

THESE

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

Centre de Recherche : Geophysics, Natural Patrimony and Green Chemistry (GEOPAC)

Structure de Recherche : Laboratoire de Géophysique et Risques Naturels (LGRN)

Discipline : Environnement et Développement Durable

Spécialité : Environnement marin et côtier

Présentée et soutenue le 26/03/2022 par :

Bouchra OUIDI

Evaluation Environnementale Intégrée de la Lagune de Marchica et de son Bassin Versant dans le cadre des Changements Globaux

JURY

Ali AZDIMOUSA	PES,	Université Mohammed Premier, Faculté Pluridisciplinaire de Nador, Maroc	Président
Nadia MHAMMDI	PES,	Université Mohammed V, Institut Scientifique de Rabat, Maroc	Directrice de Thèse
Hocein BAZAIRI	PES,	Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat, Maroc	Co-Directeur de Thèse
Laarbi BOUDAD	PES,	Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat, Maroc	Rapporteur/Examineur
Abdelaziz BENHOUSSE	PES,	Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat, Maroc	Rapporteur/Examineur
Mohamed MAANAN	MCF-HDR,	Université de Nantes, France	Rapporteur/Examineur
Mohamed EL BOUCH	Expert/Dr,	Laboratoire National des Etudes et de la Surveillance de la Pollution, Rabat, Maroc	Examineur
Mounia TAHRI	Experte/Dr,	Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires, Rabat, Maroc	Examinatrice
Mostaafa LAYACHI	Expert/Dr,	Institut National de la Recherche Halieutique Centre Régional de Nador, Maroc	Examineur
Maria SNOUSSI	Experte/Dr,	Experte Internationale, Maroc	Invitée

Année Universitaire : 2021/2022

AVANT - PROPOS

*Le Fonds Français pour l'Environnement Mondial (FFEM) en concertation avec l'Agence Française de Développement (AFD), dans le cadre du financement du projet d'assainissement du Grand Nador en 2008, a confié à la **Fondation Mohammed VI pour la Protection de l'Environnement (FM6E)** présidée par son **Altesse Royale LALLA HASNA** l'accompagnement du projet d'appui à la réalisation et la mise en œuvre d'un plan global de dépollution et de protection de la lagune de Marchica par un programme d'éducation et de sensibilisation spécifique et une démarche partagée et intégrée. Dans ce cadre, un Observatoire Marchica a été créé en 2012, pour assurer le suivi de l'état environnemental de cet écosystème à travers des indicateurs environnementaux et un plan de gestion. Cet Observatoire a été appuyé par plusieurs experts partenaires de la FM6E notamment le **Conservatoire du Littoral Français, l'Agence de l'Eau de Rhône Méditerranée Corse, IFREMER, ECOCEAN, INRH, la Faculté des Sciences de Rabat et le Département de l'Environnement/Développement Durable.***

Les principales missions de l'Observatoire sont la collecte des données disponibles sur la lagune de Marchica ; le suivi de la mise en œuvre du plan global de suivi environnemental de la lagune de Marchica et son environnement ; l'actualisation et l'élaboration des indicateurs environnementaux ; la comparaison avec les valeurs réglementaires ou normatives marocaines et internationales ; la sensibilisation des différents intervenants concernés par la protection et la gestion durable de la lagune de Marchica ; l'alerte des gestionnaires et des décideurs ; et positionnement de la lagune par rapport à d'autres lagunes au niveau national et international.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail de recherche et vise à réaliser une évaluation environnementale de la lagune de Marchica et de son bassin versant dans le cadre des changements globaux actuels notamment la dernière décennie (2010 – 2020). Cette évaluation environnementale a été réalisée à travers la caractérisation de trois compartiments : Eau, Sédiment et Air ; et ce pour répondre aux indicateurs : « Qualité des eaux » ; « Qualité des Sédiments » ; et « Qualité de l'Air » de l'Observatoire Marchica.

*Pour ce faire, une convention de partenariat intitulée « **Projet Lag-Nad 2016** » a été signée en 2016 entre la **Faculté des Sciences de Rabat, le Département de l'Environnement / Laboratoire National des Etudes et de la Surveillance de la Pollution (LNEP), l'Institut National de la Recherche Halieutique (INRH) et le Centre National des Sciences et Techniques Nucléaires (CNESTEN)** afin d'établir une évaluation environnementale dans une vision stratégique de protection et de préservation de cet écosystème.*

REMERCIEMENTS

Après avoir obtenu mon Diplôme des Etudes Supérieures en Physique Nucléaire en 1996 à la Faculté des Sciences de Rabat, Université Mohamed V Maroc en collaboration avec le Commissariat d'Energie Atomique (CEA) Saclay, France ; j'ai intégré le Département de l'Environnement / Développement Durable du Maroc en 1997. Après une longue expérience professionnelle au sein de ce Département, et dans le cadre du projet Gestion Intégrée des Zones Côtières **GIZC FEM - Banque Mondiale** sur le Littoral Méditerranéen Oriental Marocain (2012 – 2017) et dans lequel j'ai été chargée Unité de Gestion de Projet (UGP Régionale), j'ai eu l'occasion de connaître **Professeur Maria Snoussi** qui a été chargée en tant qu'experte de la formation sur la GIZC aux parties prenantes de la région de l'Oriental. Elle m'a donné l'occasion d'enrichir mes connaissances sur les méthodes scientifiques des évaluations environnementales des écosystèmes en acceptant de m'inscrire en cycle doctoral au sein de son équipe, et ensuite au sein du laboratoire de recherche « Laboratoire de Géophysique et Risques Naturels (LGRN) ». Aucun mot ne peut exprimer mon profond remerciement et respect envers **Professeur Maria Snoussi** pour son aide, son encadrement, sa disponibilité et ses remarques pertinentes le long des années de thèse (2016 -2021) qui ont aboutis à la réalisation de ce travail de recherche.

Professeur Nadia Mhammdi, Directrice du **LGRN** au centre de recherche « Geophysics, Natural Patrimony and Green Chemistry (**GEOPAC**) », et Chef du Département Physique du Globe à l'Institut Scientifique de Rabat, a acceptée de m'inscrire en tant que nouvelle directrice de thèse durant les deux dernières années de ce travail de recherche. Je la remercie vivement pour sa disponibilité, son aide, ses conseils et son encadrement.

Professeur Hocein Bazairi, Département Biologie à la Faculté des Sciences de Rabat, co-directeur de thèse, m'a orienté le long de ce travail de recherche. Je le remercie vivement pour la validation des traitements statistiques, pour sa disponibilité et son encadrement. Ses conseils critiques ont permis d'enrichir ce travail de recherche.

Je remercie vivement tous les membres de jury d'avoir accepté d'examiner ce travail de recherche. Je remercie **Professeur Ali Azdimousa**, Doyen de la Faculté Pluridisciplinaire de Nador - Université Mohamed Premier - d'avoir accepté de présider le jury de ce travail de recherche. Je remercie les rapporteurs de ce travail : **Professeur Laarbi Boudad**, Chef de Département Géologie à la Faculté des Sciences de Rabat - Université Mohamed V - ; **Professeur Abdelaziz Benhousa**, Directeur du laboratoire Biodiversité, Ecologie et Génome à la Faculté des Sciences de Rabat - Université Mohamed V - ; et **Professeur Mohamed Maanan**, Maître de conférences à l'Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes (IGARUN).

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements aux responsables partenaires du projet « **Lag-Nad 2016** » qui ont permis la réalisation des analyses nécessaires pour la caractérisation des compartiments Eau, Sédiment et Air : **M. le Secrétaire Général Mohamed Benyahia** du Département du Développement Durable ; **M.s les doyens Professeur Mourad El Belkacemi et Professeur Mohammed Regragui** de la Faculté des Sciences de Rabat ; **M. Khalid Mediouri Directeur Générale** du CNESTEN ; et **M. Abdelmalek Faraj Directeur Général** de l'INRH.

Du LNESE, je remercie **Dr Mohammed El Bouch**, Directeur du Laboratoire National des Etudes et de la Surveillance de la Pollution, **M. Abdesslam Abid** chef de Service Analyse de la pollution des eaux et déchets, **M. Hassan Ouahiddi** chef de Service Analyse des micropolluants, **M. Mohammed El Kabriti** chercheur au sein du LNESE, **M. Abdelfattah Bensaber** et **M. Sliman Hssaissoune** pour la validation du réseau d'échantillonnage au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica et pour leur appui à la réalisation des analyses des nutriments dans les eaux superficielles et les analyses des éléments traces métalliques dans les sédiments superficiels. Je remercie **M. Radouan Jkhakha** pour le transport des échantillons de Nador vers les laboratoires du CNESTEN, du LNESE et de la Faculté des Sciences de Rabat.

De l'INRH/Centre Régional Nador, je remercie l'ancien et le nouveau Directeur du Centre Régional Nador : **M. Abdelhakim El Mesfoui** et **Dr Najib El Ouamari** pour la mise à disposition des moyens nécessaires à la réalisation de ce travail à savoir le Zodiac pneumatique et le plongeur pour la réalisation des missions en mer ainsi que les prélèvements des échantillons de l'eau et des sédiments et leurs prétraitements au laboratoire de Surveillance et de Suivi du Milieu Marin (LSSMM) pour analyses ultérieures. Je remercie vivement **Dr Mostafa Layachi**, Ex chef du Laboratoire LSSMM durant la période 2010-2019, et actuellement Chargé de Recherche pour son aide, son encadrement, sa disponibilité, ses orientations scientifiques et pour la validation du réseau et de la stratégie d'échantillonnage au niveau de la lagune. Je remercie le plongeur **M. Ahmed Chihani** pour sa participation aux missions d'échantillonnage au niveau de la lagune de Marchica. Je remercie aussi **Dr. Faïd ElMadani**, chargé du Laboratoire LSSMM et le personnel de ce laboratoire **M.s Yahya Azzaoui** et **Chafiq Lahcen** pour leur aide et soutien.

Du CNESTEN, je remercie **Dr Moussa Bounakhla**, chef de Division Sciences de la Terre et de l'Environnement et **Dr Mounia Tahri**, chef de Service Géochimie et Pollution Chimique pour leur disponibilité, leur encadrement, leurs remarques constructives et pour l'appui à la réalisation des analyses des éléments traces métalliques dans l'eau, les analyses des éléments majeurs dans l'eau et dans les sédiments ainsi que les analyses de l'air. Je remercie **Dr Abdelfettah Benchrif** chercheur au sein du Service Géochimie et Pollution Chimique pour son appui apporté depuis le début de ce travail de recherche, notamment aux missions d'échantillonnage de l'air et sa contribution aux traitements des données de la qualité de l'air.

Mes vifs remerciements au **Professeur Mohamed Maanan**, Maître de conférences à l'Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes (IGARUN) et au **Dr Souilem Boutoumit** d'avoir apporté l'appui nécessaire à la réalisation des analyses granulométriques et des analyses du carbone organique total.

Je remercie les autorités locales de la zone d'influence de la lagune de Marchica pour leur appui aux missions d'échantillonnages en particulier **M. Ali Khalil Gouverneur de la Province de Nador**. Je remercie également **M. Abdeslam Bourjila** chef de Service Environnement et les représentants des communes de la zone d'étude qui nous ont accompagné lors des missions de terrain notamment **Dr Mimoun Bahkan** Directeur de la commune de Kariat Arekmane, **M. Abdelhak Tifafi** ingénieur municipal à la commune de Kariat Arekmane et **M. Allal Kaychouh** ingénieur municipal à la commune de Béni Ensar.

Je remercie **M. Said Zarou** Directeur Général de l'Agence pour l'Aménagement du site de la Lagune de Marchica et son équipe **M. Abbas El Kadi** Chargé de la Gestion du site de la lagune de Marchica et **Mme Khadija Outlmit** chef de Service Travaux Hydrauliques et Maritimes pour la mise à disposition de ce travail de recherche les études réalisées sur le site de la Marchica.

Mes vifs remerciements au **Professeur Abdelhafid Chafi**, Directeur de l'Ecole Supérieur de Technologie (EST) Oujda pour ses encouragements et ses précieux conseils.

Mes vifs remerciements au **Professeur Mustapha Akodad**, chef de Département Biologie - Géologie et Directeur du Laboratoire de Biologie, Géoscience, Physique et Environnement (LBGPE) à la Faculté Pluridisciplinaire de Nador pour ses encouragements et ses précieux conseils et pour les échanges scientifiques pertinents entre l'Observatoire Marchica et le laboratoire **OLMAN- RL** de la Faculté Pluridisciplinaire de Nador, Université Mohamed Premier.

Je remercie **Professeur Rachid Bouchnan** de l'Ecole Normale Supérieur de Tétouan, Université Abdelmalek Essaadi, pour les séances de travail tenus à l'Observatoire Marchica concernant les aspects hydrogéologiques et pour son aide au déplacement du matériel de mesure de la qualité de l'air.

Je remercie **M. Said Drif** Délégué Provincial du Tourisme, **M. Mohammed Malal** ingénieur à l'ORMVAM et **M. Abdellah Khallaf** chef de Service Industrie à la Délégation du Commerce et d'Industrie de Nador pour l'actualisation des indicateurs concernant les aspects socio-économiques autour de la lagune de Marchica.

Je remercie **M. Aziz Saidi**, Directeur Provincial de l'Equipement et Eau de Nador et **M. Mohammed Ben Abbou**, Chef du Service J.P pour l'appui apporté lors de l'installation du matériel de la qualité de l'air au niveau de la terrasse de cette direction.

Je remercie mes collègues du laboratoire **LGRN : Doctorante Rajae Aitali** et **Dr Otmane Khalfaoui** pour leur aide et soutien durant les années de travail de thèse.

Enfin, je remercie mon mari **Dr Abdelhakim Amaioua** et mes fils **Adel** et **Ilias** pour leur patience et leur appui durant les années de ce travail de recherche. Je remercie vivement **mon père** pour son soutien et ses encouragements. Je remercie **ma mère** qui m'a toujours encouragé à terminer mes études et je dédie ce travail à sa mémoire. Je remercie **mes frères, mes sœurs** et **leurs familles ; mes collègues et mes amis** (e) qui m'ont apporté leur soutien lors de la réalisation de ce travail. Mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche.

RESUME

L'évaluation environnementale des écosystèmes constitue un instrument de gouvernance permettant d'orienter vers la prise de décision et vers la planification du développement durable. L'objectif principal de ce travail de recherche consistait à réaliser une évaluation environnementale intégrée de la lagune de Marchica et de son bassin versant dans le cadre des changements globaux actuels et ce à travers la caractérisation des compartiments : Eau, Sédiment et Air durant la période 2016 - 2018.

La caractérisation des éléments majeurs et traces des eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant la période 2017 - 2018 avec une fréquence de deux campagnes saisonnières par an a montré que les concentrations moyennes annuelles en Pb, Cd, Cr, Zn, Mn et Cu ont été inférieures aux normes de l'USEPA 2016. Tandis que les concentrations moyennes en Ni et Cu étaient plus élevées que ces normes. Une forte amélioration de l'oxygène dissous des eaux superficielles de la lagune a été enregistrée durant les quatre campagnes (humides et sèches) des années 2017 et 2018 par rapport à l'état environnemental avant la restauration à l'exception de la station recevant les rejets de la STEP du Grand Nador. La caractérisation des nutriments des eaux superficielles de la lagune réalisée durant l'année 2017 avec une fréquence de deux campagnes saisonnières par an a montré une nette amélioration des nitrates et des orthophosphates par rapport à l'état environnemental de la lagune avant la restauration à l'exception de la zone recevant les rejets de la STEP du Grand Nador. Quant aux concentrations de l'ammonium, des valeurs élevées ont été enregistrées durant la saison sèche par rapport à la saison humide durant l'année 2017 au niveau de la lagune. Les résultats au niveau du bassin versant ont montré que l'état des oueds varie entre très mauvaise et excellente qualité pour l'orthophosphate, entre mauvaise et excellente qualité pour l'ammonium, entre bonne et excellente qualité pour les nitrates et entre moyenne et excellente qualité pour les éléments traces métalliques.

La caractérisation des sédiments superficiels au niveau de la lagune et de son bassin versant a été réalisée pendant deux campagnes saisonnières durant l'année 2018 à travers l'évaluation du risque écotoxicologique et l'analyse multivariée des éléments traces métalliques. Elle a révélé une contamination des sédiments superficiels de la lagune par le plomb, le cuivre et le zinc, et de même une contamination des sédiments superficiels des oueds par le plomb, le cuivre et le zinc avec des pics au niveau de la zone nord-ouest du bassin versant et l'oued traversant la mine de fer abandonnée. La comparaison des indices écotoxicologiques saisonniers (FE, Igeo, FC et PLI) des sédiments et les corrélations eaux - sédiments entre la lagune de Marchica et son bassin versant ont montré une tendance de variation presque similaire entre ces deux écosystèmes et un impact saisonnier du bassin versant concernant les apports en éléments traces métalliques vers la lagune de Marchica.

La caractérisation de la qualité de l'air à travers les polluants gazeux durant deux campagnes au cours des années 2016 et 2017 et à travers les particules PM₁₀, PM_{2,5}, leur composition chimique et le carbone suie durant une campagne en juillet 2018 a été réalisée en se basant sur la comparaison des résultats avec les normes nationales. Les concentrations de polluants gazeux étaient inférieures aux valeurs limites nationales de protection de la santé. La caractérisation des PM_{2,5} et PM₁₀ a montré un enrichissement modéré en Ni, Cr, P, Ca, Cu et Pb et un enrichissement fort en Zn. La variation du carbone suie dans les particules fines a indiqué que la contribution de la combustion de la biomasse était significative par rapport aux combustibles fossiles.

L'analyse SWOT a montré que les efforts réalisés dans le cadre de la gestion du site de la lagune de Marchica à travers des actions de restauration durant la dernière décennie ont permis d'améliorer la gestion des eaux usées et la gestion des déchets solides. Toutefois, la lagune est toujours soumise aux impacts négatifs de son bassin versant à travers les oueds notamment la pollution par les nutriments et la pollution chimique. L'analyse SWOT a permis de conclure que le développement durable de la lagune de Marchica nécessite la prise en considération de la protection environnementale de sa zone d'influence dans le cadre d'une approche GIZC.

Mots clés : Lagune de Marchica, Bassin versant, Evaluation environnementale, Eaux superficielles, Sédiments superficiels, Air, Analyse SWOT, GIZC.

ABSTRACT

The environmental assessment of ecosystems constitutes a governance tool to guide decision-making and planning for sustainable development. The main objective of this research work was to conduct an integrated environmental assessment of the Marchica lagoon ecosystem and its watershed in the context of current global changes and this through the characterization of the compartments Water, Sediment and Air during the period 2016-2018.

The characterization of major and trace elements in the surface waters of Marchica lagoon and its watershed during the period 2017 - 2018 with a frequency of two seasonal campaigns per year showed that the annual average concentrations of Pb, Cd, Cr, Zn, Mn and Cr were below the USEPA 2016 standards. While average concentrations of Ni and Cu were higher than these standards. A strong improvement in dissolved oxygen of the lagoon surface waters was recorded during the four campaigns (wet and dry) of the years 2017 and 2018 compared to the environmental state before the restoration with the exception of the station receiving the discharges of the Grand Nador WWTP. The characterization of nutrients in surface waters of the lagoon conducted during the year 2017 with a frequency of two seasonal campaigns per year showed a clear improvement in nitrates and orthophosphates compared to the environmental state of the lagoon before the restoration with the exception of the station receiving the discharges of the Grand Nador WWTP. As for ammonium concentrations, high values were recorded during the dry season compared to the wet season during 2017 at the lagoon. The results at the watershed level showed that the state of the wadis varies between very poor and excellent quality for orthophosphate, between poor and excellent quality for ammonium, between good and excellent quality for nitrates and between average and excellent quality for trace metals.

The characterization of surface sediments at the level of the lagoon and its watershed was conducted during two seasonal campaigns during 2018 through the ecotoxicological risk assessment and multivariate analysis of trace metal elements. It revealed a contamination of surface sediments of the lagoon by lead, copper and zinc, and also a contamination of surface sediments of wadis by lead, copper and zinc with peaks at the level of the north-western area of the watershed and the wadi crossing the abandoned iron mine. The comparison of seasonal eco-toxicological indices (FE, Igeo, FC and PLI) of the sediments and the water-sediment correlations between the Marchica lagoon and its watershed showed an almost similar variation trend between these two ecosystems and a seasonal impact of the watershed concerning the inputs of trace metal elements to the Marchica lagoon.

The characterization of air quality during two campaigns during the years 2016 and 2017 through gaseous pollutants and a campaign during the year 2018 through PM₁₀, PM_{2.5}, their chemical composition and black carbon was conducted by comparing the results with the national standards. The concentrations of gaseous pollutants were below the national health protection limit values. The characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} showed moderate enrichment of Ni, Cr, P, Ca, Cu and Pb and strong enrichment of Zn. The variation of black carbon in fine particles indicated that the contribution of biomass combustion was significant compared to fossil fuels.

The SWOT analysis showed that the efforts made in the management of the Marchica lagoon through restoration actions during the last decade have improved the management of wastewater and solid waste management. However, the lagoon continues to be subject to the negative impacts of its watershed through the wadis, particularly nutrient and chemical pollution. The SWOT analysis led to conclude that the sustainable development of the Marchica lagoon requires the consideration of the environmental protection of its area of influence within the context of an ICZM approach.

Keywords: Marchica Lagoon, Watershed, Environmental assessment, Water, Sediment, Air, SWOT analysis, ICZM.

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Articles publiés dans le cadre de ce travail de recherche :

- ❖ **Oujidi, B.**, Tahri, M., Layachi, M., Abid, A., Bouchnan, R., Selfati, M., Bounakhla, M., El Bouch, M., Maanan, M., Bazairi, H., & Snoussi, M. (2020). Effects of the Watershed on the Seasonal Variation of the Surface Water Quality of a Post-Restoration Coastal Wetland: The case of the Nador Lagoon (Mediterranean Sea, Morocco). *Regional Studies in Marine Science*, 35, (2020) 101127 <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101127> (Chapitre III).
- ❖ **Oujidi, B.**; El Bouch, M.; Tahri, M.; Layachi, M.; Boutoumit, S.; Bouchnan, R.; Ouahidi, H.; Bounakhla, M.; El Ouamari, N.; Maanan, M.; Bazairi, H., Mhammdi, N & Snoussi, M. (2021). Seasonal and Spatial Patterns of Ecotoxicological Indices of Trace Elements in Superficial Sediments of the Marchica Lagoon following Restoration Actions during the Last Decade. *Diversity* (2021), 13, 51. <https://doi.org/10.3390/d13020051> (Chapitre IV).
- ❖ **Oujidi, B.**, Kabriti, M., Tahri, M., Bensaber, A., Benchrif, A., Layachi, M., Maanan, M., Bazairi, H., Mhammdi, N & Snoussi, M. Assessment of the Coastal Marchica Watershed through Ecotoxicological Indices of Trace Elements in Superficial Sediments (2021). In *E3S Web of Conferences* (Vol. 298, p. 03001). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129803001> (Chapitre V).

Articles qui feront objet de publication dans le cadre de ce travail de recherche :

- ❖ Seasonal Impact of the Watershed on Marchica Lagoon and Water-Sediment Correlations. (Chapitre VI).
- ❖ First Air Quality Characterization of Nador city: Gaseous Pollutants, Ambient Particulate Matter, Chemical Composition and Black Carbon. (Chapitre VII).
- ❖ SWOT Analysis for Sustainable Development planning within the framework of the Integrated Coastal Zone Management of the Marchica Lagoon Ecosystem and its Watershed. (Chapitre VIII).

LISTE DES FIGURES

Figure I-1 : Situation géographique de la lagune de Marchica et son bassin versant.	10
Figure I-2 : Bathymétrie de la Lagune de Marchica (INRH/ANDA, 2018).	11
Figure I-3 : Principal réseau hydrographique du bassin versant de la lagune de Marchica.	12
Figure I-4 : Carte piézométrique de la nappe phréatique de Bouarg (El Mandour et al., 2008).	13
Figure I-5 : Variation de la température de l'air à la station de Mellila (Période 1990 – 2020 ; http://www.tutiempo.net/).....	14
Figure I-6 : Variation de la pluviométrie (Période 1990 – 2020 ; http://www.tutiempo.net/).	15
Figure I-7 : Variation de la vitesse du vent moyen et du vent maximal (Période 1990 – 2020 ; http://www.tutiempo.net/).....	16
Figure I-8 : Rose des vents au niveau de l'aéroport Nador (Période 2016-2017 ; Maicu et al. (2021))	16
Figure I-9 : Variation de l'humidité relative (Période 1990 – 2020 ; http://www.tutiempo.net/).....	17
Figure I-10 : Carte géologique de la zone d'études (in Azougay, 2020).	18
Figure I-11 : Cités touristiques autour de la lagune de Marchica (http://agencemarchica.gov.ma/)....	21
Figure I-12 : Variation des nuitées touristiques à Nador (https://www.hcp.ma/region-oriental/).....	21
Figure I-13 : Sites de pêche au sein de la lagune de Marchica (in Najih et al., 2015).	22
Figure I-14 : Les trois sites miniers de fer abandonnés à la commune Iksane, province Nador (in Khafouri et Talbi., 2020).	23
Figure I-15 : PAS Marchica (Département de l'Environnement, 2016c).	24
Figure I-16 : Photo illustrant l'ouverture d'une nouvelle passe entre la mer Méditerranée et la lagune de Nador et fermeture de l'ancienne passe (http://agencemarchica.gov.ma/).	25
Figure I-17 : Circulation des eaux de la lagune de Nador (Maicu et al., 2021).	25
Figure I-18 : Photos illustrant l'état de pollution des eaux de la lagune de Marchica avant la dépollution. (http://agencemarchica.gov.ma/).	27
Figure I-19 : Photos montrant les travaux de dépollution des eaux de la lagune de Marchica. (http://agencemarchica.gov.ma/).....	27
Figure I-20 : Photos illustrant l'état après les travaux de dépollution des eaux de la lagune de Marchica. (http://agencemarchica.gov.ma/).	28
Figure I-21 : Photos du parc ornithologique au niveau de la lagune de Marchica. (http://agencemarchica.gov.ma/).....	29
Figure I-22 : Installation des biohuts au niveau du port de plaisance d'Atalayoune, lagune de Marchica (Fondation Mohammed VI pour la protection de l'Environnement, 2014).	30
Figure I-23 : Ferme pilote d'algoculture au sein de la lagune de Marchica (https://www.anda.gov.ma/fr/aquaculture-sociale).....	31
Figure I-24 : Immersion des récifs artificiels au niveau de la lagune de Marchica (http://agencemarchica.gov.ma/).....	32
Figure I-25 : Schéma de la restauration écologique de la lagune de Marchica durant la dernière décennie.	35
Figure II-1 : Schéma organisationnel de l'évaluation environnementale de la lagune de Marchica et son bassin versant.	39
Figure II-2 : Carte illustrant le réseau d'échantillonnage au niveau de la lagune de Marchica et son Bassin Versant.....	43
Figure II-3 : Echelle adoptée par GRADISTAT Program (modifié à partir de Udden (1914) et Wentworth).....	46
Figure II-4 : Localisation du site d'échantillonnage de l'air (DPETLE) au niveau de la ville de Nador.....	49
Figure III-1 : Location of the study area (lagoon and its watershed).	67
Figure III-2 : a Stations projection on the principal components during the wet season, b Trace metals projection on the principal components during the wet season, c Zonation of the lagoon during the wet season.	74
Figure III-3 : a Stations projection on the principal components during the dry season, b Trace metals projection on the principal components during the dry season, c Zonation of the lagoon during the dry season.	75

Figure IV-1: Map of Marchica Lagoon (S, sample station; G, group station).	88
Figure IV-2: Dendrogram showing the cluster pattern during wet and dry seasons (WS, wet station and DS, dry station) of the geochemical parameters, granulometry, and TOC, on the basis of similarity.	97
Figure IV-3: Principal component analysis (PCA) of the wet and dry seasons (WS, wet station and DS, dry station) for the geochemical parameters, granulometry, and TOC.	98
Figure IV-4: Wet and dry enrichment factor (EF): (a) EF of Pb; (b) EF of Zn; and (c) EF of Cu.	102
Figure IV-5: Wet and dry geoaccumulation index (Igeo): (a) Igeo of Pb; (b) Igeo of Zn; and (c) Igeo of Cu.	103
Figure IV-6: Wet and dry contamination factor (CF): (a) CF of Pb; (b) CF of Zn; and (c) CF of Cu.	104
Figure IV-7: Wet and dry pollution-load index (PLI).	105
Figure IV-8: Wet and dry biological-risk index (m-ERM-Q).	106
Figure V-1 : Description de la zone d'influence de la lagune de Marchica.	118
Figure V-2: Dendrogramme montrant les clusters (WS, station humide et DS, station sèche) des paramètres géochimiques, granulométriques et carbone organique total, sur la base de la similarité.	123
Figure V-3: Analyse en composantes principales (ACP) des paramètres géochimiques, la granulométrie et le carbone organique total (TOC) durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 (WW, Station Humide et DW, Station Sèche).	124
Figure V-4 : Variation du facteur d'enrichissement durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 au niveau	126
Figure V-5 : Variation de l'indice de géoaccumulation durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica.	127
Figure V-6 : Variation du facteur de contamination durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018.	128
Figure V-7 : Variation de l'indice de charge de pollution (PLI) durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica.	129
Figure VI-1: Réseau d'échantillonnage au niveau de la lagune de Marchica et son bassin versant.	135
Figure VI-2: Comparaison des facteurs d'enrichissement entre la lagune de Marchica et son bassin versant durant l'année 2018.	139
Figure VI-3: Comparaison des indices de géoaccumulation entre la lagune de Marchica et son bassin versant durant l'année 2018.	140
Figure VI-4: Comparaison des facteurs de contamination entre la lagune de Marchica et son bassin versant durant l'année 2018.	141
Figure VI-5: Comparaison des indices de charge de pollution entre la lagune de Marchica et son bassin versant durant l'année 2018.	142
Figure VI-6: Variation de la granulométrie des sédiments superficiels de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant la saison humide de l'année 2018.	143
Figure VI-7 : Variation de la granulométrie des sédiments superficiels de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant la saison sèche de l'année 2018.	143
Figure VI-8 : Variation du COT des sédiments superficiels de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant.	144
Figure VI-9 : Variation des concentrations moyennes annuelles de l'Oxygène Dissous dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	145
Figure VI-10 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Plomb dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	145
Figure VI-11 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Cadmium dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	146

Figure VI-12 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Nickel dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	146
Figure VI-13 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Chrome dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	147
Figure VI-14 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Cuivre dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	147
Figure VI-15 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Zinc dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	148
Figure VI-16 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Cobalt dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	148
Figure VI-17 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Strontium dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	149
Figure VI-18 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Vanadium dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2017. .	149
Figure VI-19 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Fer dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	150
Figure VI-20 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Manganèse dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	150
Figure VI-21 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Titium dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.	151
Figure VI-22: Dendrogramme issue de la classification automatique hiérarchique illustrant les stations de la saison humide (SH) et de la saison sèche (SS) de la lagune de Marchica et du bassin versant (WH et WS) durant l'année 2018 vis-à-vis des concentrations des ETM dans les eaux et sédiments.	153
Figure VII-1: Schéma montrant les sources de polluants atmosphériques (in Vaslin-Reimann, 2019).	161
Figure VII-2: Situation du site d'échantillonnage (DPETLE) au niveau de la ville de Nador.	163
Figure VII-3: Variation du dioxyde d'azote et d'ozone au niveau de la ville de Nador durant les campagnes de 2016 et 2017.	165
Figure VII-4: Variation du monoxyde de carbone au niveau de la ville de Nador durant les campagnes de 2016 et 2017.	166
Figure VII-5: Variation des particules PM ₁₀ et les conditions climatiques (Température, Vitesse du vent et Humidité Relative) au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.	167
Figure VII-6: Variation des particules PM _{2,5} et les conditions climatiques (Température, Vitesse du vent et Humidité Relative) au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.	168
Figure VII-7: Variation du rapport PM _{2,5} /PM ₁₀ au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.	168
Figure VII-8: Concentrations moyennes des éléments dans les particules PM ₁₀ et PM _{2,5} au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.	170
Figure VII-9: Variation des facteurs d'enrichissements des PM ₁₀ and PM _{2,5}	170
Figure VII-10: a) Biomass Black Carbon (BBC) au niveau de la ville de Nador ; b) Fossil Black Carbon (FBC) au niveau de la ville de Nador ; c) Comparaison entre BBC et FBC dans les PM _{2,5} au niveau de la ville de Nador. ...	171
Figure VIII-1 : Axes stratégiques du Plan National du Littoral (PNL) au Maroc (Département de l'Environnement, 2019b).	183

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Comparaison des analyses des eaux lagunaires avant et après l'ouverture de la passe selon les normes en vigueur.	26
Tableau I-2 : STEPs au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica (Département de l'Environnement, 2019a).	33
Tableau I-3 : Quantités de déchets ménagers collectés au niveau du bassin versant de la Marchica en 2018 (Source : Etablissement Intercommunale du Grand Nador 2018).	34
Tableau II-1 : Réseau d'échantillonnage des compartiments Eau - Sédiment au niveau de la lagune de Marchica et son Bassin Versant.	44
Tableau II-2 : Méthodes d'analyses standardisées et référencées du compartiment Eau au niveau de la lagune et son bassin versant.	47
Tableau II-3 : Méthodes d'analyses standardisées et référencées du compartiment Sédiment au niveau de la lagune et son bassin versant.	48
Tableau II-4 : Méthodes et techniques utilisées pour la mesure des polluants gazeux au niveau de la ville de Nador.	51
Tableau II-5 : Méthodes et techniques utilisées pour la mesure des particules en suspension et du carbone suie au niveau de la ville de Nador.	52
Tableau II-6 : Classification des niveaux de pollution des sédiments selon des intervalles de valeurs du facteur d'enrichissement facteur (FE) (Sutherland, 2000).	54
Tableau II-7 : Classification des niveaux de pollution de l'air selon des intervalles de valeurs du facteur d'enrichissement (FE) (Das et al., 2015).	55
Tableau II-8 : Classification des niveaux de pollution selon des intervalles de valeurs de l'indice de géoaccumulation (Müller, 1981 ; Müller, 1979).	55
Tableau II-9 : Classification des niveaux de pollution selon des intervalles de valeurs de facteur de contamination (Hakanson, 1980).	56
Tableau II-10 : Classification des niveaux de pollution selon des intervalles de valeurs de pollution load index (Tomlinson et al., 1980).	56
Tableau II-11 : Classification du degré de toxicité selon des intervalles de valeurs du Quotient moyen des valeurs seuils (Long et al., 2000 ; Long et al., 1998).	57
Table III-1: Key of Figures III-1, III-2 and III-3 (Sampling network at the lagoon and its watershed).	68
Table III-2: Detection Limits (DL) of the various elements analyzed.	69
Table III-3: Physico-chemical parameters concentrations in the Marchica Lagoon and in water samples of wadis (W) and WWTP1 (W*) during wet and dry seasons of 2017.	70
Table III-4: Trace metals and nutrients parameters concentrations in Marchica Lagoon (Minimum, Maximum and Mean $\pm$ Standard Deviation) and in water samples of wadis (W) and WWTP1 (W*) during wet and dry seasons of 2017.	76
Table III-5: Comparison with national regulation (mean 2017) at watershed.	77
Table III-6: Comparison of trace metals in water lagoon during PSR (mean $\pm$ standard deviation) with studies during PRR, with other lagoons in the Mediterranean region and with guidelines.	78
Table IV-1: Metal pollution index and descriptions.	92
Table IV-2: Physicochemical parameters of the surface waters in the lagoon during the wet and dry seasons.	93
Table IV-3: Seasonal and spatial concentrations of the grain size fractions (%), total organic carbon (TOC; %), major elements (%), and trace elements (mg/kg).	95
Table IV-4: Spearman's correlation coefficients of the major and trace elements, grain size fractions, and TOC in sediment and the physicochemical parameters of the surface waters in Marchica Lagoon.	99
Table IV-5: Comparison of the trace element concentrations with background values and guidelines.	107

