

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : GEOPAC

Structure de Recherche : Laboratoire de Géophysique et Risques Naturels

Discipline : Géosciences de l'Environnement et Développement Durable

Spécialité : Environnement Côtier et Changement Climatique

Présentée et soutenue le 16/12/2022 par :

Rajae EL AOULA

Titre

**Variabilité hydroclimatique et évolution des flux sédimentaires de l'oued
Bouregreg, Afrique du Nord**

Devant le jury

Mohammed FEKHAOU	PES, Université Mohammed V, Institut Scientifique-Rabat	Président
Saida NIAZI	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences-Rabat	Examinatrice/Rapporteuse
Larbi BOUDAD	PES, Université Mohammed V, Faculté des Sciences-Rabat	Examineur/Rapporteur
Oula AMROUNI	PH, Université de Carthage, INSTM-Tunisie	Examinatrice/Rapporteuse
Gil MAHE	PES, Université de Montpellier, HSM-France	Examineur
Laurent DEZILEAU	PES, Université de Caen Normandie-France	Examineur
Nadia MHAMMDI	PES, Université Mohammed V, Institut Scientifique-Rabat	Directrice

Année 2022/2023

Dédicaces

A la mémoire de MA CHÈRE MAMAN

M^{me} Khadija TALBI

La femme exceptionnelle qui m'a toujours inspiré ;

La mère courageuse qui m'a protégé de toutes ses forces et qui m'a aimé de
tout son cœur ;

La mère exigeante et ambitieuse, qui a guidé mes pas et qui est à l'origine
de toutes mes réussites ;

Une amie qui a toujours cru en moi.

*C'est à ma défunte maman ainsi qu'à toute ma famille que je
dédie ce travail.*

Remerciements

Ce mémoire de thèse vient couronner la formation doctorale exigeante, que j'ai eue tout au long de mes années d'inscription à l'Université Mohammed V de Rabat, par l'obtention du diplôme de Doctorat au sein du laboratoire Géophysique et Risques Naturels de l'Institut Scientifique. Il est le fruit du projet de recherche CASBA « Caractères Anthropiques et Environnementaux de l'Érosion des Versants du Barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah ». L'objet de ce travail de recherche est l'oued Bouregreg, dans son ensemble : du bassin versant jusqu'au barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah (SMBA), ainsi que la plaine alluviale en aval du barrage jusqu'à la mer. Le but est d'évaluer les transferts de matières du bassin versant de l'oued Bouregreg vers la mer et d'étudier l'impact du barrage SMBA sur la sédimentation côtière.

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été effectués grâce à un co-encadrement des professeurs :

- **Mme Nadia MHAMMDI**, Chef du Département Physique du Globe de l'Institut Scientifique de Rabat, Université Mohammed V de Rabat - (Maroc) ;

- **Mr. Gil MAHÉ**, Directeur de Recherche à l'IRD, Hydrosiences Montpellier- (France) ;

- **Mr. Laurent DEZILEAU**, du Groupe de Recherche « Risques » du Laboratoire Géosciences Montpellier à l'Université Montpellier 2- (France).

Ce travail a été réalisé au laboratoire Géosciences de Montpellier 2, en France, et soutenu par le programme PHC Toubkal, No. TBK/15/CASBA, édition, 2016.

Je tiens en premier lieu , à remercier **Prof. Nadia MHAMMDI**, la directrice de thèse, mon initiatrice du carottage sédimentaire, qui a pu me laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de mes actions, tout en y gardant un œil critique et avisé sur ma recherche. Elle a toujours montré de l'intérêt pour mes travaux et répondu à mes sollicitations lorsque le besoin s'en faisait sentir.

Je remercie particulièrement **Prof. Mohammed FEKHAOUI**, pour m'avoir fait l'honneur de Président le jury de ma thèse, aussi pour m'avoir attribué l'occasion de bénéficier d'un contrat à durée déterminée en Géosciences marines, et pour le soutien qu'il m'a apporté durant des moments difficiles de ma vie; lors du décès de ma chère maman.

Mes sincères reconnaissances et remerciements vont tout particulièrement à **Mme Saïda NIAZI**, Professeure à la Faculté des Sciences, de l'Université Mohammed V, qui m'a le plus marqué tout au long de mes études universitaires et qui m'inspire encore aujourd'hui. Je la remercie pour son soutien qui m'a été réellement précieux, grâce à elle j'ai pu améliorer mon mémoire de thèse. Merci de m'avoir inspiré et d'être là pour me guider lorsque j'avais besoin d'aide, et surtout d'avoir accepté d'être Examinatrice/Rappotrice de cette thèse et de m'avoir honoré en acceptant de siéger à mon jury de thèse.

Mes vifs remerciements s'adressent à **Mr Larbi BOUDAD**, Professeur à la Faculté des Sciences, à l'Université Mohammed V, pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail et pour avoir accepté de siéger à mon jury de thèse.

Je dois une vive reconnaissance à **Mme Oula AMROUNI**, Professeure Habilitée à l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer en Tunisie, pour m'avoir fait l'honneur d'être membre de jury et rapporteur de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également au **Prof. Gil MAHÉ**, qui m'a encadré lors de la préparation de mon mémoire de Master et m'a initié à la recherche scientifique. Puis j'ai eu encore une fois l'occasion de travailler avec lui, en co-dirigeant ma thèse. Il était toujours là à encourager mes initiatives, et en me dotant de compétences multidisciplinaires en hydroclimatologie. Merci Mr. Gil pour les réponses à mes questions, pour les discussions fructueuses et les corrections de mes écrits.

J'adresse ma profonde reconnaissance au **Prof. Laurent DEZILEAU**, pour avoir accepté de m'accueillir au Laboratoire de Géosciences à l'Université de Montpellier 2, afin de pouvoir réaliser mes analyses de Granulométrie Laser, de Géochimie et la Datation. Merci beaucoup Mr. **Laurent** pour votre encadrement et vos conseils qui m'ont fait progresser. Vous

étiez toujours attentif et disponible malgré vos nombreuses charges. Votre gentillesse, votre sens de l'humour et votre esprit d'équipe, me marqueront à jamais.

Ma gratitude s'adresse à celles et ceux qui, au fil de ma thèse, ont apporté leur contribution scientifique. Je tiens ainsi à remercier **Mme Kenza KHOMSI** de la Météorologie National de Casablanca (Maroc) et **Mr Alexander KOLKER** de l'Université de Louisiana (États-Unis), pour leur aide et leurs suggestions scientifiques.

Un grand merci au **Prof. Faïçal RAMDANI**, pour son soutien moral après le décès de ma maman, et pour la peine qu'il se donnait à répondre à tous mes emails et questions.

Résumé

L'approche paléohydrologique combinée à l'analyse multi-proxy est réalisée pour la première fois sur des archives sédimentaires de la basse vallée de l'oued Bouregreg, en aval du barrage SMBA (Maroc). Cette étude a permis de mieux appréhender la signature climatique et anthropique dans la colonne sédimentaire d'environ 2 m, prélevée en 2017 dans la terrasse alluviale. De précieuses informations sont fournies sur : l'évolution climatique des dernières décennies, les paléoévénements de crues et les actions anthropiques ayant contrôlé le transit sédimentaire amont-aval de l'oued. L'historique des séries pluviométriques de 36 ans (1977-2013) montre une variabilité temporelle et spatiale sur l'ensemble du bassin versant, marquée par une longue période de sécheresse (1979-1997), entrecoupées par des phases humides dont la plus intense est celle de 1996. La probabilité d'occurrence d'une année sévèrement sèche est passée d'une année tous les 6 ans à tous les 3-4 ans, avec une tendance vers la bi-saisonnalité (hiver-été). La variabilité hydroclimatique impacte nettement les apports en eau de l'oued Bouregreg ; la variation des débits vers le barrage reflète les mêmes tendances que les régimes pluviométriques. Toutes ces fluctuations hydroclimatiques sont enregistrées dans les archives sédimentaires prélevées. L'étude sédimentologique couplée à une analyse géochimique (Fe, Zr et Ti) ont permis d'identifier Sept horizons à fraction grossière ; témoins de dépôts de paléocrues intenses. Le profil d'activité du ^{210}Pb décroissant dans les dépôts, confirme des sédiments non perturbés et d'âge postérieurs à 1900. Le ^{137}Cs révèle une chronologie approximative des dépôts des événements extrêmes en 1960, 1978, 1990 et 2010. Les apports des paléocrues de 1996 et 2002 n'ont pas été enregistrés dans la chronique sédimentaire en raison probablement de : (i) la faible intensité de l'événement hydrologique ne pouvant submerger la terrasse fluviale, et (ii) la rétention d'eau et le piégeage des sédiments dans la retenue après une longue période de sécheresse. Le taux de sédimentation a progressivement baissé, de 3,64 cm/an, 3,08 cm/an à 0,41 cm/an (1950-1978-2017). La diminution des flux hydrosédimentaires vers l'aval est bel et bien confirmée. Les forçages hydroclimatique et anthropique (barrage) y contribuent au taux de déficit fluvial avec, respectivement, 46,5% et 53,5%. Durant ces dernières décennies, la composante fluviale est moins importante en aval du barrage, elle favorise alors une dynamique estuarienne à composante marine. Celle-ci risque de s'accroître si la pénurie en sédiments vers la mer se poursuit et l'élévation du niveau marin s'accélère dans le contexte du changement climatique. L'estuaire du Bouregreg, trait d'union entre Rabat et Salé, risque de se transformer en un bras de mer et favoriser l'extension des submersions marines à l'intérieur de la vallée amplement aménagée. Pour pérenniser les fonctions de l'ouvrage hydraulique et atténuer la pénurie en sédiments du littoral, la gestion du matériel détritique piégé dans la retenue est recommandée.

Mots clés: Variabilité hydroclimatique, archive sédimentaire, paléohydrologie, analyse multiproxy, terrasse alluviale, paléocrues, barrage, estuaire, oued Bouregreg.

Abstract

Paleohydrological approach combined with multi-proxy analysis is realized for the first time on sedimentary archives of the lower valley of the Bouregreg river, downstream from the SMBA dam (Morocco). These studies contributed to identify both climatic and anthropogenic signatures in a sedimentary column of about 2 m that was sampled in 2017 in the alluvial terrace. Valuable data are provided on climatic evolution of the last decades, paleoevents of floods and the anthropic actions which controlled the sedimentary transit upstream-downstream of the river. 36-year rainfall series (1977-2013) show temporal and spatial variability over the entire catchment area marked by a long period of drought (1979-1997) scattered with wet phases the most intense of which occurred in 1996. The probability of occurrence of a severely dry year during a given period changed from 6 years to 3-4 years with a trend towards bi-seasonality (winter-summer). Hydroclimatic variability clearly impacts the water supply of the Bouregreg Bouregreg as the variation in flows towards the dam reflects similar trends of rainfall patterns. Hydroclimatic fluctuations are recorded in the collected sedimentary archives. Sedimentological and geochemical analyses (Fe, Zr and Ti) made it possible to identify seven horizons with a coarse fraction that shows evidence for witnesses of intense paleoflood deposits. Decreasing activity profile of ^{210}Pb in the deposits confirms undisturbed sediments of post-1900 period. ^{137}Cs indicates an approximate chronology of extreme events deposits during 1960, 1978, 1990 and 2010. Both periods of 1996 and 2002 were not recorded in the sedimentary chronicle probably due to two reasons. First the low intensity of the hydrological event which could not submerge the fluvial terrace, and secondly it is due to water retention and sediment trapping in the reservoir after a long period of drought. Sedimentation rate gradually decreased from 3.64 cm/year (1950) to 3.08 cm/year (1978), and to 0.41 cm/year (2017). The decrease in hydrosedimentary flows downstream is then accurately confirmed. Hydroclimatic and anthropogenic (dam) forcing contribute to the river deficit rate by 46.5% and 53.5% respectively. During the last decades fluvial component appears less important downstream of the dam which favors an estuarine dynamic with a marine component. This setting may develop if the shortage of sediment towards the sea continues and the rise in sea level may accelerate in a context of climate change. The Bouregreg estuary which link both Rabat and Salé cities may transform into a branch of the sea from the extension of marine flooding inside the urbanized valley. In maintaining for long times, the essential function of the hydraulic structure and reducing the shortage of sediments on coast the management of detrital materials trapped in the reservoir is recommended.

Keywords: Hydroclimatic variability, sedimentary archive, paleohydrology, multiproxy analysis, alluvial terrace, paleofloods, dam, estuary, Bouregreg river.

Productions scientifiques

Articles :

Rajae El Aoula, Nadia Mhammdi, Gil Mahe, Laurent Deuzileau, Alexander S Kolker. 2022. Variabilité et devenir des apports sédimentaires à la mer par l'oued Bouregreg. Soumis à Copernicus Publications (PIAHS).

Rajae El Aoula, Gil Mahe, Nadia Mhammdi, Abdellatif Ez-zahouani, Ilias Kacimi, Kenza Khomsi. 2021. Évolution du régime hydrologique dans le bassin versant du Bouregreg, Maroc. Open Acces Proc. IAHS, 384, 163–168, 2021.

Rajae El Aoula, Nadia Mhammdi, Gil Mahe, Laurent Deuzileau, Alexander S Kolker. 2021. Fluvial sediment transport degradation after dam construction in North Africa. Journal of African Earth Sciences, 182 (2021) 104255.

Rajae El Aoula, Gil Mahe, Nadia Mhammdi, Abdellatif Ez-zahouani, Ilias Kacimi, Kenza Khomsi. 2021. Evolution of the hydrological regime in relation to climate change: Case of the Bouregreg River basin, Morocco. Geographia Polonica, Volume 94, Issue 1, pp. 131-148.

Nadia Mhammdi, Fida Medina, Zaineb Belkhat, **Rajae El Aoula**, Mohammed-Ali Geawahri, Adil Chiguer. 2020. Marine storms along the Moroccan Atlantic coast: An underrated natural hazard? Journal of African Earth Sciences, 163 (2020) 103730.

Gil Mahe, Oula Amrouni, Thourouya Ben Moussa, Laurent Deuzileau, **Rajae El Aoula**, Hamadi Habaieb, Ilias Kacimi, Mohamed Meddi, Nadia Mhammdi Saadi Abdeljaouad. 2018. Recent advances in environmental science from the Euro- Mediterranean and surrounding regions. Springer International Publishing, AG 2018 A.

Zaineb Belkhat, **Rajae El Aoula**, Nadia Mhammdi. 2017. Effects of the winter storms of 2017 on the Atlantic coast of Rabat: A preliminary evaluation. Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, (39), 135-139.

Gil Mahe, Oula Amrouni, Thourouya Ben Moussa, Laurent Deuzileau, **Rajae El Aoula**, Hamadi Habaieb, Ilias Kacimi, Mohamed Meddi, Nadia Mhammdi Saadi Abdeljaouad. 2017. Assessment of the Impact of Dams on River Regimes, Sediment Transports to the Sea, and Coastal Changes. Chapter in book: Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions.

Communications dans des séminaires scientifiques internationales :

- **Rajae El Aoula**, Nadia Mhammdi, Gil Mahe, Laurent Deuzileau, Alexander S Kolker (2022). Fluvial sediment transport degradation after dam construction in North Africa. **La XIème Assemblée Scientifique de l'Association Internationale des Sciences Hydrologiques, du 29 mai au 03 juin 2022 à Montpellier, France.**

- **Rajae El Aoula**, Gil Mahe, Nadia Mhammdi, Abdellatif Ez-zahouani, Ilias Kacimi, Kenza Khomsi (2021). Évolution du régime hydrologique dans le bassin versant du Bouregreg, Maroc. **La 4ème Edition de la Conférence Internationale de FRIEND WATER sur l'Hydrologies des Grandes Fleuves d'Afriques, du 13 au 15 novembre 2021 au Cotonou, Bénin.**
- **Rajae El Aoula**, Nadia Mhammdi, Gil Mahe, Laurent Dezileau (2018). Paleoclimatic reconstruction of extreme events (Floods and Storms) in the estuary of the Bouregreg through the study of sedimentary archives. **Scientific conference on Climate Change and its implication to Smart ICZM and sustainable Blue Growth, du 18 au 20 avril 2018 à l'université Ibn Tofail, Kénitra.**

Participation aux séminaires et expéditions scientifiques :

- **Ecohydrology Workshop in North Africa ECOTUN 2022**, toward a North African Ecohydrology Demo Site , du 04 au 07 octobre 2022 à **l'Institut National des Sciences et Technologies de la Mer, Tunisia.**
- **Université d'été des étudiants francophones, sous le thème: SE RASSEMBLER POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE**, du 23 au 29 septembre 2019 à **l'Université de Rangsit, Bangkok, Thaïlande.**
- **Troisième Edition des DOCTORIALES DE LA COOPÉRATION FRANCO-MAROCAINES**, le 25 avril 2019 au Centre Nationale pour la Recherche Scientifique et Technique (CNRST).
- **Session plénière solennelle, sous le thème : LA SCIENCES DANS TOUS SES ÉTATS**, déroulé du 16 au 18 février 2016, à **l'Académie Hassan II des Sciences Techniques.**
- **Expédition océanographique dans les eaux sous juridiction espagnoles et marocaines**, participation en tant qu'observatrice scientifique à la compagne de recherche océanographique SEVACAN 1507, pour l'étude de la variabilité saisonnière du courant des Canaries. Du 16 au 27 juillet 2015 aux **îles des Canaries, Espagne.**
- **Conférence nationale sous le thème: LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES, LE DÉVELOPPEMENT DURABLE ET LES FUTURES DÉFIS**, organisée le 16 mars 2016 à **l'Institut Scientifique de Rabat (IS).**
- **La journée d'étude sous le thème : LA BIODIVERSITÉ AU MAROC ET LES DÉFIS DE DEMAIN**, organisée le 08 juin 2015 à l'occasion de la Journée Mondiale de l'Environnement, à **l'Institut Scientifique de Rabat (IS).**

Liste de figures

- Figure 1 :** Représentation schématique d'un estuaire d'après Dionne (1963), Pritchard (1967), Dalrymple et al., (1992) et Perillo (1995).
- Figure 2 :** Estuaire comme zone tampon entre les milieux marin et continental selon la classification tripartite des environnements côtiers (d'après Dalrymple et al., 1992 ; modifiés).
- Figure 3 :** Classification des estuaires suivant la structure géomorphologique (Pinet, 2009).
- Figure 4 :** Classification des estuaires selon la propagation de la marée (Le Floch, 1961).
- Figure 5 :** Classification des estuaires basée sur le mélange des eaux (Valle-Levinson, 2010).
- Figure 6 :** Principaux processus physiques : Les vagues, les courants fluviaux et de marée au sein d'un estuaire (d'après Dalrymple & Choi 2007; modifié).
- Figure 7 :** Faciès sédimentaires d'un estuaire (Dalrymple et al., 1992).
- Figure 8 :** Diagramme montrant les principaux facteurs climatiques et les impacts primaires et secondaires du changement climatique sur les estuaires : cas du Royaume-Uni (Robins et al., 2016).
- Figure 9 :** Situation du bassin versant du Bouregreg (El Agbani et al., 1992 ; modifié).
- Figure 10 :** (A)-Relief (Laouina et Mahé, 2013) et (B)-unités géomorphologiques de l'oued Bouregreg (Beaudet, 1969).
- Figure 11 :** Carte géologique simplifiée du bassin versant du Bouregreg (Bounouira, 2007).
- Figure 12 :** Carte isohyète du bassin du Bouregreg (Ezzaouini, 2022).
- Figure 13 :** Répartition de la pluviométrie moyenne aux stations d'Oulmès et de Sidi Jabeur (1970-1995) (Mohsine, 2009).
- Figure 14 :** Principaux types de végétation du bassin du Bouregreg.
(Source : CERCEO, in Trabi et al., 2013).
- Figure 15 :** Localisation des principaux cours d'eau du bassin Bouregreg (Laouina et Mahé, 2013).
- Figure 16 :** Barrage Sidi Mohammed Ben Abdallah et les principaux oueds (SIGMED, 2010).
- Figure 17 :** Représentation générale de l'estuaire du Bouregreg (Cherkaoui, 2006).
- Figure 18 :** Représentation de la structure géologique de l'estuaire du Bouregreg (Gillet, 1986).
- Figure 19 :** Coupes géologiques des deux rives de l'estuaire du Bou Regreg (Beaudet, 1969).
- Figure 20 :** Localisation sur une image satellite des zones humides présentes actuellement dans la vallée du Bouregreg (Hilmi et al., 2020).
- Figure 21 :** Évolution de l'urbanisation de Rabat -Salé de part et d'autre de l'estuaire du Bouregreg (Plan d'Aménagement unifié de Rabat, 2009).
- Figure 22 :** Vues satellites de l'estuaire en 2006 (a) et en 2009 (b), Zone d'aménagement du projet de la vallée du Bouregreg (in Banque Mondiale, 2011).
- Figure 23 :** Accroissement de la population sur le bassin du Bouregreg entre 2004 et 2014 (Ezzaouini, 2022).
- Figure 24 :** Établissements industriels par secteurs à Rabat et Salé pour l'année 2013 (Monographie régionale, 2019).
- Figure 25 :** Répartitions des stations pluviométriques et hydrométriques sur le bassin versant
- Figure 26 :** Exemple de détermination des polygones de Thiessen.
- Figure 27 :** Localisation du site de carottage dans le bassin versant du Bouregreg.
- Figure 28 :** Localisation du site de prélèvement, (A) terrasse alluviale de la carotte BR1, (B) terrasse alluviale de BR2.
- Figure 29 :** Photographie du granulomètre laser du laboratoire des Géosciences de l'université de Montpellier (France).

Figure 30 : Photographie de l'analyse de la carotte bR2 par le spectromètre des Rayons X (XRF-mobile) (X-florescence mobile) de type Nitron, au laboratoire des Géosciences de l'université de Montpellier (France).

Figure 31 : Modes de production et de migration du ^{210}Pb jusqu'au sédiment final (modifié d'après (Corbett and Walsh, 2015)). C : Exemple de profil de ^{210}Pb dans une carotte (trait rouge dans (B)). Le ^{210}Pb en excès qui se désintègre progressivement avec la profondeur et le temps, et qui n'est pas renouvelé une fois enfouit (Baumann, 2017).

Figure 32 : Indices pluviométriques et hydrométriques de 1977 à 2007 pour l'ensemble du bassin versant du Bouregreg (9 970 km²).

Figure 33 : Différence indice pluviométrique moins indice hydrométrique.

Figure 34 : Les deux phases de la NAO Meteorological Mindset.

Figure 35 : Évolution des pluies (mm) et débits (m³/s) mensuels sur le bassin du Bouregreg entre 1977 et 1997 (trait plein) et 1980 à 2013 (tireté) de septembre à août.

Figure 36 : Les sept sous-bassins du bassin versant du Bouregreg.

Figure 37 : Évolution des pluies annuelles (mm) sur les sous-bassins du Bouregreg entre 1977 et 2013.

Figure 38 : Différence des pluies annuelles (mm) entre la région de Tsalat et celle d'Ain Loudah (1977-2013).

Figure 39 : Évolution des débits annuels (m³/s) sur le bassin du Bouregreg pour la période 1977-2007.

Figure 40 : Évolution des débits mensuels (m³/s) par station du Bavant et après 1996 pour la période 1977-2007.

Figure 41 : Faciès sédimentaire et évolution de la granulométrie moyenne de la carotte sédimentaire BR1 prélevée au niveau de la terrasse alluviale du Bouregreg.

Figure 42 : Faciès sédimentaire et évolution de la granulométrie moyenne de la carotte sédimentaire BR2 prélevée au niveau de la terrasse alluviale du Bouregreg (DS : Horizon à dépôt grossier).

Figure 43 : Similitude des dépôts de forte énergie fluviale, retrouvés dans les 2 carottes sédimentaires BR1 et BR2.

Figure 44 : Évolution des éléments géochimiques (Zr, Ti et Fe) le long de la colonne sédimentaire BR2.

Figure 45 : Les profils verticaux des activités du ^{210}Pb (a) et ^{137}Cs (b) dans les sédiments de la carotte BR2.

Figure 46 : Évolution du nombre d'essais nucléaires atmosphériques entre 1945 et 1998 (IRSN, 2006).

Figure 47 : Reconstitution historique des apports sédimentaires par les traceurs chronologiques et la comparaison des enregistrements de débit maximum annuel au niveau de la station hydrométrique de Lalla Chafia.

Figure 48 : Évolution de l'indice standardisé de précipitations (SPI) et l'indice climatique NAO entre 1977 et 2013.

Figure 49 : weather chart of 28 february 2017 at 00.00 UTC. Isobars in hPa. Altitude information is referenced to mean sea level.

Figure 50 : Significant height recorded in SIMAR point 1052036 by Puertos del Estado superimposed with high tide.

Figure 51: Damage caused by the storm surge on the Coast of Rabat. A: Location of the observation sites; B: Destroyed road, stones and trash deposited in the road; C1: Stones dragged away in parking; C2: Parking cleaned after the storm surge; D: Stones and trash deposited.

Figure 52: Damage caused by the storm surge on Temara. A: Framework; B: destroyed and displaced wall, displaced boulder (1.4 x 0.8 x 0.5 m); C: inundation marked by sand deposited (~150m); D: Sidewalk and wall destroyed.

Figure 53 : Réchauffement climatique amorcé depuis 1980 à une échelle planétaire (a) et africaine (b) (Source : GIEC et Banque mondiale).

Figure 54 : Élévation du niveau de la mer depuis 1093 (Source : NASA).

Figure 55 : Élévation du niveau de la mer selon 2 scénarios d'émission du GIEC : faibles émissions (RPC 2.6) à gauche, fortes émissions (RPC 8.5) à droite. (Source : AEE).

Figure 56 : Principales réponses d'un estuaire peu profond à l'élévation du niveau de la mer (Extrait de Leuven et al. 2019. Le texte et les symboles bleus (rouges) représentent les effets positifs (négatifs). Qs: débit fluvial solide, Qs, req: Apport en sédiment requis.

Figure 57 : Comparaison des niveaux d'eau au niveau de la vallée du Bouregreg (situation actuelle – situation aménagée pour des débits de crue avec différentes périodes de retour (Agence pour l'aménagement de la vallée du Bouregreg, 2012).

Liste de tableaux

Tableau 1 : Population de Rabat et Sale 2014 -2019 (Monographie régionale 2019).

Tableau 2 : Superficies et productions des céréales au niveau de Rabat et Sale pour l'année 2015-2016 (Monographie Régionale, 2019).

Tableau 3 : Ruptures détectées par les tests de KhronoStat pour les séries de pluies et débits moyennes sur le bassin versant du Bouregreg, période 1977-2007. (NR= Pas de rupture.

Tableau 4 : Rupture dans les séries de pluies mensuelles des sous bassins du Bouregreg.

Tableau 5 : Rupture des débits mensuels des sous-bassins versant du Bouregreg.

Liste des abréviations

- **ABHBC :** Agence du bassin hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia
- **CID :** Conseil, Ingenierie et Développement
- **DHA :** Département des Affaires Humanitaires
- **DMN :** Direction météorologique nationale
- **DRPE :** Direction de la Recherche et la Planification de l'Eau
- **GIECC :** Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- **IPCC:** The Intergovernmental Panel on Climate Change
- **MES :** Matière En Suspension
- **MO :** Mediterranean Oscillation
- **NAO :** North Atlantic Oscillation
- **ONA :** Occillation Nord Atlantique
- **ONEM :** Observatoire National de l'Environnement du Maroc
- **SIEREM :** Système d'Information Environnementale sur les Ressources en Eau et leur Modélisation
- **SMBA :** Sidi Mohammed Ben Abdellah

Table de matière

Dédicaces	II
Remerciements.....	III
Résumé.....	VI
Abstract	VII
Productions scientifiques	VIII
Liste de figures.....	X
Liste de tableaux	XII
Liste des abréviations.....	XII
Table de matière.....	XIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LA DYNAMIQUE ESTUARIEENNE ET LES RISQUES CÔTIERS FACE AUX ALÉAS NATURELS ET ANTHROPIQUES.....	4
Introduction.....	5
I. Milieu estuarien	5
I.1 Définition d'un estuaire	5
I.2 Types d'estuaires	7
II. Flux de matières et d'énergie en zone estuarienne	9
II.1 Processus hydrodynamiques	9
II.1.1 La Marée	9
II.1.2 Les courants	10
II.1.3 Le vent et la houle.....	10
II.1.4 Les eaux fluviales	11
II.2 Fonctionnement hydro-sédimentaire	11
III. Estuaire face aux effets du changement climatique et aux impacts anthropiques	13
Conclusion	15
CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE BASSIN VERSANT ET ESTUAIRE DU BOUREGREG -RÉGION DE RABAT_ SALE-	16
I. Caractéristique du bassin du Bouregreg	17
I.1 Situation géographique du bassin	17
I.2 Contexte géomorphologique	18
I.3 Cadre géologique	19

I.4	Climat du Bassin de Bouregreg	20
I.5	Sol et couvert végétal.....	22
I.6	Réseau hydrographique et ressources en eaux.....	23
I.6.1	Réseau hydrographique.....	23
I.6.2	Ressources en eaux	24
I.6.3	Barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah	24
II.	Estuaire du Bouregreg.....	25
II.1	Situation	25
II.2	Contexte géologique	26
II.3	Climat.....	27
II.4	Hydrodynamisme fluvatile et marin	28
II.5	Caractéristiques sédimentologiques.....	28
II.6	Biodiversité	29
II.7	Aménagements.....	30
III.	Activités socio-économiques	31
III.1	Population	31
III.2	Secteurs d'activités économiques	33
IV.	Contraintes environnementales.....	35
	Conclusion	35
	CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE	36
I.	Conception de la méthode.....	37
II.	Origine et traitement de données de pluies et débits.....	37
II.1	Origine	37
II.2	Traitement de données	38
II.2.1	Indices pluviométriques et hydrométriques	38
II.2.2	Polygones de Thiessen.....	39
II.2.3	Etude des ruptures.....	40
III.	Compagne de carottage.....	40
IV.	Analyses de laboratoire.....	42
IV.1	Etude sédimentologique des archives sédimentaires	42
IV.1.1	Description litho-stratigraphique	42
IV.1.2	Analyse granulométrique	42
IV.1.3	Analyse géochimique.....	43
IV.2	Etude chronologique	43

Conclusion	45
CHAPITRE 4 : RÉGIME HYDROCLIMATIQUE DANS LE BASSIN VERSANT DU BOUREGREG	46
I. Évolution des relations pluie-débit pour l'ensemble du bassin du Bouregreg.....	48
I.1 Indices pluviométriques et hydrométriques	48
I.2 Rupture de stationnarité	50
I.3 Régime mensuel avant et après la rupture (1979).....	51
II. Étude régionale des pluies et des débits.....	52
II.1 Régionalisation	52
II.2 Rupture de stationnarité	53
II.3 Évolution des pluies.....	55
II.4 Évolution des débits.....	57
Conclusion	61
CHAPITRE 5 : RECONSTITUTION DE LA VARIABILITÉ PASSÉE DES APPORTS SÉDIMENTAIRES DE L'OUED BOUREGREG	62
I. Identification des paléo-crues	63
I.1 Traçage et origine des sédiments	63
I.1.1 Etude sédimentologique.....	63
I.1.2 Analyse géochimique.....	66
I.2 Géochronologie.....	68
I.2.1 Distribution du ^{210}Pb ex	69
I.2.2 Distribution du ^{137}Cs	69
I.3 Taux de sédimentation	70
II. Analyse paléohydrologique pour la reconstitution des crues extrêmes	70
III. Impacts climatique et anthropique sur les apports sédimentaires vers l'aval du barrage SMBA.	72
Conclusion	74
CHAPITRE 6 : IMPACT DES TEMPÊTES HIVERNALES SUR LA CÔTE ATLANTIQUE: CAS DU LITTORAL DE RABAT-SALE	75
Effets des tempêtes hivernales sur la côte atlantique de Rabat Effects of the winter storms of 2017 on the Atlantic coast of Rabat: A preliminary evaluation Zaïneb Belkhatat, Rajae El Aoula, Nadia Mhammdi (2017) <i>Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, (39), 135-139</i>	
CHAPITRE 7 : SYNTHÈSE ET DISCUSSION	83

I. Changements du régime hydroclimatique du bassin versant du Bouregreg entre 1977-2013 (36 ans).....	84
II. Réduction des apports sédimentaires du Bouregreg vers l'aval sous l'effet de la variabilité climatique et de l'ouvrage hydraulique.....	87
III. Devenir potentiel de l'estuaire du Bouregreg face à l'élévation du niveau de la mer	89
Conclusion	93
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS.....	94
BIBLIOGRAPHIE	98
ANNEXES	108

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les contributions sédimentaires vers la zone côtière sont conditionnées par les écosystèmes fluviaux via le processus d'érosion et de transport solide. Ces sédiments transférés dans les océans, par voie hydrique, contribuent à la hauteur de 95% au bilan sédimentaire côtier (Syvitski *et al.*, 2003). Ils assurent et renforcent l'équilibre sédimentaire littoral, qui constitue un intérêt écologique, environnemental et socio-économique (Ludwig *et* Probst, J., 1998). Dans le contexte du changement environnemental actuel, l'hydrodynamique de ces écosystèmes fluviaux a été profondément modifiée, en réponse aux changements climatiques (variabilité des précipitations, modification du régime de l'écoulement et changement du flux sédimentaires) à de larges échelles spatiales et temporelles. En plus, une contribution des activités anthropiques telle que la gestion antérieure de la conservation des sols et le piégeage de sédiments par les barrages impactent fortement l'environnement côtier (Stanley, 1988 ; Antonelli *et al.*, 2004, Syvitski, 2005), en modifiant les apports sédimentaires fluviaux vers la mer (Benmoussa, 2019). Ils induisent ainsi, une pénurie en sédiments au niveau des zones côtières.

L'érosion marine et le recul des côtes sont des phénomènes bien connus pour un grand nombre de fleuves aménagés (Quinquis, 2017). La côte méditerranéenne maghrébine fait partie de ces zones menacées par l'érosion côtière en raison d'une diminution des apports en sédiments, à cause de la concentration humaine et des activités principalement tournées vers la mer, que ce soit la pêche, le commerce ou encore le tourisme (Kacemi, 2008). Les côtes, déjà fortement anthropisées (ports, digues, brise-lames, épis, etc.) aux abords des centres urbains, sont appelées à être de plus en plus aménagées de par l'évolution démographique locale, et d'avantage encore avec le développement du tourisme de masse (El Mrini *et al.*, 2013). Tout cela ne sera pas sans conséquences sur le fonctionnement des transits sédimentaires littoraux comme l'ont montré certains grands aménagements récents, qu'ils soient de type portuaire classique ou « marina ».

Les bassins versants ne sont pas en reste eux non plus. A l'échelle mondiale, 48% des fleuves sont actuellement régulés par des barrages (Grill *et al.*, 2015), et le rythme de construction risque d'être maintenu. Les retenues des barrages permettent une régulation des crues, le soutien à l'étiage, l'irrigation mais constituent aussi des barrières physiques en piégeant les sédiments. La rétention au sein des retenues peut atteindre 70 à 90% du volume des sédiments exportés du bassin versant (Vörösmarty *et al.*, 2003). Par conséquent, une modification des berges des oueds et des estuaires ainsi qu'une érosion côtière sont notées en raison d'un appauvrissement en fraction terrigène.

Le Maroc, dispose actuellement de 149 grands barrages et d'autres chantiers sont en cours. En effet, dans le cadre de la gestion de la rareté d'eau et de l'émergence des phénomènes de sécheresses et des inondations, 45 nouveaux ouvrages hydrauliques seront construits. La politique des barrages reste un véritable levier pour assurer la sécurité hydrique au pays surtout dans le contexte des scénarios relatifs au changement climatique. Cependant, l'envasement des retenues des barrages par les sédiments est un fléau qui impacte la capacité de stockage des ouvrages. Selon le Ministère de l'Équipement et de l'Eau, environ 30% du stock d'eau retenue dans 148 barrages du Royaume est inexploitable à cause de l'envasement. Sur certains bassins versants, des opérations de reboisement ont été effectuées pour freiner les pertes en sol et les sédiments arrivant dans les retenues de barrage. Toute cette fraction terrigène est alors retranchée des apports en sédiments vers la mer à travers des estuaires et des embouchures induisant ainsi une pénurie en sédiments au niveau du littoral.

L'oued Bouregreg parmi les principaux cours d'eau du réseau hydrographique du Maroc, il débouche sur la côte atlantique par l'estuaire de même nom. Il draine le ruissellement du centre nord du pays depuis le Moyen Atlas vers l'Atlantique. Il présente la particularité d'être limité à 18 km de son embouchure par le barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA). La retenue connaît un envasement estimé à environ 2,5 millions de m³/an, ce qui correspond à une dégradation spécifique annuelle de 370 t/km²/an (Lahlou, 1986). Une autre étude basée sur la bathymétrie de la retenue a révélé que l'envasement total depuis la mise en service du barrage en 1974 jusqu'en 2009, est de l'ordre de 1,08 Mm³/an, une conséquence directe d'une forte dégradation spécifique du bassin versant estimée à 4,545 t/ha/an (Rahdou, 2010). Une autre étude plus récente sur le transport sédimentaire en suspension par l'oued Bouregreg, montre qu'au cours des deux années de mesures 2016-2017 et 2017-2018 au niveau de trois stations contrôlant les entrées du barrage, le taux d'envasement a atteint $9,49 \times 106$ m³/an, soit 18% des sédiments du barrage provenant depuis l'amont sont retenus dans cet ouvrage (Ezzaouini *et al.*, 2020). Les principales sources de sédiments vers la retenue sont l'érosion des sols du bassin versant et des berges du barrage. Le taux d'envasement plus élevé observé récemment par rapport à celui estimé par Lahlou (1986) est corrélé à la surélévation du barrage en 2006 ; il retient l'eau et il piège désormais la quasi-totalité des sédiments issus de l'amont. La réduction des flux de sédiments dans le continuum terre-mer est éminente.

A cet égard, le principal objectif de cette étude est mieux comprendre la cause du déficit sédimentaire de l'oued Bouregreg vers l'estuaire et les facteurs naturels et /ou anthropiques qui sont responsables.

Ce mémoire de thèse s'articule, en Sept chapitres :

Le premier chapitre, issu d'une recherche bibliographique ; définit les caractéristiques et le fonctionnement des écosystèmes estuariens en général et l'impact des changements climatiques et anthropiques sur la zone côtière.

Le deuxième chapitre, est consacré à la présentation des caractéristiques de l'ensemble du bassin versant et de l'estuaire du Bouregreg ;

Le troisième chapitre, traite les données de base et les méthodes adoptées au cours de ce travail ;

Le quatrième chapitre, présente les résultats sur le régime hydroclimatique dans le bassin versant du Bouregreg ;

Le cinquième chapitre, aborde la reconstitution de la variabilité passée des apports sédimentaires de l'oued Bouregreg ;

Le sixième chapitre est un exemple de d'impacts d'événements extrêmes (tempête hivernale) sur le littoral de Rabat-Salé ;

Le septième chapitre est consacré à la synthèse et la discussion des résultats trouvés au terme de cette étude ;

Enfin, **des conclusions** résument l'essentiel des résultats obtenus et **des recommandations** sont également proposées.

***CHAPITRE 1 : GÉNÉRALITÉS SUR LA DYNAMIQUE
ESTUARIENNE ET LES RISQUES CÔTIERS FACE AUX ALÉAS
NATURELS ET ANTHROPIQUES***

Introduction

A l'interface entre le continent et l'océan, le domaine côtier est un environnement naturellement dynamique et sujet à des changements importants dans le temps et dans l'espace. Il constitue des territoires à forts appuis stratégiques pour l'économie et pour l'environnement. En effet, les systèmes côtiers dans le monde subissent des pressions humaines de plus en plus croissantes en raison de la croissance démographique et du développement économique (agriculture, industrie, tourisme, transport). Parmi les écosystèmes côtiers, les estuaires sont parmi les plus complexes et fragiles. Cette fragilité est liée à la façon dont l'humanité dégrade ces écosystèmes naturels et les transforme en des "anthroposystèmes". L'importance de ces zones humides, très productives, réside dans l'ensemble des ressources, d'avantages et de services qu'ils nous offrent ainsi que leur action comme tampon protecteur contre les risques côtiers, notamment les inondations. En outre, ils agissent comme une barrière à l'érosion et aux submersions sur le front côtier, en dissipant l'énergie de la houle et de la marée (Möller et Spencer, 2009).

I. Milieu estuarien

I.1 Définition d'un estuaire

Un estuaire est un environnement de type côtier à l'interface des domaines continentaux et marins. De nombreuses définitions ont été proposées afin de prendre en compte les processus physiques, chimiques, biologiques et sédimentaires (Fig. 1). Les premiers travaux sont issus de Pritchard (1967); ils définissent un estuaire comme *«une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte et à l'intérieur duquel l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant »*. Cette définition reste la plus utilisée, toutefois, différents auteurs ont souligné d'autres aspects du milieu estuarien. Dionne (1963) précise les effets de la marée, d'autres ajoutent le volet sédimentaire à cette définition (Dalrymple *et al* , 1992), tandis que celle proposée par Perillo (1995), elle prend en compte les aspects biologiques; il recense 40 définitions différentes, chacune reste dépendante de la perspective étudiée. Plus tard, Dyer (1997), en modifiant la définition de Pritchard (1967) donne une définition intégrant l'hydrodynamisme : *« une masse d'eau confinée ayant une connexion libre avec la mer ouverte, se prolongeant dans la rivière jusqu'à la limite de l'influence tidale, à l'intérieur de laquelle l'eau de mer est diluée d'une façon mesurable avec de l'eau douce issue du drainage du bassin versant »*.

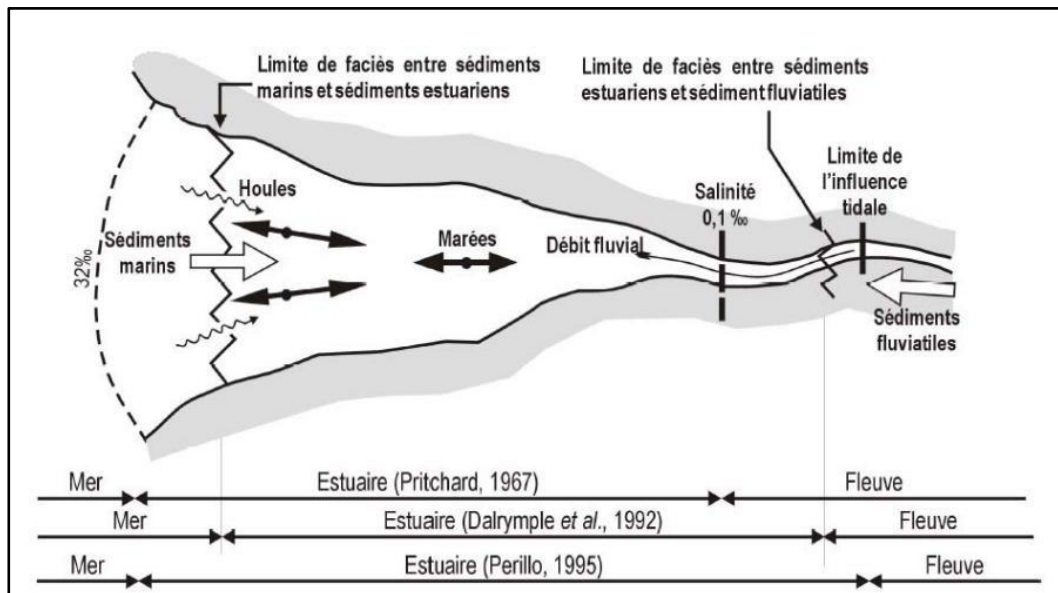


Figure 1 : Représentation schématique d'un estuaire d'après Dionne (1963), Pritchard (1967), Dalrymple *et al.*, (1992) et Perillo (1995).

Les estuaires en tant que zones humides sont le plus souvent définis en fonction de leurs caractéristiques hydrodynamiques et les sources sédimentaires dominantes. De surcroît, la conjonction des forçages hydrodynamiques dominants et le mélange de sources sédimentaires (marine et fluviale) font des estuaires une zone tampon entre les milieux marin et continental (Fig. 2) (Dalrymple *et al.*, 1992).

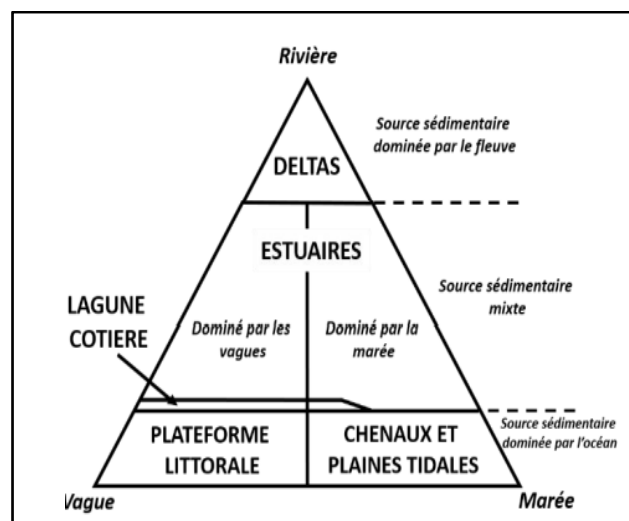


Figure 2 : Estuaire comme zone tampon entre les milieux marin et continental selon la classification tripartite des environnements côtiers (d'après Dalrymple *et al.*, 1992 ; modifiés).

Faisant intervenir l'impact humain Hobbie (2000) a défini l'estuaire comme un milieu aquatique semi-fermé situé à l'interface entre le domaine continental et océanique où l'eau de mer se mélange avec l'eau douce et dont le fonctionnement est influencé par l'hydrologie du bassin versant, le milieu marin et les activités anthropiques. Toutes cette diversité dans la définition du milieu estuarien souligne la complexité à le définir plus simplement.

I.2 Types d'estuaires

Globalement, les estuaires sont des écosystèmes mixtes qui mélangent l'eau douce du lit du fleuve avec l'eau salée de la mer. Néanmoins, différentes approches sont utilisées pour les classer: la géomorphologie, le forçage et progradation tidale, la structure verticale de la salinité et les caractéristiques hydrodynamiques. D'autres critères, notamment le gradient liant salinité et transparence ainsi que la distance à l'embouchure ont intéressé les classifications bioécologiques (Albaret, 1999 ; Mathieson *et al.*, 2000 ; Blaber, 2002 ; Thiel *et al.*, 2003) celles-ci ne seront pas évoquées ici et le volet biologique n'a pas été pas abordé dans cette thèse.

- Géomorphologie

Différents mécanismes naturels peuvent générer des estuaires, tels que l'élévation du niveau de la mer ou l'activité tectonique. Sur la base de la structure géomorphologique, les estuaires peuvent être divisés en quatre types (Schubel et Pritchard, 1972) : (1) l'*estuaire côtier simple* en forme transversale en «V» relatif à une ancienne vallée fluviale inondée au niveau d'une plaine côtière par une élévation du niveau de la mer (Fig. 3a) ; 2- un *fjord* formé par l'action des glaciers, qui creusent des vallées latérales abruptes, les chenaux sont profonds allongés et la section transversale est U (Fig. 3b) ; 3- *Un estuaire à barres de sable* le long de la côte entre l'océan et l'estuaire, en raison d'une dérive littorale. Il est généralement peu profond, avec un chenal étroit qui relie l'estuaire à la mer (Fig. 3c) ; (4) et enfin le dernier type est un estuaire tectonique, formé suite à un mouvement vertical des terres, par des failles ou des plissements aux frontières des plaques ; les bassins qui en résultent sont remplis par l'eau de mer (Fig. 3d). Cette classification basée sur la structure géomorphologique ne tient pas compte de l'intervention humaine, qui peut nettement changer la morphologie d'un estuaire.

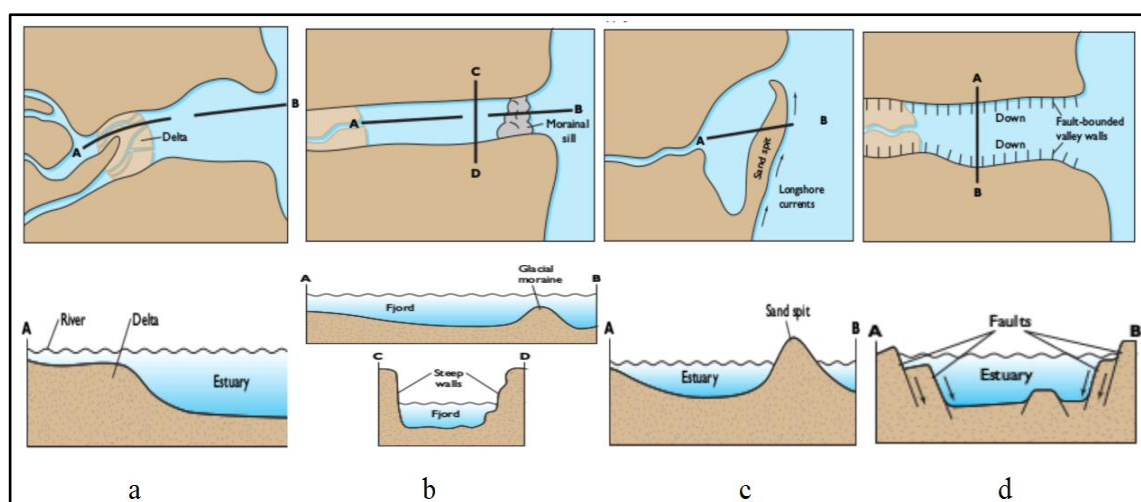


Figure 3 : Classification des estuaires suivant la structure géomorphologique (Pinet, 2009).

- Forçage et propagation de la marée

L'une des principales caractéristiques des estuaires est l'influence des marées et la variation subséquente de l'élévation de l'eau à l'intérieur de l'estuaire. En effet, les estuaires peuvent également être classés en fonction de leur amplitude de marée (Davies, 1964 ; Hayes, 1975), comme microtidaux (< 2 m), mésotidaux (2 m à 4 m) et macrotidaux (> 4 m). Cette amplitude de l'onde de marée le long de l'estuaire est soumise à deux contraintes : le frottement du lit et la réduction de la section. Une classification basée sur la compétition entre les effets de convergence et de friction dans l'estuaire, distingue 3 types (Fig. 4) : le premier est dit *hyper-synchrone*, lorsque l'effet de la convergence l'emporte sur la friction dans l'estuaire, l'amplitude de la marée augmente vers l'intérieur de la terre. Dans les estuaires *hypo-synchrones*, le frottement l'emporte sur l'effet de convergence et donc l'amplitude de la marée diminue dans le sens de l'amont; et dans le cas d'un équilibre entre les deux effets, l'amplitude de la marée restant généralement uniforme, l'estuaire est dit *synchrone* (Dyer, 1995 ; Nichols et Biggs, 1985 et Le Floch, 1961).

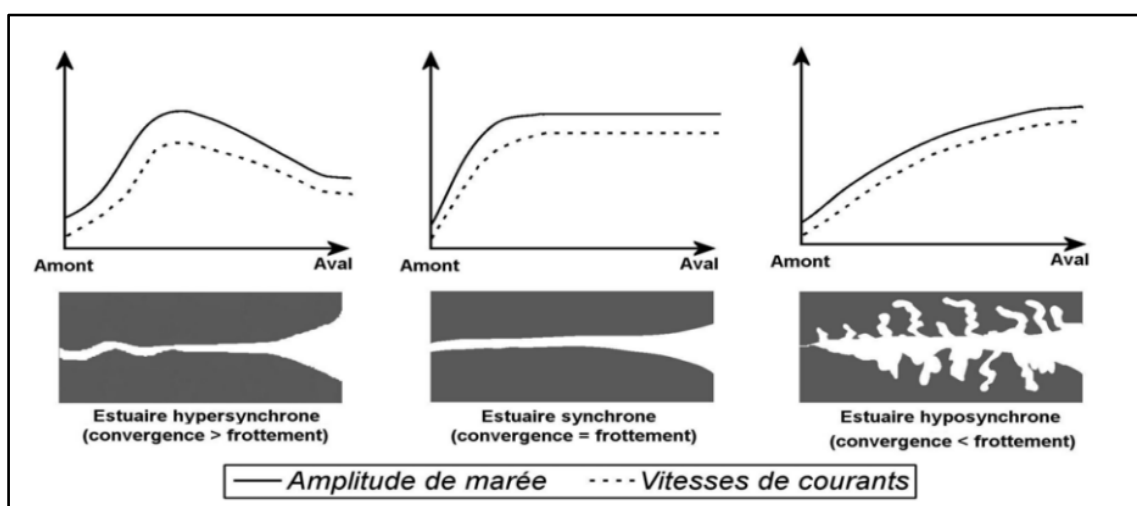


Figure 4 : Classification des estuaires selon la propagation de la marée (Le Floch, 1961).

- Structure verticale de la salinité :

Les effets combinés de la marée et du débit fluvial à l'intérieur de l'estuaire conduisent à la génération d'une stratification de la densité. La variabilité de celle-ci sera largement dominée par les gradients de salinité. L'estuaire peut être alors classé ayant un biseau salé (Fig. 5), ou étant fortement stratifié, voire faiblement stratifié ou bien mélangé (Valle-Levinson, 2010).

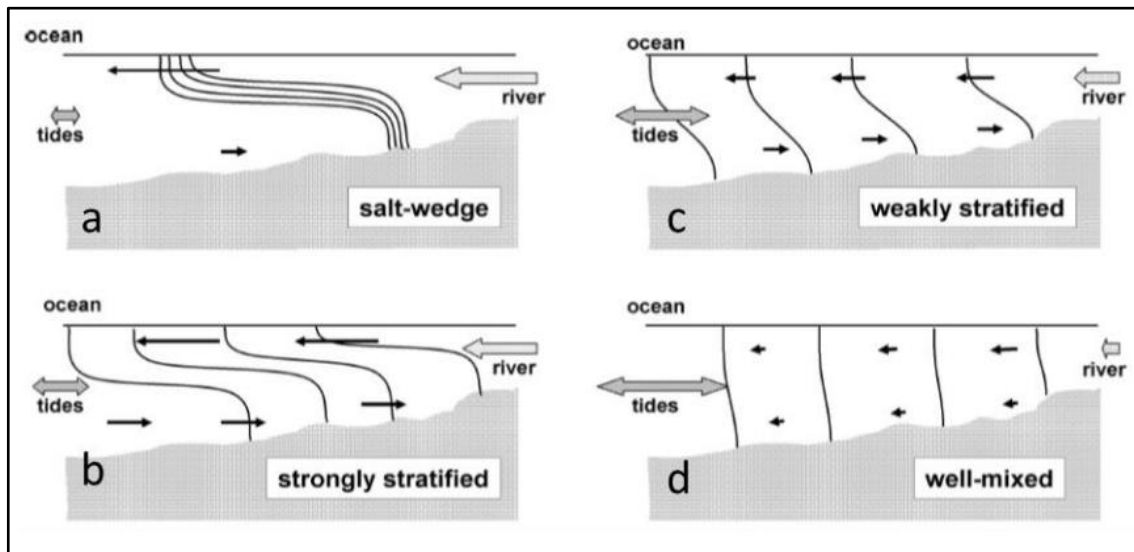


Figure 5 : Classification des estuaires basée sur le mélange des eaux (Valle-Levinson, 2010).

D'ailleurs, c'est la limite de la marée salée qui est retenue dans la définition de l'habitat, puisqu'elle explique la répartition des faunes et des flores saumâtres qui caractérisent l'estuaire.

- **Caractéristiques hydrodynamiques:**

La classification hydrodynamique dépend de la circulation et de la stratification : la première correspond au rapport entre le flux de surface et le flux moyen de la colonne d'eau douce - $U_f = Q/S$ - où Q est le débit de la rivière et S la section; le second, paramètre de la stratification, est le rapport de la différence de salinité entre le haut et le bas de l'eau ∂S par rapport à la salinité moyenne sur la section S_0 . Une forte circulation gravitationnelle est globalement reflétée par une valeur élevée du paramètre de circulation, et une faible valeur du paramètre de stratification signifie une faible stratification verticale de la colonne d'eau (Rockwell et Parker, 2014).

II. Flux de matières et d'énergie en zone estuarienne

Les marées et le débit du fleuve sont les principaux facteurs de la dynamique estuarienne, ces forçages impactent finement les flux de matières et d'énergie au niveau de l'estuaire.

II.1 Processus hydrodynamiques

II.1.1 La Marée

La marée provoque dans un estuaire un mouvement alternatif de la masse d'eau; son onde peut y déformée: elle perd de son énergie par frottement et donc son amplitude diminue (Deloffre, 2005); elle présente un profil asymétrique quand la hauteur d'eau diminue (Wang *et al.*, 2002) et par contre, elle peut augmenter de la hauteur d'eau, du fait de la concentration de l'énergie ondulatoire, à son passage dans des sections rétrécies (Dingemans, 1994).

Sur la base de l'amplitude de l'onde de marée à l'embouchure, les estuaires sont classés comme microtidaux (marnage moyen de 0-2 m), mésotidaux (2-4 m) et macrotidaux (> 4 m) (Davies, 1964).

Le forçage de la marée ne se limite pas à la propagation d'une vague à l'intérieur de l'estuaire, mais il induit également une variation de la salinité. Dans les estuaires mésotidaux, ce forçage est dominant et il est encore plus important dans les estuaires macrotidaux.

Parallèlement à la marée dynamique, la marée saline correspond à la pénétration des eaux marines salées dans le courant fluvial ; elle s'amortit dans les eaux douces provenant du drainage des sols du bassin versant.

II.1.2 Les courants

Le volume d'eau déplacé par la marée, à l'intérieur de l'estuaire, génère des courants. Ces derniers sont alternativement dirigés vers l'amont au moment du flot et vers l'aval au moment du jusant. Ainsi la pénétration de l'eau de mer pendant le flot refoule l'eau douce vers l'amont jusqu'au point à partir duquel on retrouve un courant fluvial dirigé vers l'aval. L'ampleur de cette marée dynamique dépend du marnage, de la pente du lit submergé, du débit fluvial, de la largeur et de la profondeur de l'estuaire.

II.1.3 Le vent et la houle

Le vent est au même titre que la marée et le débit du fleuve, il régit l'hydrodynamisme estuarien. Son influence reste minime excepté lors des épisodes de tempêtes durant lesquelles, il déplace les masses d'eau et provoque une surcote dont la localisation dépendra du sens du vent : Si ce dernier est vers la cote, la surcote se placera au niveau de l'embouchure alors que si le sens est vers le large, elle se situera en mer. Le vent génère la houle, les vagues pénètrent alors l'embouchure et se propage dans l'estuaire, elles y perdent l'énergie. Néanmoins, la houle reste un forçage hydrodynamique significatif dans la dynamique sédimentaire estuarienne (Le Hir *et al.*, 2000) particulièrement pendant les fortes tempêtes (Yang *et al.*, 2015).

Selon Guillou et Chapalain (2012), la houle est influencée aussi par la marée, lors du jusant, la houle est amplifiée par réfraction, ce phénomène entre en concurrence avec le phénomène de dissipation par frottement sur le fond. Il est à noter que le forçage du vent et des vagues est dominant dans les estuaires microtidaux.

II.1.4 Les eaux fluviales

Les eaux fluviales constituent un autre forçage hydrodynamique dans les estuaires dont l'influence diminue progressivement vers l'embouchure de l'estuaire. Le courant fluvial s'amortit dans un estuaire par diminution de la pente et il finit par s'annuler. Le régime hydrologique des fleuves dépend majoritairement de l'interaction du climat, de la végétation, du sol, de la structure géologique ainsi que de la taille et de la forme du bassin versant. Le volume d'eau douce que le fleuve apporte joue un rôle important dans l'hydrologie de l'estuaire dont les caractères changent suivant les périodes d'étiage ou de crue. Toutefois, les lâchers de barrage ou les événements météorologiques exceptionnels peuvent y entraîner des variations épisodiques du débit fluvial (Jay et Flinchem, 1997).

Ces processus hydrodynamiques sont différents en fonction de la zone d'action à l'intérieur de l'estuaire. Dalrymple *et al.*, (1992) ont schématiquement synthétisé les trois zones d'influence : marine, mixte et fluviale (Fig. 6) avec une diminution graduelle de l'influence marine au fur et à mesure que l'on s'approche de la partie amont de l'estuaire ainsi qu'une décroissance de l'énergie relative des rivières d'amont en aval.

