). 55p.

Tayaa M. (1997). Bassin versant de Nakhla: Caractéristiques hydrologiques et estimation du taux d'érosion. Ministère de l'Environnement-USDA. WRS- project, 60p.

World Water Development Report (WWDR) (2016). Water and jobs, Executive summary, 12p.