Table IV-6: Comparison of the minimum and maximum trace elements (mg/kg) in sediment of Marchica Lagoon with previous studies and with others lagoons in the Mediterranean Sea.....	111
Tableau V-1 : Concentrations saisonnières et spatiales des fractions granulométriques (%), du carbone organique total (TOC ; %), des éléments majeurs (%) et des ETM (mg/kg) durant l'année 2018.	122
Tableau V-2 : Comparaison des concentrations en ETM avec les valeurs guides et backgrounds. ..	129
Tableau VI-1: Facteurs d'enrichissement en ETM des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2018.....	136
Tableau VI-2: Indices de géoaccumulation des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2018.	137
Tableau VI-3: Facteurs de contamination des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2018.	137
Tableau VI-4: Indice de charge de pollution des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2018.	138
Tableau VI-5: Concentrations moyennes des ETM au niveau des eaux superficielles de la lagune de Marchica durant l'année 2018.	151
Tableau VI-6: Concentrations moyennes des ETM au niveau des eaux superficielles du bassin versant de la lagune de Marchica durant l'année 2018.	152
Tableau VII-1: Analyse descriptive des polluants gazeux dans l'air de la ville de Nador durant les deux premières campagnes.....	164
Tableau VII-2: Analyse descriptive des particules en suspension (PM ₁₀ , PM _{2,5}) dans l'air de la ville de Nador durant la troisième campagne.	167
Tableau VII-3: Les compositions élémentaires des concentrations massiques des PM ₁₀ et PM _{2,5} au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.....	169
Tableau VII-4: Comparaison des concentrations moyennes des PM _{2,5} (µg/m ³), de leurs concentrations en ETM (ng/m ³) et du carbone suie (µg/m ³) dans la ville de Nador avec d'autres localités au Maroc et au niveau du bassin méditerranéen.....	174
Tableau VII-5: Comparaison des rapports élémentaires de la ville de Nador avec d'autres études. .	175
Tableau VII-6: Excess Cancer Risk des éléments traces cancérigènes dans la ville de Nador.	176
Tableau VIII-1: Projet MedWetCoast sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc.	184
Tableau VIII-2: Projet SMAPIII sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc.....	185
Tableau VIII-3: Projet ACCMA sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc.....	186
Tableau VIII-4: Projet appui à la mise en œuvre d'un plan global de dépollution et de protection de la lagune de Nador sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc.	187
Tableau VIII-5: Projet GIZC/ FEM – Banque Mondiale sur le Littoral Méditerranéen Oriental du Maroc.....	188
Tableau VIII-6: Analyse SWOT de l'écosystème lagune de Marchica et sa zone d'influence (Atouts et Faiblesses).....	190
Tableau VIII-7: Analyse SWOT de l'écosystème lagune de Marchica et sa zone d'influence (Opportunités et Menaces).....	191

LISTE DES ACRONYMES

ABHM	Agence du Bassin Hydraulique Moulouya
ACCMMA	Adaptation au Changement Climatique au Maroc
ADA	Agence de Développement Agricole
ANDA	Agence Nationale de Développement d'Aquaculture
CAR/PAP	Programme d'Actions Prioritaires du Plan d'Action pour la Méditerranée des Nations Unies, Centre Régional d'Activité de Split
DMN	Direction de la Météorologie Nationale
ECOCEAN	Société Française Innovante, Leader de la Filière de l'Ingénierie Ecologique en Milieu Marin
ETM	Eléments Traces Métalliques
ENFI	Ecole Nationale Forestière des Ingénieurs
EUCC	Coastal & Marine Union
ERL	Effect Range Low
ERM	Effect Range Medium
FEM -BM	Fonds pour l'Environnement Mondial - Banque Mondiale
FFEM	Fonds Français pour l'Environnement Mondial
FUED	Forum d'Urbanisme d'Environnement et de Développement, ONG Maroc
HCP	Haut Commissariat au Plan
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
GIEC	Groupe International des Experts du Climat
GIZC	Gestion Intégrée des Zones Cotières
LD ou DL	Limite de détection ou Detection Limit
LMO	Littoral Méditerranéen Oriental
MATEE	Ministère d'Aménagement de Territoire, de l'Eau et de l'Environnement
MEDPOL	Programme de surveillance de la pollution tellurique en Méditerranée
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
PAM	Plan d'Action pour la Méditerranée
PEL	Probable Effect Level
TEL	Threshold Effect Level
ONP	Office National des Ports
ORMVAM	Office Régional de Mise en Valeur Agricole Moulouya
SRAT	Schéma Régional d'Aménagement de Territoire
STEP	Station de traitement des eaux usées
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats
UICN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature
USEPA	U.S. Environmental Protection Agency
USEPA / IRIS	U.S. Environmental Protection Agency / Integrated Risk Information System
WHO/OMS	World Health Organization / Organisation Mondiale de la Santé
WWTP	Wastewater treatment plant

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
I. Contexte de l'étude.....	2
II. Objectifs et plan de thèse.....	6
CHAPITRE I : PRESENTATION GENERALE DE LA LAGUNE DE MARCHICA ET DE SON BASSIN VERSANT	9
I. Introduction.....	10
II. Situation géographique de la zone d'étude.....	10
III. Contexte géomorphologique et hydrologique.....	11
III.1. Géomorphologie et hydrologie de la lagune de Marchica	11
III.2. Géomorphologie et hydrologie de la zone d'influence de la lagune de Marchica ..	12
IV. Aspects climatologiques.....	13
IV.1. Température de l'air	13
IV.2. Pluviométrie.....	15
IV.3. Vent.....	15
IV.4. Humidité Relative	17
V. Aspects géologiques du bassin versant de la lagune de Marchica	17
VI. Contexte écologique et biodiversité de la lagune de Marchica.....	18
VII. Contexte socio-économique du bassin versant de la lagune de Marchica	19
VII.1. Démographie	19
VII.2. Urbanisme	19
VII.3. Industrie.....	19
VII.4. Mines	20
VII.5. Tourisme.....	20
VII.6. Pêche	21
VII.7. Agriculture.....	22
VIII. Contraintes et pressions sur la lagune de Marchica.....	23
IX. Aménagement et restauration de la lagune de Marchica.....	24
IX.1. Ouverture d'une nouvelle passe entre la lagune de Marchica et la mer Méditerranée.....	24
IX.2. Dépollution des eaux de la lagune de Marchica	26
IX.3. Plages autour de la lagune de Marchica.....	28
IX.4. Création du parc ornithologique	28
IX.5. Installation des Biohuts dans la marina d'Atalayoun	29
IX.6. Mise en place d'une ferme pilote d'algoculture dans la lagune de Marchica	30
IX.7. Installation des récifs artificiels	31
IX.8. Assainissement liquide	32
IX.9. Déchets solides	33
X. Conclusion.....	34
CHAPITRE II : APPROCHES METHODOLOGIQUES.....	37
I. Introduction.....	40
II. Stratégie d'échantillonnage des compartiments Eau -Sédiment au niveau de la lagune et son bassin versant.....	41
II.1. Protocole d'échantillonnage dans la lagune de Marchica.....	41
II.2. Protocole d'échantillonnage au niveau du bassin versant	41
II.3. Identification du réseau d'échantillonnage lagune -bassin versant	42
III. Prélèvement des compartiments Eau - Sédiment au niveau de la lagune et son bassin versant.....	45

IV. Analyses des compartiments Eau - Sédiment au niveau de la lagune et son bassin versant.....	45
IV.1. Paramètres physico-chimiques	45
IV.2. Nutriments dans les eaux superficielles.....	45
IV.3. Eléments Traces Métalliques (ETM) et éléments majeurs dans les eaux superficielles.....	46
IV.4. ETM et éléments majeurs dans les sédiments superficiels.....	46
IV.5. Carbone organique total dans les sédiments superficiels.....	46
IV.6. Granulométrie des sédiments superficiels	46
V. Suivi de la qualité de l’Air.....	48
V.1. Site d’échantillonnage	48
V.2. Analyse de la qualité de l’air	49
VI. Analyses statistiques et géomatiques.....	53
VII.Indices d’évaluation des risques écologiques des compartiments Sédiment et Air.....	53
VII.1. Facteur d’enrichissement.....	54
VII.2. Indice de géoaccumulation	55
VII.3. Facteur de contamination	55
VII.4. Indice de charge de pollution (PLI).....	56
VII.5. Quotient moyen des valeurs seuils	56
VIII. Normes de qualité des compartiments Sédiment, Eau et Air.....	57
VIII.1. Valeurs Guides Sédimentaires (SQGs)	57
VIII.2. Normes de qualité des eaux superficielles.....	57
VIII.3. Normes de qualité de l’air	58
IX. Conclusion.....	58
CHAPITRE III : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE LA QUALITE DES EAUX SUPERFICIELLES DE LA LAGUNE DE MARCHICA ET SON BASSIN VERSANT.....	59
I. Introduction.....	64
II. Materials and Methods.....	66
II.1. Site description	66
II.2. Sampling network.....	67
II.3. Analysis methods.....	68
II.4. Statistical methods	69
III. Results and Discussion.....	69
III.1. Results.....	69
III.2. Discussion.....	71
IV. Conclusion.....	79
CHAPITRE IV : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE LA QUALITE DES SEDIMENTS SUPERFICIELS DE LA LAGUNE DE MARCHICA.....	81
I. Introduction.....	86
II. Materials and Methods.....	87
II.1. Site Description	87
II.2. Environmental Sampling	88
II.3. Analysis Methods	89
II.4. Statistical Methods.....	90
II.5. Sediment Contamination and Risk Assessment Indices	91
III. Results.....	93
III.1. Seasonal Distribution of the Geochemical Parameters in Marchica Lagoon Sediment.....	93

III.2. Spatial Pattern and Correlation of the Geochemical Parameters, Granulometry, and TOC in Marchica Lagoon Sediment	96
III.3. Ecological Risk of the Trace Elements in Marchica Lagoon Sediment	100
IV. Discussion.....	107
V. Conclusion.....	112
CHAPITRE V : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE LA QUALITE DES SEDIMENTS SUPERFICIELS DU BASSIN VERSANT DE LA LAGUNE DE MARCHICA	113
I. Introduction.....	116
II. Méthodologie.....	117
II.1. Description de la zone d'étude	117
II.2. Réseau d'échantillonnage	118
II.3. Méthodes d'analyse	119
II.4. Traitement statistique.....	119
II.5. Indices d'évaluation des risques et de contamination des sédiments	119
III. Résultats.....	119
III.1. Distribution saisonnière des paramètres géochimiques dans les sédiments de la zone d'influence au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica	119
III.2. Distribution spatiale et corrélation des paramètres géochimiques, granulométrique et du carbone organique total dans les sédiments de la zone d'influence au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica	123
III.3. Risque écologique des éléments traces métalliques dans les sédiments du bassin versant de la lagune de Marchica	124
IV. Discussion.....	130
V. Conclusion.....	131
CHAPITRE VI : IMPACT SAISONNIER DU BASSIN VERSANT SUR LA LAGUNE DE MARCHICA ET CORRELATIONS EAUX - SEDIMENTS	133
I. Introduction.....	135
II. Méthodologie.....	135
III. Résultats.....	136
III.1. Comparaison des indices écotoxicologiques des sédiments entre la lagune et son bassin versant	136
III.2. Granulométrie et carbone organique total des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant	143
III.3. Comparaison des eaux superficielles entre la lagune de Marchica et son bassin versant	144
III.4. Corrélations Eaux - Sédiments entre la lagune de Marchica et son bassin versant	152
IV. Discussion.....	155
IV.1. Compartiment Sédiment	155
IV.2. Compartiment Eau	155
IV.3. Corrélations Eaux - Sédiments	156
V. Conclusion.....	158
CHAPITRE VII : EVALUATION ENVIRONNEMENTALE DE LA QUALITE DE L'AIR AMBIANT AU NIVEAU DE LA ZONE D'INFLUENCE DE LA LAGUNE DE MARCHICA.....	159
I. Introduction.....	161
II. Méthodologie.....	163
III. Résultats.....	164
III.1. Données météorologiques.....	164
III.2. Polluants gazeux	164

III.3. Variation des concentrations des PM ₁₀ et PM _{2,5}	167
III.4. Composition Elémentaire des particules.....	168
III.5. Facteur d'enrichissement des éléments chimiques	170
III.6. Carbone suie dans la fraction fine PM _{2,5}	171
IV. Discussion.....	171
IV.1. Polluants gazeux	171
IV.2. Particules PM _{2,5} et PM ₁₀	172
IV.3. Black suie.....	173
IV.4. Comparaison avec d'autres études.....	173
IV.5. Caractérisation des émissions anthropiques	174
IV.6. Évaluation des risques des ETM liés à la santé humaine	175
V. Conclusion.....	177
CHAPITRE VIII : GESTION INTEGREE DES ZONES COTIERES, APPROCHE OPERATIONNELLE VERS UN LITTORAL DURABLE DE LA LAGUNE DE MARCHICA	179
I. Introduction.....	181
II. La GIZC, approche opérationnelle vers un littoral durable.....	181
III. Aperçu sur la gestion du milieu marin et du littoral au Maroc.....	182
IV. Initiatives GIZC sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc.....	184
IV.1. Projet MedWetCoast.....	184
IV.2. Projet SMAPIII	185
IV.3. Projet ACCMA	186
IV.4. Projet Appui à la mise en œuvre d'un plan global de dépollution de la lagune de Marchica	187
IV.5. Projet GIZC FEM_Banque Mondiale.....	187
IV.6. Evaluation des initiatives GIZC.....	189
V. La lagune de Marchica et la GIZC.....	189
V.1. Diagnostic de territoire à travers l'analyse SWOT	189
V.2. Le suivi de l'état environnemental de la Marchica.....	192
VI. Conclusion.....	193
CONCLUSION GENERALE	195
I. Rappel du contexte et principaux objectifs de recherche de la thèse	196
II. Principaux résultats de l'évaluation environnementale de la lagune de Marchica et sa zone d'influence.....	196
III. Recommandations.....	198
IV. Perspectives de recherche scientifique.....	200
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	201
WEB REFERENCES.....	227
ANNEXES.....	229
I. Annexe 1.....	230
II. Annexe 2.....	236
III. Annexe 3.....	242

INTRODUCTION GENERALE

I. Contexte de l'étude

Le littoral, ou zone côtière¹, constitue une interface entre la terre, la mer et l'atmosphère. Il s'agit d'un écosystème de transition complexe où s'opèrent des échanges et des interactions entre les différentes composantes physiques, biologiques et humaines. La longueur totale du littoral dans le monde est d'environ 504 000 km, soit l'équivalent de 12 fois le tour de la planète au niveau de l'équateur. Les zones côtières constituent des zones soumises à des fortes pressions démographiques. L'UICN estime que plus de 60 % de la population mondiale sont installées à moins de 150 kilomètres du rivage (Tanguy, 2020), et ce en raison des services écosystémiques offerts par ces systèmes aux populations riveraines tels que la sécurité alimentaire, le tourisme, les services culturels, la protection, la régulation, etc. (Mitsch et al., 2015, Millennium Ecosystem Assessment, 2005). La concentration des populations sur le littoral a été accompagnée par des problèmes liés à la dégradation de l'environnement notamment les rejets des eaux usées domestiques, des eaux industrielles non traitées, des déchets solides et aussi par des problèmes liés à de multiples conflits d'usage (Gourmelon, 2003 ; Lefevre, 1992).

La Méditerranée, mer intercontinentale presque entièrement fermée, couvre environ 2,45 millions de km² et son littoral est de 46 270 km de longueur (PNUE/PAM/CAR/PAP, 2016). Elle représente 0,8 % de la superficie totale des océans et elle est identifiée comme l'un des « hotspots » de la biodiversité marine avec un fort pourcentage d'endémisme (PNUE/PAM/CAR/PAP, 2016 ; Lenfant et al., 2015 ; Hubert & Broin, 2014, Cuttelod, 2009). Les lagunes littorales, marais maritimes, estuaires, deltas, côtes rocheuses et sableuses, herbiers, coralligènes, fonds meubles et rocheux, canyons, plateaux, montagnes sous-marines, sont autant d'habitats remarquables qui favorisent la diversité des organismes en Méditerranée (Hubert & Broin, 2014).

Toutefois, le bassin méditerranéen est considéré comme un « hotspot » mondial en termes de variabilité et de changement climatique ainsi que de transformation de l'utilisation des terres (García-Ruiz, 2011 ; Giorgi and Lionello, 2008 ; Rosenzweig et al., 2007 ; Giorgi, 2006). Le cinquième rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (IPCC, 2013) a identifié la Méditerranée comme l'une des régions les plus vulnérables au monde vis-à-vis des impacts du réchauffement climatique. Le littoral méditerranéen, en particulier, constitue une zone très sensible aux changements globaux (Cramer et al., 2021 ; Cramer et al., 2019 ; Hubert, 2014 ; Hubert & Broin, 2014) (<https://www.medecc.org/>) qui se manifestent par des :

- ❖ Changements climatiques caractérisés par l'augmentation de l'intensité et de la fréquence d'événements extrêmes, l'augmentation de la température et de l'acidité de la mer et l'élévation du niveau marin.

¹ On fera dans ce travail de recherche référence indistinctement à la terminologie 'littoral' ou 'zone côtière'.

- ❖ Changements démographiques et socioéconomiques caractérisés par des facteurs tel que la littoralisation, l'intensification des activités, la surexploitation des ressources, la pollution, l'accroissement du tourisme et l'introduction d'espèces invasives ainsi que d'autres facteurs.

Les changements globaux côtiers sont principalement causés par les impacts directs et indirects des activités humaines (Valiela, 2006). Dans ce contexte, l'intensification des apports continentaux et le changement climatique contribuent à modifier les paramètres environnementaux qui caractérisent les eaux côtières telles que la salinité, la température, la composition en sels nutritifs entraînant ainsi des impacts sur le développement des communautés biologiques et sur la répartition des espèces marines (Hubert & Broin, 2014).

Parmi les écosystèmes côtiers, les lagunes occupent en moyenne 13 % des côtes mondiales (Nixon, 1982 ; Barnes, 1980). Elles représentent des surfaces d'eau de faible profondeur, séparées de la mer par un cordon littoral appelé « lido » et sont connectées à la mer, parfois de façon intermittente, par une ou plusieurs ouvertures appelées « graus » (Lauret et al., 2011 ; Deslous-Paoli, 1996 ; Kjerfve, 1994). Elles sont alimentées en eau douce par les apports du bassin versant. Les chercheurs Nichols et Allen (1981) ont proposé une classification des lagunes côtières en quatre catégories en fonction de leur connectivité à la mer :

- ❖ Les lagunes estuariennes représentent des surfaces d'eau dont les courants de marée et les courants fluviaux jouent un rôle important ;
- ❖ Les lagunes ouvertes alimentées par les eaux marines sont caractérisées par un marnage suffisant permettant l'auto-dragage des passes ;
- ❖ Les lagunes semi-fermées sont caractérisées par des apports de la dérive littorale qui tendent à colmater les passes (cas de la lagune de Marchica) ;
- ❖ Les lagunes fermées caractérisées par l'absence de courants de marée.

La région méditerranéenne abrite environ 400 lagunes côtières couvrant une superficie de plus de 641 000 ha et se différencie par leur typologie et leur utilisation (Cataudella et al., 2015). Ces lagunes représentent des habitats écologiques importants et fournissent des services écosystémiques essentiels pour l'homme tel que la pêche, la conchyliculture, l'éducation environnementale, l'écotourisme, l'observation des oiseaux, la protection des côtes contre les catastrophes naturelles tel que les tsunamis, les cyclones et les tempêtes côtières (Pérez-Ruzafa et al., 2019a ; Newton et al., 2018 ; Mitsch et al., 2015) et jouent un rôle écologique d'épuration et de filtration des eaux douces en provenance des bassins versants (Derolez, 2020). Les données hydrologiques ou écologiques ont été publiées pour plus d'une cinquantaine de lagunes méditerranéennes (Pérez-Ruzafa et al., 2011a).

Les lagunes côtières sont généralement soumises à de multiples pressions en raison des transformations de l'utilisation des terres au niveau de leur bassin versant et les rejets de polluants provenant des activités humaines continentales (El Mahrad et al., 2020). Certaines activités sur les bassins versants des lagunes telles que l'urbanisation, le tourisme et l'agriculture, qui génèrent des apports excessifs de

polluants et de nutriments, constituent des menaces à l'intégrité écologique des lagunes (Newton et al., 2014).

L'enrichissement des eaux par l'azote et le phosphore est à l'origine du phénomène d'eutrophisation (Derolez, 2020 ; Cloern, 2001 ; Nixon, 1995). Cet enrichissement peut entraîner une augmentation de la croissance accélérée des algues dans la colonne d'eau et des formes supérieures des plantes vivant sur le fond (Ménèsguen and Lacroix, 2018). Les lagunes côtières sont particulièrement vulnérables au processus d'eutrophisation causé par les pressions humaines et accentué par les effets du changement climatique (Pérez-Ruzafa et al., 2019b). La pollution chimique tellurique représente également une forte menace pour les lagunes côtières et les mers. Les éléments traces métalliques, en particulier, constituent des polluants toxiques et persistants, pouvant s'accumuler dans les compartiments sédiments et biote et avoir ainsi des effets négatifs, si leurs concentrations dépassent les normes en vigueur, sur la santé des écosystèmes, la santé humaine et l'environnement (Valavanidis et al., 2010 ; De Lacerda, 1994). La restauration écologique des écosystèmes dégradés, constitue une approche importante comme réponse pour atténuer les pressions humaines sur les écosystèmes naturels et pour améliorer les services écosystémiques (Tolvanen and Aronson, 2016 ; Feng et al, 2013). Pour les lagunes côtières, la restauration écologique est récente (De Wit et al, 2020 ; Leruste et al, 2016). Deux actions sont nécessaires pour la restauration des lagunes côtières méditerranéennes : améliorer la connectivité hydrologique avec la mer et limiter les polluants déversés dans les eaux intérieures (Quintana et al., 2018). L'état écologique des lagunes côtières doit être régulièrement analysé et évalué (Pérez-Ruzafa et al., 2019a ; Pérez-Ruzafa et al., 2011b).

A ce titre, les évaluations environnementales constituent un des instruments de gouvernance pour une meilleure gestion environnementale et écologique. La surveillance et l'évaluation, fondées sur la connaissance scientifique de la mer et des côtes, constituent le fondement essentiel à la gestion des activités humaines, afin de promouvoir l'usage durable des mers et des côtes, conserver les écosystèmes marins et assurer leur développement durable (PNUE/PAM, 2017). L'évaluation d'un écosystème est nécessaire pour fournir des informations de base permettant d'intégrer la gestion dans un cadre de gestion écosystémique (PNUE, 2015).

Au Maroc, les travaux de recherche qui ont concerné les évaluations environnementales des lagunes côtières à savoir la lagune Oualidia, la lagune Khenifiss, la lagune Moulay Bousselham, la lagune sidi Moussa et la lagune de Marchica ont été focalisés en majorité sur la caractérisation des eaux et sédiments lagunaires sans tenir compte de leur bassin versant à l'exception de quelques études. Concernant la lagune de Marchica, les études environnementales qui ont pris en considération le bassin versant de la Marchica sont très peu nombreuses. En effet, ces travaux se sont focalisés soit sur la caractérisation des eaux et sédiments du bassin versant sans tenir compte de la lagune de Marchica (Chaoui, 1999), sur la caractérisation des eaux et sédiments de la lagune et de son bassin versant (Bloundi, 2005), ou sur la caractérisation des sédiments de la lagune et certains oueds qui l'entourent (González et al., 2007). Les autres études environnementales menées avant la mise en place des actions de restauration à travers la caractérisation des compartiments eau et/ou sédiment n'ont pas pris en considération le bassin versant (Zerrouqi et al., 2013 ; SEEE/INRH, 2009 ; Ruiz et al., 2006 ; Lefebvre et al.,

1997 ; Inani, 1995 ; Guelorget et al., 1987). Après les actions de restauration, les études réalisées se sont focalisées aussi sur la caractérisation des compartiments eau et/ou sédiment au niveau de la lagune sans tenir compte du bassin versant (Aknaï et al., 2018 ; Aknaï et al., 2017a,b ; Mostarih et al., 2016 ; Maanan et al., 2015 ; Saddik, 2014). Cependant, le bassin versant de la lagune de Marchica fait l'objet d'étude depuis 2005 dans le cadre du programme MEDPOL de surveillance du degré de pollution des côtes méditerranéennes marocaines en exécution de la convention de Barcelone et de ses protocoles que le Maroc a ratifié notamment le protocole « tellurique ». Les résultats de surveillance de ce programme à travers la caractérisation des eaux et sédiments ont montré que l'état des deux oueds du bassin versant de la Marchica (Selouane et Cabaillo) durant la période 2013-2016 est presque toujours médiocre à dégradé (Département de l'Environnement, 2016a). Concernant la qualité de l'air autour de la lagune de Marchica et de son bassin versant, aucune étude n'a été réalisée ni avant ni après les actions de restauration. Ce travail étant le premier à traiter la qualité de l'air autour de la lagune de Marchica.

C'est dans cet objectif que s'inscrit ce travail de recherche, qui vise à prendre en considération l'impact du bassin versant sur la lagune de Marchica à travers la caractérisation simultanée au niveau de la lagune et des principaux oueds du bassin versant des compartiments eau et sédiment durant un suivi de deux années (2017 et 2018) en se basant sur deux campagnes par an (saison humide et saison sèche). La caractérisation de la qualité de l'air a été réalisée durant trois campagnes à raison d'une campagne par an (2016, 2017 et 2018). La lagune de Marchica et son bassin versant ont été choisis pour cette évaluation environnementale pour les raisons suivantes :

La première opération de restauration des écosystèmes côtiers au Maroc a été lancée en 2008 sur la lagune de Marchica, en tant que zone humide et Site d'Intérêt Biologique et Ecologique (SIBE) et en raison de son importance socio-économique (Département de l'Environnement, 2016b). Les principales actions de restauration sont :

- ❖ L'ouverture d'une nouvelle passe entre la lagune et la mer Méditerranée permettant l'amélioration des échanges d'eau entre ces deux écosystèmes ;
- ❖ La construction dans le cadre du programme du programme national d'assainissement liquide mutualisé PNAM de deux stations d'épuration du Grand Nador et d'Arekmane ainsi que l'extension du réseau d'assainissement des communes entourant la lagune ;
- ❖ La construction d'un centre d'enfouissement et de valorisation des déchets solides dans le cadre du programme national des déchets ménagers PNDM ;
- ❖ L'opération de dépollution des eaux de surface réalisée entre 2010 et 2013 au niveau de la lagune et ses alentours ainsi qu'aux embouchures des oueds qui l'entourent. Cette action a permis d'extraire environ 40 000 tonnes de matériaux vaseux qui ont été transportés vers le centre d'enfouissement des déchets et 400 tonnes de déchets plastiques ainsi que d'autres types de déchets ont été valorisés (Département de l'Environnement, 2019a ; www.agencemarchica.gov.ma).

- ❖ Le dragage des embouchures des oueds ainsi que la transformation des anciens bassins de lagunage en parc ornithologique réalisées durant la période 2013-2020 par l'Agence pour l'Aménagement du site de la lagune de Marchica ;

Le plan de restauration écologique du site de la lagune de Marchica est estimé à plus de 1,6 milliards de Dirhams (environ 160 millions d'euros) durant la dernière décennie 2010 - 2020 (www.agencemarchica.gov.ma). Les actions de restauration réalisées ont été accompagnées par la création d'un Observatoire Marchica par la Fondation Mohammed VI pour la protection de l'environnement en 2012. Les travaux réalisés dans le cadre de ce travail de recherche ont été formulés afin de répondre à certains indicateurs environnementaux de l'Observatoire Marchica concernant l'écosystème lagune de Marchica et son bassin versant et ce, afin de statuer sur son état environnemental, alerter les décideurs et orienter les gestionnaires sur les futures actions de restauration à prendre en considération notamment au niveau du bassin versant.

II. Objectifs et plan de thèse

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet Lag-Nad 2016 exécuté dans le cadre d'un partenariat entre la Faculté des Sciences de Rabat, l'Institut National de Recherche Halieutique, le Centre National de l'Energie, des sciences et des Techniques Nucléaires et le Département de Développement Durable. Ce projet vise à réaliser une évaluation environnementale de la lagune de Nador et de son bassin versant² dans le cadre des changements globaux. L'objectif de ce travail de recherche consiste à l'évaluation environnementale de l'écosystème de la lagune de Marchica et de son bassin versant après les actions de restauration réalisées durant la dernière décennie par le Gouvernement marocain.

Après cette **introduction générale** qui présente le contexte et les objectifs du travail de recherche, cette thèse est structurée en 8 chapitres :

- ❖ Le **chapitre I** concerne la présentation de la zone d'étude et la réalisation d'un inventaire de toutes les actions de restauration autour de l'écosystème de la lagune de Marchica et de son bassin versant ;
- ❖ Le **chapitre II** traite les aspects techniques concernant les matériels et méthodes utilisés pour la réalisation de ce travail, incluant les réseaux d'échantillonnage Eau – Sédiment et Air, les missions de terrain, les méthodes d'analyses et les normes de qualité en vigueur des trois compartiments Eau, Sédiment et Air ;

² Le Bassin versant de la lagune de Marchica dans la suite de cette étude désignera la zone d'influence de cette lagune.

- ❖ Le **chapitre III** présente l'évaluation environnementale de la qualité des eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant à travers la caractérisation des paramètres in situ (Température, salinité, oxygène dissous, pH et conductivité électrique), nutriments, ETM et leur comparaison avec les normes en vigueur ;
- ❖ Les **chapitre IV et V** présentent respectivement les résultats de l'évaluation de la qualité des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant à travers leur caractérisation granulométrique, les analyses en ETM, les éléments majeurs, le carbone organique total (COT) et à travers les indices écotoxicologiques des ETM ;
- ❖ Le **chapitre VI** traite l'impact du bassin versant sur la lagune à travers la comparaison simultanée des indices écotoxicologiques des sédiments et à travers les interactions Eaux - Sédiments entre la lagune de Marchica et son bassin versant ;
- ❖ Le **chapitre VII** décrit l'évaluation environnementale de la qualité de l'air autour de la lagune de Marchica à travers la caractérisation des polluants gazeux à savoir le dioxyde de soufre (SO₂), le dioxyde d'azote (NO₂), l'ozone (O₃) et le monoxyde de carbone (CO) ; et à travers la caractérisation des particules en suspension PM₁₀ et PM_{2,5}, leur composition chimique notamment les ETM, les rapports élémentaires des ETM permettant de déterminer les sources de pollution, le carbone suie et enfin le risque excessif de cancer ;
- ❖ Le **chapitre VIII** traite la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) de l'écosystème lagune de Marchica et son bassin versant en tant qu'approche opérationnelle pour un bon état environnemental futur et un développement durable de la lagune de Marchica ainsi que pour son adaptation aux changements climatiques.

Enfin, une **conclusion générale** synthétise les principaux résultats issus de ce travail et propose des recommandations et des perspectives permettant d'améliorer la qualité environnementale de l'état environnemental de la lagune de Marchica et de son bassin versant.

Chapitre I : Présentation générale de la lagune de Marchica et de son bassin versant

I. Introduction

Ce chapitre présente les caractéristiques de la zone d'étude notamment le contexte géomorphologique et hydrologique de la lagune de Marchica et de son bassin versant, l'aspect climatologique, le contexte écologique et biodiversité de la lagune de Marchica, l'aspect géologique et le contexte socio-économique du bassin versant de la lagune de Marchica ainsi que les contraintes et les pressions exercées sur la lagune. Ce chapitre présente également un inventaire des aménagements et des actions de restauration réalisés au niveau de la zone d'étude au cours de la dernière décennie.

II. Situation géographique de la zone d'étude

La lagune de Marchica, encore appelée « Sebkha Bouarg » ou « lagune de Nador », est située sur la rive sud-ouest de la mer Méditerranée, au niveau du littoral méditerranéen nord-est du Maroc, entre le Cap de l'Eau et le Cap des Trois Fourches. Sur le plan administratif, la lagune appartient à la province de Nador, région de l'Oriental du Maroc (Figure I-1). Elle constitue un plan d'eau très important dans le bassin méditerranéen. C'est d'ailleurs la plus grande des lagunes marocaines et la deuxième grande lagune du Maghreb.

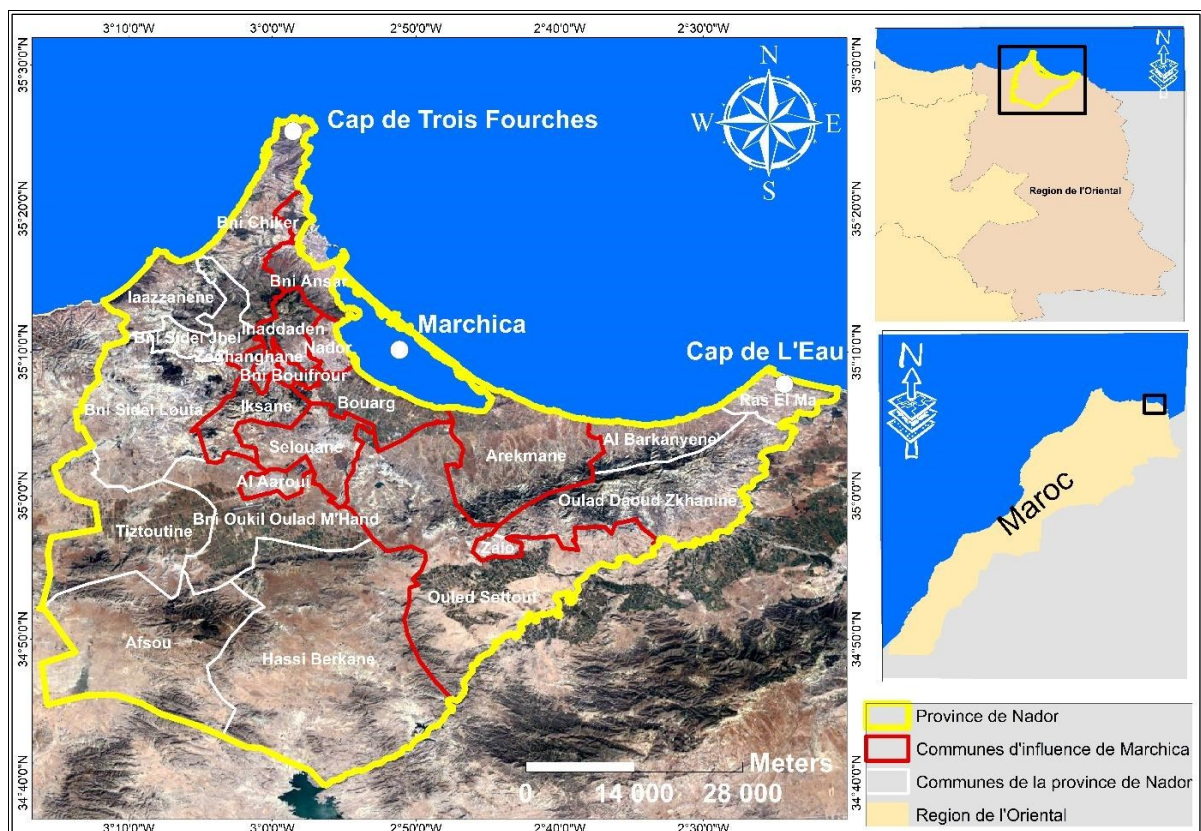


Figure I-1 : Situation géographique de la lagune de Marchica et son bassin versant.