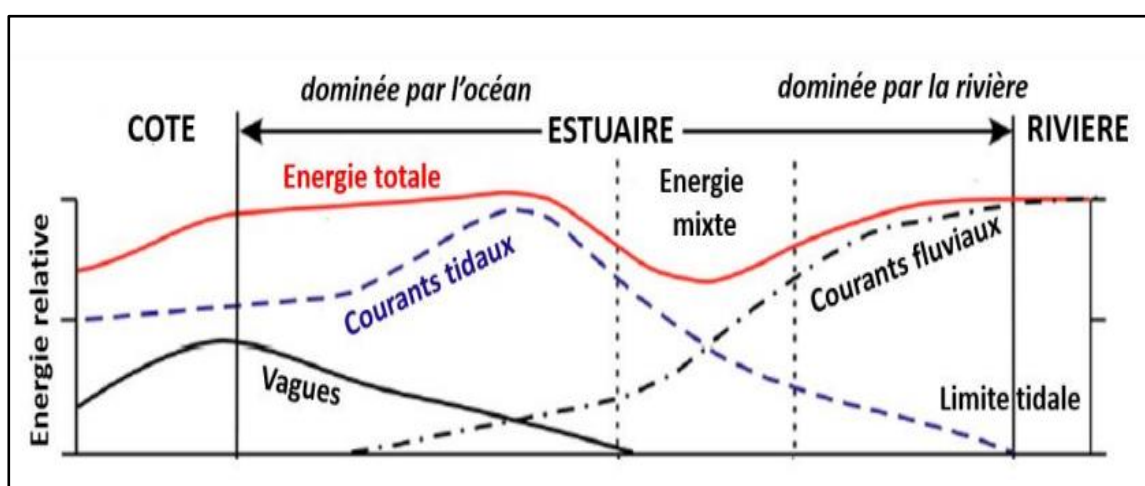


Figure 6 : Principaux processus physiques : Les vagues, les courants fluviaux et de marée au sein d'un estuaire (d'après Dalrymple et Choi 2007; modifié).

II.2 Fonctionnement hydro-sédimentaire

Tout système estuarien reçoit des sédiments d'origines marine et fluviale; de ce fait il est considéré comme une extension dans les terres de la limite des faciès tidaux et la limite vers le large des faciès côtiers de l'embouchure (d'après Dalrymple, 1992). Ce système côtier apparaît comme un milieu sédimentaire extrêmement varié. Les sédiments estuariens, bien que comportant localement des sables et des graviers, sont principalement formés de vase.

Les caractéristiques des sédiments sont donc la conséquence des processus continus de dépôt, d'érosion et de transport de matières au sein de l'estuaire (Dyer, 1995).

les eaux estuariennes sont caractérisées par une grande turbidité, très chargées en suspensions, formant une structure turbide majeure appelée bouchon vaseux qui semble exister dans la plupart des estuaires. Ce stock sédimentaire marqué par un maximum de turbidité, se forme suite à l'interaction des courants et des frottements induits par les courants sur le fond. Il est mobile et se déplace dans l'axe de l'estuaire avec la marée, dans le même sens qu'elle; sur un segment d'estuaire dont les limites varient pour chaque estuaire (Chamley, 1974). Une autre formation turbide appelée crème de vase ou «couche-crème» est présente au niveau de l'estuaire, elle constitue une lentille de boue liquide sur le fond des chenaux de marée (Allen *et al.*, 1970). La crème de vase ne se forme qu'en mortes eaux, quand les courants atténués et la durée accrue des étales favorisent le dépôt des sédiments fins. C'est un dépôt de vase fluide, qui constitue un état distinct et intermédiaire entre l'eau turbide et la vase consolidée (Kirby, 1988). Ces dépôts souvent associés à la présence du bouchon vaseux (Ross et Mehta, 1989).

La dynamique sédimentaire de l'estuaire est une conséquence : (i) du transport des sédiments en suspension provenant du bassin versant et de l'océan, (ii) des processus d'échange lit du fleuve - colonne d'eau et (iii) ceux d'érosion et de dépôt. De ce fait les estuaires peuvent être sectorisés en trois zones (Dalrymple *et al.*, 1992) : Une zone externe de haute énergie où les sédiments sont issus de la mer, une zone centrale de faible énergie, caractérisée par des sédiments fins et une zone interne, où la dynamique fluviale domine sans négliger les effets de marée. Cette zone est caractérisée par un transport des sédiments vers la mer (Fig. 7).

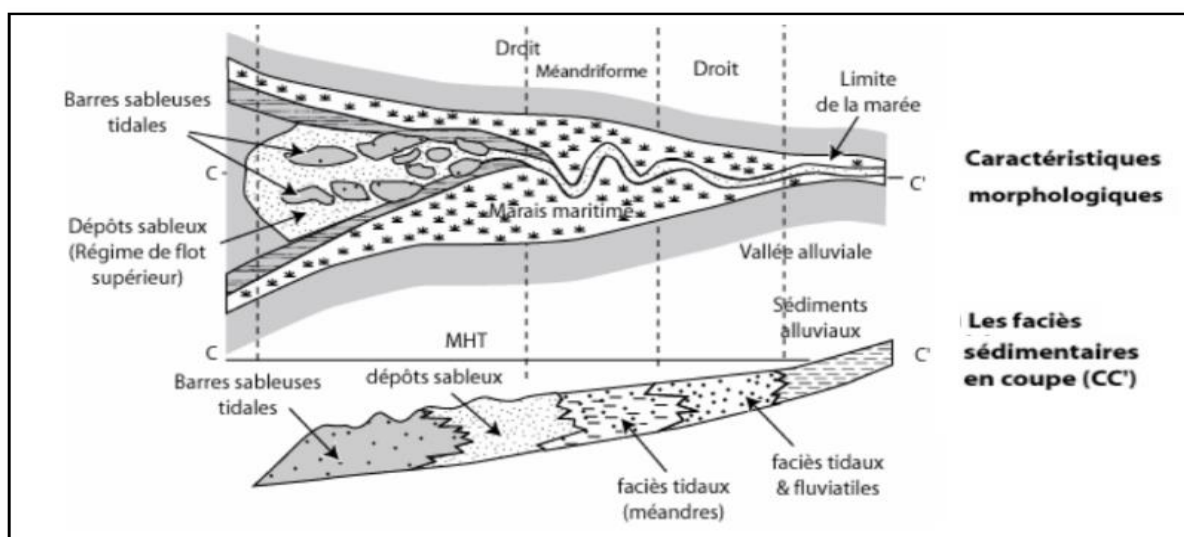


Figure 7 : Faciès sédimentaires d'un estuaire (Dalrymple *et al.*, 1992).

La répartition des sédiments au niveau de l'estuaire varie au cours du temps et dans l'espace, elle est dépendante des processus hydrodynamiques.

En raison de leur cadre hydrologique unique, les estuaires sont des écosystèmes très productifs, ils abritent des communautés vivantes typiques des milieux à salinité variable. En effet, ils comprennent des eaux saumâtres peu profondes, protégées, dynamiques et riches en nutriments, pour une flore et faune diversifiée.

III. Estuaire face aux effets du changement climatique et aux impacts anthropiques

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est "pratiquement certain" que les températures mondiales augmenteront au cours du 21^{ème} siècle, et le niveau moyen mondial de la mer devrait augmenter de 44 à 74 cm, en fonction des futures émissions de dioxyde de carbone (IPCC, 2013). Par conséquent, les modifications prévues du niveau de la mer et des débits fluviaux dues au changement climatique pourraient avoir des implications importantes sur le fonctionnement des environnements côtiers, entre autres les estuaires (Whitehead *et al.*, 2009). L'évaluation des impacts et des effets du changement climatique dans les estuaires est tout de même complexe puisque cela toucherait les aspects physiques, biologiques et écologiques. Plusieurs événements sont susceptibles d'engendrer des phénomènes d'inondation ou de débordement ; ils peuvent être de *type fluvial* suite à une crue ; impactant alors le niveau d'eau plus à l'amont de l'estuaire ; ou bien de *type maritime*, dans ce cas, ces événements sont le plus souvent attribués aux tempêtes engendrées par des phénomènes météorologiques et un fort coefficient de marée. Les surcotes impacteraient alors les niveaux d'eaux à l'aval ; voire des événements de *types fluvio-maritimes* qui sont liés à une concomitance d'un débit fluvial important et une tempête marine. Ces événements impacteraient tout l'estuaire.

Selon les prévisions du GIEC (IPCC, 2007) avec le réchauffement climatique, ces événements météo marins classiques vont gagner en intensités et en fréquence, et les impacts seraient considérables sur les environnements côtiers. Au niveau des estuaires, les effets vont se manifester surtout au niveau hydro-sédimentaire avec une modification du niveau marin et du régime des tempêtes en aval, et une évolution des apports liquides et solides en amont.

Une modélisation réalisée par une simulation de l'élévation du niveau de la mer combinée à de longues périodes d'étiage (sécheresse) montre que l'interaction de l'élévation du niveau de la mer avec les changements maximaux projetés du débit de la rivière au cours du 21^e siècle augmentera potentiellement la longueur de l'intrusion saline ; celle-ci devrait se déplacer progressivement vers les terres (Yang *et al.*, 2015 ; Prandle et Lane, 2015).

D'autres chercheurs ont démontré que si les conditions de sécheresse s'accroissent sur un bassin versant, elles entraîneront une diminution du débit des rivières et que l'estuaire est susceptible de devenir plus inondé à mesure que l'onde de marée se déplace vers la terre (Robins et Davies, 2010). En outre, l'élévation du niveau de la mer due au changement climatique et les modifications des surcotes marines dues aux tempêtes vont donc impacter directement la morphologie des estuaires. Elles entraîneront l'expansion de certains habitats marins et la diminution de l'étendue. De même de nombreux secteurs adjacents à l'estuaire présentent une topographie inférieure à la cote, d'où un risque potentiel de submersion, avec des effets sur les activités humaines, la faune et la flore. La conjugaison prévue de la hausse du niveau marin et de la baisse du débit des fleuves provoquerait aussi une remontée du bouchon vaseux et un faible transi sédimentaire vers l'aval va amputer le littoral d'un stock en sédiments susceptible de freiner l'érosion côtière .

Dans les zones estuariennes, les activités humaines sont très présentes et les polluants provenant du bassin versant composés des effluents domestiques, industriels et agricoles s'accumulent au niveau des estuaires provoquant alors l'eutrophisation voire l'anoxie (Kennish, 2002). De plus, l'installation des ouvrages comme des barrages, a modifié la nature des estuaires par l'élimination ou la réduction des apports terrigènes. Ces réservoirs piègent de plus en plus des sédiments, ce qui provoque un déficit sédimentaire à l'aval. Cette limitation des échanges amont-aval au niveau de l'estuaire favorise la prédominance des phénomènes hydrodynamiques d'origine marine. De même, les estuaires constituent des récepteurs de rejets des eaux résiduelles (industrielles et urbaines) qui n'ont cessé d'augmenter ces dernières années. En anticipant les impacts du changement climatique dans un milieu naturel soumis à de fortes contraintes anthropiques dans le cas de l'estuaire de la Loire, des chercheurs français ont mis en évidence d'importantes évolutions à prévoir dans les prochaines décennies en lien avec le changement climatique (Le Dez *et al.*, 2017). Aussi des chercheurs anglais ont résumé sur un graphe (Fig. 8) les principaux facteurs climatiques et impacts sur les estuaires du Royaume-Uni (Robins *et al.*, 2016).

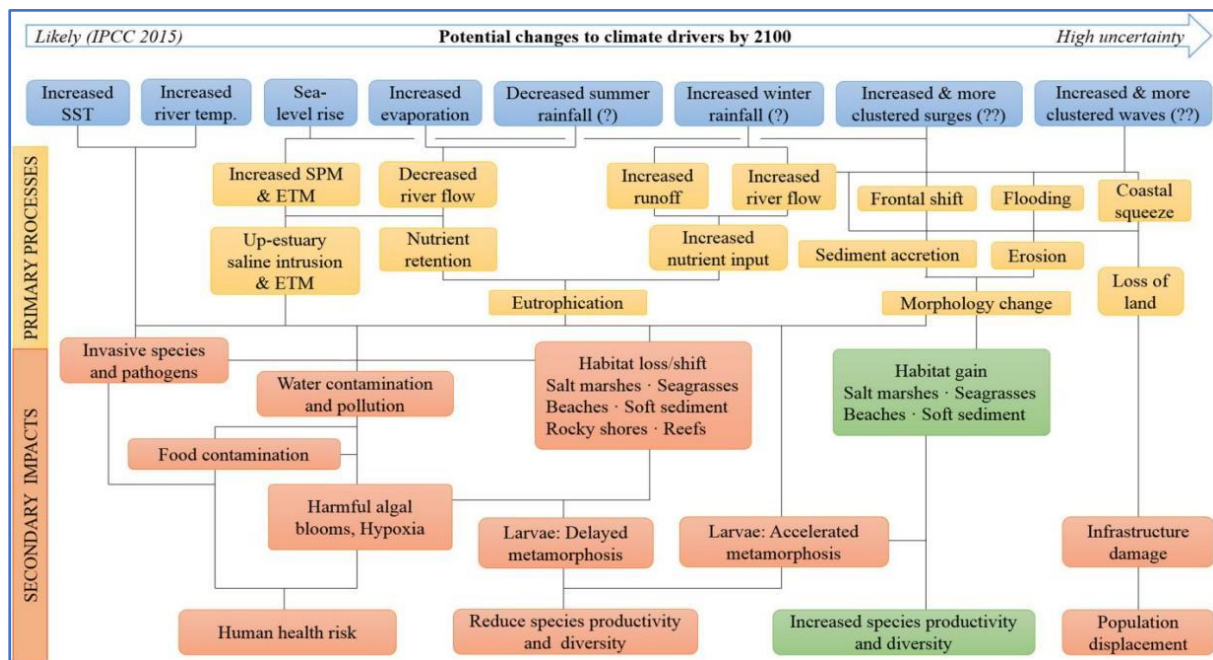


Figure 8 : Diagramme montrant les principaux facteurs climatiques et les impacts primaires et secondaires du changement climatique sur les estuaires : cas du Royaume-Uni (Robins *et al.*, 2016).

Conclusion

Le Maroc est pratiquement le plus riche en zones humides, de tous les pays nord africains, il possède de nombreux estuaires, et sur la plupart des principaux fleuves, des barrages y sont construits. Ces véritables prouesses techniques ont des fonctions variées, néanmoins, leur l'implantation s'accompagne d'une modification de la morphologie des berges des cours d'eau, des estuaires et des côtes en raison de la perturbation du transit sédimentaire vers la mer. Ainsi l'impact en aval des barrages est tout d'abord lié à la réduction des débits qui va donc impacter la capacité de transport du fleuve et aussi au déficit sédimentaire provoqué par l'installation de l'ouvrage.

Qu'en est-il de l'estuaire du Bouregreg ?

Compte tenu de la complexité des facteurs en jeu dans le bassin versant du Bouregreg, nous étudierons d'abord la variabilité hydroclimatique sur son bassin versant et tenterons d'analyser l'évolution passée des apports sédimentaires de l'oued pour dégager l'impact hydroclimatique et anthropique sur l'environnement côtier estuarien.

***CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE BASSIN
VERSANT ET ESTUAIRE DU BOUREGREG -RÉGION DE RABAT_
SALE-***

Introduction

Dans le cadre du projet CASBA, qui propose une approche spatialisée de l'impact des activités humaines sur les transports sédimentaires et les ressources en eau, l'oued Bouregreg a été choisi pour développer l'étude pluri-disciplinaire au Maroc. Le Bouregreg est l'un des principaux grands fleuves marocains par le débit et la taille, il présente la particularité d'être barré à 18 km de son embouchure par le grand barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah, de plus d'un milliard de m³, qui dessert les deux plus grandes agglomérations du Maroc Rabat, Salé et Casablanca pour un bassin de population de plus de 8 millions d'habitants. Cet ouvrage a modifié complètement l'hydrologie et la qualité des eaux de l'estuaire. Qu'en est-il pour les apports en sédiments vers la mer ? Avant de répondre à cette question, les caractéristiques du bassin du Bouregreg et de son estuaire influencent nettement la dynamique hydro-sédimentaire vers la mer ; ils seront présentés dans ce chapitre.

I. Caractéristique du bassin du Bouregreg

I.1 Situation géographique du bassin

Le bassin versant du Bouregreg est l'un des principaux bassins versants marocains, il a une superficie de l'ordre de 9700 km² (El Agbani, 1984). Il est limité au Nord par le bassin de Sebou, au Sud par celui d'Oum Er Rbia et au Sud-Ouest par les bassins des oueds côtiers (Cherrat, Nfifikh et Mellah), et s'ouvre vers l'Ouest sur l'océan Atlantique par l'estuaire du Bouregreg (Fig. 9).

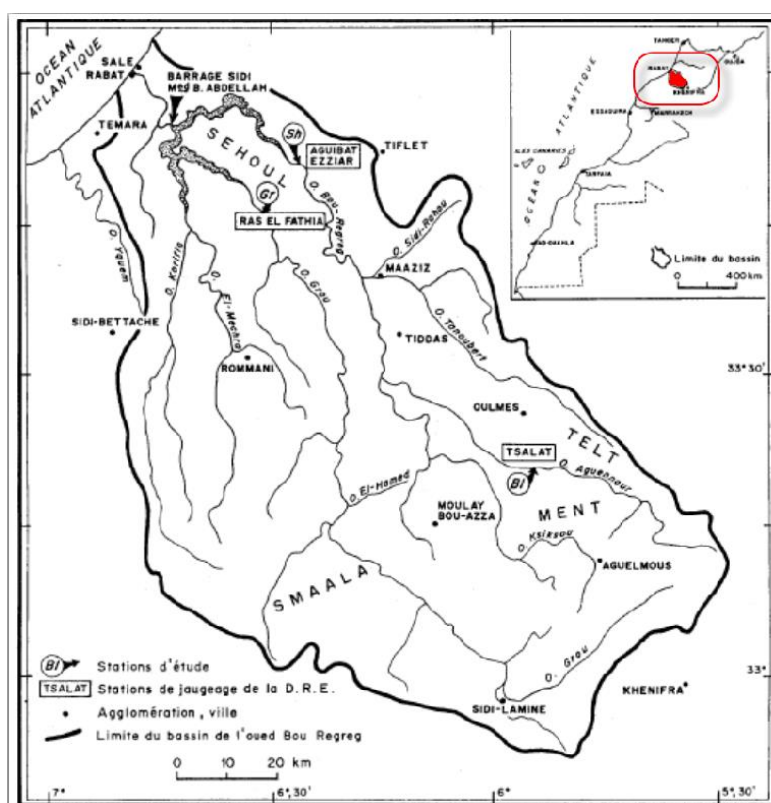


Figure 9 : Situation du bassin versant du Bouregreg (El Agbani *et al.*, 1992 ; modifié).

Le bassin du Bouregreg est compris entre les parallèles 32°50' et 34°30' N et entre les méridiens 5° et 7° W. D'un point de vue administratif, le bassin versant s'étend sur la Wilaya de Rabat-Salé et partiellement sur les provinces de Khémis et de Khénifra. Le lit de l'oued sépare deux préfectures, sur sa rive gauche, Rabat Hassan et El Youssoufia et sur sa rive droite.

I.2 Contexte géomorphologique

Le bassin versant se présente sous forme rectangulaire ayant une longueur de 184,2 km et une largeur de 19,2 km. Son altitude varie de 0 à 1727 m (point culminant de Jbel Mtourzgane) avec 50% de sa surface relevant une gamme d'altitude de 500 à 1000 mètres. Il est constitué dans sa majeure partie par des collines et des plateaux sous forme de plaines sillonnées par de profondes vallées. L'ensemble de ces structures s'abaisse progressivement vers le nord sous une pente moyenne de l'ordre de 0,60% et dépasse rarement 1% tout au long de son cours d'eau (selon le ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement). En 1969, Beudet a subdivisé le bassin du Bouregreg en quatre unités géomorphologiques majeures : le haut pays, la dépression orientale, le palier intermédiaire et le palier inférieur (Fig. 10).

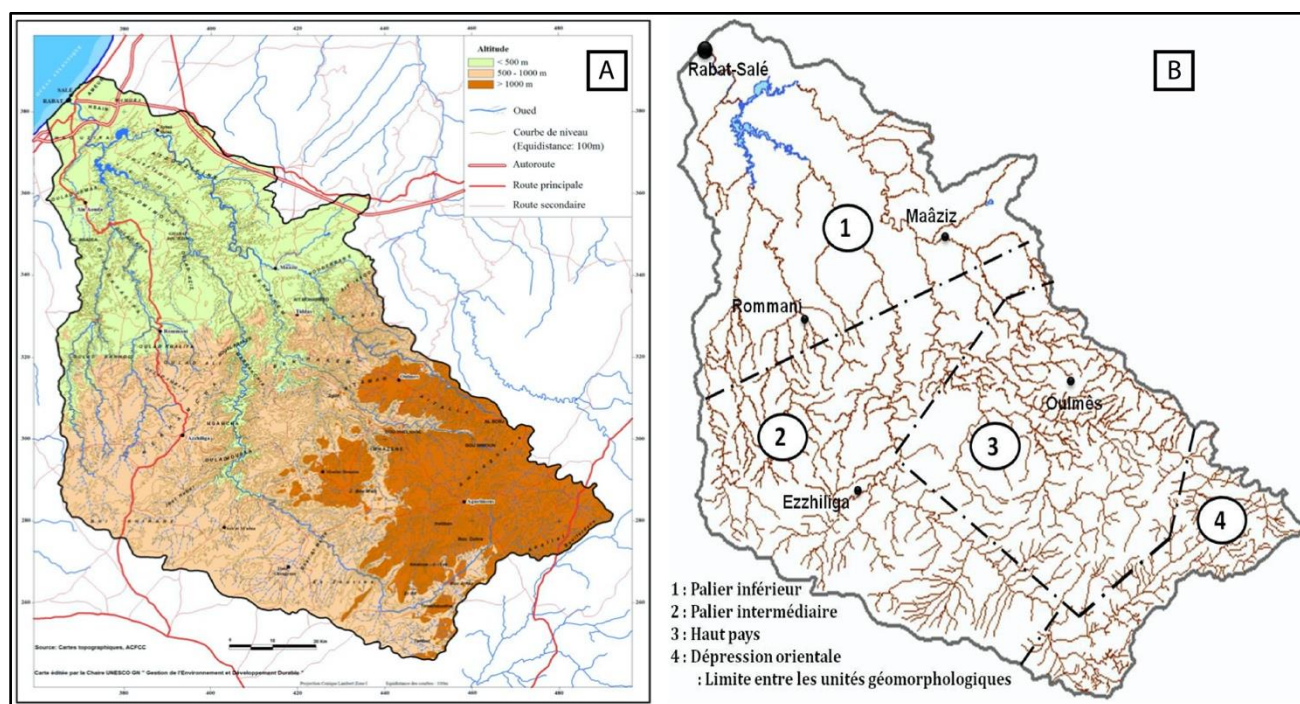


Figure 10 : (A)-Relief (Laouina et Mahé, 2013) et (B)-unités géomorphologiques de l'oued Bouregreg (Beudet, 1969).

Au Sud-Ouest, le haut pays est constitué d'une part par des crêtes culminantes (pente forte) à 1500 m, boisées et armées par endroits par des dalles de quartzites, et d'autre part par les hauts plateaux (pente moyenne à faible) situés à l'Ouest et au Nord avec des altitudes qui varient entre 1050 m et 1400 m dont le plateau d'Oulmès.

La dépression orientale s'étale au pied du moyen Atlas-occidental à l'Est et le haut pays à l'Ouest. Cette zone est caractérisée par une pente faible. Ces plaines sont dépourvues du couvert végétal car ses affleurements sont directement soumis à une forte érosion qui les stérilise (Beaudet, 1969). Le palier intermédiaire, d'une altitude qui varie entre 600 et 850 m est constitué de plateaux soulignés par des lignes de crêtes schisto-quartzitiques. Ses altitudes diminuent jusqu'au palier inférieur (600 m) où se regroupent les bas plateaux littoraux (Bensalah, 2008). D'une manière générale, le bassin comprend une partie nord-est, d'une superficie de 3210 km² qui correspond au bassin du Bouregreg proprement dit, et la partie sud-ouest, d'une superficie de 5760 km², correspondant au bassin de son principal affluent (rive gauche), l'oued Grou et ses deux affluents secondaires (Korifla et Akrech).

I.3 Cadre géologique

Le bassin du Bouregreg appartient dans son ensemble au Plateau central marocain, durant l'orogénèse hercynienne; ce massif a connu une succession d'événements géologiques (métamorphisme, plissements, etc) suivis d'une érosion majeure durant le Permien. Il y couvre plusieurs structures géologiques : (i) Dans la partie haute du bassin versant se trouve l'anticlinorium de Kasba Tadla-Azrou, (ii) la gouttière du synclinal de Fourhal, (iii) au niveau du centre du bassin versant du Bouregreg domine l'anticlinorium Khouribga-Oulmès, (iv) et le synclinal de Khémisset-Rommani. Au Secondaire, le bassin a été recouvert de formations ayant une origine sédimentaire représentées essentiellement par des argiles rouges salifères (Beaudet, 1969).

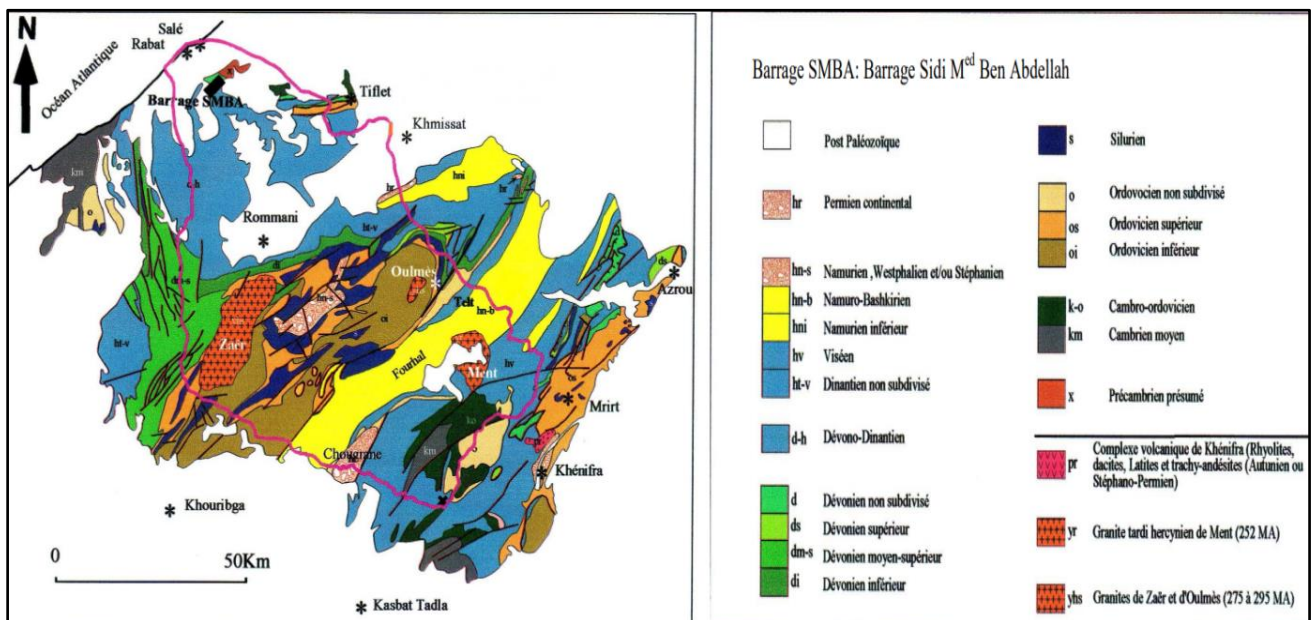


Figure 11 : Carte géologique simplifiée du bassin versant du Bouregreg (Bounouira, 2007).

Du fait de cette évolution paléogéographique, Le bassin du Bouregreg présente une large diversité lithologique avec une prédominance de formations schisteuses et gréseuses, avec en quelques endroits des granites et des calcaires en faible superficie. Ces formations répondent différemment à l'érosion hydrique, selon leur dureté, leur cohésion et leur porosité (Poncet, 1981). En raison de leur texture, les dépôts du Trias et des marnes de différents âges constituent des terrains très fragiles du bassin versant (Fig.11). Les formations les plus résistantes sont représentées par les grès, les calcaires et les quartzites.

Le climat du bassin versant Bouregreg est de type méditerranéen à influence océanique. Celle-ci diminue d'autant plus qu'on s'éloigne de la mer vers l'intérieur. La zone Est du bassin, est influencée par la présence du relief et notamment vers la région d'Oulmès et de Moulay Bouazza. Les pluies moyennes annuelles qui tombent dans le bassin varient de 450 mm au niveau de Rabat, au Nord-Ouest, pour atteindre près de 650 mm en zone de montagne au Sud-Est (Mohsine, 2009). Généralement, les pluies diminuent avec la latitude selon un gradient faible mais augmentent avec l'altitude instaurant un gradient positif en allant du Sud vers le Nord et de la côte vers les régions d'altitude à l'intérieur du pays (Fig. 12).

Figure 12 : Carte isohyète du bassin du Bouregreg (Ezzaouini, 2022).

La répartition annuelle des précipitations laisse apparaître le contraste pluviométrique des stations d'Oulmès et de Sidi Jabeur malgré leur forte proximité dans la partie sud du bassin (Mohsine, 2009). Le maximum des précipitations moyennes annuelles au niveau du bassin de Bouregreg, au cours de la période 1970 à 1995, est enregistré à Oulmès (1250 m), pour une moyenne interannuelle de 658 mm, tandis que le minimum, est enregistré à la station de Sidi Jabeur (195 m), est de 329 mm en moyenne (Fig. 13).

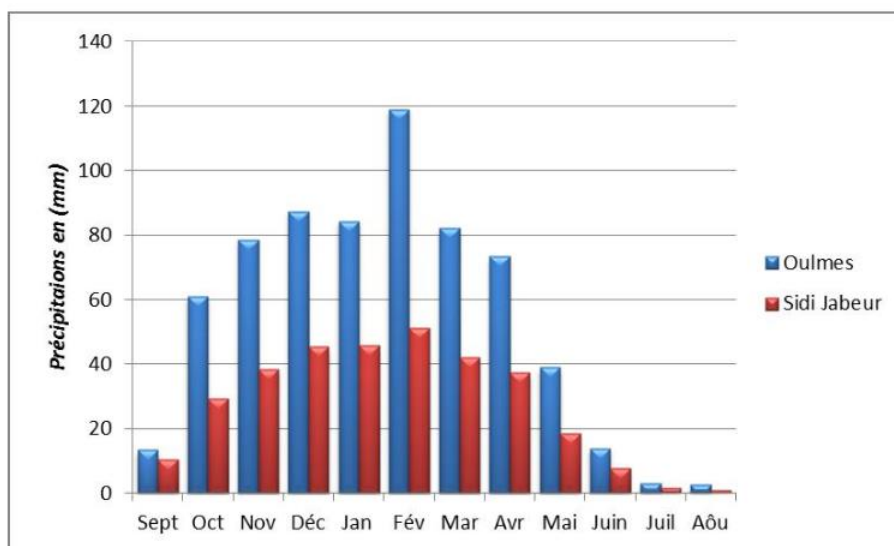


Figure 13 : Répartition de la pluviométrie moyenne aux stations d'Oulmès et de Sidi Jabeur (1970-1995) (Mohsine, 2009).

Le bassin se caractérise par une saison pluvieuse s'étendant d'Octobre à Avril, pendant laquelle la quasi-totalité des épisodes pluvieux sont observés et produisent une pluviométrie cumulée de l'ordre de 90% de la pluviométrie annuelle. La saison sèche quant à elle s'étend du mois de Mai à Septembre et se distingue par la rareté des pluies qui ne dépassent guère 10 % de la pluie annuelle (Ezzaouini, 2022).

Les températures moyennes dans la zone sont clémentes près de l'atlantique et en zone de montagne et varient entre 15 à 25°C (Khomsi, 2014). Elles sont fortement influencées par les courants chauds en période sèches, notamment à l'intérieur de la zone où la température maximale peut atteindre 40°C pendant l'été (Juillet-Août). Les températures moyennes maximales au cours de ces deux mois varient entre 30 et 34°C dans le haut Bouregreg et entre 26 et 28 °C dans la zone côtière. Selon ce même auteur, les valeurs moyennes enregistrées de l'évaporation dans la zone oscillent entre 1 500 mm/an au niveau de la côte de Rabat et 1 600 mm/an au niveau du Haut Bouregreg.

I.5 Sol et couvert végétal

Le bassin versant du Bouregreg présente une diversité des sols; trois types de sols dominant sur ce territoire (Laouina et Mahe, 2013): (i) le faciès pédologique à sols peu évolués d'érosion qui est le plus dominant avec un couvert végétal dégradé; il est particulier aux terrains en pente, (ii) les sols fersiallitiques bien développés au niveau des plateaux littoraux, des bas plateaux Zaër et Zemmour et les terrains granitiques et grésos-schisteux en montagne et (iii) des sols bruns forestiers.

Les conditions pédoclimatiques du bassin du Bouregreg façonnent une végétation majoritairement sclérophylle (Fig. 14), il fait partie des espaces pastoraux favorables de tout le Maroc avec une prédominance d'une céréaliculture pluviale.

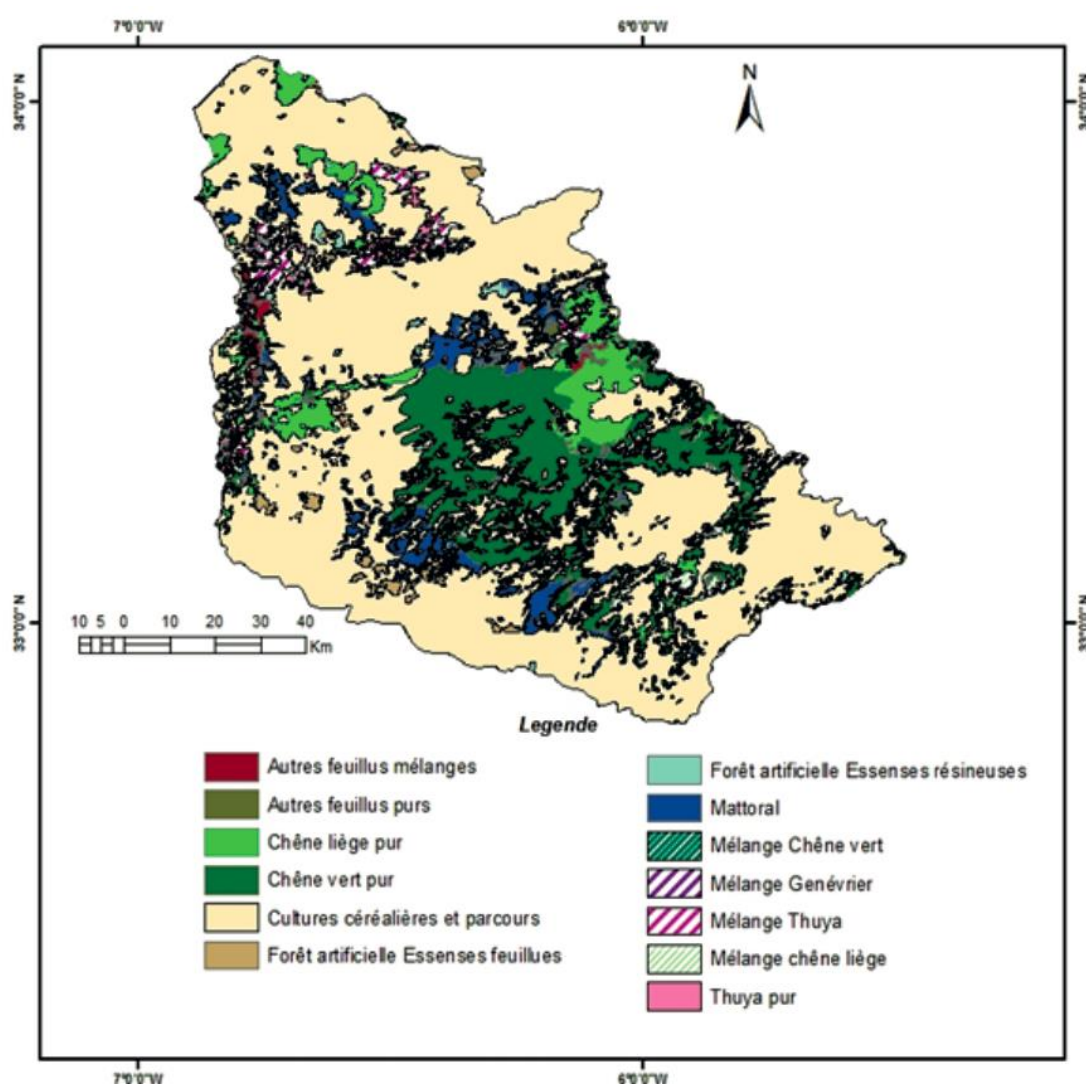


Figure 14 : Principaux types de végétation du bassin du Bouregreg.
(Source : CERGEO, in Tra Bi *et al.*, 2013).

I.6 Réseau hydrographique et ressources en eaux

I.6.1 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du bassin s'articule autour de deux principales rivières, l'oued Bouregreg et l'oued Grou, qui drainent respectivement une superficie de 4000 km² et de 3600 km² (Fig. 15). En plus de ces deux cours d'eau majeurs, s'ajoutent l'oued Korifla de 1900 km² et l'oued Akrech de 150 km², deux affluents de l'oued Grou (Cherkaoui, 2006). L'ensemble forme un réseau développé.

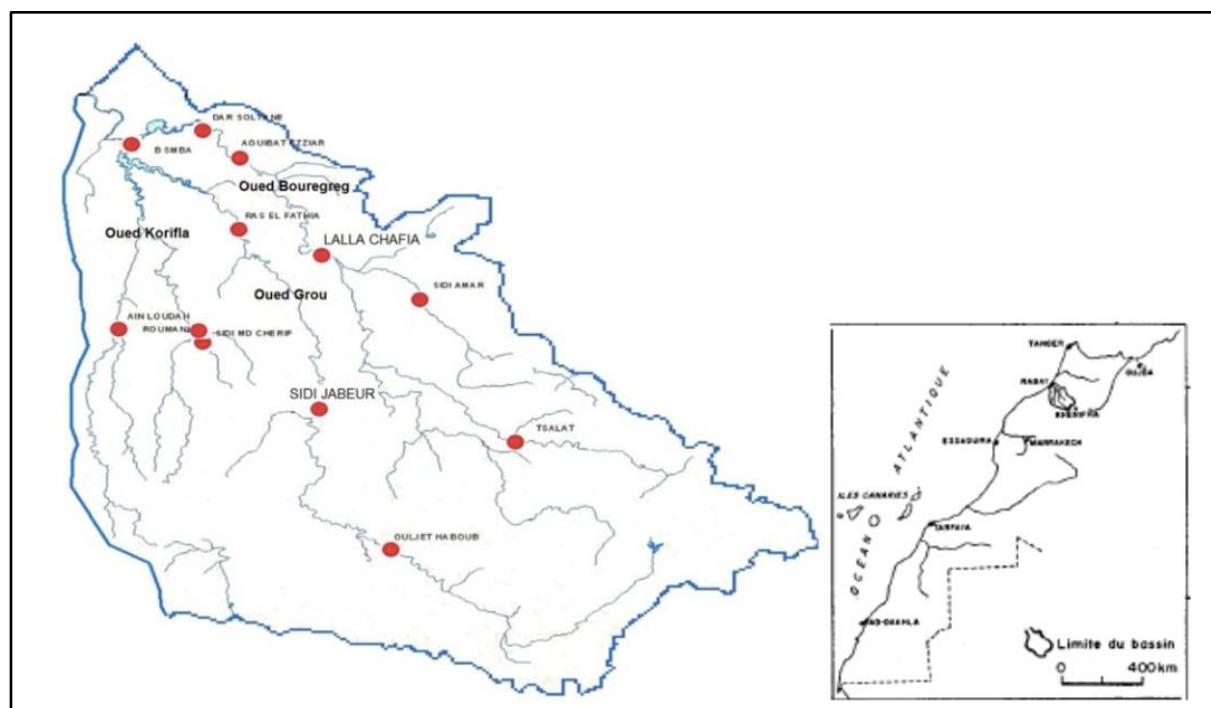


Figure 15 : Localisation des principaux cours d'eau du bassin Bouregreg (Laouina et Mahé, 2013).

Le Bouregreg prend sa naissance dans le massif du Moyen Atlas à l'altitude de 1 627 mètres au niveau du Jebel Mtourzgane et de Grou (Beaudet, 1969), et se jette dans l'océan Atlantique à l'embouchure séparant les villes de Salé au nord et Rabat au sud, après avoir cheminé vers le littoral atlantique à travers la Meseta côtière selon une direction moyenne NW-SE (Bounouira, 2007). Son chenal suit une direction globale rectiligne orientée SE-NW et s'étend sur une longueur de 240 Km. Son débit moyen s'élève à 23 m³/s mais peut atteindre 1 500 m³/s en période de crue (SIGMED, 2010). Il reçoit, le long de son parcours près de Ras Ennouala à 25 km de l'océan atlantique, l'oued Grou, et à 18 km de l'aval de sa confluence l'oued Akrech caractérisé par un régime variable et un débit très faible (Cherkaoui, 2006).

I.6.2 Ressources en eaux

Les ressources en eaux du bassin du Bouregreg dépendent étroitement du régime pluviométrique. Néanmoins, ce dernier montre une forte variabilité saisonnière et annuelle. Le potentiel annuel est estimé à 720 Mm^3 issus des eaux de surface ; et pour peu, des eaux souterraines (Laouina et Mahe, 2013). Celles-ci se localisent dans les aquifères plio-Quaternaires du bas plateau littoral avec les nappes de la Mamora, des Sehoui et de Témara. Toutefois il faut noter que le contexte hydrogéologique est défavorable vu la dominance de formations géologiques imperméables d'où ce de potentielles nappes d'eau souterraines quasi absentes. La totalité des eaux du bassin du Bouregreg est retenue par le barrage de SMBA ; celui-ci régularise 245 Mm^3 dont 80 pour l'agglomération de Rabat-Salé selon ABHBC.

I.6.3 Barrage Sidi Mohammed Ben Abdallah

Depuis 1974, le cours de la rivière du Bouregreg a été modifié par le Barrage SMBA. A 18 km de l'embouchure, cet ouvrage constitue le principal dispositif existant en matière de mobilisation des eaux de surface du bassin. Il est alimenté par les oueds : Bouregreg, Grou et Korifla (Fig. 16). Il assure l'alimentation en eau potable de toute la région de Rabat, Salé et Casablanca. Le barrage était d'une hauteur de 97,5 m, elle est ensuite passée à 105 m; sa capacité en eau a varié de 446 millions de m^3 à 1025 millions de m^3 en 2006. Le but de cette surélévation est d'anticiper l'évolution des besoins en eau potable et industrielle et aussi de protéger le projet du Bouregreg contre les inondations selon l'ABHBC.

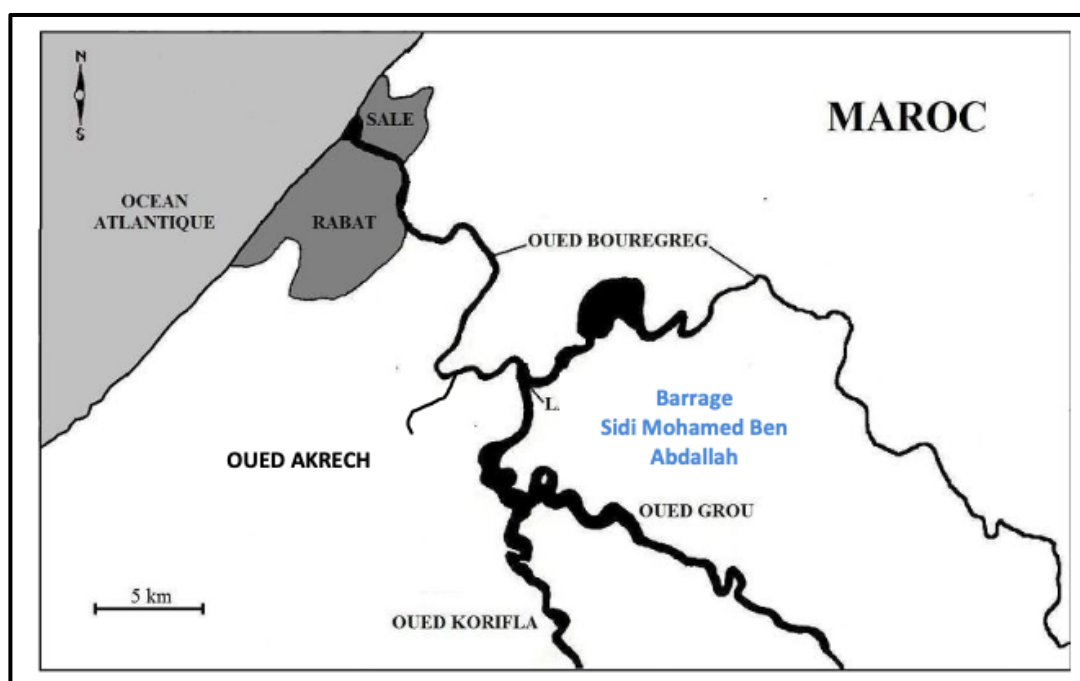


Figure 16 : Barrage Sidi Mohammed Ben Abdallah et les principaux oueds (SIGMED, 2010).

Comme tous les barrages situés en Afrique du Nord, le barrage SMBA connaît d'énormes problèmes d'envasement, il était estimé de 2,5 Mm³/an par Lahlou en 1986, de 1,08 Mm³ / an par Rahdou en 2010. Le bassin contient également Sept barrages collinaires : Aird, Ait Lamrabtia,

II. Estuaire du Bouregreg

II.1 Situation

Les 23 derniers kilomètres de cours inférieur du Bouregreg constituent son estuaire, situé sur l'Atlantique entre les deux villes Rabat et Salé à 34° nord et 6°50' ouest. Il est orienté généralement SE-NW sauf au niveau du secteur allant du kilomètre 13.5 au confluent de l'oued Akrech où il adopte une direction SW-NE. En amont et jusqu'à l'oued Akrech (18 km), l'estuaire présente un aspect de vallée encaissée bordée de hauts plateaux. En aval du point kilométrique 14,5 (Les deux îles), l'encaissement disparaît et l'estuaire traverse une plaine alluviale dans laquelle il décrit de nombreux méandres qui disparaît au profit des aménagements des deux rives. Près de l'embouchure, les deux plages sableuses de Rabat et de Salé bordent, de part et d'autre, la partie terminale de l'estuaire (Fig. 17).

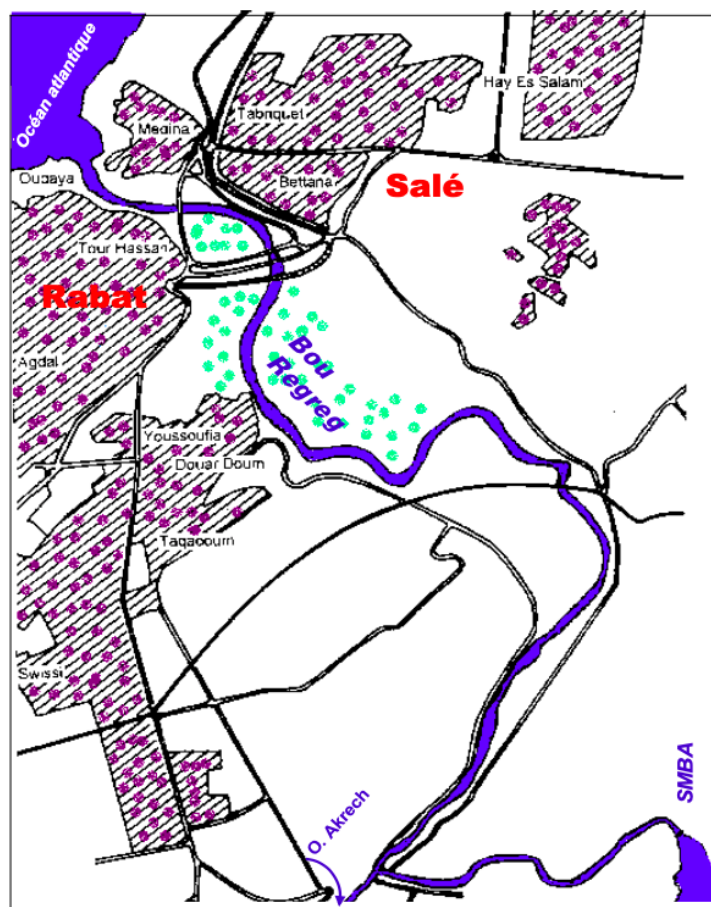


Figure 17 : Représentation générale de l'estuaire du Bouregreg (Cherkaoui, 2006).

II.2 Contexte géologique

L'estuaire du Bouregreg est situé dans la méseta côtière. Celle-ci est caractérisée par des plaines et des plateaux où l'altitude décroît au fur et à mesure que l'on s'approche de l'océan Atlantique. Les terrains où se trouve le lit de l'Oued Bouregreg sont formés essentiellement de séries paléozoïques. La nature lithologique de roches est dominée par des schistes primaires avec des affleurements de granites et des roches éruptives : les syénites du Bouregreg. Les schistes sont localement injectés de filons doléritiques souvent minéralisés et présentent par endroit des intercallements de quartzites et de grès. Les calcaires (marbres de l'oued Akrech) sont exploités au niveau de la confluence avec l'oued Bouregreg (ouverture des carrières vers 1920). Une couverture sédimentaire repose par endroit sur les terrains paléozoïques et se présente sous forme d'un complexe détritique argilo-gypsifère (permo-trias), basaltiques ou marneux à macro calcaires du Miocène et du Pliocène (Beaudet, 1969) (Fig. 18).

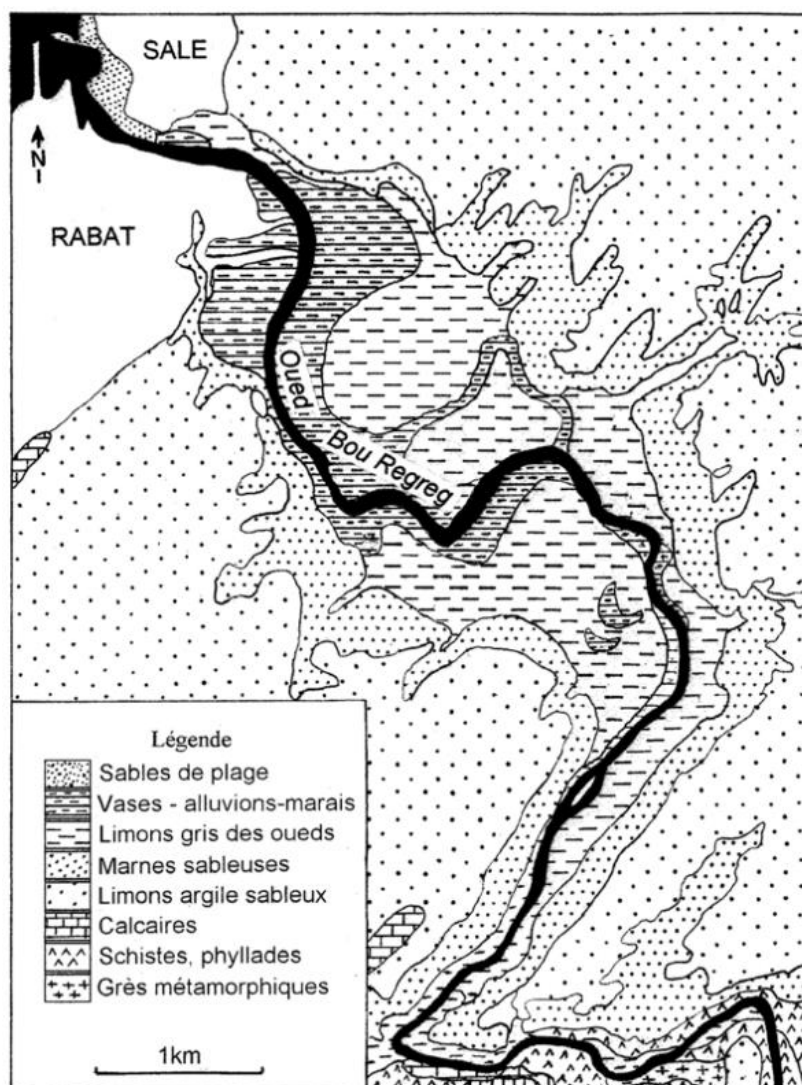


Figure 18 : Représentation de la structure géologique de l'estuaire du Bouregreg (Gillet, 1986).

D'après les coupes géologiques (Fig. 19), les deux rives de l'oued Bouregreg montrent une différence du point de vue formation géologique. La rive droite est formée d'une série de couches stratifiées composées de limons rouges, couches argileuses, couches fluvio-marines et importantes marnes.

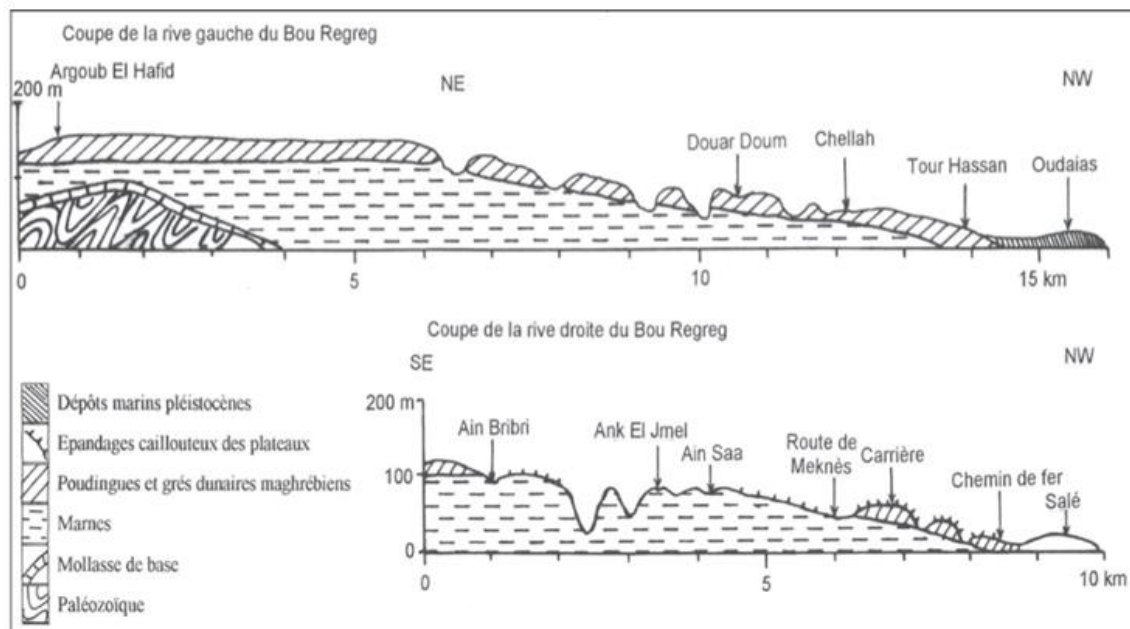


Figure 19 : Coupes géologiques des deux rives de l'estuaire du Bou Regreg (Beaudet, 1969).

Au niveau de la rive gauche, il y a des couches fluviométriques avec des grès dunaires qui portent un sable argileux rouge. Au Nord-Ouest de Douar Doum, la corniche de grès maghrébins, surmontée de sable rouge, se poursuit jusqu'à Chellah et Tour Hassan. Au-delà, le grès est raviné par un « bouding » fluvio-marin supportant des grès feuilletés (Beaudet, 1969).

II.3 Climat

La région de Rabat-Salé est caractérisée par une répartition irrégulière des pluies intra et inter-annuelles avec des fluctuations allant de 370 mm à 800 mm/ an. Un quotient pluviométrique de 85,6 donne à la région un bioclimat de type méditerranéen subhumide inférieur à la variante thermique chaude. Les variations saisonnières sont très importantes, avec une période sèche estivo-automnale et même démarrant à la fin du printemps jusqu'à la mi-automne et s'étalant sur 5 mois en moyenne selon la Direction de la Météorologie (DMN). Les températures moyennes sont de l'ordre de 12°C pour les mois les plus froids (Décembre - Janvier) et de 22°C pour les mois les plus chauds (Juillet-Septembre). Quant aux vent, le climat annuel se caractérise par la prédominance de ceux du secteur Ouest en été (56%), les vents du secteur Est sont fréquents pour 25 % du temps lors du régime hivernal, et les plus calmes sont fréquents pour 19% du temps (SOGREAH, 2011).

II.4 Hydrodynamisme fluvial et marin

L'oued Bouregreg est un fleuve d'importance moyenne avec un débit annuel de l'ordre de 7,10 m³/s calculé avant la construction du barrage. Pour les années « très humides », le débit moyen peut atteindre 15,3 m³/s (1963-1964) voire même 242 m³/s pour les années (1968-1969). Durant les années sèches (absence de crues), le débit varie entre 3,3 m³/s (1966-1969) et 8,8 m³/s (1964-1965) (Elkaïm, 1972). Cependant, après la construction du barrage en 1974, le débit du Bouregreg vers l'aval est devenu presque nul. L'évolution de l'écosystème a été globale, touchant les masses d'eau, le système benthique et la qualité des eaux estuariennes (Cherkaoui *et al.*, 2003).

Les sources des apports d'eaux douces sont particulièrement les restitutions du barrage, les apports de l'oued Akrech (sont devenus très faibles après la construction de la digue) et les apports de la partie du bassin versant située entre le barrage et l'embouchure, sans oublier l'apport des eaux usées (Cherkaoui, 2006).

L'estuaire du Bouregreg est soumis à un régime de marée semi-diurne dont le niveau le plus élevé de pleine mer est de 3,80 m pour la haute mer et de 0,5 m pour la basse mer. Le niveau moyen à Rabat est à + 2,17 m au-dessus du Zéro hydrographique (Gillet, 1986), qui reste peu différent de celui enregistré par Elkaïm (1974) en février (maximum de 3,9 m en pleine mer et de 0,4 m en basse mer). Le retard de la progression de l'onde de marée, selon Ezzouaq (1990) peut être chiffré à 37 minutes au niveau du pont Fida, à une heure à Takkadoun et une heure 30 minutes aux deux îles. La vitesse de propagation de marée le long de l'oued diminue de l'aval vers l'amont, par exemple pour une marée de trois mètres, elle est de 2,5 m/s au niveau du pont de Méknes, 2 m/s aux deux îles et de 1,50 m/s (pont d'Akrech) (Elkaïm, 1977). Les courbes marégraphiques tracées par Mayif (1987) pour différents coefficients de marée, révèlent l'existence de deux zones avec des comportements hydrographiques différents, de part et d'autre d'un seuil situé à 14 km de l'océan. Les vitesses maximales enregistrées au niveau de l'estuaire montrent une variation pour les périodes de vives eaux que pour les périodes de mortes eaux. Cette vitesse ne dépasse pas 0,5 m/s en mortes eaux et dépasse 1 m/s en vives eaux (RED, 1990). Quant à la houle, elle est freinée par les digues excepté lors de fortes houles qui en présence d'une surcote où les vagues peuvent pénétrer l'estuaire.

II.5 Caractéristiques sédimentologiques

Dans le cadre du projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg, une étude hydraulique réalisée au niveau de l'embouchure en avril 2002 par le CID révèle que le lit de l'oued est comblé par des dépôts alluviaux quaternaires (argiles et vases, limons sableux, des sables grossiers). Alors que dans la région qui s'étend du port à l'embouchure présentait un envasement avant la construction du barrage, et que celui-ci, risque d'enrayer ce processus (*in* Banque Mondiale, 2011).

Ce phénomène a été soulevé aussi par Elkaïm (1972), expliquant que la diminution de la fraction vaseuse peut être expliquée soit par l'arrêt de l'arrivée d'eau douce chargée de particules fines ou par les lâchers du barrage, susceptibles de les enlever. Le substrat meuble de l'estuaire a subi un changement suite aux travaux de dragage du chenal qui ont eu lieu 2006 afin d'assurer une meilleure navigabilité du fleuve. En outre, l'embouchure est limitée par des digues qui amortissent la houle et limite l'ensablement.

II.6 Biodiversité

Bien que l'estuaire ait subi des perturbations et des dégradations très profondes qui ont abouti à une régression de la quasi-totalité d'éléments remarquables de la biodiversité sur des étendues immenses qui étaient, jadis, soumises aux effets directs ou encore indirects des marées. Plusieurs secteurs bioécologiques depuis l'embouchure jusqu'au barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah se sont succédés et l'évolution à long terme montre que cet estuaire a subi une diminution de 50% de sa richesse biologique, que ce soit la flore (phanérogames et algues) ou la faune aquatique et estuarienne (avifaune sauvage sédentaire et migratrice, amphibiens et faune ichtyologique), particulièrement depuis la construction du barrage. D'ailleurs vu son originalité et ses spécificités biologiques, le Plan directeur des aires protégées (PDAP), établi au Maroc en 1996, avait classé le Bouregreg en un site d'intérêt biologique et écologique (SIBE) (Mouloudi, 2015).

En effet, les zones humides naturelles de la vallée ont quasiment disparu, ne sont présentés qu'une sansouire intertidale, plus ou moins étroite selon les endroits, sur la rive gauche en amont du pont My Hassan (Fig. 20), une zone de marais très localisée (Marais du Bouregreg), ainsi qu'une mare d'eau douce plus ou moins temporaire plus en amont (Daya de Takaddoum).

Daya de Takaddoum abrite des populations nicheuses d'oiseaux d'au moins six espèces d'intérêt patrimonial mondial ou national. Elle joue un rôle important pour 50 espèces d'oiseaux aquatiques (Hilmi *et al.*, 2020). Malgré son importance, la daya de Takaddoum subit une dégradation rapide et se trouve menacée de disparition.