III. Contexte géomorphologique et hydrologique

III.1. Géomorphologie et hydrologie de la lagune de Marchica

La lagune de Marchica occupe un bassin oval d'une superficie d'environ 115 Km², allongé parallèlement à la côte de direction Nord Ouest -Sud Est. Ses dimensions sont de 25 km de long sur 7,5 km de large. Les profondeurs de la lagune varient entre -0.5 m au niveau des bordures et -7 à -8 m au niveau de la partie centrale de la lagune (ANDA/INRH, 2018) (Figure I-2).

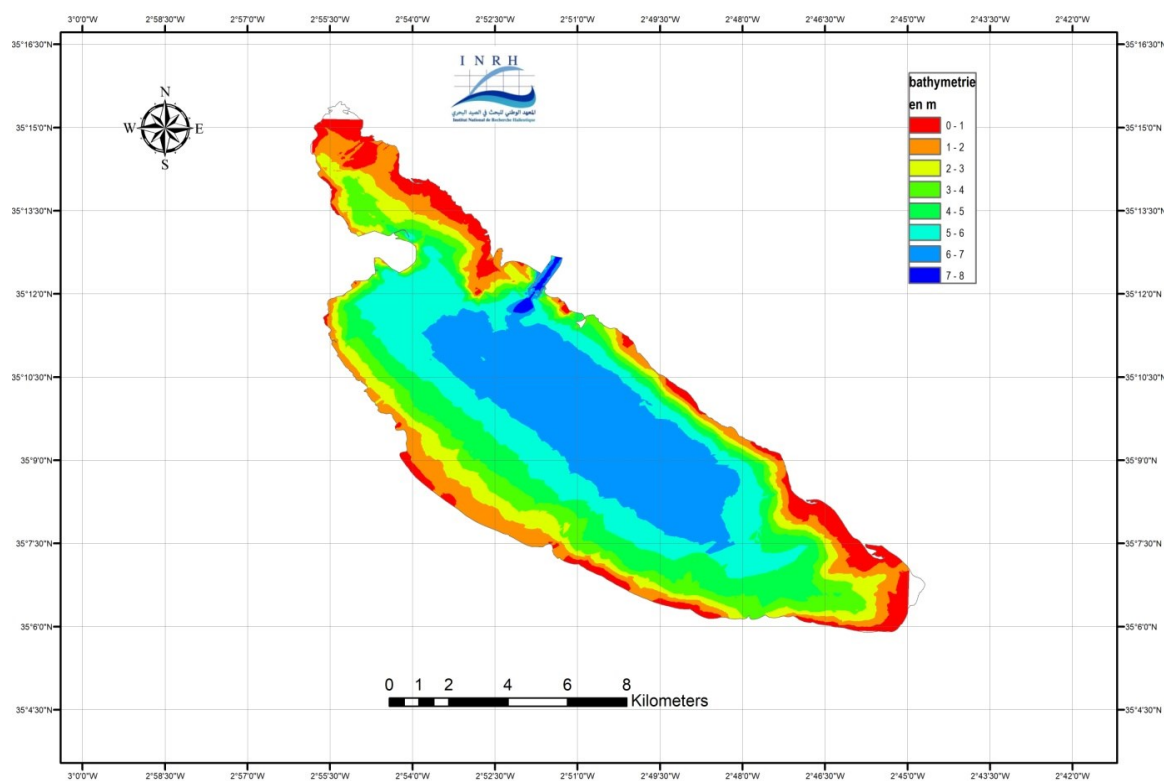


Figure I-2 : Bathymétrie de la Lagune de Marchica (INRH/ANDA, 2018).

La lagune est séparée de la Méditerranée par une île barrière rectiligne (ou lido) d'une largeur qui varie entre 0,3 et 1,5 km. La lagune communique avec la mer à travers une passe artificielle de 350 m de largeur et de 6 m de profondeur. Selon la classification de Nichols et Allen (1981), la lagune de Marchica appartient à la catégorie des lagunes semi fermées, et d'après la classification de Kjerfve (1986), elle est considérée comme étant une lagune à communication « étouffée » (Hilmi, 2005).

La marée est de type semi-diurne, variant entre 0,5 m (en vives eaux) et 0,1 m (en mortes eaux). Les apports en eaux marines et les échanges entre la lagune et la Méditerranée se font essentiellement à travers la passe. À l'intérieur de la lagune, la circulation et le mélange des eaux sont principalement contrôlés par les vents (Hilmi et al., 2015 ; Hilmi, 2005).

III.2. Géomorphologie et hydrologie de la zone d'influence de la lagune de Marchica

La zone d'influence de la lagune de Marchica intègre une partie terrestre et une partie marine conformément aux définitions du protocole relatif à la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) de la Méditerranée et la loi nationale du littoral 81-12. La délimitation de la zone d'influence terrestre consiste à identifier les communes du bassin versant qui sont traversées par des cours d'eau (Oueds ou/et chaabas) acheminant des rejets telluriques vers la lagune. Cette zone d'influence est composée par 11 communes territoriales dont cinq communes urbaines (Nador, Beni Ensar, Zghanghane, Selouane et Al Aaroui) et six communes rurales (Kariat Arekmane, Bouarg, Ihaddaden, Beni Bouifrou, Iksane, et Oulad Settout). Cette zone a été délimitée aussi comme zone d'influence de la lagune de Marchica par le projet SEIS SUD II qui vise la réduction de la pollution marine en Méditerranée en développant un Système de Partage d'Informations sur l'Environnement (SEIS) encourageant la production régulière et le partage de données environnementales fiables ([Département de l'Environnement, 2019a](#)).

Le réseau hydrographique traversé par les communes susmentionnées est très dense et est composé de plusieurs cours d'eau et chaabas dont la majorité sont à écoulement temporaire avec des apports pouvant être importants durant les périodes de fortes pluies ([Raji, 2014](#) ; [ABHM, 2009](#)). La surface de cette zone d'influence est estimée à environ 700 Km² (Figure I-3). Les principaux cours d'eau qui risquent d'impacter négativement la lagune à travers le charriage de la pollution tellurique sont : Cabaillo, Selouane, Ouchen, Akhandouk, Affelioun et Lhdara.

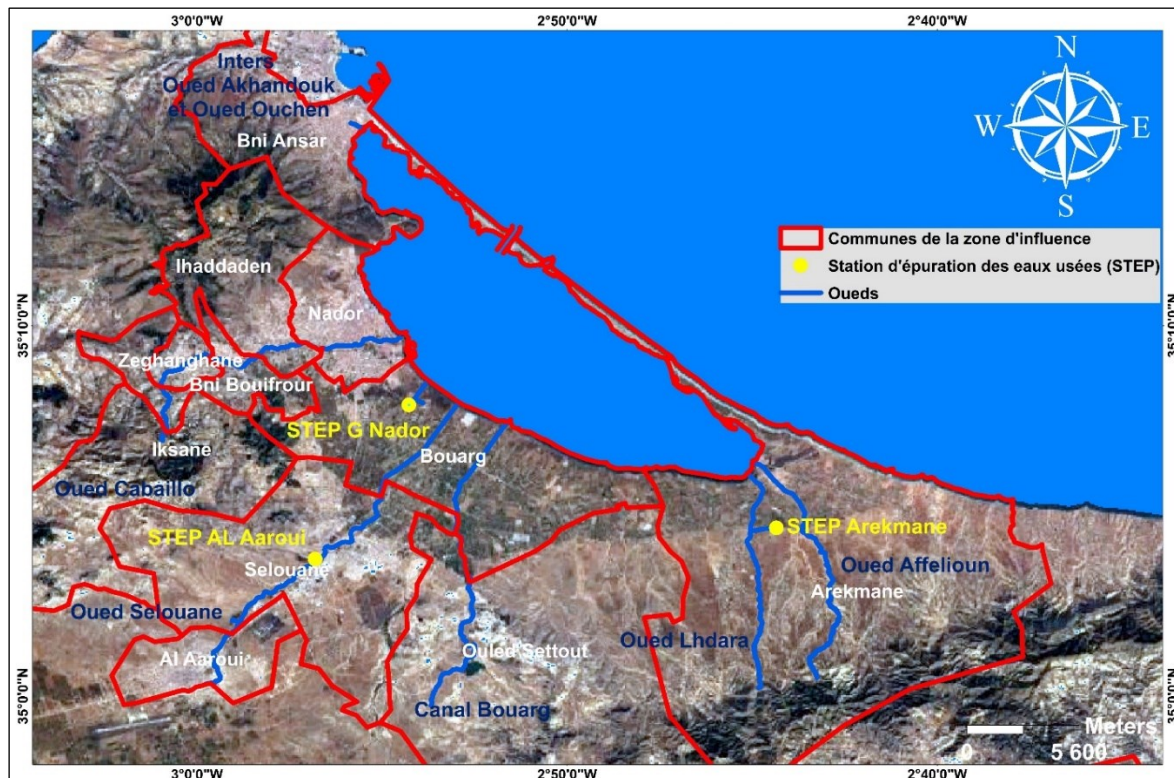


Figure I-3 : Principal réseau hydrographique du bassin versant de la lagune de Marchica.

En plus du réseau hydrographique, l'aquifère de Bouarg constitue un pôle très important dans le bilan hydrique de la lagune de Marchica (El Mandour et al., 2008) avec une superficie de 190 km² (Figure I-4). Cette nappe est alimentée par les eaux souterraines de l'aquifère du Gareb, les eaux pluviales, les eaux d'oued Selouane, et les eaux provenant des canaux d'irrigation (El Yaouti et al., 2009).

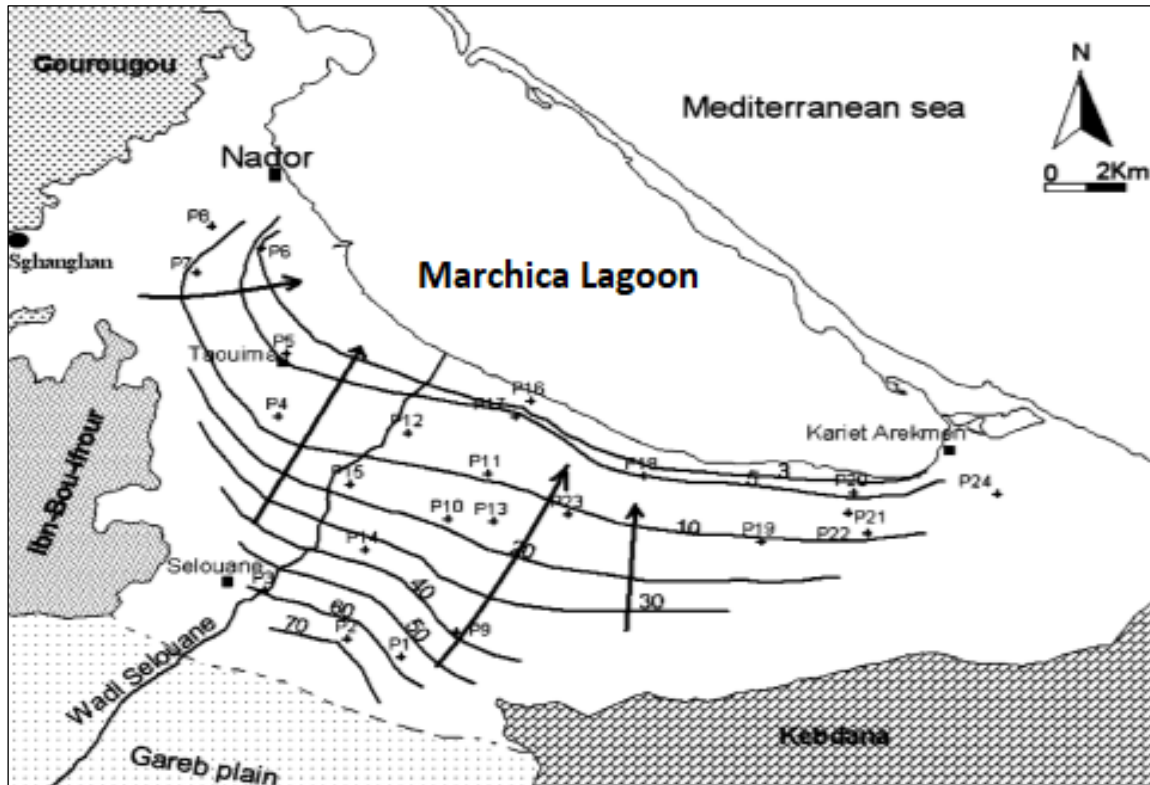


Figure I-4 : Carte piézométrique de la nappe phréatique de Bouarg (El Mandour et al., 2008).

IV. Aspects climatologiques

Le bassin versant de la lagune de Marchica est caractérisé par un climat de type méditerranéen à caractère contrasté, avec une saison humide froide et une saison sèche chaude. Toutefois, durant les dernières années, on observe de fortes précipitations pendant des durées de temps très courtes provoquant des inondations comme le cas des inondations du Grand Nador d'octobre 2008 (ABHM, 2009), ou au contraire de longues périodes de sécheresse. Ces événements extrêmes sont très probablement liés aux changements climatiques. Les variables climatiques présentées ici sont celles de la station météorologique de Melilla qui est la station la plus proche de la zone d'étude, et qui couvre au moins les quatre principaux paramètres climatiques (Température, Pluviométrie, Vent et Humidité Relative). (<http://www.tutiempo.net>).

IV.1. Température de l'air

La température de l'air est caractérisée par des écarts thermiques saisonniers très importants. Durant les trois dernières décennies (1990 – 2020), la température moyenne maximale est enregistrée durant les mois de Juillet - Aout (environ 32°C) et la température moyenne minimale est enregistrée durant les mois de

Décembre - Janvier (environ 8°C). La variation des plus hautes températures durant la période 1990 - 2020 montre des pics maximaux de 41,8 °C en 1994 ; 40,8°C en 2001 ; et 40 °C en 2009, 2012 et 2020. Pour le reste des années (1990 – 2020), les valeurs des plus hautes températures ont été inférieures à 40°C (Figure I-5).

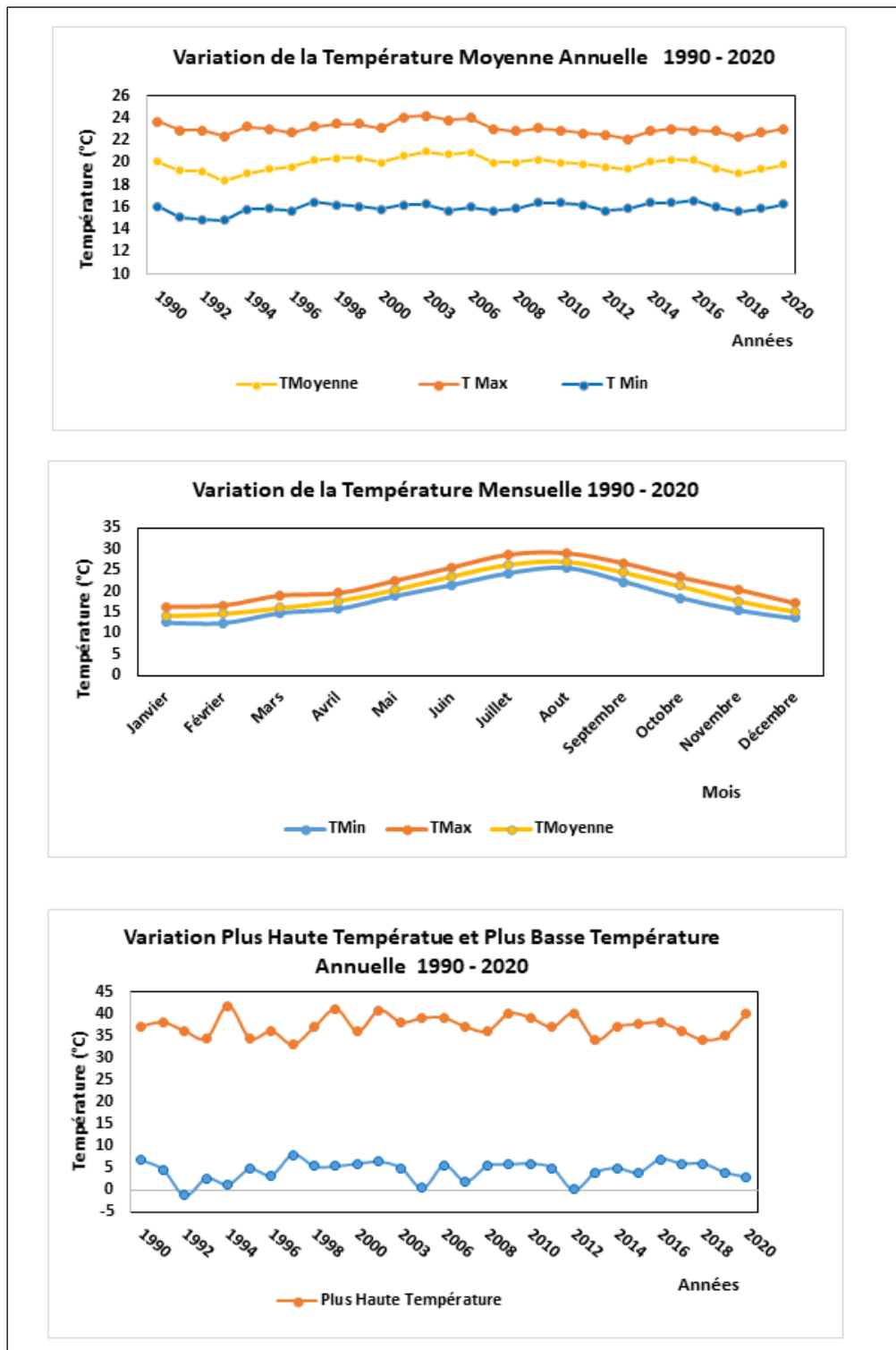


Figure I-5 : Variation de la température de l'air à la station de Mellila (Période 1990 – 2020 ; <http://www.tutiempo.net/>).

IV.2. Pluviométrie

La pluviométrie est relativement importante entre les mois d'octobre et avril. La moyenne des précipitations durant les trois dernières décennies (1990 – 2020), varie entre 300 mm à 400 mm (Figure I-6). Avec le changement climatique que connaît la région, les précipitations ont enregistré un maximum annuel de 764 mm durant le mois d'octobre de l'année 2008. Le climat a été caractérisé par une sécheresse en l'absence totale de pluies durant les années 2014, 2016 et 2017.

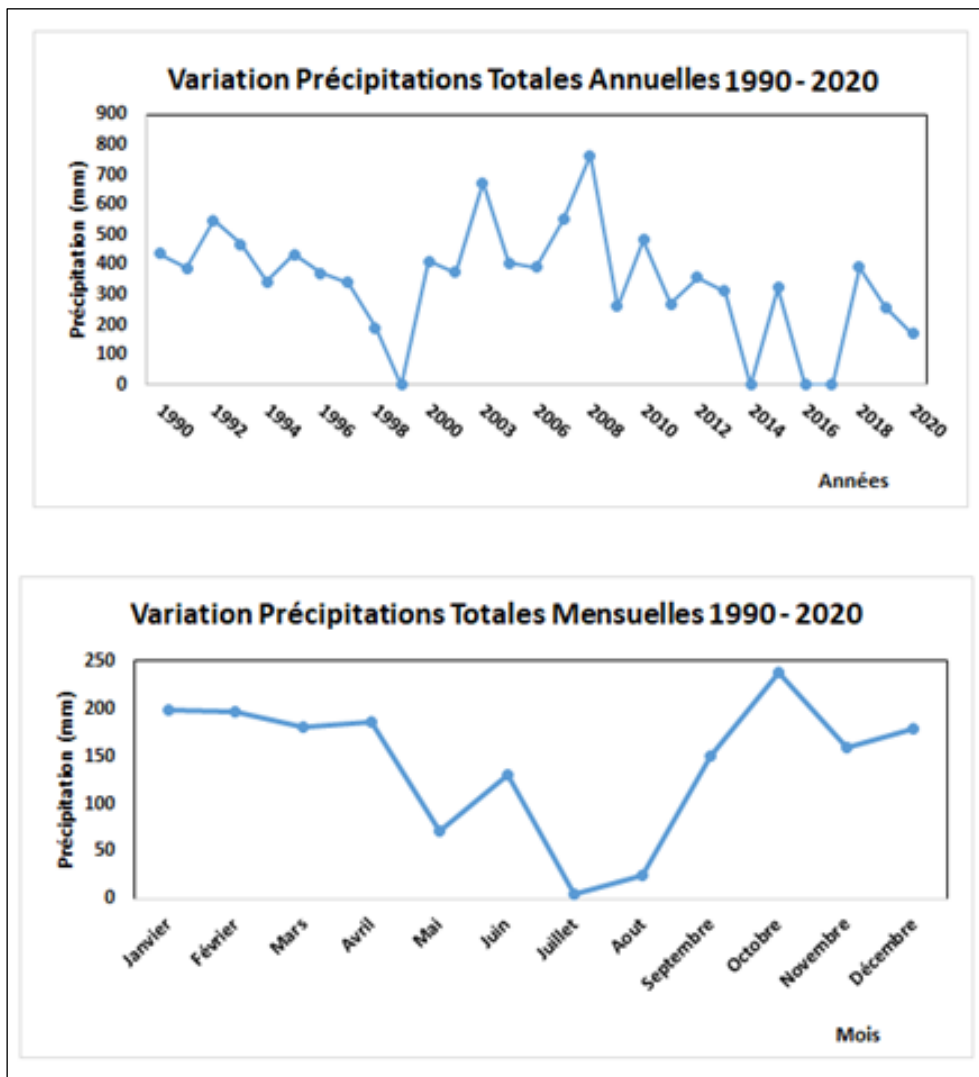


Figure I-6 : Variation de la pluviométrie (Période 1990 – 2020 ; <http://www.tutiempo.net>).

IV.3. Vent

Durant la période 1990 – 2020, la vitesse du vent moyen varie entre 10 et 20 km/h et la vitesse maximale des vents enregistrée est située entre 80 et 100 km/h (Figure I-7). La rose des vents au niveau de l'aéroport de Nador situé au niveau du bassin versant de la lagune à 25 km de lagune durant une période d'une année (juillet 2016 – juillet 2017) (Maicu et al., 2021) montre deux directions dominantes de vents Nord Est et Sud-Sud-Ouest (Figure I-8).

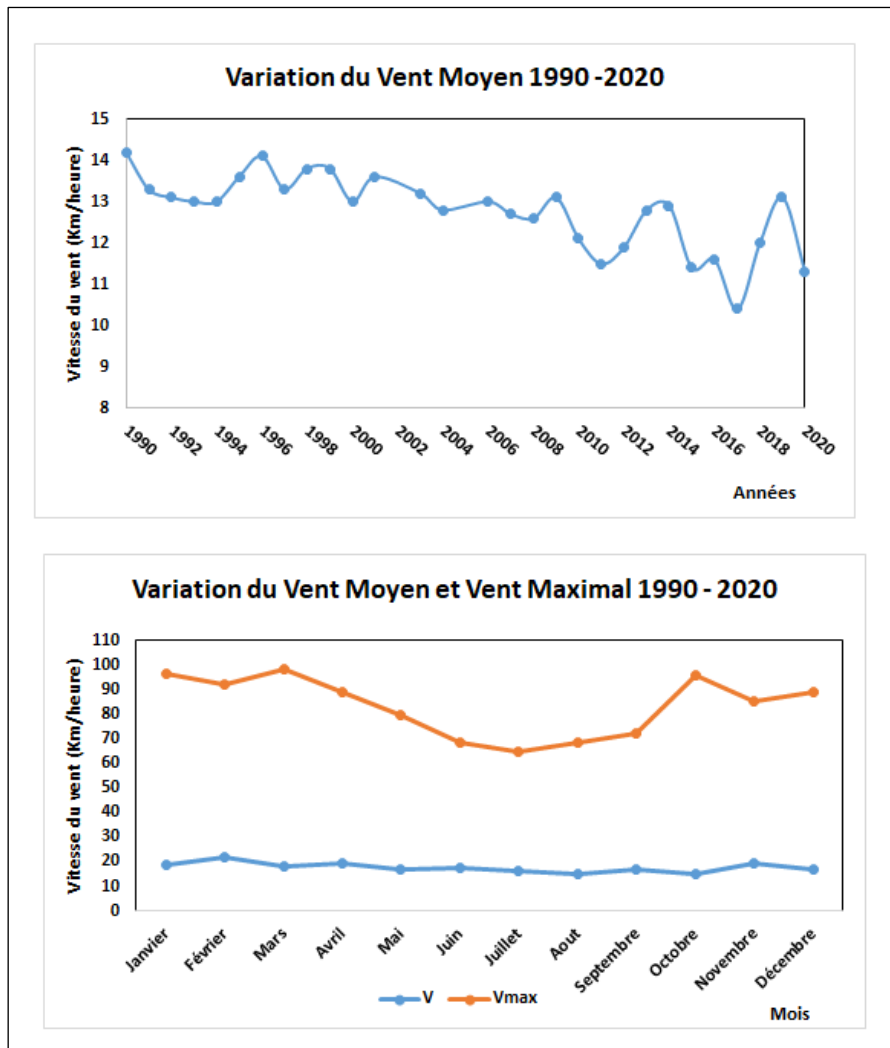


Figure I-7: Variation de la vitesse du vent moyen et du vent maximal (Période 1990 – 2020 ; <http://www.tutiempo.net>)

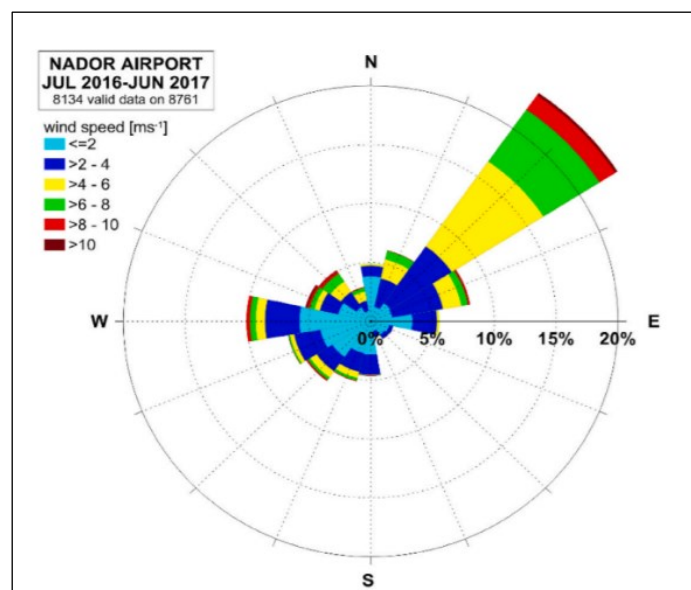


Figure I-8: Rose des vents au niveau de l'aéroport Nador (Période 2016-2017 ; Maicu et al. (2021))

IV.4. Humidité Relative

Durant la période 1990 – 2020, l'humidité relative moyenne varie entre 65 % et 73 %. Les valeurs minimales et maximales ont été enregistrées respectivement durant le mois de juillet (50 %) et le mois de septembre (88%) (Figure I-9).

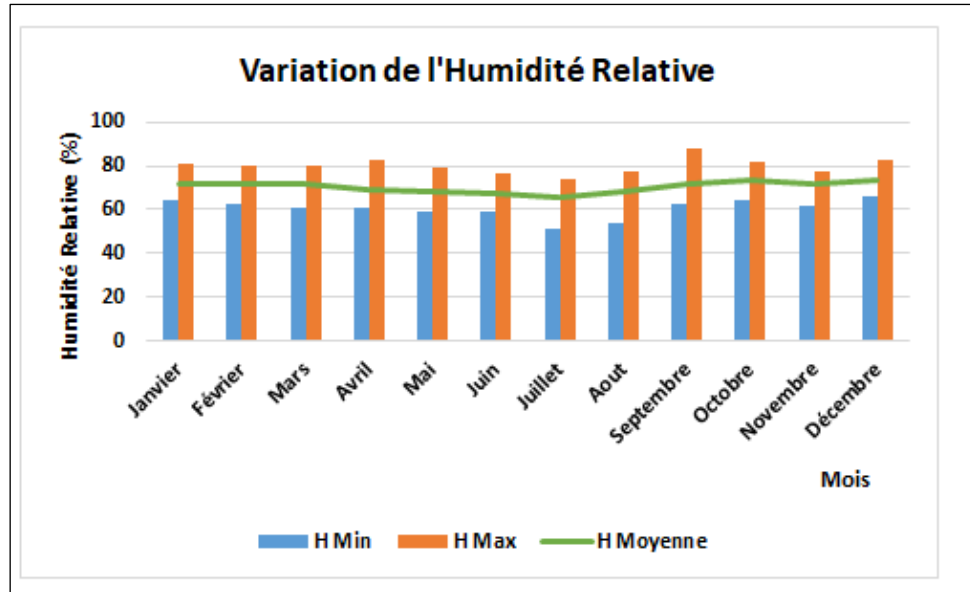


Figure I-9 : Variation de l'humidité relative (Période 1990 – 2020 ; <http://www.tutiempo.net>)

V. Aspects géologiques du bassin versant de la lagune de Marchica

L'histoire géologique de la lagune de Marchica est inscrite dans le cadre de l'histoire du bassin côtier méditerranéen Nord-Est du Maroc caractérisé par l'influence conjointe de la tectonique et du volcanisme (Azdimousa and Bourgois, 1993). La lagune de Marchica fait partie du bassin Néogène de Nador-Méllila qui est un des bassins post-orogéniques du Rif Nord-Est (Guillemin and Houzay, 1982). Ce bassin a commencé à s'individualiser au Miocène supérieur. Le bassin versant de la Marchica est caractérisé par quatre domaines structuraux permettant d'alimenter la lagune en matériaux sédimentaires (Figure I-10) :

1. Le massif de Gourougou situé à l'ouest de la lagune et il culmine à 887 m. Il s'agit d'un strato-volcan généré par trois séries volcaniques : (1) calco-alcalines (tendance potassique) ; (2) intermédiaires (shoshonites : trachytes et latites) ; et (3) alcalines (basaltes à tendance sodique) (El Bakkali, 1995 ; Hernandez and Bellon, 1985). Ces événements volcaniques se sont succédés entre le Messinien et le Plio-Quaternaire (Morel, 1985).
2. Le massif de Beni-Bou-Iffroug situé au sud-ouest de la lagune, il représente le socle du massif volcanique du Gourougou et il culmine sur une hauteur de 699 m. Il est formé par des schistes jurassiques et des calcaires crétacés (Mahjoubi et al., 2003). La partie Ouiksane de ce massif est caractérisée par des intrusions granodioritiques à minéral de fer associé (El Bakkali, 1995).

3. Le massif de Kbdana situé au sud-est de la lagune et il culmine sur une hauteur de 937 m. Il est constitué par des formations jurassiques « calcaires dolomitiques, marno-calcaires et formations schisto-gréseuses », recouvertes par des formations miocènes comportant essentiellement des calcaires et des marnes (Paquet H, 1970).
4. La plaine de Bou-Areg située au sud de la lagune et elle fait partie du bassin subsident « Gareb-Bou-Areg ». Elle constitue la frontière entre les plaques d'Afrique et d'Alboran, le bassin de Gareb-Bou-Areg semble être le résultat de la flexure lithosphérique sous la charge due à l'épaississement crustal dans la zone de collision entre les deux plaques (Yahyaoui et al., 1997).

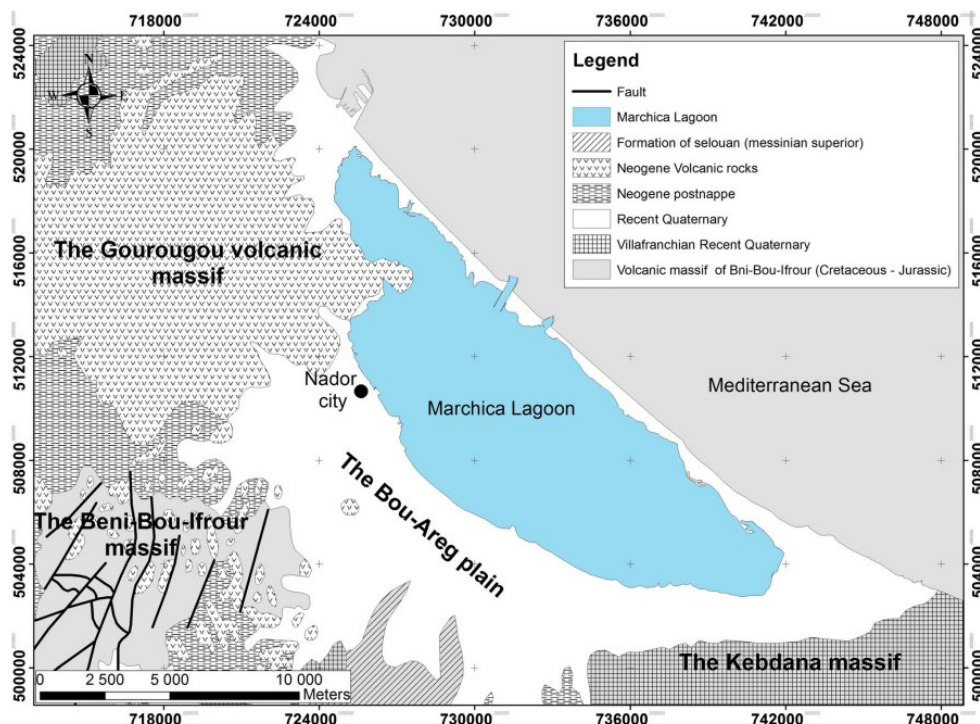


Figure I-10 : Carte géologique de la zone d'études (in Azougay, 2020).