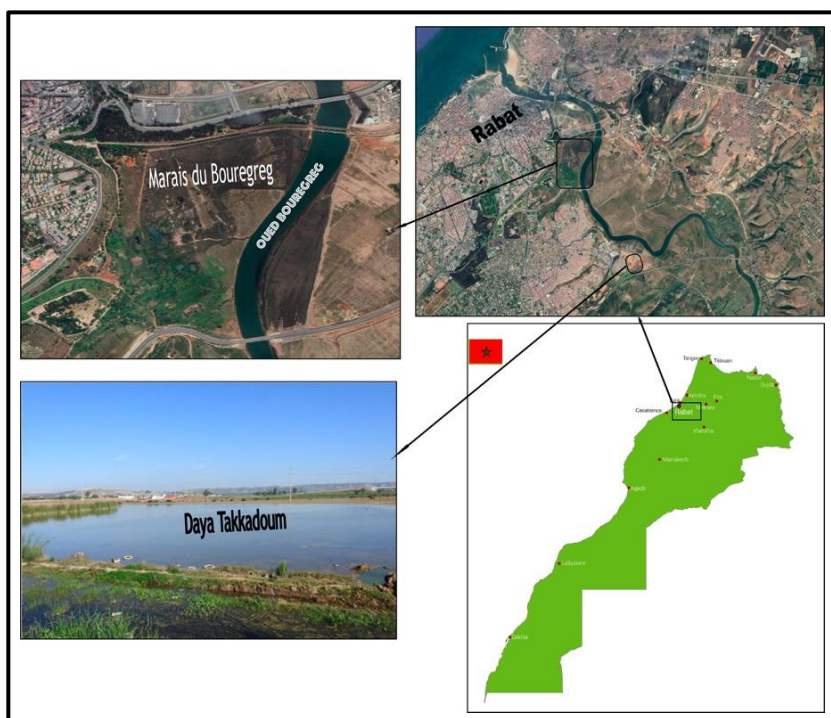


Figure 20 : Localisation sur une image satellite des zones humides présentes actuellement dans la vallée du Bouregreg.

II.7 Aménagements

Depuis le choix de Rabat comme capitale du Maroc en 1912, l'extension urbaine s'est basée sur la centralité des fronts d'eau dans les politiques d'aménagement. Elle s'est développée essentiellement au niveau de cette ville sur la rive gauche du Bouregreg, au détriment de Salé, sur la rive droite, qui ne verra son extension démarrer qu'à partir des années 50 (Fig. 21). Le développement urbain s'est fait vers le sud-Ouest et le Sud, à Rabat, et vers l'Est et le Nord-Est à Salé, avec une tendance à contourner la vallée du Bouregreg, (Alillouch *et al.*, 2019).

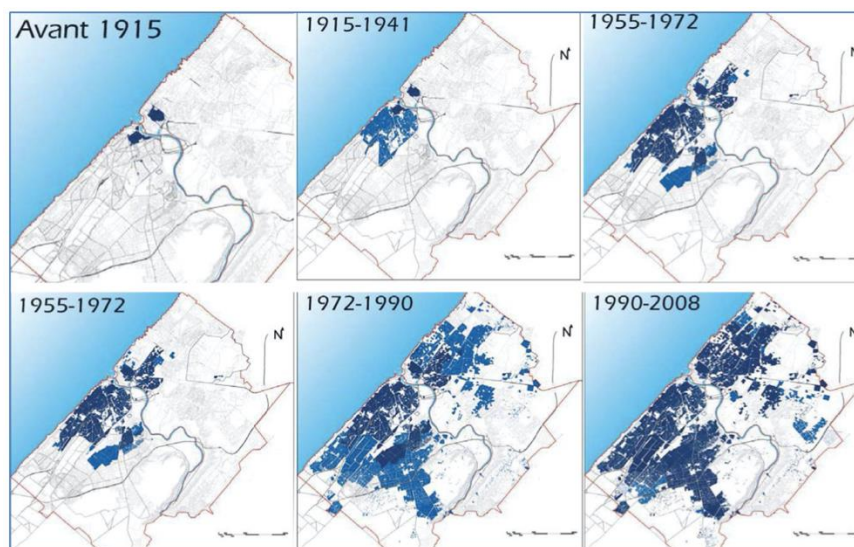


Figure 21 : Évolution de l'urbanisation de Rabat -Salé de part et d'autre de l'estuaire du Bouregreg (Plan d'Aménagement unifié de Rabat, 2009).

Entre 1924 et 1926, deux grandes digues sont construites aux deux limites de l’embouchure du Bouregreg pour atténuer l’impact de la houle (Fig. 22 a et b). Deux autres plus basses étaient destinées à canaliser le chenal dans la zone où il changeait de cours mais la plus au Sud a complètement été ensevelie par le sable et reconstruite entièrement sur une longueur de 350 m. La jetée intérieure Nord actuelle bordant la plage de Salé est réaménagée et renforcée. En outre, entre l’embouchure du fleuve Bouregreg et le barrage SMBA, la vallée Bouregreg qui s’étend sur une superficie de 5750 hectares sur une profondeur de 15 Km, a fait l’objet d’un méga projet qui repose sur divers aménagements hydrauliques et portuaires (Fig. 22 C).

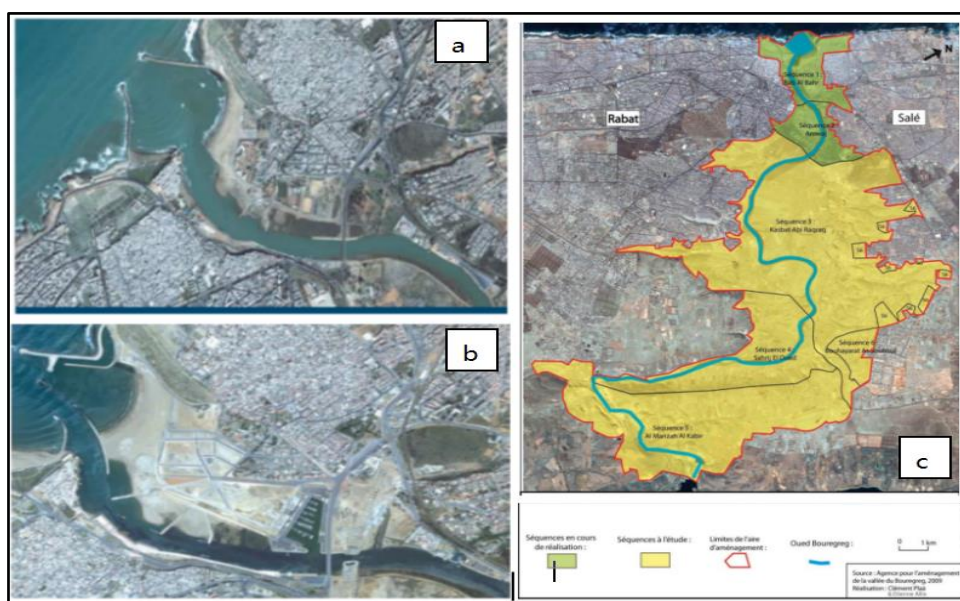


Figure 22 : Vues satellites de l’estuaire en 2006 (a) et en 2009 (b), Zone d’aménagement du projet de la vallée du Bouregreg (in Banque Mondiale, 2011).

III. Activités socio-économiques

III.1 Population

La répartition de la population dans le bassin versant de Bouregreg est influencée par les caractéristiques géomorphologiques, selon le recensement général de la population et de l’habitat de 2014, environ 2,02 millions d’habitants avec 49% de la population totale vit dans le milieu urbain et 51% dans le milieu rural (Ezzaouini, 2022). Les données des deux derniers recensements révèlent des communes en pleine expansion, en cours de dépeuplement ou encore stagnantes (Fig. 23) : 26 communes ont stagné avec un taux d’accroissement annuel moyen de 0% à 1% ; 27 ont régressé avec un taux annuel moyen négatif ; et 17 sont en expansion avec un taux d’accroissement annuel moyen supérieur à 2% (Ezzaouini, 2022).

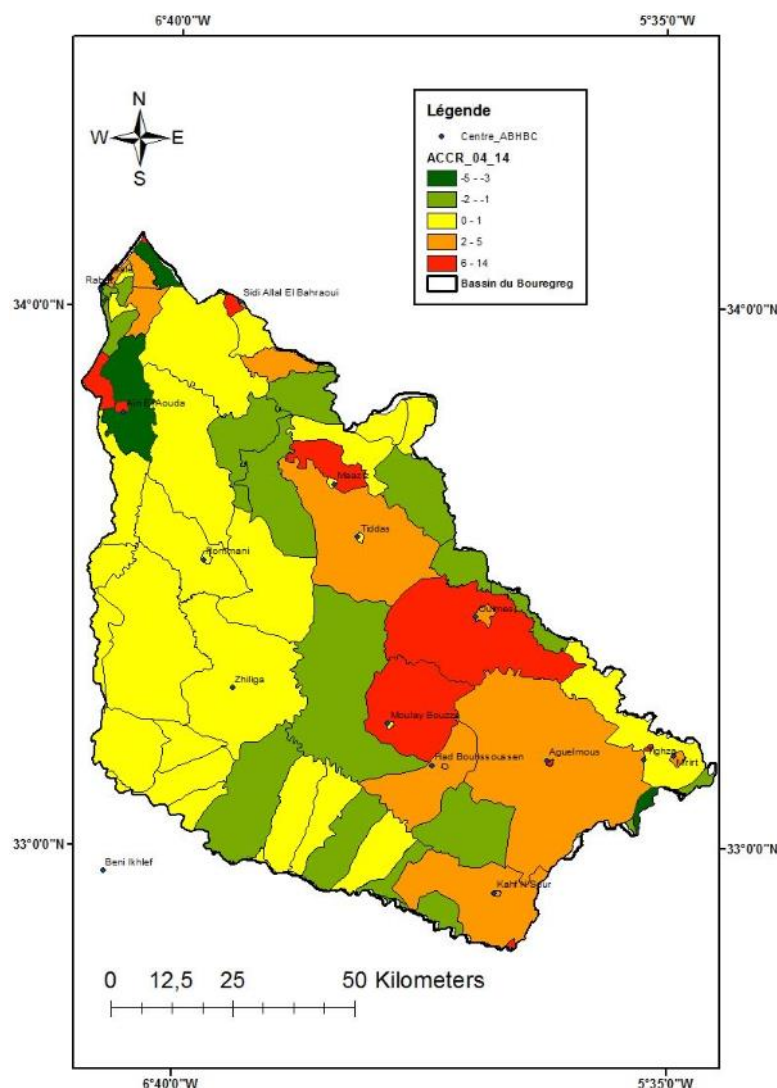


Figure 23 : Accroissement de la population sur le bassin du Bouregreg entre 2004 et 2014 (Ezzaouini, 2022).

Dans la zone d'étude il apparaît que la population se trouve plus concentrée dans la préfecture de Salé que celle de Rabat (Tableau 1). Ces deux entités territoriales, Rabat et Salé, se distinguent, en 2019, dans toute la région de Rabat-Sale-Kenitra par un niveau d'urbanisation, relativement très élevé, respectivement, de 100% et 93% (Monographie Régionale, 2019). Pour le rythme de croissance de la population, la préfecture de Salé a affiché un taux de croissance des plus élevés entre 2014 et 2019 et la population urbaine de Rabat, la préfecture la plus urbanisée, a, par contre, régressé avec un rythme de 1,2% (Monographie Régionale, 2019).

Tableau 1 : Population de Rabat et Sale 2014 -2019 (Monographie régionale, 2019).

Province ou préfecture	Population en 2014		Population en 2019		TAAM (%)
	Effectifs	Part_reg* (%)	Effectifs	Part_reg* (%)	
Rabat	578 519	12,7%	544 422	11,3%	-1,2%
Salé	978 307	21,4%	1 074 734	22,3%	1,9%

III.2 Secteurs d'activités économiques

-Agriculture et élevage

Malgré la faiblesse relative des précipitations, le climat de la zone d'étude est favorable à l'activité agricole. Une pratique plus développée à Rabat qu'à Salé en raison de la disponibilité des terres de cultures (Tableau 2). L'élevage est aussi une activité pratiquée en parallèle à l'agriculture dans la région.

Tableau 2 : Superficies et productions des céréales au niveau de Rabat et Sale pour l'année 2015-2016 (Monographie Régionale, 2019).

Province ou préfecture	Superficie en milliers ha		Production en milliers de Qx	
	Nombre	(%)	Nombre	(%)
Rabat	49,6	9,1%		0,0%
Salé	0,2	0,0%	1,8	0,0%

-Industrie

Rabat et Salé ont connu un développement remarquable dans le domaine de l'industrie. Ainsi la préfecture de Rabat possède plus 200 établissements industriels relevant des industries chimiques ou para-chimiques, agroalimentaires ainsi que l'industrie métallique et mécanique (Fig. 23). Quant à la préfecture de Salé, elle abrite 165 établissements qui relèvent du secteur des industries chimique et para-chimique ou agroalimentaires avec d'importants établissements opérant dans les industries textiles et cuir.

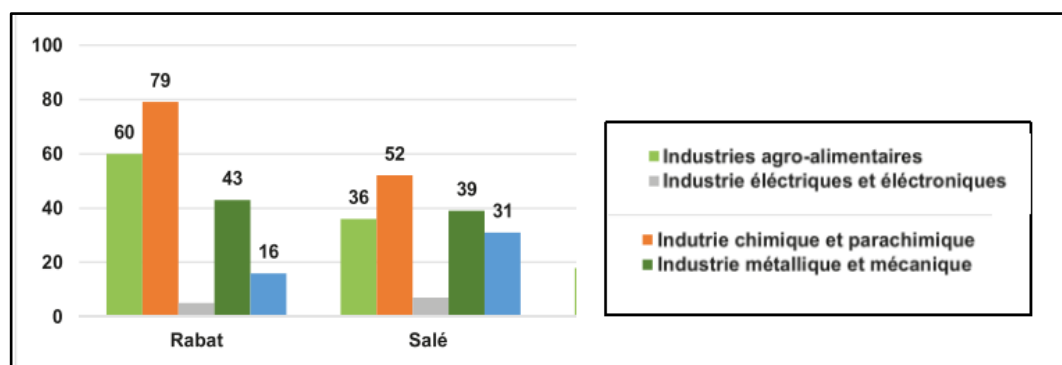


Figure 24 : Établissements industriels par secteurs à Rabat et Salé pour l'année 2013 (Monographie régionale, 2019).

- Pêche

Bien que moins florissante qu'autre fois dans l'estuaire, la pêche demeure néanmoins une activité importante dans la zone d'étude. Elle se pratiquait dans des conditions précaires avant l'installation d'un petit port sur la rive droite (Sale) dans le cadre de l'aménagement du Bouregreg au profit des 140 armateurs de la pêche maritime dite artisanale. Ce petit port qui se situe derrière la digue Nord à l'embouchure de l'oued est aujourd'hui l'un des points les plus dynamiques de la commercialisation des produits de la mer dans la région Rabat-Salé- kenitra.

Autour de ce port se développe une activité commerciale, sociale et touristique relativement importante dont 5 restaurants et 22 gargotes. Ce programme a pour préoccupation majeure d'intégrer le segment de la pêche artisanale dans le tissu socio-économique régional, de valoriser les produits capturés et d'améliorer les conditions de travail des marins pêcheurs artisans.

- Commerce

Au niveau des deux villes Rabat et Salé, le commerce traditionnel représenté par les commerçants individuels, grossistes et détaillants qui exploitent leurs propres activités s'est vu concurrencer par le développement de nouveaux modes de commerce, notamment, ceux relatifs aux réseaux de franchise nationales et internationales et aux grandes distributions qui ont vu le jour dans la région (Marjane, Aswak Essalam, Bim, Carrefour, Bricoma, Kitéa, Décathlon etc....)

- Tourisme et loisirs

La région bénéficie d'un patrimoine historique et culturel unique. La ville de Rabat possède de nombreux sites classés par l'UNESCO particulièrement la médina, les remparts, Chellah, les Oudayas, quartier des Habous...etc. la ville de Salé a aussi plusieurs sites qui sont le reflet des héritages passés, notamment, la médina de Salé et ses murailles, ses portes et Bordjs, la medersa merinide, ses Mausolées. En plus le paysage et les projets touristiques valorisent le potentiel touristique de la région.

La dynamique touristique au niveau des deux Préfectures de Rabat et Salé est respectivement de 95,8 % de la capacité en lits et 98,8 % des nuitées (Snoussi, 2020) et c'est Rabat qui polarise la quasi-totalité (80%) des touristes de la région. En plus de son tourisme d'affaires, le Programme 'Rabat Ville Lumière, Capitale marocaine de la Culture' a dédié 9,42 Milliards de dirhams au développement culturel, en plus du projet du Grand Théâtre.

A l'embouchure du Bouregreg, la Marina est considérée comme un ouvrage phare de l'aménagement de la vallée. De 350 places sur la rive droite de l'oued elle est localisée entre le pont Moulay El Hassan et l'embouchure de l'oued ; elle s'étend sur une superficie de 8.2 ha, avec 4 ha de terre-pleins et 4.2 ha de bassin, pouvant accueillir des bateaux avec un tirant d'eau de 2 à 4m. Avec

divers lieux d'animation et de loisirs, Bouregreg Marina ouvre un champ d'attractivité nouveau qui suscite l'engouement des plaisanciers nationaux et étrangers. Bouregreg Marina. Elle est bordée d'espaces de restauration, d'animation et de loisirs ouverts au public et, dans un futur proche, elle sera entourée d'un front résidentiel et hôtelier adossé à la Cité des Arts et Métiers.

IV. Contraintes environnementales

De par sa richesse sur les plans historique, patrimonial et physique. La vallée du Bouregreg a toujours occupé une importante place dans la vie sociale et économique de Rabat-Salé. Depuis plusieurs décennies elle ne fait qu'évoluer et changer néanmoins tous les changements et les extensions sur le territoire au pourtour de la vallée, ont entraîné une dégradation de son environnement. En effet, avant le début de l'aménagement de la vallée Bouregreg, initié dans les années 2000, plusieurs points de rejets des eaux usées longeaient les rives et déversés directement dans l'oued Bouregreg, des dépotoirs d'ordures non contrôlés et de carrières pour l'extraction des matériaux de construction en plus des installations d'activités anarchiques qui ont provoqué des dégradations importantes altérant la qualité du paysage de la région et celle des eaux fluviales en impactant la vie biologique dans l'écosystème estuarien et fluvial. En novembre 2021 un chantier de la dépollution de l'oued Bouregreg a débuté pour transférer les eaux usées vers le réseau Redal. En outre, l'aménagement de l'embouchure du Bouregreg a modifié l'équilibre sédimentaire des plages mitoyennes et la construction du barrage a accentué le phénomène par la réduction du transit sédimentaire vers la mer accentuant la pénurie en sédiments que connaît la côte atlantique marocaine.

Conclusion

De par ses patrimoines, naturel, écologique et historique ainsi que le développement urbanistique, architecturale et socio-économique qui s'y poursuivent depuis des décennies, la vallée du Bouregreg reste un site exceptionnel sur la côte atlantique marocaine. Néanmoins toute cette dynamique, tous les changements et les installations qui s'y opèrent ne restent pas sans impacts sur l'environnement. Des effets qui risquent de s'accroître dans un contexte du changement climatique amorcé. En focalisant sur l'estuaire du Bouregreg, pièce maîtresse de la vallée du Bouregreg et zone de transition entre la dynamique fluviale et marine, cet écosystème présenterait des archives sédimentaires qui, une fois analysées, permettraient d'authentifier l'origine de la réduction des apports de l'oued Bouregreg vers la mer.

CHAPITRE 3 : MÉTHODOLOGIE

I. Conception de la méthode

Afin de mettre en évidence l'impact du climat et des activités humaines sur la variabilité et le devenir des apports sédimentaires par l'oued Bouregreg, nous avons utilisé deux approches:

➤ La première est une étude de la variabilité hydroclimatique au sein du bassin versant, avec (1) une description de l'évolution des relations pluies-débits pour l'ensemble du bassin, (2) une analyse des tendances et des ruptures dans les séries chronologiques de pluie et débit, et (3) une étude de Sept sous bassins du Bouregreg pour identifier les zones pluviométriques susceptible d'être plus vulnérables au changement climatique :

➤ La seconde est une analyse de la variabilité des apports en sédiments à la mer par l'oued Bouregreg par une approche paléohydrologique. Il s'agit d'une thématique récente au domaine continental, qui permet de reconstituer les événements hydrologiques anciens et établir une chronologie des événements d'inondation qui s'étendent sur plusieurs siècles dans des environnements caractérisés par des régimes fluviaux de climats arides ou semi-arides. Une telle approche est basée sur les analyses suivantes : celles des séquences stratigraphiques, sédimentaires, géochimique et la méthode de datation radiométrique au ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ pour une chronologie précise des événements.

L'objectif de cette étude est de mieux cerner les impacts des barrages sur le transi-sédimentaire vers l'environnement côtier.

II. Origine et traitement de données de pluies et débits

II.1 Origine

Les données des pluies mensuelles utilisées dans ce travail sont celles des stations à l'intérieur et à proximité du bassin versant du Bouregreg. Elles ont été collectées pour 26 stations de mesure : 18 stations proviennent de la base de données SIREM de l'UMR HydroSciences Montpellier (Dieulin *et al.*, 2006) ; elles sont spatialisées sur une grille de 0.5° de résolution et couvrent la période 1977-1999 ; et 8 stations issues de la DMN et l'agence hydraulique de Bouregreg et Chaouia, dont la période s'étend de 1977-2013 (Annexe. 1).

Les données de débit ont été recueillies auprès de 8 stations de mesure de débit par l'agence hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia et couvrent une période allant de 1977 à 2007 (Fig. 24). La qualité des données utilisées, dans ce travail, est déjà assurée par l'organisme fournisseur (Annexe. 2).

Les stations étudiées sont situées dans la moitié amont du bassin, et sont peu influencées par la construction du barrage SMBA. Elles présentent un jeu de données intéressant pour tester l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique et donc pour connaître la variabilité de la ressource en eau qui serait disponible pour les aménagements en aval de ces stations, suivant une méthode qui a été appliquée partiellement au Maroc par Singla *et al.* (2010).

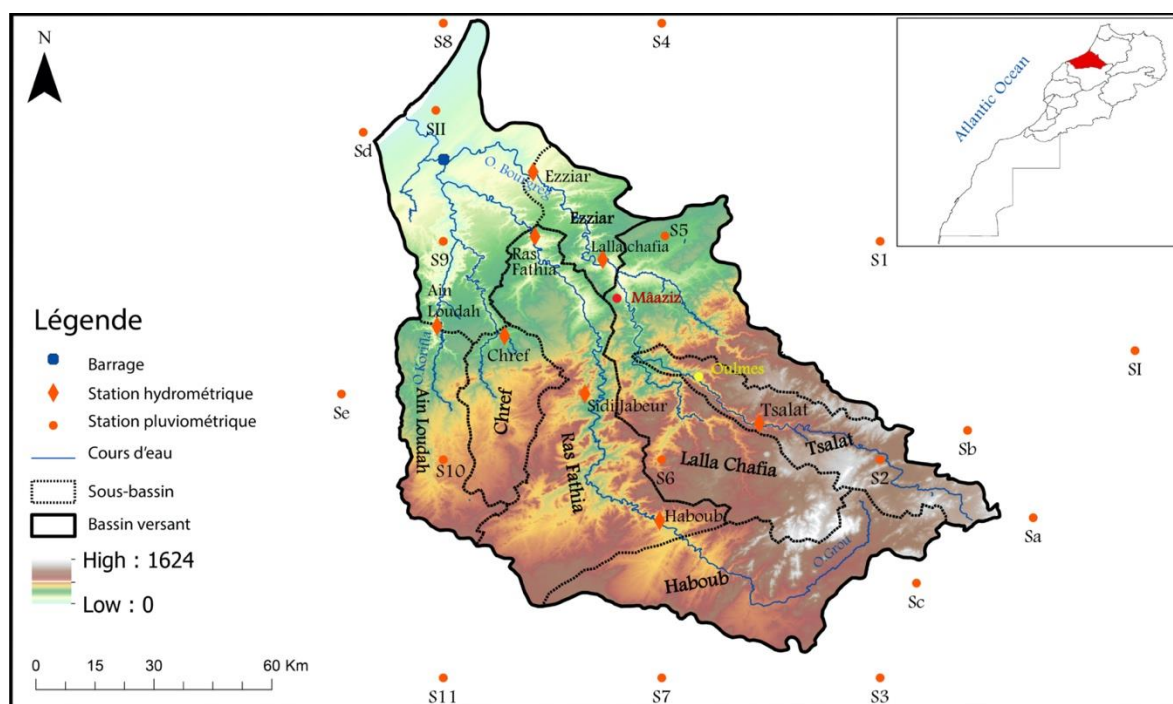


Figure 25 : Répartitions des stations pluviométriques et hydrométriques sur le bassin versant.

II.2 Traitement de données

II.2.1 Indices pluviométriques et hydrométriques

Le calcul des indices pluviométriques et hydrométriques permet de caractériser l'hétérogénéité temporelle de la variabilité climatologique et de dégager les grandes tendances dans les séries hydroclimatologiques. Pour mieux visualiser les périodes de déficit et d'excédent à l'échelle annuelle, ces indices ont été centrés et réduits à partir de la formule suivante :

$$V_{cr} = (P - P_{moy}) / \sigma$$

Où, **V_{cr}** est la Variable centrée réduite (Indice pluviométrique (**SPI**) ou hydrométrique (**SDI**) selon la variable étudiée), **P** est le cumul de la variable sur une période t donnée, **P_{moy}** est la moyenne de la série chronologique sur la période d'étude et σ est l'écart type de la série sur la période d'étude (Hallouz *et al.* 2019).

II.2.2 Polygones de Thiessen

La précipitation mesurée à une station météorologique représente la pluie tombée en un point géographique particulier et non une pluie spatiale. Cette méthode permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique ; elle affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence dont l'aire, exprimée en pourcentage, représente le facteur de pondération de la valeur locale. Les différentes zones d'influence sont déterminées par découpage géométrique du bassin sur une carte topographique (Fig. 25). La précipitation moyenne P_{moy} pondérée pour le bassin se calcule par la relation suivante (Mahé *et al.*, 1994) :

$$P_{moy} = \sum A_i \cdot P_i / A$$

Où

P_{moy} : Précipitation moyenne sur le bassin.

A : Aire totale du bassin ($\sum A_i$).

P_i : Précipitation enregistrée à la station i .

A_i : Surface du polygone associée à la station i .

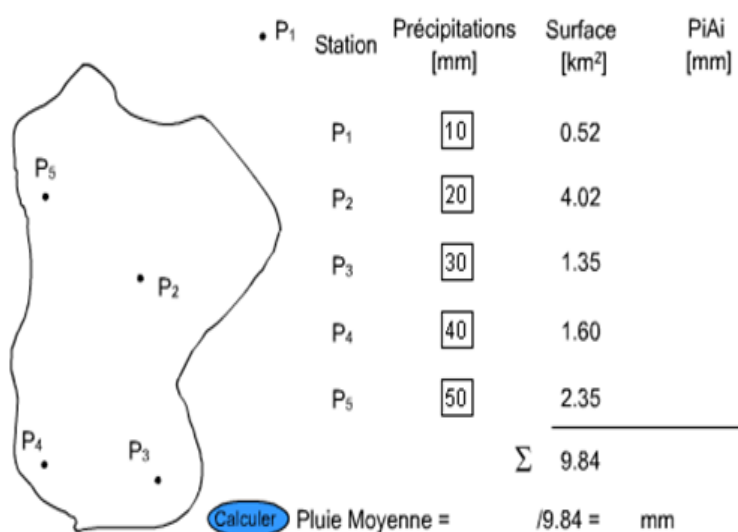


Figure 26 : Exemple de détermination des polygones de Thiessen.

La méthode du polygone de Thiessen affecte à chaque pluviomètre une zone d'influence en permettant alors d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station pluviométrique.

II.2.3 Etude des ruptures

Afin d'analyser les discontinuités dans l'ensemble des données étudiées, nous avons adopté les tests de rupture de Pettitt, Buishand et Lee et Heghinian et la procédure de segmentation de Hubert. Ces tests sont regroupés dans le logiciel Khronostat (1998) réalisé par l'IRD et disponible sur le site d'HydroSciences Montpellier (France) (<http://www.hydrosciences.fr>).

Le test de Pettitt (Pettitt; 1979) est utilisé sur tous les postes retenus en vue d'identifier une "rupture" moyenne dans les séries chronologiques analysées de la pluviométrie et l'hydrométrie aussi bien annuelle que mensuelle. Ce test réputé pour sa robustesse, est non paramétrique et dérive de la formulation du test de Mann-Whitney. Une absence d'une rupture dans une série chronologique X constituerait une hypothèse nulle H_0 . Ensuite, l'utilisation de la méthode bayésienne de Lee et Heghinian (1977) permet de déterminer la date et l'amplitude de la rupture. Cette méthode fournit la probabilité qu'un changement se produise à un moment t , dans une série chronologique où il est supposé, à priori, qu'il y a effectivement un changement à un moment indéterminé. De même, cette procédure donne une estimation de la probabilité que l'amplitude du changement ait la valeur du changement éventuel de la moyenne. Quant à la segmentation de Hubert *et al.*, (1989), elle consiste à découper la série en m segments ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement être différente de la moyenne du (ou des) segment(s) voisin(s). Une telle méthode est appropriée à la recherche de multiples changements de la moyenne.

III. Compagne de carottage

Afin d'établir une échelle chronologique des événements sédimentologiques passés, deux campagnes d'échantillonnage des sédiments profonds par carottage ont été réalisées au niveau de l'estuaire du Bougregrerg (Fig. 26) à l'aide du carottier à piston : La première carotte sédimentaire *BR1* de 2 m a été prélevée en 2016 en zone urbaine, près de l'embouchure à proximité du pont Hassan II (Photo A, Fig. 27).

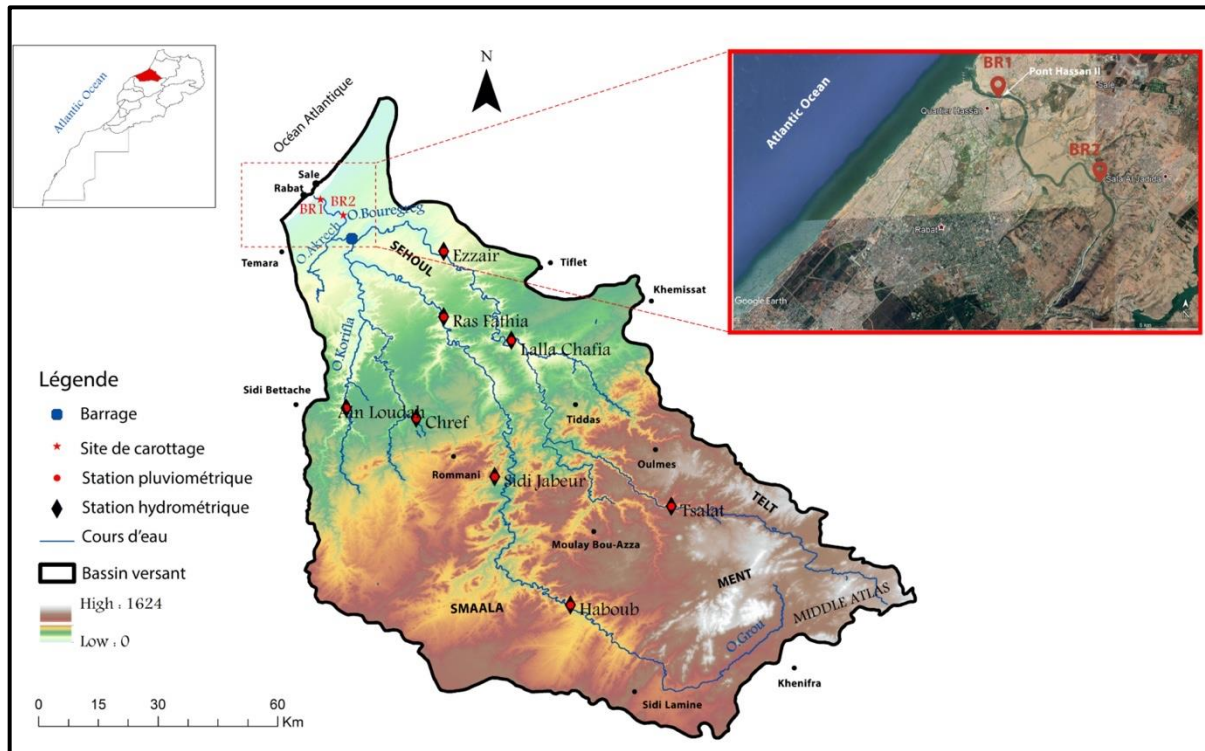


Figure 27 : Localisation du site de carottage dans le bassin versant du Bouregreg.

Dans le but de corrélér les résultats litho-stratigraphiques, sédimentologiques et géochimiques de cette première carotte BR1, nous avons échantillonné une deuxième carotte sédimentaire *BR2* de 1,80 m dans la zone estuarienne de Bouregreg, en aval du barrage SMBA et loin de l'influence urbaine et marine (Photo B, Fig. 27). Les carottes sédimentaires prélevées sont gardées dans des tubes PVC découpés à l'avance en deux. Leurs positions géographiques sont enregistrées à l'aide du GPS portatif type Garmin.



Figure 28 : Localisation du site de prélèvement, (A) terrasse alluviale de la carotte BR1, (B) terrasse alluviale de BR2.

IV. Analyses de laboratoire

IV.1 Etude sédimentologique des archives sédimentaires

Les carottes sédimentaires prélevées sur les terrasses alluviales du Bouregreg ont fait l'objet d'une série d'analyses sédimentologiques, géochimiques et chronologiques au sein du Laboratoire des Géosciences de Montpellier (France).

IV.1.1 Description litho-stratigraphique

Les carottes sédimentaires une fois prélevées, sont coupées en deux dans la longueur : une moitié est utilisée pour les analyses, et la seconde moitié est conservée comme archive. Elles sont étiquetées, emballées dans un film plastique et protégées dans un tube en plastique.

La première étape d'analyses a consisté en une description précise des deux carottes en tenant compte de la couleur du sédiment, des variations granulométriques, du degré d'oxydation, des bioturbations (terriers, empreintes, animaux ou végétaux...), des structures rencontrées ou encore de leur absence et d'autres singularités. Cela nous a permis de la subdiviser en unités sédimentaires caractéristiques chacune d'un type de faciès sédimentaire observés.

IV.1.2 Analyse granulométrique

L'étude granulométrique est réalisée pour chaque échantillon afin de déterminer la distribution de la taille des grains existants. L'appareil utilisé pour cette étude est le granulomètre laser de type LS200 Beckman Coulter, qui consiste en la diffraction et la diffusion d'un faisceau laser monochrome sur des particules préalablement mises en suspension suffisamment longue, pour empêcher la présence d'agrégats (Fig. 28). Cet appareil fournit des résultats d'une grande résolution, en effectuant une mesure pour chaque centimètre de la colonne sédimentaire. Les résultats de cette analyse permettent de suivre l'évolution granulométrique du faciès sédimentaire et donnent un renseignement sur la variation des processus hydrodynamiques et sédimentaires du milieu.



Figure 29 : Photographie du granulomètre laser du laboratoire des Géosciences de l'université de Montpellier (France).

IV.1.3 Analyse géochimique

Réalisée par fluorescence-X, l'analyse géochimique mesure de manière semi-quantitative la concentration d'éléments chimiques de différents matériaux (sol, pièce de monnaies, tube PVC...). Cette méthode a la particularité d'être non destructive. Les mesures ont été réalisées sur la carotte la carotte *BR2* à l'aide d'un générateur à fluorescence-X mobile (Niton XL3t) (Fig. 29), capable de mesurer jusqu'à 30 éléments chimiques, et dispose de plusieurs modes d'analyse selon les besoins de l'utilisateur. Les concentrations sont données en *ppm* ou en pourcentage et avec une résolution centimétrique le long de la carotte sédimentaire, pour avoir un profil géochimique à haute résolution.



Figure 30 : Photographie de l'analyse de la carotte bR2 par le spectromètre des Rayons X (XRF-moblie) (X- florescence mobile) de type Nitron, au laboratoire des Géosciences de l'université de Montpellier (France).

IV.2 Etude chronologique

L'approche géochronologique utilisée dans cette recherche est basée sur la datation au Plomb²¹⁰ (²¹⁰Pb_{ex}) et au Césium¹³⁷ (¹³⁷Cs) ; elle utilisée pour mesurer l'activité des éléments radioactifs dans les sédiments analysés par spectrométrie gamma. L'ensemble de ces mesures ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre Gamma de la marque CANBERRA BEGe 3825.

Pour établir une échelle très fine de l'évolution sédimentaire temporelle, chaque échantillon d'environ 5 à 10 g (selon le type de sédiment) a été mis dans un tube fermé hermétiquement pour passer dans une spectrométrie gamma équipée d'un détecteur de Germanium type puits. Le cristal de Germanium permet d'atténuer les bruits de fond. L'unité de la spectrométrie Gamma est installée dans une salle au sous-sol couverte par une piscine au plafond afin d'atténuer l'exposition aux rayonnements naturels cosmiques.

Tous les échantillons préparés précédemment ont subi cette analyse pendant un temps d'exposition bien déterminé (généralement entre 4 et 7 jours). Les échantillons, avant d'être mesurés en spectrométrie gamma, sont tamisés à 1 mm pour enlever les bioblastes, dessalés dans des bains successifs d'eau distillée, puis séchés à l'étuve (70° C) et enfin broyés pour être mis dans des boîtes cylindriques adaptées au spectromètre. Cette méthode repose sur l'analyse du rayonnement gamma créé à la suite d'une émission alpha ou bêta par les différents éléments radioactifs. En effet, après une désintégration alpha ou bêta, et la formation d'un nouveau noyau, l'élément radiogénique créé n'est pas nécessairement dans un état d'équilibre. Pour se débarrasser de cet excédent d'énergie et atteindre l'équilibre, le noyau émet un ou plusieurs photons gamma d'énergies déterminées le caractérisant. Ces émissions, mesurées par spectrométrie gamma, permettent de déterminer l'activité de radioéléments dans un échantillon, exprimée en désintégrations par minute (dpm ou en Bq=1dps).

■ Méthode de datation au $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$

Cette méthode est basée sur l'activité du nucléide ^{210}Pb ; elle a été utilisée pour la première fois par Goldberg (1963). Cette technique a été réalisée plus tard sur des sédiments lacustres par Krishnaswamy *et al.*, (1971). Elle est très recommandée pour la détermination des vitesses de sédimentation dans des différents milieux de dépôt tels que : le milieu estuarien et lagunaire (Radakovitch *et al.*, 1998, Arnaud *et al.*, 2002, Karageorgis *et al.*, 2003).

Le ^{210}Pb est l'un des isotopes naturels du plomb et fait partie de la chaîne de désintégration de l'uranium ^{238}U provenant de la décroissance du radon ^{222}Rn (Fig. 30). Toute méthode de datation, basée sur les séries de désintégration, suppose l'apparition d'un processus venant perturber l'état d'équilibre qui existe entre les différents maillons de la chaîne. Dans la plupart des systèmes environnementaux restés «fermés» pendant plus d'environ 120 ans (cinq fois la demi-vie de ^{210}Pb), ^{210}Pb est dérivé de son radionucléide parent, ^{226}Ra ($T_{1/2} = 1600$ ans), qui est présent dans le matériau atteindra un état de radioactivité d'équilibre. Cependant, ^{210}Pb peut ne pas être en équilibre avec l'isotope parent ^{226}Ra et peut avoir une source supplémentaire non liée à ^{226}Ra . Une fraction du ^{210}Pb observée est issue par désintégration de ^{226}Ra et représente ^{210}Pb «pris en charge», qui est considéré comme indépendant du temps. La deuxième fraction provient de la désintégration du ^{222}Rn atmosphérique en ^{210}Pb et est appelée ^{210}Pb en «excès» ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$).

■ Méthode ^{137}Cs :

Le ^{137}Cs est un isotope artificiel ($T_{1/2} = 30,17$ ans), provenant des activités nucléaires purement anthropiques. Il est mesuré en même temps que le ^{210}Pb car ils ont presque la même période de vie ($T_{1/2} = 30$ ans). Son intrusion dans la nature a eu lieu depuis 1950, date des premiers essais nucléaires.

Un maximum de ^{137}Cs a été observé dans deux périodes : 1- la période qui correspond aux essais nucléaires en haute atmosphère avec comme paroxysme l'année 1963. 2- la période datant d'il y a 32 ans (depuis 1986) et tirant un trait sur l'ère soviétique, avec l'explosion du réacteur numéro 4 de la centrale de Tchernobyl, provoquant des retombées de Cs^{137} et de Am^{241} dans toute l'Europe.

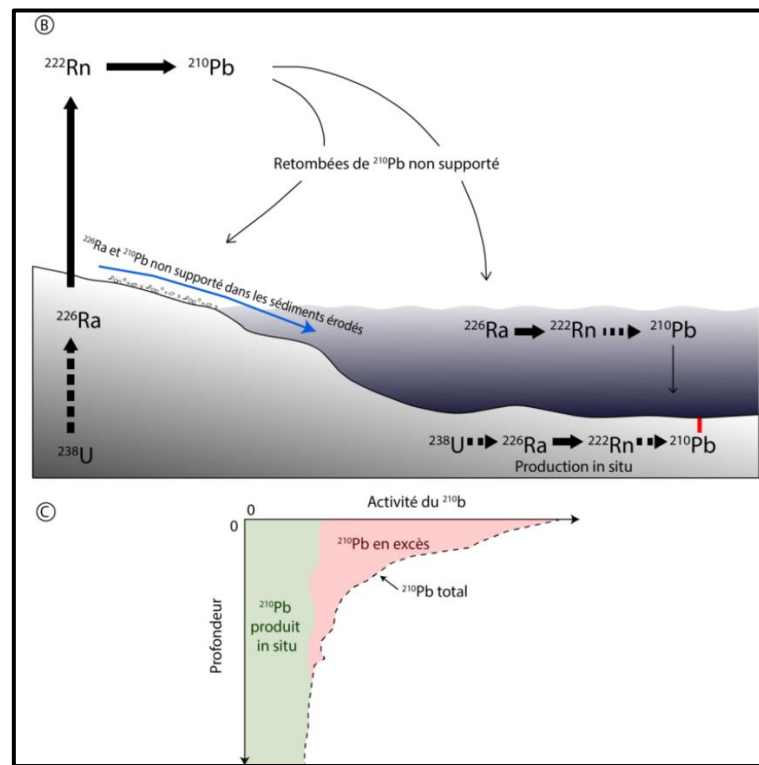


Figure 31 : Modes de production et de migration du ^{210}Pb jusqu'au sédiment final (modifié d'après (Corbett and Walsh, 2015)). C : Exemple de profil de ^{210}Pb dans une carotte (trait rouge dans (B)). Le ^{210}Pb en excès qui se désintègre progressivement avec la profondeur et le temps, et qui n'est pas renouvelé une fois enfoui (Baumann, 2017).

Conclusion

L'approche multiproxy est appliquée pour la première fois sur l'estuaire du Bouregreg. Les analyses sédimentologiques et géochimiques effectuées sur les carottes sédimentaires prélevées au niveau des terrasses alluviales vont permettre de tracer la distribution granulométrique et l'évolution des éléments géochimiques dans le faciès sédimentaire, afin de reconstituer l'histoire des transferts sédimentaires par l'oued Bouregreg. Les données chronologiques seront utilisées pour apporter la dimension temporelle à ces dépôts sédimentaires, et pour établir une échelle chronologique des événements sédimentologiques passés et de les corréler avec l'historique de la variabilité hydroclimatique, et l'histoire de la construction des aménagements.

***CHAPITRE 4 : RÉGIME HYDROCLIMATIQUE DANS LE BASSIN
VERSANT DU BOUREGREG***

Introduction

Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les populations que pour les écosystèmes. Ainsi de nombreuses études portent sur la détection des tendances et des variations dans les longues séries hydroclimatologiques. Cette connaissance est pertinente pour l'élaboration des stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique dans une région donnée. En effet, le Maroc fait partie des pays qui ont souffert économiquement, socialement et écologiquement de la sécheresse au cours des dernières décennies de 1980 à 1985 et de 1991 à 1995 (Tsiourtis 2001, Singla *et al.*, 2010). Les systèmes naturels et les activités humaines sont les plus à risque en raison du manque d'approvisionnement régulier en eau au cours de l'année. Ceci est principalement dû à la forte variabilité interannuelle et à l'importante saisonnalité des précipitations. Cette étude a été développée à partir des résultats du programme SIGMED (Mahé *et al.*, 2013) et les résultats du mémoire de master de Ezzahouani (2015) sur la modification du régime hydroclimatique dans le bassin versant du Bouregreg.

Le Maroc fait partie de la région méditerranéenne qui reste particulièrement sous l'effet de la NAO (North Atlantic Oscillation) et de la MO (Mediterranean Oscillation). Celles-ci influencent l'évolution des épisodes chauds sur les zones internes du Maroc (Khomsî *et al.*, 2013). Cependant, le régime hydroclimatique du bassin versant du Bouregreg est influencé par les changements de la circulation atmosphérique à large échelle (Driouech *et al.*, 2010a). De plus, dans un contexte méditerranéen semi-aride depuis la baisse des pluies de 1979, et suite à une augmentation des événements extrêmes (Khomsî *et al.*, 2012 ; 2016), les conditions de l'érosion et du transport solide ont été modifiées sur ce bassin. Il est donc indispensable de connaître l'évolution des ressources en eau disponibles dans un environnement climatique changeant. Afin d'approfondir le travail initié par Ezzahouani (2015) sur la compréhension du fonctionnement hydroclimatique du bassin versant du Bouregreg, nous comparons l'évolution des pluies et des débits à partir d'une étude régionale pour mieux décrire les évolutions climatiques dans la zone d'étude et considérer la contribution de chaque région au changement hydrologique. Les stations étudiées sont situées dans la moitié amont du bassin, et sont peu influencées par la construction du barrage SMBA. Elles présentent un jeu de données intéressant pour tester l'impact du changement climatique sur le régime hydrologique de l'oued et donc pour connaître la variabilité de la ressource en eau qui serait disponible pour les aménagements en aval de ces stations, suivant une méthode qui a été appliquée partiellement au Maroc par Singla *et al.*, (2010).

Ce travail répond au premier objectif de cette recherche et correspond à un article publié récemment dans *Geographia Polonica* (El Aoula *et al.*, 2021) (Annexe 1).

I. Évolution des relations pluie-débit pour l'ensemble du bassin du Bouregreg

I.1 Indices pluviométriques et hydrométriques

Sur l'ensemble du bassin Bouregreg, la période 1977–2007 est marquée par deux années fortement déficitaires 1994 et 2006 (Fig. 31). Après la fin des années 70, une augmentation est observée, non seulement de la fréquence des années sèches mais aussi de l'amplitude de la sécheresse par rapport à la période précédente. Cette diminution des précipitations est déjà signalée par de nombreux chercheurs. En effet Singla *et al.*, (2010) ont évoqué la rupture des pluies au Maroc en 1979. Les décennies 80 et 90 sont particulièrement sèches avec le maximum de déficit en 1994. En dehors des années 1995 et 1996 caractéristiques de forte anomalie NAO favorable à la pluie au Maroc (Khamsi *et al.*, 2012), toutes les autres années sont sèches. A partir de 2002, une alternance d'indices positifs et négatifs est enregistrée.

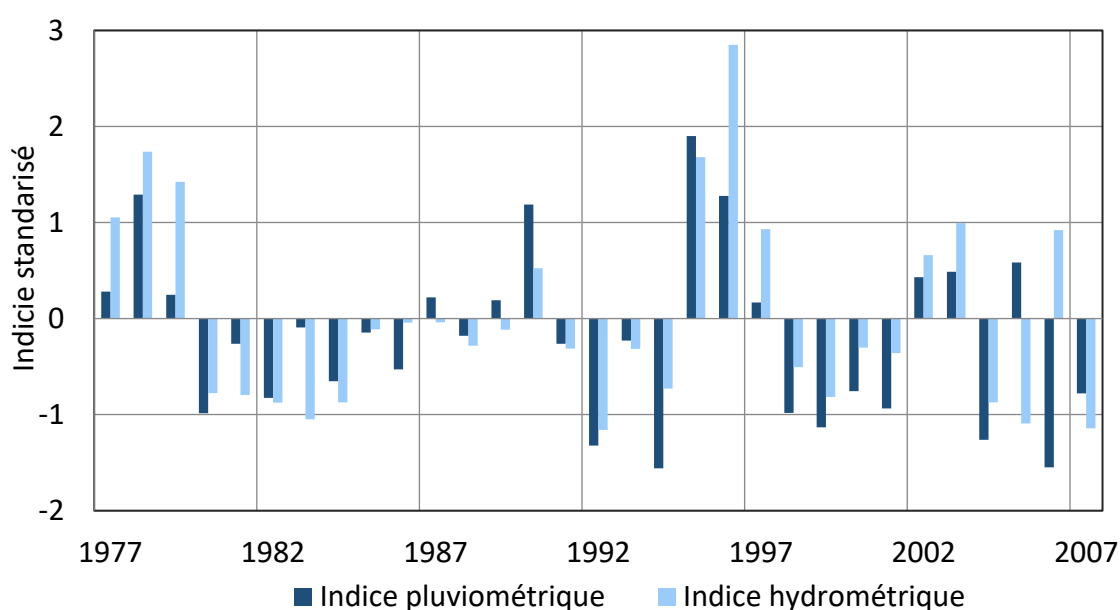


Figure 32 : Indices pluviométriques et hydrométriques de 1977 à 2007 pour l'ensemble du bassin versant du Bouregreg (9 970 km²).

Sur la base de ces indices exprimés par les données pluviométriques et hydrométriques pour la période 1977-2007, on remarque que le graphique des précipitations suit le même sens que celui des débits mais avec des valeurs parfois sensiblement différentes. Ensuite, en 2005 et 2006 on enregistre des valeurs opposées des deux indices. Pour mieux estimer cette différence observée, sur la figure 32 nous avons représenté la différence entre l'indice pluviométrique et l'indice hydrométrique. On en déduit une différence positive depuis le début de la sécheresse (1979) jusqu'à l'événement NAO (1995/1996), puis à partir de 1996 la différence devient négative, avec un indice pluviométrique plus fort que l'indice hydrométrique.

Ce résultat semble être expliqué par le fait que la variabilité du cumul annuel est plus liée à celle du nombre d'événements plutôt qu'à la quantité de pluie par événement pluvieux (Lawin *et al.* 2011). Au niveau du bassin versant du Bouregreg, le nombre de jours de pluie par an varie de 60 à 75 entre les montagnes et l'océan ensuite de 75 à 100 sur les régions montagneuses. Les changements dans la variabilité du climat local sont influencés par ceux de la circulation atmosphérique à large échelle. Khomsi *et al.* (2013) ont montré l'existence d'un lien statistique significatif entre l'évolution des épisodes chauds d'été et la MO sur les zones internes du Maroc. Une corrélation significative a été également trouvée entre la NAO et les épisodes chauds de Rabat-Salé. En effet, au cours de la saison froide, la NAO est dans sa phase négative, les perturbations s'engouffrent vers le Nord de l'Afrique, apportant ainsi des pluies sur la région (Fig. 33). Les types de temps résultants peuvent adoucir le climat et diminuer la fréquence des épisodes chauds au Nord du Maroc. Alors qu'au cours de la saison chaude, la NAO est généralement en phase positive, une augmentation de cet indice renforce les vents d'Ouest sur l'Afrique du Nord. Ces derniers devenant plus chauds suite à l'augmentation de la température de la surface de la mer, affectent le Nord du pays dont fait partie le bassin du Bouregreg. Aussi, l'augmentation de l'indice MO provoque l'infiltration sur le pays de masses d'air chaudes depuis la Méditerranée qui peuvent occasionner des épisodes chauds.

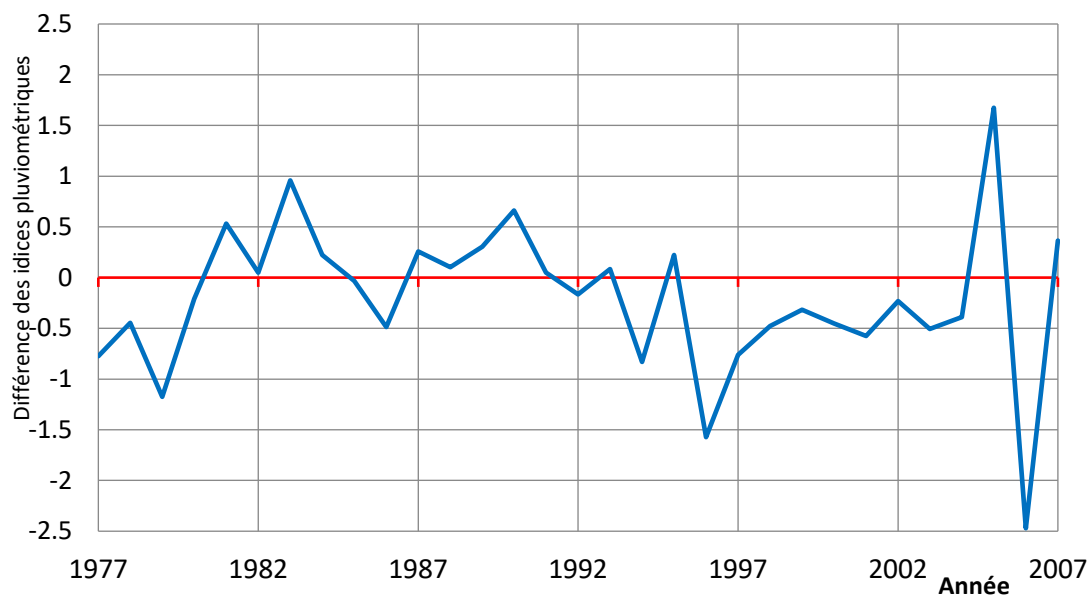


Figure 33 : Différence indice pluviométrique moins indice hydrométrique.

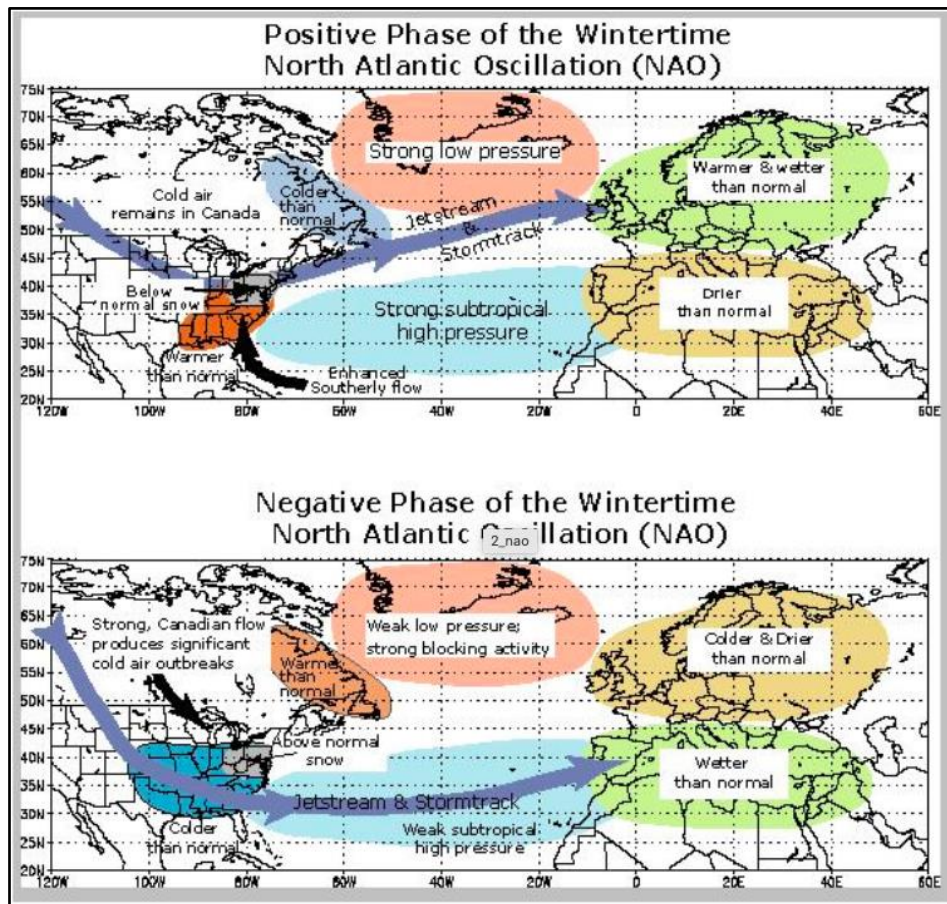


Figure 34 : Les deux phases de la NAO Meteorological Mindset, (<https://pkozich.wordpress.com/2010/05/31/the-north-atlantic-oscillation/>).

I.2 Rupture de stationnarité

L'analyse et l'interprétation des tests statistiques a permis de constater que pour les pluies annuelles, la rupture sur l'ensemble du bassin du Bouregreg a été détectée au niveau de 1994 et de 1997 (Tableau 3). Ces années sont caractérisées par une diminution des précipitations. Néanmoins, quelques ruptures et tendances peuvent être observées à la fin de la décennie 70 ou au début de la décennie 80, traduisant peut-être un changement qui se révélerait plus clairement à l'échelle de l'événement pluvieux. Ces résultats réaffirment les constatations des différentes études réalisées auparavant sur l'évolution des pluies en Afrique comme celles de Klaus (2002). Les périodes où le réchauffement a été le plus rapide en Afrique au cours du XX^{ème} siècle, sont observées à partir des années 1910 jusqu'aux années 1930 et ensuite après 1979.

Ceci confirme aussi les études ayant évoqué une diminution des précipitations au Maroc, depuis les années 1960 (Driouech, 2006 ; DMN, 2007) et plus significativement depuis la fin des années 70 et début des années 80 (Agoumi et Debbarh 2006, Knippertz *et al.* 2003). Cette rupture est aussi confirmée à l'échelle régionale, par l'étude de la pluviométrie régionale du bassin versant du Bouregreg (Khoms, 2014). Il apparaît ainsi qu'un changement des régimes pluviométrique et hydrométrique a affecté une grande partie du bassin versant du Bouregreg à partir de 1979.

Tableau 3. Ruptures détectées par les tests de KhronoStat pour les séries de pluies et débits moyennes sur le bassin versant du Bouregreg, période 1977-2007. (NR= Pas de rupture)

Variable	Période	Pettitt	Lee & Heghinian	Hubert	Buishand	Probabilité de rupture		
						Faible	Moyen	Fort
Pluies	1977-2007	1997	1997	1994 1998 2006	NR	-	1997	-
Débits	1977-2007	NR	1979	1979	1979	-	-	1979

I.3 Régime mensuel avant et après la rupture (1979)

Le régime des pluies mensuelles sur les deux périodes avant et après la rupture montre une diminution sensible surtout entre décembre et février sur l'ensemble du bassin du Bouregreg (Fig. 34). La pluviométrie a baissé au cours des années 80, sauf en mars. Les totaux pluviométriques ont évolué au cours de la « grande » saison des pluies novembre-décembre, tandis que la « petite » saison des pluies de mars à avril a presque disparu. Un maximum relatif apparaît en septembre-octobre. Pour mieux estimer cette différence observée avant et après 1979, le pourcentage des pluies mensuelles est calculé. Une diminution significative de 14,3%, est notée avec un passage d'un total pluviométrique de 534 à 458 mm, alors qu'au mois de février, l'augmentation de 49 % enregistrée ; reste difficile à expliquer sans une étude approfondie de l'évolution des variables climatologiques concomitantes. La période de calcul des débits avant la sécheresse est différente de celle des pluies, car les données disponibles sont plus longues (moyenne des 4 stations de longue durée), mais le résultat est le même qu'avec l'ensemble des stations sur la période courte, avec des débits en février et mars plus élevés sur la période 1977-1979. La différence mensuelle de débit entre les deux périodes est près de 41%.