VI. Contexte écologique et biodiversité de la lagune de Marchica

La lagune de Marchica a été classée site d'intérêt biologique et écologique (SIBE de priorité 1) dans le Plan Directeur des Aires Protégées au Maroc depuis 1996 et elle a été déclarée site RAMSAR depuis 2005 (Dakki et al., 2011); (<https://rsis.ramsar.org/rsis/1484>). Elle est caractérisée par une faune aquatique qui constitue environ 7% de la faune marine marocaine (Dakki, 2003). L'étude de la diversité de l'assemblage des poissons de la lagune réalisée en 2015 a permis de recenser 43 espèces de poissons appartenant à 20 familles comprenant 20 espèces marines migrantes, 12 espèces marines réfugiées et 11 espèces résidentes (Selfati et al., 2019). Elle est caractérisée par la présence de deux espèces remarquables d'intérêt communautaires à savoir l'anguille commun (*Anguilla anguilla*) et la grande nacre (*Pinna nobilis*) (ANDA/INRH, 2018). Elle est aussi caractérisée par des habitats (herbiers de phanérogames marines *Cymodocea nodosa* et *Zostera noltii*) d'intérêt pour la conservation en Méditerranée (ANDA/INRH, 2018 ; Bazairi et Niazi, 2012).

VII. Contexte socio-économique du bassin versant de la lagune de Marchica

VII.1. Démographie

La population dans la zone d'influence de la lagune de Marchica comptait 448 634 en 2014 (HCP, 2014). La démographie a connu une augmentation durant les années 2017 et 2018 pour atteindre respectivement 471 823 et 480 315 (HCP, 2019). Cette population représente presque 80% de la population totale de la province de Nador soit 565 426 en 2014 (HCP, 2014). Le taux de pauvreté au niveau des communes urbaines dans la zone d'influence varie entre 0,53 et 0,79 alors qu'au niveau des communes rurales de cette zone, il varie entre 2,64 et 9,26 (HCP, 2014).

VII.2. Urbanisme

Au niveau du bassin versant, l'Agence Urbaine Nador-Driouch-Guercif (<https://aunador.ma/fr/planification-urbaine/etat-des-documents-d-urbanisme/>) a élaboré, durant la dernière décennie, le Schéma Directeur d'Aménagement Urbain (SDAU) fixant les orientations en termes d'urbanisme pour une durée de 25 ans, ainsi que plusieurs plans d'aménagements (PA) concernant les centres et certains quartiers des communes de ce bassin versant. Les documents d'urbanisme jouent un rôle très important dans la planification territoriale et fixent les orientations à suivre pour une structuration optimale du territoire, en considérant aussi bien les critères socioéconomiques qu'environnementaux. Toutefois, ces documents ne couvrent pas tout le territoire du bassin versant. La densité de la population au niveau de la province de Nador est très forte, soit 175,5 habitants/Km² (HCP, 2017a).

VII.3. Industrie

L'infrastructure d'accueil industriel au niveau de la zone d'influence du bassin versant de la lagune de Marchica est composée des zones suivantes (<https://www.mcinet.gov.ma/>) :

- ❖ Zone industrielle de Selouane (1ère, 2ème et 3ème tranche) ;
- ❖ Zone franche logistique intra portuaire de Béni Ansar ;
- ❖ Zone franche industrielle d'exportation extra portuaire de Béni Ansar ;
- ❖ Zone d'activité économique d'Ouled Settout ;
- ❖ Parc industriel de Selouane installé dans le cadre du nouveau pôle industriel MED-EST.

Les unités industrielles au niveau de la province de Nador sont de l'ordre de 150 unités, parmi lesquelles plus d'une centaine d'unités sont localisées au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica. Selon la [Délégation de l'Industrie, du Commerce et des Nouvelles Technologies de Nador \(2019\)](#) les principales branches industrielles sont :

1. Industrie chimique et para-chimique (ICPC) : secteur le plus dominant composé essentiellement des briqueteries, des unités de fabrication d'agglomérés pour la construction, des unités de fabrication de béton prêt à l'emploi, centre emplisseur de gaz et production de combustibles solides Cokes ;
2. Industrie agro-alimentaire (IAA) : secteur très représenté et compte principalement les minoteries industrielles, production de miel, production de viande et de volaille, unités de traitement et de congélation de poissons et unités de traitement et de conservation de fruits ;
3. Industrie mécanique et métallurgique (IMM) : secteur le plus dominant en matière de chiffre d'affaires. Il est caractérisé par la présence de grandes unités telle la sidérurgie (Sonasid), la fabrication de bouteilles à gaz (Sofrenor) et aussi les unités de déroulage de fer à béton, la menuiserie de l'aluminium et métallique, les unités de fabrication mécanique, ainsi que des unités de construction et réparation navale.
4. Industrie textile et cuir (ITC) : secteur composé par deux unités de fabrication de couvertures et de matelas.

VII.4. Mines

Actuellement, l'activité minière au niveau du bassin versant de la lagune de Nador est basée principalement sur l'exploitation des minerais de la bentonite et de l'argile smectique. Le massif des Beni Bouifrouf comprend les gisements de fer les plus importants du Maroc dont plus de 60 millions de tonnes ont été exploités entre 1915 et 1976 ([Lebret, 2014](#)).

VII.5. Tourisme

L'Agence pour l'Aménagement du site de la Lagune de Marchica prévoit la réalisation d'une station touristique composé de 7 cités touristiques (Figure I-11) : Cité d'Atalayoun, Cité des deux mers, la ville nouvelle de Nador, les vergers de Marchica, Marchica Sport, le village des pêcheurs et la Baie des flamands. La première cité touristique (Cité d'Atalayoun) a été achevée depuis 2017.

Le nombre de nuitées touristiques à Nador a augmenté légèrement entre 2008 et 2010 pour diminuer en 2014. Par la suite, une forte augmentation a été notée jusqu'en 2016 ([HCP, 2019](#) ; [HCP, 2017b](#) ; [HCP, 2015](#)) (Figure I-12). En effet, l'offre touristique autour de la Marchica a connu une évolution positive notamment avec les réalisations touristiques de l'Agence pour l'Aménagement du site de la Lagune de Marchica (Hôtel Marchica Lagoon, Cité d'Atalayoun, Marina Atalayoun, Corniche de Nador, Plage artificielle de Nador).



Figure I-11 : Cités touristiques autour de la lagune de Marchica (<http://agencemarchica.gov.ma/>).

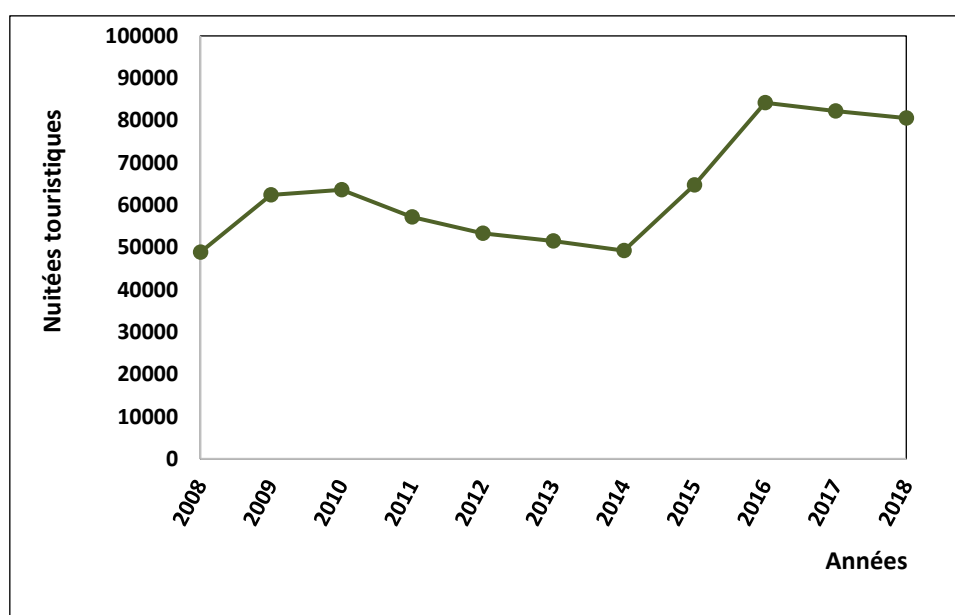


Figure I-12 : Variation des nuitées touristiques à Nador (<https://www.hcp.ma/region-oriental/>).

VII.6. Pêche

La pêche maritime constitue l'une des principales activités économiques au niveau de la zone d'étude. Ce secteur est structuré sous forme de pêche artisanale au niveau de la lagune de Marchica et de pêche côtière débarquée au niveau du port de Beni Ensar. Durant les années 2017 et 2018, la production halieutique au niveau du port de Beni Ensar était de 5 962 379 kg en 2017 et de 6 254 843,5 kg en 2018 incluant les céphalopodes, crustacés, poissons blancs et poissons pélagiques (<http://www.onp.ma/>).

Pour la lagune de Marchica, [Najih et al. \(2015\)](#) avaient mené une étude en 2012, sur l'actualisation de l'état des connaissances de l'activité de pêche artisanale après l'ouverture de la nouvelle passe. Le diagnostic réalisé, basé sur l'exploitation et l'analyse d'indicateurs socio-économiques, a montré que le nombre de pêcheurs est d'environ 900 avec 391 barques réparties sur 16 sites de pêche (Figure I-13) et que les principales espèces pêchées sont : anguille, mullet, sars, seiche, crevette, dorade, poulpe et rouget. Ladite étude a mentionné que la capture globale annuelle réalisée par la pêche artisanale au niveau de la lagune durant l'année 2012 est de 1 157 tonnes.

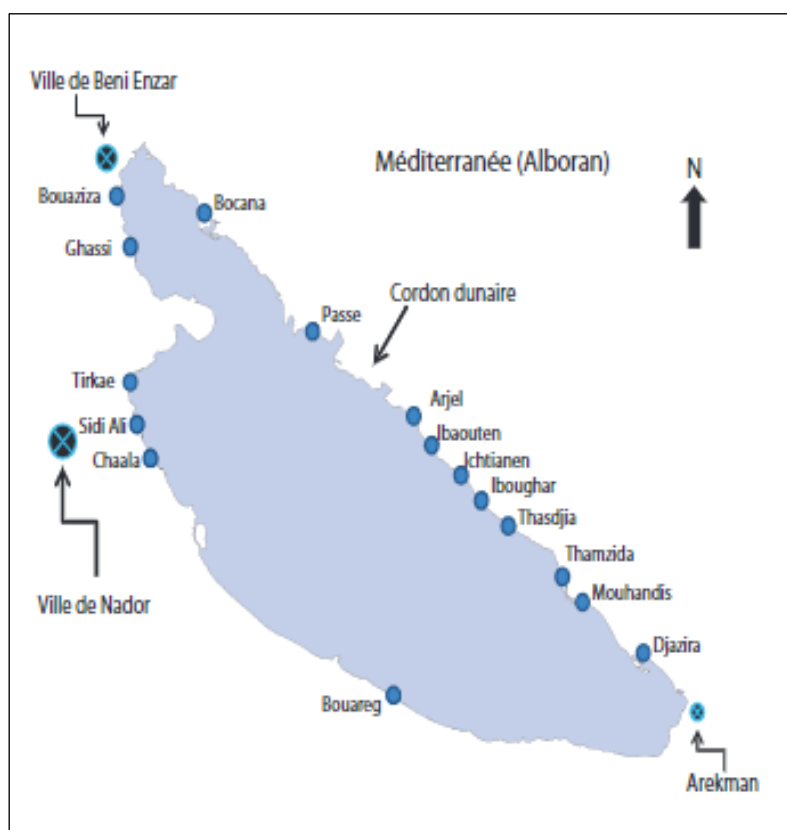


Figure I-13 : Sites de pêche au sein de la lagune de Marchica (in [Najih et al., 2015](#)).

VII.7. Agriculture

L'agriculture est basée essentiellement au niveau de la plaine de Bouarg et est caractérisée par une richesse des cultures. Cette zone irriguée d'une superficie agricole utile totale d'environ 30 500 ha, est caractérisée par les cultures suivantes : l'arboriculture (olivier, vigne, agrumes), les cultures industrielles (betterave à sucre), les cultures fourragères (luzerne vert), les céréales (blé tendre, blé dur, orge), les cultures spéciales (menthe, coriandre), maraîchage (tomate, haricot, artichaut, fève, petit pois) ainsi que des cultures sous serre. Les agriculteurs de cette plaine sont localisés majoritairement au niveau des communes de Bouarg (presque 3000 agriculteurs) et de Kariat Arekmane (presque 2400 agriculteurs); les autres communes du bassin versant de la lagune abritent moins d'agriculteurs ([ORMVAM, 2018](#)).

VIII. Contraintes et pressions sur la lagune de Marchica

Le bassin versant de la lagune de Marchica constitue un véritable pôle de développement économique au niveau de la province de Nador et au niveau de la région de l'Oriental. La zone d'influence de la lagune de Marchica constitue une partie majeure de ce bassin versant et elle est caractérisée par des forces motrices basées essentiellement sur les principales activités économiques de la province de Nador permettant de créer des emplois et de générer des sources de revenus dans les secteurs d'industrie, d'agriculture, de mines, de pêche et de tourisme.

Le secteur industriel au niveau de la zone d'influence de la lagune de Marchica occupe la première place à l'échelle de la région de l'Oriental en termes de chiffre d'affaires et de production. Toutefois, le développement de ces activités sans tenir compte de la protection de l'environnement et du développement durable engendre des contraintes et des pressions sur la lagune de Marchica. La plupart des unités industrielles au niveau de ce bassin versant ont été installées avant 2003, date de publication de la loi des Etudes d'Impact sur l'Environnement qui oblige les industriels à prétraiter les rejets liquides, solides et gazeux avant leur élimination ; ce qui peut exercer des pressions fortes sur la lagune de Marchica notamment en période pluviale et sur la qualité de l'air de l'environnement avoisinant.

L'agriculture au niveau de la plaine de Bouarg constitue un secteur très important. Toutefois, le recours à l'utilisation, souvent abusive, des engrais et des pesticides dans l'agriculture de Bouarg constitue une source principale de pollution de la lagune de Marchica (ORMVAM, 2010).

Les gisements de Ouixane, Aaxara et Setolazar au niveau de la commune d'Iksane (Figure I-14) intensivement exploités ont été abandonnés sans réhabilitation environnementale (Lebret, 2014 ; Bouabdellah et al., 2012), ce qui risque d'impacter négativement la lagune de Marchica à travers le charriage de la pollution minière lors des périodes pluviales (Khafouri et Talbi, 2020 ; Lakrim et al., 2014).

La croissance démographique au niveau de la zone d'influence du bassin versant de la lagune de Marchica n'a pas été accompagnée par la mise en place des équipements nécessaires pour une gestion adéquate d'assainissement liquide et solide constituant ainsi des pressions importantes sur la lagune de Marchica.



Figure I-14 : Les trois sites miniers de fer abandonnés à la commune Iksane, province Nador (in Khafouri et Talbi., 2020).

IX. Aménagement et restauration de la lagune de Marchica

L'Agence pour l'Aménagement du site de la Lagune de Marchica, depuis sa création en 2010, a élaboré un plan d'aménagement spécial (<http://agencemarchica.gov.ma/>) (PAS, périmètre d'intervention de ladite Agence) (Figure I-15), dont les principaux objectifs sont :

- Protéger et mettre en valeur la lagune et ses milieux humides ;
- Préserver le patrimoine naturel, agricole et paysager du site de la lagune ;
- Développer le site dans le cadre d'une cohérence territoriale maîtrisée ;
- Promouvoir un urbanisme durable respectueux du citoyen et de son environnement.

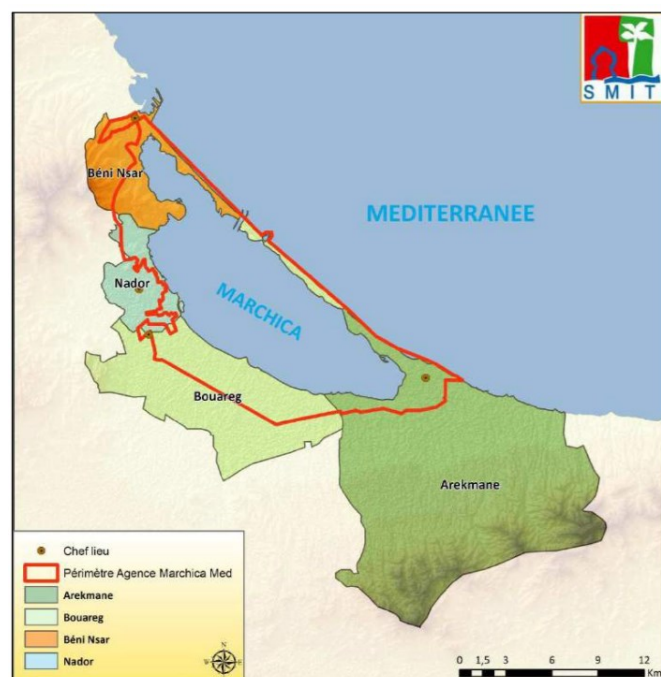


Figure I-15 : PAS Marchica (Département de l'Environnement, 2016c).

IX.1. Ouverture d'une nouvelle passe entre la lagune de Marchica et la mer Méditerranée

La position de la passe a changé plusieurs fois au cours du temps modifiant à chaque fois la dynamique intra-lagunaire. En 2011, dans le cadre du projet Marchica-Med et dans le but d'améliorer le renouvellement des eaux de la lagune et l'accès aux bateaux de plaisance, une nouvelle passe a été ouverte et endiguée. Quant à l'ancienne passe, elle a été fermée par crainte de déstabilisation du cordon littoral et sera aménagée en port de plaisance. Le temps de renouvellement des eaux lagunaire avait été estimé par Hilmi (2005) à environ 80 jours à travers l'ancienne passe. Après l'ouverture de la nouvelle passe (Figure I-16), ce temps est passé, selon l'étude réalisée par l'Agence pour l'Aménagement du site de la Lagune de Marchica à 29 jours. Ce temps de renouvellement des eaux varie selon les saisons et les secteurs de la lagune (Maicu et al., 2018 ; ANDA/INRH, 2018), il serait de l'ordre de 22 jours durant la saison humide (hiver, printemps et automne) et de l'ordre de 35

jours en été (5 à 10 jours au niveau de la zone centrale, 10 à 20 jours au niveau de la zone côtière Sud Est et 20 à 35 jours au niveau des zones eutrophes de Beni Ensar et Kariat Arekmane). Le temps de renouvellement des eaux étant le plus élevé au niveau des deux zones d'eutrophication de Beni Ensar et de Kariat Arekmane (Maicu et al., 2021) (Figure I-17).

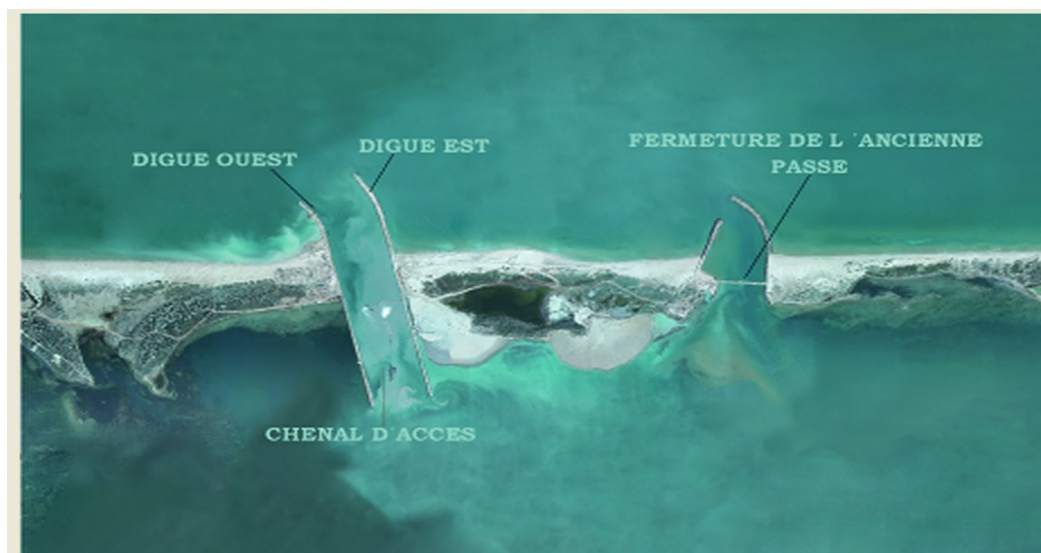


Figure I-16 : Photo illustrant l'ouverture d'une nouvelle passe entre la mer Méditerranée et la lagune de Nador et fermeture de l'ancienne passe (<http://agencemarchica.gov.ma/>).

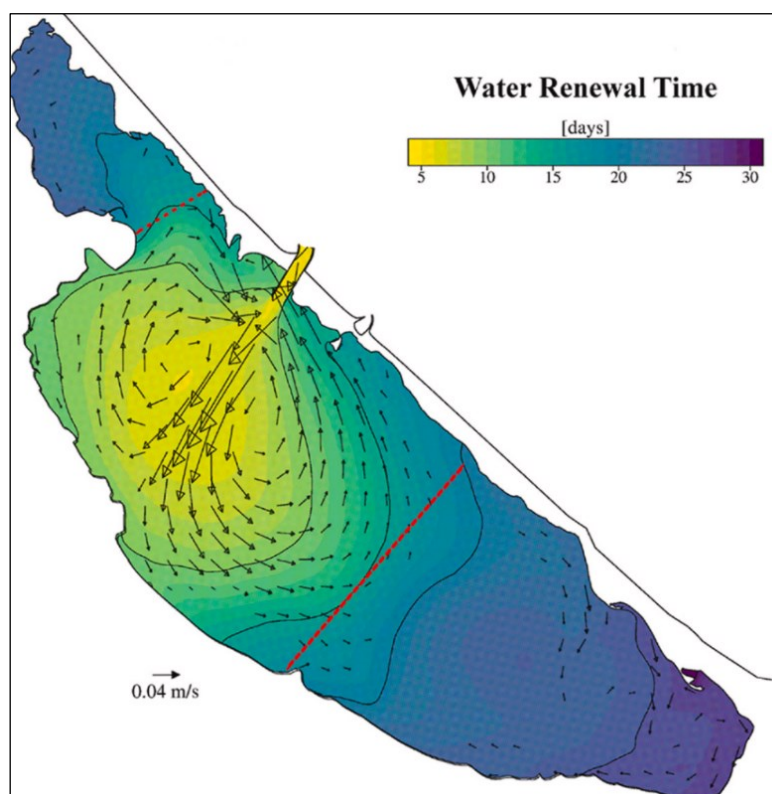


Figure I-17 : Circulation des eaux de la lagune de Nador (Maicu et al., 2021).

Des analyses des eaux lagunaires ont été réalisées avant et après l'ouverture de la passe et ont montré que la qualité microbiologique des eaux s'est nettement améliorée (Tableau I-1).

Tableau I-1 : Comparaison des analyses des eaux lagunaires avant et après l'ouverture de la passe selon les normes en vigueur.

Paramètres	Normes (Valeurs impératives)	2007	2011
Coliformes fécaux (CF) UFC/100ml	2000	6000	320
Streptocoque fécaux (SF) UFC/100ml	400	20000	400
Coliformes totaux (CT) UFC/100ml	-	40000	1400

Source : Département de l'Équipement (2011). Direction des ports et du Domaine Public Maritime, Maroc. Rapport concernant la réalisation d'une nouvelle passe et réaménagement de l'ancienne passe de la lagune de Marchica.

IX.2. Dépollution des eaux de la lagune de Marchica

Dans le cadre de la sauvegarde et la mise en valeur du site de la lagune de Marchica, une convention de partenariat pour la dépollution et la protection de la lagune a été signée en 2010 entre l'Agence Marchica Med, le Département de l'Environnement, le Ministère de l'Intérieur, et l'Agence de Développement des Provinces de l'Oriental. Les travaux de dépollution ont été réalisés par l'Agence Marchica Med et ont concerné la dépollution et le nettoyage des rives de la lagune de Marchica à travers un travail manuel et mécanique par exploitation des tracteurs et des pélicans (Figures I-18, I-19 et I-20) et ce durant la période 2010-2013 ([Département de l'Environnement, 2019a](#)) :

- Travaux de dépollution et purge de l'embouchure de l'Oued Bousardoun ;
- Travaux de dépollution et de purge des rivages de la lagune de Marchica : Commune de Béni Ansar, Commune d'Arekmane, Commune de Nador et la Commune de Bouarg ;
- Travaux de dépollution mécanique du pourtour marin de la lagune ;
- Nettoyage du site et entretien des espaces verts d'Atalayoun ;
- Le recyclage et la valorisation des matériaux issus de la dépollution.

La dépollution des eaux lagunaires 2010 - 2013 a permis d'extraire environ 40 000 tonnes de matériaux vaseux qui ont été transportés vers la décharge provinciale et 400 tonnes de déchets recyclables dont notamment le plastique ont été valorisés sur site. Depuis 2013, l'Agence pour l'Aménagement du site de la Lagune de Marchica a été chargé de la collecte des déchets solides autour de la lagune de Marchica afin d'éviter les rejets de ces déchets dans les eaux lagunaires. Par ailleurs, en 2018 ladite agence a organisé une grande opération de nettoyage, de dragage et de dépollution au niveau de la plage artificielle de Nador et de ses abords (oued Cabaillo et son estuaire), ayant pour objectif principal l'amélioration de la qualité des eaux et les conditions de baignade. La quantité des matériaux extraite est estimée à 130 000 m³ ([Département de l'Environnement, 2019a](#)).



Figure I-18 : Photos illustrant l'état de pollution des eaux de la lagune de Marchica avant la dépollution.
(<http://agencemarchica.gov.ma/>).



Figure I-19 : Photos montrant les travaux de dépollution des eaux de la lagune de Marchica.
(<http://agencemarchica.gov.ma/>).



Figure I-20 : Photos illustrant l'état après les travaux de dépollution des eaux de la lagune de Marchica.
(<http://agencemarchica.gov.ma/>).

IX.3. Plages autour de la lagune de Marchica

Le littoral autour de la lagune de Marchica abrite 4 plages à savoir :

- La plage Miami - Bocana ;
- La plage Al Mohandis ;
- La plage artificielle de la corniche de Nador ;
- La plage de Kariat Arekmane.

A l'exception de la plage artificielle de la corniche de Nador influencée par le bassin versant, les trois autres plages sont situées à l'extérieur de la lagune. Ces plages font l'objet de la surveillance de la qualité des eaux de baignade dans le cadre du Programme National de la qualité des Eaux de Baignade piloté par le Laboratoire National des Etudes et de la Surveillance de la Pollution. Le dernier rapport ([Département de l'Environnement, 2021](#)) a montré que la qualité microbiologique des eaux de baignade est souvent entre excellente et bonne pour l'ensemble des plages autour de la lagune de Marchica. La plage Miami - Bocana a fait l'objet d'étude du profil des eaux de baignade.

IX.4. Création du parc ornithologique

Le parc ornithologique a été créé en transformant les anciens bassins de lagunage des eaux usées de la ville de Nador, et ce pour la reconstitution des milieux d'habitat naturels d'oiseaux migrateurs (Figure I-21). Les principales phases de ce projet sont :

- Dragage et comblement des bassins ;
- Confortement des digues et passes hydrauliques ;
- Aménagements paysagers et plan d'eau douce ;
- Plantation ;
- Réalisation du centre d'accueil, des postes d'observation et signalétique.

Ce parc est doté d'une infrastructure d'accueil pour des fins scientifiques et pédagogiques dans le bassin méditerranéen (<http://www.agencemarchica.gov.ma/>) .

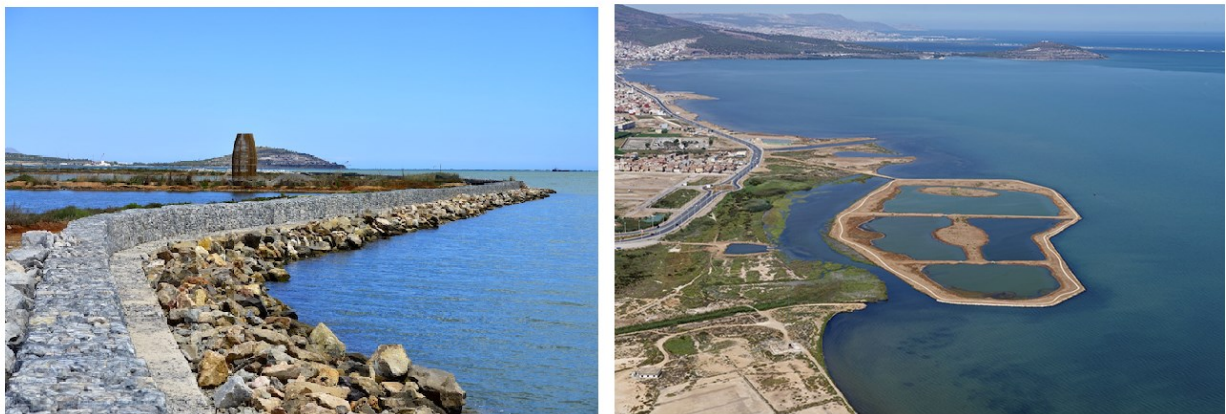


Figure I-21 : Photos du parc ornithologique au niveau de la lagune de Marchica. (<http://agencemarchica.gov.ma/>).

IX.5. Installation des Biohuts dans la marina d'Atalayoun

En 2014, dans le cadre d'un partenariat entre la Fondation Mohammed VI pour la Protection de l'Environnement et le Conservatoire du Littoral et des Rivages Lacustres Français ; 50 dispositifs « Biohut » (Figure I-22) ont été immergées sous les pontons du port de plaisance d'Atalayoune avec un appui de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (RMC), ECOCEAN et IFREMER. L'objectif principal de cette nurserie artificielle est de favoriser le développement des alevins, dont l'habitat naturel a été détruit par la construction d'aménagements côtiers (Fondation Mohammed VI pour la protection de l'Environnement, 2014). Les habitats artificiels (Biohut) permettent de contribuer à la reconstitution de certaines espèces menacées notamment le mérou. Le suivi bimensuel pendant une durée de trois ans a permis de conclure que les Biohuts peuvent être considérés comme des réservoirs pour les jeunes mérous, y compris l'espèce emblématique de la Méditerranée le mérou brun ; et peuvent aussi servir de support pour la création de petites réserves marines, pouvant favoriser à long terme la reconstitution de certaines espèces menacées (Bazairi, 2021).



Figure I-22 : Installation des biohuts au niveau du port de plaisance d'Atalayoune, lagune de Marchica ([Fondation Mohammed VI pour la protection de l'Environnement, 2014](#)).

IX.6. Mise en place d'une ferme pilote d'algoculture dans la lagune de Marchica

La production d'algues marines, qu'il s'agisse de stocks sauvages ou d'aquaculture, représente un moyen important d'élimination du CO₂ de l'atmosphère ([Duarte et al., 2017](#)). Les algues marines contribuent de manière significative aux puits de carbone océaniques ([Krause-Jensen et Duarte, 2016](#)). Généralement, les algues sont capables d'absorber de grandes quantités d'azote et de phosphore et produire des quantités importantes d'oxygène permettant la réduction du phénomène d'eutrophisation ([Kassila et al., 2019](#) ; [Xiao et al., 2017](#) ; [Seghetta et al., 2016](#) ; [Fei, 2004](#)).

Dans une perspective d'exploiter le potentiel trophique de la lagune de Marchica, de procéder à sa restauration écologique et de promouvoir l'intégration des projets écologiques dans le cadre des changements climatiques à intérêts économiques pour la population avoisinante, une ferme pilote d'algoculture dans la lagune de Nador a été implantée dans le cadre du projet Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) - Banque Mondiale (2012 -2017). Cette ferme a fait l'objet d'un partenariat entre le Ministère délégué chargé de l'Environnement et l'Agence Nationale de Développement d'Aquaculture (ANDA), avec un appui technique du Département des Pêches Maritimes et un appui scientifique de l'INRH (Centre Régional Nador) (www.environnement.gov.ma/).

Le projet a fait l'objet d'une étude de faisabilité et d'une étude d'impact environnemental et social. Le déroulement de mise en place de cette ferme pilote a concerné deux phases :

- ❖ 1^{ère} Phase : Installation et exploitation de l'unité d'essai de la conformité de la technique de culture des algues sur une superficie de 5 ha durant l'année 2016.
- ❖ 2^{ème} Phase : Extension de l'installation de la ferme d'algoculture avec changement de la technique des cultures des algues sur une superficie de 6 ha durant l'année 2017.

La ferme d'algoculture est installée dans la commune de Bouarg (Figure I-23), la superficie totale prévue étant de 28 ha avec une production de 1300 tonnes de *Gracilaria gracilis* par année, destinés principalement pour la production de l'agar agar. La « Coopérative Marchica des pêcheurs », porteuse de ce projet, a bénéficié d'un encadrement et d'un appui technique et financier depuis le démarrage du projet, et ce afin de garantir la pérennité d'une exploitation de culture d'algues au niveau de la lagune de Marchica.



Figure I-23 : Ferme pilote d'algoculture au sein de la lagune de Marchica (<https://www.anda.gov.ma/fr/aquaculture-sociale>).

IX.7. Installation des récifs artificiels

Dans le cadre d'un partenariat entre la Fondation Mohammed VI pour la Protection de l'Environnement et l'Agence pour l'Aménagement du site de la Lagune de Marchica, et entre la Fondation Mohammed VI pour la Protection de l'Environnement et le Conservatoire du Littoral et des Rivages Lacustres Français ; un projet de création de réserves biologiques au niveau de la lagune de Marchica a été réalisé durant l'année 2018 à travers l'implantation des récifs artificiels à côté de la passe (Figure I-24). Ce projet va permettre de favoriser la reproduction des poissons et soutenir la biodiversité de la lagune (<https://www.fm6e.org/fr/-/depollution-de-la-lagune-de-nador/introduction.html>); <http://agencemarchica.gov.ma/>).



Figure I-24 : Immersion des récifs artificiels au niveau de la lagune de Marchica (<http://agencemarchica.gov.ma/>).

IX.8. Assainissement liquide

Le programme national d'assainissement liquide et d'épuration des eaux usées (PNA) au niveau urbain a été élaboré en 2006 et révisé en 2008 dont les principaux objectifs étant de réduire la pollution domestique de 50 % en 2016, de 60 % en 2020 et de 100 % en 2030. En milieu rural, pour résorber le retard enregistré dans l'assainissement liquide, un projet national d'assainissement rural (PNAR) a été élaboré ayant comme objectifs, l'éradication de la défécation dans la nature d'ici 2035 avec un taux d'équipement adéquat des ménages ruraux de 50 % en 2035 (<https://www.environnement.gov.ma/>). En 2017, il a été procédé à l'élaboration d'un plan de mutualisation des programmes et plans d'assainissement (PNA, PNAR) et de réutilisation des eaux usées traitées (PNREU).

Le traitement des eaux usées de la population du bassin versant de la lagune de Marchica est assuré par l'ONEE-Branche Eau moyennant trois stations d'épuration des eaux usées (STEPs) dans le cadre du programme national d'assainissement liquide mutualisé (PNAM)) (Tableau I-2) :

- ❖ La STEP du Grand Nador de type Boue activée située dans la commune de Bouarg ;
- ❖ La STEP d'Al Aroui de type lagunage naturel ;
- ❖ La STEP d'Arekmane de type lagunage naturel.

Le taux de raccordement dans le milieu urbain est de 75 % alors qu'en milieu rural le traitement des eaux usées concerne essentiellement les centres et le reste est couvert par des fosses septiques. Deux autres STEP s sont en cours de construction dans le bassin versant de la lagune de Marchica (Tableau I-2), à savoir la STEP de Beni Ensar, Farkhana et le projet touristique d'Atalayoun qui va permettre de soulager la STEP du Grand Nador dont la capacité est presque saturée ; et l'extension de la STEP d'AlAroui dont les eaux usées traitées sont rejetées au niveau d'oued Selouane pour atteindre la lagune de Marchica.

Tableau I-2 : STEPs au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica (Département de l'Environnement, 2019a).

Communes	Type STEP	Niveau traitement	Date de mise en service	Capacité STEP
Beni Ensar Nador Zeghanghane Beni Bouifrou Ihaddadene Selouane Bouarg	STEP Grand Nador Boues activées	Tertiaire	2010	20600 m ³ /j
Al Aaroui	STEP Al Aaroui Lagunage naturel	Secondaire	2004	1378 m ³ /j
Kariat Arekmane	STEP Arekmane Lagunage naturel	Tertiaire	2013	1500 m ³ /j
Beni Ensar Farkhana Projet touristique Atalayoun	Boue activée	Tertiaire	En cours de construction	7023 m ³ /j à l'horizon 2030
Al Aaroui	Extension et remplacement du lagunage naturel par le lagunage aéré	Tertiaire	Encours de construction	9865 m ³ /j à l'horizon 2030

IX.9. Déchets solides

Le programme national des déchets ménagers (PNDM) 2008-2023, consiste à atteindre un taux de collecte de 100%, réaliser des décharges contrôlées et des centres d'enfouissement et de valorisation (CEV), réhabiliter ou fermer toutes les décharges sauvages existantes, développer la filière de « tri-recyclage-valorisation » pour atteindre un taux de 20 % et la mise en place des plans directeurs de gestion des déchets ménagers et assimilés dans les provinces et préfectures (www.environnement.gov.ma). Des plans directeurs de gestion des déchets ménagers et assimilés ont été lancés depuis 2010 au niveau de toutes les provinces du Maroc. Au niveau de la province de Nador, un centre d'enfouissement technique des déchets solides a été construit en 2011 dans le cadre du PNDM pour l'élimination des déchets ménagers et assimilés (CET). Ce centre est en cours de transition vers un centre d'enfouissement et de valorisation des déchets (CEV) conformément aux objectifs du PNDM. La croissance démographique et l'urbanisation constituent les principales forces motrices de l'augmentation importante des gisements de déchets ménagers au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica. Le plan directeur des déchets ménagers de la province de Nador prévoit l'extension de la décharge actuelle et la création de 3 centres de transfert des déchets.

Pour les communes du bassin versant de la lagune, les déchets sont acheminés directement vers le CET. La gestion des déchets solides au niveau de la zone d'étude est réalisée par les communes à l'exception des villes de Nador, Beni Ensar et Zeghaghane qui ont confié cette tâche à la gestion déléguée des services de collecte et de nettoyage. L'Etablissement Intercommunal du Grand Nador a confié la mise en service du CET à un opérateur privé à travers un contrat de gestion depuis 2015. Malgré les efforts réalisés dans le cadre du PNDM au niveau de la province de Nador, certains points noirs existent toujours notamment sur les abords des oueds, ce qui risque d'impacter la lagune à travers le charriage de ces déchets en période pluviale. Les quantités des déchets ménagers collectés en 2018 au niveau dudit bassin et le lieu de leurs rejets sont citées dans le tableau I-3.

Tableau I-3 : Quantités de déchets ménagers collectés au niveau du bassin versant de la Marchica en 2018
(Source : Etablissement Intercommunale du Grand Nador 2018).

Commune	Quantité des déchets ménagers collectés (T/an) en 2018	Lieu de rejet
Beni Ensar	13 028,36	CET Ouled Settout
Nador	54 105,94	
Zeghanghane	10 156,14	
Beni Bouifrou	898,84	
Ihaddadene	1 730,30	
Selouane	7 518,26	
Bouarg	2 575,56	
Al Aaroui	11 005,06	
KariatArekmane	1 640,52	
Oulad settout	269,22	
Iksane	3 859,54	Séchage CET Ouled Settout
ONEE (Boues STEP Grand Nador)	4 405,9	

X. Conclusion

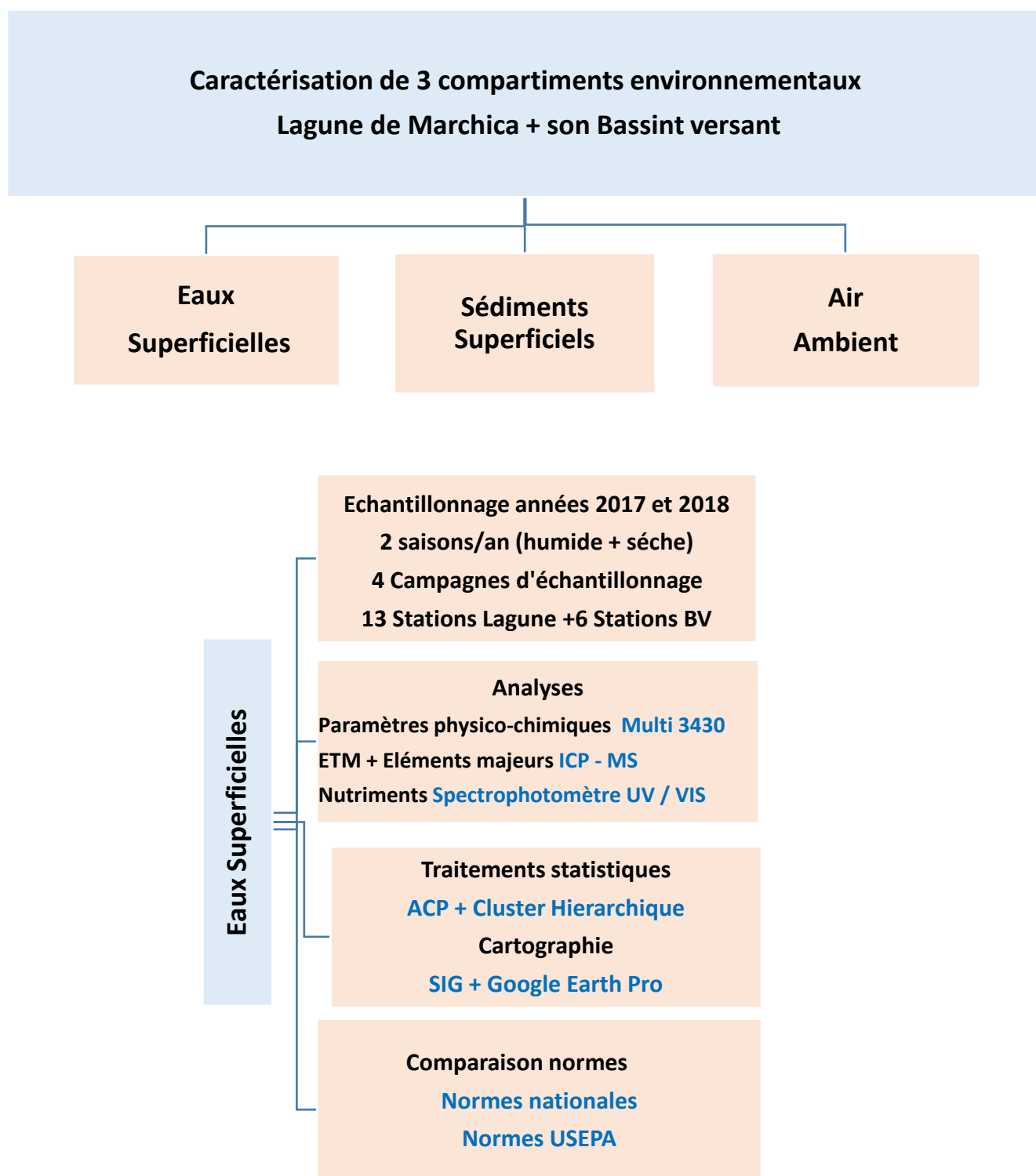
La lagune de Marchica et son bassin versant présentent des enjeux importants basés essentiellement sur des activités socio-économiques diversifiées. Toutefois, le développement de ces activités, sans tenir compte de la protection de l'environnement et du développement durable, génère des contraintes et des pressions sur la lagune notamment sur la qualité des eaux, des sédiments superficiels et sur la qualité de l'air. La dernière décennie a été marquée par des aménagements et des actions de restauration résumés dans la figure I-25. Il est donc important de procéder à l'évaluation environnementale de cet écosystème en vue d'évaluer les retombées des diverses actions de restauration et d'aménagement réalisées dernièrement dans la lagune de Marchia et son bassin versant.



Figure I-25 : Schéma de la restauration écologique de la lagune de Marchica durant la dernière décennie.

Chapitre II : Approches méthodologiques

Schéma organisationnel de l'évaluation environnementale de la lagune de Marchica et de son bassin versant



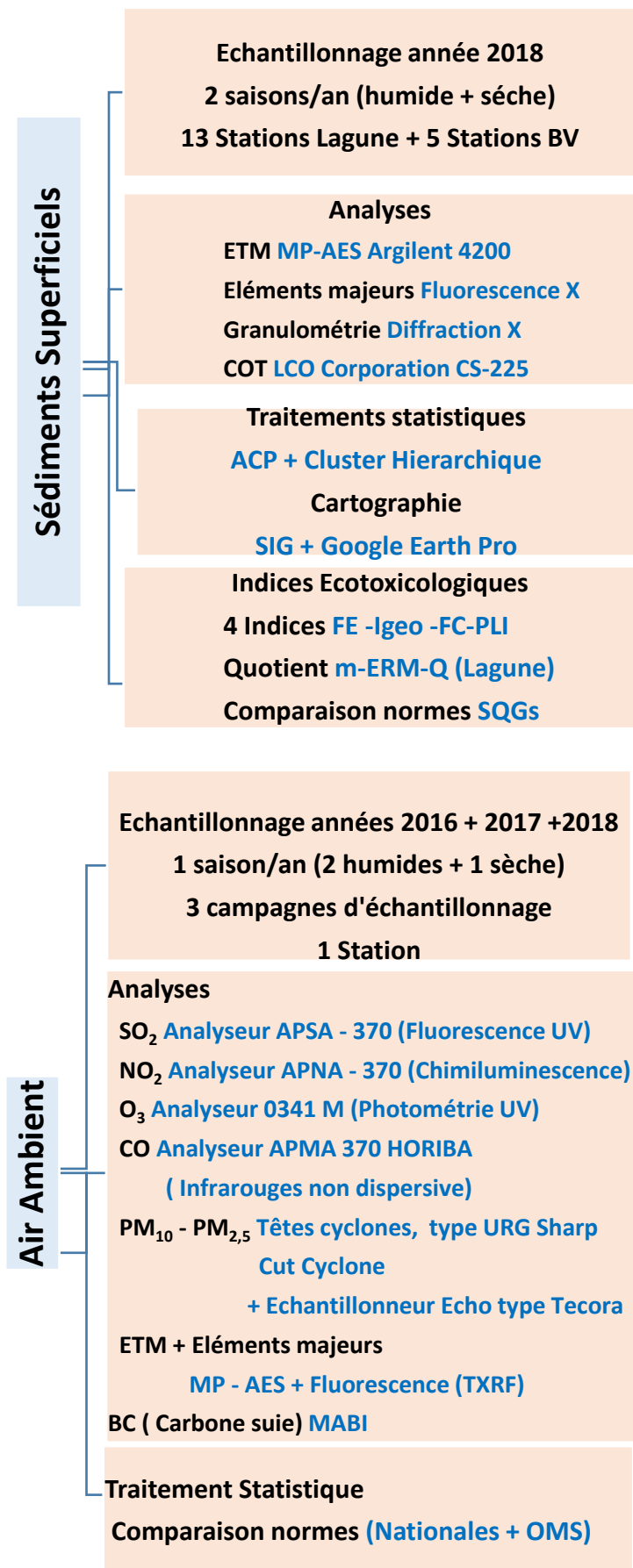


Figure II-1 : Schéma organisationnel de l'évaluation environnementale de la lagune de Marchica et son bassin versant.

I. Introduction

L'évaluation environnementale des trois compartiments Eau, Sédiment et Air nécessite plusieurs étapes incluant l'identification des stations d'échantillonnage, les prélèvements des échantillons, les analyses, le calcul des facteurs écotoxicologiques, les traitements statistiques et la comparaison des résultats des analyses avec les normes en vigueur. Ce chapitre décrit les approches méthodologiques adoptées pour l'évaluation environnementale des trois compartiments précités incluant la stratégie d'échantillonnage, les prélèvements des échantillons et les méthodes d'analyses.

La caractérisation du compartiment Eau a été réalisée à travers les analyses des paramètres physico-chimiques, des nutriments, des éléments traces métalliques et des éléments majeurs. La caractérisation des sédiments a été réalisée à travers les analyses des éléments traces métalliques, des éléments majeurs, de la granulométrie et du carbone organique total. La caractérisation de la qualité de l'air a été réalisée à travers les analyses des polluants gazeux à savoir le dioxyde de soufre, le dioxyde d'azote, le monoxyde de carbone et l'ozone ; des particules en suspension à savoir PM₁₀ et PM_{2,5} ; et du carbone suie (BC).

Les concentrations en nutriments, éléments traces et majeurs des eaux superficielles au niveau des oueds du bassin versant de la lagune de Marchica ont été comparées aux concentrations de la grille de qualité des eaux de surface marocaine (2002) relevant de l'arrêté conjoint du Ministre de l'Équipement et du Ministre chargé de l'Aménagement de Territoire, de l'Urbanisme, et de l'Habitat. Au niveau des rejets de la STEP du Grand Nador, les concentrations de ces éléments ont été comparées aux valeurs limites générales de rejet dans les eaux superficielles ou souterraines (2013) relevant de l'arrêté conjoint du Ministre de l'Intérieur, du Ministre de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, du Ministre de l'Industrie, du Commerce et des Nouvelles Technologies et du Ministre de l'Artisanat.

Les concentrations en éléments traces et majeurs dans les eaux de surface de la lagune de Marchica ont été comparées aux seuils de qualité des eaux de surface américaines USEPA pour la protection de la vie aquatique en eau salée.

Les concentrations en ETM des sédiments superficiels ont été comparées aux valeurs guides sédimentaires américaines (SQGs) pour les écosystèmes marins et d'eau douce respectivement pour la lagune de Marchica et son bassin versant. Des seuils ERL, ERM, TEL et PEL permettent de distinguer les intervalles de concentrations pour lesquelles des effets biologiques néfastes sur les organismes vivants dans les sédiments sont soit faibles (inférieur aux seuils ERL et TEL), soit occasionnellement entre les ERL et ERM ou entre TEL et PEL, soit souvent supérieurs aux seuils ERM ou PEL.

Les concentrations des polluants gazeux (SO₂, NO₂, CO et O₃) ainsi que les matières en suspension PM₁₀ ont été comparées aux normes marocaines de qualité de l'air et les modalités de surveillance de l'air relevant du décret N° 2-09-286 fixant les normes de qualité de l'air et les modalités de surveillance de l'air (2009).

Le risque écotoxicologique des sédiments a été évalué par les indices suivants : facteur d'enrichissement (FE), indice de géoaccumulation (Igeo), facteur de

contamination (CF), indice de charge de pollution (PLI) et le quotient moyen des valeurs seuils (m-ERM-Q). La qualité de l'air a été aussi évaluée par le facteur d'enrichissement des éléments chimiques au niveau des particules PM₁₀ et PM_{2,5}.

Des analyses univariées et multivariées ont permis de traiter les résultats analytiques. L'analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée pour étudier les corrélations entre les paramètres étudiés et les sources de pollution. L'analyse des clusters hiérarchiques (CH) a été appliquée pour évaluer la similitude des sites d'échantillonnage par rapport à la distribution des paramètres étudiés.

II. Stratégie d'échantillonnage des compartiments Eau -Sédiment au niveau de la lagune et son bassin versant

II.1. Protocole d'échantillonnage dans la lagune de Marchica

Le protocole d'échantillonnage des compartiments eaux et sédiments dans la lagune de Marchica a été établi en tenant compte des éléments suivants :

1. Les zones dynamiques de la lagune selon les travaux de [Hamoumi \(2012\)](#) et [Hamoumi et al. \(2011\)](#) :
 - Zone I correspond à la passe entre la lagune et la mer Méditerranée sous influence marine ;
 - Zone II correspond à la bordure interne de l'île barrière sous influence marine ;
 - Zone III correspond à la partie centrale de la lagune, sa bordure sud est sous influence continentale et sa bordure nord ainsi que ses extrémités NW (Nord West à Beni Ensar) et SE (Sud Est à Kariat Arekmane) sont sous influence marine ;
 - Zone IV correspond aux extrémités NW et SE de la lagune sous influence continentale et très confinés ;
 - Zones V et VI correspondent respectivement au partie nord et partie sud de la bordure continentale sous influence continentale.
2. Les stations d'échantillonnages des études environnementales réalisées dans la lagune avant sa restauration, notamment [SEEE/INRH \(2009\)](#) et [Bloundi \(2005\)](#) et ce pour pouvoir comparer nos résultats avec les études antérieures.

II.2. Protocole d'échantillonnage au niveau du bassin versant

Afin d'évaluer l'impact de la pollution tellurique du bassin versant sur la lagune de Marchica, le protocole d'échantillonnage des compartiments eaux et sédiments s'est basé sur l'identification d'une station représentative au niveau de chaque oued parmi les 5 principaux oueds débouchant dans la lagune. Les stations d'échantillonnage ont été choisies sur la base d'un ou plusieurs critères suivants et ce conformément à la stratégie d'échantillonnage du programme UNEP/MAP /MEDPOL ([Département de l'Environnement/LNESP, 2019](#)) :

- Être représentative d'une bande côtière ;
- Être une source probable d'une pollution tellurique ;
- Être le mieux exposé aux éventuels phénomènes de perturbation du milieu ;
- Être accessible pour les opérations d'échantillonnage.

II.3. Identification du réseau d'échantillonnage lagune -bassin versant

Le réseau d'échantillonnage établi couvre l'ensemble des zones de la lagune et son bassin versant. Le choix des stations d'échantillonnage est basé essentiellement sur la présence des sources potentielles de pollution.

Au niveau de la lagune, 13 stations ont été identifiées :

- Deux stations d'eutrophisation à hot spot de pollution se trouvant au NW et au SE de la lagune, et soumises respectivement aux impacts des principaux oueds Ouchen et Akhandouk à Beni Ensar et des oueds Lhdara et Afflioun à Arekmane ;
- Trois stations sur le cordon dunaire sous influence marine ;
- Deux stations au niveau du centre de la lagune également sous influence marine ;
- 6 stations sur la bordure continentale, dont 3 stations aux embouchures d'oued Cabaillo, oued Selouane et canal Bouarg ; une station au niveau des rejets de la STEP du Grand Nador ; une station entre Bouarg et Arekmane et une autre station au niveau de la Marina.

Au niveau du bassin versant, cinq stations pour le compartiment Sédiment et six stations pour le compartiment Eau ont été identifiées :

- Intersection des oueds Ouchen et Akhandouk ;
- Oued Cabaillo ;
- Oued Selouane ;
- Oued Lhdara ;
- Oued Affelioune ;
- Sortie STEP Grand Nador (Compartiment Eau).

Ainsi, le réseau d'échantillonnage mis en place pour ce projet de recherche est composé de 18 stations pour le compartiment Sédiment et de 19 stations pour le compartiment Eau (Figure II-2 et Tableau II-1). La fréquence d'échantillonnage des eaux au niveau de la lagune et son bassin versant durant les deux années 2017 et 2018 est de deux campagnes/an (Humide et Sèche). La fréquence d'échantillonnage des sédiments au niveau de la lagune et son bassin versant durant l'année 2018 est de deux campagnes/an (Humide et Sèche). Les missions d'échantillonnage au niveau de la lagune ont été réalisées en moyennant le Zodiac du Centre Régional INRH à Nador. L'échantillonnage des couches superficielles des sédiments a été effectué par le plongeur de l'INRH et à l'aide d'un carottier du CNESTEN.

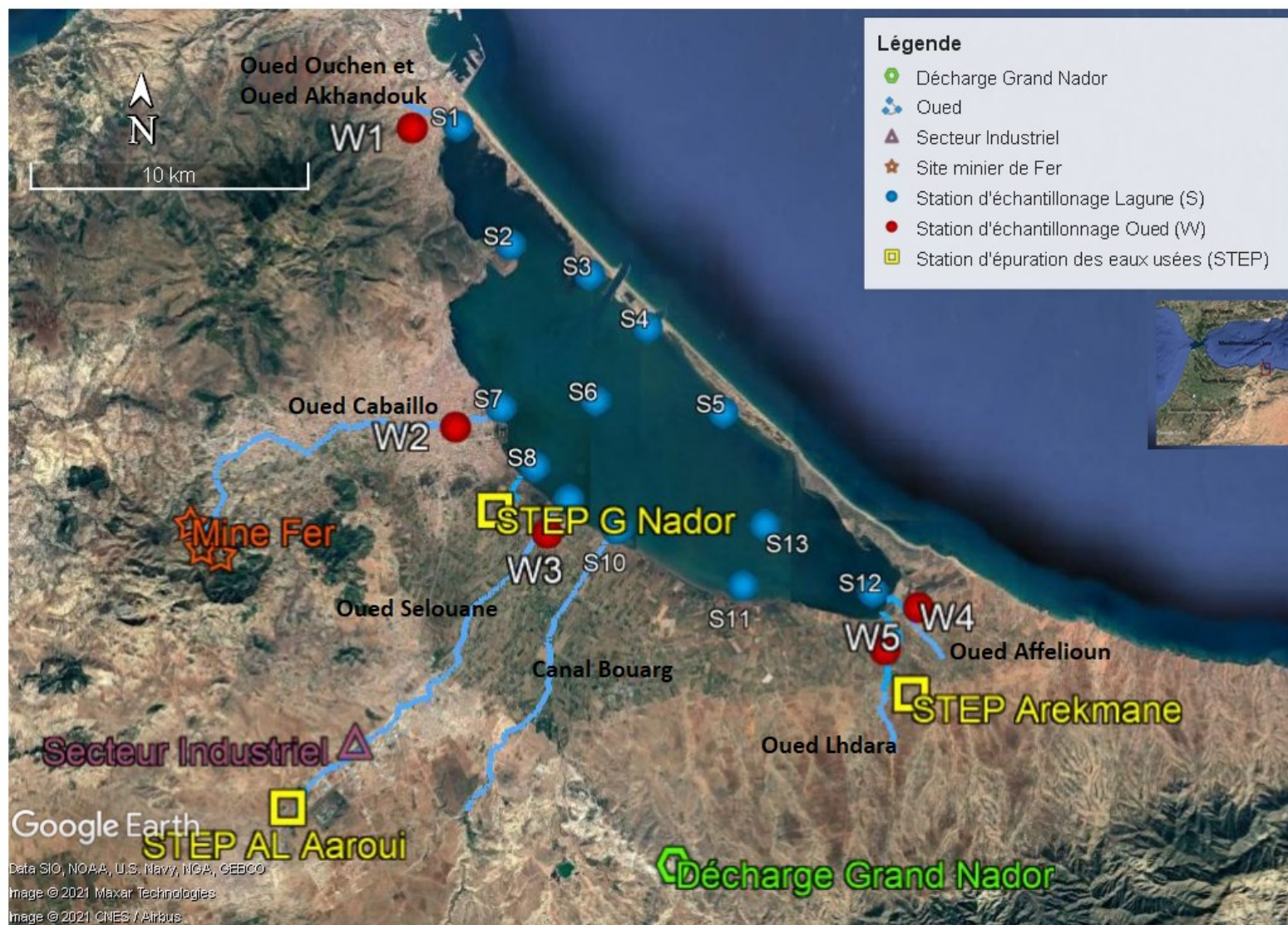


Figure II-2 : Carte illustrant le réseau d'échantillonnage au niveau de la lagune de Marchica et son Bassin Versant.

Tableau II-1 : Réseau d'échantillonnage des compartiments Eau - Sédiment au niveau de la lagune de Marchica et son Bassin Versant.

Code stations d'échantillonnage Lagune	Coordonnées		Profondeur (m) (Sédiment)	Profondeur (m) (Eau)	Localisation Lagune
	Latitude	Longitude			
S1	35,254791	-2,923409	0,50	0,20	Beni Ensar (zone eutrophisée)
S2	35,216733	-2,901683	2,40	0,50	Marina
S3	35,2072	-2,867417	2,80	0,50	A côté de la nouvelle passe (Beni Ensar)
S4	35,190917	-2,84685	0,50	0,50	Ancienne passe
S5	35,163933	-2,816233	3,40	0,50	Entre l'ancienne passe et la plage Mohandis
S6	35,16705	-2,866767	6,80	0,50	Centre Lagune
S7	35,161767	-2,903917	2,40	0,50	En face oued cabaillo
S8	35,142633	-2,895767	1,40	0,50	En face du canal du rejet des eaux usées de la STEP G Nador
S9	35,128633	-2,8708	2,57	0,50	En face oued Selouane
S10	35,125567	-2,857133	0,80	0,50	En face du canal d'irrigation de Bouarg
S11	35,10825	-2,807117	4,20	0,50	Entre Bouarg et Arekmane
S12	35,1046	-2,75155	0,50	0,20	Arekmane (zone eutrophisée)
S13	35,127867	-2,798917	6,20	0,50	Centre lagune (coté Arekmane)
Code stations d'échantillonnage BV					Localisation Bassin versant
W1	35,2558447	-2,92583803	0,30	Entre 0,10 - 0,20	Intersection de deux oueds à la commune de Beni Ensar : Ouchen et Akhandouk
W2	35,1612105	-2,90852527	0,30	Entre 0,10 - 0,20	Oued Cabaillo à la commune de Nador
W3	35,1306873	-2,88340941	0,30	Entre 0,10 - 0,20	Oued Selouane à la commune de Bouarg
W4	35,104354	-2,74753161	0,30	Entre 0,10 - 0,20	Oued Affelioun à la commune de Kariat Arekmane
W5	35,0934792	-2,74551314	0,30	Entre 0,10 - 0,20	Oued Lhdra (Rejet STEP Arekmane) à la commune de Kariat Arekmane
W*	35,1364783	-2,90002981	-	Entre 0,10 - 0,20	Sortie STEP Grand Nador à la commune de Bouarg

III. Prélèvement des compartiments Eau - Sédiment au niveau de la lagune et son bassin versant

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des bouteilles en plastique polypropylène à (0,20 à 0,50 m) de la surface des eaux lagunaires et entre 0,10 et 0,20 m pour les eaux de surface des oueds et la sortie de la station d'épuration du Grand Nador. Les échantillons collectés ont été mis dans des glacières isothermes puis conservés selon les directives de la norme internationale [NM ISO 5667-3](#) pour le stockage et la manutention des échantillons. Les échantillons d'eau destinés à l'analyse des éléments traces ont été acidifiés avec l'acide nitrique (HNO_3) et ceux destinés aux nutriments ont été acidifiés avec l'acide sulfurique (H_2SO_4). Tous les échantillons d'eau ont été conservés à 4 ° C pour des analyses ultérieures.

Pour les sédiments, des couches superficiels (0 - 5 cm) ont été prélevées en quatre sous couches et conservées à une température d'environ 4°C dans des sachets hermétiques zip en plastique transparent. Les sous couches ont été destinées à l'analyse de la granulométrie, le carbone organique total, les ETM et les éléments majeurs.

La position et la profondeur des échantillons prélevés au niveau de la lagune ont été déterminées à l'aide d'un équipement FURUNO FCV-627/587 Fish Finder intégré au zodiac de l'INRH incluant un système GPS et une sonde de profondeur. Au niveau du bassin versant, un GPS a été utilisé pour relever les coordonnées des stations.

IV. Analyses des compartiments Eau - Sédiment au niveau de la lagune et son bassin versant

Les méthodes d'analyses des eaux et sédiments superficiels réalisées dans le cadre de ce travail de recherche sont des méthodes standardisées et référencées (Tableaux II-2 et II-3).

IV.1. Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques : température, pH, salinité, oxygène dissous, turbidité et conductivité ont été mesurés in situ à l'aide d'une sonde d'eau multimètre (WTW, MULTI 3430) étalonnée avant chaque campagne de prélèvement.

IV.2. Nutriments dans les eaux superficielles

Les nutriments dans les eaux ont été analysés à l'aide d'un spectrophotomètre UV / VIS (Perkin Elmer, Lambda 35 UV) au LNEP. Tous les échantillons d'eau ont été filtrés avant analyse avec des filtres en nitrate de cellulose (Sartorius, 0.45µm). Le nitrate ($\text{N} - \text{NO}_3^-$) a été déterminé conformément à la norme [NM ISO 7890-1](#) en eau douce et [DIN 38405- 9](#) en eau salée. Le nitrite ($\text{N} - \text{NO}_2^-$) a été déterminé conformément à la norme [NM ISO 6777](#). L'ammonium ($\text{N} - \text{NH}_4^+$) a été déterminé selon [NM ISO 7150-1](#) en eau douce et [NM ISO 5664](#) en eau salée. L'orthophosphate ($\text{P} - \text{PO}_4^{3-}$) a été déterminée selon la norme [NM ISO 6878](#) pour l'eau douce et l'eau salée.

IV.3. Eléments Traces Métalliques (ETM) et éléments majeurs dans les eaux superficielles

Les éléments traces métalliques et les éléments majeurs dans les eaux superficielles ont été déterminés à l'aide de la méthode ICP-MS « Thermo Scientific XSERIES 2 » au niveau du CNESTEN conformément à la norme [NM ISO 17294-2](#). Un prétraitement des échantillons d'eau a été réalisé en ajoutant 2% de HNO₃ 65% suprapur à chaque échantillon d'eau douce et d'eau salée ; et une dilution de 1000 a été réalisée en ajoutant l'eau ultra-pure avant d'introduire les échantillons dans l'appareil de mesure.

IV.4. ETM et éléments majeurs dans les sédiments superficiels

Les ETM dans les sédiments ont été analysés à l'aide de la spectrométrie d'émission atomique à plasma micro-ondes Agilent 4200 (MP-AES) selon la méthode d'analyse standard [NF X31-147](#) au LNESTP. Les éléments majeurs dans les sédiments ont été analysés au CNESTEN à l'aide d'un système portatif de fluorescence X à dispersion d'énergie (HHXRF) Bruker S1 Turbo SD (Bruker AXS GmbH). Le matériau standard de référence [NIST 2702](#) a été utilisé pour le contrôle qualité.

IV.5. Carbone organique total dans les sédiments superficiels

Le carbone organique total (COT) a été analysé au LETG (Laboratoire Littoral, Environnement, Géomatique, Télédétection) à Nantes, France en utilisant un analyseur de carbone LECO Corporation ([Andrews et al., 2008](#)).

IV.6. Granulométrie des sédiments superficiels

La granulométrie des sédiments superficiels a été mesurée au LETG - Nantes avec un microgranulomètre à diffraction laser (Malvern, Mastersizer) après avoir préparé les sédiments dans une solution d'hexamétaphosphate de sodium ([Gee et al., 2002](#)). La distribution des tailles des particules a été calculée par le programme GRADISTAT ([Blott and Pye., 2001](#)) après chaque mesure, et elle est exprimée en proportions relatives (%) de sable (2 mm-63µm), de limon (63-2 µm) et d'argile (< 2 µm) (Figure II-3).

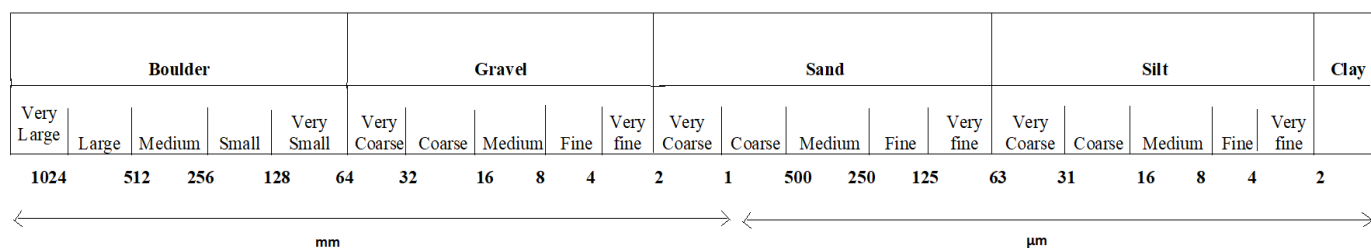


Figure II-3 : Echelle adoptée par GRADISTAT Program (modifié à partir de Udden (1914) et Wentworth).

Tableau II-2 : Méthodes d'analyses standardisées et référencées du compartiment Eau au niveau de la lagune et son bassin versant.

Analyse	Paramètre	Méthode Référence	Appareil de mesure Laboratoire d'analyse
Paramètres physico-chimiques	Temperature (°C)	NM 03.7.008	WTW
	Salinité (mg/l)	NM ISO 7888	Multi-parameter Model 3430
	pH (unite pH)	NM ISO 10523	In Situ
	Oxygen Dissous (mg O ₂ /l)	NM ISO 5814	
	Conductivité Electrique (µs/cm)	NM ISO 7888	
	Turbidité	NM ISO 7027	
Nutriments	Nitrites (mg N-NO ₂ /l)	NM ISO 6777	Spectrophotomètre UV/ VIS
	Nitrates (mg N-NO ₃ /l)	NM ISO 7890-1 Eau douce	(Perkin Elmer, Lambda 35 UV)
		DIN 38405- 9 Eau marine	LNESP, Maroc
	Ammonium (mg N-NH ₄ /l)	NM ISO 7150-1 Eau douce	
		NM ISO 5664 Eau marine	
	Orthophosphates (mg P-PO ₄ /l)	NM ISO 6878	
Eléments majeurs et ETM (µg/l)	Plomb (Pb)	NM ISO 17294-2	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif, de type XSERIE2 de Thermo Fisher
	Cadmium (Cd)		
	Chrome (Cr)		
	Nickel (Ni)		
	Zinc (Zn)		
	Cuivre (Cu)		
	Manganèse (Mn)		
	Fer (Fe), Sodium (Na)		
	Potassium (K)		
	Calcium (Ca)		
	Titium (Ti)		
	Vanadium (V)		
	Strontium (Sr)		

Tableau II-3 : Méthodes d'analyses standardisées et référencées du compartiment Sédiment au niveau de la lagune et son bassin versant.