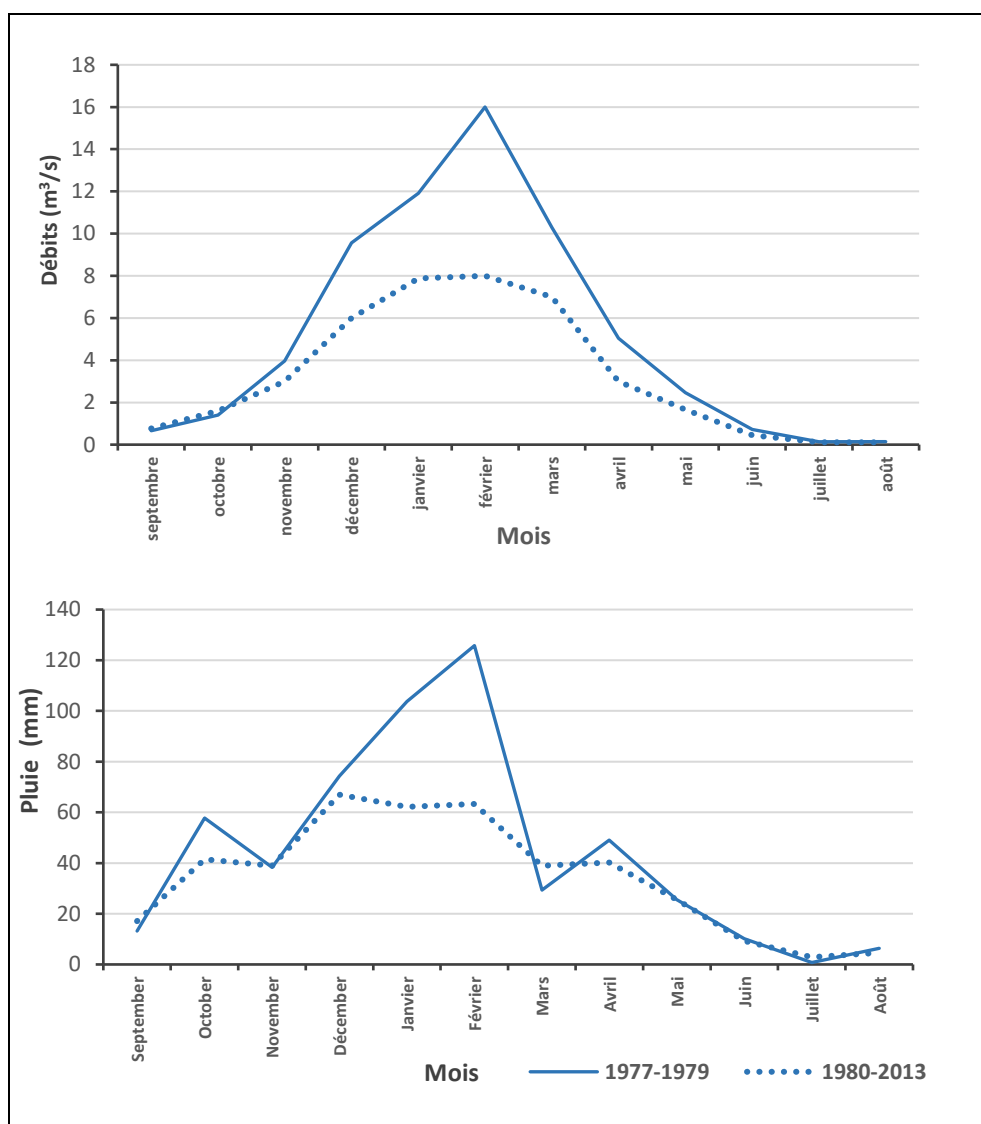


Figure 35: Évolution des pluies (mm) et débits (m³/s) mensuels sur le bassin du Bouregreg entre 1977 et 1997 (trait plein) et 1980 à 2013 (tireté) de septembre à août.

II. Étude régionale des pluies et des débits

II.1 Régionalisation

Pour mieux décrire l'évolution des pluies et débits sur le bassin versant du Bouregreg et représenter efficacement l'évolution des précipitations en prenant en compte plus finement toutes les hétérogénéités locales de la répartition de la pluie, le grand bassin du Bouregreg a été subdivisé en régions climatiques afin de réévaluer les séries annuelles et mensuelles par région, et aussi d'apporter de nouvelles informations en montrant clairement la propagation des différents signaux et les régions les plus vulnérables au changement climatique.

Pour calculer la pluie moyenne pour chaque sous-bassin, nous avons utilisé la méthode de polygone de Thiessen en se basant sur la triangulation de Delaunay en utilisant la méthode des médiatrices entre deux stations. Nous avons ensuite intercepté la couche de chaque sous-bassin versant avec celle des polygones de Thiessen afin d'obtenir les tracés des polygones sur les sous-bassins versants. Le traitement des stations restantes a abouti à la constitution de sept polygones et donc de Sept sous-bassins à différentes échelles spatiales, sur l'ensemble du bassin versant du Bouregreg. Ce sont particulièrement, Ezziar, Lalla Chafia, Tsalat, Ras Fathia, Haboub, Ain Loudah et Chref (Fig. 35).

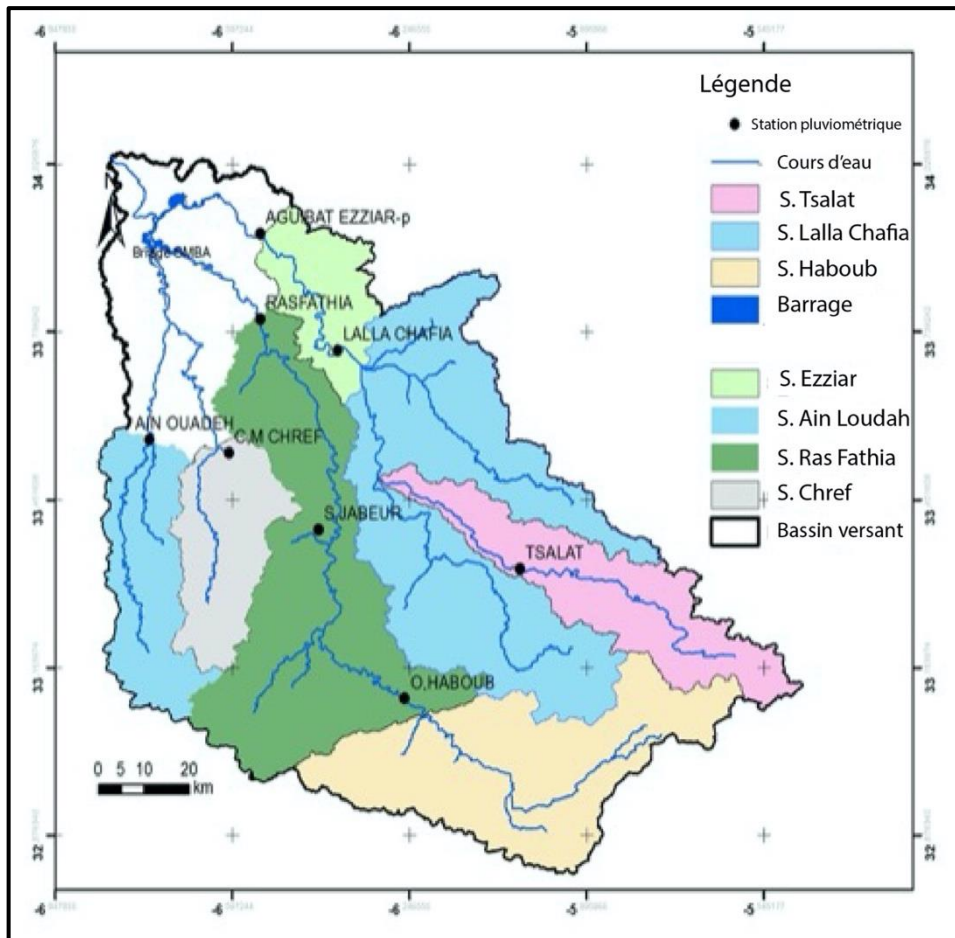


Figure 36 : Les sept sous-bassins du bassin versant du Bouregreg.

II.2 Rupture de stationnarité

Les tests statistiques de rupture dans les séries d'indices des sous-bassins ont permis de mettre en évidence plusieurs résultats (Tableau 2). Tout d'abord, la constitution des régions est limitée par le nombre de stations utilisées, mais aussi par leur répartition spatiale et la durée des séries. Néanmoins, des ruptures dans les années 70 en janvier 1977 et février 1979 ont été notées. Il est de même pour des ruptures tardives enregistrées en avril 1997 au niveau de Chref, en septembre 2007, novembre-octobre 2009 et juillet 2012 au niveau des sous bassins Ezziar et Lalla chafia (Tableau 4).

Tableau 4. Rupture dans les séries de pluies mensuelles des sous bassins du Bouregreg.

Sous-bassins	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
Ezziar	07	09	09	10	77	79	12	97	84		12		
Lalla Chafia	07	07	09	10	77	79	12	97	84	98	12		
Tsalat	99	09	09	10	77	79	12	97	84	98	12	12	
Ras Fathia	11	09	09	94	78	78	12		12		12	12	
Haboub	11	09	09	94	77	79	12	97	85	98	12	12	
Ain Loudah	00	09	09	10	79	96	12	97		98			
Chref	12	09	09	10		94	96	97		98		99	
Nombre de ruptures durant la décennie 70	0	0	0	0	6	5	0	0	0	0	0	0	11
Nombre de ruptures durant la décennie 80	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4
Nombre de ruptures durant la décennie 90	1	0	0	2	0	2	1	6	0	5	0	1	18
Nombre de ruptures après la décennie 90	6	7	7	5	0	0	6	0	1	0	5	3	40

Quant aux débits, le tableau 5 montre une variabilité spatiale et temporelle des dates de ruptures à l'échelle du Bouregreg. Pour les ruptures probables, elles sont observées aussi bien en saison de pluie qu'en saison sèche. Et les tests mettent en évidence une période de rupture négative surtout vers la fin des années 79. Ainsi les séries de pluies, et aussi dans une moindre mesure les séries de débits, présentent des ruptures positives très importantes pour presque toutes les stations à la fin des années 2000. Cependant pour ce qui est des séries de pluies de janvier et février et dans une moindre mesure celles de mai, le rebond pluviométrique dû aux années successives du meilleur cumul annuel, à la fin des années 2000, n'a pas modifié la tendance à long terme des mois de janvier et février; la figure 34 montre qu'ils restent faibles, avec une incidence directe sur les débits de décembre à février et ces derniers sont marqués par la rupture de la fin des années 70. Or, c'est durant les mois de décembre à février que les nappes se rechargent le plus. Cependant, les eaux souterraines seraient impactées par une tendance à long terme de la baisse des pluies durant l'hiver.

Tableau 5. Rupture des débits mensuels des sous-bassins versant du Bouregreg.

Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
Ezziar	96		01		77	79	80	03	04	79	79		
Lalla Chafia		78	01	94	78		79	07	07				
Tsalat		06				78	79		06				
Ras Fathia	94		01		79	79	80	04	04				
Haboub		04	07			78	06						
Ain Loudah						78			02				
Chref			01			78							
Nombre de ruptures durant la décennie 70	0	1	0	0	3	6	2	0	0	1	1	0	14
Nombre de ruptures durant la décennie 80	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2
Nombre de ruptures durant la décennie 90	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Nombre de ruptures après la décennie 90	0	2	5	0	0	0	1	3	5	0	0	0	16

II.3 Évolution des pluies

Suite à sa situation géographique, le bassin versant du Bouregreg se trouve sous l'influence de l'Atlantique et de la Méditerranée, et subit également l'effet du relief. Ces différents facteurs influencent son climat à l'échelle globale. Afin de comprendre les évolutions climatiques et de considérer la contribution de la région d'étude au changement climatique, nous avons analysé l'évolution des pluies pour chaque sous-bassin. La figure 36 montre que les sept sous-bassins présentent la même variation de distribution des pluies avec une combinaison des tendances positives et négatives. La hauteur des précipitations a généralement fluctué entre 1104 mm et 162 mm. Certaines amplitudes sont sensiblement différentes, et surtout un pic beaucoup plus élevé est noté pour le sous-bassin de Tsalat en 1996. Celui-ci se situe près de la ville d'Oulmès sur les montagnes de l'ouest du bassin, ce qui induit sans doute une variabilité spécifique de la pluie dans cette région. Sachant déjà que la pluviométrie moyenne au poste de d'Oulmès est de l'ordre de 760 mm (Mahe *et al.*, 2012 ; Tra Bi *et al.*, 2013).

Toutefois, la hauteur la plus basse a été enregistrée en 2001 à Ain Loudah situé sur l'oued Korifla, qui arrive du Sud . C'est le sous bassin le plus sec de tout le Bouregreg. Vers la fin des années 70, une légère diminution des précipitations est notée dans tous les sous bassins. Confirmant ainsi les résultats de Khomsi (2014), une baisse générale des pluies est enregistrée dans l'ensemble du bassin versant du Bouregreg avec un changement dans le régime pluviométrique depuis 1979. En 2006 une augmentation des valeurs moyennes annuelles est nettement visible.

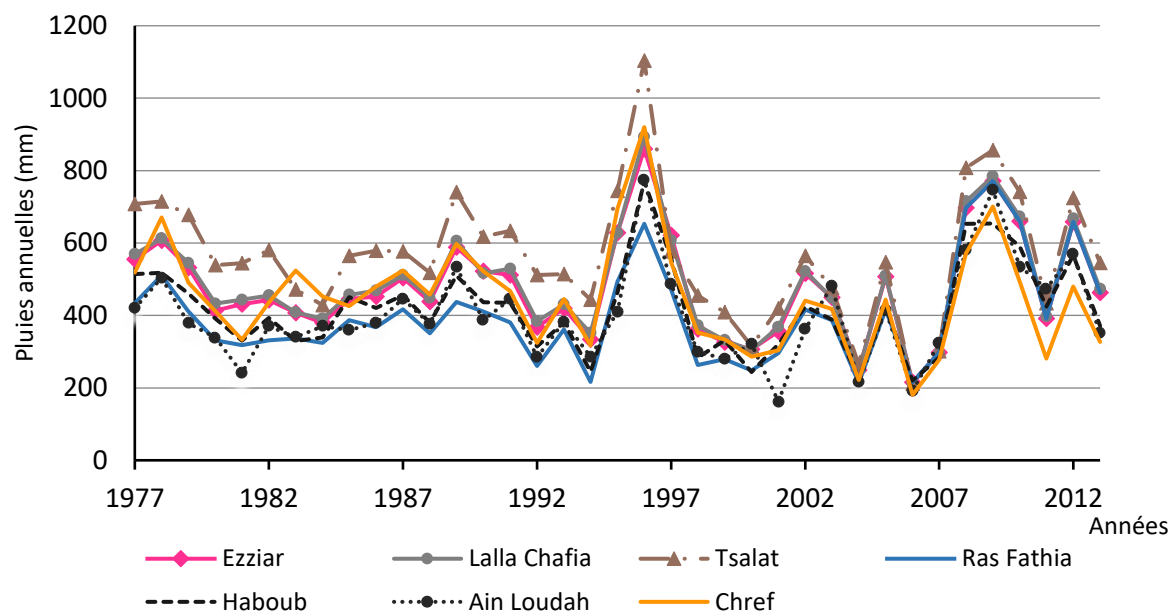


Figure 37 : Évolution des pluies annuelles (mm) sur les sous-bassins du Bouregreg entre 1977 et 2013.

Les sous-bassins définis ont des pluies qui sont significativement peu différentes les uns des autres, hormis deux régions qui ont le plus de contraste Tsalat et Ain Loudah. La pluviométrie du premier sous-bassin est supérieure de 40 % à celle d'Ain Loudah, du fait de la différence de situation géographique : une différence décroissante entre les deux régions et sur toute la période est notée. A priori, c'est la région de Tsalat (le haut bassin) qui témoigne d'une tendance significative à la baisse comparée à la région d'Ain Loudah où la tendance à perdre de pluies est faible (Fig. 37).

Toutefois, la perte d'environ 100 mm annuellement sur le haut bassin (région la plus pluvieuse) enregistrée depuis la fin des années 90, soit depuis une vingtaine d'année par rapport aux régions plus basses, n'augure rien de bon pour les prochaines décennies, car si cette tendance se confirme cela impliquerait une diminution durable de l'approvisionnement en eau douce au barrage SMBA par l'oued Bouregreg. Ce résultat met en évidence que les régions du bassin versant du Bouregreg réagissent différemment au réchauffement du climat. Cette réponse dépend des caractéristiques de chaque région considérée. En définitive, la distribution spatiale des sept sous régions n'est pas surprenante compte tenu des principales influences du relief et de la continentalité.

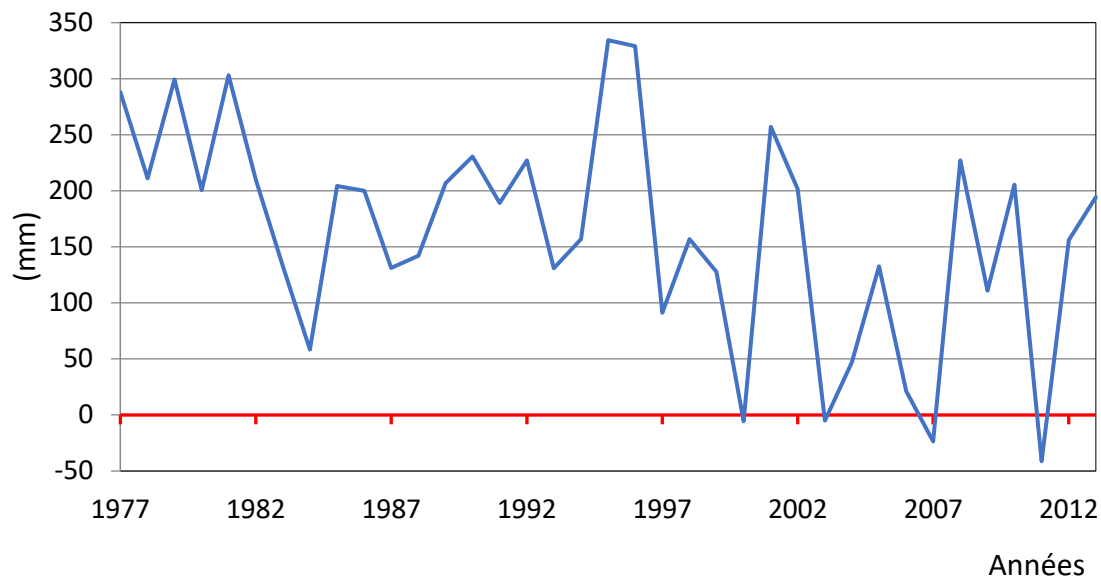


Figure 38 : Différence des pluies annuelles (mm) entre la région de Tsalat et celle d'Ain Loudah (1977-2013).

II.4 Évolution des débits

La figure 38 présente les débits annuels disponibles sur de longues chroniques depuis 1977 jusqu'en 2007 au niveau de plusieurs stations : Tsalat, Ezziar, Ras Fathia, Ain Loudah, Lalla Chafia, Haboub et Sidi Jabeur. Depuis 1980-1982, les débits annuels sont plus faibles comparés à ceux des années 70 ; ce qui indique une sécheresse. Celle-ci a nettement influencé l'hydrologie à la même période. En outre, un maximum noté en 1996 est déjà repéré sur la figure 36 indiquant une année de forte pluie. Il s'agit de la période d'un maximum de crue enregistré pour l'ensemble des stations, ce qui est cohérent avec les résultats de Khomsi *et al.* (2012). L'année 1996 correspondait à une forte anomalie NAO, favorable à la pluie au Maroc. Ces résultats sont à rapprocher de ceux trouvés par Singla *et al.* (2009) qui décrivent également une diminution des écoulements (débits mensuels et annuels) au Maroc depuis la fin des années 70- début des années 80. Nous supposons donc que la diminution des écoulements serait due à une diminution globale des précipitations sur les bassins versants étudiés.

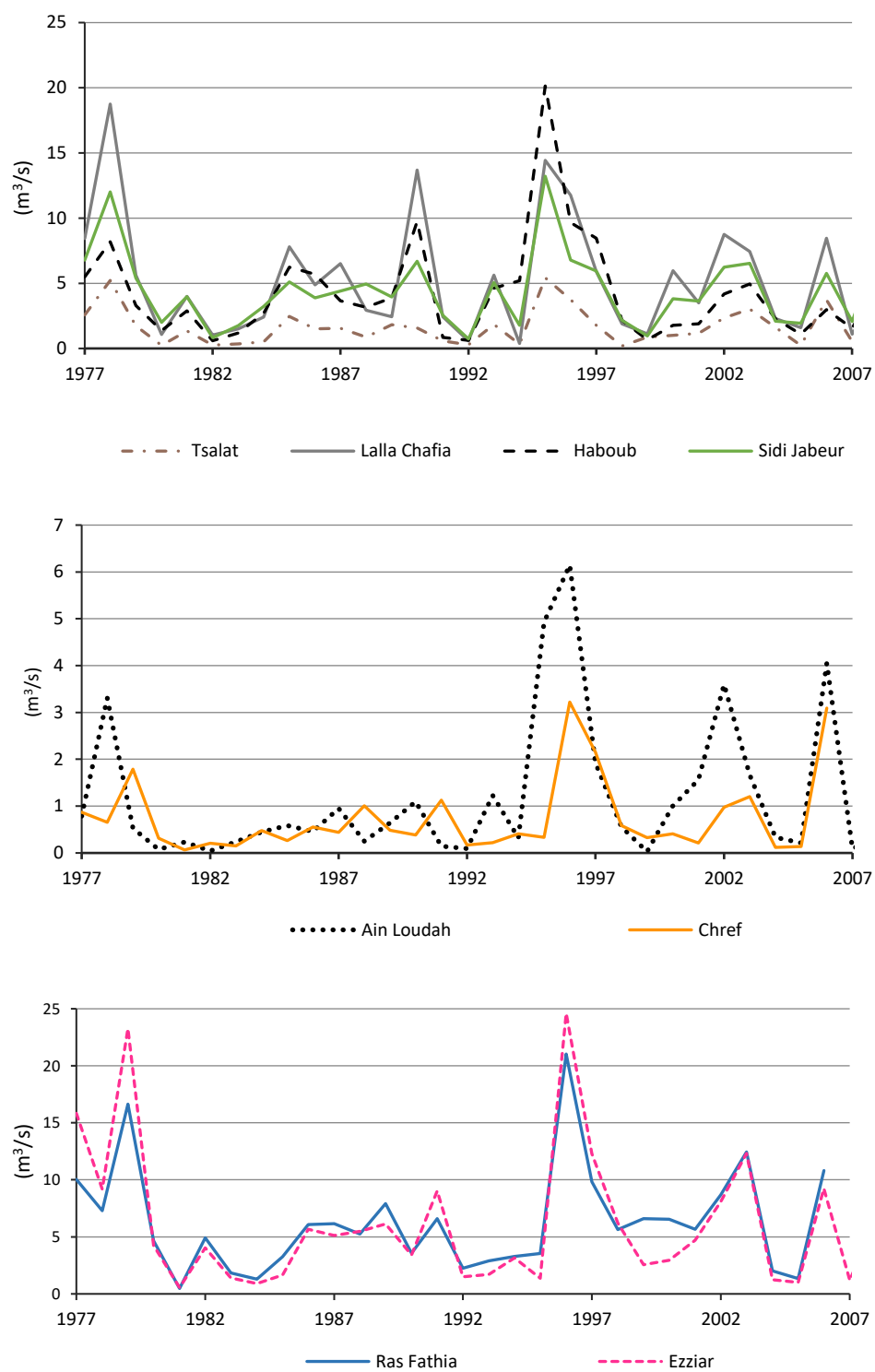


Figure 39 : Évolution des débits annuels (m^3/s) sur le bassin du Bouregreg pour la période 1977-2007.

Par ailleurs, la variabilité entre les stations étudiées est proche avec quelques différences notables sur toute la période d'étude. Le débit au niveau des différentes stations (Ezziar, Ras Fathia, Haboub, Lalla Chafia et Sidi Jabeur) est beaucoup plus élevé par rapport au débit enregistré aux stations Ain Loudah et Chref. Celles-ci situées sur le bassin de l'Oued Grou et Korifla, présentent un comportement singulier et une variabilité moindre dans le temps. Ces régions n'ont donc pas connu un changement aussi notable qu'au Nord et au Nord-Est. La différence observée entre les stations peut s'expliquer par la plus forte dénudation des états de surface du bassin de l'oued Grou; celui-ci est situé plus au sud et il est plus sec que le bassin de l'oued Bouregreg; donc il est sans doute susceptible à des ruissellements plus élevés dès le début de la saison des pluies.

Les stations Ezziar et Ras Fathia présentent un comportement identique et une variabilité interannuelle particulièrement due à leur proximité de la zone côtière où les apports en eau sont étroitement liés aux précipitations qui sont de l'ordre de 400 mm et sont plus importants en période de crues. Enfin, les autres stations Tsalat, Sidi jabeur, Haboub et Lalla Chafia qui sont situées au niveau des oueds Bouregreg et Grou montrent des résultats assez importants. La topographie joue cependant un rôle primordial, puisque les régions les plus arrosées sont situées sur le haut bassin montagneux, ce dernier est caractérisé par l'encaissement accusé de ses vallées, par des crêtes culminantes et des hauts plateaux qui traversent le nord du pays, et concentrent les précipitations les plus importantes du pays vers le barrage SMBA par deux principales rivières, l'oued Bouregreg et l'oued Grou. Quant à Lalla Chafia, elle est située dans des dépressions alluvionnaires à l'instar de la nappe de Tanoubert, près de Mâaziz (province de Khémisset). Elle est localisée dans une bande large traversée par l'oued Tanoubert, affluent du Bouregreg et principale source de son alimentation en période des crues.

L'étude des débits régionaux met en évidence des modifications nettes des débits annuels qui se traduisent en général par une augmentation des débits en 1996. Cette année nous semble intéressante comme référence pour comparer la différence des situations avant et après cette date et suivre l'évolution mensuelle des séries tout en décrivant le comportement saisonnier au niveau de chaque station. Suivant les graphes (Fig. 39), les débits mensuels augmentent à partir du mois de septembre jusqu'à un pic au mois de février, une baisse très significative est observée surtout pendant la saison sèche qui coïncide avec les mois de juin-août. Toutefois, on remarque des débits plus élevés sur l'ensemble des stations dès septembre et octobre jusqu'en décembre et parfois même janvier, puis systématiquement des débits plus faibles à partir de janvier-février après 1996. Ces constatations correspondent bien à la baisse moyenne des pluies observée sur l'ensemble du bassin depuis les dernières décennies. En outre les débits d'étiage sont très faibles, ils indiquent une très faible réserve souterraine et certainement une très faible recharge.

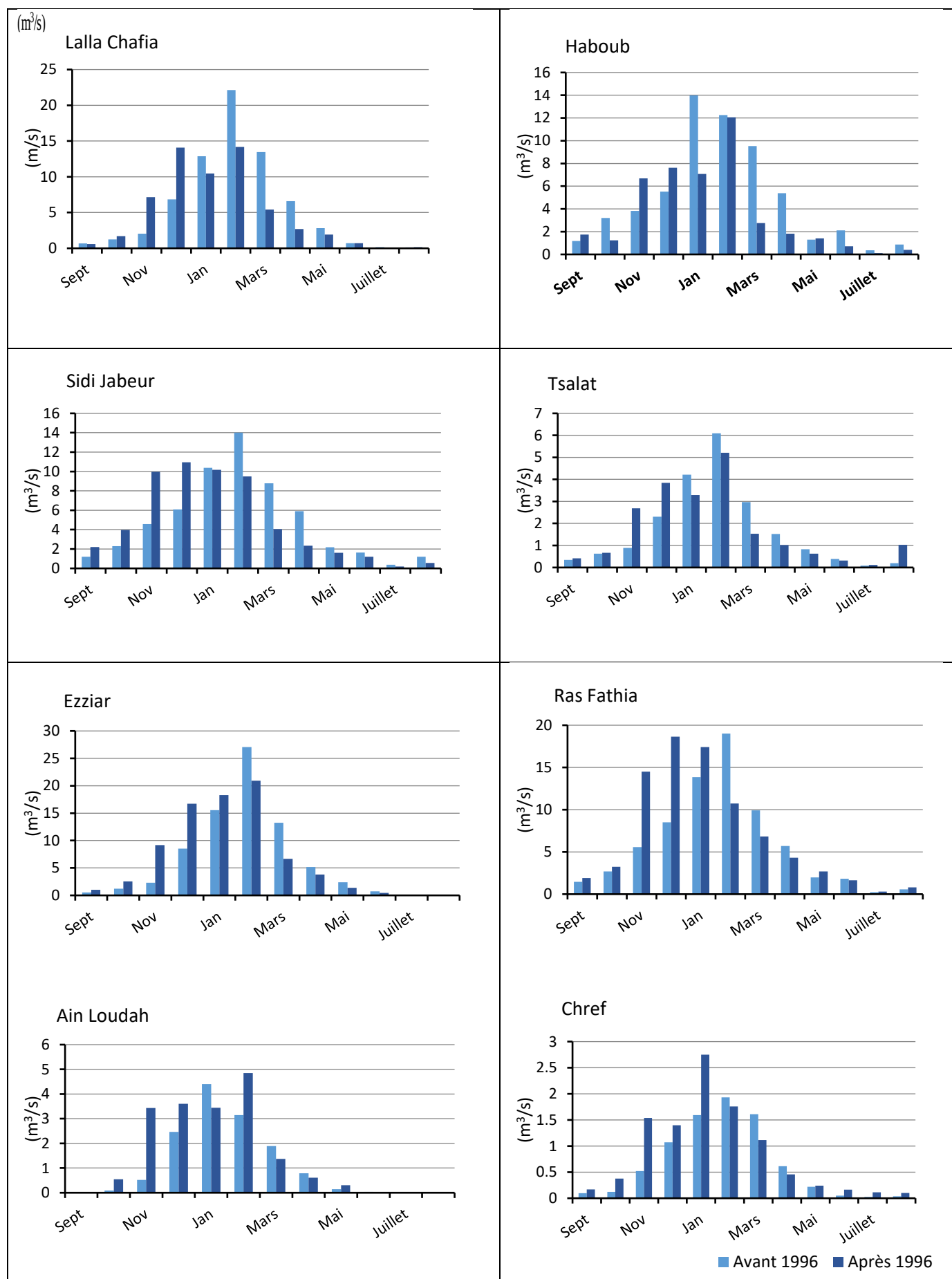


Figure 40 : Évolution des débits mensuels (m^3/s) par station du avant et après 1996 pour la période 1977-2007.

Conclusion

A travers l'étude de l'évolution hydroclimatique du bassin versant du Bouregreg, les pluies et les débits sont assez bien connus sur ce bassin et ses principaux affluents. Les méthodes statistiques de détection de ruptures ont montré que la période de rupture majeure se trouve durant la deuxième moitié des années 70 et le début des années 80. Depuis cette date *la variabilité hydroclimatique s'est matérialisée par une alternance de périodes humides et sèches au regard de l'évolution des pluies et débits.

Dans cette partie d'analyse hydroclimatique, l'étude régionale a permis d'identifier sept sous-régions pluviométriques principales. La distribution spatiale de ces sous-régions est influencée par la continentalité et la topographie. L'évolution des indices pluviométriques régionaux calculés met en relief la période déficitaire qu'a vécu le nord du Maroc au début des années 1980. Une baisse générale des pluies est remarquée sur l'ensemble du bassin versant du Bouregreg – zone d'étude - depuis 1979. Ce changement est marqué également par une légère augmentation des pluies en région méditerranéenne, et une diminution significative sur les autres régions depuis la fin des années 70. Nous supposons que la diminution des débits observée est due principalement à la diminution des précipitations sur le bassin versant du Bouregreg.

***CHAPITRE 5 : RECONSTITUTION DE LA VARIABILITÉ PASSÉE
DES APPORTS SÉDIMENTAIRES DE L'OUED BOUREGREG***

Introduction

Une analyse pluridisciplinaire des archives sédimentaires d'une terrasse alluviale de l'oued Bouregreg prélevées au niveau estuarien est présentée dans ce chapitre pour fournir de précieuses informations sur l'évolution hydroclimatique des dernières décennies, les événements extrêmes et sur les effets des actions anthropiques passées et leurs impacts sur les apports sédimentaires en aval de l'oued Bouregreg. Ainsi dans un premier paragraphe, seront présentés les études sédimentologique, géochimique et géochronologique de la colonne sédimentaire, dans un second, l'approche paléohydrologique permettra d'identifier les paléo-crues intenses et les facteurs de contrôle climatique ensuite dans un troisième paragraphe, sera abordé l'impact du barrage SMBA sur le transit sédimentaire vers l'aval. Bien que deux carottes BR1 et BR2 aient été prélevées, cette dernière sera étudiée plus en détail.

Le travail de recherche présenté dans ce chapitre a fait l'objet d'un article scientifique intitulé « Fluvial sediment transport degradation after dam construction in North Africa » publié dans *Journal of African Earth Sciences* (Annexe 2).

I. Identification des paléo-crues

I.1 Traçage et origine des sédiments

I.1.1 Etude sédimentologique

Les archives sédimentaires des deux carottes BR1 et BR2 montrent d'importantes variations granulométriques. Elles sont toutes les deux caractérisées principalement par un matériau silto-argileux avec des intervalles de passées sableuses et silto sableuses (Fig. 40 et Fig. 41) :

➤ **La carotte BR1** (Fig. 40) : présente un important banc argileux (entre 90 et 150 cm de profondeur) riche en matière organique, il est localisé dans la partie médiane de cette colonne sédimentaire alors que dans les deux autres sections, basale (de 150 à 200 cm) et sommitale (de 90 à 0 cm), les dépôts montrent une alternance de bancs à sédiments fins et silteux à silto-sableux. Des passées sableuses bien définies et constituées aussi de sédiments estuariens fins (avec D50 de 68 μm) sont nettement repérées aux niveaux 20 cm, 60cm, 70 cm et dans la partie basale de la carotte (Fig. 40).

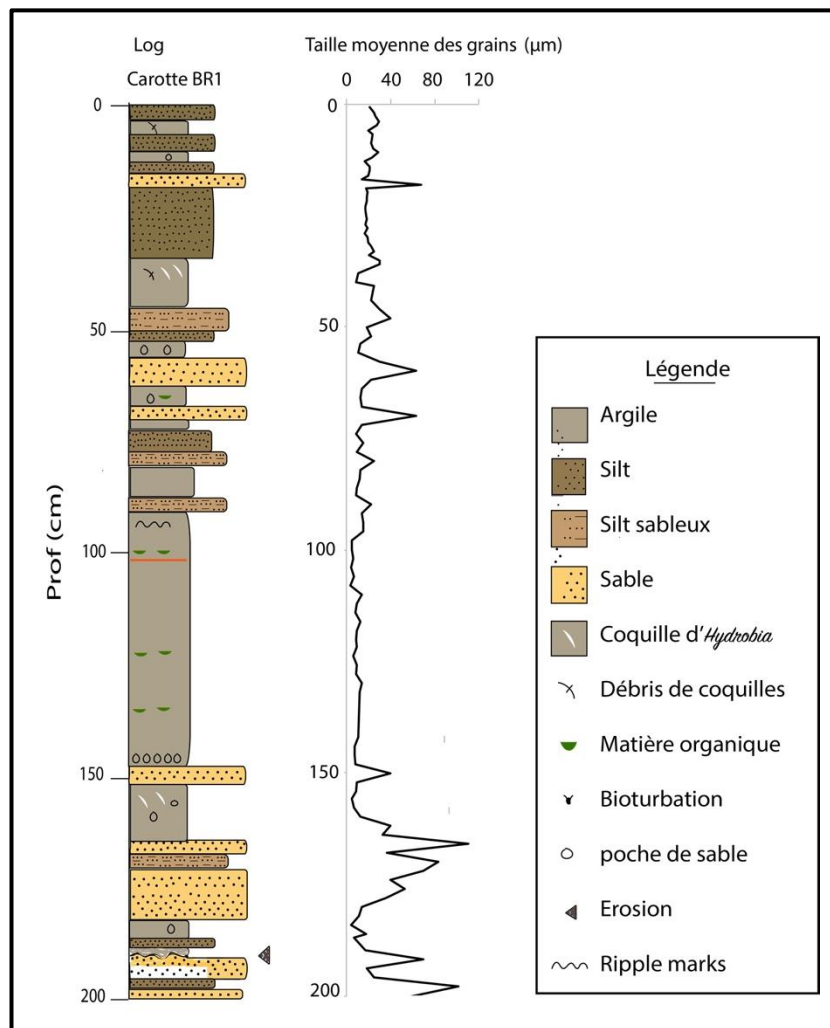


Figure 41 : Faciès sédimentaire et évolution de la granulométrie moyenne de la carotte sédimentaire BR1 prélevée au niveau de la terrasse alluviale du Bouregreg.

Le dépôt de BR1 a été prélevé un peu plus vers l'aval, dans une zone urbaine ; il présente des perturbations dues à sa proximité de la zone où ont lieu des travaux d'aménagement de la marina du Bouregreg. Les éléments remaniés ont perturbé la chronologie des dépôts lors de l'analyse géochronologique. De ce fait, elle est présentée dans cette étude en raison des informations qu'elle révèle sur les dépôts et sur la mise en évidence d'une variabilité latérale, tout en confirmant la nature essentiellement silto-argileuse des sédiments.

➤ **La carotte BR2** (Fig.41) : Elle possède une dominance des sédiments argileux avec une alternance de bancs à matériel plus grossiers : De la base à 145 cm de profondeur environ, le dépôt est principalement constitué de bancs d'argile molle riche en matière organique et des fragments de coquilles d'*Hydrobia* sp. Cet espèce est un petit gastéropode vivant dans des milieux où les apports d'eau douce sont importants et elle est communément retrouvée dans les sédiments vaseux.

Dans l'accumulation sédimentaire localisée entre 145 cm à 105 cm de profondeur, une fine couche de sable fin (vers 144 cm) est surmontée par des niveaux silto-sableux plus importants qui alternent ceux argileux. Dans le niveau sédimentaire situé entre 104 cm et 83 cm de profondeur, nous retrouvons le dépôt d'argile riche en matière organique sous forme de végétaux (racines) avec des bioturbations à la base. Dans le niveau allant de 82 à 48 cm de profondeur, le dépôt est formé essentiellement d'une fraction plus grossière (sable et silt). La fraction fine argileuse ne forme qu'une fine couche (78-75 cm). Apparaît ensuite, un banc argileux (46-20 cm), riche en matière organique et en l'espèce *Hydrobia* sp. Au-delà jusqu'au sommet, des dépôts de sable fin riche en fragments de bivalves alternent avec des niveaux argileux ; vers le sommet de la colonne sédimentaire de la carotte BR2 apparaissent des poches de sable et des coquilles parfois entières au sein d'une couche argileuse. En effet, dans les premiers 20 cm de dépôt, la granulométrie des sédiments varie entre deux classes, l'une constituée de limon fin (12 à 20 μ m), et une seconde correspondant à un sable fin (95 à 112 μ m), indiquant deux conditions de dépôt absolument différentes (Fig. 41).

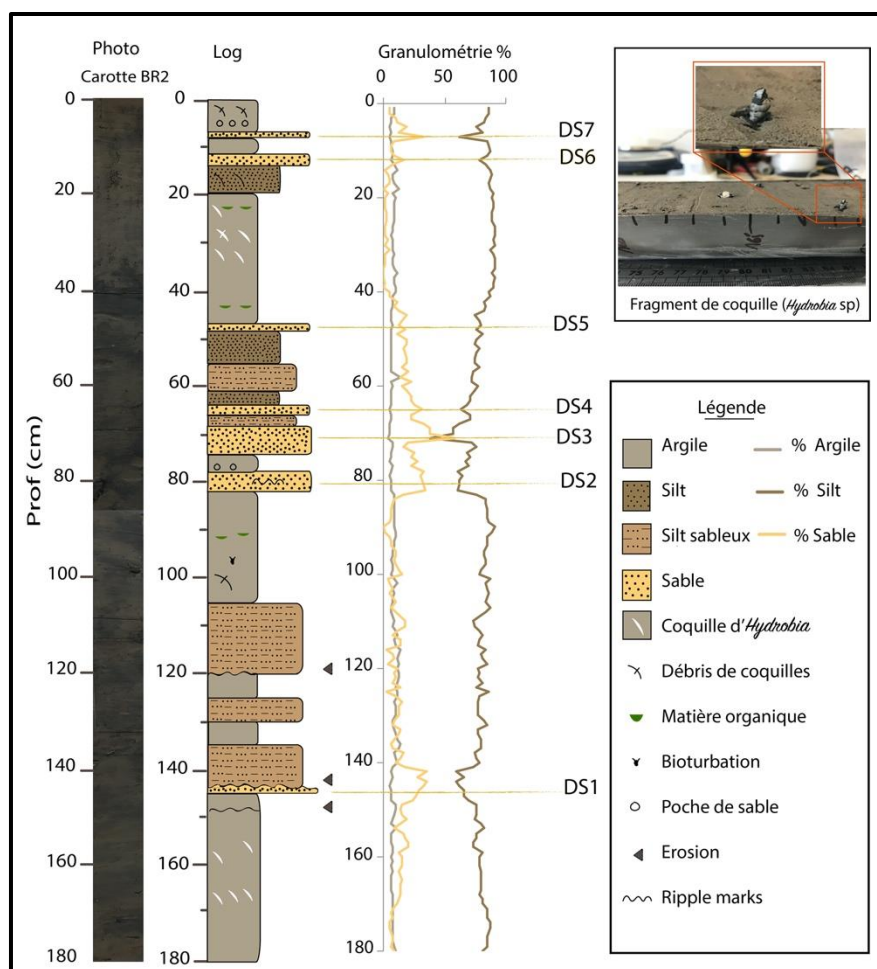


Figure 42 : Faciès sédimentaire et évolution de la granulométrie moyenne de la carotte sédimentaire BR2 prélevée au niveau de la terrasse alluviale du Bouregreg (DS : Horizon à dépôt grossier).

L'étude litho-stratigraphique de la carotte BR2 présente sept dépôts avec une fraction granulométrique grossière, notes de DS1 à DS7 dont 4 (DS1, DS2, DS3 et la DS7) sont retrouvés dans la colonne sédimentaire BR1 (Fig 42). Ils seraient attribués à des apports de crues intenses. La variation de la profondeur de ces niveaux dans les deux carottes est une tendance générale imputable aux sites de carottage éloignés et à une variation dans le temps (année de carottage 2016 pour BR1 et 2017 pour BR2).

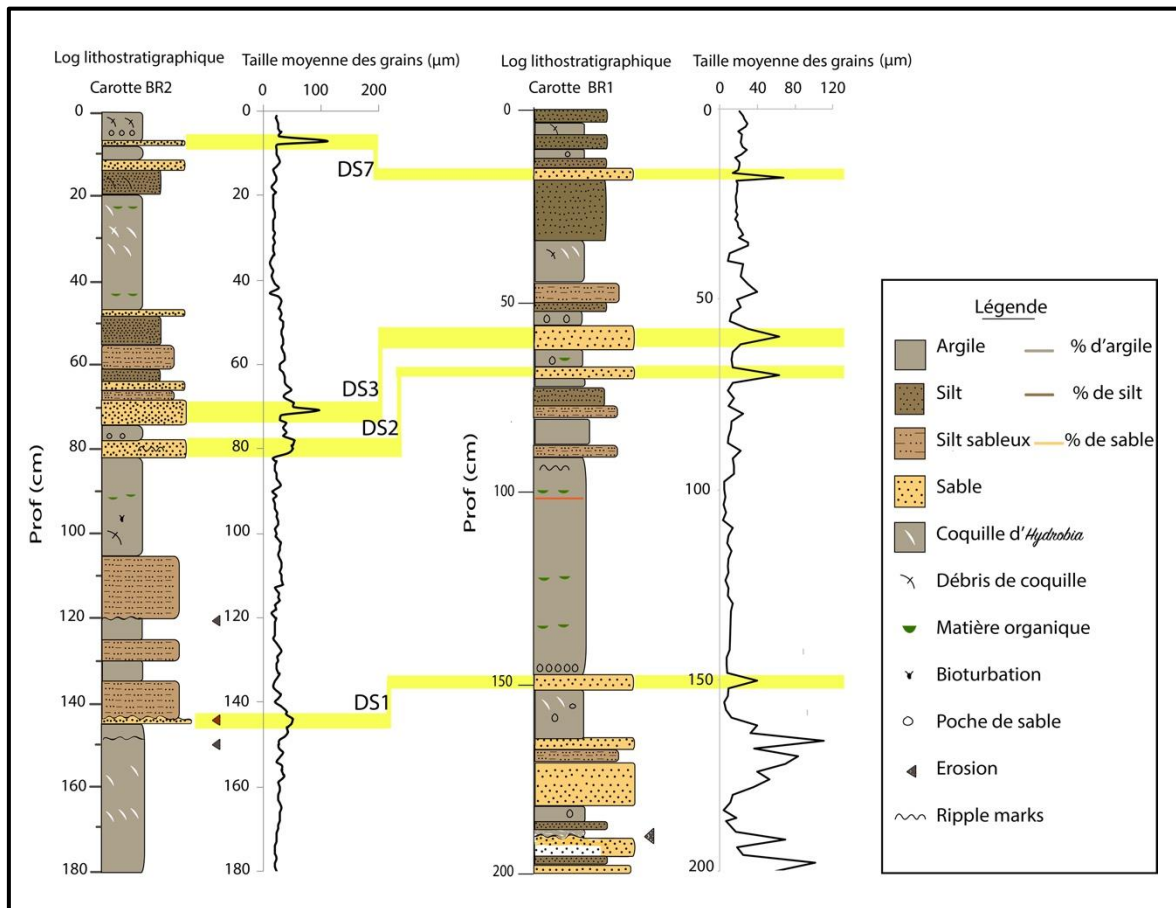


Figure 43 : Similitude des dépôts de forte énergie fluviale, retrouvés dans les 2 carottes sédimentaires BR1 et BR2.

I.1.2 Analyse géochimique

Trois éléments ont été utilisés pour l'analyse géochimique des dépôts de la carotte BR2 : Le Fer (Fe), le Titane (Ti) et le Zirconium (Zr). Le profil de la teneur en Fe présente des fluctuations en fonction de la profondeur (Fig. 43), ses fortes teneurs sont associées à la fraction argilo-silteuse. Selon les études géochimiques déjà effectuées au niveau de l'estuaire du Bouregreg, Nadem *et al.* (2015) ont montré que cet élément a une source lithologique, et selon Benmessaoud *et al.* (2005), les fortes teneurs en Fe enregistrées dans les sédiments du Bouregreg sont surtout notées pendant les périodes de fort lessivage d'où son origine continentale.

Quant aux concentrations en Zr et en Ti, elles révèlent des pics associés aux sables moyens et fins. L'origine naturelle de ces deux éléments (Zr et Ti) est plus précisément d'origine crustale (Bounouira, 2007) ; ils sont ainsi issus de l'altération des roches silicatées. Selon Tribouvillard *et al.*, (2006) quand les dépôts sédimentaires sont fortement enrichis en Zr et Ti, ceci indique une augmentation de l'érosion dans le bassin versant ; d'autres chercheurs (Kotti *et al.*, 2018) ont souligné que les variations dans la granulométrie et la géochimie des dépôts indiqueraient des changements de la dynamique sédimentaire. Cela confirme les résultats obtenus par l'analyse granulométrique et géochimique des dépôts sédimentaires de la carotte BR2. Les sept niveaux sableux identifiés (DS1, DS2, DS3, DS4, DS5, DS6 et DS7) correspondraient à des dépôts d'événements de haute énergie (Fig. 41).

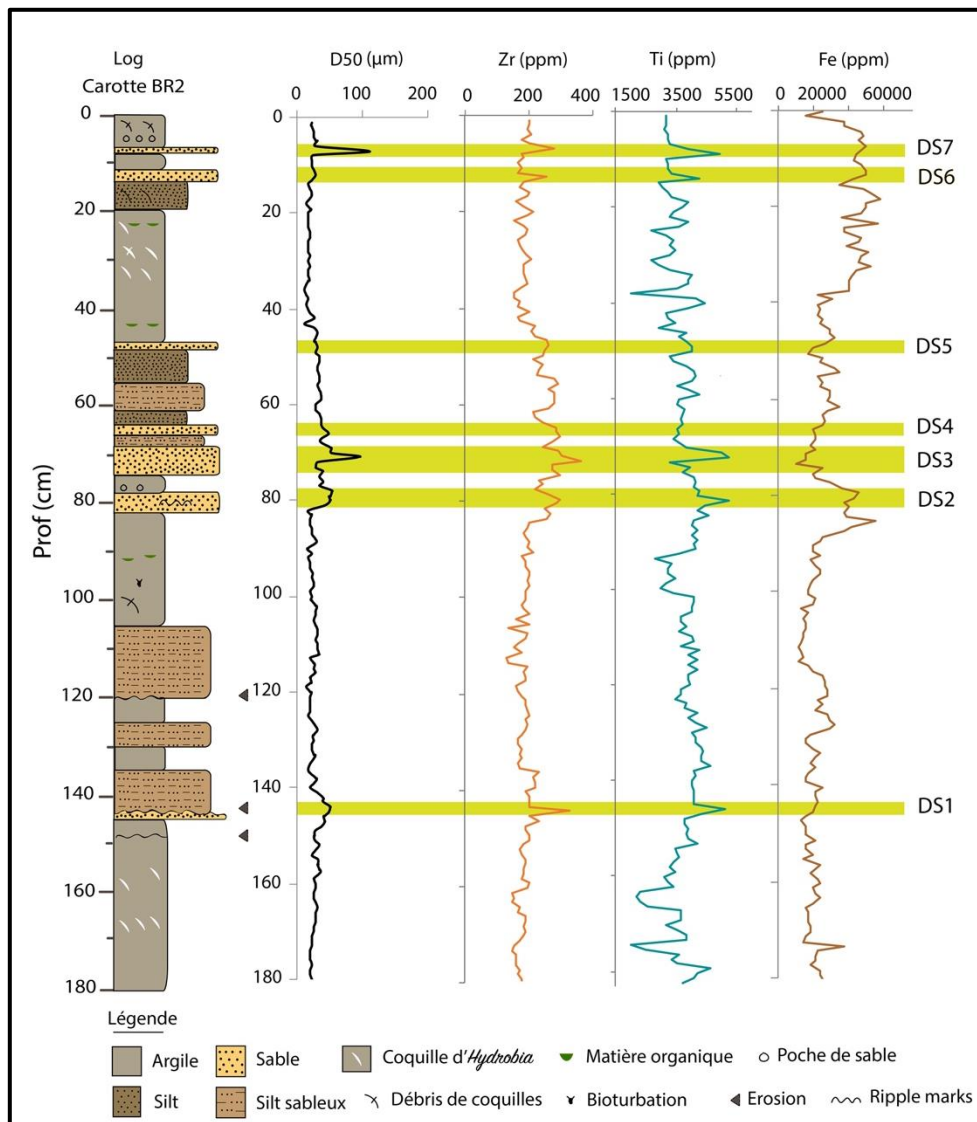


Figure 44 : Évolution des éléments géochimiques (Zr, Ti et Fe) le long de la colonne sédimentaire BR2.

I.2 Géochronologie

L'étude de l'évolution des flux sédimentaires de l'oued Bouregreg nécessite un modèle d'âge dont la précision doit permettre de situer dans le temps les paléoenvironnements extrêmes et les environnements passés. Le modèle d'âge a été établi en se basant sur des méthodes classiques pour un laps de temps court. Dans cette étude, le plomb-210 ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$; $T_{1/2} = 22,3$ ans) et le césium-137 (^{137}Cs ; $T_{1/2} = 30$ ans) ont été utilisés : $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ est un isotope naturel du plomb qui se forme pendant la séquence de désintégration de ^{238}U (Uranium -238) alors que ^{137}Cs est un isotope radioactif artificiel produit principalement par les essais nucléaires atmosphériques et il est présent dans l'environnement à partir de 1954. Les profils de l'activité de ces deux radioéléments dans la colonne sédimentaire de la carotte BR2 sont représentés sur la figure 44.

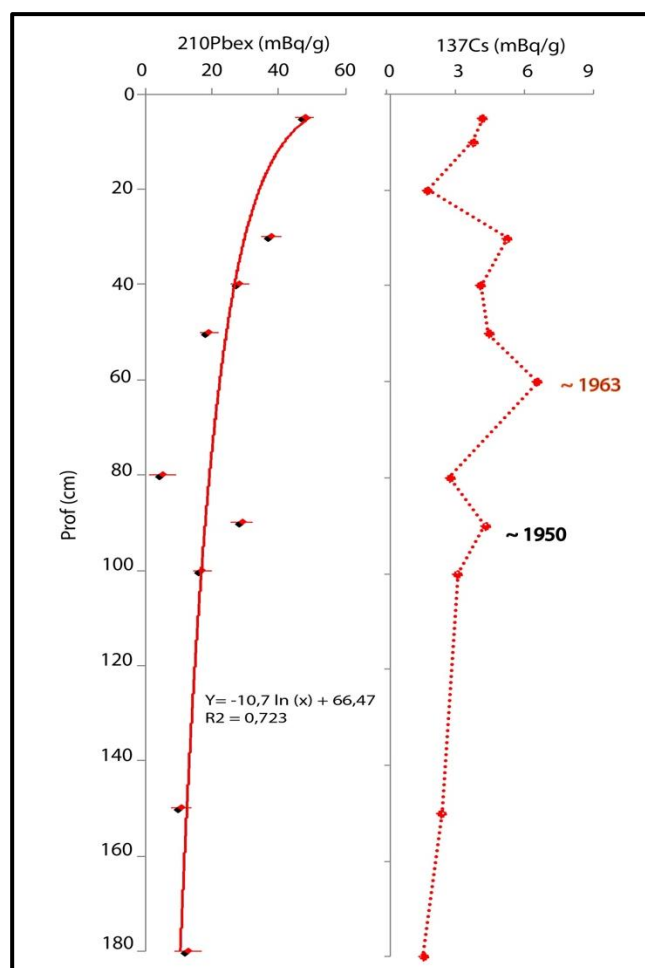


Figure 45 : Les profils verticaux des activités du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (a) et ^{137}Cs (b) dans les sédiments de la carotte BR2.

I.2.1 Distribution du ^{210}Pb

Le profil vertical de l'activité du ^{210}Pb montre qu'elle est enregistrée dans toutes les unités lithologiques et qu'elle suit globalement une décroissance relativement exponentielle en fonction de la profondeur (Fig. 44a). Cette diminution des activités en ^{210}Pb serait attribuée à la décroissance radioactive. La plus importante activité est notée en surface (40-50 mBq/g). Toutes ces informations indiquent que les dépôts seraient récents et probablement postérieurs à 1900, soit 5 fois sa période de désintégration qui est de 22,3 ans.

I.2.2 Distribution du ^{137}Cs

Le profil vertical de l'activité du ^{137}Cs est utile pour une éventuelle validation ou un ajustement des datations effectuées par le ^{210}Pb (Fig. 44b). Depuis 1945, plus de 500 essais nucléaires atmosphériques parmi 2400, ont été réalisés dans l'hémisphère Nord selon l'Institut radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN, 2006). Les concentrations faibles voire nulles en ^{137}Cs , caractérisent la période antérieure à 1950 (Fig. 45) ; celle des premiers apports anthropiques de cet élément radioactif, alors que le pic de son activité est associé à des niveaux de retombées maximales liés à la période des essais atmosphériques d'armes nucléaires 1954 à 1958, et surtout en 1961 et 1962 avec un pic pour cette dernière année (à elle seule 118 essais atmosphériques) avec 40% de la puissance totale libérée. L'année suivante, 1963, est considérée comme l'année des retombées maximales de ces essais nucléaires (IRSN, 2006). Pendant la période 1945-1980, ce radionucléide artificiel s'est progressivement déposé sur l'ensemble de la planète. Son enregistrement radioactif dans les sédiments enfui est un marqueur chronostratigraphique à court et moyen terme, et les systèmes côtiers sont les meilleurs environnements dont le taux de sédimentation élevés des sédiments permet un enfouissement rapide de tous les matériaux déposés (Bianchi, 2007).

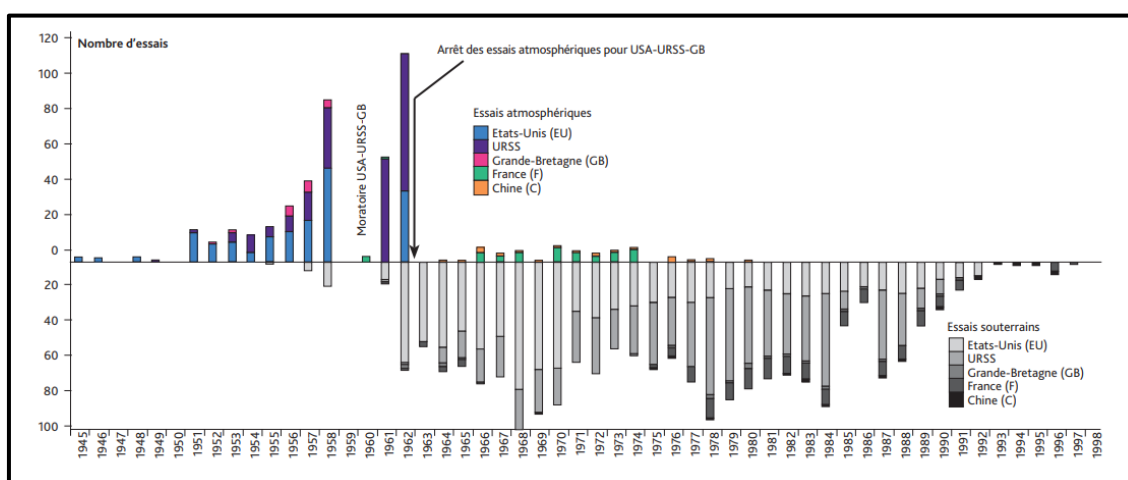


Figure 46 : Évolution du nombre d'essais nucléaires atmosphériques entre 1945 et 1998 (IRSN, 2006).

Ainsi, la distribution du ^{137}Cs dans les sédiments de la carotte BR2 montre des horizons relatifs à l'histoire de la contamination des sédiments par le ^{137}Cs . Son activité est non négligeable à partir de 150 cm de profondeur (Fig. 44b) ; ceci peut être associé à la période des premiers essais nucléaires aériens en 1950 (IRSN, 2006). La forte activité en ^{137}Cs est notée à 60 cm de profondeur (avec en moyenne de 6,65 mBq/g), elle correspondrait à la période des essais nucléaires en haute atmosphère avec comme maximum l'année 1963. De ce fait nous supposons que ce dépôt est associé à cette période.

I.3 Taux de sédimentation

En utilisant les horizons de sédiments datés, le taux d'accumulation de sédiments peut être mesuré. Il est calculé en considérant les hypothèses du modèle Flux constant et Sédimentation constante (CF:CS). Ce modèle a été proposé, à l'origine, par Goldberg (1963) et ensuite développé et appliqué par Robbins *et al.* (1975). Il est simple et se nomme « *modèle à flux constant et vitesse de sédimentation constante* (CFCS) ». Il est basé sur l'hypothèse selon laquelle il n'y a ni mélange ni diffusion de Pb dans les sédiments (Goldberg, 1963). Bien que la vitesse de sédimentation, exprimée en cm/an, ne reste pas constante au cours du temps, Sabatier *et al.*, (2008) ont montré qu'il est possible d'utiliser ce modèle (CFCS) sur les intervalles sédimentaires perturbés par les événements extrêmes. Alors nous l'avons appliqué sur la carotte sédimentaire BR2 : le taux de sédimentation est estimé en moyenne de (+/-) 3,64 cm/an pour la période 1950-1978, d'environ 3,08 cm/an entre 1978 et 1990, et réduit à environ 0,41 cm/an entre 1990 et 2017. Durant 67 ans, la vitesse de sédimentation est graduellement réduite (Fig. 46).

II. Analyse paléohydrologique pour la reconstitution des crues extrêmes

L'ensemble des travaux d'observation, d'analyse granulométrique et géochimique ont permis d'identifier sept dépôts à fraction grossière (DS1 à DS7) et une succession de dépôts de sédiments fins d'origine estuarienne et/ou de fin de crue. En outre, afin de déterminer s'il y a un enrichissement en Pb, un facteur d'enrichissement (FE) a été calculé en incluant sa normalisation par rapport à l'aluminium (Al) puisque les concentrations de ce dernier dans le bassin versant du Bouregreg montrent des variations très limitées (Bounouira, 2007). FE est calculé selon l'équation suivante :

$$FE_{\text{Pb}} = (\text{Pb}/\text{Al})_{\text{échantillon}} / (\text{Pb}/\text{Al})_{\text{base naturelle}}$$

Le profil vertical du facteur d'enrichissement (FE) en Pb est représenté sur la Figure 46 ; il montre une variation entre la base et le sommet de la colonne sédimentaire de la carotte BR2, avec des valeurs comprises, respectivement, entre 7,27 et 12,61.

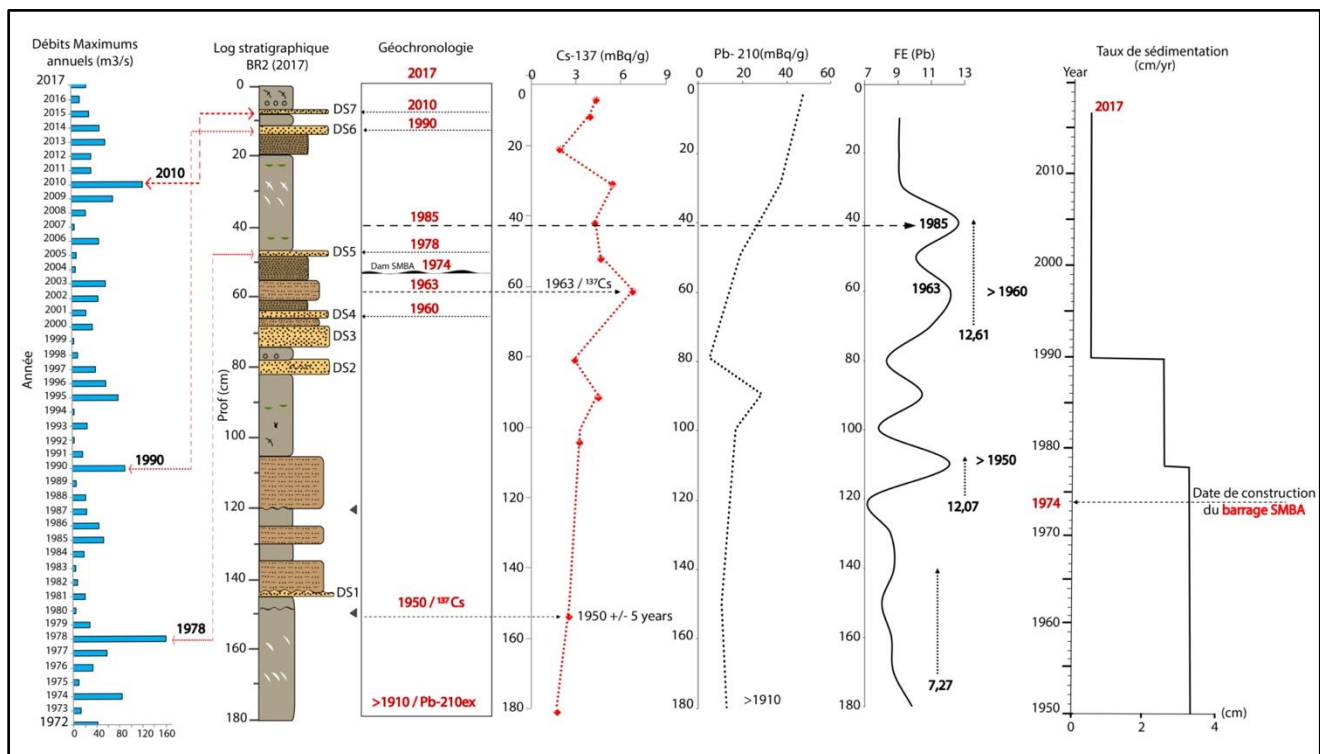


Figure 47 : Reconstitution historique des apports sédimentaires par les traceurs chronologiques et la comparaison des enregistrements de débit maximum annuel au niveau de la station hydrométrique de Lalla Chafia.

Dans l'unité DS1, une valeur basse autour de 8,02 est enregistrée, dans les unités médianes DS3 et DS4, celle plus élevée est autour de 12,34 alors qu'elle diminue dans les deux unités supérieures DS6 et DS7. Le pic indiquant une valeur de 12,07, enregistré à 110 cm de profondeur, serait lié à la forte augmentation de la production du Pb au cours des années 60 et au début des années 70 (Fig. 46). Un second pic de 12,61 est estimé vers 40 cm de profondeur, il serait probablement lié à la pollution en 1985 dans le bassin versant ; celle-ci est issue de la contamination par les anciens sites miniers d'Aouli, Mibladen et Zeïda, dans la Haute Moulouya. Suite à la dispersion, par les transports éoliens et hydriques, ces mines abandonnées ont contaminé à l'aval, les eaux de surface, les sols et les sédiments par les métaux lourds (Pb, Zn, Cu et Cd) (El Hachimi *et al.*, 2014). Vu que le haut bassin du Bouregreg prend sa source dans les montagnes du Moyen Atlas et rejoint celles de la Moulouya, les valeurs élevées du FE en Pb dans le dépôt de la zone d'étude, durant le début des années 80, pourraient être effectivement issu de cette pollution par le plomb.

En outre, les traceurs chronologiques utilisés dans cette étude ont été comparés aux historiques des crues disponibles, à la station de jaugeage Lalla Chafia située en amont du site pour la période 1972- 2017. La comparaison de ces enregistrements a permis d'affiner l'identification chronologique des événements sédimentaires de crue de la séquence (DS) au niveau de la terrasse alluviale de l'oued Bouregreg.

Ainsi en se basant sur une relation possible entre la granulométrie des sédiments et l'ampleur d'un événement, il apparaît que l'événement de 1978, serait la première phase hydrologique active enregistrée par les archives instrumentales après 1960, le débit était de l'ordre de $161 \text{ m}^3/\text{s}$. La crue aurait alors déposé la fraction sableuse de l'unité DS5 (Fig. 46). Les deux autres unités sus-jacentes DS6 et DS7 ont été affectées par deux autres événements hydrologiques ayant eu lieu en 1990 et 2010, avec des débits respectifs, de l'ordre de $90,10 \text{ m}^3/\text{s}$ et $123,34 \text{ m}^3/\text{s}$. Les dépôts sédimentaires associés à ces crues sont caractérisés par des passées sableuses à fraction granulométrique moyenne. Quant à l'unité DS4, elle correspondrait à un dépôt de crue intense survenue en décembre 1960 dont le débit était beaucoup plus fort, de l'ordre de $638 \text{ m}^3/\text{s}$ selon l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia.

Quant aux deux phases humides (1996 et 2002) ayant interrompu la période sèche entamée depuis les années 80, leurs paléocrues ne semblent pas avoir été assez intenses pour être enregistrées dans la colonne sédimentaire étudiée. L'absence de leurs enregistrements dans les archives sédimentaires serait probablement liée soit à la faible intensité du débit qui ne pouvait inonder la terrasse alluviale et déposer la fraction terrigène grossière, ou bien en raison, de la rétention de l'eau et du piégeage des apports solides dans la retenue afin de compenser le déficit hydrique noté à cette période dans le barrage.

L'enregistrement des dépôts de crues dans les archives sédimentaires étudiées, avant 1960 semble être incomplet. Les processus d'érosion et les erreurs probables dans les sources des données sur l'hydrologie pourraient être à l'origine de cette plus faible corrélation entre les deux enregistrements, sédimentaire et instrumental, entre 1960 et 1950.

III. Impacts climatique et anthropique sur les apports sédimentaires vers l'aval du barrage SMBA

L'étude du régime hydroclimatique dans la zone d'étude a montré une baisse des précipitations à la fin des années 70. Depuis cette date, la variabilité hydroclimatique du bassin est marquée par une alternance de périodes sèches et d'autres moyennement humides par rapport à l'évolution des pluies et des débits. Afin de mieux comprendre les influences atmosphériques à grande échelle, la relation entre les indices de précipitations et ceux de la circulation atmosphérique a été analysée en décrivant l'évolution de l'indice standardisé de précipitations (SPI) et celle de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) (Fig. 47). Il apparaît que la plupart des corrélations significatives sont négatives, ce qui indique que les valeurs extrêmes des paramètres hydroclimatiques étudiés dans cette zone (précipitations et ruissellement) peuvent être liées aux phases négatives des indices ONA.

Cependant, les années 1995 et 1996 ont connu une forte anomalie ONA favorable aux précipitations au Maroc. Selon Driouech *et al.*, (2010a), les précipitations sur le bassin versant du Bouregreg sont particulièrement affectées par l'indice ONA. Et comme le montre la figure 47, l'ONA présente une variabilité interannuelle importante et sa phase positive ou négative peut persister durant plusieurs années. Les années humides sont souvent liées à un indice ONA négative et les années sèches ont un indice NAO positif. En effet, la période 1977-1993 est généralement caractérisée par des années sèches et un indice NAO positif. Par conséquent, les apports fluviaux étaient faibles d'où un taux de sédimentation réduit (2 cm/an).

Les fluctuations de la NAO semblent impactées ainsi les variations de la vitesse de sédimentation ; un taux de sédimentation plus élevé est enregistré avant 1970, de l'ordre de 3,64 cm/an, et un taux plus faible de l'ordre de 1,75 cm/an durant les années sèches, entre 1980 et 1990. Le taux de diminution dû à la période sèche ne dépasse pas 0,3 cm/an.

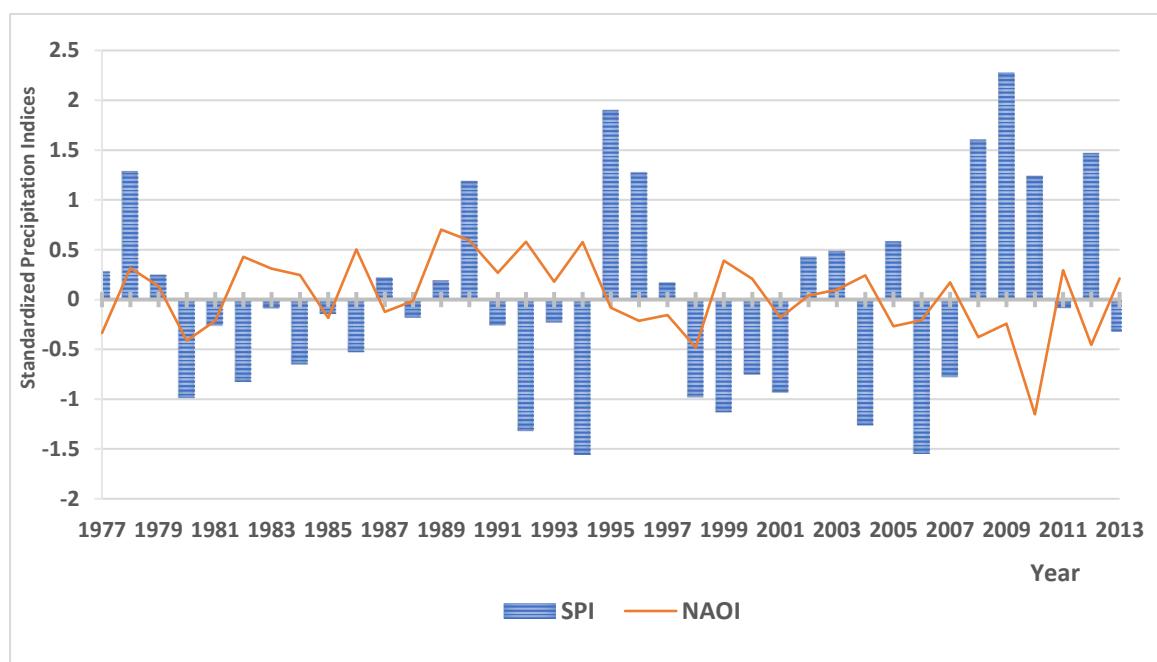


Figure 48 : Évolution de l'indice standardisé de précipitations (SPI) et l'indice climatique NAO entre 1977 et 2013.

En plus, cette réduction des apports en sédiments au niveau des terrasses alluviales coïncide aussi avec la construction du barrage SMBA sur l'oued Bouregreg. En effet, cet ouvrage semble avoir modifié encore plus la réponse naturelle de la partie aval du fleuve depuis 1974. Les sédiments résultant de la dégradation spécifique du bassin versant qui est estimée aux environs de 360 t/km²/an (Lahlou, 1986, El Boukhari *et al.*, 2019), contribuent à l'envasement de la retenue du barrage (estimé à environ 2,5 mm/an) et la grande part revient à la contribution des berges (Ezzaouini *et al.*, 2020).

Ce taux d'envasement plus élevé est corrélé aussi à la surélévation du barrage en 2006 qui piège plus de sédiments. Ceci a nettement influencé la vitesse d'accumulation des sédiments enregistrée au niveau de cette terrasse alluviale (Fig. 46). Cependant, les lâchers du barrage pourraient avoir amené du sable jusqu'à la plaine alluviale pendant les crues des dernières années et correspondraient aux trois unités d'une fraction granulométrique grossière (DS5, DS6 et DS7) relatives aux crues intenses et aux inondations de 1978, 1990 et 2010. Généralement, ces lâchers d'eau ne se font que quand le barrage est plein et fait face à une nouvelle crue importante venant de l'amont (Ezzaouini *et al.*, 2020). Néanmoins ces dernières années, ils se font rares en raison du déficit pluviométrique dû au réchauffement climatique.

Pour estimer l'impact du changement climatique et du barrage, nous avons séparé les deux facteurs. Puisque le barrage est installé en 1974, nous supposons qu'avant cette date le principal facteur contrôlant la diminution du taux sédimentaire est dû au changement climatique. Il apparaît que niveau de la zone d'étude l'appart de l'impact de la variabilité climatique est celle du barrage sur le déficit en apports fluviaux vers l'aval est respectivement d'environ 46,5% et 53,5% (El Aoula *et al.*, 2021).

Les résultats d'analyse granulométrique de la carotte BR2 montrent principalement une succession de petites couches de matériaux fins (silt ou argile) depuis la mise en eau du barrage Sidi Mohammed Ben Abdellah en 1974. Un taux de sédimentation très faible d'environ 0,41 cm/an est observé entre 1990 et 2017, alors qu'il était plus important d'environ 3,64 cm/an entre 1950 et 1978.

Conclusion

Des analyses sédimentologique, géochimique et géochronologique couplées à une approche paléohydrologique, appliquées à des dépôts sédimentaires de la terrasse alluviale du Bourgreg, prélevés en aval du barrage SMBA, ont permis de reconstituer la variation passée des apports sédimentaires de l'oued Bourgreg dans la zone estuarienne. En outre, les radioéléments (^{210}Pb et ^{137}Cs) dosés dans la colonne sédimentaire ont permis de mettre en place une chronologie approximative des dépôts de paléo-événements de crues intenses en leur attribuant un âge de manière plus fine. Sept horizons (DS1 à DS7) présentent des dépôts avec une fraction granulométrique grossière témoins des paléo-événements de crues intenses dont les trois dernières sont bien datées (1978, 1990 et 2010).

La variation verticale des dépôts de la terrasse alluviale du Bouregreg est le reflet des modifications de la dynamique du transport fluvial. Si le rôle du climat est incontestable dans cette histoire des fluctuations des flux hydro-sédimentaires vers l'estuaire du Bouregreg, il n'en est pas moindre pour le forçage anthropique marqué par la construction du barrage SMBA qui piège l'essentiel des apports terrigènes. Les impacts y sont doubles, l'envasement de la retenue et la diminution du flux de sédiments vers la mer. Celle-ci reste une question majeure à considérer dans l'étude de la dynamique des zones côtières en général et dans le devenir des estuaires, particulièrement dans un contexte de changement climatique.

CHAPITRE 6 : IMPACT DES TEMPÊTES HIVERNALES SUR LA CÔTE ATLANTIQUE: CAS DU LITTORAL DE RABAT-SALE

Introduction

Si l'accélération du changement climatique général constatée actuellement, produit entre autres, des effets sur la montée moyenne du niveau de la mer ; elle risque d'entraîner aussi une augmentation des instabilités climatiques et de la fréquence des tempêtes (Lozano et Swail, 2002). Ceci pourrait contribuer à accroître l'érosion des côtes et inonder les zones basses voire pénétrer plus loin dans les estuaires.

La variabilité climatique, les aménagements dans les bassins versants et le piégeage des sédiments dans les retenues sont pour beaucoup dans l'évolution des environnements côtiers. En outre, les causes du recul des littoraux sont multiples, et la conjonction des phénomènes naturels et anthropiques a nettement intensifié l'érosion en raison principalement de la pénurie en sédiments au niveau de la zone côtière, d'où une diminution de l'espace littoral.

De plus, la conséquence la plus probable dans le contexte du réchauffement climatique est, sans équivoque, la remontée du niveau marin qui est déjà amorcée. Celle-ci, le climat et l'altitude de la zone côtière constituent les principaux paramètres dont dépendrait le risque de submersion marine. À courte échelle de temps, le niveau de la mer est à son tour contrôlé par la marée, le vent, la pression atmosphérique et la hauteur des vagues.

En effet, à l'échelle régionale et sur un laps de temps court, la variation du niveau marin est peut-être liée aux tempêtes (surcotes). Dans l'océan Nord atlantique, l'ensemble est contrôlé par l'intensité de l'anticyclone des Açores et des dépressions nord-atlantiques. Selon l'indice ONA (Oscillation Nord atlantique), les dépressions se creusent alors que l'anticyclone se renforce (Fig. 48) ; par conséquent, le vent s'intensifie et augmente l'amplitude des vagues (Fig. 49). De tels événements ont touché la cote de Rabat-Salé durant cette dernière décennie dont les plus fortes tempêtes sont celles de 2014 et 2017, provoquant alors des dégâts considérables (Fig. 50).

Dans ce chapitre, nous présenterons un exemple d'étude de l'impact de tempête hivernale (le 28 février au mars 2017) ayant touché le littoral de Rabat- Salé. Elle était liée à une dépression dans l'océan atlantique, les vents étaient violents (100 km) et la marée haute. Basée sur des observations de terrain, les vagues avaient complètement inondé l'intérieur des terres, ont causé plusieurs dégâts sur les constructions et les infrastructures côtières et les eaux marines ont pénétré largement l'estuaire. Les dégâts notés à la suite de cette tempête révèle la vulnérabilité du littoral de Rabat-Salé aux risques côtiers (Érosion et submersion marine).

L'étude de l'impact des tempêtes hivernales sur la côte de Rabat à fait l'objet d'un papier scientifique (Short Note) qui décrit les effets de la tempête hivernale de 2017 sur le littoral.

Effects of the winter storms of 2017 on the Atlantic coast of Rabat: A preliminary evaluation

Effets des tempêtes hivernales de 2017 sur la côte Atlantique de Rabat :
Evaluation préliminaire

Zaineb BELKHAYAT*, Rajae EL AOULA & Nadia MHAMMDI

Geophysics and Natural Hazards Laboratory (LGRN), Institut scientifique; Geophysics, Natural Patrimony and Green
Chemistry Research Center (GEOPAC), University Mohammed V in Rabat, Maroc. *(belkhat-zineb@live.com)

Abstract. This paper considers the preliminary results of storms effects on the Rabat coast that occurred on 28 February and 1st March, 2017 in Morocco, in order to identify and manage risk coastal areas in the future. Indeed, the beaches were strongly eroded, the rock fills were destabilized and the constructions have been flooded and devastated.

Keywords: Storm, Erosion, Coast, Rabat.

Résumé. Cet article présente les résultats préliminaires des effets de tempêtes sur la côte de Rabat au Maroc, survenues entre le 28 février et le 1er mars 2017, pour but d'identification et de gestion des zones côtières à risque dans le futur. En effet, les plages ont été fortement érodées, les enrochements ont été déstabilisés et les constructions ont été submergées et détruites. Mots-clés: Tempête, Erosion, Côte, Rabat.

INTRODUCTION

The geographical situation of the Moroccan coastal cities makes them vulnerable to natural hazards and extreme events such as storms, tsunamis, floods and erosion ... In general, statistical data on the storms that affected the Moroccan coast during the last century are rare, although some references were quoted by Simonet & Tanguy (1962), Cherfaoui & Doghmi (2002), Minoubi et al. (2013) and El Messaoudi et al. (2016) about storm events that were generated during the winter, and caused damage to infrastructures, property and personal injury. The storms of 28 February and 1st March, 2017 generated waves with 6 to 7 m of significative height that reached the Moroccan coast between Kenitra and Tarfaya (National Meteorological Department, unpublished data). The objective of this short report is to describe some effects of this storm on buildings and coastal infrastructure along the coast of Rabat (34°N; 6°W).

STUDY AREA

The coast of Rabat is located in the north-west of Morocco, is oriented NE-SW and is mostly composed of lithified sand dunes parallel to the coastline, separated by longitudinal cliffs and depressions (locally called Oulja), transversally cut by the Bouregreg estuary that separates Rabat from Salé city.

Morphologically, the barrier beach of Rabat is characterized by lithified high dunes (probably ancient spits) eroded frontally by sea cliff. The southern part of the coast is made in general by small sandy beaches (Casino, Sables d'Or, Skhirat...) separated by rocky cliffs and limestone pavement platforms (South of Temara, Miramar, Guéville). (Gigout 1957, Akil 1980, Saaidi 1988, Chabli et al. 2003, Akil et al. 2008, Chahid, 2017).

MARINE WEATHER

According to the Moroccan National Meteorological Department, the storms that affected the Moroccan coast between Kenitra and Tarfaya on 28 February and 1st March 2017, and engendered swells, winds and windwaves from the north-west was due to a depression located in the North Atlantic Ocean combined with strong winds (100 km/h) and elevated tide amplitude (Fig. 48). The maximum significant height recorded in SIMAR point 1052036 by Puertos del Estado (<http://www.puertos.es/en-us/oceanografia/Pages/portus.aspx>) was about 3.68 m while the high tide was about 3.49 m on 28 February at 15h37 and 3.60 m on 1st March at 3h54.

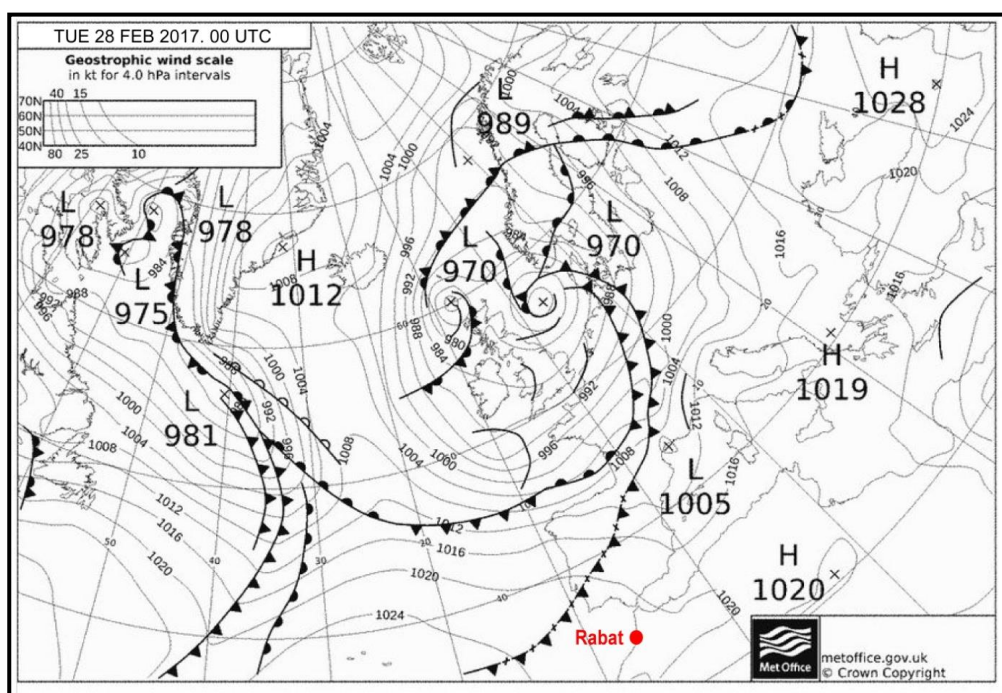


Figure 49: weather chart of 28 february 2017 at 00.00 UTC. Isobars in hPa. Altitude information is referenced to mean sea level.

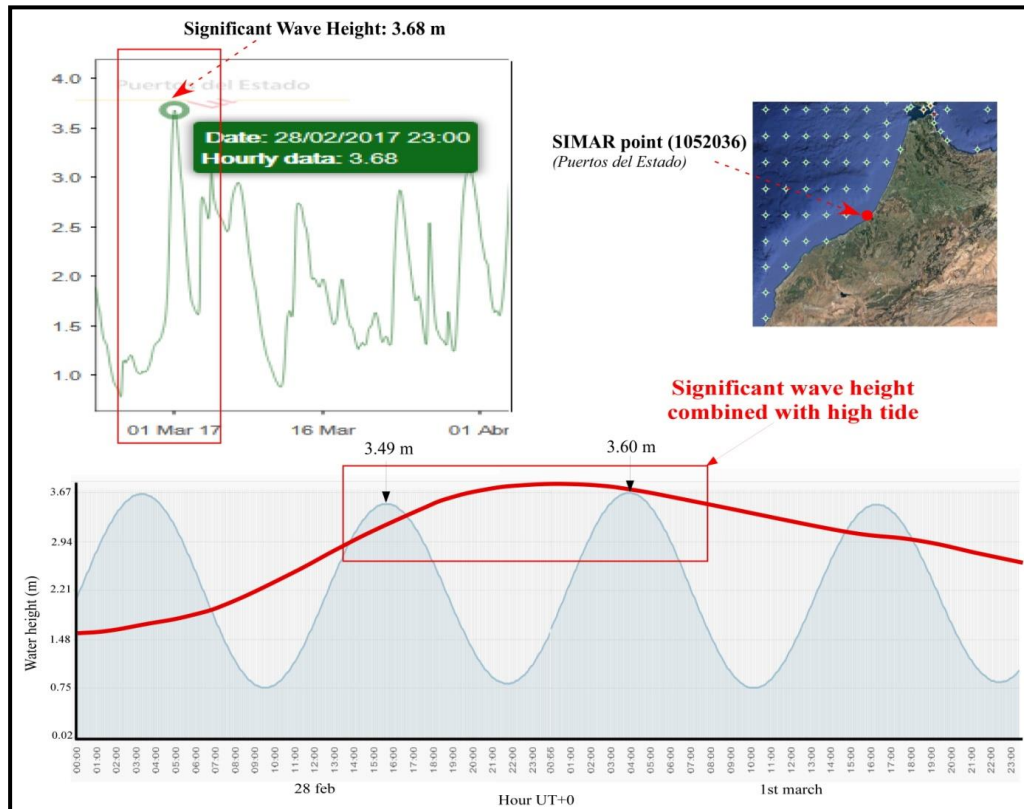


Figure 50: Significant height recorded in SIMAR point 1052036 by Puertos del Estado superimposed with high tide.

EFFECTS OF THE STORM OF 2017

The observed effects of both storms are mainly illustrated in figures 3 and 4.

Effects on the rocky cliff of Rabat

On the coast of Rabat, the waves reached buildings at a distance of 170 m from the shoreline. (Fig. 50,A) (N 34°1'46.48"; W 6°50'45.43"). Inundation damaged parts of the rocky cliff, the road and some coastal infrastructures, displaced boulders, washed away and deposited sand and trash on the 12 m high road (Fig. 3- C, D). By 7 March, although sand and stones had been cleared from the road and parking (Fig. 3-C2) by the Municipality, damage was still visible (Fig. 3-B).

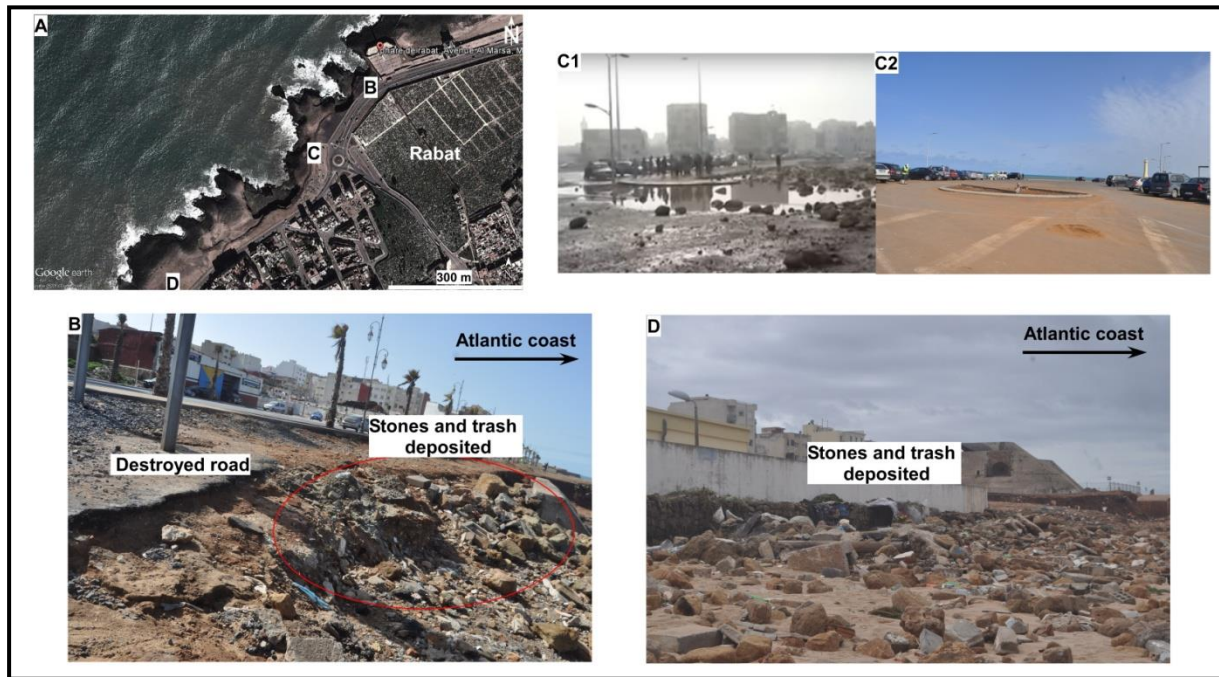


Figure 51: Damage caused by the storm surge on the Coast of Rabat. A: Location of the observation sites; B: Destroyed road, stones and trash deposited in the road; C1: Stones dragged away in parking; C2: Parking cleaned after the storm surge; D: Stones and trash deposited.

Effects on the sandy coast of Harhoura-Temara

Damage caused to the sandy coast of Harhoura and Skhirat was spectacular as coastal structures were severely affected since they were close to the beach and marine hydrodynamic energy was strongest. Flooding was observed along the coastal road and especially in the areas where the coastline was closest to infrastructures. The inundation depth reach was about 150 m (Fig. 4-C).

The wave currents were strong enough to destroy the 6 m high sidewalk (N 33°55'49.59"; W 6°57'26.40"), break and then displace stairs (N 33°55'45.41"; W 6°57'31.5") and wash away sand and boulders carved from the cliff (N 33°55'48.15"; W 6°57'23.99"). The largest boulder found at 30 m from coastline, attained a volume of $\sim 0.6 \text{ m}^3$ ($1.4 \times 0.8 \times 0.5 \text{ m}$) and 1.2 tons assuming a volumetric weight of 2000 kg/m^3 (Fig. 4). In addition, 6 persons were caught by the huge waves in Val d'Or beach; some were able to escape while a woman died in the hospital.

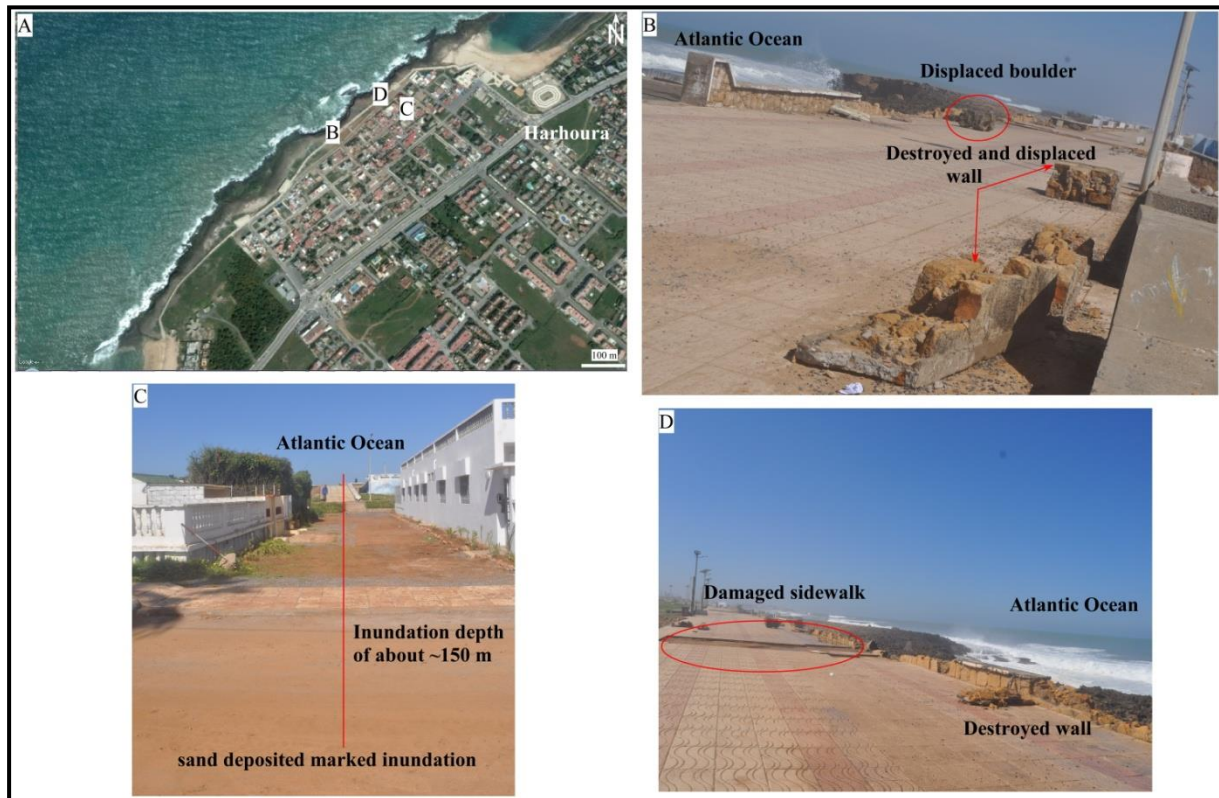


Figure 52: Damage caused by the storm surge on Temara. A: Framework; B: destroyed and displaced wall, displaced boulder (1.4 x 0.8 x 0.5 m); C: inundation marked by sand deposited (~150m); D: Sidewalk and wall destroyed.

DISCUSSION AND CONCLUSION

The effects of the winter storm of 2017 on the Atlantic coast of Rabat were briefly described in this note based on field observations, and showed that waves completely flooded the inland and caused several damages on coastal buildings and infrastructures. This extreme phenomenon was referred to using various terminologies; it could be a storm surge since it was induced by a summation of the effects of the depression off the North Atlantic Ocean, the strong winds and the high tide (Galli & Hontarrède 2001). It can also be due to superimposed waves as the study area is far from the depression center.

Based on scientific literature, the flooding may also correspond to a “meteotsunami” or “meteorological tsunam” because it was characterized by long period waves causing comparable behaviour to the tsunami (Defant 1961; Rabinovich & Monserrat 1996 and 1998, Bryant 2014, González et al. 2001).

The meteo-tsunami phenomenon has much in common with storm surges (Levin & Nosov 2009), and the only formal difference between a storm surge and a meteo-tsunami consists in the difference between their maximum periods. The maximum period for a meteotsunami does not exceed several hours, while storm surges may last several days (O'Brien et al. 2013). The same phenomenon occurred three years ago in January 2014, during a North Atlantic low-pressure system called "Hercules that affected the Atlantic coast in Portugal, England, Spain, Morocco... and caused several damages (Mallet et al. 2014, Ministère de l'équipement du transport et de la logistique 2014). Therefore, it is important to understand the physical processes of erosion, flood and coastal development to sustainably manage the coastal zone.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was realized under a research program of "le Laboratoire de Physique du Globe, Institut Scientifique" with the help of Toubkal Project N° TBK/15/CASBA: "Caractères Anthropiques et environnementaux de l'érosion des versants du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah". Authors would like to thank Dr. Medina and the reviewers for their advised remarks and their contribution to improve the first version of the paper

CHAPITRE 7 : SYNTHÈSE ET DISCUSSION

***Signature climatique et anthropique dans les archives sédimentaires des
terrasses alluviales du Bouregreg***

I. Changements du régime hydroclimatique du bassin versant du Bouregreg entre 1977-2013 (36 ans)

Dans la présente étude, l'analyse du régime hydroclimatique du bassin versant de l'oued Bouregreg a montré des changements significatifs au cours de la fin 20^{ème} siècle et début du 21^{ème} siècle. Nous avons utilisé les séries pluviométriques annuelles et régionales et celles des débits disponibles dans les stations de mesure, présentes sur l'ensemble du bassin versant du Bouregreg, et ce, sur une moyenne d'une trentaine d'année. Pour chaque sous-région (ou sous bassin) étudié, la moyenne des totaux pluviométriques mesurés a été calculée et considérée comme la série pluviométrique relative à la sous-région. Les discontinuités dans les séries chronologiques ont été analysées en utilisant les tests de rupture de Pettitt, Buishand, Lee & Heghinian et la procédure de segmentation de Hubert.

L'analyse de la variabilité spatiale et temporelle des régimes pluviométriques menée sur **l'ensemble du bassin versant** a permis de mettre en évidence un comportement hydrologique interannuel très irrégulier. Les ruptures observées dans les séries des pluies annuelles sont statistiquement significatives, toutefois il apparaît qu'un changement du régime pluviométrique a affecté le bassin du Bouregreg à partir de 1979, date de la rupture des pluies dans l'ensemble du Royaume. Avant les années 80, il y avait une alternance irrégulière d'années sèches et humides avec des périodes sèches plus longues (de 3 à 4 ans) que les humides (1 à 2 ans). Ensuite, au début des années 80, une nette augmentation est notée aussi bien pour la fréquence des années sèches que pour l'amplitude de la sécheresse. La décennie 80 est alors un épisode sec et long (1979-1989) pour l'ensemble du bassin. La décennie 90 a été particulièrement sèche avec un maximum de déficit pluviométrique en 1994 ; elle est entrecoupée d'une courte période à tendance humide (1995-96). L'année 1996 a été extrêmement humide dans la majorité du territoire étudié. Ces deux années (1995-96) étaient marquées par de fortes anomalies ONA (Oscillation Nord-Atlantique), favorable à une pluviométrie significative pour l'ensemble du Maroc comme cela a été noté par Khomsi *et al.*, (2012) : Ce sont des années excédentaires pour l'ensemble du bassin, après quoi, un autre épisode sec s'est de nouveau installé (1997-2001).

D'ailleurs, l'analyse de la différence entre les indices pluviométrique et hydrométrique a en effet présenté une différence positive depuis le début de la sécheresse (1979) jusqu'à l'événement ONA (1995/1996), qui devint négatif, avec un indice pluviométrique plus fort que l'indice hydrométrique. A partir de 2002, année pluvieuse, une alternance d'indices positifs et négatifs est alors enregistrée et l'année 2006 a été fortement déficitaire. Ces résultats comparés à ceux d'autres bassins versants Nord africains montrent une concordance avec ceux de la Tunisie (Kingumbi *et al.*, 2000) et de l'Algérie

(Nezzal et Iftini-Belaid, 2013). En Afrique de l'Ouest et centrale, la sécheresse se situe aussi après 1970 (Paturel *et al.*, 1997 ; Soro *et al.*, 2011) et elle commence dans les pays du Sahel à la fin des années 1960 et début des années 1970. Cette similitude dans la variabilité climatique à cette échelle serait liée à la tendance globale du réchauffement climatique déjà amorcé à cette période (1980) comme cela a été signalé par le GIEC (Fig. 52).

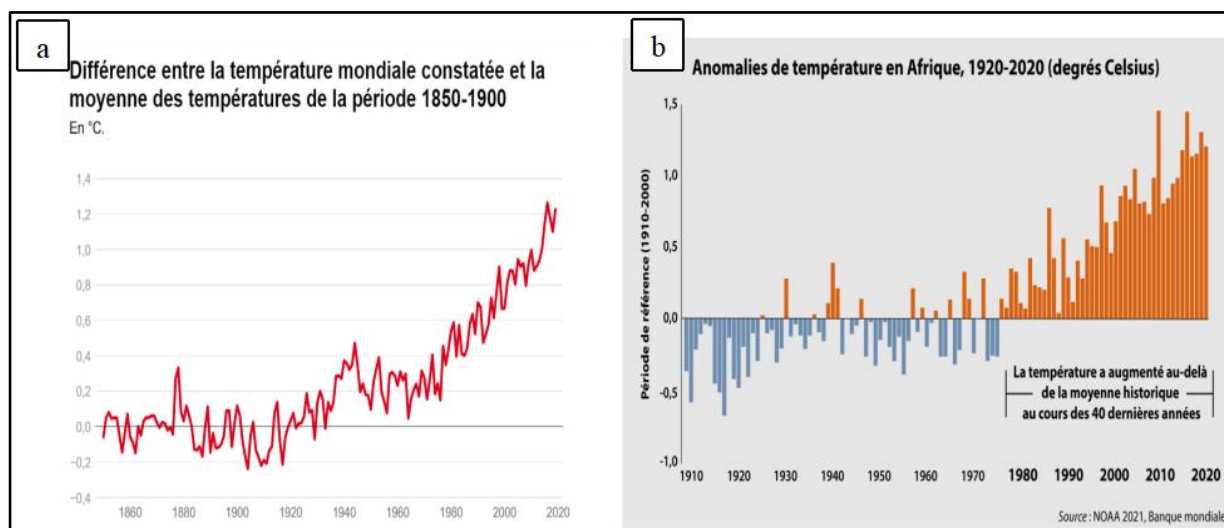


Figure 53 : Réchauffement climatique amorcé depuis 1980 à une échelle planétaire (a) et africaine (b) (Source : GIEC et Banque mondiale).

Une analyse de la variation des pluies à une échelle spatiale a permis une subdivision du bassin versant du Bouregreg en **sept sous régions** (Ezziar, Lalla Chafia, Tsalat, Ras Fathia, Haboub, Ain Loudah et Chref). Bien qu'elle soit limitée par le nombre de stations utilisées, par leur répartition spatiale et par la durée des séries de données disponibles, les mêmes ruptures durant les années 70 (en janvier 1977 et février 1979) ont été notées pour toutes les sous régions. Il en est de même pour la variation de la distribution des pluies avec une combinaison des tendances positives et négatives telle enregistrée dans l'ensemble du bassin du Bouregreg. Il est à noter aussi un nombre d'années à déficit pluviométrique plus important dans la plupart des stations étudiées relatives aux sept sous régions ; elles montrent une tendance plus ou moins vers la baisse de 1977 à 2007, alors que les 6 années qui suivirent (2007-2013) étaient excédentaires dans la plupart des stations.

Durant 36 ans, les précipitations ont fluctué entre 1104 mm et 162 mm avec un pic beaucoup plus élevé noté en 1996 pour le sous-bassin de Tsalat ; celui-ci reste le plus arrosé de toutes les régions du bassin du Bouregreg. Il se situe plus en amont près de la ville d'Oulmès, ce qui induit sans doute à une variabilité spécifique de la pluie dans cette sous région.

Une pluviométrie des plus faibles du bassin du Bouregreg, a été enregistrée en 1981 et 2001 à Ain Loudah ; station relative à l'oued Korifla au Sud du Bassin du Bouregreg. Toutefois, il est à noter que la pluviométrie du premier sous-bassin est supérieure de 40 % à celle d'Ain Loudah. A priori, en période de sécheresse, la zone de Tsalat (le haut bassin) présenterait une tendance à la baisse plus marquée par rapport à celle de la région d'Ain Loudah. Ceci pourrait révéler une vulnérabilité de la sous-région Tsalat vis-à-vis de la sécheresse.

La probabilité d'occurrence d'une année sévèrement sèche était d'une année tous les 6 ans avant 1996 et elle est passée après à une tous les 3-4 ans pour toutes les sous régions du bassin du Bouregreg. En outre, le régime mensuel des pluies a aussi été modifié après la longue période de sécheresse qui a précédée 1996 ; les pluies sont devenues plus faibles durant le trimestre décembre janvier-février induisant aussi une baisse dans les débits des oueds. La tendance serait probablement un passage vers des années à deux saisons (hiver – été) au lieu de quatre. Une tendance intéressante à suivre plus en détail dans d'autres études de recherche sur le bassin du Bouregreg.

Le **débit fluvial** au niveau de 5 stations (Ezziar, Ras Fathia, Haboub, Lalla Chafia et Sidi Jabeur) est beaucoup plus élevé par rapport à celui enregistré aux stations Ain Loudah et Chref. Celles-ci situées plus au Sud, sur les bassins versants de l'Oued Grou et Korifla, présenteraient une variabilité moins prononcée dans le temps, et l'impact de la sécheresse y serait moins accusé. Ces sous régions se caractérisent par une pluviométrie plus faible et l'état dénudé du sol y est sans doute susceptible à des ruissellements plus élevés dès le début de la saison des pluies.

En comparant les débits moyens annuels, notés dans les différentes stations hydrométriques, il apparaît aussi que les zones les plus productives hydrologiquement se situent en amont de Lalla Chafia et de Sidi Jaber. Ce sont des zones à pentes fortes sur substratum schisteux et/ou magmatique à perméabilité très faible. Ces caractères favorisent le développement de crues violentes le long du Grou et du Bouregreg entraînant des inondations catastrophiques. Quant aux variations mensuelles du débit, elles montrent un régime hydrologique à caractère saisonnier. Nous retrouvons la bi-saisonnalité durant l'année hydrologique qui comprend une saison humide et une saison sèche. La première dure trois à cinq mois, elle se situe en saison hivernale et printanière et la seconde les mois qui suivent. Les plus importantes crues sont généralement observées en février et les étiages les plus sévères apparaissent en août.

L'activité hydrologique annuelle du bassin de Bouregreg est également marquée par la présence d'années où l'écoulement était très important au niveau de certaines stations, particulièrement, Sidi Jaber et Ras Fathia, en 1995-96. Ce comportement serait lié à la forte anomalie NOA favorable à la pluie au Maroc en 1996. La diminution des débits observée après l'année 96, est due à la baisse des précipitations sur l'ensemble du bassin versant du Bouregreg.

Il en ressort que les apports en eau de l'oued Bouregreg sont étroitement liés aux précipitations. Ils sont forts lors de crues et des périodes humides et quasi nul pendant les périodes d'été. De plus, une baisse des précipitations en moyenne de 65 mm annuellement notée sur le haut bassin -région la plus pluvieuse - enregistrée depuis la fin des années 90, n'augure rien de bon pour les prochaines décennies ; si cette tendance se confirme, cela impliquerait une baisse dans l'approvisionnement en eau douce au barrage SMBA par l'oued Bouregreg voire un transit sédimentaire vers la mer freiné et une dynamique littorale perturbée.

II. Réduction des apports sédimentaires du Bouregreg vers l'aval sous l'effet de la variabilité climatique et de l'ouvrage hydraulique

Les bassins versants intègrent souvent des hétérogénéités hydrologiques, sédimentaires et climatiques en plus des activités anthropiques d'où la complexité de pouvoir déterminer le ou les facteurs qui sont réellement responsables de la baisse du transit sédimentaire vers la mer. L'origine de ce travail est l'ambition de contribuer à une meilleure compréhension de l'impact du climat et/ou des effets de l'installation du barrage SMBA sur l'évolution des flux sédimentaires vers la mer. Seules l'utilisation des archives sédimentaires et la paléohydrologie pourraient nous renseigner sur d'identifier les « acteurs » impliqués dans la pénurie en sédiments vers en aval de l'ouvrage hydraulique voire vers la mer.

Deux carottes sédimentaires BR1 et BR2 sont prélevées sur une terrasse alluviale de la rive gauche du Bouregreg, en aval du barrage SMBA ; ces dépôts sont présents dans le champ d'inondation. La BR1 est assez perturbée alors l'étude complète (Sédimentologie, géochimie, géochronologie) a été réalisée plus en détail sur la carotte BR2 de la plaine alluviale du Bouregreg.

L'analyse du log litho stratigraphique de la carotte sédimentaire, nous a permis de noter une variation granulométrique importante en fonction de la profondeur. La fraction la plus fine montre la contribution du bassin versant en période d'été et de crue, tandis que la fraction la plus grossière indique la présence de sédiments déposés lors des événements de crues intenses. L'étude sédimentologique couplée à une analyse géochimique de la colonne sédimentaire ont permis d'identifier en effet le nombre de dépôts de paléocrues : Sept horizons à fraction grossière (DS) ont été identifiés, témoins d'un régime hydraulique plus énergétique. Les âges des ces dépôts d'inondation ont été estimés à l'aide d'éléments radionucléides ^{137}Cs et de ^{210}Pb .

Le profil d'activité du ^{210}Pb présente une décroissance exponentielle dans les dépôts; il confirme que la stratigraphie n'est pas perturbée et indique que tous les dépôts sont récents et postérieurs à 1900. Le profil d'activité du ^{137}Cs en fonction de la profondeur montre un pic maximal à 60 cm, attribué à des niveaux de retombées maximales liés à la période des essais nucléaires aériens en 1963. Ces traceurs chronologiques, nous ont permis d'établir une chronologie approximative des dépôts de crue (DS1 à DS7), associés à une granulométrie plus importante.

Basé sur une relation possible entre la taille des grains de sédiments et la magnitude d'un événement, nous avons comparé ces dépôts aux enregistrements instrumentaux disponibles à la station Lalla Chafia depuis 1972; celle-ci enregistre les apports de la zone la plus arrosée du bassin versant. Nous supposons que le premier événement enregistré par les archives instrumentales après 1963 (avec un débit de l'ordre de $161 \text{ m}^3/\text{s}$ à la station Lalla Chafia) aurait probablement déposé, en 1978, une passée sableuse relative à l'unité DS5. Un autre événement est enregistré en 1990 avec un débit estimé à $90,10 \text{ m}^3/\text{s}$, il est associé à l'unité de dépôt DS6, caractérisée par un niveau sableux avec un pic en Zr probablement lié à des événements de haute énergie apportant des sédiments érodés du bassin versant. L'épaisseur du dépôt entre ces deux horizons sableux (DS5 et DS6), avoisine les 30 cm, ceci témoignerait d'une faible accumulation de sédiments caractéristique d'un apport fluvial quasiment faible en aval du barrage. L'événement de 2010 est associé à l'unité DS7 caractérisée par des sables moyens ($112 \mu\text{m}$). L'unité DS4, quant à elle, est attribuée à l'événement de magnitude $638 \text{ m}^3/\text{s}$ survenu en décembre 1960. Le taux de sédimentation lié aux 28 premières années de débits fluviaux déterminé à partir de la datation au ^{137}Cs , est d'environ $3,64 \text{ cm/an}$ entre 1950 et 1978, il est de $3,08 \text{ cm/an}$ entre 1978 et 1990, et devient 9 fois plus faible entre 1990 et 2017 atteignant $0,41 \text{ cm/an}$. Ce rythme décroissant est lié à la variabilité climatique notée sur ce bassin, étant donné que les périodes sèches sont plus fréquentes que les périodes humides après les années 1990 (El Aoula *et al.*, 2021), et elle coïncide avec la construction du barrage SMBA en 74 sur l'oued Bouregreg. Ce réservoir de stockage d'eau, piège aussi les sédiments dans la retenue marquée par son envasement rapide.

Par ailleurs, les variations climatiques annuelles sont importantes et influencent beaucoup la quantité des eaux douces déversées dans l'estuaire du Bouregreg. Les précipitations enregistrées au cours des années 1980 et 1990 ont été faibles, les crues générées ont été moindres et n'ont pas dépassé un maximum de $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Le bassin versant du Bouregreg a connu durant les périodes sèches de 1980 à 1985, 1991 à 1995 et 1998 à 2001, des déficits en apport d'eau douce, respectivement, de 70%, 70% et 74% selon Bzioui (2004).

En effet, moins d'unités de dépôt de crue sont déposées durant ces périodes. Ainsi, à travers l'étude de l'archive sédimentaire de la carotte BR2, nous mettons en évidence un taux de sédimentation faible d'environ 1,75 cm/an en moyenne pendant les années sèches (entre 1980 et 1990). Bien que l'évaluation des apports sédimentaires de l'oued Bouregreg montre une réduction du flux sédimentaire à l'aval du barrage SMBA, le taux de diminution dû aux périodes sèches ne semble pas dépasser 0,3 cm/an. L'ouvrage semble alors avoir fortement modifié la réponse naturelle de la partie aval du fleuve. D'ailleurs, l'impact du barrage SBMA apparaît à hauteur de 53,5% alors que l'effet hydroclimatique est de l'ordre de 46,5%. Nous constatons à ce sujet que les résultats trouvés tout au long de ce travail témoignent d'une réponse aux fluctuations climatiques notées sur le bassin versant et illustrent bien l'impact de la mise en eau du barrage sur le bassin, qui prive la basse vallée, l'estuaire et la zone littorale de la majeure partie des apports sédimentaires. La fraction terrigène en provenance du bassin versant s'accumule dans la retenue et seule une partie sera évacuée à l'aval pendant les crues et les chasses par les vannes de fond comme cela a été noté par Cherkaoui (2006).

III. Devenir potentiel de l'estuaire du Bouregreg face à l'élévation du niveau de la mer

Le 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2014) indique que le niveau de la mer augmente globalement à un rythme de 3,5 mm par an (Fig. 53), en raison du réchauffement climatique. La tendance s'accélère depuis 2011 avec une hausse annuelle de 5 mm ainsi que la fréquence des ondes de tempête ; celles-ci vont exacerber la hauteur moyenne significative des vagues sur le littoral.

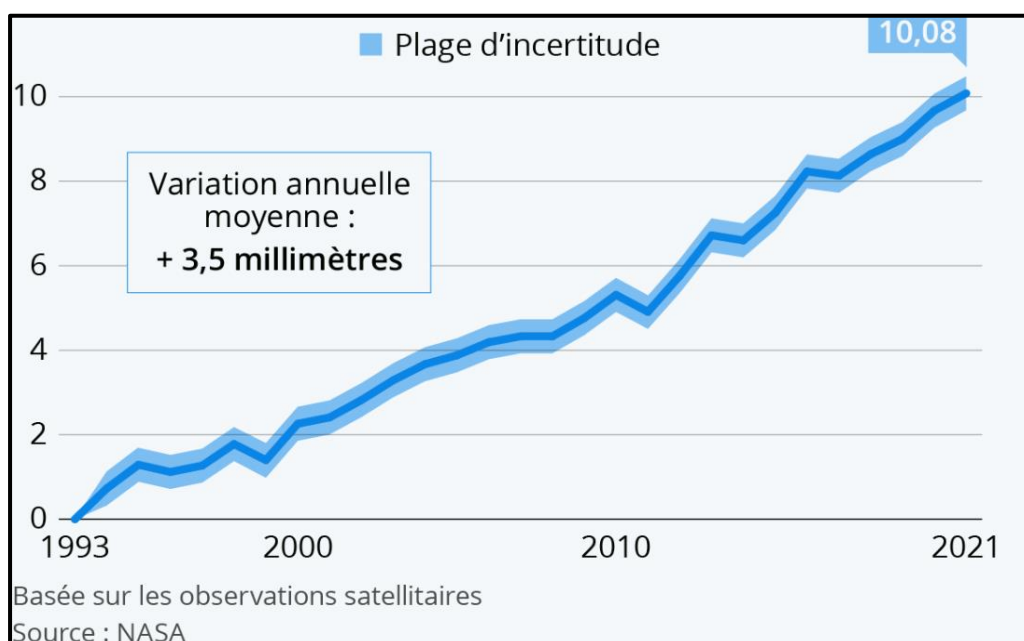


Figure 54 : Élévation du niveau de la mer depuis 1993 (Source : NASA).
<https://fr.statista.com/infographie/15700/hausse-du-niveau-des-mers-oceans/>

L'Agence Européenne de l'Environnement (AEE) estime une élévation moyenne du niveau de la mer au niveau de l'océan Atlantique Nord, une hausse comprise entre 0,2 m et 0,4 m pour un scénario de faibles émissions (RPC 2.6), et entre 0,4 m et 1,0 m dans le cadre du scénario plus intense (RPC 8.5) (Fig. 54).

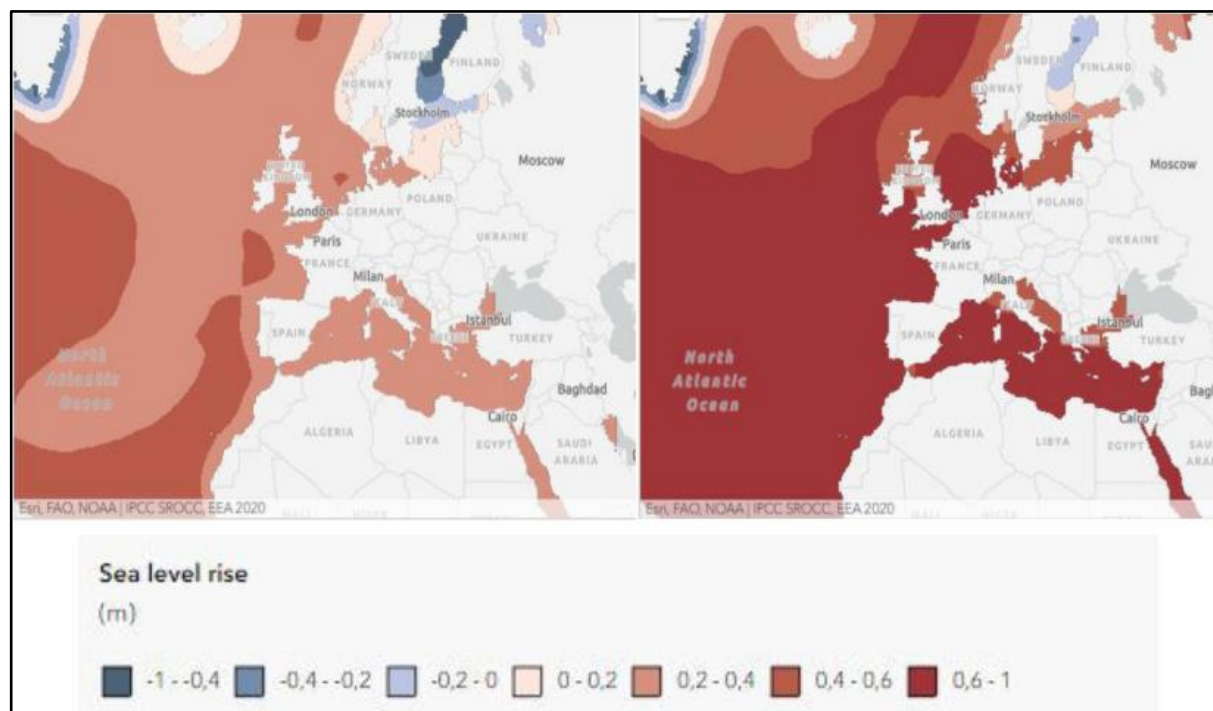


Figure 55 : Élévation du niveau de la mer selon 2 scénarios d'émission du GIEC : faibles émissions (RPC 2.6) à gauche, fortes émissions (RPC 8.5) à droite. (Source : AEE).

Selon le GIEC, l'élévation du niveau de la mer s'accélère et la concordance avec l'augmentation des tempêtes marines aura un effet plus intense sur les processus côtiers (GIEC, 2020). D'ailleurs, les facteurs de stress liés au changement climatique vont concerner les écosystèmes estuariens du monde entier, par la modification des conditions climatiques terrestres et les processus de circulation océanique et côtière, l'élévation du niveau de la mer, les tempêtes marines intenses et fréquentes, et l'acidification des océans (Yang *et al.*, 2015).

Un des principaux facteurs climatiques à l'origine des modifications des environnements côtiers est le risque d'inondation dans les estuaires dont l'occurrence serait due à une conjonction d'événements, notamment l'augmentation du niveau de la mer et/ou les ondes de tempête, les modifications du climat des vagues et aussi le débit fluvial élevé (Quinn *et al.*, 2014). L'estuaire du Bouregreg n'échapperait pas aux effets des forçages météomarins et climatiques.

D'après cette étude, la réduction des apports de l'oued Bouregreg en aval du barrage est très nette en raison de la variabilité climatique, le piégeage des sédiments dans la retenue, et la rareté des lâchers d'eau par les vannes due aux périodes de sécheresse, que connaît le bassin versant. En l'absence d'un débit fluvial important dans tout l'estuaire, et en réponse à la hausse du niveau marin, l'énergie des vagues va alors contrôler le transport des sédiments et/ou la fermeture de l'embouchure (Kench, 1999). Selon une étude des estuaires portugais, il apparaît que si la composante fluviale est moins importante que la composante marine, la dynamique estuarienne serait affectée par l'élévation du niveau de la mer (Iglesias *et al.*, 2022). Tel le cas du Bouregreg, si le flux terrigène continue à se réduire et que l'influence météomarine s'intensifie, des conditions dans l'estuaire seraient propices pour des phases d'inondation pour les scénarios futurs.

Selon Leuven *et al.*, (2019), les petits estuaires peu profonds sont susceptibles de subir une amplification des marées à l'avenir lorsque l'apport de sédiments fluviaux est insuffisant et risque de ne pouvoir adapter la morphologie de la zone aval à l'élévation du niveau de la mer (Fig. 55). L'importance du flux de sédiments de l'amont est donc cruciale pour lutter contre les effets de la hausse du niveau de la mer. Le flux solide est pourtant absolument nécessaire dans les cours d'eau à l'aval des ouvrages pour maintenir les caractéristiques morphologiques, écologiques et hydrodynamique de l'estuaire. Ainsi l'écosystème du Bouregreg serait confronté au défi de recevoir plus de sédiments pour que toute la zone côtière puisse s'adapter à l'élévation relative du niveau de la mer.