Analyse	Paramètre	Méthode Référence	Appareil de mesure Laboratoire d’analyse
Eléments majeurs (%)	Aluminium (Al)	Calibration spécifique du système à l’aide de matériaux standards de référence (SRM) de concentrations connues (NIST) et contrôle qualité en utilisant un MSR de type NIST 2702	Système portatif de Fluorescence X à Dispersion d’Energie, de type S1 Turbo SD (Bruker AXS GmbH)
	Silicium (Si)		
	Phosphore (P)		
	Potassium (K)		
	Calcium (Ca)		
	Manganèse (Mn)		
	Fer (Fe)		
	Titium (Ti)		CNESTEN, Maroc
ETM (mg/Kg)	Plomb (Pb)	NFX 31-147	MP-AES Spectrométrie d’émission atomique à plasma micro-ondes Agilent 4200
	Zinc (Zn)		
	Cuivre (Cu)		
	Chrome (Cr)		
	Cobalt (Co)		
	Baryum (Ba)		
Granulométrie (%)	Sable	Gee et al. (2002)	Microgranulomètre à diffraction laser (Malvern, Mastersizer)
	Limon	Blott and Pye (2001)	
	Argile		
			LETG–Nantes Université de Nantes, France
Carbone organique total (%)	COT	Andrews et al. (2008)	LECO Analyseur Carbone
			LETG–Nantes Université de Nantes, France

V. Suivi de la qualité de l'Air

V.1. Site d'échantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé sur la terrasse de la Direction Provinciale de l'Équipement, Transport, Logistique et Eau (DPETLE) de Nador à environ 8 m au-dessus du sol. La DPETLE se trouve à une distance approximative de 500 m de la lagune de Marchica (Figure II-4).



Figure II-4 : Localisation du site d'échantillonnage de l'air (DPETLE) au niveau de la ville de Nador.

V.2. Analyse de la qualité de l'air

Les méthodes d'analyse utilisées pour l'évaluation de la qualité de l'air au niveau de la ville de Nador sont des méthodes standardisées et référencées (Tableaux II-4 et II-5).

V.2.1. Polluants gazeux : SO₂, NO₂, CO et O₃

Les polluants gazeux ont été mesurés lors des deux premières campagnes d'échantillonnage. Les mesures ont été effectuées en continuité pendant 4 jours et ce du 10 au 13 octobre 2016 pour la première campagne et du 05 au 08 avril 2017 pour la deuxième campagne. Le dioxyde d'azote (NO₂) a été mesuré toutes les demi-heures en utilisant une technique de chimiluminescence (Horiba, APNA-370) avec un débit de 0,8 l/min et une sensibilité de détection minimale de 05 ppb pour des concentrations inférieures à 0,2 ppm. L'ozone (O₃) a été mesuré toutes les demi-heures en utilisant la technique de photométrie UV par un analyseur automatique de type O341M (Environnement SA) avec un débit de 1,5 l/min et une sensibilité de détection minimale de 0,4 ppb. Le monoxyde de carbone (CO) a été mesuré tous les quarts d'heure par analyse infrarouge non dispersive par un analyseur automatique de type APMA-370 (HORIBA) avec un débit de 1,5 l/min et une sensibilité minimale de détection de 0,05 ppb pour des concentrations inférieures à 10 ppm. Le dioxyde de soufre (SO₂) a été mesuré uniquement lors de la première campagne toutes les demi-heures en utilisant la technique de fluorescence UV par un analyseur automatique de type APSA-370 (HORIBA) avec un débit de 0,7 l/min et une sensibilité de détection minimale de 05 ppb pour des concentrations inférieures à 0,2 ppm.

V.2.2. Matière particulaire

La matière particulaire (PM₁₀ et PM_{2,5}) a été analysée pendant une période de deux semaines pendant la saison sèche du 17 au 30 juillet 2018. Le protocole d'échantillonnage est basé sur des prélèvements par filtration à l'aide d'un dispositif composé de deux lignes qui fonctionnent en parallèle et simultanément pour collecter séparément les fractions grosses et fines des aérosols. Les têtes de prélèvements URG de type *Sharp Cut Cyclone* sont utilisées pour faire la coupure PM₁₀ et PM_{2,5} à un débit de 1m³/hr (approx. 16.7 l/min). La mesure de la masse de l'aérosol a été réalisée sur des filtres PTFE de 2µm de porosité et 47 mm de diamètre. Ces filtres ont été placés pendant 48h dans le dessiccateur avant d'être pesés afin de minimiser l'effet de la capture de l'humidité de l'atmosphère par les particules. Les teneurs des PM₁₀ et PM_{2,5} (en µg/m³) ont été calculées comme le rapport des poids nets mesurés pour chaque filtre par rapport au volume d'air échantillonné selon l'équation (1) :

$$\text{Concentration de PM (}\mu\text{g/m}^3\text{)} = \text{Poids nets (}\mu\text{g)} / \text{Volume d'air échantillonné (m}^3\text{)} \quad (1)$$

V.2.3. Analyses chimiques des PM₁₀ et PM_{2,5}

La première étape avant l'analyse des particules PM₁₀ et PM_{2,5} est la minéralisation des échantillons. Les filtres collectés ont été soumis à une digestion acide par micro-ondes (Milestone MAXI14) à 200°C pendant 45 minutes ; en ajoutant 8 ml de l'acide nitrique (HNO₃) et 2 ml de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂). Après minéralisation et refroidissement, les solutions ont été ramenées à un volume de 50 ml en ajoutant de l'eau ultra-pure et conservées dans un réfrigérateur à 4°C jusqu'à leurs analyses. Pour chaque lot d'échantillons, un échantillon dit « blanc » contenant les acides utilisés lors de la minéralisation ainsi qu'un filtre blanc a été également préparé selon la même procédure. Le blanc analytique a pour objectif l'évaluation d'une éventuelle contamination lors de la phase de préparation des échantillons. Pour le contrôle qualité, un matériau standard de référence (MSR) de type NIST 2783 a également été préparé de la même manière ayant pour rôle de vérifier la validité et la qualité des résultats obtenus.

Les solutions extraites ont été analysées à l'aide de deux techniques : la fluorescence X à réflexion totale (TXRF) et la spectrométrie d'émission atomique à plasma micro-ondes (MP-AES). Pour l'analyse TXRF, le gallium a été ajouté comme standard interne pour quantifier les concentrations élémentaires. 10 µl de l'échantillon du filtre minéralisé a été pipeté sur un réflecteur siliconé en quartz et séché sous une lampe infrarouge. L'échantillon a ensuite été analysé par TXRF de type S2-Picofox de Bruker. Cette technique a été utilisée pour mesurer les concentrations des éléments suivants P, K, Ca, V, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Zn, Sr, Pb et Ba. Les teneurs en Al et en Na ont été mesurées par la spectrométrie MP-AES.

V.2.4. Carbone suie

Le carbone suie appelé également Black Carbon (BC) a été mesuré dans les filtres chargés par la fraction fine PM_{2,5} en utilisant un instrument de mesure de l'absorption du BC à plusieurs longueurs d'onde appelé MABI (Multi-wavelength Absorption Black Carbon Instrument). La mesure du BC est faite pour sept

longueurs d'onde différentes (405 nm, 465 nm, 525 nm, 639 nm, 870 nm, 940 nm et 1050 nm) (Manohar et al., 2021), ce qui permet de différencier l'origine des sources de combustion et ainsi d'estimer la part de carbone suie (Mutahi et al., 2021 ; Tuso et al., 2020) issue de :

- ❖ La combustion d'énergies fossiles (FBC) (principalement de trafic routier),
- ❖ La combustion de biomasse (BBC).

Tableau II-4 : Méthodes et techniques utilisées pour la mesure des polluants gazeux au niveau de la ville de Nador.

Contaminants	Type de mesure	Méthode d'échantillonnage et d'analyse	Appareil de mesure Laboratoire d'analyse
Dioxyde de soufre (SO ₂)	En continu	Le principe de fluorescence ultraviolette (UV) permet de mesurer les concentrations de SO ₂ dans l'air	Analyseur du dioxyde de soufre, type APSA-370 HORIBA CNESTEN Maroc
Oxyde d'azote (NO _x = NO + NO ₂)	En continu	La mesure de la concentration de NO _x est basée sur le principe de chimiluminescence, soit la production d'énergie sous forme de lumière résultant d'une réaction chimique	Analyseur d'oxydes d'azote, type APNA-370 HORIBA CNESTEN Maroc
Ozone (O ₃)	En continu	Dans la stratosphère, l'ozone a la capacité d'absorber les rayons ultraviolets du soleil. Cette propriété est utilisée par les instruments de mesure de l'ozone ; c'est ce qu'on appelle l'«absorption ultraviolette»	Analyseur d'ozone, type O341M d'Environnement S.A CNESTEN Maroc
Monoxyde de carbone (CO)	En continu	La liaison entre le carbone et l'oxygène absorbe la lumière infrarouge de longueur d'onde connue. L'échantillon d'air est aspiré vers l'analyseur, où il est soumis à un rayonnement infrarouge (IR) à la longueur d'onde spécifique au CO	Analyseur de monoxyde de carbone, type APMA-370 HORIBA CNESTEN Maroc

Tableau II-5 : Méthodes et techniques utilisées pour la mesure des particules en suspension et du carbone suie au niveau de la ville de Nador.

Contaminants	Type de mesure	Méthode d'échantillonnage et d'analyse	Appareil de mesure Laboratoire d'analyse
Matières particulaires de diamètre 10 et 2,5 µm (PM ₁₀ et PM _{2,5})	Séquentielle	L'échantillonnage séquentiel des particules est fait de façon similaire à l'échantillonnage en continu : l'air aspiré passe à travers une tête sélective, avant d'être déposé sur un filtre. Ce filtre est ensuite envoyé au laboratoire pour être soumis à des analyses physico-chimiques	- Têtes de prélèvements URG de type Sharp Cut Cyclone. - Echantillonneur faible débit (1m ³ /h) de type Echo PM de Tecora CNESTEN Maroc
Eléments majeurs et traces dans les fractions PM _{2,5} et PM ₁₀	Phosphore (P) Potassium (K) Calcium (Ca) Chrome (Cr) Cuivre (Cu) Fer (Fe) Manganèse (Mn) Vanadium(V) Titium (Ti) Nickel (Ni) Zinc (Zn) Strontium (Sr) Plomb (Pb) Baryum (Ba) Aluminium (Al) Sodium (Na)	Mise en solution (minéralisation) des filtres par attaque acide en utilisant un micro-onde. Méthode de digestion inspirée de la norme NF EN 14902 : 2005	Spectromètre de Fluorescence X à Réflexion Totale (TXRF), de type S2 Picofox de Bruker AXS CNESTEN Maroc Microwave Plasma Atomic Emission Spectrometry (MP-AES) LNESP, Rabat, Maroc
Carbone suie (BC)	En continu	Mesure de la transmission de la lumière à sept longueurs d'onde fixes (405 nm, 465 nm, 525 nm, 639 nm, 870 nm, 940 nm et 1050 nm) à travers un filtre PM avant et après échantillonnage des PM à l'aide d'un d'échantillonneur de particules séparé	Multi-wavelength Absorption Black Carbon Instrument (MABI) CNESTEN Maroc

VI. Analyses statistiques et géomatiques

Des analyses univariées et multivariées ont permis de traiter les données analytiques en termes de distribution et de corrélation entre les paramètres étudiés. Le test de Shapiro-Wilk a été appliqué pour examiner la normalité, et le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été appliqué pour explorer la saisonnalité de chaque paramètre. Le test de corrélation Spearman a été appliqué pour identifier la corrélation significative entre les paramètres étudiés. Ces tests ont été réalisés avec le logiciel R 3.6.1 et le logiciel IBM SPSS Statistics version 20.

L'analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée après transformation des données pour analyser les ETM, éléments majeurs, la granulométrie et le COT des sédiments superficiels, et les ETM et les éléments majeurs dans les eaux superficielles de la lagune et de son bassin versant ainsi que pour analyser les corrélations entre les différents paramètres (Jackson, 2005).

L'analyse de classification automatique hiérarchique (CAH), basée sur la distance euclidienne au carré et la méthode de Ward avec l'utilisation d'un test de profil de similarité (SIMPROF) pour évaluer la similitude des sites d'échantillonnage par rapport aux concentrations des ETM et éléments majeurs dans l'eau et dans les sédiments et définir le nombre optimal de stations de groupe. La variabilité entre les sites et les saisons pour les éléments étudiés a été identifiée en utilisant le test PERMANOVA.

L'ACP et CH ont été appliquées en utilisant le logiciel PRIMER v6 (Clarke et Gorley, 2006) et le logiciel IBM SPSS Statistics version 20.

Toutes les méthodes statistiques ont été appliquées avec un niveau de confiance de 95% ($p < 0,05$). Les cartes ont été réalisées avec le logiciel ESRI ArcGIS Desktop 10 et Google Earth Pro.

VII. Indices d'évaluation des risques écologiques des compartiments Sédiment et Air

La contamination des sédiments du bassin versant peut engendrer des effets négatifs par la diffusion de la pollution dans les eaux soit souterraines ou aquatiques avec le risque de contamination de la biodiversité marine.

Le risque écotoxicologique des sédiments a été évalué à l'aide de divers indices : facteur d'enrichissement (FE), indice de géoaccumulation (Igeo), facteur de contamination (CF), indice de charge de pollution (PLI) et le quotient moyen des valeurs seuils (m-ERM-Q). La qualité de l'air a été évaluée par le facteur d'enrichissement des éléments chimiques au niveau des particules PM₁₀ et PM_{2,5}.

Les principaux éléments conservatifs couramment utilisés pour la normalisation des teneurs élémentaires sont les éléments les plus abondants sur la terre comme l'aluminium et le fer. L'aluminium a été utilisé par plusieurs auteurs comme élément de référence pour évaluer la qualité des sédiments (Hayzoun, 2014 ; Tessier et al., 2011 ; Niencheski et al., 1994 ; Schropp et al., 1990 ; Bruland et al., 1974) et la qualité de l'air (Tahri et al., 2017 ; Hsu et al., 2016 ; Das et al., 2015). De même, le

fer a été utilisé par plusieurs auteurs comme élément de référence pour évaluer la qualité des sédiments (Okay et al., 2016 ; Maanan et al., 2013 ; Schiff et Weisberg, 1999 ; Daskalakis et O'Connor, 1995 ; Blomqvist et al., 1992 ; White et al., 1985) et la qualité de l'air (Enamorado-Báez et al., 2015 ; Lee et Hieu, 2011). Dans cette étude, le fer a été choisi comme élément conservateur.

Maanan et al., (2015) ont établis en 2013 les valeurs locales de fond (Local Backround Values, LBV) pour les sédiments de la lagune de Marchica pour six ETM Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn en adoptant les concentrations moyennes de deux carottes de presque 1 m de profondeur dans deux zones non polluées. Au niveau du bassin versant, aucune étude n'a été réalisée pour déterminer les LBV. A cet effet, les valeurs de référence de Rudnick et Gao (2003) pour les concentrations de la croûte continentale (Upper Continental Crust, UCC) ont été utilisées comme fond géochimique naturel.

VII.1. Facteur d'enrichissement

Le facteur d'enrichissement (FE) d'un élément chimique permet d'évaluer la pollution anthropique de cet élément par rapport au background naturel. Il est calculé par comparaison de la concentration élémentaire avec celle de la croûte continentale supérieure (UCC) selon la formule suivante (Sutherland et al., 2000 ; Poissant et al., 1994 ; Schropp et al., 1990 ; Lawson et Winchester, 1979) :

$$FE = (C_{ETM}/C_{Normalisation}) \text{ Echantillon Sédiment ou Filtre} / (C_{ETM}/C_{Normalisation}) \text{ Croûte terrestre}$$

Pour les sédiments, les facteurs d'enrichissement sont classés en cinq niveaux de pollution d'après Sutherland (2000) (Tableau II-6).

Tableau II-6 : Classification des niveaux de pollution des sédiments selon des intervalles de valeurs du facteur d'enrichissement facteur (FE) (Sutherland, 2000).

Classe	FE	Niveau de pollution
1	$FE \leq 2$	Non enrichi ou enrichissement anthropique minimal
2	$2 < FE < 5$	Enrichissement modéré
3	$5 < FE < 20$	Enrichissement significatif
4	$20 < FE < 40$	Enrichissement très fort
5	$FE > 40$	Enrichissement extrême

Pour la qualité de l'air, les facteurs d'enrichissement sont classés en quatre niveaux de contamination (Tableau II-7) d'après Tahri et al., (2017) et Das et al., (2015).

Tableau II-7 : Classification des niveaux de pollution de l'air selon des intervalles de valeurs du facteur d'enrichissement (FE) (Das et al., 2015).

Classe	FE	Niveau de pollution
1	$EF < 10$	Non enrichi ou enrichissement anthropique minimal
2	$10 < EF < 100$	Enrichissement modéré
3	$100 < EF < 1000$	Enrichissement très fort
4	$EF > 1000$	Enrichissement extrême

VII.2. Indice de géoaccumulation

L'indice de géoaccumulation (I_{geo}) d'un élément chimique permet d'évaluer l'état de pollution anthropique de cet élément au niveau du sédiment. Il est basé sur la comparaison de la concentration élémentaire dans le sédiment par rapport à celle du fond géochimique naturel pour le même élément selon la formule suivante (Müller, 1979) :

$$I_{geo} = \log_2 (C_{\text{Trace metal}} / 1.5 C_{\text{Background}})$$

L'indice de géoaccumulation est classé en 7 niveaux de pollution (Müller, 1979) variant d'un état non pollué à un état extrêmement pollué (Tableau II-8).

Tableau II-8 : Classification des niveaux de pollution selon des intervalles de valeurs de l'indice de géoaccumulation (Müller, 1981 ; Müller, 1979).

Classe	I_{geo}	Etat de pollution
1	$I_{geo} < 0$	Non pollué ou pollution minimale
2	$0 < I_{geo} < 1$	Pollution minimale à modérée
3	$1 < I_{geo} < 2$	Pollution modérée
4	$2 < I_{geo} < 3$	Pollution modérée à forte
5	$3 < I_{geo} < 4$	Pollution forte
6	$4 < I_{geo} < 5$	Pollution forte à extrême
7	$I_{geo} > 5$	Pollution extrême

VII.3. Facteur de contamination

Le facteur de contamination (CF ; FC en anglais) d'un élément chimique permet d'évaluer la contamination de cet élément au niveau du sédiment. Il est exprimé par le rapport entre la concentration élémentaire dans le sédiment par rapport à celle du fond géochimique naturel pour le même élément selon la formule suivante (Hakanson, 1980) :

$$FC = C_{\text{TracemetalSample}} / C_{\text{TracemetalBackground}}$$

Le facteur de contamination est classé en 4 niveaux de contamination (Hakanson, 1980) variant d'un état non pollué à un état de contamination forte (Tableau II-9).

Tableau II-9 : Classification des niveaux de pollution selon des intervalles de valeurs de facteur de contamination (Hakanson, 1980).

Classe	CF	Etat de pollution
1	$CF < 1$	Non contaminé
2	$1 \leq CF < 2$	Contamination moyenne
3	$2 \leq CF < 3$	Contamination modérée
4	$CF \geq 3$	Contamination forte

VII.4. Indice de charge de pollution (PLI)

L'indice de la charge de pollution (PLI) permet d'évaluer l'état d'un milieu à travers le degré de pollution dans les sédiments. Il est calculé selon la formule suivante (Tomlinson et al., 1980).

$$PLI = \sqrt[n]{CF1 \times CF2 \times CF3 \times \dots \times CFn}$$

CF représente le facteur de contamination et n le nombre des éléments traces métalliques analysés. PLI est classé en 4 niveaux de contamination (Tomlinson et al., 1980) variant d'un état non pollué à un état de pollution très forte (Tableau II-10).

Tableau II-10 : Classification des niveaux de pollution selon des intervalles de valeurs de pollution load index (Tomlinson et al., 1980).

Classe	PLI	Etat de pollution
1	$PLI < 1$	Non pollué
2	$1 \leq PLI < 2$	Pollution modérée
3	$2 \leq PLI < 3$	Pollution forte
4	$PLI \geq 3$	Pollution très forte

VII.5. Quotient moyen des valeurs seuils

Pour tenir compte de l'effet de contaminations multiples, le quotient moyen des valeurs seuils (mean-ERM-quotient (m-ERM-Q)) intégrant plusieurs contaminants permet d'évaluer la toxicité probable pour le biota d'un milieu selon Long et al., (2000, 1998) (Tableau II-11) :

$$m-ERM-Q = \sum (C_i / ERM_i) / n$$

C_i est la concentration du contaminant i ; ERM_i est la valeur seuil ERM du composé i et n est le nombre de contaminants.

Tableau II-11 : Classification du degré de toxicité selon des intervalles de valeurs du Quotient moyen des valeurs seuils (Long et al., 2000 ; Long et al., 1998).

Classe	m-ERM-Q	Degré de toxicité
1	< 0,1	9% de probabilité de toxicité
2	0,11 <m-ERM-Q< 0,5	21% de probabilité de toxicité
3	0,51 <m-ERM-Q< 1,5	49% de probabilité de toxicité
4	>1,5	76% de probabilité de toxicité

VIII. Normes de qualité des compartiments Sédiment, Eau et Air

VIII.1. Valeurs Guides Sédimentaires (SQGs)

Les Valeurs Guides Sédimentaires américaines (sediment quality guidelines, SQGs) permettent d'associer les niveaux de contamination à de possibles effets biologiques sur les organismes benthiques (Hayzoun, 2014 ; Hill et al., 2000).

MacDonalds et al. (2000) ; Long et MacDonald (1998) ; MacDonalds et al. (1996) et Long et al. (1995) ont déterminé des seuils ERL (Effect Range Low) et ERM (Effect Range Medium) et TEL (Threshold Effect Level) et PEL (Probable Effect Level) qui permettent de distinguer les intervalles de concentrations pour certains éléments traces métalliques pour lesquelles des effets biologiques néfastes sur les organismes vivants dans les sédiments sont inexistantes ou faibles (inférieur aux seuils ERL et TEL), occasionnellement (Entre les ERL et ERM ou entre TEL et PEL) et souvent (supérieur aux seuils ERM ou PEL).

VIII.2. Normes de qualité des eaux superficielles

Les concentrations en nutriments, éléments trace et majeurs des eaux superficielles au niveau des oueds du bassin versant de la lagune de Marchica ont été comparé aux concentrations de la grille de qualité des eaux de surface marocaine (2002) relevant de l'arrêté conjoint du Ministre de l'Équipement et du Ministre chargé de l'Aménagement de Territoire, de l'Urbanisme, et de l'Habitat. Au niveau des rejets de la STEP du Grand Nador, les concentrations de ces éléments ont été comparé aux valeurs limites générales de rejet dans les eaux superficielles ou souterraines (2013) relevant de l'arrêté conjoint du Ministre de l'Intérieur, du Ministre de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, du Ministre de l'Industrie, du Commerce et des Nouvelles Technologies et du Ministre de l'Artisanat.

L'Agence de Protection de l'Environnement Américaine USEPA a élaboré des critères de qualité des eaux de surfaces pour la protection de la vie aquatique (www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-aquatic-life-criteria-table) qui sont basés sur une concentration maximale (CMC) et une concentration continue (CCC) pour les polluants en eau douce et en eau salée. Les concentrations des eaux de surface de la lagune de Marchica ont été comparées aux seuils de qualité des eaux de surface de l'USEPA en eau salée concernant les ETM.

VIII.3. Normes de qualité de l'air

Les concentrations des polluants gazeux (SO_2 , NO_2 , CO et O_3) ainsi que les matières en suspension PM_{10} ont été comparées avec les concentrations marocaines relevant du décret N°2-09-286, décembre 2009 fixant les normes marocaines de qualité de l'air et les modalités de surveillance de l'air. Les concentrations des $\text{PM}_{2,5}$ ont été comparées avec les normes de l'OMS ([WHO, 2021](#)).

IX. Conclusion

Afin de procéder à l'évaluation environnementale des compartiments Eau et Sédiment au niveau de l'écosystème lagune de Marchica et son bassin versant et évaluer l'impact de la pollution tellurique du bassin versant sur la lagune de Marchica, une stratégie d'échantillonnage et de prélèvement a été identifiée et une série d'analyses a été réalisée. Des analyses des nitrates, nitrites, orthophosphates et ammonium ont été appliquées aux eaux superficielles pendant deux campagnes durant l'année 2017. Des analyses des paramètres physico-chimiques, des éléments traces métalliques et des éléments majeurs ont été appliquées aux eaux superficielles pendant quatre campagnes durant les années 2017 et 2018. Des analyses des éléments traces métalliques, des éléments majeurs, de la granulométrie et du carbone organique total ont été appliquées aux sédiments superficiels pendant deux campagnes de l'année 2018. Afin de statuer sur la qualité de l'air au niveau de la ville de Nador, des analyses du dioxyde de soufre ont été réalisées durant une campagne en 2016, des analyses de dioxyde d'azote, du monoxyde de carbone, et d'ozone ont été réalisées durant deux campagnes en 2016 et 2017, des analyses des particules en suspension grossière et fine et du carbone suie ont été réalisées durant une campagne en 2018.

Chapitre III : Evaluation environnementale de la qualité des eaux superficielles de la lagune de Marchica et son bassin versant

Ce chapitre a été traité sous forme d'un article publiée dans la revue '**Regional Studies in Marine science**' indexée dans la base des données scopus :

Oujidi, B., Tahri, M., Layachi, M., Abid, A., Bouchnan, R., Selfati, M., Bounakhla, M., El Bouch, M., Maanan, M., Bazairi, H., & Snoussi M. (2020). Effects of the watershed on the seasonal variation of the surface water quality of a post-restoration coastal wetland: The case of the Nador lagoon (Mediterranean Sea, Morocco). *Regional Studies in Marine Science*, 35, 101127
<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101127>

Résumé :

« Effet du bassin versant sur la variation saisonnière de la qualité des eaux de surface d'une zone humide après restauration : Cas de la lagune de Nador (Mer Méditerranée, Maroc) »

L'évaluation environnementale des eaux superficielles de la lagune Marchica et son bassin versant a été réalisée pendant deux campagnes (saison humide et saison sèche) durant l'année 2017 au niveau de 19 stations d'échantillonnage, dont 13 au niveau de la lagune et 6 au niveau des principaux oueds du bassin versant. Cette évaluation a été basée sur la caractérisation des paramètres physicochimiques (Température, pH, Oxygène dissous, Salinité, Turbidité et Conductivité électrique), des nutriments (Nitrate, Ammonium et Orthophosphate) et des éléments majeurs et éléments traces métalliques. Les principaux objectifs de cette étude consistent à :

1. Caractériser la variation saisonnière des concentrations des nutriments NO_3 , NH_4 et PO_4 et la variation des concentrations des éléments majeurs et traces Fe, Mn, Ni, Cr, Cu, Zn, Pb et Cd dans les eaux de surface de la lagune Marchica, suite aux actions de restauration réalisées au cours de la dernière décennie ;
2. Comparer les concentrations des nutriments et des éléments majeurs et traces métalliques avec les normes en vigueur ;
3. Déterminer les sources potentielles de pollution et identifier les zones fortement polluées en regroupant les stations d'échantillonnage présentant des similarités de pollution, à travers l'analyse en composantes principales et les clusters hiérarchiques.

Bassin versant

Au niveau du bassin versant, les résultats obtenus ont montré que les valeurs minimales de la conductivité électrique, d'oxygène dissous, de pH et de salinité ont été enregistrées au niveau des rejets de la STEP du Grand Nador, et ce durant les deux saisons de l'année 2017. Ces rejets ont été aussi caractérisés par une turbidité très élevée durant la saison humide permettant de conclure à un état de dysfonctionnement de la STEP du Grand Nador. Des valeurs minimales d'oxygène (<5) ont été aussi enregistrées au niveau de l'intersection des oueds Ouchen et Akhandouk durant la saison humide et au niveau d'oued Affelioun et d'oued Cabaillo durant la saison sèche. Pour les autres oueds, l'oxygène dissous varie entre 10,67 et 14 durant la saison humide ; et entre 6,22 et 12,5 durant la saison sèche.

La caractérisation des nutriments, des éléments majeurs et traces au niveau des eaux superficielles a été réalisée en comparant les résultats obtenus avec la réglementation nationale (Qualité des eaux de surfaces, 2002). Les résultats des nutriments durant les deux campagnes de l'année 2017 a montré que les eaux superficielles des oueds Ouchen et Akhandouk sont caractérisées par une mauvaise qualité pour l'ammonium et une très mauvaise qualité pour l'orthophosphate. Quant aux eaux superficielles des oueds Cabaillo et Lhdara, elles sont caractérisées par une mauvaise qualité tant pour l'ammonium que pour l'orthophosphate. Pour les Nitrates, les résultats varient entre une bonne et excellente qualité pour tous les oueds. Les

éléments majeurs et traces dans les eaux de surface des oueds varient entre qualité moyenne, bonne et excellente.

Pour la station d'épuration des eaux usées (STEP) du Grand Nador, les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs limites générales marocaines de rejet dans les eaux de surface et eaux souterraines (2013); ils ont révélé des valeurs inférieures pour les éléments majeurs et traces durant les deux saisons de l'année 2017.

Lagune Marchica

Au niveau de la lagune Marchica, les résultats obtenus ont montré une variation saisonnière significative pour la température ($P < 0,05$) avec la valeur la plus élevée de 21,4°C pendant la saison humide et 29,1°C pendant la saison sèche. Aucune différence significative ($P > 0,05$) n'a été observée entre les deux saisons pour le pH avec une moyenne de 8,36 pendant la saison humide et 8,27 pendant la saison sèche; pour la salinité avec une moyenne de 34,76 pendant la saison humide et de 36,07 pendant la saison sèche; et pour l'oxygène dissous avec une moyenne de 9,57 pendant la saison humide et de 8,81 pendant la saison sèche. Les concentrations des nitrates sont inférieures à la limite de détection (LD). Les concentrations de l'ammonium présentent des valeurs maximales pendant la saison sèche le long du cordon dunaire et sur la bordure continentale de la lagune (oueds Cabaillo, Lhdara et Afflioun, STEP Grand Nador). Une forte amélioration a été enregistrée au niveau de la lagune pour l'oxygène dissous avec l'absence des anoxies et pour les orthophosphates à l'exception de la station recevant les rejets de la STEP du Grand Nador, et ce par rapport à son état environnemental avant la réalisation des actions de restauration.

La caractérisation des éléments majeurs et traces au niveau des eaux superficielles a été réalisée en comparant les résultats aux critères de qualité des eaux de surfaces pour la protection de la vie aquatique de l'USEPA en eau salée (2016). Les résultats obtenus ont montré que des variations saisonnières ont affecté de manière significative les concentrations de Fe, Cu, Cr, et Cd dans la lagune. Les concentrations moyennes de Pb, Cd, Cr, Zn et Mn dans la lagune sont inférieures aux normes USEPA 2016 concernant la préservation de la vie aquatique en eau salée; tandis que les concentrations moyennes de Ni et Cu étaient plus élevées. Les concentrations totales de Cr analysées sont inférieures à la valeur guide de l'USEPA concernant le Cr (VI). Les valeurs moyennes des concentrations des éléments majeurs et traces varient dans l'ordre décroissant suivant $Fe > Ni > Cr > Cu > Zn > Mn > Pb > Cd$. Les concentrations moyennes les plus élevées ont été enregistrées pour Mn, Zn, Cr et Pb pendant la saison humide et pour Fe, Cu, Ni et Cd pendant la saison sèche.

Durant la saison humide, les deux premiers axes de l'ACP ont expliqué 65,82% de la variance totale et l'analyse en clusters a montré l'existence de 4 groupes (Figure III-2 de ce chapitre). Le premier axe (39,74% de la variance totale) est lié à une corrélation positive avec Fe, Mn, Cd, Pb et Zn; et le deuxième axe (26,08% de la variance) est lié à une corrélation positive avec Ni, Cu et Cr. Le premier groupe G1, représente la zone nord-ouest de la lagune, et est soumis aux pressions du bassin versant à travers les oueds Ouchen et Akhandouk qui transportent les eaux usées non traitées de certains quartiers et activités commerciales; il est également soumis à

l'influence marine. Le deuxième groupe G2, représente la zone littorale entre la ville de Nador et la commune de Bouarg ; il est soumis aux pressions du bassin versant à travers les rejets de la STEP du Grand Nador, le ruissellement de l'oued Cabaillo avec la mine de fer comme source de pollution minière, l'oued Selouane comme source de pollution industrielle et la plaine de Bouarg avec une agriculture intensive comme source de pollution par les pesticides et les produits phytosanitaires. Le troisième groupe G3 est marqué par les pressions du bassin versant dues au ruissellement agricole et aux eaux usées non traitées de certains quartiers. Le quatrième groupe G4, est sous l'impact de la STEP d'Arekmane et des eaux usées non traitées de certains quartiers à travers les oueds Lhdara et Affelioun.

Durant la saison sèche, les deux premiers axes de l'ACP ont expliqué 69.67% de la variance totale et l'analyse en clusters a montré l'existence de 4 groupes (Figure III-3 de ce chapitre). Le premier axe (51,98 % de la variance totale) est lié à une corrélation positive avec Ni, Cr, Pb, Cd et Cu ; et le deuxième axe (17,68% de la variance) est lié à une corrélation positive avec Fe et Mn. Le premier groupe G1, est caractérisé par les rejets de la STEP d'Arekmane, les rejets des quartiers non encore assainis, les effluents agricoles estivaux et également par l'influence marine. Le deuxième groupe G2, représente la zone littorale entre la ville de Nador et la commune de Bouarg, marqué par les rejets de la STEP Grand Nador, le ruissellement des oueds Cabaillo et Selouane véhiculant trois types de rejets (eaux usées non traitées des quartiers non assainis, eaux d'irrigation des cultures agricoles d'été et débit permanent de l'oued Selouane). Le groupe G3, situé entre le littoral de la commune de Bouarg et la commune d'Arekmane et constitué d'une seule station, est marqué par les valeurs relativement faibles des éléments traces. Le quatrième groupe G4 constitué d'une station, représente la zone nord-ouest, est influencé par les rejets d'eaux usées non traitées et les rejets de quelques activités commerciales à travers les oueds Ouchen et Akhandouk.

En conclusion, la qualité des eaux de la lagune de Marchica est sensible aux variations spatio-temporelles des apports de son bassin versant. Le site nécessite, par conséquent, la mise en place d'un plan de gestion intégrée prenant en compte des actions de restauration au niveau du bassin versant notamment la réhabilitation des sites miniers abandonnés de fer, l'extension du réseau d'assainissement au niveau du bassin versant, la mise à niveau des unités industrielles et la rationalisation de l'utilisation des pesticides et produits phytosanitaires au niveau du secteur agricole.

Effects of the watershed on the seasonal variation of the surface water quality of a Post-Restoration Coastal Wetland: The case of the Nador Lagoon (Mediterranean Sea, Morocco)

Oujidi, B., Tahri, M., Layachi, M., Abid, A., Bouchnan, R., Selfati, M., Bounakhla, M., El Bouch, M., Maanan, M., Bazairi, H., & Snoussi, M. Regional Studies in Marine Science, 35, (2020) 101127 <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101127>

Abstract

The Nador lagoon is a coastal wetland which is subject to both the watershed pressures and land runoffs coming from domestic, agricultural, industrial and mining pollution. In 2017, 19 stations encompassing the entire lagoon and pollution sources, including 13 at the lagoon level and 6 at the watershed level, were sampled during wet and dry seasons. Descriptive and multivariate statistical analyses were used to assess its environmental status through physio-chemical, nutrients and trace metals parameters. The results show that seasonal variations significantly affected the concentrations of Fe, Cu, Cr, and Cd in the lagoon. The highest mean concentrations were recorded for Mn, Zn, Cr and Pb during the wet season and for Fe, Cu, Ni and Cd during the dry season. The average concentrations of Pb, Cd, Cr, Zn and Mn in the lagoon were lower than the USEPA 2016 standards on saltwater aquatic life preservation while the average concentrations of Ni and Cu are higher. In order to preserve this wetland, the implementation of an environmental management plan is required focusing on the rehabilitation of the iron mining area, the extension of the sewerage network, the control of agricultural effluents and the upgrading of industrial pollution controls.