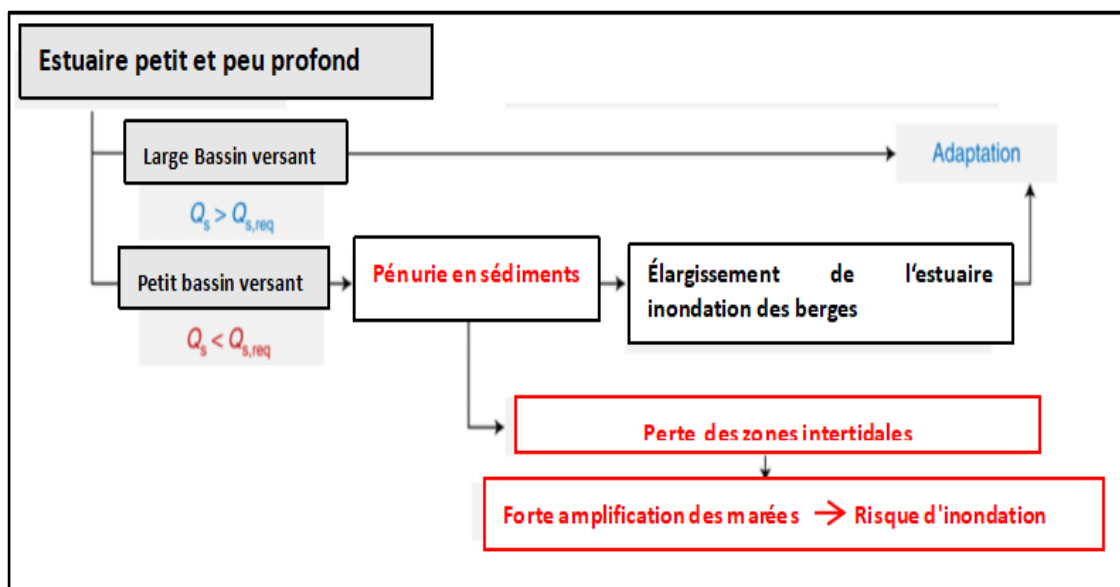


Figure 56 : Principales réponses d'un estuaire peu profond à l'élévation du niveau de la mer (Extrait de Leuven *et al.* 2019. Le texte et les symboles bleus (rouges) représentent les effets positifs (négatifs). Q_s : débit fluvial solide, $Q_{s, req}$: Apport en sédiment requis.

L'estuaire du Bouregreg est de type mésotidale, la circulation et le mélange y sont contrôlés par l'énergie oscillatoire des marées. L'élévation du niveau de la mer risque de propager encore plus en amont l'eau salée, ce qui aura pour conséquence une augmentation de l'étendue de l'intrusion saline. Les changements du prisme et de la vitesse des marées augmenteraient la vulnérabilité des berges à l'érosion. Quant à l'énergie des vagues, elle est généralement dissipée par les digues à l'embouchure.

En outre, l'hydrodynamique estuarien, régi par les marées et les débits de l'oued, et la dynamique sédimentaire qui en résulte sont des processus clés qui contrôlent la qualité de l'eau puisqu'ils influencent les caractéristiques biogéochimiques de cet écosystème et le biotope estuarien (Ji, 2017). Les tempêtes marines, combinées à des surcotes lors des événements paroxysmiques, peuvent également augmenter le transport de sédiments marins dans la zone de l'embouchure, provoquant un remplissage progressif et/ou l'estuaire se comporterait comme un bras de mer. De ce fait il ne pourrait plus jouer son rôle de station d'épuration naturelle ; sa suppression entraînerait une expulsion accrue des polluants en mer.

Pour le respect du règlement d'aménagement qui accorde une importance particulière à la protection de la vallée du Bouregreg, particulièrement aux zones urbanisables contre les risques d'inondations, des études d'impacts ont révélé la vulnérabilité du territoire au pourtour de l'estuaire en prenant en considération les niveaux extrêmes d'eau relatifs :

- aux débits de l'amont (lâchers du barrage et débit de l'oued Akrach);
- à la marée (niveau d'eau de mer le plus haut), une surcôte météorologique et les variations du niveau marin dans le contexte du changement climatique.

Une zonation pour le risque d'inondation a été effectuée, elle s'est basée sur les données de crue pour des périodes de retour de 10, 50, 100, 200, 500 et 1000 ans; le niveau à urbaniser a été porté à plus 2 m au-dessus des niveaux des débits de crue (Fig. 56) (Agence pour l'aménagement de la vallée du Bouregreg, 2012).

Des prédictions fiables de l'étendue future des inondations dans cet estuaire nécessitent une évaluation précise du flux sédimentaires nécessaires pour permettre à cet écosystème de s'adapter et contrer potentiellement l'avancée de la mer vers l'amont.

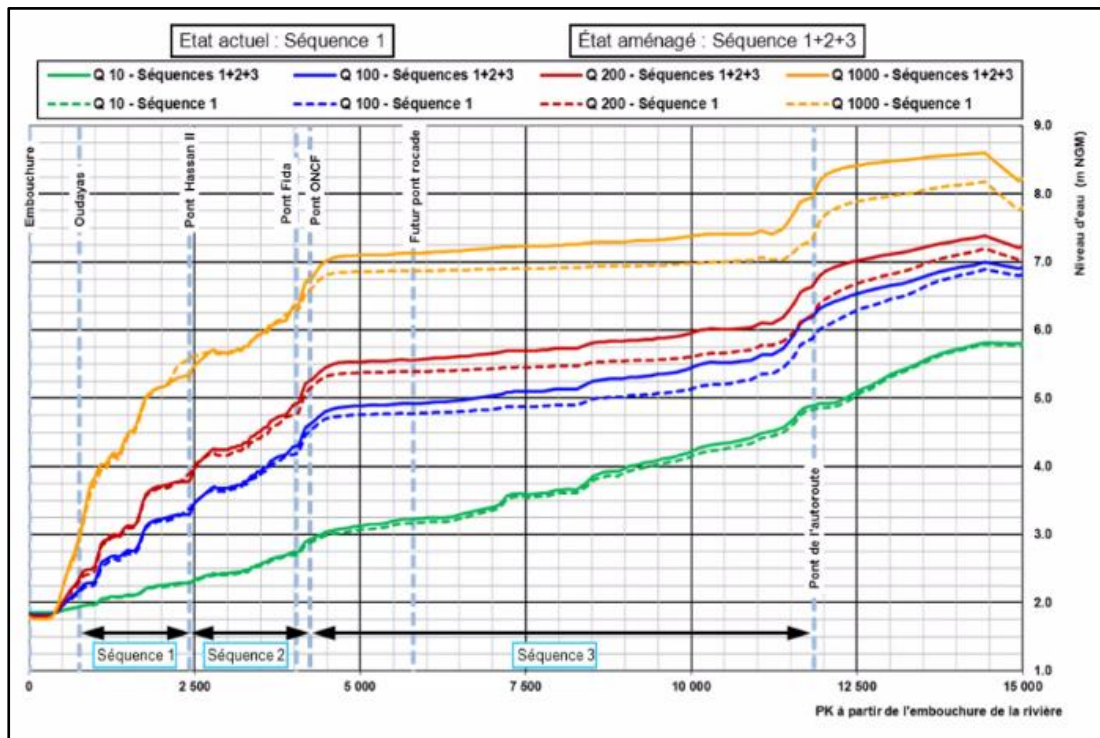


Figure 57 : Comparaison des niveaux d'eau au niveau de la vallée du Bouregreg (situation actuelle – situation aménagée pour des débits de crue avec différentes périodes de retour (Agence pour l'aménagement de la vallée du Bouregreg, 2012).

Conclusion

Le régime pluviométrique sur l'ensemble du bassin versant connaît depuis des décennies une forte variabilité interannuelle, il est marqué par des périodes de sécheresse assez longue interrompue sporadiquement par quelques phases humides. Cette variation de pluviométrie influence nettement le comportement hydrologique interannuel très irrégulier de l'oued Bouregreg. Avant les années 74, la fréquence des crues provoquait des inondations, suite aux quelles le barrage SMBA a été construit. Sa mise en service a réduit les flux liquide et aussi solide arrivant vers l'estuaire. Les quelques lachers du barrage ont permis d'alimenter l'aval en sédiments grossiers. Ceci a bel et bien été confirmé par les analyses sédimentologique, géochimique et géochronologique réalisées sur une carotte sédimentaire prélevées au niveau de la terrasse alluviale du Bouregreg en aval de l'ouvrage. Cette étude confirme la réduction de transit sédimentaire vers l'aval particulièrement de la fraction terrigène grossière dont une grande part est piégée dans la retenue. Ceci impacte d'une part, la capacité utile de l'ouvrage et d'autre part la fonction écosystémique de l'estuaire du Bouregreg.

Dans le contexte du changement climatique, la hausse du niveau de la mer s'accélère et une conjonction avec les événements météorologiques paroxysmiques auront un effet plus intense sur l'estuaire du Bouregreg qui pourrait ne pas pouvoir s'adapter aux nouvelles conditions hydrodynamiques et induire des effets cascades sur tout le territoire côtier.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Conclusions

De nombreuses études ont été réalisées au niveau du bassin versant du Bourgerg, la majorité d'entre elles se sont intéressées à l'hydrologie fluviale en amont du barrage, à l'érosion côtière et l'occupation du sol dans le bassin versant, à la qualité biogéochimique et écologique des eaux de l'estuaire, entre autres. Néanmoins, aucune étude ne s'est intéressée à la cause du déficit sédimentaire de l'oued Bouregreg vers l'aval.

En effet, l'histoire des apports sédimentaires fluviaux vers la mer en transitant par l'estuaire du Bouregreg n'est pas connue. **Quels sont alors les facteurs qui contrôlent cet apport ? Peut-on incriminer uniquement le barrage SMBA?**

Pour pouvoir répondre à ces questions, la présente étude est réalisée dans le but de comprendre la variabilité et l'évolution des apports de l'oued Bouregreg vers la zone côtière en faisant part de l'influence de chaque facteur qu'il soit naturel ou anthropique.

L'approche paléohydrologique adoptée dans cette recherche nous a permis de mieux cerner les causes qui sont responsables de la discontinuité sédimentaire dans le transport vers l'aval. En effet, l'analyse pluridisciplinaire des archives sédimentaires prélevées dans une terrasse alluviale du Bouregreg en aval du barrage a permis de fournir de précieuses informations sur l'évolution climatique des dernières décennies, les paléoévénements de crues et enfin sur les actions anthropiques ayant impactés la dynamique sédimentaire de l'oued Bouregreg.

Les approches multiproxy (sédimentologique, géochimique (Fe, Ti et Zr) et géochronologiques (^{210}Pb et ^{137}Cs) combinées à la paléo-hydrologie sont appliquées pour la première fois sur les archives sédimentaires de l'estuaire du Bouregreg.

Ce travail de recherche a permis de faire ressortir ce qui suit :

A- PLUVIOMETRIE

Une variabilité temporelle des régimes pluviométriques au niveau de l'ensemble du bassin versant du Bouregreg sur 36 ans (1977-2013), est influencée par : (i) la tendance globale du réchauffement climatique déjà amorcé en 1980 comme cela a été signalé par le GIEC, et par (ii) les anomalies de l'Oscillation Nord-Atlantique. Sur ce bassin l'analyse montre que :

- La sécheresse s'est imposée avec force depuis 1980 ;
- Cet épisode sec est entrecoupé de phases humides ; celles-ci ont nettement arrosé l'ensemble du bassin versant ;

- Une variabilité climatique spatiale relative à 7 sous régions du bassin versant du Bouregreg (Ezziar, Lalla Chafia, Tsalat, Ras Fathia, Haboub, Ain Loudah et Chref) révèle que :
 - La sous-région de Tsalat, située plus en amont près de la ville d'Oulmès, reste la plus arrosée ;
 - La pluviométrie la plus faible est notée dans la sous-region d'Ain Loudah, située au Sud du Bassin du Bouregreg.
- La probabilité d'occurrence d'une année sévèrement sèche pour toutes les sous régions a changé : elle est d'une année tous les 6 ans avant 1996 et elle est passée à une année tous les 3-4 ans après.
- Une modification du régime pluviométrique mensuel : les pluies sont devenues plus faibles durant le trimestre Décembre-Janvier-Février.
- Une tendance probable d'un passage vers des années à deux saisons (hiver – été) au lieu de quatre.

B- HYDROLOGIE

Les débits fluviaux sont fortement influencés par la variabilité climatique temporelle et spatiale sur l'ensemble du Bouregreg ; en effet il a été noté que :

- Des débits sont plus élevés au niveau de 5 stations (Ezziar, Ras Fathia, Haboub, Lalla Chafia et Sidi Jabeur)
- Des débits sont insuffisants au niveau des stations Ain Loudah et Chref, situées plus au Sud, sur les bassins versants des Oueds Grou et Korifla.
- Les variations mensuelles du débit montrent un régime hydrologique à caractère saisonnier : Une bi-saisonnalité est notée durant l'année hydrologique (une saison humide et une saison sèche).

C- ARCHIVES SÉDIMENTAIRES

Les anciens dépôts sédimentaires des terrasses alluviales de l'oued Bouregreg ont une mémoire des évolutions hydroclimatiques, et des perturbations d'origine anthropiques : Il apparaît au terme de ces analyses que :

- Le log litho stratigraphique de la carotte sédimentaire montre une importante variation granulométrique en fonction de la profondeur ;
- L'étude sédimentologique couplée à une analyse géochimique ont permis d'identifier sept horizons à fraction grossière (DS1 - DS7) témoins de dépôts de paléocrues ;
- Le profil d'activité du ^{210}Pb décroissant dans les dépôts confirme des sédiments non perturbés et sont postérieurs à 1900.

Le profil de l'activité du ^{137}Cs révèle une chronologie approximative des dépôts de paléocrues avec en :

- 1960 correspondant à l'unité DS4 ($638 \text{ m}^3/\text{s}$) ;
- 1978, la crue y a déposé la passée sableuse relative à l'unité DS5 ($161 \text{ m}^3/\text{s}$) ;

- 1990, le dépôt grossier (DS6) de la paléocrue est formé de niveau sableux riche en Zr (90,10 m³/s) ;

- 2010, la paléocrue est associée aux sables moyens déposés dans l'unité DS7.

Les paléocrues de 1996 et 2002, bien que les pluies étaient fortes, l'intensité du débit de l'oued était plus faible (10,9 m³/s et 5,4 m³/s respectivement). Leurs dépôts ne sont pas retrouvés dans la séquence sédimentaire ; ceci pourrait être dû à : (i) l'absence d'une inondation de la terrasse alluviale donc les sédiments ne sont pas déposés, et (ii) la rétention d'eau et au piégeage des apports terrigènes afin de combler le déficit du remplissage en eau du barrage après une longue période de sécheresse entamée depuis plus d'une décennie.

Un taux de sédimentation de plus en plus faible est en relation avec les effets combinés de la variabilité climatique et la construction du barrage, il est :

- d'environ 3,64 cm/an entre 1950 et 1978 ;
- de 3,08 cm/an entre 1978 et 1990 ;
- de 9 fois plus faible entre 1990 et 2017 atteignant 0,41 cm/an.

Au terme de cette étude, il apparaît que le barrage SMBA semble avoir fortement modifié la réponse naturelle de la partie aval de l'oued Bouregreg, en réduisant le transit sédimentaire amont - aval. Nous estimons que le taux de déficit fluvial dû à cet ouvrage hydraulique apparaît à hauteur de 53,5% alors que l'effet hydroclimatique est de l'ordre de 46,5%.

Depuis ces deux dernières décennies, la composante fluviale est alors moins importante vers l'aval, elle favorise ainsi une dynamique estuarienne dominée par une composante marine : celle-ci deviendrait plus imposante dans un contexte d'élévation du niveau de la mer et d'une intensification des tempêtes marines dues au changement climatique. Si cette tendance de pénurie en sédiments vers l'aval se poursuit, la limitation des échanges amont-aval au niveau de l'estuaire favoriserait plus la prédominance des phénomènes hydrodynamiques d'origine marine.

L'importance du flux de sédiments vers l'estuaire du Bouregreg est cruciale pour :

1. Lutter contre la pénurie en sédiments responsable en grande partie de l'érosion des plages ;
2. Maintenir les caractéristiques morphologiques, écologiques, hydrodynamiques, biogéochimiques et socioéconomique de cet estuaire, aujourd'hui très convoité.

3. Contrer les effets de la hausse du niveau de la mer par une adaptation géomorphologique. La capacité des estuaires à répondre à l'élévation du niveau de la mer dépendra des contraintes de transgression vers l'intérieur des terres, de l'espace d'accommodation possible et de l'approvisionnement en sédiments disponibles.

Recommandations

L'étude croisée de la sédimentologie, géochimie, géochronologie et paléohydrologie constitue une approche complète pour appréhender les signatures climatiques et anthropiques dans les archives sédimentaires du Bouregreg.

La construction des barrages sur les cours d'eau est stratégique et nécessaire, néanmoins, elle s'accompagne toujours de modifications hydromorphologiques et physico-chimiques en perturbant notamment la continuité sédimentaire vers l'aval, en piégeant les sédiments. De plus, l'envasement affecte les performances de la retenue en réduisant la capacité de régularisation et la durée de vie de l'ouvrage, ce qui constitue une menace latente et permanente pour sa sécurité. La gestion du matériel sédimentaire piégé est aujourd'hui un enjeu fondamental dans ce barrage.

Comment peut-on concilier Barrage et transports de sédiments vers l'aval ?

Afin de maintenir le principe de continuité sédimentaire vers l'aval, nous recommandons :

1- D'assurer artificiellement le transfert des sédiments vers l'aval par la mise en place de systèmes de by-pass ou encore de turbines acceptant le passage de sédiments en aval du barrage. Ceci permettrait de limiter le réservoir et d'augmenter l'espérance de vie du barrage.

2- De préserver un espace de liberté ou de mobilité de l'oued en évitant des aménagements au niveau des berges et favoriser l'expression de l'érosion latérale. Les sections de l'écoulement élargies diminueraient les contraintes hydrauliques lors des événements marin et fluvial extrêmes.

BIBLIOGRAPHIE

- Albaret, J.J. 1999. Les peuplements des estuaires et des lagunes. In : Les Poissons Des Eaux Continentales Africaines : Diversité, Biologie, Écologie, Utilisation Par L'Homme (Eds. Lévêque C, Paugy D). IRD, Paris, 325-249.
- Alillouch R., Mansour R., Radoine H. 2019. Le Projet d'aménagement de la Vallée du Bouregreg. Contexte et modalités de conception et de mise en œuvre d'un projet urbain pour un site vulnérable. *African and Mediterranean Journal of Architecture and Urbanism*. ISSUE 2: V.1 N°2 (2019).
- Allen, J.R.L. (1970) *Physical Processes of Sedimentation*. Allen and Unwin, London, 248.
- Antonelli, C., Provansal, M., Vella, C. 2004. Recent morphological changes of a channel in a deltaic environment. The case of the Rhône River, France, *Geomorphology*, vol. 57, n° 3-4, p. 385–402.
- Arnaud, F., Lignier, V., Revel, M., Desmet, M., Beck, C., Pourchet, M., Tribovillard, N. 2002. Flood and earthquake disturbance of 210Pb geochronology (Lake Anterne, NW Alps). *Terra Nova*, 14(4), 225-232. doi:10.1046/j.1365-3121.2002.00413.
- Banque Mondiale. 2011. Adaptation au changement climatique et aux désastres naturels des villes côtières d'Afrique du Nord- phase 1 : évaluation des risques en situation actuelle et à l'horizon 2030 pour la ville de Casablanca et la vallée du Bouregreg – rapport commun version finale, 2011, 211p.
- Baumann, J., 2017, Signature sédimentaire des submersions de tempête dans le domaine rétro littoral -Application à la Charente Maritime Jury: Université de la Rochelle, 282 p., doi:10.2143/KAR.25.0.504988.
- Beaudet, G., 1969. Le plateau central marocain et ses bordures. Etude géomorphologique, mémoire de thèse, Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Rabat, 478p.
- Benmassaoud, M., 1987. Dynamique de la population *Cerastoderma edule* d'un estuaire marocain : L'oued Bou Regreg. Thèse de 3ème cycle, Université Mohammed V, Rabat : 93p.
- Benmassaoud, F. & Kourradi, R. 2005. Quelques caractéristiques physico-chimiques de l'estuaire de Bou-Regreg. *Société Marocaines de Nutrition*. Journée d'Études sur : «eau ; vecteur de Développement Humain », pp.36.
- Benmoussa, T., 2019. Morphodynamique sédimentaire des plages microtidales à barres de la baie ouest du golfe de Tunis (Cap Farina-Cap Gammarth). Mémoire de thèse, Université de Tunis EL MANAR, faculté des sciences de Tunis EL MANAR.
- Benmoussa, T., Amrouni, O., Dezileau, L., Mahe, G., Saadi, A. 2018. The sedimentological changes caused by human impact at the artificial channel of Medjerda-River Coastal zone of Medjerda, Tunisia), Special Issue: Water quality and sediment transport issues in surface water, *Proc. IAHS*, 377, 77–81, 2018 <https://doi.org/10.5194/piahs-377-77-2018>.
- Blaber, S.J.M. 2002. Fish in hot water: the challenges facing fish and fisheries research in tropical estuaries. *Journal of Fish Biology*, 61, 1-20.
- Bounouira, H. 2007. Etude des qualités chimiques et géochimiques du bassin versant du Bouregreg. Thèse de doctorat, Université Ibn Tofail, Kenitra, Maroc.
- Bryant, E.A. 2014. *Tsunami: The Underrated Hazard*. Cambridge University Press, Cambridge. 320 p.
- Bzioui, M. 2004. Rapport national 2004 sur les ressources en eau au Maroc. UN Water-Africa.

- Cameron, W.M., Pritchard D. 1963. Estuaries: The sea, Ed. Hill M.N., Wiley, Intersciences, v. 2, p. 306-324.
- Chahid, D. 2017. Paléoenvironnements littoraux atlantiques (Pleistocene moyen-superieur, Holocene) de Rabat-Temara (Maroc) : lithostratigraphie, petrographie et geochronologie. Thèse de Doctorat, Fac Sci Meknès, 249 p.
- Chamley, H. 1974. Considérations sur la sédimentologie des estuaires. LA HOUILLE BLANCHE / No 1/2-1974, Centre d'Océanographie, Centre Universitaire de Luminy- Marseille 123-128pp.
- Cherkaoui, E., Bayed A., Hily C. 2003. Organisation spatiale des peuplements macrozoobenthiques subtidiaux d'un estuaire de la côte atlantique marocaine : l'estuaire du Bou Regreg. Cah. Bio. Mar. 22 : 339-352.
- Cherkaoui, S. 2006. Structure et organisation des peuplements macrozoobenthiques de l'estuaire du bou regreg apres la construction du barrage. Thèse de Doctorat, Université Mohammed V, N° 2295.
- CID. 2002. Projet d'aménagement de la vallée du Bouregreg : Étude hydraulique générale – volets I à IV – Royaume du Maroc – SABR Aménagement.
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B. a., Boyd, R. 1992. Estuarine facies models; conceptual basis and stratigraphic implications. J. Sediment. Res. 62, 1130–1146.
- Dalrymple, R.W., Zaitlin, B. a., Boyd, R. 1992. Estuarine facies models; conceptual basis and stratigraphic implications. J. Sediment. Res. 62, 1130–1146.
- Davies, J.L. 1964. A morphogenic approach to world shorelines. Zeitschrift fur Geomorphologie, 8:127–142,
- Defant, A. 1961. Physical Oceanography. Pergamon Press, Oxford. Vol 1. 729 p.
- Deloffre, J., 2005. La Sédimentation Fine Sur Les Vasières En Estuaires Macrotidaux: Processus, quantification et modélisation de l'échelle semi-diurne à l'échelle annuelle. Thèse de doctorat. 227 pages.
- Dezileau, L., Terrier, B., Berger, J. F., Blanchemanche, P., Latapie, Freydier, R., Paquier, A., Lang, M., Delgado, J.L., 2014. Paleohydrological reconstruction of extreme floods of the Gardon River, SE France, Houille Blanche, International Water Journal, n°4, p44-52.
- Dieulin, C., Boyer J.F., Ardoin-Bardin S. 2006. The contribution of GIS to hydrological modeling. Climate variability and change: hydrological impacts. FRIEND 2006 (ed. by S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena & E. Servat), 68-74 (Vth Int. Conf., La Havane (CUB)). IAHS Pub\ 308. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Dieulin, C., Boyer, J.F., Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., 2006. The contribution of GIS to hydrological modeling. Climate variability and change: hydrological impacts. FRIEND 2006. In: Demuth, S., Gustard, A., Planos, E., Scatena, F., Servat, E. (Eds.). IAHS Press, Wallingford, UK, pp. 68–74 (Vth Int. Conf., La Havane (CUB)). IAHS Pub \ 308.
- Dingemans, M.W., 1994. Water wave propagation over uneven bottoms
- Dionne, J.-C., 1963. Vers une définition plus adéquate de l'estuaire du Saint-Laurent. Zeitschrift für Geomorphol. 36–44.
- Dionne, J.-C., 1963. Vers une définition plus adéquate de l'estuaire du Saint-Laurent. Zeitschrift für Geomorphol. 36–44.
- DMN (Direction de la Météorologie Nationale). 2007. Les changements climatiques au Maroc : Observations et projections. DMN, Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des

- Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Chargé de l'Eau et de l'Environnement, Royaume du Maroc, Casablanca.
- Driouech F., Déqué M. & Sanchez-Gomez E. 2010a. Weather Weather regimes Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global and Planetary Change*, 72: 1-10.
- Driouech, F. 2006. Etude des indices de changements climatiques sur le Maroc : températures et précipitations. DMN "INFOMET", Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l' Environnement, Charge de l'Eau et de l'Environnement, Royaume du Maroc, Casablanca, Novembre 2006.
- Driouech, F., Mahé, G., Déqué, M. 2010b. Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya au Maroc. In: *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010), IAHS Publ. 340, 561-567.
- Dyer, K.R. 1995. Sediment transport processes in estuaries. In: Perillo, G.M.E. (Ed.), *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Elsevier, Amsterdam, pp. 423–449.
- Dyer, K.R. 1997. *Estuaries: A physical introduction*: Wiley, London eds, 140 p.
- El Agbani M.A., Dakki M. Et Bournaud M., 1992. Étude typologique du Bou Regreg (Maroc) : les milieux aquatiques et leurs peuplements en macroinvertébrés. *Bull. Ecol.* 23 (1-2) : 103 – 113.
- El Agbani, M. A. 1984. Le réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Bou Regreg. Essai de biotypologie. Thèse de 3ème cycle. Université Claude Bernard, Lyon I (France), 147 p.
- El Aoula R., Mahé G., Mhammdi N., Ezzahouani A., Kacimi I., Khomsi K. 2021. Evolution of the hydrological regime in relation to climate change: case of the bouregreg river basin, Morocco. *Geographia Polonica*, volume 94, Issue 1, pp. 131-148.
- El Aoula R., Mhammdi N., Dezileau L., Mahé G., Kolker A. 2021. Fluvial sediment transport degradation after dam construction in North Africa. *Journal of african Earth Sciences* 182 (2021) 104255.
- El Boukhari A., M. Naimi M., Chikhaoui et RaclotD., 2019. Caractérisation de la dégradation spécifique des sols pour la région septentrionale du Maroc. *Dégradation spécifique des sols au Maroc. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires* 7 (2): 288-293.
- El Hachimi, M.L., Fekhaoui, M., El Abidi, A., Rhoujatti, A., 2014. Contamination des sols par les métaux lourds à partir de mines abandonnées: le cas des mines Aouli- Mibladen-Zeïda au Maroc. *Cah. Agric.* 23 n8 3, mai-juin 2014.
- El Messaoudi B., Ait Laâmel M., El Hou M. & Bouksim, H. 2016. Situations des fortes houles sur les côtes atlantiques marocaines. *Actes Session Plénière Académie Hassan II des Sciences & Techniques*, Rabat, 24-25 février 2015, pp. 79-99.
- El Mrini, A., Anthony, E.J., Taaouati, M., Nachite, D., Maanan, M. 2013. A note on contrasting morphodynamics of two beach systems with different backshores, Tetouan coast, northwest Morocco: the role of grain size and human-altered dune morphology. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, 2013.
- Elkaïm B., 1972. Contribution à l'étude écologique d'un estuaire atlantique marocain: L'estuaire du Bou Regreg *Bull. Soc. Sci. Nat. Phys. Maroc*, 52: 131- 300.
- Elkaïm, B., 1974. *Contribution à l'étude écologique d'un estuaire atlantique marocain: l'estuaire du Bou Regreg*. Thèse Doctorat d'Etat, Université. Bordeaux I (France)- 2ème partie : 250 p.

- Elkaïm, B., 1977. Bionomie et écologie des peuplements des substrats meubles d'un estuaire atlantique marocain : l'estuaire de Bou Regreg. I : unités indicatrices supralittorales ou en position supralittorale. *Vie Milieu*, 27 (1-B) : 27-83.
- Ezzahouani, A. 2015. Modification du régime hydroclimatique dans le bassin versant du Bouregreg au Maroc. Mémoire de master soutenu à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat, Maroc.
- Ezzaouini, A. 2022. Estimation du transport solide entrant au barrage Sidi mohammed Ben Abdellah pour une gestion rationnelle des ressources en eau du bassin du Bouregreg. Thèse de Doctorat, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat.
- Ezzaouini, M., Mahe, G., Kacimi, I., Zerouali, A., 2020. Comparison of the MUSLE model and two years of solid transport measurement in the Bouregreg basin, and impact on the sedimentation in the Sidi Mohamed Ben Abdellah dam, Morocco. *Water* 12 (7). <https://doi.org/10.3390/w12071882>, 1882. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/7/1882>.
- Ezzouaq, M., 1990. Caractéristiques hydrodynamiques, physico-chimiques et bactériologiques des eaux superficielles de l'estuaire du Bou Regreg soumis aux rejets de Rabat- Salé. Thèse Doctorat 3ème cycle, Université Mohammed V, Rabat: 140 p.
- Galli F.L., Hontarrede M. 2001. Surcote et marée de tempête. *Met. Mar.*, 49, 79-89. Gigout M. 1957. L'Ouljien dans le cadre du Tyrrhénien. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 7,4-5, 385-400.
- Gillet, P., 1986. *Contribution à l'étude écologique des Annélides Polychètes de l'estuaire du Bou Regreg* (Maroc). Thèse Doctorat, Université d'Aix Marseille (France) : 215 p.
- Goldberg, E., 1963. Geochronology with lead-210, In *Radioactive Dating. Report to the International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.*, 121–131.
- González J.I., Farreras S.F., Ochoa J. 2001. Seismic and meteorological tsunami contributions in the Manzanillo and Cabo San Lucas seiches of September 14, 1995. *Marine Geodesy* 24, 219–227.
- Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A.E., MacDonald, G.K., Zarfl, C., Lierman, C.R. (2015). An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales. *Environmental Research Letters*, 10, 1-15.
- Guillou N., Chapalain G. 2012. Modélisation des effets de la marée sur les hauteurs de houle aux abords de Port 2000 au Havre. In *Wikigéotech*.
- Guillou, N., Chapalain, G. (2012). Modeling the tide-induced modulation of wave height in the outer Seine estuary. *Journal of Coastal Research*. Volume 18, Issue 3 (May 2012), pp. 612-623, doi: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00075.1.
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G., Karahacane, H., Salah Eddine, A.R., 2019. Trend in precipitation and evolution of discharge in a climate change context: wadi Mina watershed in Algeria. *Rev. Sci. Eau* 32 (2), 83–114.
- Hayes, Miles O 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium. In *Geology and Engineering*, pages 3–22. Elsevier,
- Hilmi M. Fernandes P. , Hassani H., El Agbani M A, El Hamoumi R Et Qninba A. 2020. Valeur ornithologique d'un plan d'eau douce menacé, la Daya de Takaddoum (Vallée de l'Oued Bouregreg, nord-ouest du Maroc. *Go-South Bull.* (2020), 17, 24-42.
- Hobbie, J.E., 2000. *Estuarine science: a synthetic approach to research and practice*. Island Press.

- Hubert, P., Carbonnel J.P., Chaouche A. 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology*, 110, p 349-367.
- Hubert, P., Carbonnel J.P., Chaouche A. 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of hydrology*, 110, p 349-367.
- IPCC, (GIEC) 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC, (GIEC) 2013. Summary for policymakers. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC, (GIEC) 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp
- IRSN 2005. Institut de radioprotection et de la sûreté Nucleaire , fiche radionucléide Césium 137 et environnement. Direction de l'environnement et de l'intervention; 29p
- IRSN 2006. Les essais nucléaires atmosphériques, Direction de l'environnement Fiche 2, 13p <https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/upload/docs/application/pdf/2012-01/tirs-atmosph.pdf>.
- Jay, D.A., Flinchem, E.P. 1997. Interaction of fluctuating river flow with a barotropic tide: A demonstration of wavelet tidal analysis methods. *Journal of Geophysical Research*, 102, p. 5705-5720.
- Kacemi, M. 2008. La loi de protection et de valorisation du littoral en Algérie. Actes du colloque international pluridisciplinaire « Le littoral : subir, dire, agir ».
- Karageorgis, A.P., Nikolaidis, N.P., Karamanos, H., Skoulikidis, N., 2003. Water and sediment quality assessment of the Axios River and its coastal environment. *Cont. Shelf Res.* 23, 1929–1944.
- Kennish, M.J., 2002. Environmental threats and environmental future of estuaries. *Environ. Conserv.* 29, 78e107.
- Khomsy K., Mahe G., Sinan M. & al. 2012. Evolution des événements chauds rares et très rares dans les bassins versants du Tensift et du Bouregreg (Maroc) et identification des types de temps synoptiques associés. In: *From prediction to prevention of hydrological risk in Mediterranean countries* (E. Ferrari & P. Versace, Sci. Eds), 4th international Workshop on Hydrological extremes MEDFRIEND group, University of Calabria; EdiBios, Cosenza, Italia; 169-182.
- Khomsy K., Mahe G., Sinan M. & al. 2013. Hydroclimatic variability in two Moroccan watersheds: A comparative analysis of temperature, rain and flow regimes. *Climate and land surface changes in hydrology* (E. Boegh, E. Blyth, D.M. Hannah, H. Hisdal, H. Kunstmann, B. Su, K.K. Yilmaz, Eds.), IAHS Publ. 359, 183-190.
- Khomsy K., Mahe G., Trambly Y. & al. 2016. Regional impacts of global change: seasonal trends in extreme rainfall. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 16, 1079–1090, 2016.

- Khomsî, K. 2014. Variabilité hydro climatique dans les bassins versants du Bouregreg et du Tensift au Maroc : moyennes, extrêmes et projections climatiques. Mémoire de thèse. Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat.
- Kingumbi A., Bergaoui Z., Bourges Jacques, Hubert P., Kallel R. (2002). Etude de l'évolution des séries pluviométriques de la Tunisie centrale. In : Servat Eric (ed.), Albergel Jean (ed.). Hydrologie des régions méditerranéennes. Montpellier (FRA) ; Montpellier : UNESCO ; IRD, p. 341-350.
- Kirby R. (1988) High concentration suspension (fluid mud) layers in estuaries. *Physical Processes in Estuaries*, L.J. Dronkers, W. Van Leussen (Eds.), SpringerVerlag, pp 463-487.
- Klaus, T. 2002. Afrique Changements climatiques. Tendances des variations de températures mondiales au cours du XXème siècle. Vital Graphics, Pp.4.
- Knippertz P., Christoph M. & Speth P. 2003. Long term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Met. Atmos. Phys.* 83, 67-88.
- Kotti, F., Dezileau, L., Mahe, G., Habaieb, H., Benabdallah, S., Bentskaya, M., Calvez, R., Dieulin, C., 2018. Impact of dams and climate on the evolution of the sediment loads to the sea by the Mejerda river (Gulf of Tunis) using a paleo-hydrological approach. *J. Afr. Earth Sci.* 142, 226–233.
- Kotti, F., Dezileau, L., Mahe, G., Habaieb, H., Benabdallah, S., Bentskaya, M., Calvez, R., Dieulin, C., 2018. Impact of dams and climate on the evolution of the sediment loads to the sea by the Mejerda river (Gulf of Tunis) using a paleo-hydrological approach. *J. Afr. Earth Sci.* 142, 226–233.
- Krishnaswamy, S., Lal, D., Martin, J, Meybeck, M., 1971. Geochronology of lake sediments. *Earth Planet.Sci. Lett.*, 11, 407–414., [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(71\)90202-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(71)90202-0).
- Lahlou, A. 1982. La dégradation spécifique des bassins versants et son impact sur l'envasement des barrages. *Recent Developments in The Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield (Proceedings of the Exeter Symposium. IAHS Publ.no.137.*
- Lahlou, A. 1986. Etude actualisée de l'envasement des barrages au Maroc, *Rev.Science de l'eau* 6, pp.337-356. .
- Laouina, A., Mahe, G. 2013. Gestion durable des terres *Proceedings de la Réunion multi-acteurs, sur le bassin du Bouregreg* 28 mai 2013.
- Lawin A.E., Afouda A. & Lebel T. 2011. Analyse de la variabilité du régime pluviométrique dans la région agricole d'Ina au Bénin. *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450-216X, 50,3, pp.425-439.
- Le Dez M., Sawtschuk J., Bioret F P., Le Hir., Walther R.. 2017. Anticiper les impacts du changement climatique dans un milieu naturel soumis à de fortes contraintes anthropiques : l'estuaire de la Loire», *Noréis*, 245/2017, 15-28.
- Le Floch, J.F., 1961. Propagation de la marée dynamique dans l'estuaire de la Seine et la Seine Maritime. Thèse de doctorat. Paris. 507p.
- Le Hir P., Roberts W., Cazaillet O., Christie M., Bassoullet P., Bacher C. 2000 Characterization of intertidal flat hydrodynamics. *Continental shelf research* 20:1433–1459.
- Lee, A.F.S., Heghinian S.M. 1977. A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables, a Bayesian approach. *Technometrics*, 19, 503–506.

- Lozano, I., V. Swail. 2002. The link between wave height variability in the North Atlantic and the storm track activity in the last four decades. *Atmosphere - Ocean* 40 (4), 377–388.
- Lozano, I., V. Swail. 2002. The link between wave height variability in the North Atlantic and the storm track activity in the last four decades. *Atmosphere - Ocean* 40 (4), 377–388.
- Ludwig, W., Probst, J.-L. 1998. River sediment discharge to the oceans; present-day controls and global budgets. *American Journal of Science*, 298(4), 265–295.
- Mahé G., Delclaux F. & Crespy A. 1994. Élaboration d'une chaîne de traitement pluviométrique et application au calcul automatique de lames précipitées (bassin versant de l'Ogooué au Gabon). *Hydrol. continent.*, 9, 2 : 169-180.
- Mahé, G., Aderghal M., AlKarkour J. & al. 2013. Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. Considering hydrological change in reservoir planning and management, (A. Schumann, V.B. Belyaev, E. Gargouri, G. Kucera, G. Mahe, Eds), IAHS Publ. 362, 115-124.
- Mahé, G., Emran A., Brou Y.T. & al. 2012. Impact de la variabilité climatique sur l'état de surface du bassin versant du Bouregreg (Maroc). *European Journal of Scientific Research*, 84, 3, 417-425.
- Mallet C., Garnier C., Maugard F. et al. 2014. Compte-rendu des observations post-tempêtes sur le littoral aquitain (décembre 2013 –janvier 2014). Rapport final. BRGM/RP-63182-FR, 81 p.
- Ministère de l'équipement du transport et de la logistique 2014. Impacts de la houle exceptionnelle du 06-07 janvier 2014 sur les infrastructures portuaires. 33 p.
- Mathieson S, Cattrijsse A, Costa MJ, Drake P, Elliott M, Gardner J, Marchand J 2000. Fish assemblages of European tidal marshes: a comparison based on species, families and functional guilds. *Marine Ecology Progress Series* , 204, 225-242.
- Mayif, M. O. A., 1987. Un modèle estuarien limite : le Bou Regreg, (Maroc). Contribution à l'étude hydrodynamique, hydrologique, géochimique et minéralogique. Thèse de 3ème cycle, E. N. S. Rabat (Maroc), 137 p.
- Minoubi A., El Khalidi K., Chaibi M. et al. 2013. Variation morphosédimentaire saisonnière et impact de la tempête de Janvier 2009 sur la côte de Safi, Maroc. *ScienceLib Editions Mersenne*, 5,130202. 24 p.
- Mohsine, Y. 2009. Application du magnétisme de l'environnement pour la caractérisation de l'état d'évolution et/ou de dégradation des sols. Application aux sous bassins versants de Mezguida et Ait Azzouz de Bouregreg. Thèse, Université Mohamed 5, Rabat, Maroc.
- Möller, I., Spencer, T., 2009. Wave dissipation over macro-tidal saltmarshes: effects of marsh edge typology and vegetation change. *Journal of Coastal Research* 36, 506e521.
- Monographie régionale. 2019. monographie regionale sur le secteur de l'habitat et de la politique de la ville au niveau de la region de beni mellal-khenifra annee 2019.
- Mouloudi H. 2015. Les ambitions d'une capitale. Les projets d'aménagement des fronts d'eau de Rabat. <https://books.openedition.org/cjb/565>.
- Nadem, S., El Baghdadi M., Rais J., Barakat A. 2015. Evaluation de la contamination en métaux lourds des sédiments de l'estuaire de Bou Regreg (Côte atlantique, Maroc). *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (11) (2015) 3338-3345, ISSN : 2028-2508.
- Nezzal F., Iftini-Belaid Z., 2013. Variabilité climatique et impacts anthropiques sur la nappe alluviale de la Mitidja Orientale (Baie d'Alger). *Revue scientifique et technique, LJEE N°21 et 22. Spécial colloque CIRED*, 2013.

- Nichols M et Biggs.R. B. 1985. Estuaries. in 'coastal sedimentary environments'.(ed. ra davies jr.) pp. 77–173.
- Paturel J.E., Servat E., Kouame B., Lubes-Niel H., Ouedraogo M., Masson J.M. 1997. Climatic variability in humid Africa along the Gulfe of Guinea. Part two: an integrated regional approach. *Journal de l'Hydrologie*, vol. 191, 16-36.
- Perillo, G.M.E. 1995. Definitions and geomorphologic classifications of estuaries. In: G.M.E. Perillo (Ed.). *Geomorphology and sedimentology of estuaries* (pp. 17-47). *Developments in Sedimentology*, 53. Amsterdam: Elsevier.
- Pettitt, A.N. 1979. A non parametric approach to the change point problem. *Appl. Statist.* 28(2), 126-135.
- Pinet R. 2009. *Invitation to oceanography*. Jones & Bartlett Publishers.
- Poncet, P. 1981. Moyens traditionnels de contrôle des processus d'érosion-sédimentation en montagne. C. T. CREF, Groupement de Grenoble. Division : Protection carte les érosions.
- Potter, I.C., Chuwen, B.M., Hoeksema, S.D., Elliott, M., 2010. The concept of an estuary: a definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 87, 497–500.
- Prandle, D., Lane, A. 2015. Sensitivity of estuaries to sea level rise: vulnerability indices. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 160, 60e68.
- Pritchard, D.W. 1967. What is an estuary: a physical viewpoint. *Am. Assoc. Advancement Sci.* 83, 3–5.
- Pritchard, D.W., 1967. What is an estuary: a physical viewpoint. *Am. Assoc. Advancement Sci.* 83, 3–5.
- Probst, J.L., Amiotte Suchet, P. 1992. Fluvial suspended sediment transport and mechanical erosion in the Maghreb (North Africa). *Hydrological Science Journal*, pp. 621-637.
- Quinquis, M., 2017. Relations entre bassins versants et cellules sédimentaires littorales : les exemples du maroc, de l'algerie et de la tunisie. Mémoire de thèse, Université d'aix-marseille, France.
- Rabinovich A.B., Monserrat S. 1996. Meteorological tsunami near the Balearic and Kuril Islands: descriptive and statistical analysis. *Natural Hazards* 13, 55–90.
- Radakovitch, O., Cherry, R. D., Heyraud, M., & Heussner, S. 1998. Unusual ratios in the surface water of the Gulf of Lions. *Oceanologica Acta*, 21(3), 459–468. doi:10.1016/s0399-1784(98)80030-3.
- Rahdou, M. 2010. *Modelisation Hydrologique Du Bassin Versant De Bouregreg (S.S) Et Evaluation De Taux D'envasement Du Barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (Maroc) Par La Methode Bathymetrique*. Abhar, Centre National de Documentation.
- Rahou, M. 2010. *Modelisation hydrologique du bassin versant de bouregreg (s.s) et evaluation de taux d'envasement du barrage sidi Mohammed Ben Abdellah (Maroc) par la methode bathymétrique*. Mémoire de fin detude Master Sciences et Techniques : Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux. A l'ENFI Salé.
- RED, 1991. *Étude de la pollution de l'Oued Bou Regreg*. Rapport de la Régie Autonome de distribution d'Eau et d'Electricité : 60 p.
- Robbins, J. A. & Edgington, D.N. 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39, pp. 285- 304.

- Robins P.E., Skov M.W., Lewis M.J., Gimenez L., Davies A.G., Malham S. K., Neill S , McDonald J. E., Whitton T.A., Jackson S.E., Jago C.F. 2016. Impact of climate change on UK estuaries: A review of past trends and potential projections. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 169 (2016) 119e135
- Robins, P.E., Davies, A.G. 2010. Morphological controls in sandy estuaries: the influence of tidal flats and bathymetry on sediment transport. *Ocean Dyn.* 60, 503e517
- Robins, P.E., Lewis, M.J., Simpson, J.H., Howlett, E.R., Malham, S.K., 2014. Future variability of solute transport in a macrotidal estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 151, 88e99.
- Rockwell W Geyer and Parker MacCready. 2014 The estuarine circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 46:175–197,
- Romana, L.A. 1992. Le comportement des grands estuaires français. Colloque national : Estuaires et deltas : des milieux menacés ?. Bègles, 25 juin 1992.
- Ross M.A., Mehta A.J. 1989. On the mechanics of lutoclines and fluid mud. *J. of Coastal Research*, Sp issue 5, High Concentration Cohesive Sediment Transport, A.J. Mehta, E.J. Hayter (Eds.), pp 51-61.
- Sabatier, P., Dezileau, L., Condomines, M., Briqueu, L., Colin, C., Bouchette, F., Le Duff, M., et Blanchemanche, P. 2008. Reconstruction of paleostorm events in a coastal lagoon (Herault, South of France). *Marine Geology*, 251, pp. 224-232.
- Sabatier, P., Dezileau, L., Condomines, M., Briqueu, L., Colin, C., Bouchette, F., Le Duff, M. and Blanchemanche, P. 2008. Reconstruction of paleostorm events in a coastal lagoon (Herault, South of France). *Marine Geology*, 251, pp. 224-232.
- Schubel J. R. et Pritchard D. W. 1972. The estuarine environment, part 1. *Journal of Geological Education*, 20(2):60–68,
- SIGMED. 2010. Approche Spatialisée de l'Impact des activités agricoles au Maghreb sur les transports solides et les ressources en Eau De grands bassins versants. <http://armspark.msem.univ-montp2.fr/SigMED/index.asp>.
- Simonet, R. et Tanguy, R. 1962. Etude statistique de la houle dans les différents ports marocains pour la période 1928–1952. *Ann Serv Phys Globe Meteorol Rabat* XVI:109–130.
- Singla S., Mahé G., Dieulin C. & al. 2010. Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources* (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010), IAHS Publ. 340, 679-687.
- Singla, S. 2009. Impact du changement climatique global sur les régimes hydroclimatiques au Maroc : tendances, ruptures et effets anthropiques sur les écoulements. Mémoire de Master. M2R2E, France.
- Snoussi, M. 2020. Contribution à l'élaboration d'un plan de gestion intégrée pour les zones côtières des régions de Rabat- Salé-Kenitra : Tâche 1 : diagnostic des zones côtières de la région d'étude, 70p.
- Sogreah, 2011. Etude d'expertise sédimentologique de la plage de Mehdiya. Final version of report N° 1712781.
- Soro T.D., Soro N., Oga Y.M.-S., Lasm T., Soro G., Ahoussi K.E., Biemi J., 2011. La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire), *Physio-Géo*, V.5, 2011 P55-P73.
- Stanley, DJ. 1988. Subsidence in the northeastern Nile Delta: rapid rates, possible cause, and consequence. *Science* 240:497–500.

- Syvitski J. P. M., Vörösmarty C., Kettner A. J., Green P. 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308, 376–380 (doi:10.1126/science.1109454).
- Syvitski, J. P., Peckham, S. D., Hilberman, R., Mulder, T. 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: A planetary perspective. *Sedimentary Geology*, 162(1–2), 5–24.
- Syvitski, J.P.M. & Saito, Y. 2007. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and planetary changes* 57 (3–4), 261–282.
- Thiel R, Cabral H, Costa MJ 2003. Composition, temporal changes and ecological guild classification of the ichthyofaunas of large European estuaries – a comparison between the Tagus (Portugal) and the Elbe (Germany). *Journal of Applied Ichthyology*, 19, 330-342.
- Tra Bi Z.A., Koli bi Z., Brou y.t, Mahe G., Emran A. 2013. Télédétection et analyse statistique de la dynamique de la végétation dans un contexte de variabilité climatique sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc) Climate and Land Surface Changes in Hydrology Proceedings of H01, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013 (IAHS Publ. 359, 2013).
- Tra Bi, Z.A. 2013. Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Tribovillard, N., Algeo, T. J., Lyons, T., Riboulleau, A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chemical geology*, 232(1), 12-32.
- Tsiourtis, S. 2001. Drought management plans for the Mediterranean region. Water Engineer Water Development Department, Nicosia, Cyprus.
- Valle-Levinson, A. 2010. Contemporary Issues in Estuarine Physics, doi:10.1017/CBO9780511676567.011.
- Vörösmarty, C.J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P. & Syvitski, J.P. 2003 Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39, 169–190.
- Wang, Z.B., Jeuken, M., Gerritsen, H., De Vriend, H.J., Kornman, B.A., 2002. Morphology and asymmetry of the vertical tide in the Westerschelde estuary. *Cont. Shelf Res.* 22, 2599–2609
- Whitehead, P.G., Wilby, R.L., Battarbee, R.W., Kernan, M., Wade, A.J., 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrol. Sci. J.* 54, 101e123.
- Yang X, Zhang Q, Zhang J, Tan F, Wu Y, Zhang N, Yang H, Pang Q. 2015. An integrated model for three-dimensional cohesive sediment transport in storm event and its application on Lianyungang Harbor, China. *Ocean Dynamics* 65:395–417.
- Yang, Z.Q., Wang, T.P., Voisin, N., Copping, A., 2015. Estuarine response to river flow and sea-level rise under future climate change and human development. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 156, 1930.

ANNEXES

Annexe 1. Inventaire des stations de mesure de pluie mensuelle dans le bassin versant du Bouregreg.

Station	Code	Paramètre	Long X	Latitude Y	Période	Lacunes(%)
AGUIBAT EZZIAR	A E	pluie	-6,541	33,909	1977-2013	10
LALLA CHAFIA	L C	pluie	-6,388	33,708	1977-2013	16
TSALAT	T	pluie	-6,027	33,333	1977-2013	3
S, JABEUR	S, J	pluie	-6,426	33,400	1977-2013	10
RASFATHIA	RF	pluie	-6,541	33,761	1977-2013	13
O, HABOUB	O, H	pluie	-6,255	33,110	1977-2013	23
AIN OUADEH	A, O	pluie	-6,761	33,555	1977-2013	29
C, M CHREF	C,m C	pluie	-6,603	33,532	1977-2013	22
station1	S1	pluie	-5,750	33,750	1977-1999	0
station2	S2	pluie	-5,750	33,250	1977-1999	0
station3	S3	pluie	-5,750	32,750	1977-1999	0
station4	S4	pluie	-6,250	34,250	1977-1999	0
station5	S5	pluie	-6,250	33,750	1977-1999	0
station6	S6	pluie	-6,250	33,250	1977-1999	0
station7	S7	pluie	-6,250	32,750	1977-1999	0
station8	S8	pluie	-6,750	34,250	1977-1999	0
station9	S9	pluie	-6,750	33,750	1977-1999	0
station10	S10	pluie	-6,750	33,250	1977-1999	0
station11	S11	pluie	-6,750	32,750	1977-1999	0

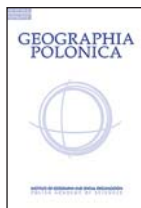
station a	Sa	pluie	-5,400	33,117	1977-1999	0
station b	Sb	pluie	-5,550	33,317	1977-1999	0
station c	Sc	pluie	-5,667	32,967	1977-1999	0
station d	Sd	pluie	-6,933	34,000	1977-1999	0
station e	Se	pluie	-6,983	33,400	1977-1999	0
station I	S I	pluie	-5,167	33,500	2000-2005	0
station II	S II	pluie	-6,767	34,050	2000-2005	0

Annexe 2. Inventaire des stations de mesure des débits mensuel dans le bassin Bouregreg.

Station	Bassin	Paramètre	Long X	Latitude Y	Période	Lacunes
AGUIBAT EZZIAR	Bouregreg	Débit	-6,541	33,909	1977-2007	0
LALLA CHAFIA	Bouregreg	Débit	-6,388	33,708	1977-2005	0
TSALAT	Bouregreg	Débit	-6,027	33,333	1977-2005	0,03
S, JABEUR	Bouregreg	Débit	-6,426	33,400	1977-2005	0
RASFATHIA	Bouregreg	Débit	-6,541	33,761	1977-2005	0,13
O, HABOUB	Bouregreg	Débit	-6,255	33,110	1977-2005	0
AIN OUADEH	Bouregreg	Débit	-6,761	33,555	1977-2005	0
C, M CHREF	Bouregreg	Débit	-6,603	33,532	1977-2005	0

Annexe 3. Articles publiés

- “Fluvial sediment transport degradation after dam construction in North Africa”. *Journal of African Earth Sciences*, 182 (2021) 104255.
- “Evolution of the hydrological regime in relation to climate change: Case of the Bouregreg River basin, Morocco”. *Geographia Polonica*, Volume 94, Issue 1, pp. 131-148.



EVOLUTION OF THE HYDROLOGICAL REGIME IN RELATION TO CLIMATE CHANGE: CASE OF THE BOUREGREG RIVER BASIN, MOROCCO

Rajae El Aoula¹  • Gil Mahe²  • Nadia Mhammdi¹  • Abdellatif Ez-zahouani³  • Ilias Kacimi³  • Kenza Khomsi⁴ 

¹ Research center of GEOPAC, Geophysical laboratory and Natural Hazard
University of Mohammed V in Rabat, Scientific Institute Morocco
Rabat: Morocco
e-mails: elaoula.rajae@gmail.com (corresponding author) • nmhammdif@yahoo.com

² UMR HydroSciences Montpellier
IRD: France
e-mails: gilmahe@hotmail.com • iliasKacimi@yahoo.fr

³ Water center, Natural resources, Environment and sustainable development Laboratory
of Geoscience, Water and Environment
University of Mohammed V in Rabat
Rabat: Morocco
e-mail: gmezzahouani@gmail.com

⁴ National Directorate of Meteorology
Casablanca: Morocco
e-mail: K.Khomsi@gmail.com

Abstract

The objective of this study is to investigate the evolution of rainfall and flow in the Bouregreg watershed, and to identify the most vulnerable regions to climate change over a period of 36 years from 1977 to 2013. Results show significant variations between these sub-regions in term of monthly flows and monthly regimes. January and February rainfall amounts are the most affected by the reduction of rainfall since the drought started end of the 1970's, inducing a reduction of flows at all hydrological stations mainly since 1979. The year 1996 shows very high precipitations over all sub-basins, and also separates two periods with different rainfall time series variations according to two regions over the basin: the region of the Tsalat sub-basin in the Southeast wet and mountainous area (Middle Atlas) shows a durable decrease of rainfall compared to the Ain Loudah sub-basin in the Center-West semi-arid plateau area.

Key words

climate change • rainfall • standardized index • rupture • watershed • Bouregreg • Morocco

Introduction

Rainfall is the most important climatic factor to both ecosystems and people. Thus, the detection of trends and variations in long hydroclimatological series is relevant for climate change mitigation and adaptation strategies. Particularly, Nord African countries suffered economically, socially and ecologically from drought during the last decades as in Morocco during years from 1980 to 1985 and from 1991 to 1995 (Tsiourtis, 2001; Singla et al., 2010; Khomsi et al., 2016; Zamrane et al., 2016a, 2016b), in Algeria (Taibi et al., 2017, 2019; Hadour et al., 2020; Hallouz et al., 2020 and in Tunisia (Bargaoui et al., 2014; Kotti et al., 2016; Trambly et al., 2019). Natural systems and human activities are most at risk due to lack of regular water supply during the year. This is due to the high inter-annual variability and the significant seasonality of rainfall. This study was developed from the results of the SIGMED project¹ (Mahé et al., 2013). This basin represents one of the five major Moroccan rivers by its flow and size and it has the distinction of being limited to 18 km from its mouth by a dam (Sidi Mohamed Ben Abdellah, SMBA) of a volume exceeding 1 Md m³. Hydroclimatic regime of the basin is influenced both by NAO (North Atlantic Oscillation) and MO (Mediterranean Oscillation) (Khomsi et al., 2016; Zamrane et al., 2016a). This has an impact on the evolution of hot episodes in Morocco's internal areas (Khomsi et al., 2013). Moreover, in a semi-arid Mediterranean context, the decrease of rainfall since 1979 and the increase in extreme events, have modified the conditions for erosion and solid transport in this basin (Driouech et al., 2010a; Singla et al., 2010; Khomsi et al., 2012; 2016), as it has been reported by Hallouz et al. (2018) in Algeria. It is therefore important to study

the evolution of water resources available in a changing climate environment. Previous studies (Knippertz et al., 2003; Driouech et al., 2009; Sinan et al., 2009; Driouech et al., 2010b; Sebbar et al., 2011; Trambly et al., 2012; Zhiri et al., 2017; Rivoire et al., 2019) in Morocco's watershed used statistical and modeling techniques to analyze the nature and extent of trends in time series. However, several gaps still exist in current knowledge and understanding of the annual variability of regional climates and river systems in the Bouregreg and other Moroccan watersheds. This study completes the previous ones about the Bouregreg by including the study of several sub-basins of the Bouregreg, allowing a better description of local variations, including the continental/coastal effect. This will reveal regional impact on varying local conditions and implications on hydrological regime in this important watershed, where many agricultural activities have been developed, and where most river runoff is stored in a large dam for portable water consumption for the most heavily populated basin in the country (with about 8 million people between Casablanca, Kenitra, and Rabat). This study investigates, trends in the rainfall and hydrometric series, and evolution of rainfall and flow from a regional scale over 36 years, using monthly and annual observations. The objectives of this work are to identify the main factors of climate variability through the detection of similarities and differences between the responses of measurement stations, and consider the contribution of each region to the development of sustainable water management in Bouregreg watershed in the context of climate change. The stations used in this work are located in the upstream half of the basin, and are not influenced by the dam. They present an interesting dataset to test the impact of climate change on the hydrological regime, and thus to the variability of the water resource that would be available for the downstream development of these stations, according to a method used in Morocco by Singla et al. (2010).

¹ The SIGMED project stands for "spatial approach of the impact of agricultural activities in the Maghreb on sediment transport and water resources in large river basins" retrieved from <http://armspark.msem.univ-montp2.fr/sigmed/>.

Study area

The Bouregreg watershed (Fig. 1) is located in the Mediterranean area at latitude 32°50' to 34°30' N and extends from longitude 5° to 7°W (Beaudet, 1969). The hydrographic network develops around two main rivers, the Bouregreg and the Grou rivers, which respectively drain an area of 4000 km² and 3600 km² (Lahlou, 1986), and a smaller basin coming from the South, the Korifla, divided into two tributaries. The water supplies of the basin are closely related to rainfall. The average water potential of the Bouregreg basin is estimated at 680 mm per year (Ministry of Energy, Mines, Water and the Environment).

The hydrographic network of the Bouregreg watershed is fairly developed. It consists of two main rivers, namely:

- Bouregreg river, which drains an area of 3.830 km², corresponding to the north-east part of the basin.
- Grou river and its tributaries, Korifla and Akrech which drain the southwest part. It has a total area of 5.760 km².

The Bouregreg river is located at 5.4 and -6.8°W and 32.8 to -34°N, representing the northeastern part of the Bouregreg basin. It originates from the Middle Atlas mountains at altitude 1627 m in Jebel Mtourzgane and Grou (Beaudet, 1969), and 50% of the area is located at altitudes between 500 and 1000 m (SIGMED project; Mahe et al., 2013). The basin consists of a combination of monotonous plateaus, deep gorges and basins partitioned by steep ridges over an area of 9656 km² (Marghich, 2004) on the western humid side of the country. The Bouregreg stream follows a straight overall direction SE-NW and extends over a length of 240 km. The last 23 kilometers of the lower course of the Bouregreg end with a partially developed estuary (Lahlou, 1986). The climate is sub-humid to semi-arid (Mahé et al., 2012) and average annual rainfall ranges from about 400 mm in coastal regions to 760 mm in the western part of the basin (Fig. 2). The number of rainy days per year is 75-100 in mountainous regions and 60-75 elsewhere (Khoms, 2014).