Keywords

Nador lagoon, Watershed, Environmental assessment, Surface water quality, Trace metals, Nutrients.

I. Introduction

Wetlands are among the most important ecosystems on Earth (Mitsch and Gosselink, 2015). Wetlands ecosystems (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) provide provisioning, regulating, supporting and cultural services. Provisioning services include fisheries support and direct food production. Regulating services include improving water quality, protecting coastlines from natural disasters (tsunamis, cyclones, and other coastal storm surges), promoting carbon sequestration, and protecting the habitat of rare and endangered species. Cultural services are involved with various activities linked to this specific landscape, i.e., ecology education, ecotourism, bird-watching, etc. Freshwater storage is considered a supporting service (Mitsch et al., 2015).

Coastal lagoons are considered highly productive fishery systems that function as nursery areas and feeding grounds (Velasco et al., 2018; Franco et al., 2009; Pérez-Ruzafa et al., 2004; De Lacerda, 1994). They occupy 13% of the world coastline (Kjerfve, 1994; Barnes, 1980). Semi-enclosed coastal systems (SECS) are considerably valuable on an ecological level and, thanks to tourism, on an economic one too. The lagoons' watersheds, however, are particularly sensitive to human activities such as fish farming, aquaculture and other industrial endeavours (Newton et al., 2014; Affian et al., 2009; Pérez-Ruzafa et al., 2005). Urbanization is a major cause of coastal wetlands' loss. It also exerts significant influences on the structure and function of coastal wetlands, mainly by modifying the hydrological and sedimentation regimes, and the nutrient and chemical pollutant dynamics (Lee et al., 2006).

Human activities on coastal watersheds provide the major sources of nutrients entering shallow coastal ecosystems. Nutrient loading from watersheds is the most widespread factor that alters both the structure and the function of receiving aquatic ecosystems (Maanan et al., 2018a, b). The main source of nutrients comes from human activities such as agriculture, urbanization, industrialization and aquaculture (Allouche et al., 2017; Affian et al., 2009; Roselli et al., 2009).

Metal contaminants potentially can have a large impact on coastal lagoons because of their chronic effects. Metals are continuously released into the biosphere by natural phenomena such as volcanoes, natural weathering of rocks but also by numerous anthropogenic activities, such as mining, fuel combustion, industrial and urban sewage and agricultural practices (Valavanidis et al., 2010). Major access pathways of trace metals to coastal lagoons are fluvial inputs (De Lacerda, 1994). All trace metals, which are practically non-degradable, generally tend to concentrate in marine biota, and thus produce long-lasting effects on the environment. They may continue to cause environmental health problems even after their major sources are eliminated or regulated (De Lacerda, 1994). The pressures from pollutants and contaminants may be exacerbated by the residence time and poor flushing in SECS as well as after effects such as bio-accumulation and bio-magnification (Newton et al., 2014).

Ecosystem functions and services of transitional environments such as lagoons are often threatened by increasing human pressure. These have substantial after effects, such as the deterioration of water quality or the disruption or loss of habitat for rare

species. This explains the increasing interest in assessing water quality and studying the ecological status of these systems (Franco et al., 2009). The preservation of coastal lagoons has become a challenge in recent decades and is essential both for their ecological significance and for the valuable ecosystem service they provide for human welfare and wellbeing (Newton et al., 2018).

In the Mediterranean Sea, hydrological and ecological data have been published about more than 50 lagoons (Pérez-Ruzafa et al., 2011a). In order to manage the pollution coming from land-based activities, the Barcelona Convention adopted a Strategic Action Program for the Assessment and Control of Marine Pollution in the Mediterranean Sea (UNEP/MAP/MEDPOL, 2015). This program aimed to identify the main pollution problems in the area so as to indicate possible pollution control measures and to draw up a national action plan (NAP) to implement them.

Morocco, as part of the Barcelona convention, prepared its NAP in 2005. It showed that the environmental situation of the Mediterranean coastal zones is very alarming and requires urgent interventions to preserve and manage all kinds of pollution from land-based sources. The NAP of Morocco has shown that the Nador lagoon is classified as an "Environmental hotspot on the Mediterranean coast" (UNEP/ EEA Report No 4, 2006) because of pollution related to urban and industrial wastewater and coastal urbanization. Following the recommendations of the NAP 2005 and with the support of the MED POL Program, Morocco carried out a study of the eutrophication of the Nador lagoon in 2009. It aimed to present the reference state of pollution and to assess the impact of anthropic contributions (SEEE/INRH, 2009); this study showed that the Nador lagoon has an eutrophication problem, especially in the summer. Integrated management of the lagoon was recommended, bearing in mind its fragility and its ecological and biological importance. The study also stressed the importance to define the different human activities that can be supported by the lagoon, without jeopardizing its ecological balance. The Moroccan authorities recognized the importance of this coastal wetland which represents for the region an economic potential, particularly thanks to the main artisanal fishing activity. Since 2010, they have set up two wastewater treatment plants so as to preserve the biological and ecological qualities and the development of tourist activities around this ecosystem (Great Nador wastewater treatment plant in 2010 and Arekmane wastewater treatment plant in 2013), the opening of a new inlet between the lagoon and the Mediterranean Sea in 2011 to exchange water which has improved the classification of the lagoon from "choked lagoon" to "leaky lagoon" (Hilmi et al., 2015), and the cleanup of lagoon waters which was aimed to decontaminate the lagoon and its surroundings by solid waste collection and dredging the mouths of wadis between 2010-2013 (Nachite et al., 2018). These measures represent lagoon Nador's restoration plan (<http://www.agencemarchica.gov.ma/>).

During post-restoration period (PSR), variation of physico-chemical parameters and nutrients in water were studied (Aknaif et al., 2017a; Mostarih et al., 2016) where the variation of trace metals have not been published which represent the main purpose of this work. The results were discussed with studies pre-restoration period (PPR) (Zerrouqi et al., 2013; Bloundi, 2005) and with other lagoons in the Mediterranean region that have certain identical characteristics such as climate conditions, land use and watershed impacts and were compared with National Recommended Water Quality Criteria - Aquatic Life Criteria (USEPA, 2016). The assessment of the

environmental status of the surface waters of watershed of the Nador lagoon ecosystem was investigated by comparing results with national regulation. Physico-chemical parameters and nutrients were also analyzed and compared with previous studies in PPR and PSR. This paper mainly aims to contribute to the assessment of the environmental status of the surface waters of the Nador lagoon ecosystem in light of the impacts of its watershed in PSR.

II. Materials and Methods

II.1. Site description

The Nador lagoon (02°45' - 02°55' and 35°16' - 35°06'), also called Sabkha Bouarg or Marchica lagoon, is the only one located along the Moroccan Mediterranean Coast. This lagoon is the largest Moroccan lagoon, with a surface area of approximately 115 km² and a maximum depth of 8 m. It is isolated from the Mediterranean Sea by a 25 km long sandbar crossed by an artificial inlet (300 m wide and 6 m deep) ensuring the renewal of water since 2011. Dominant climatic conditions prevailing in the study area are that of typical Mediterranean climate, with hot and dry summers that contrast to mild and rainy winters (Raji et al., 2015). The wind in the Nador region has two dominant directions east-northeast to east from May to October and west-southwest to west between November and May (Cataudella et al., 2015). The driver of the marine circulation of the waters within the lagoon of Nador is the wind (Hilmi et al., 2015). Since 1996, it has been classified as a Site of Biological and Ecological Interest (SIBE), through the master plan of Protected Areas of Morocco and since 2005, as a wetland under the Ramsar International Convention. However, this wetland is subject to both watershed pressures and land runoffs coming from domestic, agricultural, industrial and mining pollution. The population in the watershed around the lagoon is about 400000 inhabitants. The lagoon is characterized by four structural domains. It is limited on its northwest side by the volcanic massif of Gourougou, on its southwest side by the massif of BeniBoulfrour and the plain of Bouarg, on its southeast by the massif of Kibdana and on north coastal zone by marine inputs (Bloundi, 2005).

The watershed is characterized by the presence of iron ore reserves which has contributed to the installation of several industrial units, the largest of which is the Nador iron and steel complex (a manufacture of round iron and peeling of the reinforcing bar). The effects of the abandoned mine area for several years result in a continuous supply of trace metals in the lagoon through the pluvial period. The drainage of industrial wastewater from some industries which were installed before 2003, the date of promulgation of the law on impact studies in Morocco which obliges industry to set up a pretreatment system before discharging water to the external environment, also result in a continuous supply of trace metals in the lagoon. Other activities around lagoon are related to agricultural runoff characterized by excessive application of fertilizers and pesticides on the Bouarg plain and to atmospheric deposition from regional industrial emissions and from several decades old waste incineration before the installation of a controlled landfill in 2016. These activities around lagoon cause considerable water pollution (Ruiz et al., 2006). The main watercourses that discharge into the wetland are Akhandouk and Ouchen wadis in Beni Ensar city, Selouane wadi in Bouarg city, Cabaillo wadi in Nador city and Afelioun and Lhdara wadis in Arekmane city (Figure III-1). The flow of these

wadis is not often permanent except for Selouane wadi and is limited to the periods of strong floods which result in solid and liquid discharges into the lagoon. During dry season, the flow of wadis is very low and characterized by the presence of wastewater discharges from certain areas around lagoon that are not connected to the sewerage network.

II.2. Sampling network

The sampling network was based on sampling covering the entire lagoon and capturing all potential sources of pollution. It includes two eutrophication zones in the northwest and southeast of lagoon, five stations near mouths of wadis, one station near agricultural effluents, one station near the great Nador wastewater treatment plant outfall, one station of the Marina which represent the first tourist site of Marchica, three stations from the sandbar border and two others area in the centre of lagoon. Within the watershed, five stations in the main channels discharging into the wetland (one for each wadi) and one station where the great Nador waste treatment plant discharges into the wadi. Indeed, there were 19 sampling stations (Figure III-1 and Table III-1) with 13 inside the lagoon and six sampling locations from watershed effluents to the lagoon. Sampling was carried out in wet and dry season campaigns during 2017.

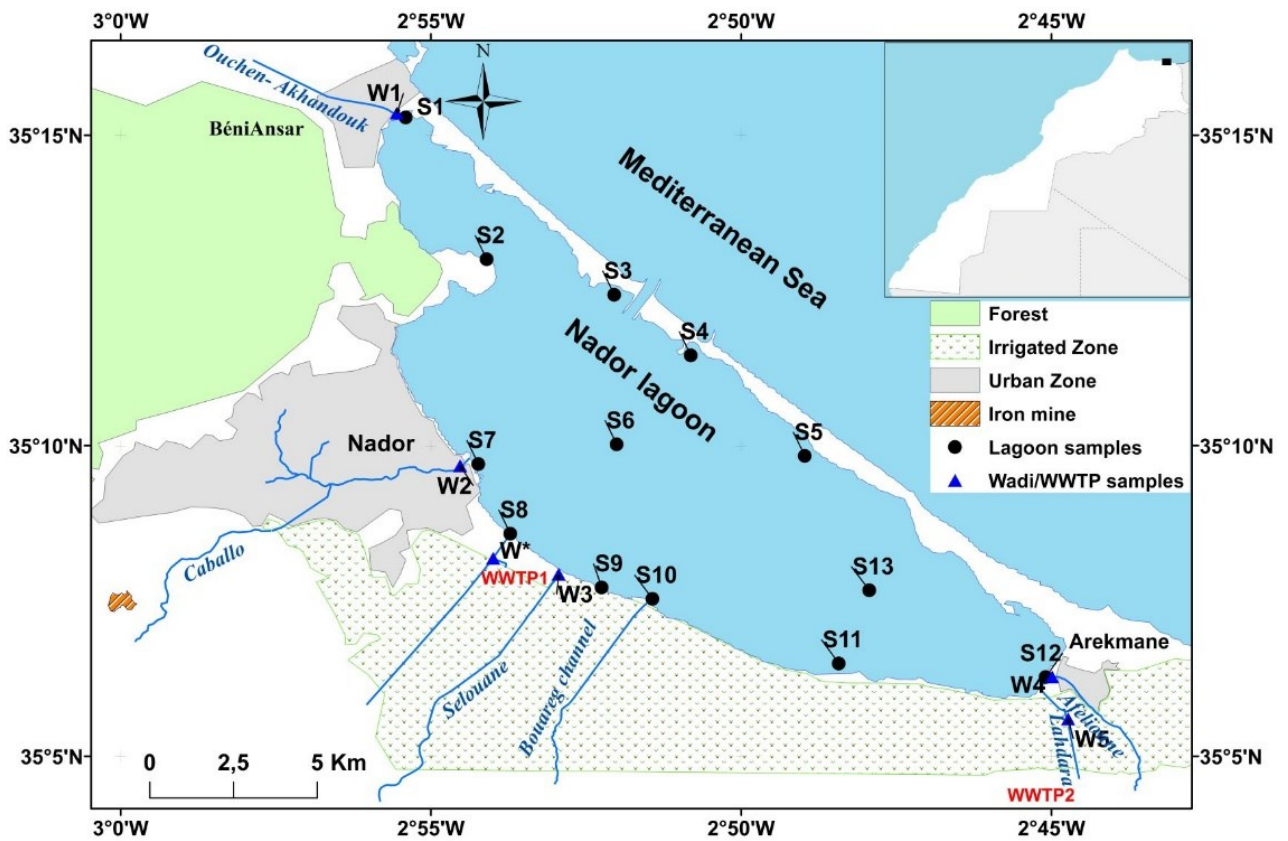


Figure III-1: Location of the study area (lagoon and its watershed).

Table III-1: Key of Figures III-1, III-2 and III-3 (Sampling network at the lagoon and its watershed).

Samples code	Samples location in the Lagoon
S1	Beni Ensar (Eutrophication zone)
S2	Marina
S3	New pass side Beni Ensar
S4	Old pass
S5	Between old pass and Mohandis
S6	Lagoon centre
S7	In front of cabaillo wadi
S8	In front of great Nador wastewater treatment plant WWTP1
S9	In front of Selouane wadi
S10	In front of irrigation canal Bouarg
S11	Between Bouarg and Arekmane
S12	Arekmane (Eutrophication zone)
S13	Centre lagoon side Arekmane
Samples code	Samples location in the Watershed
W1	Intersection of two wadis at Beni Ensar city : Ouchen and Akhandouk
W2	Cabaillo wadi at Nador city
W3	Selouane wadi at Bouarg city
W4	Affelioun wadi at Arekmane city
W5	Lhdra wadi (Discharges from the Arekmane wastewater treatment plant WWTP2) at Arekmane city
W*	Output discharge of the great Nador wastewater treatment plant WWTP1 at Bouarg city
G1, G2, G3 and G4	Groups of sampling stations

II.3. Analysis methods

Water samples were collected in polypropylene plastic bottles 0.5 m below the water surface for the lagoon, 0.2 m for the wadis and the output of the great Nador wastewater treatment plant. The samples collected were stored according to the guidelines of the international standard for the storage and handling of samples [NM ISO 5667-3](#). Physiochemical, parameters (Temperature, pH, Salinity, Dissolved Oxygen, Turbidity and Conductivity) were measured in situ using a Multi parameter meter water probe (WTW, MULTI 3430) which was calibrated before each sampling campaign. The water samples destined to trace metals analysis were acidified with HNO₃ and those destined for nutrients were acidified with H₂SO₄. All water samples were stored at 4°C until analysis. The nutrients were analyzed using spectrophotometer UV/VIS (Perkin Elmer, Lambda 35 UV) according to standard analysis method at the LNESTP. The nitrate (N- NO₃⁻) was determined according with [NM ISO 7890-1](#) in freshwater and [DIN 38405- 9](#) in saltwater. The ammonium (N- NH₄⁺) was determined according with [NM ISO 7150-1](#) in freshwater and [NM ISO 5664](#) in saltwater. Orthophosphate (P- PO₄³⁻) was determined according with [NM ISO 6878](#) for both freshwater and saltwater. Trace metals: Lead (Pb), Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Nickel (Ni), Zinc (Zn), Copper (Cu), Manganese (Mn) and Iron (Fe) were determined using ICP-MS method Thermo Scientific XSERIES 2 at CNESTEN, the analysis was carried out by adding 2% of HNO₃ 65% suprapur to each freshwater sample and for saltwater samples and a dilution of 1000 was made by adding ultra-pure water, before introducing the

samples into the instrument. The detection limits of the analyzed elements are given by Table III-2.

Table III-2: Detection Limits (DL) of the various elements analyzed.

Parameters	NO ₃ mg/l	NH ₄ mg/l	PO ₄ mg/l	Pb μg/l	Cd μg/l	Cr μg/l	Ni μg/l	Zn μg/l	Cu μg/l	Mn μg/l	Fe μg/l
Detection Limits (DL)	0.5	0.05	0.05	0.0063	0.0008	0.0079	0.0106	0.1309	0.0187	0.0034	0.2486

II.4. Statistical methods

Descriptive analysis (min, max, mean and standard deviation) and multivariate statistical methods were used for data analysis and to compare the seasonality effect. Before statistical analyses, non-normality was proved through Shapiro–Wilk test. Non-parametric test Kruskal-Wallis with a post-hoc Dunn's test was used to explore seasonality. Analyses were used with significance levels set at 5% using R software. Non-normally distributed data were subjected to logarithmic transformations.

Principal component analysis (PCA) was used with Statistical Package for the Social Sciences (IBM SPSS Statistics Version 20) to analyze the traces metals in the lagoon and their correlation (Jackson, 2005) and to compare the results with the two studies before the restoration (Bloundi, 2005) and (Zerrouqi et al., 2013). Normalized variables (original variables) were transformed into the rotated components to extract significant principal components (PC). Clusters (Groups) analysis was applied to evaluate the similarity of sampling sites with respect to measured trace metals concentrations in water. Squared Euclidian distances were calculated as measures of similarity and the Ward's method was used to link groups. The maps of sampling network at the lagoon and its watershed and groups of stations were made by ArcGIS (ESRI software: ArcGIS Desktop 10).

III. Results and Discussion

III.1. Results

Seasonal variation of physico-chemical parameters, nutrients and trace metals

The physico-chemical parameters of the water for dry and wet seasons are shown on Table III-3. The results of nutrients and trace metals during the both seasons are likewise summarized on Table III-4. In the lagoon, the results show significant seasonal variation for temperature ($P < 0.05$) with the highest value of 21.4 during wet season and 29.1 during dry season. No significant differences ($P > 0.05$) for average pH with 8.36 during wet season and 8.27 during dry season. Average salinity was 34.76 during wet season and 36.07 during dry season with no significant differences ($P > 0.05$). No significant difference was observed for dissolved oxygen ($P > 0.05$) with mean value 9.57 during wet and 8.81 during dry season. During the wet and dry seasons, all value of nitrate was below the limit of detection and only one value was recorded for orthophosphate in the area receiving water from great Nador wastewater treatment plant with no significant differences ($P > 0.05$). Differences among season were found for ammonium ($P < 0.05$). Seasonal variations were significant for the concentrations of Fe, Cu, Cr, and Cd (p

< 0.05) while the concentrations of Mn, Ni Zn and Pb were not affected ($P > 0.05$). Within the watershed most physico-chemical parameters, nutrients and trace metals ($P > 0.05$) did not show seasonality, except for iron ($P < 0.05$).

Table III-3: Physico-chemical parameters concentrations in the Marchica Lagoon and in water samples of wadis (W) and WWTP1 (W*) during wet and dry seasons of 2017.

		T°c	pH	Sal (g/l)	O ₂ (mg/l)	Cond (ms/cm)	Turb (NTU)		
Wet Season	Lagoon	Min	18.5	7.73	27.5	5.58	43	1.04	
		Max	21.4	8.92	36.9	13.8	55.9	141	
		Mean± SD	19.33± 0.79	8.36± 0.29	34.76± 2.34	9.57± 1.94	53.1± 3.24	19.85± 39.83	
	Watershed	W1	23.9	8.19	12.8	2.08	21.3	117	
		W2	23	7.61	7.2	14	12.54	12.9	
		W3	22.9	8.4	5.9	10.67	10.51	11.3	
		W4	26.4	8.15	17.6	13.16	28.5	7.85	
		W5	28.6	9.04	9	10.92	15.3	48.5	
		W*	21.9	7.69	3.1	4.02	5.73	226	
	Dry Season	Lagoon	Min	25.8	29.1	7.86	35	3.84	44
Max					8.6	38.6	11.4	55.6	60.6
Mean± SD			27.5± 0.99	8.27± 0.18	36.07± 0.96	8.81± 1.81	53.26± 2.87	6.84± 16.37	
Watershed		W1	33.7	8.94	36.7	10.6	54.8	15.9	
		W2	32	7.82	4.5	1.8	7.95	94	
		W3	26	8.03	5.8	12.5	10.21	4.38	
		W4	28.5	7.95	30.4	4.2	46.6	6.2	
		W5	26.8	8.29	9.1	6.22	45.5	180	
		W*	27.8	7.81	1.9	1.6	3.68	174	

Correlation of trace metals and groups stations

Two principal components (PC) with eigenvalues were extracted for each season accounting with 65.82% of the total variance for wet season (Figure III-2a) and 69.67% of the total variance for dry season (Figure III-3a).

During wet season, the first principal component PC1 wet as factor 1 explained 39.74% of total variance and was related to positive correlation with Fe, Cd, Pb, Zn and Mn. The second component PC2 wet as factor 2 explained 26.08% of the variance and was correlated with Ni, Cu and Cr (Figure III-2b). Four groups of sampling locations (Figure III-2c) were identified. First group G1 at northwest of the lagoon is characterized by the watershed pressures from Ouchen and Akhandouk wadis carrying untreated wastewater and also by the marine influence. Second group G2 which represents sampling of the lagoon between Nador and Bouarg is marked by watershed pressures from great Nador wastewater treatment plant, the runoff

through the Cabaillo wadi with iron mine as source, Selouane wadi with an industrial source and the plain of Bouarg with intensive agriculture as source. G3 is marked by the watershed pressures due to agricultural runoff and untreated wastewater. G4 at southwest of the lagoon is under runoff of Arekmane wastewater treatment plant and untreated wastewater through Lhdara and Affelioun wadis.

During the dry season, the first principal component PC1 dry as factor 1 explained 51.98% of total variance and was related to positive correlation with Ni, Cr, Pb, Cd, and Cu. PC 2 dry as factor 2 dry responsible for 17.68% of the variance, was highly correlated with Fe and Mn (Figure III-3b). Also, four groups of sampling locations (Figure III-3c) were identified. The largest group G1 is characterized by the runoff of the Arekmane wastewater treatment plant, untreated wastewater, summer agricultural effluents and also by marine influence. Second group G2 is the same group G2 of wet season which represent sampling of lagoon between Nador and Bouarg and is marked during this season by great Nador wastewater treatment plant discharges and the runoff of Cabaillo and Selouane wadis conveys three types of discharges (untreated wastewater, irrigation water from summer crops and permanent flow coming from Selouane wadi's as industry sources). G3 located between Bouarg and Arekmane consist of a simple station (S11) which is marked by the lowest relative values of all the trace metals. G4 at northwest consist of a simple station (S1) which is influenced by the discharges of untreated wastewater and some commercial activities through Ouchen and Akhandouk wadis.

PC1 wet suggested that pressures on G2 may be due to Fe, Cd, Pb, Zn and Mn. Regarding PC2 wet it seems that pressures on G1, G3 and G4 are expressed by Ni, Cu and Cr. However, in the dry season the pressures exerted on G1 and G2 are attributed to Ni, Cr, Pb, Cd and Cu based on PC1. Ultimately,

PC2 dry suggested that the pressures exerted on G4 are attributed to Fe and Mn. In the lagoon during both seasons a positive correlation between Fe - Mn was noted in the northwest and positive correlation between Ni - Cu - Cr was noted likewise in the southwest.

III.2. Discussion

Watershed

The national regulation has established a 5-points quality ranking system to assess the quality of surface water (1 qualifies as Excellent, 2 as Good, 3 as Middle, 4 as Bad, 5 as Very Bad). The overall quality is determined on the basis of the most unfavorable parameter according to [the Moroccan Standards for Surface Water Quality. \(2002\)](#). According to this system, nutrient results during the year 2017 (Table III-5) show that the waters of the two wadis Ouchen and Akhandouk are a bad quality for ammonium and a very bad quality for orthophosphate. As for the water of the Cabaillo and Lhdara wadis, they qualify as a bad quality for both ammonium and orthophosphate. In most cases in 2017, according to the limits fixed by the system to define the quality of surface water, the wadis surface waters were of excellent quality for trace metals.

The concentrations of trace metals in Selouane and Cabaillo wadis of our study (Table III-4) were compared with results of [Bloundi. \(2005\)](#). This comparison ($\mu\text{g/l}$) shows that during both seasons, the concentrations of Cd, Zn and Cu are lower than those recorded in 2005 for Selouane wadi (Cd-0.20, Zn-22.27, Cu-14.36) and for Cabaillo wadi (Cd-0.42, Zn-19.82, Cu-6.59) while the concentrations of Ni and Pb are higher for Selouane wadi (Ni-8.39 and Pb-0.38) and for Cabaillo wadi (Ni-5.06 and Pb-0.46). The concentrations of iron are higher than those recorded in 2005 (Fe-175) for the Cabaillo wadi and are higher during the wet season and lower during the dry season for Selouane wadi (Fe-290). The concentrations of Mn are lower than those 2005 for Selouane wadi (Mn-100) and higher for the Cabaillo wadi (Mn-256).

For the great Nador wastewater treatment plant, the results were compared with the general limit values for surface and groundwater discharge ([Moroccan General Limit Values for Discharge into Surface or Underground Waters, 2013](#)). They indicate that trace metals are below these limit values during both seasons in 2017.

This study shows that mean values of trace metals ($\mu\text{g/l}$) in the surface water of Selouane wadi with permanent flow (Pb-1.09, Cd-0.05, Ni-14.81, Zn-8.35, Fe-716) were below the ([USEPA, 2016](#)) standards about fresh water aquatic life preservation (Pb-3.2, Cd-0.72, Ni-52, Zn-120, Fe-1000). The current USEPA chronic Fe criterion of 1000 $\mu\text{g/l}$ was revised by [Cadmus et al., \(2018\)](#) using the US Environmental Protection Agency's recommended methods and the final chronic value was calculated and should be reduced by half to 499 $\mu\text{g/l}$. The average iron recorded at Selouane wadi exceeds the final revised chronic value. The mean total Cr concentration (7.87) is lower than the USEPA 2016 standards for Cr (VI) of 11 $\mu\text{g/l}$ and Cr(III) of 74 $\mu\text{g/l}$.

Nador Lagoon

The average concentrations of trace metals were compared with the ([USEPA, 2016](#)) standards of saltwater aquatic life preservation. The results show that Pb, Cd, Zn and Mn in the lagoon are lower than these standards while the average concentrations of Ni and Cu are higher. The total Cr concentrations measured during both seasons are lower than Cr (VI) value of standards (Table III-6). The mean values concentrations of trace metals in the Nador lagoon during 2017 followed the order $\text{Fe} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Pb} > \text{Cd}$. The highest mean concentrations were recorded for Mn, Zn, Cr and Pb during the wet season and for Fe, Cu, Ni and Cd during the dry season.

Concerning Dissolved Oxygen, the results did not show the presence of anoxia as the study [SEEE / INRH. \(2009\)](#), the minimum value (3.84) was recorded in the dry season in the area receiving wastewater from great Nador treatment plant and maximum value (13.8) was recorded in the wet season in the northwest area. Minimum and maximum values of pH (7.73 – 8.2) and of salinity (33– 38.6) were comparable to those of 2009 (7.58 to 8.41 and 32.7 to 39 for pH and salinity, respectively). The values for nitrates in the lagoon are below the limit of detection. The ammonium distribution in the lagoon shows maximum values during the dry season on the sandbar border and on the border of lagoon (Cabaillo, Lhdara and Afflioun wadis, Great Nador waste water treatment plant). A clear improvement of orthophosphate concentration has been recorded in the lagoon except for the area receiving the wastewater from great Nador treatment plant which can be explained

by the occasional operating problems at the plant, the water can become turbid and malodorous especially during wet season (Table III-4). In effect, after the opening of the new inlet in 2011, water exchanges are indeed better between the lagoon and the Mediterranean Sea and the developments around the lagoon have improved the oxygenation of the surface water and reduced the eutrophication of the lagoon according to [Aknaif et al. \(2017a\)](#) and [Mostarih et al. \(2016\)](#).

Results of this study appear consistent with published papers ([Maanan et al., 2015](#); [Bloundi et al., 2009](#); [Ruiz et al., 2006](#)) of metal pollution in lagoon waters prior to enaction of effluent controls which show that the surface sediments are rich in trace metals and that the most impacted areas are Beni Ensar, Arekmane, the outfall of wadis and wastewater discharges area. The comparison with the previous studies during PRR shows that identical PCA correlations to this work were found. Positive PCA correlation of Fe and Mn ([Bloundi, 2005](#) and [this work](#)) at the northwest eutrophication zone suggests occurrence of these two metals from the iron mine of Nador and from industry effluents. Positive PCA correlation between Ni-Cu and Cr ([Zerrouqi et al., 2013](#) and [this work](#)) suggests that apart from the geological sources, anthropogenic sources including agricultural runoff with the use of chemical fertilizers and pesticides in agriculture land, industrialization and urbanization as reported by [Alloway \(2013\)](#) and [Nriagu and Pacyna. \(1988\)](#).

In effect, the watershed is the main factor unanimously reported that strongly impacts the Nador lagoon. The BeniBoulfrour massif contains the largest iron mines in Morocco. The mineralogical composition of deposits contains significant quantities of sulphide minerals such as pyrite containing accessory amounts Mn, Ni, Cr, Pb, Zn, Cu and Cd ([Lebret, 2014](#)). Sulphide oxidation takes place once the minerals are exposed to atmospheric conditions generating acid mine drainage and sulphates and liberating Fe and accessory metals according to [Cadmus et al. \(2018\)](#), [Olias et al. \(2004\)](#) and [Wittmann. \(1981\)](#) impacting the Nador lagoon through watershed as previously proved by ([Lakrim et al., 2014](#)). Other sources of pollution include marine activities (approximately 400 fishing boats in the lagoon; ([Najih et al., 2015](#))) and some port activities as reported by [De Lacerda. \(1994\)](#) that found trace metals in coastal lagoons can come from certain activities such as shipping and other port activities.

Trace metals in water lagoon were compared with other Mediterranean lagoons with some similarities such as land use and watershed impacts as example Mar Menor lagoon and Burullus lake (Table III-6). The comparison shows that mean value of Fe, Cu and Ni detected in Nador lagoon were higher than those of Mar Menor lagoon ([Muñoz-Vera et al., 2016](#)) and Burullus lake ([El-Batrawy et al., 2018](#)).

Figure III-2a.

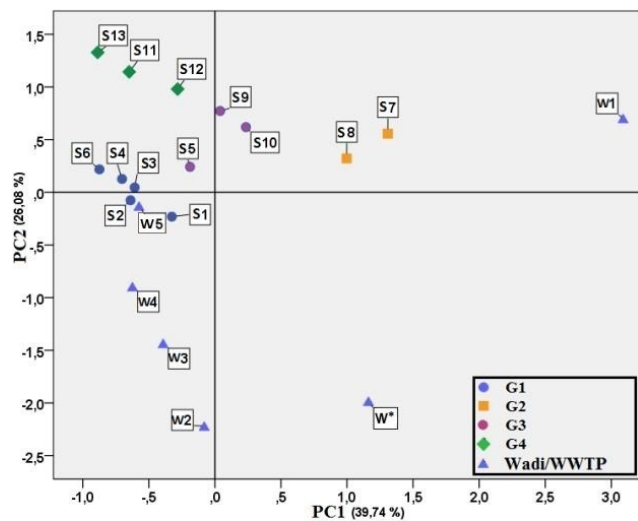


Figure III-2b.

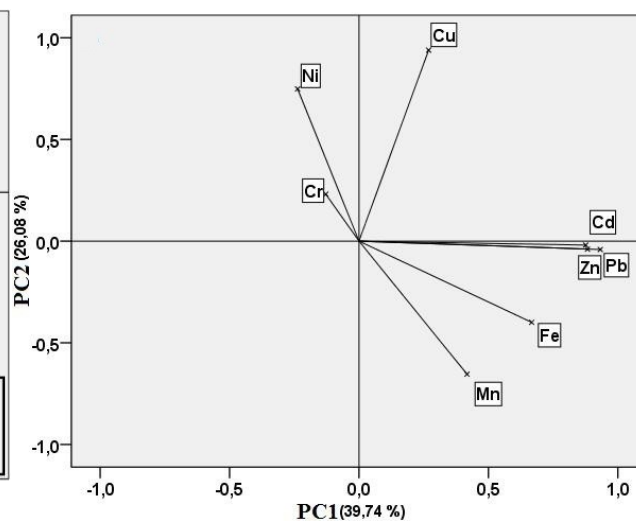


Figure III-2c.

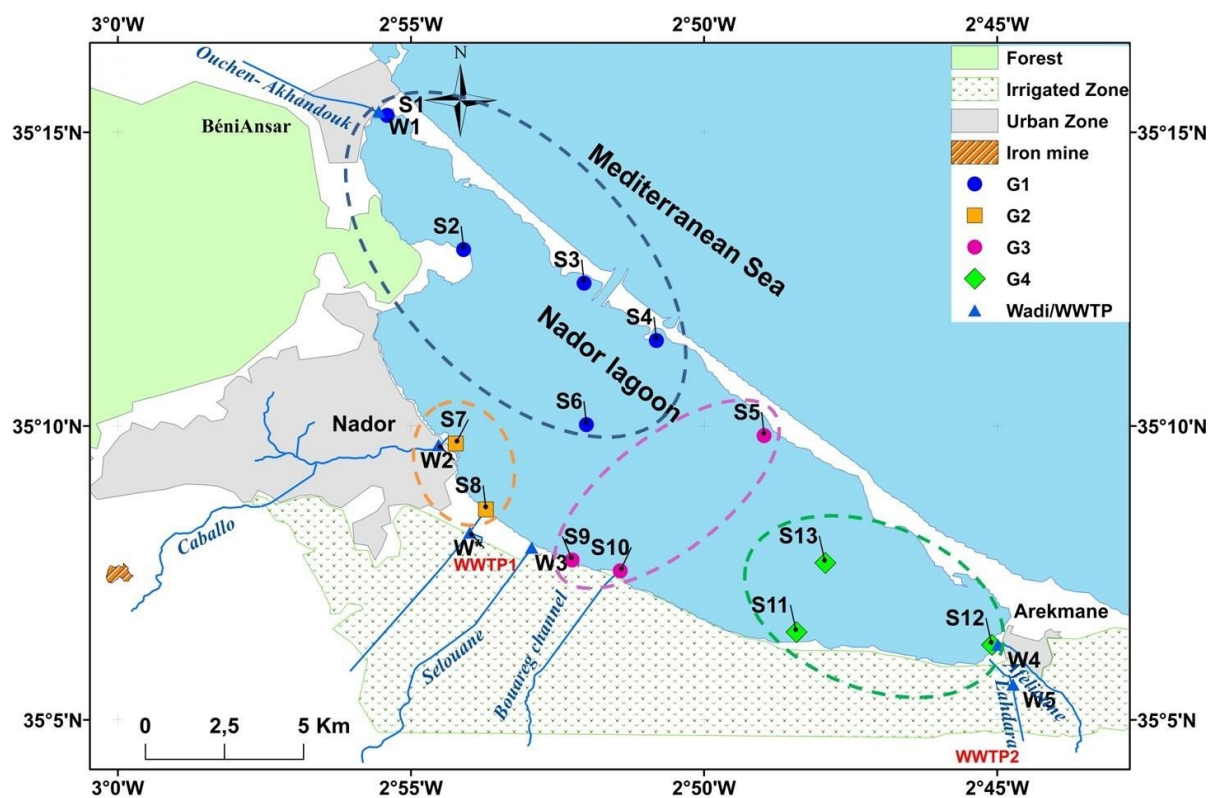


Figure III-2 : **a** Stations projection on the principal components during the wet season, **b** Trace metals projection on the principal components during the wet season, **c** Zonation of the lagoon during the wet season.