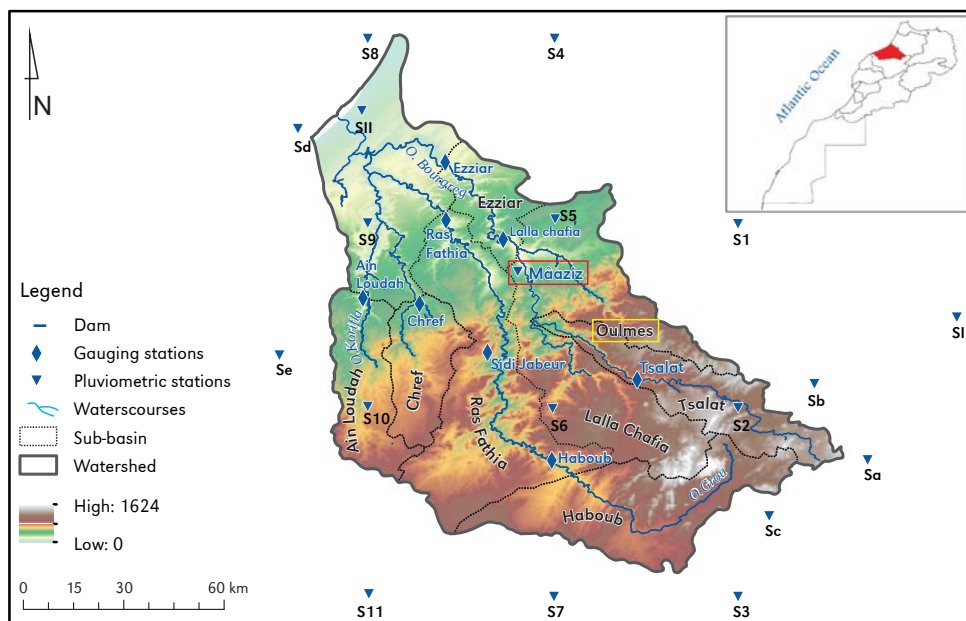


Figure 1. The Bouregreg catchment and the main sub-basins

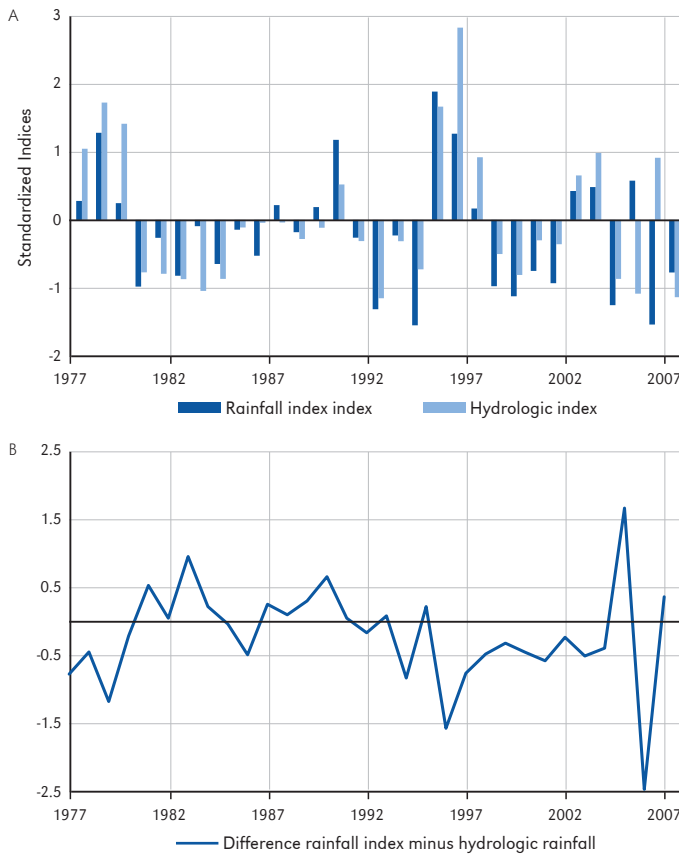


Figure 2. Rainfall and hydrologic indexes from 1977 to 2007 for the Bouregreg catchment (9970 km²)

Data and methods

Source of data

Rainfall data used in this study come from 18 stations available on the SIEREM database of the Environmental information system for water resources (Boyer et al., 2006; Dieulin et al., 2006; Dieulin et al., 2019), and recent data from 8 stations of Bouregreg and Chaouia hydraulic agency for the period 1977–2013. The SIEREM rainfall database totalizes more than 10,000 stations over the whole African continent (Rouche et al., 2010), starting before the XXth century for the oldest ones. They originate from several sources: the former rainfall database shared by all western African countries within ASECNA (African agency for the security of aerial

navigation), the databases of the FRIEND-Water program from UNESCO, and data shared by IRD and their national partners during research project. These data have been crossed and improved according to the CRU raw database, implementing some areas with less data in each base. The most recent data mainly during the 80s were obtained from the GPCC (Global Precipitation Climatology Centre), and national services. The raw data were strictly analyzed following many statistical tests, and about 6000 stations were eventually used for the interpolation of station data to obtain monthly gridded data sets from January 1940 to December 1999, at the 0.5° square scale. Dieulin et al. (2019) indicated different techniques used and the validation with observed data, and present a comparison

with the CRU data on the same area and period, which show that SIEREM gridded data better represent rainfall in many areas of Africa than the CRU especially in North Africa.

The flow data were collected from 8 flow measurement stations by the Bouregreg and Chaouia hydraulic agency (ABHBC) and cover a period from 1977 to 2007. The quality of the flow data used in this work is ensured by the ABHBC, which operates continuous discharges automatic measurements, and regular gaugings at all stations to ensure an up to date rating curve. The following methods are used in this study.

Rainfall and hydrometric indices

Rainfall and hydrometric indices are used to characterize the temporal heterogeneity of climatological variability and to identify major trends in hydroclimatological series. To visualize the annual deficit and surplus periods, these indices were centered and reduced using the following formula:

$$V_{cr} = (P - P_{moy}) / \sigma \quad (1)$$

where:

V_{cr} – is the Reduced Centered Variable (Rainfall Index (SPI) or Hydrometric Index (SDI) according to the variable under study),

P – is the cumulative of the variable over a given period t ,

P_{moy} – is the mean of the time series over the period of time, and

σ – is the standard deviation of the series over the period (Hallouz et al., 2013).

Thiessen Polygon

Precipitation measured at a meteorological station represents rainfall falling at a particular geographical point and not a spatial rainfall. Thiessen polygon method assigns to each rain gauge a zone of influence whose area, expressed as a percentage, represents the weighting factor of the local value. The different zones of influence are determined by geometric cutting of the basin on a topographic map. The weighted mean precipitation for

the basin is then computed by taken the sum of the rainfall of each station, multiplied by their weighting factor, divided by the total area of the basin (Mahé et al, 1994).

Statistical methods for rupture detection

Statistical tests are used to detect a trend or an average break in the series. The tests are grouped together in the Khronostat software (1998) produced by the IRD and available on the HydroSciences Montpellier website (<http://www.ird.fr/hydrosciences/fr>).

Pettitt test (Pettitt, 1979) was used on all selected positions to identify an average “break” in the annual and monthly rainfall and hydrometric series. This test, despite its robustness, is non-parametric and derives from the formulation of the Mann-Whitney test. The absence of a rupture in the time series X constitutes the null hypothesis H_0 .

Bayesian method of Lee and Heghinian (1977) allows to determine the date and the amplitude of the rupture. This method provides the probability that a change occurs at a time t in a time series where it is assumed that there is indeed a change at an unknown time. Similarly, this procedure gives an estimate of the probability that the magnitude of the change has the value of the potential change in the mean.

Hubert method (Hubert et al, 1989) consists in dividing the series into m segments ($m > 1$) so that the average calculated on any segment is significantly different from the average of the neighbor segment (s). This method is suitable for detecting multiple changes in the mean.

Results

Evolution of rainfall and flow over the whole Bouregreg watershed

Rainfall and hydrometric indices

Over the whole of the Bouregreg basin, the period 1977-2007 is marked by two years of major deficits in 1994 and 2006

(Fig. 2). After the end of the 1970s, there was an increase not only in dry years but also in the magnitude of drought compared to the previous period. Apart from 1995 and 1996, all other years were dry. From 2002 appeared an alternation of positive and negative indices. Based on these indices expressed by the rainfall and hydrometric data for the period 1977-2007, the precipitation trend follows those observed in flow but with values sometimes significantly different. Then, in 2005 and 2006, opposite values of the two indices are recorded. To estimate this difference, Figure 2B shows the variation between rainfall and hydrometric indices. Resulting positive variation is obtained from the beginning of the drought (1979) to the NAO event (1995/1996). Since 1996, the variation becomes negative, with a rainfall index higher than the hydrometric index. This result seems to be explained by variability of annual cumulation that appears related to the number of events rather than to the amount of rainfall by rainy event (Lawin et al, 2011). At the level of the Bouregreg watershed, the number of rainy days per year varies from 60 to 75 between the mountains and the ocean and from 75 to 100 on the mountains. This can be also due to a durable impact of the drought on groundwater reserves which are much lower after ten years of drought, and the 1996 wet year is not sufficient to recover the previous groundwater level. Eventually, as it was not possible to get up to date data for all rivers, the time series ends in 2007, and it thus not possible to show if the wetter years recorded starting in 2008 have a positive impact on the discharges, as it seems

observed from some other studies (Mahe et al., 2014).

Monthly regime before and after the rupture (1979)

Analysis and interpretation of the statistical tests revealed that for annual rainfall in the whole basin (Tab. 1), the rupture was detected in the years 1994 and 1997. This is related to a decrease in rainfall. However, some ruptures and trends can be observed at the end of the 1970s or at the beginning of the 1980s reflecting probably a change that would be more apparent at the scale of rainy event.

The monthly rainfall evolution over the two periods before and after the rupture (Fig. 3) shows a significant decrease between December and February over the whole basin. Rainfall declined in the 1980s, except in March. Rainfall totals evolved during the "great" rainy season November-December, while the "small" rainy season from March to April has almost disappeared, and a relative maximum appears in September-October.

To estimate the variation before and after 1979, the percentage of monthly rainfall is computed. We deduced a significant decrease of 14.3%, from a total rainfall of 534 to 458 mm, while in February there is an increase of 49%, which made it difficult to be explained without investigating the evolution including many climatic parameters. The period of calculation of the flow before the drought is different from that of the rains, because the available data are longer (average of 4 stations of long duration), but the result is the same as including all stations over short period, with flow in February

Table 1. Observed ruptures by the statistical methods of Khronostat for rainfall and flow time series on the Bouregreg catchment, since 1977 to 2007. (NR= No rupture)

Variable	Period	Pettitt	Lee & Heghinian	Hubert	Buishand	Probability of rupture		
						low	intermediate	strong
Rainfall	1977-2007	1997	1997	1994 1998 2006	NR	-	1997	-
Flow	1977-2007	NR	1979	1979	1979	-	-	1979

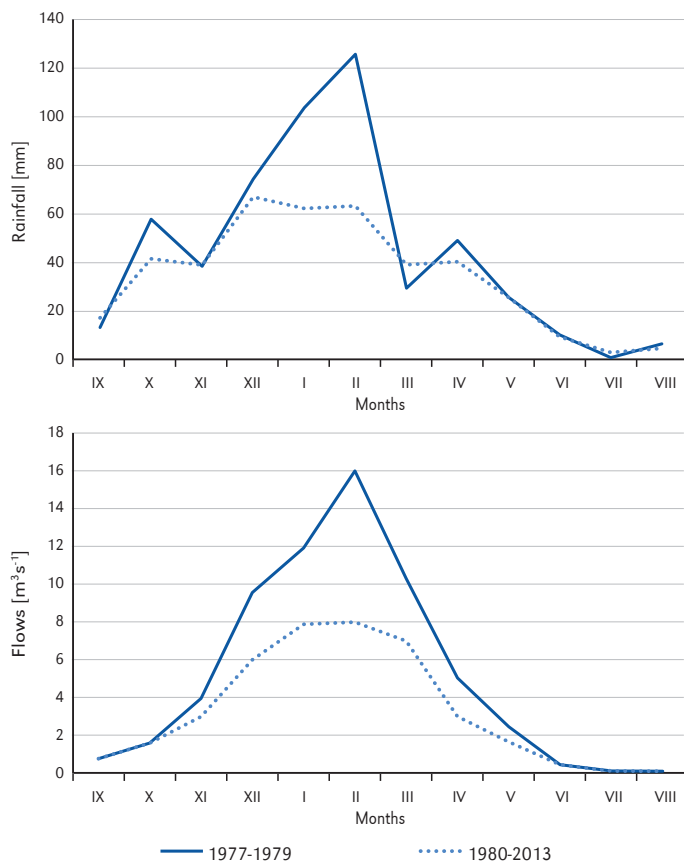


Figure 3. Evolution of the rainfall and flow monthly in the Bouregreg basin, since 1977 to 1979 and from 1980 to 2013 from September to August

and March higher over the short period 1977-1979. The monthly difference in flow between the two periods is close to 41%.

Regional study of rainfall and flow

To investigate the evolution of rainfall and flow in the Bouregreg watershed by considering local heterogeneities of the distribution of rain, we have subdivided the large basin of the Bouregreg into climatic regions to reassess the annual and monthly series by sub-region. This provided new information by clearly showing the spread of different signals and we deduced sub-regions most vulnerable to climate change. The average rainfall for each sub-basin is obtained from

the Thiessen polygon method based on the Delaunay triangulation using the mediator method between two stations.

The layer of each sub-watershed is taken with that of the Thiessen polygons in order to obtain the polygons on the sub-watersheds. Processing of the remaining stations leads to the constitution of seven polygons and thus of seven sub-watersheds basins (Fig. 1). We therefore identified seven sub-basins at different spatial scales in the Bouregreg watershed: Ezziar, LallaChafia, Tsalat, RasFathia, Haboub, Ain Loudah and Chref.

Spatio-temporal variable rupture

Statistical tests in the sub-basin index series are shown in Table 2. The establishment

of the sub-regions is constrained by the number of stations used, their spatial distribution, and the duration of the series. However, there were ruptures in the 1970s in January 1977 and February 1979, as well as late ruptures in April 1997 at Chref, and in September 2007, November-October 2009 and July 2012 at the Ezziar and Lalla Chafia sub-basin (Tab. 2). As for flow, it appears, through Table 3, a spatio-temporal variability of rupture dates at the Bouregreg scale. The probable ruptures are observed both in the rainy season and dry season. The tests show

evidence for a period of negative rupture particularly at the end of the 79's. The rainfall series and to a lesser extent the flow series show very significant positive ruptures for almost all the stations at the end of the 2000s. However, January – February rainfall series and to a lesser extent by May, the rainfall

rebound due to a few successive years of best annual accumulation in the late 2000s did not change the long-term trend in January-February (Fig. 3). A direct impact on flow from December to February, is marked by the

Table 2. Rupture in the monthly rainfall time series of the Bouregreg sub-basins

Sub-basins	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
Ezziar	07	09	09	10	77	79	12	97	84		12		
LallaChafia	07	07	09	10	77	79	12	97	84	98	12		
Tsalat	99	09	09	10	77	79	12	97	84	98	12	12	
Ras Fathia	11	09	09	94	78	78	12		12		12	12	
Haboub	11	09	09	94	77	79	12	97	85	98	12	12	
Ain Loudah	00	09	09	10	79	96	12	97		98			
Chref	12	09	09	10		94	96	97		98		99	
Number of ruptures during 1970s	0	0	0	0	6	5	0	0	0	0	0	0	11
Number of ruptures during 1980s	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	4
Number of ruptures during 1990s	1	0	0	2	0	2	1	6	0	5	0	1	18
Number of ruptures after 1990s	6	7	7	5	0	0	6	0	1	0	5	3	40

Table 3. Rupture of monthly flow of the Bouregreg sub-basins

Stations	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
Ezziar	96		01		77	79	80	03	04	79	79		
LallaChafia		78	01	94	78		79	07	07				
Tsalat		06				78	79		06				
Ras Fathia	94		01		79	79	80	04	04				
Haboub		04	07			78	06						
Ain Loudah						78			02				
Chref			01			78							
Number of ruptures during 70s	0	1	0	0	3	6	2	0	0	1	1	0	14
Number of ruptures during 80s	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2
Number of ruptures during 90s	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
Number of ruptures after 90s	0	2	5	0	0	0	1	3	5	0	0	0	16

rupture in late 1970s. However, since the aquifers recharge the most during months of December to February we can expect a still marked impact on groundwater due to long-term trend decrease of rains during winter.

Rainfall evolution

Due to its geographical setting, Bouregreg watershed basin is under influence of the Atlantic and Mediterranean in addition to the relief effect. These features influence its climate on a global scale. We then investigate the contribution of climate change in the evolution of rainfall for each sub-basin. Figure 4 shows that the seven sub-basins

present similar variation in rainfall distribution with a combination of positive and negative trends. The precipitations usually fluctuate between 162 mm and 1104 mm. Some amplitudes are significantly different, with a much higher peak in the Tsalat sub-basin in 1996. This sub-basin is located near the town of Oulmes on the western mountains of the basin, which probably induces a specific variability of rainfall in this zone where the average rainfall at Oulmes station is of about 760 mm (Mahe et al., 2012; Tra bi, 2013). However, the lowest height was recorded in 2001 in Ain Loudah located on the Korifla river which is coming from south, and is the driest

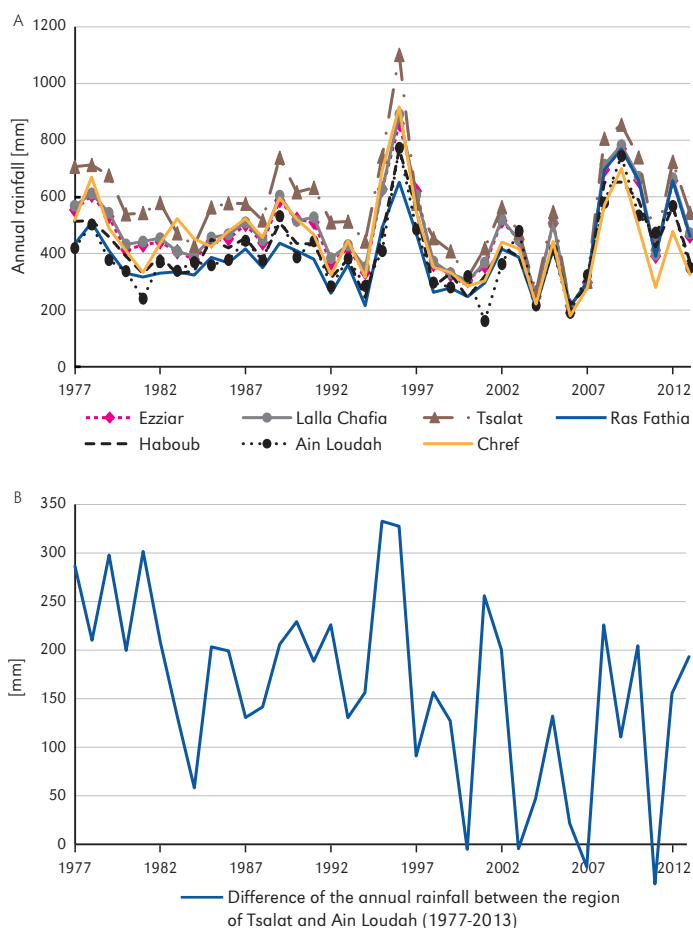


Figure 4. (A) Evolution of the annual rainfall on the Bouregreg sub-basins from 1977 to 2013; (B) Difference of the annual rainfall between the region of Tsalat and Ain Loudah (1977-2013)

of all the Bouregreg. In 2006, we noticed a clearly increase in annual average values. The sub-basins have similar rainfall except two sub-regions: Tsalat and Ain Loudah. Rainfall from Tsalat is 40% higher than that of Ain Loudah due to their geographical setting. We noticed also a decreasing difference between the two regions over the entire period. Tsalat sub-region which shows a significant downward trend compared to the Ain Loudah where it tends to lose less rain (Fig. 4B). The loss of about 100 mm per year since the end of 90s on the high basin that is the rainiest region of the basin, compared to lower regions, does not augur positive trend for the next decades. While this trend is confirmed it will involve a sustainable decrease in water supply at the SMBA dam from Bouregreg river.

Evolution of flow

Figure 5 presents the annual flow available on long chronicles from 1977 to 2007 at seven stations: Tsalat, Ezziar, Ras Fathia, Ain Loudah, Lalla Chafia, Haboub and Sidi Jabeur. Since 1980-1982, annual discharges have been lower than during the 1970s which worsens drought, and greatly influenced hydrology during the same period. At all the stations of the watershed, a peak in 1996 is observed. Strong variation is observed between stations (Fig. 5). The flow at the stations (Ezziar, Ras Fathia, Haboub, Lalla Chafia and Sidi Jabeur) is regularly largely higher compared to the flow rate recorded at Ain Loudah and Chref stations. These last stations, located on the Oued Grou and Korifla basin, show significant variation even though they both are of low flow amplitude.

Previous studies highlighted net changes in annual flow that generally result in an increased flow in 1996, when it seems interesting to compare the difference before and after this date to follow the monthly evolution of the series and seasonal behavior at each station. Figure 6 shows the monthly flow increases from September to a peak in February, with a very significant decrease observed during the dry season which coincides with

June-August period. Haboub and Sidi Jaber, Ezziar Fathia stations show high scale of monthly flows compared to Chref, Tsalat, Ain Loudah stations. Local conditions may explain these important sub-regional variations. However, global trends of higher flow on all stations is observed from September to December and even January, and then systematically lower flow from January-February after 1996. This corresponds well to the average decline rains observed throughout the basin since the last decades. The very low flow rates at three stations indicate a very low underground reserve and correlatively a very weak recharge.

Discussion

Analysis and interpretation of the statistical tests revealed that for annual rainfall in the whole basin, the rupture was detected in the years 1994 and 1997. This is related to a decrease in rainfall. However, some ruptures and trends can be observed at the end of the 1970s or at the beginning of the 1980s reflecting probably a change that would be more evident at the scale of the rainy event. These results are in agreement with studies that investigated the evolution of rains in Africa showing the fastest warming periods during the twentieth century that are observed from the 1910 to 1930s and after 1979 (Klaus, 2002). This also agreed with studies showing a decrease in rainfall in Morocco since the 1960s (Driouech, 2006; DMN, 2007), and significantly since the late 70's / early 80's (Agoumi and Debbarh, 2006; Knippertz et al, 2003). This evolution of hydrological regime is reported by Singla et al, (2010) who included the rains in 1979. At the end of 1970s, there was a slight decrease in rainfall and in all sub-basins, which also noted a decrease in flow (monthly and annual flow) in Morocco since the end of the 1970s / early 1980s. We therefore assume that the decrease in flow is due to an overall decrease in precipitation over watershed. Similar trends are also observed by Khomsi et al (2016) in the Tensift watershed and Ouahidy

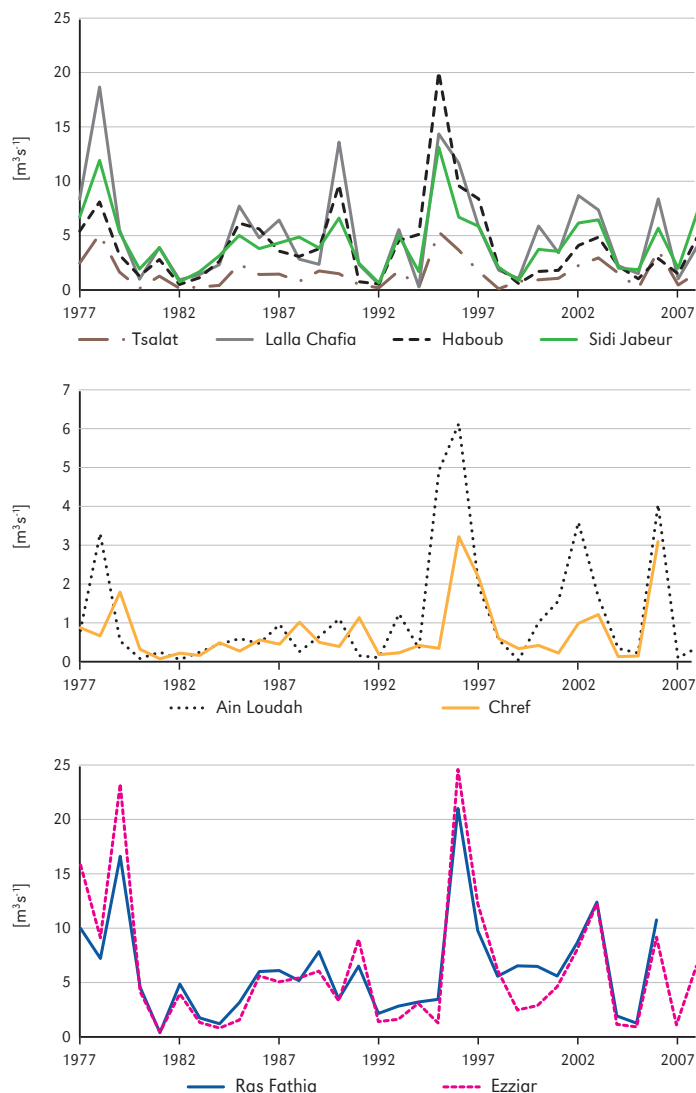


Figure 5. Evolution of the annual flow on the Bouregreg sub-basins from 1977 to 2007 (m^3s^{-1})

and Choukri (2018) in Rheraya watershed, located in the Hight Atlas of Marrakech (Morocco). Also, we noticed a peak in 1996, a year of heavy rain corresponding to the maximum flood period recorded for all the stations, which is consistent with the results of Khomsi et al, (2012). The year 1996 was of strong NAO anomaly favorable to rainfall in Morocco. According to Khomsi et al. (2016), the northern and southern regions

of Bouregreg watershed are impacted differently by large- scale atmospheric circulation and may respond in different ways to recent global warming. This response depends on the season studied and the considered region characteristics. At monthly time scale, the rainfall timeseries present a statistically significant ruptures at the end of the 1970s. January and February rainfall amounts are the most affected by the reduction of rainfall

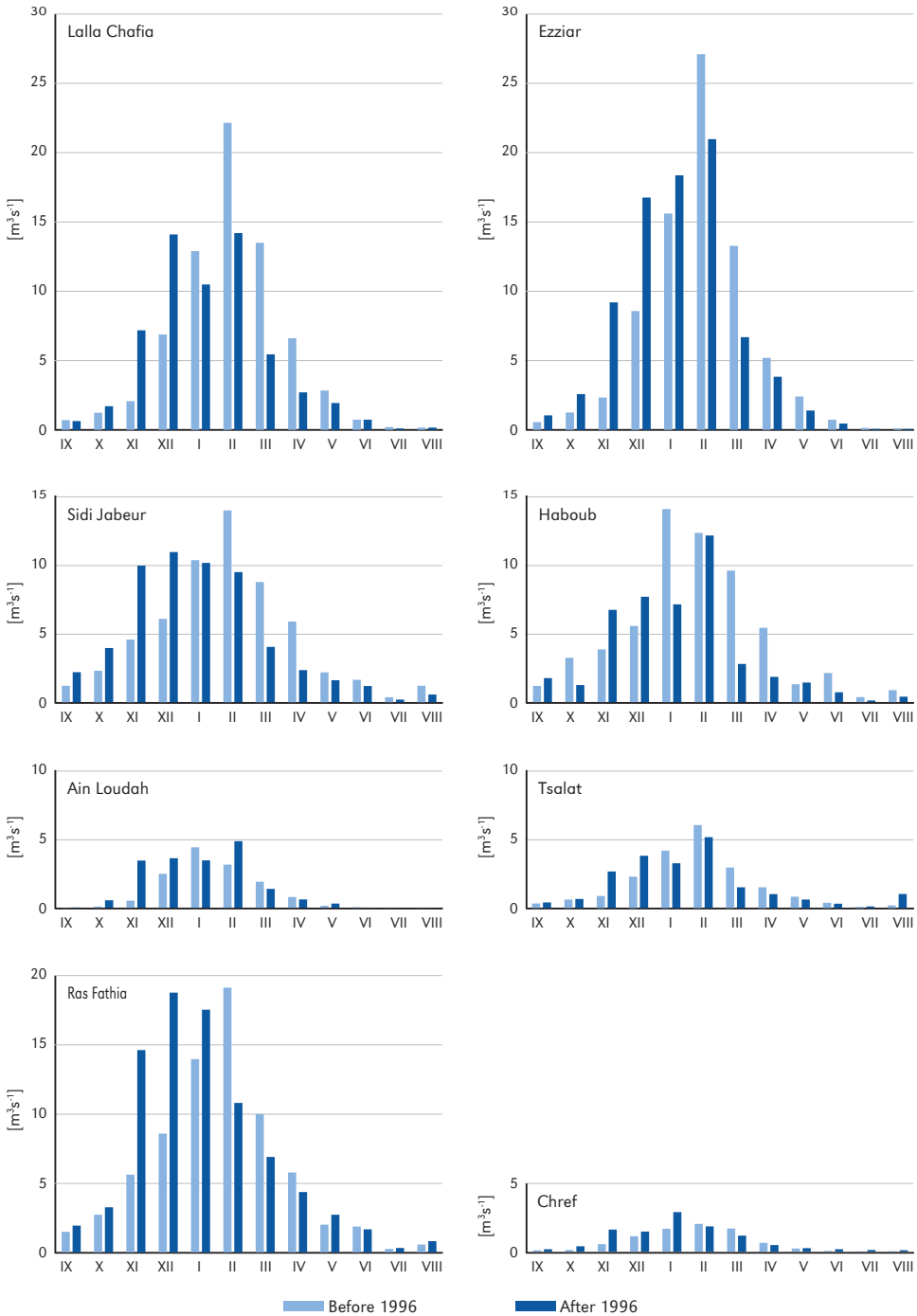


Figure 6. Evolution of the monthly flow for each station before and after 1996 for the period 1977-2007 (m^3s^{-1})

since the drought started end of the 1970's, inducing a reduction of flows at all hydrological stations mainly since 1979. Autumn and spring rainfall seem much less affected by the rainfall decrease, but show a positive change since around 2009 in October and November, but also during September and December around 2010 and March in 2012. Since then, rainfall has significantly increased all over the basin, but the runoff time series are too short to assess the impact of this rainfall recent increase on river flows. Lateral variation in monthly flow observed between stations of the basin shows evidence for local conditions that appears essential in investigating the hydrodynamic regime of a watershed. The difference observed between flow stations can be explained by the greater denudation of surface conditions in the Grou river, located farther south and drier than the basin of the Bouregreg river, and therefore is probably susceptible to higher flow from the beginning of the rainy season. The Ezziar and Ras Fathia stations exhibit identical behavior and particular year-to-year variability due to their proximity to the coastal zone, where water inflow is closely related to precipitation, which is around 400 mm and more important during floods. The Tsalat, Sidi Jabeur, Haboub and Lalla Chafia stations located in the Bouregreg and Grou rivers show important results related to topography. As the most watered regions are located in the high mountain basin, characterized by marked cashing of its valleys, by peaks and high plateaus which cross the north of the area, they concentrate the most important rainfall towards the dam by two main rivers, the Bouregreg and Grou. Lalla Chafia zone is located in alluvial depressions like the water table of Tanoubert, near Mâaziz city, in a wide band crossed by the Oued Tanoubert, tributary of Bouregreg and main source during floods. The results obtained from regional study of rainfall in Bouregreg, show that the sub-regions of Bouregreg watershed react differently to warming. This is related to the characteristics of each sub-region with a specific influence from relief

and continental setting. These results are in agreement with the results found by Sebbar et al, 2017, who confirms that the north-western region of Morocco is characterized by high climatic variability, the climate there is influenced by the oceanity and altitude of watersheds.

Conclusion

Statistical methods of rupture detection showed that the major rupture period is during the second half of the 70s and the beginning of the 80s. Since that date the hydroclimatic variability exhibited an alternation of wet and dry periods with respect to the evolution of the rains and flow. Consequently, the hydrological regime of the basin is directly influenced by the precipitation regime. Thus, it can be noted that despite some bursts of relative abundance, the water flow of the Bouregreg watershed has steadily deteriorated. This persistent downward trend should be emphasized as it shows a lasting degradation of the hydrological system despite a fairly significant return to better precipitation conditions. We assume that the decrease in flow is mainly due to the decrease in rainfall in the Bouregreg watershed, and not to a major decline in groundwater resources. In order to identify the origin of the hydrological variability in the Bouregreg watershed, the Thiesen polygon method allowed to better investigate the climatic evolutions in the study area and to consider the contribution of each sub-region to the hydrological change. The findings of this study highlight strong variations between stations as the northern and southern sub-region of Bouregreg are influenced by continental setting and relief. Thus, there are isolated regions of plains, plateaus and mountains and high mountains, relatively close to or distant from the Atlantic and Mediterranean coasts.

Acknowledgements

This work is part of the Toubkal project No. TBK / 15 / CASBA (Anthropic and Environ-

mental Characteristics of the erosion of the slopes of the Sidi Mohammed Ben Abdellah dam) between the Geophysics and Natural Hazards laboratory of the Scientific Institute, Bouregreg and Chaouia watershed agency (ABHBC), and Montpellier HydroSciences laboratory. Anonymous reviewers are thanked for their comments and suggestions.

Editors' note:

Unless otherwise stated, the sources of tables and figures are the authors', on the basis of their own research.

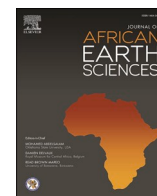
References

- Agoumi, A., Debarh, A. (2006). Ressource en eau et bassins versants du Maroc : 50 ans de développement (1955-2000). Retrieved from https://www.oieau.org/eaudoc/system/files/documents/41/206253/206253_doc.pdf
- Beaudet, G. (1969). Le plateau central marocain et ses bordures : étude géomorphologique. Rabat: Imprieries françaises et marocaines.
- Bargaoui, Z., Trambly, Y., Lawin, E.A., Servat, E. (2014). Seasonal precipitation variability in regional climate simulations over Northern basins of Tunisia. *International Journal of Climatology*, 34, 1, 235-248. <https://doi.org/10.1002/joc.3683>
- Boyer, J.F., Dieulin, C., Rouché, N., Crès, A., Servat, E., Paturel, J.E., Mahé, G. (2006). SIEREM: an environmental information system for water resources. *IAHS Publications*, 308, 19-25.
- Buishand, T.A. (1984). Tests of detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, 37(1-2), 51-69. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90032-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90032-5)
- Dieulin, C., Boyer, J.F., Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A. (2006). The contribution of GIS to hydrological modeling. *IAHS Publications*, 308, 68-74.
- Dieulin, C., Mahe, G., Paturel, J.E., Ejjiyar, S., Trambly, Y., Rouche, N., El Mansouri, B. (2019). A new 60-year 1940-199 monthly gridded rainfall data set for Africa. *Water*, 11(2), 387. <https://doi.org/10.3390/w11020387>
- DMN (Direction de la Météorologie Nationale). (2007). *Les changements climatiques au Maroc : Observations et projections*. DMN, Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Chargé de l'Eau et de l'Environnement, Royaume du Maroc, Casablanca.
- Driouech, F. (2006). Etude des indices de changements climatiques sur le Maroc : températures et précipitations. *Infomet Maroc Meteo*, 26, 33-38.
- Driouech, F., Déqué, M., Sanchez-Gomez, E. (2010a). Weather regimes Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global and Planetary Change*, 72, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.03.004>
- Driouech, F., Mahé, G., Déqué, M., Dieulin, C., EL Heirech, T., Milan, M., Benabdefadel, H., Rouché, N. (2010b). Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya au Maroc. *IAHS Publications*, 340, 561-567.
- Hadour, A., Mahe, G., Meddi, M. (2020). Watershed based hydrological evolution under climate change effect: An example from North Western Algeria. *Journal of Hydrology Regional Studies*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100671>
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G. (2013). Modification du régime hydroclimatique dans le bassin de l'Oued Mina (nord-ouest d'Algérie). *Journal of Water Science*, 26, 1, 33-38. <https://doi.org/10.7202/1014917ar>

- Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., Toumi, S., Ali Rahamni, S.E. (2018). Erosion, sedimentation and climate change on the Wadi Mina at the Sidi M'Hamed Ben Aouda dam, Algeria. *Water*, 10, 7, 895. <https://doi.org/10.3390/w10070895>
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., Alirahmani, S., Karahacane, H., Brahini, S. (2020). Analysis of meteorological drought sequences at various time scales in semi-arid climate: Case of the Cheliff watershed (Northwest of Algeria). <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5256-5>
- Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chauouche, A. (1989). Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-367. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90197-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90197-2)
- Khamsi, K., Mahe, G., Sinan, M., Snousi, M. (2012). Evolution des événements chauds rares et très rares dans les bassins versants du Tensift et du Bouregreg (Maroc) et identification des types de temps synoptiques associés. In P. Versace, E. Ferrari (Eds.), *From prediction to prevention of hydrological risk in Mediterranean countries: 4th international Workshop on Hydrological extremes Med-Friend group: Department of Soil Protection "V. Marone" University of Calabria, Cosenza (Italy) September 15-17, 20119* (pp. 169-182). Cosenza: EdiBios.
- Khamsi, K., Mahe, G., Sinan, M., Snousi, M. (2013). Hydro-climatic variability in two Moroccan watersheds: A comparative analysis of temperature, rain and flow regimes. In E. Boegh, E. Blyth, D.M. Hannah, H. Hisdal, H. Kunstmann, B. Su, K.K. Yilmaz (Eds.), *Climate and land surface changes in hydrology*, Wallingford, Oxfordshire, U.K.: IAHS Press.
- Khamsi, K. (2014). *Variabilité hydro climatique dans les bassins versants du Bouregreg et du Tensift au Maroc : moyennes, extrêmes et projections climatiques*. (Typescript). Rabat, Maroc : Université Mohamed V.
- Khamsi, K., Mahe, G., Trambly, Y., Sinan, M., Snoussi, M. (2016). Regional impacts of global change: Seasonal trends in extreme rainfall, runoff and temperature in two contrasted regions of Morocco. *Natural Hazards & Earth System Sciences*, 16(5), 1079-1090. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1079-2016>
- Khronostat. (1998). Logiciel de tests statistiques de ruptures dans des séries chronologiques. IRD, France. Retrieved from <http://www.hydrosociences.fr>
- Klaus, T. (2002). Afrique Changements climatiques. Tendances des variations de températures mondiales au cours du XXème siècle. *Vital Graphics*, p.4.
- Knippertz, P., Christoph, M., Speth, P. (2003). Long term precipitation variability in Morocco and the link to the large scale circulation in recent and future climates. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 83, 67-88. <https://doi.org/10.1007/s00703-002-0561-y>
- Kotti, F., Mahe, G., Habaieb, H., Dieulin, C., Calvez, R. (2016). Etude des pluies et des débits sur le bassin versant de la Medjerda, Tunisie. *Bulletin de l'Institut Scientifique*, 38, 19-28. <https://doi.org/10.7202/705038ar>
- Lahlou, A. (1986). Etude actualisée de l'envasement des barrages au Maroc. *Sciences de l'Eau*, 6(3), 337-356.
- Lawin, A.E., Afouda, A., Lebel, T. (2011). Analyse de la variabilité du régime pluviométrique dans la région agricole d'Ina au Bénin. *European Journal of Scientific Research*, 50(3), 425-439.
- Lee, A.F.S., Heghinian, S.M. (1977). A shift of the mean level in a sequence of independent normal random variables, a Bayesian approach. *Technometrics*, 19, 503-506. <https://doi.org/10.2307/1267892>
- Mahé, G., Delclaux, F., Crespy, A. (1994). Élaboration d'une chaîne de traitement pluviométrique et application au calcul automatique de lames précipitées (bassin versant de l'Ogooué au Gabon). *Hydrologie continentale*, 9(2), 169-180.
- Mahé, G., Emran, A., Brou, Y.T., Tra Bi, Z.A. (2012). Impact de la variabilité climatique sur l'état de surface du bassin versant du Bouregreg (Maroc). *European Journal of Scientific Research*, 84(3), 417-425.
- Mahé, G., Aderghal, M., Alkarkouri, J., Benabdelfadel, H., Bensafia, D., Brou, ... Zerouali, A. (2013). Etude de l'évolution de l'occupation du sol sur deux grands bassins d'Algérie et du Maroc, et relation avec la sédimentation dans les barrages. In A. Schumann (Ed.), *Considering hydrological change in reservoir planning and management*. Wallingford, Oxfordshire, U.K.: IAHS Press

- Mahé, G., Benabdelfadel, H., Dieulin, C., Elbaraka, M., Ezzaouini, M., Khomsi, K., ... Zerouali, A. (2014). Evolution des débits liquides et solides du Bouregreg. In A. Laouina, G. Mahe (Eds.), *Gestion durable des terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg*. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013. Rabat, Maroc: ARGDT.
- Marghich, A. (2004). *Le bassin versant de Bouregreg (Maroc Central): Etudes hydrologique, hydrogéologique et hydrochimie des eaux*. (Typescript). Université Sidi Mohammed Ben Abdellah-Faculté des sciences Dhar Lmahraz.
- Ouahidy, A., Choukri, M. (2018). *Etude hydro-pluviométrique et estimation des débits de pointe du bassin versant de la Rheraya (Maroc)*. (Typescript). Faculté des Sciences et Technique de Marrakech, Morocco.
- Pettitt, A.N. (1979). A non parametric approach to the change point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Rivoire, P., Trambly, Y., Neppel, L., Hertig, E., Vicente-Serrano, S.M. (2019). Impact of the dry-day definition on Mediterranean extreme dry-spell analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(8), 1629-1638. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1629-2019>
- Rouché, N., Mahé, G., Ardoin-Bardin, S., Brissaud, B., Boyer, J.F., Crès, A., Dieulin, C., Bardin, G., Commelard, G., Paturel, J.E., Dezetter, A., Servat, E. (2010). Constitution d'une grille de pluies mensuelles pour l'Afrique, période 1900-2000. *Sécheresse* 21, 4, 336-338. <https://doi.org/10.1684/sec.2010.0269>
- Sebbar, A., Badri, W., Fougrach, H., Hsaine, M., Saloui, M. (2011). Étude de variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 22(3), 139-148.
- Sebbar, A., Hsaine, M., Fougrach, H., Hama, S., Ajeddou, M., Badri, W. (2017). Etude des variations climatiques à la région Nord-Ouest du Maroc, débits de projet "bassin d'Oued Beht". *XXXème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Sfax 03-06 juillet 2017.
- Singla, S. (2009). *Impact du changement climatique global sur les régimes hydroclimatiques au Maroc : tendances, ruptures et effets anthropiques sur les écoulements*. (Typescript). Montpellier: Université de Montpellier 2.
- 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. Global change: Facing risks and threats to water resources (Proceedings of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010). *IAHS Publications*, 340, 679-687.
- Taibi, S., Meddi, M., Mahe, G., Assani, A. (2017). Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. *Theoretical and Applied Climatology*, 127(1-2), 241-257. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1626-4>
- Taibi, S., Meddi, M., Mahe, G. (2019). Seasonal rainfall variability in the southern Mediterranean border: Observations, regional model simulations and future climate projections. *Atmósfera*, 32(1), 39-54. <https://doi.org/10.20937/atm.2019.32.01.04>
- Tra Bi, Z.A. (2013). *Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc)*. (Typescript). Abidjan, Côte d'Ivoire: Université Félix Houphouët Boigny.
- Trambly, Y., Badi, W., Driouech, F., El Adlouni, S., Neppel, L., Servat, E. (2012). Climate change impacts on extreme precipitation in Morocco. *Global Planet. Change*, 82-83, 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.12.002>
- Trambly, Y., Feki, H., Quintana-Segui, P., Guijarro, J.A. (2019). The SAFRAN daily gridded precipitation product in Tunisia (1979-2015). *International Journal of Climatology*, 39(15), 5830-5838. <https://doi.org/10.1002/joc.6181>
- Tsiourtis, S. (2001). Drought management plans for the Mediterranean region. *Report of the Water Engineer Water Development Department, Nicosia, Cyprus*.

- Zamrane, Z., Turki, I., Laignel, B., Mahe, G., Laftouhi, N. (2016a). Characterization of the interannual variability of precipitation and streamflow in Tensift and Ksob basins (Morocco) and links with the NAO. *Atmosphere*, 7(6), 84. <https://doi.org/10.3390/atmos7060084>
- Zamrane, Z., Laftouhi, N.E., Mahe, G., Laignel, B. (2016b). Relationship between climate index (WMOI, SOI) and rainfall variability in Azib Soltane (Sebou basin Morocco). *Journal of Environment and Earth Science*. 6(2), 34-42.
- Zkhiri, W., Trambly, Y., Hanich, L., Berjamy, B. (2017). Regional flood frequency analysis in the High Atlas mountainous catchments of Morocco. *Natural Hazards*, 86(2), 953-967. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2723-0>



Fluvial sediment transport degradation after dam construction in North Africa

Rajae El Aoula^{a,*}, Nadia Mhammdi^a, Laurent Dezileau^b, Gil Mahe^c, Alexander S. Kolker^d

^a University Mohammed V in Rabat, Institut Scientifique, GEOPAC Research Center, Geophysics and Natural Hazards Laboratory, Morocco

^b University of Montpellier II, HDR-Géosciences, France

^c UMR HydroSciences Montpellier / IRD, France

^d Louisiana Universities Marine Consortium, 8124 Highway 56, Chauvin, LA, 70344, USA

ARTICLE INFO

Keywords:

Paleo-hydrology
Sediment transport
Intense floods
Dam
Climate change
Morocco

ABSTRACT

Recent reductions of sediment transport are observed in Bouregreg River and estuary close to the city of Rabat in Morocco. The cause of this evolution in sediment transport which may be due to human activities (dam, pollution), climate variability and natural events has been investigated from a paleo-hydrological approach. Sedimentological and geochemical analyses of slackwater flood deposits are used to assess the impact of a dam installed in 1974 and the climate change on the evolution of sediment transport during about 60 years. Higher accumulation rate of about 3,64 cm/year is observed between 1950 and 1978, whereas it was much lower about 0,41 cm/year between 1990 and 2017. This strong decrease in sediment rate appears much more due to the impact of dam construction rather than to climate change, however climate change is an increasing concern for the future.

1. Introduction

The transport and deposition of sediment in rivers is important to understand in the context of global climate change, as rivers are one of the primary means by which Earth's continent (Syvitsky et al., 2003) interact with its oceans. Climate changes have been investigated in sedimentation records of various sub-basins around the world (Samaras and Koutitas, 2014). Particularly, in river environments, reduced sediment transport may be due to anthropogenic changes (Wang et al., 2015) while mitigation strategy was suggested to reduce climate change effects (Bussi et al., 2016). The suspended sediment of a river impacts not only the aquatic ecology, but also the morphology and the exploitation of related water resources. Changes in sediment loads of rivers can therefore have wide-ranging environmental and social and economic implications (Moussa et al., 2019; Hzami et al., 2021). There is clear evidence that increased fine sediment loads can cause major problems in degrading aquatic habitats (Dudgeon, 1992), but it is also important to recognize that fine fluvial sediment can provide essential source of nutrients in some aquatic systems, including those supporting large fisheries. In coastal waters fine fluvial sediment may represent an important source of nutrients to both marine biota, coastal wetlands and mangrove

stands. Reduced sediment loads may therefore also have negative environmental impacts. Sediment transport and the magnitude of the sediment load also play a key role in the dynamics of river channels. Although the coarser fractions of the sediment load are generally more important in this context, fine sediment may also have a significant control on river morphology in some river systems (Walling, 2011). Changes in sediment flux and deposition can be impacted by localized human impacts (e.g. the construction of dams, or channel straightening), broad-scale human impacts (e.g. global climate change), or natural climate variability (e.g. fluctuations in the North Atlantic Oscillation (Taibi et al., 2017, 2019; Syvitski and Saito, 2007) which has resulted in reduced precipitation over the river basin. One particularly important anthropogenic impact to rivers is the construction of a dam. Dams often trap large amounts of sediment volume delivered from the watershed. Rivers react to dam construction in various ways, reflecting changes in the relative balance between the quantity and type of transported sediment and changes in discharge and slope (Lane, 1955). In some cases, the reduction in sediment transport leads to channel scour and the deepening of the channel downstream of the river (Graf, 2006; Magilligan and Nislow, 2005; Petts and Gurnell, 2005; Grant et al., 2003; Brandt, 2000; Chien, 1985; Williams and Wolman, 1984). In other

* Corresponding author.

E-mail addresses: elaoula.rajae@gmail.com, rajae2329@gmail.com (R. El Aoula), nmhammdif@yahoo.com (N. Mhammdi), laurent.dezileau@gm.univ-montp2.fr (L. Dezileau), gilmahe@hotmail.com (G. Mahe), akolker@lumcon.edu (A.S. Kolker).

<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104255>

Received 27 February 2020; Received in revised form 19 April 2021; Accepted 11 May 2021

Available online 29 May 2021

1464-343X/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

cases, the reduction of the number of intense floods can lead to sedimentation downstream, which raises the river bed, leading paradoxically to more flooding of the lower alluvial plains with lower discharges (Slowick et al., 2018; Kotti et al., 2016). Overall, the magnitude and sign of channel change depends on a suite of factors that include the flow characteristics, supply of fine and coarse sediment, the slope of the channel and the rate of subsidence and/or uplift (Schmidt and Wilcock, 2008; Leopold, 2006). All of these factors can be controlled by a suite of human and natural processes that include the construction of dams, adjustments to the channel morphology, changes in the magnitude of relative sea level rise, as well as climate variability and change. Hallouz et al. (2018), clearly showed the relationships between soil erosion, solid transport in rivers and sedimentation in the Sidi Mohamed Ben Aouda dam on the Wadi Mina in Algeria, while Kotti et al. (2018) and Hadour et al. (2021) show how the main largest dam respectively on the Medjerda River in Tunisia and the Wadi Chellif in Algeria, substantially reduce the sediment transport to the sea downstream of the dams, together with reducing to near zero the amount of coarse sediment released in the case of the Medjerda. Many of the world's rivers now provide evidence of declining sediment loads as a result of dam construction which may cause river fragmentation and flow regulation (Grill et al., 2015). Previous work has shown how some of the man-made interventions have had major effects on the large-scale sediment budget and consequent shoreline changes (Renwick et al., 2005; Walling, 2012; Giadino et al., 2018; Amrouni et al., 2019). Kondolf et al. (2017) argued that the dams altered the downstream flow conditions of Rivers, and provides an overview of key drivers of change (hydropower development, sand mining, dyking and water infrastructures, climate change, and accelerated subsidence from pumping) for the global sediment budget, and their likely individual and cumulative impacts on the river system.

The goal of this project is to study the impact of dams on the sediment supply to the semi-arid coastal area of northern Morocco in the context of climate variability. While such systems occur globally, they are relatively understudied with most attention to semi-arid streams focusing on inland rivers, and to coastal rivers focusing on lower gradient temperate environments. Such information is crucial to understand how wetlands across the world will respond to the acceleration in sea level rise that is occurring globally - a critical concern for coastal and wetland scientists (Kirwan and Mudd, 2012; Kolker et al., 2010). In particular, this work focuses on the Bouregreg river, which is one of the five largest rivers in Morocco, as defined by both flow average $23 \text{ m}^3/\text{s}$ and length of 240 km (Goussot et al., 2014; El Aoula et al., 2021). The system was largely free-flowing until 1974 when the Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA) dam was constructed 18 km upstream of the river's mouth on the Atlantic coast (Beaudet, 1969). The exclusive function of this dam is to supply water for cities and irrigation along Moroccan coast from Kenitra to Casablanca.

We adopt a paleo-hydrological approach (Kochel et al., 1982; Ely and Baker, 1985; Baker, 1987; Benito and Thorndycraft, 2005; Dezileau et al., 2014; Benmoussa et al., 2018; Kotti et al., 2018; Moussa et al., 2019) to estimate the evolution of the sediment accumulation rate on alluvial terraces downstream the dam and establish the impact of dam and climate on the evolution of sediment transport. Although the main concept of paleo-hydrology is to lengthen the flood series beyond that of the instrumental record, significant benefits can also be gained by accurately dating modern slackwater flood deposits (Thorndycraft et al., 2003). As these events occurred during the instrumental period, the potential to correlate modern sedimentary flood record with data measured at gauging stations may be possible. This is of particular importance in understanding the paleoflood record preserved over centennial time scales (Benito et al., 2004). A key part of this work is the collection of sediment cores (BR1 and BR2) in an alluvial terrace downstream the dam, in a calm area far from any source of disturbance. We use stratigraphic and sedimentological analyses to identify the number of flood units preserved within a particular sedimentary deposit,

and dating techniques to determine the chronology of flood occurrence. These data were then compared to regional meteorological, climatic (Khomsy et al., 2016), hydrological (Mahe et al., 2014) and geospatial data (Tra Bi, 2013; Bi et al., 2013) to evaluate the relative impacts of climatic and local anthropogenic factors in the geomorphology and sedimentology of this system.

2. River setting

The Bouregreg watershed is located in the coastal Maghreb, and extends from $32^{\circ}50'$ to $34^{\circ}30'N$ and $5^{\circ}-7^{\circ}W$ (Fig. 1a). The hydrographic network of the Bouregreg watershed includes two main rivers, the Bouregreg and the Grou Rivers, draining an area of 4000 km^2 and 3600 km^2 respectively (Lahlou, 1986). Grou river is divided into two tributaries, Korifla of 1900 km^2 and Akrech of 150 km^2 which drain the southwest part of the basin. The Bouregreg stream follows a straight overall direction SE-NW and extends over a length of 240 km. The last 23 km of the lower course of the Bouregreg end with a partially developed estuary (Lahlou, 1986). Both Bouregreg and Grou Rivers sources are from western Middle Atlas Mountains, and crossing the Meseta plateau to the dam at 18 km to the estuary (Beaudet, 1969). The Bouregreg watercourse has been modified since the construction of SMBA dam in 1974, located 24 km from the mouth. When the dam was originally constructed, the dike was 97,6 m high, and water storage capacity was $446 \times 10^6 \text{ m}^3$. The elevation of the dike was increased in 2006 to 105 m, increasing the water storage capacity to $1025 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Khomsy, 2014) to ensure supply of drinkable water to the cities of Kenitra, Rabat, Sale, and Casablanca (Benmohammadi, 1991).

The dam experiences enormous problems of siltation which was estimated at around 2,5 millions m^3/year , which corresponds to an annual specific degradation of $370 \text{ t}/\text{km}^2/\text{year}$ (Lahlou, 1986). The most recent study of the suspended transport by the Bouregreg River, which was released by Ezzaoui et al. (2020). It shows that during the two measurement years 2016–2017 and 2017–2018 at the 3 stations controlling the dam's entries, the dam's siltation rate was of $9,49 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, with only 18% of the dam's sediment coming from upstream, as compared with the bathymetric survey of the dam's deep. This leads to the conclusion that the main source of sediments for the dam was the erosion of the dam's banks. The higher rate of siltation observed recently in regard of the rate given by Lahlou in 1986 is correlated with the raising of the dam in 2006, which now trapped nearly all sediments. There are water released only when the dam is full and faces new important flood coming from upstream, which happens rarely as there can be several years without releases (Ezzaoui et al., 2020).

The Bouregreg watershed experiences a great diversity of forms of erosion which are distributed according to the characteristics that control each sector. The gullying affects most of the basin, especially the clay and schist formations. Its lands are more sensitive to erosion, especially in steep slope areas, and constitute one of the formations most responsible for the silting up of the SMBA dam (Rhouichi, 1996). An examination of the water budgets for the two periods 1975–1984 and 1987–1989, by Gillet (1986) and Ezzouaq (1991) respectively, revealed large annual differences between the volumes restored from the dam and even monthly differences during the same year. In 1979, restitution represented 90.3% of the contributions to the dam, while in 1981 it did not exceed 0.3%. Gillet (1986) reported that the returns from the dam can be higher than the annual inputs from the driest years. In fact, since the installation of the SMBA dam in 1974, the hydrodynamics of the Bouregreg have been profoundly modified, resulting in an excessive reduction in its purifying power (Benabdellouahad, 2006). The ocean tide has become its main power source as its river flow is almost canceled by the dam except during some rare releases. The siting of this building also led to physicochemical and sedimentological changes, Gillet (1986) announced that these modifications had an impact on the distribution of certain faunistic groups such as Annelids polychaetes. The allochthonous contributions of the watershed no longer seem to

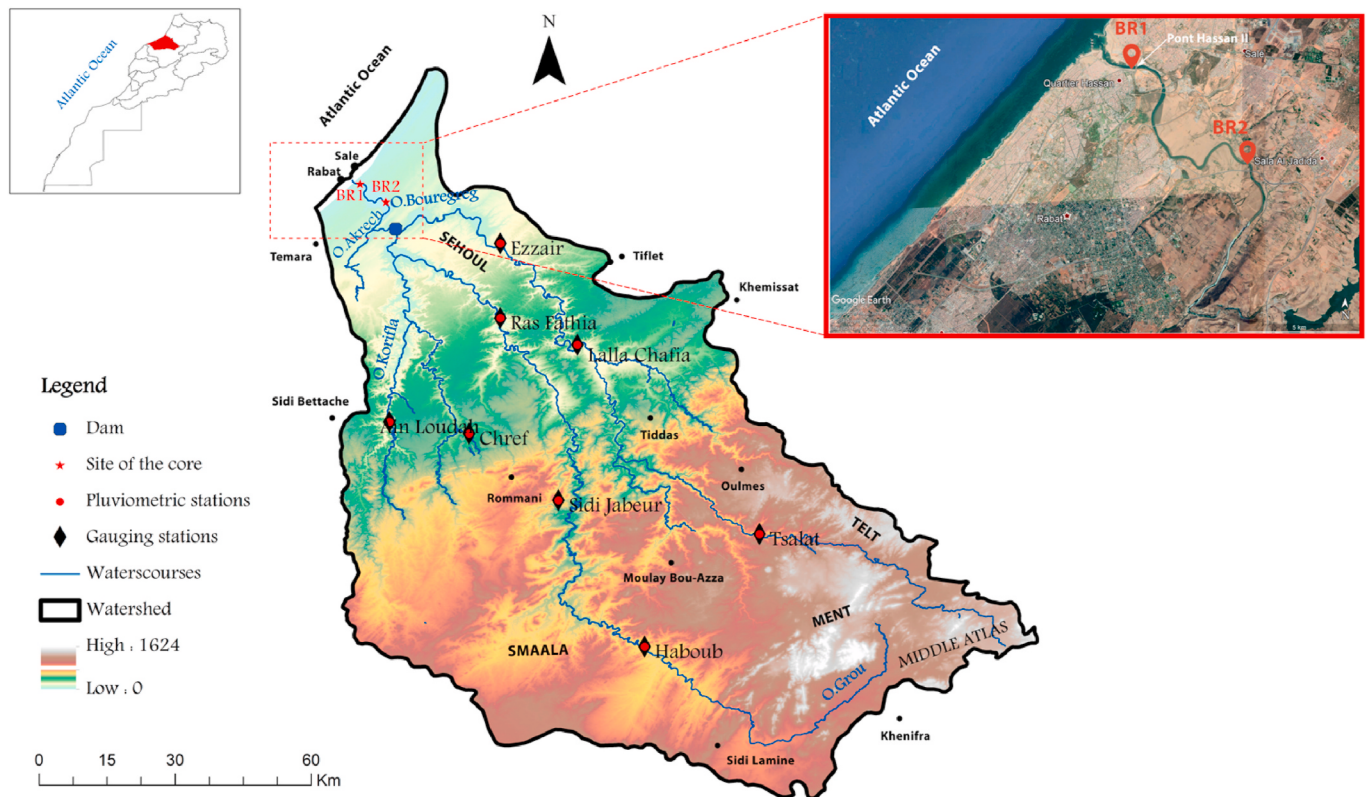


Fig. 1a. The Bouregreg watershed map shows location of dam, main gauging stations, and location of the sampling area (BR1 and BR2).

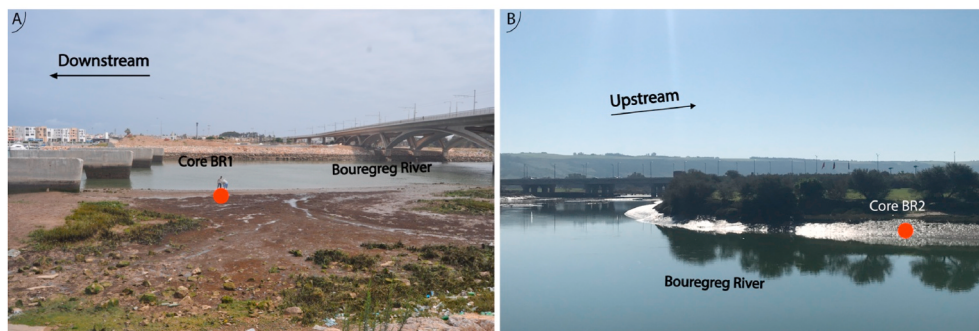


Fig. 1b. bis. Sites of slackwater flood sediment archives, (A) alluvial terrace of BR1 core, (B) alluvial terrace of BR2 core.

contribute to the suspended matter contained in the waters of Bouregreg estuary downstream the dam because they have been dried up by entrapment at the dam. The large quantities of suspended matter that the Bouregreg receives during the releases from the SMBA dam, contain more particulate mineral matter especially downstream. They are related to the winter rainfall and the draining of water from the dam loaded with silt and mud (Benabdellouahad, 2006).

The most recent study of the suspended transport by the Bouregreg River has been released by Ezzaouini et al. (2020), showing that during the two measurement years 2016–2017 and 2017–2018 at the 4 stations controlling the dam's entries, the dam's siltation rate was of $9,49 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, with only 18% of the dam's sediment coming from upstream, as compared with the bathymetric survey of the dam's deep, with the conclusion that the main source of sediments for the dam was the erosion of the dam's banks. This has some importance to better understand the possible impact this can have had on the sedimentation rate downstream the dam, which is awaited to become very low, and mostly constituted by clays and silts, as it can be observed on the Medjerda

lower valley (Kotti et al., 2017).

From a climatic viewpoint, the Bouregreg watershed can be classified as sub-humid to semi-arid (Mahé et al., 2012). The annual average temperature varies from 15 to 18° on the coast, and 15–17° on mountain areas. The annual average annual rainfall is estimated to vary between 400 and 460 mm in coastal regions and 760 mm near the town of Oulmes in the Mountains of the western basin (Khamsi et al., 2016; Amhoud, 1997). The number of rainy days per year fluctuates from 60 to 75 in the Meseta plateau, and from 75 to 100 on the Mountains (Benabdellouahad, 2006). The hydroclimatic regime is influenced by both NAO (North Atlantic Oscillation) and MO (Mediterranean Oscillation) (Khamsi, 2014) and shows some statistically significant ruptures in the distribution of time series over the last 50 years, showing a sensitivity of rainfall and discharges to the main drivers of climatic variability and change in the region ((Singla et al., 2010)(Driouech et al.)(Khamsi et al., 2013).

Land-use might have an impact on the erosion and sediment transport. Mahe et al. (2012) and Tra Bi et al. (2013) studied land-cover and land-use changes on the Bouregreg basin with remotely sensed images

over a period extending from 1982 to 2009 and 2003 to 2009. By examining the evolution of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) value, they found a decrease of the NDVI, and thus to the vegetation cover over a time which they correlated with a reduction of the hydrological changes. This was compared to agricultural productivity data by Goussot et al. (2014) using Landsat data from 1985, 2000 and 2007. They showed an increase of agricultural surface and a reduction of forested areas, and also showed that the correlation between climatic variability and cereals productions was not easy without knowing some detailed data on the intra-seasonal distribution of rainfall.

3. Sampling, methods and data collection

A high-resolution multi-proxy study of sediment cores was conducted to establish a chronology on the sedimentary evolution of the Bouregreg River during the past century. The site selection of the cores was based on two conditions: (i) it should be located between the dam and the littoral zone, inside a meander, where accumulation dominates in relation to erosion processes, (ii) it should be situated on a terrace at low altitude compared to the river bed, and along a terrace that is regularly flooded. The first sediment core (BR1), which was 2 m long was extracted on June 2016, in an area located towards the mouth of the river, and in urban areas near the Hassan II bridge. The second sediment core (BR2), which was 1,80 m long was extracted on March 2017, in a meander downstream to the SMBA dam and upstream to the estuary zone, far before urban influence of associated cities of Rabat and Sale (Fig. 1b bis).

Sedimentological analysis was carried out continuously along the core (each centimeter), and only on particles lower than 2 mm in diameter. To determine particle size, samples were suspended in deionized water before measurement and exposed to ultrasound during the measurement to prevent flocculation, analyzed using a LS13320 Beckman-Coulter (Geosciences Laboratory of Montpellier, France), and classified according to Folk and Ward (1957).

Geochemical analysis was performed every centimeter on the surface of the half core by using hand-held Nikon XL3t spectrometer (X-ray fluorescence; Geoscience Montpellier Laboratory, France).

A chronology of sediment accumulation was determined using the naturally abundant radioisotopes $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs . $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ commonly termed unsupported or excess ^{210}Pb , which is deposited as fallout and not in equilibrium with the parent ^{226}Ra . $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activity is a product of the ^{238}U decay chain, has a half-life of 22,3 years, and is delivered to wetland surfaces on a quasi-constant through both atmospheric deposition and on sedimentary particles (Kolker et al., 2009; Cochran et al., 1998). Sediment accumulation rates determined with $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ are based on a log-transformation of the profile of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in the sediment cores. ^{137}Cs is an artificial radionuclide that was first released into the atmosphere by nuclear bomb testing in the mid-1950s. This testing peaked and ended in 1963, providing a marker layer of that year (Milan et al., 1995). Radioisotopes were quantified via gamma spectrometry using CANBERRA BEGe 3825 gamma spectrometer (Dezileau, 2014).

To find out an enrichment of stable lead relative to the local background, the enrichment factor (EF) of lead was estimated. The enrichment factor (EF) of stable lead is calculated following the equation:

$$\text{EF}_{\text{Pb}} = (\text{Pb}/\text{Al})_{\text{sample}} / (\text{Pb}/\text{Al})_{\text{Average Local Background}} \quad (1)$$

Where $(\text{Pb}/\text{Al})_{\text{sample}}$ is the ratio of Pb, Al the concentrations of the sample and $(\text{Pb}/\text{Al})_{\text{Average Local background}}$ is the ratio of Pb and Al concentrations of a background. Background concentrations of Pb were taken from the base of the terrace (i.e., pre-industrial period concentrations).

To understand the correlation between the flow of the Bouregreg River and sedimentation patterns in the Bouregreg estuary, we used paleo hydrological method, covering a period of 1972–2017, in

determining a correlation between sedimentary and instrumental flood records in the gauging station (Lalla Chafia) located upstream of the site. Rainfall data used in this study from 18 stations are available on the SIEREM database of the Environmental information system for water resources (Boyer et al., 2006; Dieulin et al., 2006; Dieulin et al., 2019), and recent data from 8 stations of Bouregreg and Chaouia hydraulic agency for the period 1977–2008. The SIEREM rainfall database totalizes more than 10000 stations over the whole African continent (Rouche et al., 2010), starting before the 20th century for the oldest ones. They originate from several sources: the former rainfall database shared by all western African countries within ASECNA (African Agency for the Security of Aerial Navigation), the databases of the FRIEND-Water program from UNESCO, and data shared by IRD and their national partners during research project. The flow data were collected from Lalla Chafia gauging stations by the Bouregreg and Chaouia hydraulic agency (ABHBC) covering a period from 1972 to 2017. The quality of the flow data used in this work is ensured by the ABHBC, which operates continuous discharges automatic measurements, and regular gauging at all stations to ensure an up to date rating curve. The following methods are used in this study:

Standardized precipitation indices are used to characterize the temporal heterogeneity of climatological variability and to identify major trends in hydro-climatological series.

In determining the annual deficit and surplus periods, rainfall indices were centered and reduced using the relationship:

$$IP = (P - P_{\text{moy}}) / \sigma \quad (2)$$

Where, P is the cumulative of the variable over a given period t, P_{moy} is the mean of the time series over the period of time, and σ is the standard deviation of the series over the period (Hallouz et al., 2019).

4. Results

4.1. Grain size and geochemistry of deposits

The sedimentary contributions of BR2 and BR1 cores are mainly characterized by silt-clay material intermittently with fine sandy intervals (Fig. 2). From the base to 145 cm, BR2 core displays fine silty-clay material with presence of some shell fragments of *Hydrobia* sp. This is a small gastropod that lives in environments with brackish water inputs and muddy sediments. From 145 to 105 cm of depth, the core consists of alternating layers brown sandy silt and clay, with a layer of fine sand at 144 cm alternately. From 105 to 83 cm depth, sediments consist of silty clay that is high in organic matter, which is mostly in the form of plant (roots). From 83 to 48 cm depths, a succession of sandy deposits are intercalated in silt layers. From 48 to 20 cm depth, fine material is marked by the presence of typical tidal species *Hydrobia*. From 20 cm depth to the top, there is a succession of sand and fine material. Median grain size (D_{50}) which show two granulometric standards having grain sizes varying over time. In this interval, sediment grain size varies between two classes, one consisting of between 12 and 20 μm (fine silt), and consisting of between 95 and 112 μm (fine sand), indicating two absolutely different deposit processes.

The BR1 core is comprised of similar sedimentary facies. A well-defined sandy layer consisting of fine estuarine sediments is present 20 cm, 60 cm and 70 cm levels with D_{50} of 68 μm . This core, located in an urban area, presents a change due to its proximity to expansion works along Bouregreg. Therefore, these will constraint a flood chronology based on geochronological analysis. However, it provides information on the homogeneity of deposits over an important area. Sedimentological results in BR2 cores shows seven coarse deposits (DS1 to DS7) that are attributed to intense floods with succession of less energetic flood deposits and fine estuarine sediments (Fig. 2).

In the geochemical analysis, three elements were used: Iron (Fe), Titanium (Ti) and Zirconium (Zr) (Fig. 3). The iron (Fe) element is

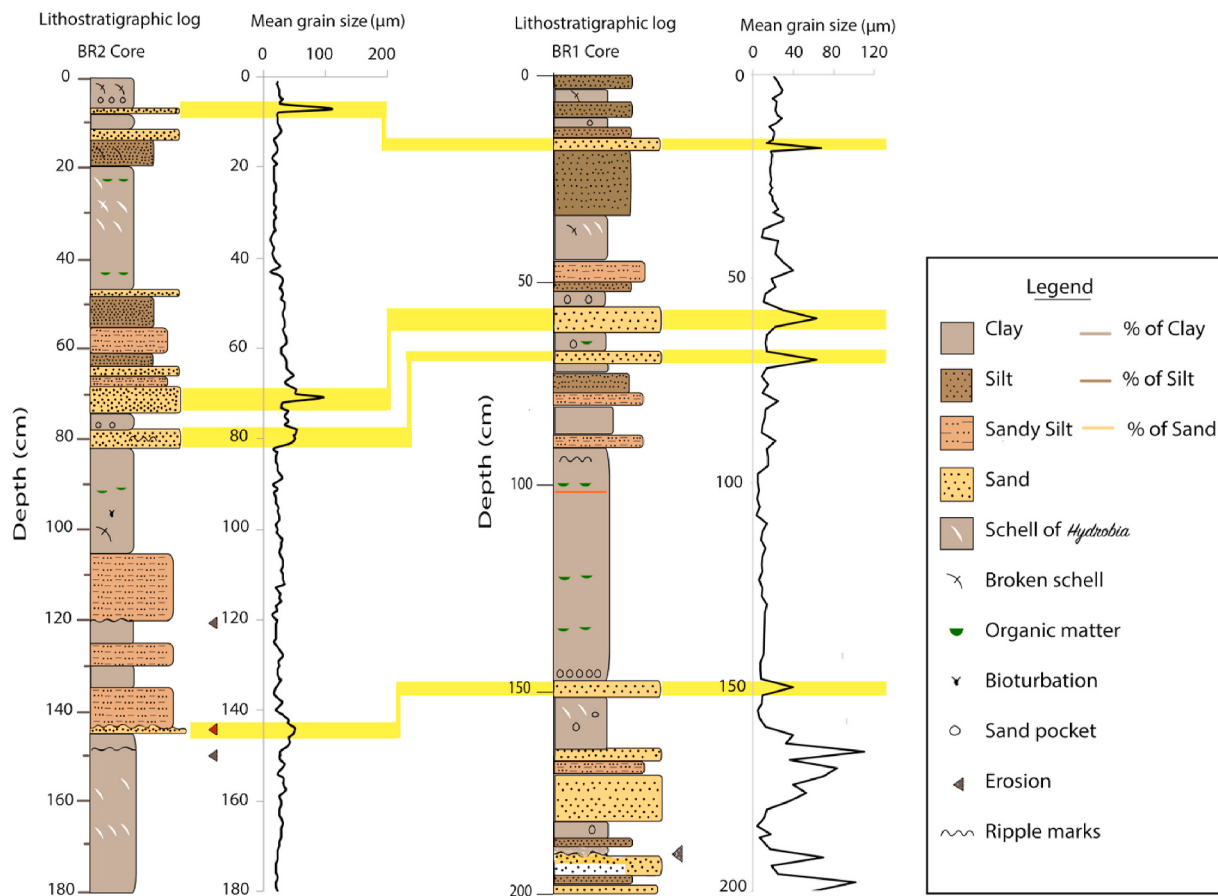


Fig. 2. Sedimentary facies and the mean grain size evolution of alluvial terrace of the Bouregreg River.

associated with the silt-clay fraction. In turn, Zr and Ti are associated with medium and fine sands. These results confirm those obtained by grain size analysis. The seven coarse stratigraphic deposits (DS1, DS2, DS3, DS4, DS5, DS6 and DS7) seem to be related to high energetic events.

4.2. Stratigraphic records of flood events on the (DS) Bouregreg terrace

The chronology of sedimentary transfer in the Bouregreg requires an age model with sufficient accuracy to place either extreme events over time or past environments. The age model was established using $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and ^{137}Cs (Fig. 4). In BR2 core, the ^{137}Cs activity increases starts at 150 cm depth, and can be associated with the 1950s period of the onset of atmospheric nuclear tests (Dezileau et al., 2014). This indicates that all flood deposits are postdated to this period. The peak ^{137}Cs activity at 60 cm (6,65 mBq/g) is likely associated with the maximum impact period due to the atmospheric nuclear production in the mid-1960s (around 1963). Sedimentary rate estimated from ^{137}Cs is about 1,12 cm/year between 1963 and 2017. However, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activity is recorded in all flood units with significant activities on the surface (40–50 mBq/g), indicating that all flood deposits of Bouregreg terrace are recent and postdated approximately to the end of 1910 (<100 years, i.e., ~4 to 5 times its decay period of 22,3 years) (Dezileau et al., 2014). Thereby, this confirms results using ^{137}Cs dating technique, all these sedimentary deposits are recent, and associated with the 20th and 21st centuries.

The geochemistry of the Pb profile shows that enrichment factor (EF) of Pb occurs in flood units between DS1 and DS7, with a range of 7,27 to 12,61, which exhibits very high variation between the base and the top of the terrace (Fig. 4). At 144 cm depth, an increase in EF of Pb occurs from a background value of 8,02 (SD1). The geochemical analysis shows that the lower stratigraphic flood deposit unit (DS1) probably occurred

prior to 1950. The EF is higher in the uppermost flood units of the terrace, around 12,34 between DS2 and DS5, while it decreases in the last flood units DS6 and DS7. At terrace (DS) the observations of the granulometric and geochemical studies of the BR2 core allowed setting up an approximate chronology of the flood deposits (DS1 and DS7) that we compared to the records of the Lalla Chafia flood data since 1972. The comparison of these recordings makes it possible to assign finer ages to the deposits of flood deposits (DS) associated with a larger grain size (Fig. 4). The 1978 event, the first largest in instrumental record (161 m³/s), deposited a thin unit of fine sands (SD5: 31,8 μm). The next two floods units (SD6 and SD7) are well marked by average sands and have been assigned to two lower magnitude floods (90,10 m³/s and 123,34 m³/s, respectively) that occurred in 1990 and 2010, respectively (Fig. 4).

4.3. Evolution of precipitation and runoff

Longer-term fluctuations in a river's load may certainly be influenced by climate variability and other drainage basin changes. Therefore, it is important to evaluate how climate, especially rainfall and runoff, has varied in the Bouregreg watershed. After the end of the 1970s, there was an increase not only in dry years but also in the magnitude of drought compared to the previous period (Fig. 5). The 1980s and 1990s were particularly dry with maximum deficit in 1994. Apart from years 1995 and 1996, all other years were dry. Based on these indices expressed by the rainfall data and flow coefficient for the period 1977–2008, the precipitation trend follows those observed in flow but with values sometimes significantly different. Then, in 2005 and 2006, opposite values of the two indices are recorded. The variation of the runoff coefficient shows a negative episode marked by a net decrease in runoff during the years from 1980 to 1984, due to a drought

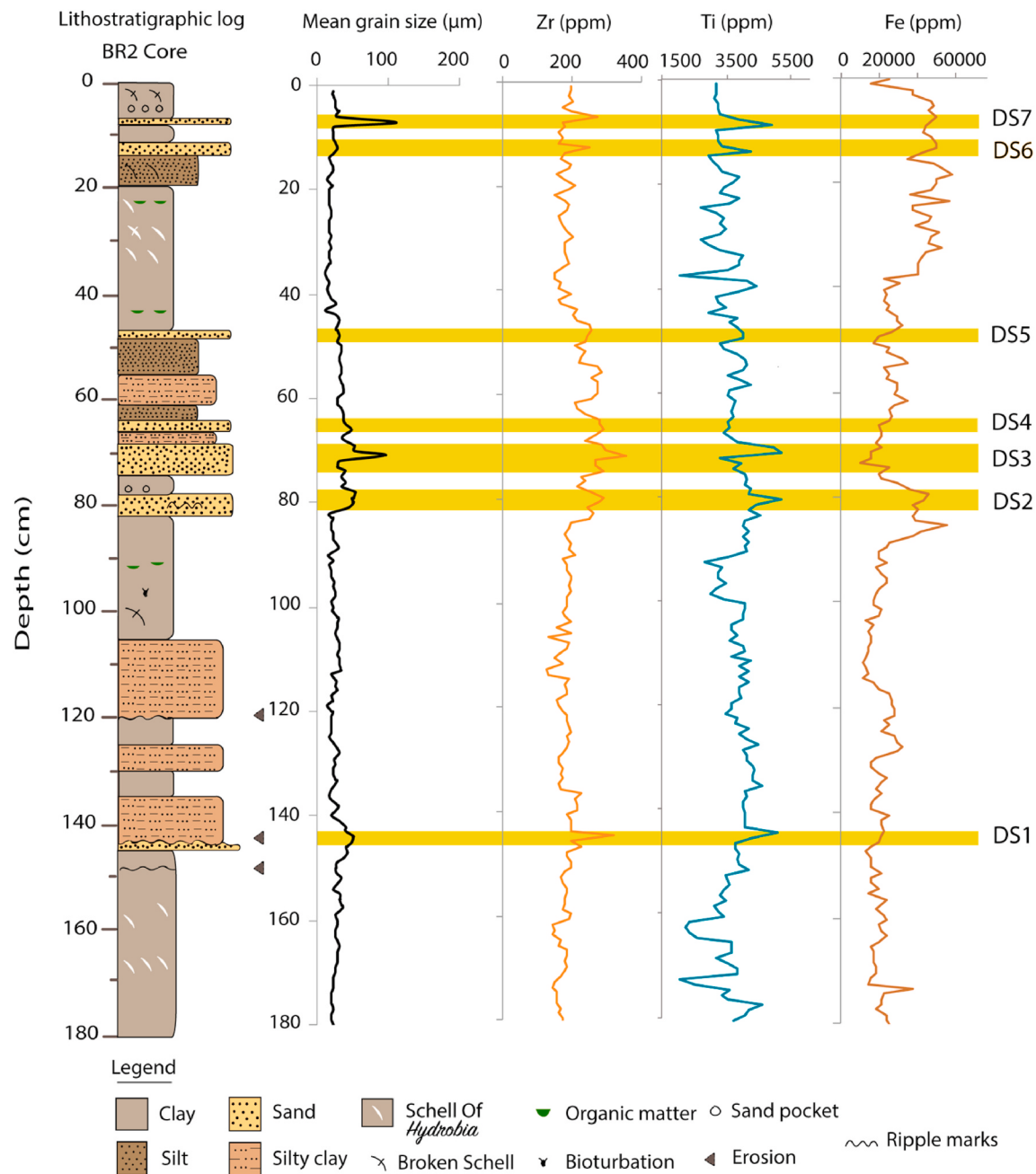


Fig. 3. Stratigraphic log, grain size and geochemical elements evolution for the sediment core BR2 in alluvial terrace of the Bouregreg River.

observed in total rainfall which greatly influenced the hydrology at the same time. From 1985, a low coefficient period of 10 years is observed in the Bouregreg watershed. Follow-up of a period which the much higher runoff coefficients is observed since 1996 to 2006. In an attempt to explain the observed trends by large-scale atmospheric influences, we investigated the relationship between precipitation indices and the large-scale atmospheric circulation indices describing the North Atlantic Oscillation (NAO) (Fig. 6). Generally, we observe that most of significant correlations are negative, indicating that the extreme values in the hydroclimatic parameters investigated in this study (precipitation and runoff) may be linked to negative phases of the NAO indexes. However, the years 1995 and 1996 was of strong NAO anomaly favorable to rainfall in Morocco.

4.4. Sedimentary rate variations

Data available in the sedimentary rate (Fig. 4) shows a large period of decrease from 1950 to 2017. To estimate the impact of both climate change and dam in explaining this marked decrease, we have to separate both factors. Since dam is installed on 1974, we can postulate that before this date the main factor controlling the sedimentary rate (SR) decrease is due to climate change. We defined a deficit factor that may accelerate the sedimentary rate versus time.

$$\text{Before 1972, } T_d(\text{SR}) = dc \quad (3)$$

Where dc is the deficit contribution to climate change and $T_d(\text{SR})$ is the total deficit of (SR)

$$\text{After 1972, } T_d(\text{SR}) = dc + dd \quad (4)$$

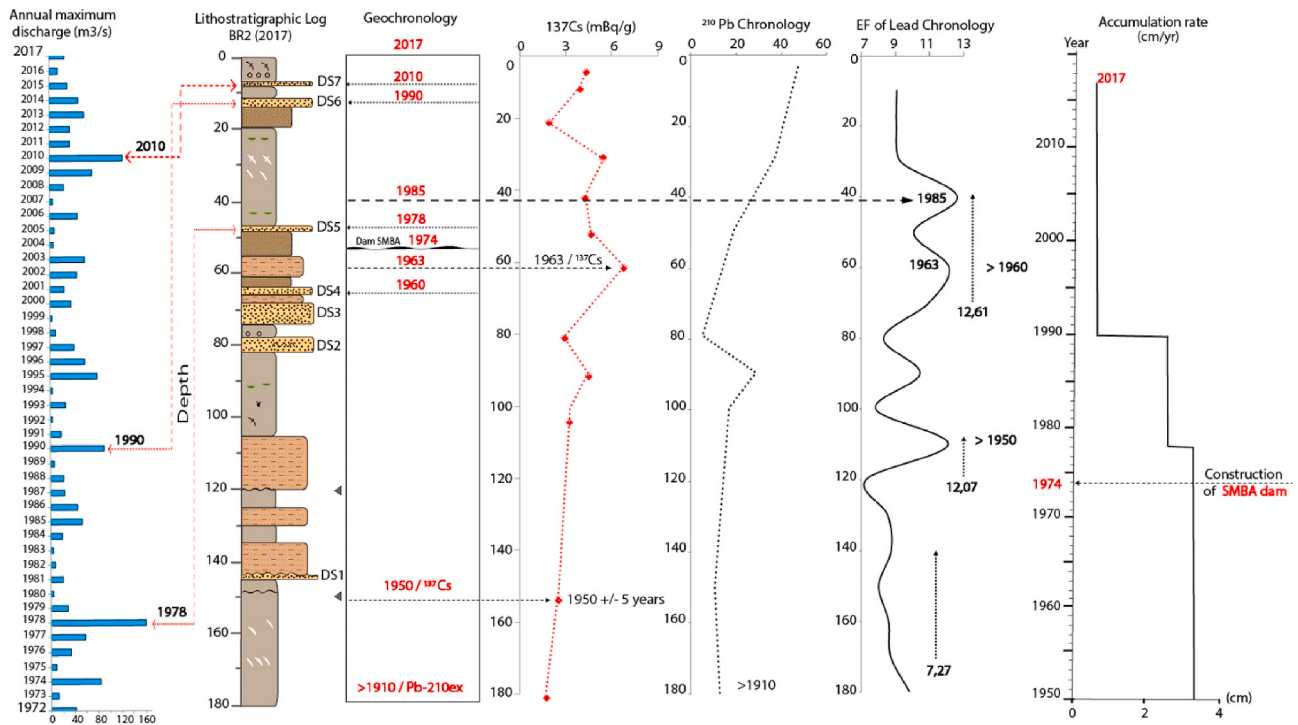


Fig. 4. ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activities, EF of lead and the annual maximum discharges series at the Lalla Chafia gauging station between 1972 and 2017 with accumulation rate of anthropogenic impact. The individual slackwater flood unit deposited by a particular event is indicated.

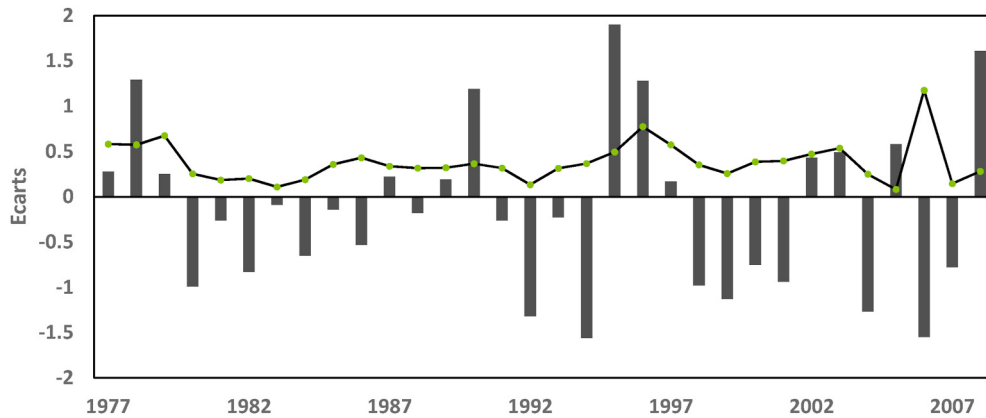


Fig. 5. Standardized Precipitation Indices (histogram graph) and runoff coefficient (curve graph) from 1977 to 2008 in Bouregreg watershed.

Where dd is deficit due to dam.

dc is calculated from the mean value obtained in 17 years (1955–1972) by

$$dc = [d(1955) - d(1972)]/17 \quad (3a)$$

$$dc = 0.1247 \text{ cm/yr} \quad (4a)$$

During this period of 12 years (1973–1985), a deficit due to dam installation expressed from equation (2) by

$$dd = Td(SR) - dc \quad (5)$$

As $Td(SR)$ is 3.43 cm/yr in 13 years, we then deduced

$$Td(SR) = 0.2676 \text{ cm/yr and } dd = 0.1429 \text{ cm/yr} \quad (6)$$

The contribution of dam after its installation and during a period of 13 years until 1985 is therefore 53.5% while the climate effect on sediment rate is about 46.5% according to equations (4) and (6). From

1985, the sedimentary rate is stabilized in 3.08 cm/yr until 1990 when a decrease to 0.41 cm/yr is observed over the period 1990–2017.

5. Discussion

5.1. Impact of dam and climate on the evolution of sediment transport

Dam structures are one of the most common ways by which the hydrological and sedimentary regimes of rivers are altered by humans. However, the influence of dam impacts may be superimposed on the effects of pre-dam hydro-technical works (Słowik et al., 2018). Since the installation of the dam in 1974, grain size of BR1 and specially BR2 core reveals a succession of layers made of fine materials (silt/clay) (Figs. 2 and 3). The finest granulometric standard shows a contribution from the watershed during periods of low water and floods, while the coarsest signs indicate the presence of sediments due to exceptional events (intense floods) (Blanchemanche, 2009; Dezileau et al., 2014; Kotti

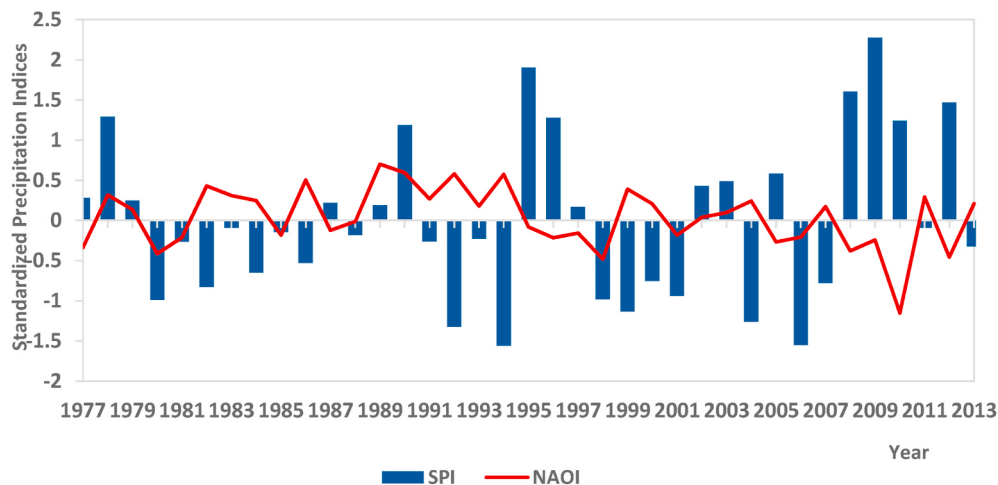


Fig. 6. Standardized Precipitation Indices (SPI) and NAO index (NAOI) from 1977 to 2013 in Bouregreg catchment (9970 km²).

et al., 2018; Grygar et al., 2018). However, seven coarse stratigraphic deposits have been determined and attributed to intense floods with succession of less energetic flood deposits and fine estuarine sediments.

The geochemistry of the profile shows that enrichment factor (EF) of Pb, exhibits very high variation between the base and the top of the terrace. This suggests that each flood event is characterized by an EF of Pb (Fig. 4). This result also indicates that EF ratio of Pb is not controlled by particle size distribution (Dezileau et al., 2014). The first high EF of 12,07 can be linked to the strong increase of Pb production during the mid-1960s (DS3 and DS4) while much higher EF of 12,61 is related to the major pollution of the basin in 1985, from the former Aouli, Mibladen and Zeïda mining sites. These substrates, abandoned in 1985 without rehabilitation, constitute a perennial source of contamination for the environment and agriculture of the region, and reach the near and even distant soils via the wind and water mechanisms of erosion and deposition (El Hachimi et al., 2014). The source of the upper Bouregreg basin initiates from western Middle Atlas mountains and therefore adjoins that of the Moulouya.

This suggests that high EF values of lead in the flood deposit are attributed to lead pollution from these mining sites. The geochemistry of the profile shows that enrichment factor (EF) of Pb, exhibits very high variation between the base and the top of the terrace. This suggests that each flood event is characterized by an EF of Pb (Fig. 4) which agrees with Dezileau et al. (2014).

Ages for various flood deposits have been assigned with the use of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex}. The profile of ²¹⁰Pb_{ex} activity follows a relatively exponential decrease with depth (Fig. 4). This exponential decline of activity in ²¹⁰Pb_{ex} indicates that all the deposits are recent and subsequent 1900 (Dezileau et al., 2014; Benmohammadi, 1991; Moussa et al., 2019). The profile distribution of ¹³⁷Cs activity shows the maximum depth at 60 cm. This represent the period of maximum radionuclide fallout in the Northern Hemisphere associated with a peak of atomic weapons testing in 1963 (Raji et al., 2015). Based on a possible relationship between sediment grain size and the magnitude of an event (Kotti et al., 2018; Dezileau et al., 2014), the first event after 1963 recorded by the instrumental archives, with a debit of the order of 161 m³/s at Lalla Chafia, has probably deposited DS5, which consists of fine sand. Another less powerful event is recorded in 1990 with flow estimated to 90,10 m³/s is related to SD6 deposit with fine materials (D₅₀ of 38 µm) but has a Zr peak probably related to high-energy events. We could also associate the event of 2010 with the DS7 deposit characterized by average sands (112 µm). DS4 deposit is assigned to the event of magnitude 638 m³/s occurred in December 1960 according to Office of Hydraulics. Sedimentary layers associated with these floods are characterized by medium sands (Fig. 3). This can be explained by

watercourse sections that were cleared before 1974, and the Bouregreg alluvial terrace was evolving. The absence of hydrological documentary sources, erosion that removes geomorphological signals, and model approximation could be also at the origin of this low correlation between sedimentary flood record and the continuous record of Bouregreg flow between 1960 and 1950. From the base to the top of the terrace, the sedimentation rate related to the first 28 years of river discharges determined from the ¹³⁷Cs dating is about (3,64 cm/year) between 1950 and 1978, and about 3,08 cm/year between 1978 and 1990, while it was much lower between 1990 and 2017 reaching 0,41 cm/year made up of fine materials between (Fig. 4). This decreasing rate coincides with the construction of dam on the Bouregreg River and climate variability, given that the dry years are more frequent than wet years after 1990s. Resulting sediments of this degradation contribute to silting of the dam's reservoir, estimated around 2,5 mm/year, corresponding to a specific annual degradation estimated to 370 t/km²/year according to Lahlou (1982), but which has increased to 1600 t/km²/year according to Ezzaoui et al. (2020) during a measurement period after the dam's raising. Our results confirm those of other authors such as Kotti et al. (2018) who reported a set of 12 distinct slackwater deposits in alluvial terrace FD of the Mejerda in Tunisia, which have been related to exceptional floods events. From this alluvial terrace, Kotti et al. (2018) deduced a decrease of flood events since the construction of a dam.

Climate variability, particularly variability in rainfall and its ensuing impact on river discharge, is also a potentially strong control on sediment flux and deposition in the Bouregreg River basin (Driouech et al., 2010a). At the end of 1970s, the hydroclimatic variability of the Bouregreg watershed exhibited an alternation of wet and dry periods with respect to the evolution of the rains and flow. Consequently, the hydrological regime of the basin is directly influenced by the precipitation regime. Thus, it can be noted that despite some bursts of relative abundance, the water flow of the Bouregreg watershed has steadily deteriorate. For example, the 1980s and 1990s, had numerous dry years, which could have impacted sediment discharge in the Bouregreg River basin (Fig. 5). One potential climatic driver of river discharge in Morocco is the North Atlantic Oscillation (NAO). The NAO is comprised of two systems, a large low pressure that is typically situated over Iceland, and a large high-pressure system that is typically located over the Azores. Fluctuations in the NAO drive major weather patterns that influence global winds, precipitation and a wealth of ecosystem and environmental parameters across the Northern Hemisphere (Hurrell and Deser, 2009). The NAO index measures the normalized pressure difference between the Icelandic Low and the Azores High, with a positive NAO index indicated a strong pressure difference and negative NAO index indicated a weak pressure difference. Precipitation in the

Bouregreg watershed is strongly anti-correlated with the NOA index, wet years often years with positive NOA index and dry years are often with a negative NOA index. For example, the period 1977–1993 is generally characterized by dry years and a positive NOA index, and the wet periods in the mid-1990s and mid 2000's correspond to negative NOA indices (Fig. 6). Fluctuations in the NAO appear to be correlated with fluctuations in sedimentation rate. The sedimentation rate was higher before 1970, about 3,64 cm/year, whereas it was between 1980 and 1990, about 3,08 cm/year during the drier years (Fig. 4). Decreasing rate due to dryer period appears not exceeding 0,02 cm/year. Indeed, the dam seems to have greatly modified the natural response of the downstream part of the River. There is more solid input since 1978 which indicates that the evolution of the hydraulic regime reflects the alterations experienced by the Bouregreg basin. Three coarse stratigraphic flood units (DS5, DS6, and DS7) are observed during the last years (1978, 1990 and 2010). These downstream floods have brought sand up to the alluvial plain throughout the releases of the dam. The causes of such reductions in sediment flux have been assessed by many studies. Climate change impacts have been demonstrated in some of the river basins (Lu et al., 2011), but the dominant control is due to human impact, through dam construction, soil and water conservation programs, water abstraction and sand extraction (Walling, 2012). Hence, we observe that in the Bouregreg River the deficit rate about 46,5% is due to climate change while the factor owing to dam effect appears by an amount of 53,5%.

Large amount of sediments are retained behind river dams. If this sediment yield would be released from the dams, this could promote sediment accretion at the coast, where the numerous cross bridges and the hydro/agricultural management of the downstream impacted the downstream part inducing a change in the sediment nature, quantity and transport regime to the sea making it difficult to highlight the direct impact of the successive flood events.

6. Conclusions

We propose that sedimentary dynamics in the Bouregreg River are controlled by a combination of both the construction of the dam, and variability in the North Atlantic Oscillation. The impact of the dam has been to drastically reduce sediment loads to the estuary, and particularly reduce the amount of coarse sediment, mainly sand, to the sea. On the other hand, the North Atlantic Oscillation can both increase or decrease the sediment flux to the estuary, with positive phases leading to dry years and reduced sediment fluxes and negative phase leading to wet years and increased sediment fluxes, but its impact on the sediment release to the sea is much reduced since the construction of the SMBA dam. The runoff and sediment load of the Bouregreg River showed a reduction in the past few decades due to climate variability and human activities. Stratigraphic records of BR2 appears to be a significant example to illustrate the impact of dam, which may have strong and long-lasting effects on coastal geomorphology and ecosystems. This result suggests that the link between flood events, dam construction and climate variability seem to be regular characteristic in North Africa. Although climate variability is increasingly seen as a cause of changing sediment loads, human impact is generally recognized to be the key cause. It is concluded that the decrease of sediment flow to the sea is a major issue to consider in investigating the dynamics of coastal areas in a context of global climate change in North Africa.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This work is part of the Toubkal project No. TBK/15/CASBA (Anthropic and Environmental Characteristics of the erosion of the slopes of the Sidi Mohammed Ben Abdellah dam) in joint collaboration between the Geophysics and Natural Hazards laboratory of the Scientific Institute of the University Mohammed V of Rabat, Bouregreg and Chaouia watershed agency (ABHBC), Montpellier HydroSciences laboratory and IRD-Institut de Recherche pour le Développement in Morocco. Anonymous reviewers are thanked for their comments and suggestions. Kolker was supported by a Fulbright Scholarship from the US Department of State during this project.

References

- Amhoud, S., 1997. Apports de la géologie et de l'hydrologie à l'étude d'impact de la décharge publique de l'Oued Akrech sur les ressources en eau (Rabat - maroc). Thèse de Doctorat, spécialité Géologie, Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat (Maroc).
- Amrouni, O., Sánchez, A., Khélifi, N., Benmoussa, T., Chiarella, D., Mahé, G., Abdeljaouad, S., McLaren, P., 2019. Sensitivity assessment of the deltaic coast of Medjerda based on fine-grained sediment dynamics, Gulf of Tunis (Western Mediterranean). *J. Coast. Conserv.* 23 (3), 571–587. <https://doi.org/10.1007/s11852-019-00687-x>.
- Baker, V.R., 1987. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *J. Hydrol.* 96, 79–99.
- Beaudet, G., 1969. Le plateau central marocain et ses bordures : étude géomorphologique. Doctoral Thesis. Mohamed V University. Rabat (Maroc), 478 pp.
- Ben Moussa, T., Dezileau, L., Amrouni, A., Mahe, G., 2018. The sedimentological changes caused by human impact at the artificial channel of Medjerda-River (Coastal zone of Medjerda, Tunisia). In: water quality and sediment transport issues in surface water. *Proc. IAHS* 377, 77–81. <https://doi.org/10.5194/piahs-377-77-2018>.
- Benito, G., Thorndycraft, V.R., 2005. Paleoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences. *J. Hydrol.* 313, 3–15.
- Benito, G., Lang, L., Barriendos, M., Llasat, M.C., Francies, F., Ouarda, T., Thorndycraft, V.R.G., Enzel, Y., Bardossy, A., Coeur, D., Bobee, B., 2004. Use of systematic, paleoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation. Review of scientific methods. *Nat. Hazards* 31, 623–643.
- Benmohammadi, A., 1991. Erosion et sédimentation dans le bassin versant de l'Oued Bou Regreg. Doctoral Thesis. Scientific University of Mohammed. Rabat (Maroc), 244 pp.
- Bi, Z.A.T., Brou, T., Emran, A., Mahe, G., 2013. In: Boegh, E., Blyth, E., Hannah, D.M., Hisdal, H., Kunstmann, H., Su, B., Yilmaz, K.K. (Eds.), Remote Sensing and GIS Analysis of the Dynamic of Vegetation in Climate Variability Context on the Bouregreg Watershed. In: Climate and Land Surface Changes in Hydrology, vol. 359. IAHS Publ., pp. 403–410.
- Boyer, Jean François, Dieulin, Claudine, Rouché, Nathalie, Crès, Agnès, Servat, Eric, Paturel, Jean Emmanuel, Mahe, Gil, 2006. SIEREM: an environmental information system for water resources. In: IAHS (Ed.), In Water Resource Variability: Processes, Analyses and Impacts; IAHS Publications: La Havana, Cuba, 308. IAHS, Wallingford, pp. 19–25. <https://iahs.info/uploads/dms/13630.08-19-25-111-308-Boyer.pdf>.
- Bravard, J.P., Peiry, J.L., 1999. The CM pattern as a tool for the classification of alluvial suites and flood-plains along the River continuum. In: Floplain: Interdisciplinary Approaches. Geological Society. In: Marriott, S.B., Alexander, J. (Eds.), vol. 163. Special Publications, London, pp. 259–268.
- Bussi, G., Dadson, S.J., Prudhomme, C., Whitehead, P.G., 2016. Modeling the future impacts of climate and land-use change on suspended sediment transport in the River Thames (UK). *J. Hydrol. (Wellington)* 542, 357–372.
- Chien, N., 1985. Changes in river regime after the construction of up-stream reservoirs. *Earth Surf. Process. Landforms* 10, 143–159.
- Cochran, J.K., Hirschberg, D.J., Wang, J., Dere, C., 1988/4. Atmospheric deposition of metals to coastal waters (Long Island Sound, New York U.S.A.): evidence from Saltmarsh deposits. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences* 46 (4), 503–522.
- Dezileau, L., Terrier, B., Berger, J.F., Blanchemanche, P., Latapie, A., Freydier, R., Paquier, A., Lang, M., Delgado, J.L., 2014. Paleohydrological reconstruction of extreme floods of the Gardon river, SE France. *Houille blanche, international water journal*, n°4, pp. 44–52.
- Dieulin, C., Boyer, J.F., Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., 2006. The contribution of GIS to hydrological modeling. Climate variability and change: hydrological impacts. FRIEND 2006. In: Demuth, S., Gustard, A., Planos, E., Scatena, F., Servat, E. (Eds.). IAHS Press, Wallingford, UK, pp. 68–74 (Vth Int. Conf., La Havane (CUB)). IAHS Pub \. 308.
- Dieulin, C., Mahe, G., Paturel, J.E., Ejjiyar, S., Trambay, Y., Rouche, N., El Mansouri, B., 2019. A new 60-year 1940–199 monthly gridded rainfall data set for Africa. *Water* 11 (2), 387. <https://doi.org/10.3390/w11020387>. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/2/387>.
- Drriouch, F., Déqué, M., Sanchez-Gomez, E., 2010a. Weather regimes Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global Planet. Change* 72, 1–10.
- Drriouch, F., Mahé, G., Déqué, M., Dieulin, C., El Heirech, T., Milan, M., Benabdelfadel, H., Rouché, N., October 2010. 2010b. Evaluation d'impacts potentiels de changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la Moulouya au Maroc. In: global Change: facing Risks and Threats to Water Resources

- (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco. IAHS Publ. 340, 561–567. https://iahs.info/uploads/dms/15260.79-561-567-340-70-T5_Driouech.pdf.
- Dudgeon, D., 1992. Endangered ecosystems: a review of the conservation status of tropical Asian rivers. *Hydrobiologia* 248, 167–191.
- El Aoula, R., Mahe, G., Mhammedi, N., Ezzahouani, A., Kacimi, I., Khomsi, K., 2021. Evolution of the hydrological regime in relation with climate change: case of the Bouregreg River basin, Morocco. *Geogr. Pol.* 94 (1), 131–147. <https://doi.org/10.7163/GPol.0197>.
- El Hachimi, M.L., Fekhaoui, M., El Abidi, A., Rhoujati, A., 2014. Contamination des sols par les métaux lourds à partir de mines abandonnées: le cas des mines Aouli-Mibladen-Zeida au Maroc. *Cah. Agric.* 23 n8 3, mai-juin 2014.
- Ely, L.L., Baker, V.R., 1985. Reconstructing paleoflood hydrology with slackwater deposit Verde River, Arizona. *Phys. Geogr.* 6, 103–126.
- Ezzaoui, M., Mahe, G., Kacimi, I., Zerouali, A., 2020. Comparison of the MUSLE model and two years of solid transport measurement in the Bouregreg basin, and impact on the sedimentation in the Sidi Mohamed Ben Abdellah dam, Morocco. *Water* 12 (7). <https://doi.org/10.3390/w12071882>, 1882. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/7/1882>.
- Ezzouaq, M., 1991. Caractérisation hydrodynamique, physico-chimique et bactériologique des eaux superficielles de l'estuaire du Bou Regreg (Maroc) soumis aux rejets des villes de Rabat-Salé. Thèse de 3ème cycle. Université Mohamed V, Rabat (Maroc), 140 p.
- Giardino, A., Schrijvershof, R., Nederhoff, C.M., Vroeg, H., 2018. Brière C., Tonnon P.-K., Caires S., Walstra D.J., Sosa J., Verseveld van W., Schellekens J., Sloff C.J. 2018. A quantitative assessment of human interventions and climate change on the West African sediment budget. *Ocean Coast Manag.* 156, 249–265.
- Gillet, P., 1986. Contribution à l'étude écologique des Annélides Polychètes de l'estuaire du Bou Regreg (Maroc). Thèse de 3ème cycle. Université d'Aix-Marseille (France), 215 p.
- Goussot, E., Brou, Y.T., Laouina, A., Chaker, M., Emran, A., Machouri, N., Mahe, G., Sfa, M., Tra Bi, A., 2014. Land covers dynamic and agricultural statistics on the Bouregreg watershed in Morocco. *Eur. J. Sci. Res.* 126 (2), 191–205.
- Graf, W.L., 2006. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. *Geomorphology* 79, 336–360.
- Grant, G.E., Schmidt, J.C., Lewis, S.L., 2003. A Geological Framework for Interpreting Downstream Effects of Dams on Rivers. In: Peculiar River, A., O'Connor, J.E., Grant, G.E. (Eds.). American Geophysical Union, Washington DC, pp. 209–225.
- Grygar, M.T., 2018. Hošek M., Pacina J., Stojdl J., Bábek O., Sedláček J., Horn K., Talská R., Kříženecká S., Tolasová J. 2019. Changes in the geochemistry of fluvial sediments after dam construction (the Chrudimka River, the Czech Republic). *Appl. Geochem.* 98, 94–108.
- Hadou, A., Meddi, M., Mahe, G., 2021. Effects of climate change and human action on the decrease of sediment discharge to the Coast: an example of the largest Wadi in the Maghreb. *Int. J. Sediment Res.* 36 (2), 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.ijscr.2020.07.001>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001627920300731?via%3Dihub>.
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahe, G., Toumi, S., Ali Rahamni, S.E., 2018. Erosion, sedimentation and climate change on the wadi Mina at the Sidi M'Hamed ben Aouda dam, Algeria. *Water* 10 (7), 895. <https://doi.org/10.3390/w10070895>. <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/7/895>.
- Hallouz, F., Meddi, M., Mahé, G., Karahacane, H., Salah Eddine, A.R., 2019. Trend in precipitation and evolution of discharge in a climate change context: wadi Mina watershed in Algeria. *Rev. Sci. Eau* 32 (2), 83–114.
- Hzami, A., Heggy, E., Amrouni, O., Mahe, G., Maanan, M., Abdeljaouad, S., 2021. Alarming coastal vulnerability of the deltaic and sandy beaches of North Africa. *Nature Scientific Reports* 11 (2320). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77926-x>. <https://www.nature.com/articles/s41598-020-77926-x>.
- Khomsi, K., 2014. Variabilité hydro climatique dans les bassins versants du Bouregreg et du Tensift au Maroc: moyennes, extrêmes et projections climatiques. Thèse de Doctorat, spécialité climatologie, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat (Maroc).
- Khomsi, K., Mahe, G., Sinan, M., Snoussi, M., 2013. Hydro-climatic variability in two Moroccan watersheds: a comparative analysis of temperature, rain and flow regimes. In: Boegh, E., Blyth, E., Hannah, D.M., Hisdal, H., Kunstmann, H., Su, B., Yilmaz, K. K. (Eds.), Climate and land surface changes in hydrology, 359. IAHS, pp. 183–190. IAHS Publ. <https://iahs.info/uploads/dms/15500.34-183-190-359-41-KHOMSI-IAHS-approved-100513CORR.pdf>.
- Khomsi, K., Mahe, G., Tramblay, Y., Sinan, M., Snoussi, M., 2016. Regional impacts of global change: seasonal trends in extreme rainfall, runoff and temperature in two contrasted regions of Morocco. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16 (5), 1079–1090. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1079-2016>.
- Kirwan, M.L., Mudd, S.M., 2012. Response of Salt-Marsh Carbon accumulation to climate change. *Nature* 489 (7417), 550–553.
- Kochel, R.C., Baker, V.R., Patton, P.C., 1982. Palaeohydrology of southwest Texas. *Water Resour. Res.* 18, 1165–1183.
- Kolker, A.S., Steven, L., Goodberd, J.R., Hameed, S., Cochran, J.K., 2009. High-resolution records of the response of coastal wetland systems to long-term and short-term sea-level variability. *Estuarine. Coastal and Shelf Science* 84, 493–508.
- Kolker, A.S., Kirwan, M.L., Goodberd, J.R., Cochran, J.K., 2010. Global climate changes recorded in Coastal Wetland sediments: empirical observations linked to theoretical predictions. *Geophys. Res. Lett.* 37 (14), L14706.
- Kondolf, G.M., Schmitt Rafael, J.P., Carling, P., Darby, S., Arias, M., Bizzi, S., Castelletti, A., Cochrane, T.A., Gibson, S., Kumm, M., Oeurng, C., Rubin, Z., Wild, T., 2017. Changing sediment budget of the Mekong: cumulative threats and management strategies for a large river basin. *Sci. Total Environ.* 625, 114–134. Pages.
- Kotti, F., Mahe, G., Habaieb, H., Dieulin, C., Calvez, R., 2016. Etude des pluies et des débits sur le bassin versant de la Medjerda, Tunisie. *Bull. Inst. Sci.* 38, 19–28.
- Kotti, F., Dezileau, L., Mahe, G., Habaieb, H., Benabdallah, S., Bentkaya, M., Calvez, R., Dieulin, C., 2018. Impact of dams and climate on the evolution of the sediment loads to the sea by the Medjerda river (Golf of Tunis) using a paleo-hydrological approach. *J. Afr. Earth Sci.* 142, 226–233.
- Lahlou, A., July 1982. 1982. La dégradation spécifique des bassins versants et son impact sur l'envasement des barrages. Recent Developments in The Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield (Proceedings of the Exeter Symposium. IAHS Publ.no.137.
- Lahlou, A., 1986. Etude actualisée de l'envasement des barrages au Maroc. Text presented in "les technologies appropriées pour l'eau et l'assainissement en zones arides", organized by the OMS, PNUD and Mohammadia School of Engineering p.p. 61 à 78 of the report of the OMS, 1984. 6, 337–356.
- Lane, E.W., 1955. The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 81, 1–17.
- Lu X. X., Zhang S. R., Xu J. C., Merz J. 2011. The changing sediment loads of the Hindu Kush-Himalayan rivers: an overview. In: sediment problems and sediment management in asian river basins (ed. by Des Walling) (Proceedings of the Workshop Held at Hyderabad, India, September 2009), 21–36. IAHS Publ. 350. IAHS Press, Wallingford, UK.
- Magillan, F.J., Nislow, K.H., 2005. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology* 71, 61–78.
- Mahe, G., Emran, A., Brou, Y.T., Tra Bi, A.Z., 2012. Impact de la variabilité climatique sur l'état de surface du bassin versant du Bouregreg (Maroc). *Eur. J. Sci. Res.* 84 (3), 417–425.
- Mahe, G., Benabdelfadel, H., Dieulin, C., Elbaraka, M., Ezzaoui, M., Khomsi, K., Rouche, N., Sinan, M., Snoussi, M., Tra Bi, A., Zerouali, A., 2014. Evolution des débits liquides et solides du Bouregreg. In: Laouina, A., Mahe, G. (Eds.), Gestion durable des terres. Proceedings de la réunion multi-acteurs sur le bassin du Bouregreg. CERGéo, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Mohammed V-Agdal, Rabat, 28 mai 2013. Edité par ARGDT. Maroc, Rabat, pp. 21–36. ISBN 978-9954-33-482-9.
- Moussa, T.B., Amrouni, O., Hzami, A., Dezileau, L., Mahe, G., Condomines, M., Saadi, A., 2019. Progradation and retrogradation of the Medjerda delta during the 20th century (Tunisia, western mediterranean). *Compt. Rendus Geosci.* 351 (4), 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.10.004>.
- Petts, G.E., Gurnell, A.M., 2005. Dams and geomorphology: research progress and future directions. *Geomorphology* 71, 27–47.
- Raji, O., Dezileau, L., Von, Grafentein U., Niaz, S., Snoussi, M., Martinez, P., 2015. Extreme sea events during the last millennium in the Northwest of Morocco. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 203–211, 2015.
- Renwick, S.V., Smith, J.D., Barley, R.W., Buddemeir, R., 2005. The role of impoundments in the sediment budget of the conterminous United States. *Geomorphology* 71 (1–2), 99–111. Pages.
- Rhouichi, H., 1996. Processus et facteurs de l'érosion dans le bassin versant du Bou Regreg (s. s.): approche sédimentologique de la quantification de l'érosion. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Mohamed V, Rabat (Maroc), 160 p.
- Samaras, A.G., Koutitas, C.G., 2014. Sediment transport and morphology in coupled watershed coast systems: a case study using an integrated approach. *Intern. Journ. of Sedim. Res.* 29 (3), 304–315.
- Schmidt, J.C., Wilcock, P.R., 2008. Metrics for assessing the downstream effects of dams. *Water Resour. Res.* 44 <https://doi.org/10.1029/2006WR005092>. W04404.
- Singla, S., Mahé, G., Dieulin, C., Driouech, F., Milano, M., El Guelai, F.Z., Ardoine-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), 340. IAHS Publ., pp. 679–687. https://iahs.info/uploads/dms/15275.94-679-687-340-85-T5_Singla.pdf.
- Syvitski, J.P.M., Saito, Y., 2007. Morphodynamics of deltas under the influence of humans. *Global and planetary changes* 57 (3–4), 261–282.
- Syvitsky, J.P.P., Peckham, S.D., Hilberman, R., Mulder, T., 2003. Predicting the terrestrial flux of sediment to the global ocean: a planetary perspective. *Sediment. Geol.* 162 (1–2), 5–24.
- Ślowski, M., Dezső, J., Marciniak, A., Kovács, J.T., 2018. Evolution of river planforms downstream of dams: effect of dam construction or earlier human-induced changes. *Earth Surface Processes and Landforms* Copyright. <https://doi.org/10.1002/esp.4371>. Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).
- Taibi, S., Meddi, M., Mahe, G., Assani, A., 2017. Relationships between atmospheric circulation indices and rainfall in Northern Algeria and comparison of observed and RCM-generated rainfall. *Theor. Appl. Climatol.* 127, 1–2, 241–257. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-015-1626-4>.
- Taibi, S., Meddi, M., Mahe, G., 2019. Change in seasonal rainfall variability in south region of Mediterranean basin (N-Algeria) simulated by ENSEMBLE RCMs. *Atmosfera* 32 (1), 39–54. <https://doi.org/10.20937/atm.2019.32.01.04>.
- Thorndycraft, V.R., Benito, G., Llasat, N.C., Barriendos, M., 2003. Paleofloods, historical data and climatic variability: applications in flood risk assessment. In: Proceedings of the PHEFRA International Workshop. Spain, Barcelona, 378 pp.
- Tra Bi, Z.A., 2013. Etude de l'impact des activités anthropiques et de la variabilité climatique sur la végétation et les usages des sols, par utilisation de la télédétection et des statistiques agricoles, sur le bassin versant du Bouregreg (Maroc). Thèse de doctorat, Université Félix Houphouët Boigny. Côte d'Ivoire, Abidjan. https://iahs.info/uploads/dms/15534.69-403-410-359-56-Tra-Bi-AISH_approvedCORR.pdf.

- Walling, D.E., 2011. Human impact on the sediment loads of Asian rivers. In: Proceedings of the Workshop held at Hyderabad, 350. India IAHS Publ. (Accessed September 2009).
- Walling, D.E., 2012. The Role of Dams in the Global Sediment Budget. Institute of Mountain Hazards and Environment. CAS-Chengdu, China, 11–15 October 2012) (IAHS Publ. 356, 2012).
- Wang, S., Fu, B.J., Piao, S., Lu, Y., Ciais, P., Feng, X., Wang, Y., 2015. Reduced sediment transport in the yellow River due to anthropogenic changes. Nat. Geosci. <https://doi.org/10.1038/NGEO2602>.
- Williams, G.P., Wolman, M.G., 1984. Downstream effects of dams on alluvial rivers. Geol. Surv. Prof. Pap. 1286, 1–83.

RÉSUMÉ

L'approche paléohydrologique combinée à l'analyse multi-proxy est réalisée pour la première fois sur des archives sédimentaires de la basse vallée de l'oued Bouregreg, en aval du barrage SMBA (Maroc). Cette étude a permis de mieux appréhender la signature climatique et anthropique dans la colonne sédimentaire d'environ 2 m, prélevée en 2017 dans la terrasse alluviale. De précieuses informations sont fournies sur : l'évolution climatique des dernières décennies, les paléoevénements de crues et les actions anthropiques ayant contrôlé le transit sédimentaire amont-aval de l'oued. L'historique des séries pluviométriques de 36 ans (1977-2013) montre une variabilité temporelle et spatiale sur l'ensemble du bassin versant, marquée par une longue période de sécheresse (1979-1997), entrecoupées par des phases humides dont la plus intense est celle de 1996. La probabilité d'occurrence d'une année sévèrement sèche est passée d'une année tous les 6 ans à tous les 3-4 ans, avec une tendance vers la bi-saisonnalité (hiver-été). La variabilité hydroclimatique impacte nettement les apports en eau de l'oued Bouregreg ; la variation des débits vers le barrage reflète les mêmes tendances que les régimes pluviométriques. Toutes ces fluctuations hydroclimatiques sont enregistrées dans les archives sédimentaires prélevées. L'étude sédimentologique couplée à une analyse géochimique (Fe, Zr et Ti) ont permis d'identifier sept horizons à fraction grossière ; témoins de dépôts de paléocrues intenses. Le profil d'activité du ^{210}Pb décroissant dans les dépôts, confirme des sédiments non perturbés et d'âge postérieurs à 1900. Le ^{137}Cs révèle une chronologie approximative des dépôts des événements extrêmes en 1960, 1978, 1990 et 2010. Le taux de sédimentation a progressivement baissé, de 3,64 cm/an, 3,08 cm/an à 0,41 cm/an (1950-1978-2017). Les forçages hydroclimatique et anthropique (barrage) y contribuent au taux de déficit fluvial avec, respectivement, 46,5% et 53,5%. Durant ces dernières décennies, la composante fluviale est moins importante en aval du barrage, elle favorise alors une dynamique estuarienne à composante marine. Celle-ci risque de s'accroître si la pénurie en sédiments vers la mer se poursuit et l'élévation du niveau marin s'accélère dans le contexte du changement climatique.

Mots clés : Variabilité hydroclimatique, archive sédimentaire, paléohydrologie, paléocrues, oued Bouregreg.

ABSTRACT

Paleohydrological approach combined with multi-proxy analysis is realized for the first time on sedimentary archives of the lower valley of the Bouregreg river, downstream from the SMBA dam (Morocco). These studies contributed to identify both climatic and anthropogenic signatures in a sedimentary column of about 2 m that was sampled in 2017 in the alluvial terrace. Valuable data are provided on climatic evolution of the last decades, paleoevents of floods and the anthropic actions which controlled the sedimentary transit upstream-downstream of the river. 36-year rainfall series (1977-2013) show temporal and spatial variability over the entire catchment area marked by a long period of drought (1979-1997) scattered with wet phases the most intense of which occurred in 1996. The probability of occurrence of a severely dry year during a given period changed from 6 years to 3-4 years with a trend towards bi-seasonality (winter-summer). Hydroclimatic variability clearly impacts the water supply of the Bouregreg Bouregreg as the variation in flows towards the dam reflects similar trends of rainfall patterns. Hydroclimatic fluctuations are recorded in the collected sedimentary archives. Sedimentological and geochemical analyses (Fe, Zr and Ti) made it possible to identify seven horizons with a coarse fraction that shows evidence for witnesses of intense paleoflood deposits. Decreasing activity profile of ^{210}Pb in the deposits confirms undisturbed sediments of post-1900 period. ^{137}Cs indicates an approximate chronology of extreme events deposits during 1960, 1978, 1990 and 2010. Sedimentation rate gradually decreased from 3.64 cm/year (1950) to 3.08 cm/year (1978), and to 0.41 cm/year (2017). The decrease in hydrosedimentary flows downstream is then accurately confirmed. Hydroclimatic and anthropogenic (dam) forcing contribute to the river deficit rate by 46.5% and 53.5% respectively. During the last decades fluvial component appears less important downstream of the dam which favors an estuarine dynamic with a marine component. This setting may develop if the shortage of sediment towards the sea continues and the rise in sea level may accelerate in a context of climate change.

Keywords: Hydroclimatic variability, sedimentary archive, paleohydrology, paleofloods, Bouregreg river.