Figure III-3a.

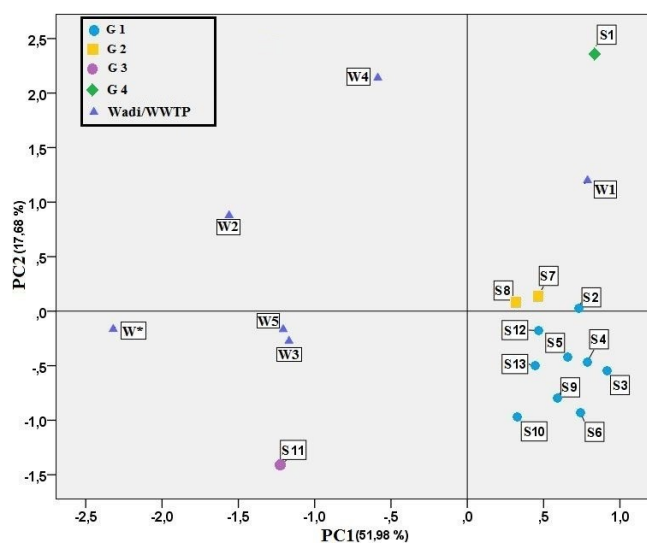


Figure III-3b.

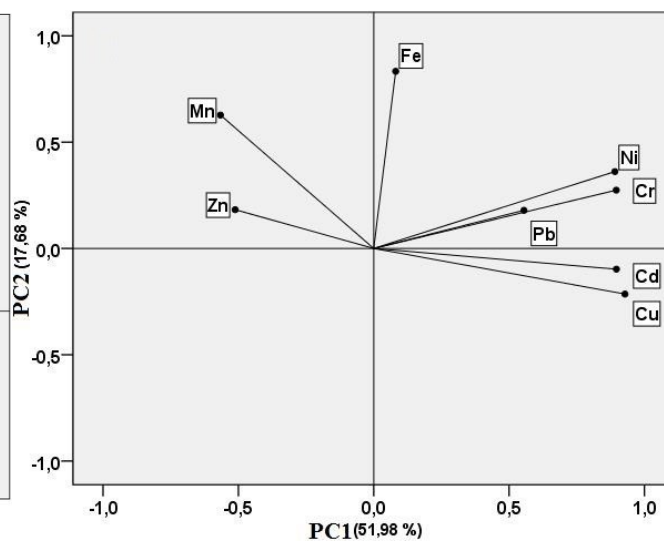


Figure III-3c.

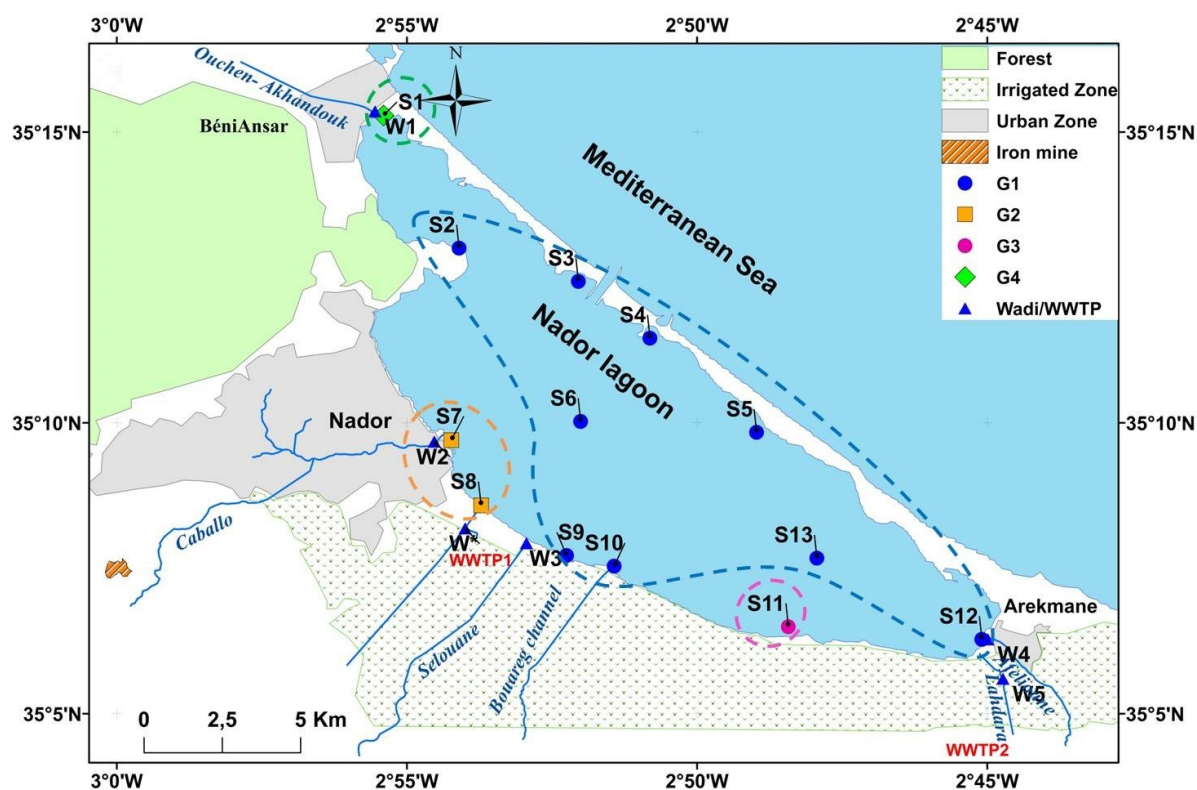


Figure III-3 : **a** Stations projection on the principal components during the dry season, **b** Trace metals projection on the principal components during the dry season, **c** Zonation of the lagoon during the dry season.

Table III-4: Trace metals and nutrients parameters concentrations in Marchica Lagoon (Minimum, Maximum and Mean $\pm$ Standard Deviation) and in water samples of wadis (W) and WWTP1 (W*) during wet and dry seasons of 2017.

			NO ₃ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	Pb (ug/l)	Cd (ug/l)	Cr (ug/l)	Ni (ug/l)	Zn (ug/l)	Cu (ug/l)	Mn (ug/l)	Fe (ug/l)
Wet season	Lagoon	Min-Max	< DL	0.21 –1.15	2.75	0.003 -4	0.03- 0.07	13-62	21-27	2-281	4-17	4-48	53-346
		Mean $\pm$ SD	< DL	0.54 $\pm$ 0.31	2.75	2.17 $\pm$ 1.33	0.04 $\pm$ 0.01	33.46 $\pm$ 16.94	23.54 $\pm$ 1.71	28.38 $\pm$ 76.23	8.92 $\pm$ 5.01	18 $\pm$ 15.89	203 $\pm$ 86
	Watershed	W1	< DL	4.84 $\pm$ 0.07	14.38 $\pm$ 0.03	15 $\pm$ 0.001	0.194 $\pm$ 0.007	30 $\pm$ 2	18 $\pm$ 0.1	148 $\pm$ 0.2	25 $\pm$ 0,1	74 $\pm$ 10	495 $\pm$ 16
		W2	15.06 $\pm$ 0.15	< DL	< DL	1 $\pm$ 0.001	0,05 $\pm$ 0.001	15 $\pm$ 0.1	14 $\pm$ 0.1	5 $\pm$ 0.1	< DL	519 $\pm$ 3	306 $\pm$ 3
		W3	12.40 $\pm$ 0.15	< DL	< DL	1 $\pm$ 0.001	0.029 $\pm$ 0.005	12 $\pm$ 0.1	12 $\pm$ 0.1	13 $\pm$ 0.1	< DL	29 $\pm$ 0.1	182 $\pm$ 3
		W4	< DL	< DL	< DL	< DL	0.031 $\pm$ 0.005	31 $\pm$ 1	17 $\pm$ 0.1	6 $\pm$ 0.1	2 $\pm$ 0.1	103 $\pm$ 0.1	144 $\pm$ 2
		W5	13.73 $\pm$ 0.15	1.49 $\pm$ 0.07	5.20 $\pm$ 0.03	< DL	0.047 $\pm$ 0.002	15 $\pm$ 2	13 $\pm$ 0.1	9 $\pm$ 0.1	5 $\pm$ 1	47 $\pm$ 1	62 $\pm$ 5
		W*	13.29 $\pm$ 0.15	4.84 $\pm$ 0.07	13.77 $\pm$ 0.03	4 $\pm$ 0.001	0.09 $\pm$ 0.002	9 $\pm$ 0.1	9 $\pm$ 0.1	68 $\pm$ 0.1	< DL	77 $\pm$ 1	473 $\pm$ 3
Dry season	Lagoon	Min-Max	< DL	3.24 –4.54	2.63	0.36-3.67	0.05-0.25	3.28-13.64	11.04-37.02	2.20–13.28	15.84 -42.65	2.45 – 30.26	674 – 1057
		Mean $\pm$ SD	< DL	4.01 $\pm$ 0.41	2.63	2.02 $\pm$ 0,82	0.21 $\pm$ 0.05	10.85 $\pm$ 2.39	26.88 $\pm$ 6.60	5.30 $\pm$ 3.32	31.26 $\pm$ 6.89	13.07 $\pm$ 903	797 $\pm$ 107
	Watershed	W1	< DL	4.06 $\pm$ 0.07	< DL	3.04 $\pm$ 0.08	0.24 $\pm$ 0,03	14.31 $\pm$ 0.78	39.17 $\pm$ 1.19	8.44 $\pm$ 0.42	24.54 $\pm$ 4.21	33.8 $\pm$ 0.6	1290 $\pm$ 57
		W2	< DL	5.96 $\pm$ 0.07	9.24 $\pm$ 0.03	1.89 $\pm$ 0.38	0.07 $\pm$ 0.02	4 $\pm$ 0.02	15.31 $\pm$ 0.26	6.27 $\pm$ 0.14	5.16 $\pm$ 0.05	321.2 $\pm$ 3.89	1120 $\pm$ 13
		W3	36.11 $\pm$ 0.15	< DL	< DL	1.18 $\pm$ 0.15	0.07 $\pm$ 0,02	3.74 $\pm$ 0.06	17.62 $\pm$ 0.08	3.7 $\pm$ 0.24	5.13 $\pm$ 0.13	6.78 $\pm$ 0.1	1250 $\pm$ 30
		W4	< DL	1.02 $\pm$ 0.02	< DL	1.21 $\pm$ 0.01	0.09 $\pm$ 0.01	13.96 $\pm$ 0.63	27.24 $\pm$ 1.18	4.95 $\pm$ 0.3	8.86 $\pm$ 1.37	557.7 $\pm$ 10.77	1640 $\pm$ 116
		W5	11.71 $\pm$ 0.15	5.72 $\pm$ 0.07	2.63 $\pm$ 0.03	0.52 $\pm$ 0.05	014 $\pm$ 0.05	7.13 $\pm$ 0.11	14.95 $\pm$ 0.09	9.93 $\pm$ 1.38	9.23 $\pm$ 0.39	111 $\pm$ 4.02	700 $\pm$ 14
		W*	< DL	0.11 $\pm$ 0.01	< DL	0.35 $\pm$ 0.12	0.08 $\pm$ 0.02	2.35 $\pm$ 0.06	12.27 $\pm$ 1.02	32.63 $\pm$ 2.48	5.93 $\pm$ 0.65	91.22 $\pm$ 1.81	810 $\pm$ 12

Table III-5: Comparison with national regulation (mean 2017) at watershed.

	NO ₃ (mg/l)	NH ₄ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)	Pb (ug/l)	Cd (ug/l)	Cr (ug/l)	Ni (ug/l)	Zn (ug/l)	Cu(ug/l)	Mn(ug/l)	Fe(ug/l)	
Wadis	W1	Excellent	Bad	Very Bad	Excellent	Excellent	Excellent	Middle	Excellent	Good	Excellent	Good
	W2	Excellent	Bad	Bad	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Good	Good
	W3	Good	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Good
	W4	Excellent	Middle	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Middle	Excellent	Excellent	Good	Good
	W5	Good	Bad	Bad	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent	Excellent

Table III-6: Comparison of trace metals in water lagoon during PSR (mean $\pm$ standard deviation) with studies during PRR, with other lagoons in the Mediterranean region and with guidelines.

Guidlines/Locality	Pb	Cd	Cr	Ni	Zn	Cu	Mn	Fe	References
Nador Lagoon, Morocco Wetland- Mediterranean Sea	2.17 $\pm$ 1.33	0.04 $\pm$ 0.01	33.46 $\pm$ 16.94	23.54 $\pm$ 1.71	28.38 $\pm$ 76.23	8.92 $\pm$ 5.01	18.00 $\pm$ 15.89	203.00 $\pm$ 86	Present Study PSR Wet Season 2017(ug/l)
	2.02 $\pm$ 0.82	0.21 $\pm$ 0.05	10.85 $\pm$ 2.39	26.88 $\pm$ 6.60	5.29 $\pm$ 3.32	31.26 $\pm$ 6.9	13.07 $\pm$ 9.04	797 $\pm$ 107	Present Study PSR Dry Season 2017 (ug/l)
	0.44 $\pm$ 0.15	0.03 $\pm$ 0.01	0.24 $\pm$ 0.263	0.62 $\pm$ 0.344	2.4 $\pm$ 0.6	1.56 $\pm$ 0.82	42.78 $\pm$ 35.08	23.62 $\pm$ 15.13	Bloundi (2005) PRR Between winter and summer 2004 (ug/l)
	7.47 $\pm$ 5.17	0.28 $\pm$ 0.15	1.57 $\pm$ 1.38	3.75 $\pm$ 5.46	19.08 $\pm$ 12.22	8.26 $\pm$ 2.84	-	-	Zerrouqi et al. (2013) PRR Summer 2006 (ug/l)
Burullus Lake, Egypt Wetland- Mediterranean Sea	1.80 $\pm$ 1.54	-	-	3.66 $\pm$ 0.70	17.0 $\pm$ 13.49	1.64 $\pm$ 0.77	1.03 $\pm$ 0.96	14.05 $\pm$ 5.44	El-Batrawy et al. (2018) Winter2014 (ug/l)
Burullus Lake, Egypt Wetland- Mediterranean Sea	8.07 $\pm$ 3.73	-	-	10.08 $\pm$ 1.13	4.01 $\pm$ 1.18	2.46 $\pm$ 0.83	1.15 $\pm$ 1.01	44.70 $\pm$ 30.9	El-Batrawy et al. (2018) Summer 2014 (ug/l)
Mar Menor Lagoon, Spain Wetland- Mediterranean Sea	0.008 $\pm$ 0.01	< DL	<DL	< DL	0.148 $\pm$ 0.04	< DL	0.023 $\pm$ 0.05	0.023 $\pm$ 0.01	Muñoz-Vera et al. (2016) Summer 2012 (ppm)
USEPA Year	5.6 1984	7.9 2016	50 Cr(VI) 1995	8.2 1995	81 1995	3.1 2007	-	-	USEPA (2016) Preservation of aquatic life saltwater (ug/l)

IV. Conclusion

The results of this study show that seasonal variations significantly affected the concentrations of Fe, Cu, Cr, and Cd in the lagoon. The highest mean values were recorded for Fe, Cu, Ni and Cd during the dry season and for Mn, Zn, Cr and Pb during the wet season. The average concentrations of Pb, Cd, Cr, Zn and Mn in the lagoon during 2017 are lower than the USEPA 2016 standards on saltwater aquatic life preservation, while the average concentrations of Ni and Cu are higher than these standards. In order to preserve this wetland, it is necessary to establish an environmental management plan taking into account the rehabilitation of the iron mining area, the extension of the sewerage network, the control of agricultural effluents and the upgrading of industrial pollution controls.

Chapitre IV : Evaluation environnementale de la qualité des sédiments superficiels de la lagune de Marchica

Ce chapitre a été traité sous forme d'un article publié dans la revue **Diversity** indexée dans les bases de données 'Scopus' :

Oujidi, B.; El Bouch, M.; Tahri, M.; Layachi, M.; Boutoumit, S.; Bouchnan, R.; Ouahidi, H.; Bounakhla, M.; El Ouamari, N.; Maanan, M.; Bazairi, H., Mhammdi, N & Snoussi, M. (2021). Seasonal and Spatial Patterns of Ecotoxicological Indices of Trace Elements in Superficial Sediments of the Marchica Lagoon following Restoration Actions during the Last Decade. *Diversity*, 13, 51.
<https://doi.org/10.3390/d13020051>

Résumé

« Distribution spatiale et saisonnière des indices écotoxicologiques des éléments traces métalliques dans les sédiments superficiels de la lagune de Marchica après les actions de restauration durant la dernière décennie »

L'évaluation environnementale des sédiments superficiels de la lagune Marchica a été réalisée pendant deux campagnes (saison humide et saison sèche) durant l'année 2018, selon un réseau d'échantillonnage de treize stations. Cette évaluation a consisté à analyser les éléments majeurs et traces, la granulométrie et le carbone organique total (TOC). Les principaux objectifs de cette étude sont :

1. Caractériser, suite aux actions de restauration réalisées autour de la lagune Marchica, la variation saisonnière des concentrations des éléments traces Pb, Cr, Zn, Cu, Co et Ba et leur corrélation avec les éléments majeurs Si, Al, Fe, Mn, Ca, Ti, K et P ; la granulométrie et le TOC dans les sédiments de surface de la lagune Marchica, afin d'établir les principaux facteurs contrôlant la distribution de certains métaux toxiques ;
2. Évaluer le risque écotoxicologique en comparant les concentrations des éléments traces avec les valeurs guides sédimentaires (SQG) et en déterminant les indices d'évaluation : facteur de contamination (CF), indice de charge de pollution (PLI), facteur d'enrichissement (EF), indice de géoaccumulation (Igeo) et quotient moyen des valeurs seuils (m-ERM-Q), afin d'examiner les effets biologiques potentiels de la toxicité des ETM dans les sédiments de surface ;
3. Déterminer les sources potentielles des ETM dans les sédiments ;
4. Identifier les zones fortement polluées en regroupant les stations présentant une similarité de pollution et en comparant la répartition avec les études précédentes.

Les résultats de cette étude ont montré que les concentrations moyennes des éléments majeurs durant les deux campagnes sont dans l'ordre décroissant suivant : Si (16,29%) > Ca (15,12%) > Fe (4,52%) > Al (4,17%) > K (1,66%) > Ti (0,34%) > P (0,11%) > Mn (0,05%). Les concentrations moyennes des ETM durant les deux campagnes sont dans l'ordre décroissant suivant : Zn (674,45 mg/kg) > Pb (361,16 mg/kg) > Ba (276,09 mg/kg) > Cr (42,55 mg/kg) > Cu (40,35 mg/kg) > Co (5,12 mg/kg). Les résultats du TOC varient de 0,17% à 6,19% pendant la saison humide et de 0,38% à 6,5% pendant la saison sèche. Des valeurs élevées en TOC ont été observées pendant les deux saisons sur le cordon dunaire coté Béni Ensar. La granulométrie a montré que généralement, à l'exception du cordon dunaire, les stations étaient caractérisées par des teneurs élevées en sable pendant la saison humide et par des teneurs élevées en limon pendant la saison sèche. La teneur en

argile était également plus élevée pendant la saison sèche et dominait la partie centrale de la lagune et le côté de la zone d'eutrophisation d'Arekmane.

Tous les paramètres géochimiques ont été regroupés en quatre groupes significatifs pendant la saison humide et la saison sèche (Figure IV-2 de ce chapitre). Le groupe G1, représente 9 stations humides et sèches (2 zones d'eutrophisation nord-ouest et sud-est, embouchure des rejets de la STEP du Grand Nador, 2 stations au centre de la lagune, station sur le cordon dunaire côté Béni Ensar, et 3 stations près des embouchures des oueds à la commune de Bouarg et la commune d'Arekmane). Ce groupe est soumis aux pressions des eaux usées non traitées de certaines agglomérations des communes de Béni Ensar et d'Arekmane, aux eaux usées industrielles de l'oued Selouane, aux effluents agricoles de la plaine de Bouarg et aux eaux usées des STEPs du grand Nador et d'Arekmane. Le deuxième groupe G2, représente la station humide et la station sèche de la zone marina. Deux sites d'échantillonnage du cordon dunaire ont été regroupés dans le troisième groupe G3, qui est sous influence marine. Le quatrième groupe G4, représente la station de la saison humide et la saison sèche de l'embouchure de l'oued Cabaillo, en aval de la mine de fer.

L'analyse en composantes principales (ACP) a été appliquée pour évaluer les processus géochimiques dans la lagune Marchica et distinguer les sources potentielles en éléments traces dans les sédiments (Figure IV-3 de ce chapitre). Les deux premiers axes de l'ACP ont expliqué 68,1% de la variance totale et l'analyse en clusters a montré la présence de 4 groupes. Le premier axe (52,7 % de la variance totale) a montré des corrélations positives avec Al, Fe, Mn, Si, Ti, K, limon, argile, Cu, Zn, Pb, Cr, et Ba, et des corrélations négatives avec Ca, P, TOC, sable, et Co. Le deuxième axe (15,4 % de la variance totale) a montré des corrélations positives avec le sable et corrélations négatives avec TOC et Co. La matrice des coefficients de corrélation de Spearman des concentrations granulométriques, TOC, des éléments majeurs et traces dans les sédiments de surface, et des paramètres physico-chimiques des eaux de surface a montré que les ETM sont associés aux particules fines (limon et argile).

L'analyse multivariée et l'évaluation du risque écotoxicologique des ETM ont révélé une contamination de la lagune par Pb, Zn et Cu. Quant aux Cr, Co et Ba, une pollution minimale a été identifiée. La distribution de l'indice de risque biologique révèle que quatre zones de la lagune peuvent présenter une forte probabilité de toxicité, constituant ainsi des zones de risque potentiel pour les organismes aquatiques : en saison humide, la zone de la bordure nord-ouest du cordon dunaire, la zone d'eutrophisation sud-est et l'embouchure d'oued Selouane véhiculant les rejets industriels ; et en saison sèche, la zone d'eutrophisation nord-ouest.

Malgré les actions de restauration réalisées autour de la lagune durant la dernière décennie, les concentrations en plomb, zinc et cuivre ont augmenté, et leur variation était significative entre les stations des groupes. La conservation de la biodiversité de la lagune Marchica nécessite un suivi et une évaluation continue, ainsi que la mise en œuvre d'un plan de gestion intégrée avec des actions de restauration, non seulement autour de la lagune, mais aussi au niveau de son bassin versant.

Seasonal and Spatial Patterns of Ecotoxicological Indices of Trace Elements in Superficial Sediments of the Marchica Lagoon following Restoration Actions during the Last Decade

Oujidi, B.; El Bouch, M.; Tahri, M.; Layachi, M.; Boutoumit, S.; Bouchnan, R.; Ouahidi, H.; Bounakhla, M.; El Ouamari, N.; Maanan, M.; Bazairi, H., Mhammdi, N & Snoussi, M. Diversity 2021, 13, 51. <https://doi.org/10.3390/d13020051>

Abstract

Marchica Lagoon, a Ramsar site on the Mediterranean coast of Morocco, is experiencing the impacts of watershed pollution, which includes pollutants from the domestic, agricultural, industrial, and mining sectors. Restoration actions were undertaken around this lagoon during the last decade in order to protect its ecological value and to develop tourist activity. To conserve the biodiversity in the lagoon, it is important to assess the environmental state of this ecosystem. This study aims to evaluate the ecotoxicological state of sediments through the post restoration characterization of the trace elements Pb, Cu, Zn, Cr, Co, and Ba, as well as their correlation to the major elements, grain size, and total organic carbon, sampled during two campaigns (the wet and dry seasons of 2018) across a sampling network of thirteen stations. Multivariate analysis and ecotoxicological risk assessment of the trace elements using the sediment quality guidelines and five pollution indices (geoaccumulation index (Igeo), enrichment factor (EF), contamination factor (CF), pollution-load index (PLI), and mean effect range median quotient (m-ERM-Q)) revealed contamination of the lagoon by Pb, Zn, and Cu, and minimal pollution by Cr, Co, and Ba. The distribution of the biological-risk index reveals that four zones of the lagoon may present a high probability of toxicity, thus constituting potential risk areas for aquatic organisms: during the wet season, the area in the northwestern sandbar border, the southeast eutrophication zone, and the mouth of the stream valley conveying industrial discharges; and during dry season, the northwestern eutrophication zone. Despite the restoration actions achieved around the lagoon, the lead, zinc, and copper concentrations increased, and their variation was significant between group stations. The biodiversity conservation of Marchica Lagoon requires continuous monitoring and assessment, as well as the implementation of an integrated management plan with restoration actions, not only around the lagoon, but also at its watershed level.

Keywords

Mediterranean Sea; Coastal Lagoon; Sediment contamination; Ecotoxicological state; Monitoring network.

I. Introduction

Coastal lagoons are very important ecosystems, characterized as the most valuable global coastal habitats, providing valuable ecosystem goods and services to humans (Pérez-Ruzafa et al., 2019a; Newton et al., 2018; Velasco et al., 2018). These semi enclosed ecosystems have not only economic value, but also heritage, societal, aesthetic, and scientific importance (De Groot et al., 2012; Kennish and Pearl, 2010; Levin et al., 2001). Nevertheless, these vulnerable areas are among the world's most altered and threatened natural systems (Newton et al., 2018; Eisenreich, 2005). Coastal lagoons face significant issues, including pollution, overexploitation, biological invasions, habitat destruction, and biodiversity changes (Halpern et al., 2008, 2007; Millennium Ecosystem Assessment, 2005). They are sensitive to land–sea interactions and can be severely affected by anthropogenic pollutants (Zhang et al., 2019; Newton et al., 2014; Castillo et al., 2013; Affian et al., 2009; Pérez-Ruzafa et al., 2005).

Trace elements are among the many anthropogenic contaminants reaching coastal lagoons, particularly those located in watersheds containing mines and mining industries. Their cumulative impact on biota can have a harmful effect on the health of marine ecosystems and humans (Boutahar et al., 2019; Wei et al., 2016). The distribution of trace elements in coastal marine areas is affected by hydrodynamic and biogeochemical processes, thereby modifying trace element bioavailability and associated environmental risks (Duan et al., 2019; De Lacerda, 1994). Sediment provides a compartment that records the temporal variation of anthropogenic inputs into the environment since the Industrial Revolution (Farmer, 1991), and allows for an ecotoxicological evaluation of trace elements.

The Marchica Lagoon, a unique coastal lagoon on the Mediterranean coast of Morocco, and the second largest in North Africa, is an example of these vulnerable ecosystems. Besides its ecological value as a Ramsar site and socioeconomic services (Selfati et al., 2019; Najih et al., 2015; Dakki, 2003; Malouli, 2002), the lagoon and its immediate surroundings have been undergoing major socioeconomic changes (tourism projects, construction of marinas, etc.). The strong urbanization of its shoreline has caused disturbances of various kinds, such as pollution and loss of habitat, which have had repercussions on the ecological values of the ecosystem. The current challenge is to reach a consensus between the conservation issues of its heritage values and the increasing development and amenities that the region is experiencing. The lagoon has qualified as an environmental hotspot on the Mediterranean coast, as it presents a eutrophication problem (UNEP/ EEA Report No 4, 2006; SEEE/INRH, 2009). Restoration actions were undertaken during the last decade by Moroccan authorities to protect the valuable qualities of the Marchica Lagoon, with the main actions related to the construction of a channel between the

lagoon and sea, the installation of two wastewater treatment plants around the lagoon, and an operation to remediate lagoon water quality, which includes the collection of solid waste and dredging where wadis (intermittent stream valleys) enter the lagoon (<http://www.agencemarchica.gov.ma/>).

The objectives of this study were to:

1. Characterize the variation in trace element concentrations of Pb, Cr, Zn, Cu, Co, and Ba and their correlation to major elements Si, Al, Fe, Mn, Ca, Ti, K, and P, grain size, and total organic carbon (TOC) in the surface sediments of the Marchica Lagoon following restoration actions during the wet and dry seasons, in order to establish the main factors controlling the distribution of some toxic metals;
2. Assess the ecotoxicological risk by comparing the concentration of trace elements with sediment-quality guidelines (SQGs) and assessment indices as good indicators: contamination factor (CF), pollution-load index (PLI), enrichment factor (EF), geoaccumulation index (Igeo), and the mean sediment-quality-guidelines quotient (m-ERM-Q) to examine the potential biological effects of the toxicity of trace elements in surface sediment ([Long et al., 2000](#); [Sutherland, 2000](#); [MacDonald et al., 1996](#); [Long et al., 1995](#); [Hakanson, 1980](#); [Tomlinson et al., 1980](#); [Müller, 1979](#));
3. Determine the potential sources of trace elements in the sediment;
4. Identify highly polluted areas by clustering the stations with pollution similarity and comparing the distribution with previous studies.

II. Materials and Methods

II.1. Site Description

The Marchica Lagoon (02°45'–02°55' and 35°16'–35°06'), also called Sabkha Bou-Areg or Nador, is the largest lagoon in Morocco, with a surface area of 115 km² and maximal depth of 8 m. The lagoon and the Mediterranean Sea are separated by a 25 km-long sandbar crossed by an artificial inlet 300 m wide and 6 m deep, which allows for water exchanges between these two ecosystems. The sedimentological study of the deposits of the lagoon permitted identification of five sedimentation media, namely, the internal border of the sandbar under marine influence; the central part of the lagoon, also under marine influence; the continental border under continental influence in the lagoon; two confined zones northwest and southeast of the lagoon; and the mouths of the wadis in the continental environment ([Hamoumi et al., 2011](#)). The lagoon is limited on its northwestern side by the volcanic Gourougou massif, on its southeast by the Kebdana massif, on its southwest side by the Beni Bouifrouf massif and the Bouarg plain, and on the northern coastal zone by marine inputs ([Bloundi, 2005](#)). The main wadis that drain into the lagoon are Akhandouk and Ouchen, crossing the city of Beni Ensar; Selouane, crossing the cities of Al Aroui, Selouane, and Bouarg; Cabaillo, crossing the cities of Iksane,

Zeghanghan, Beni Bouifrouf, Ihaddaden, and Nador; and Afelioun and Lhdara, crossing the city of Arekmane (Figure IV-1).

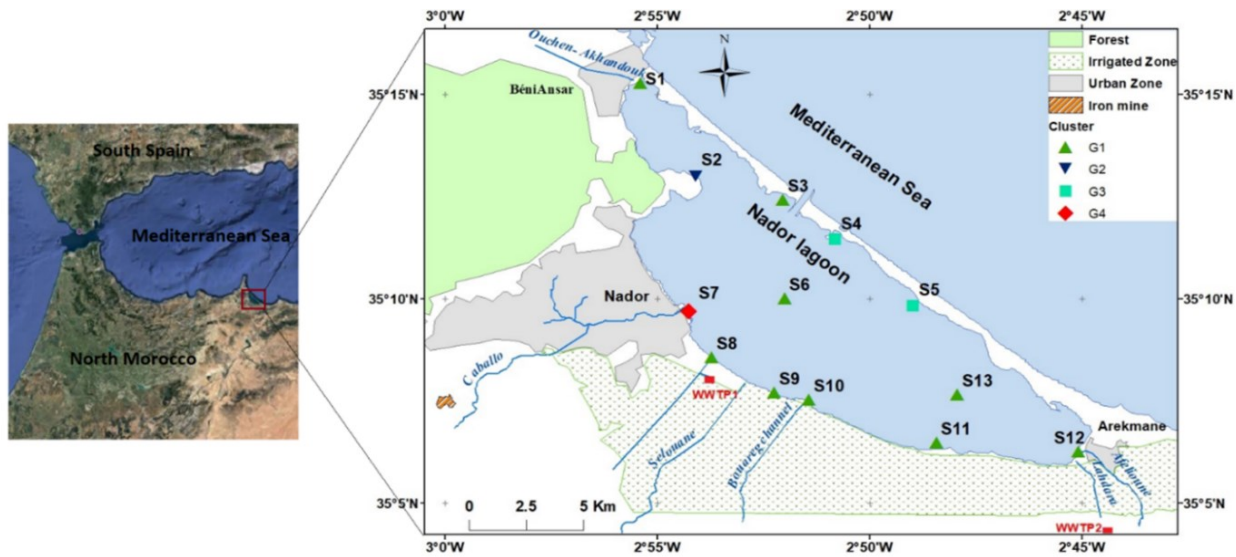


Figure IV-1: Map of Marchica Lagoon (S, sample station; G, group station).

The dominant climate around the lagoon is Mediterranean, with hot and dry summers and mild and rainy winters (Raji et al, 2018). The wind is the main driver of marine circulation of the waters of the Marchica Lagoon (Hilmi et al., 2015; Guelorget et al., 1987), which has two dominant directions, east–northeast to east from May to October, and west–southwest to west between November and May. The watershed of the lagoon is characterized by the abandoned iron-mining site at Iksane, the iron and steel industries at Selouane and Al Aroui, irrigated agriculture (including fertilizer and pesticide use) on the Bouarg plain, and fishing industries in Beni Ensar (Bloundi et al., 2009).

II.2. Environmental Sampling

The samples were collected during the wet (March) and dry (July) seasons in 2018. Sampling stations were established by considering the sedimentological characteristics, bathymetry, and currentology of the lagoon, ensuring the coverage of all areas and accounting for all potential sources of pollution: 3 stations in the internal border of the sandbar under marine influence; 2 stations in the center of the lagoon, also under marine influence; 2 stations at the confined zones northwest and southeast of the lagoon; 3 stations under continental influence, including the mouths of the wadis (Cabaillo wadi, Selouane wadi, and Bouarg channel); 1 station at the outfall of the great Nador wastewater treatment plant; one marina station; and another between Bouarg and Arekmane. There were 13 sampling stations inside the lagoon for each campaign (Figure IV-1).

II.3. Analysis Methods

Superficial sediment cores (0 - 5 cm) were sampled and conserved at a temperature of about -4°C in an airtight transparent plastic container. The position and depth of the samples collected were determined using an equipment board of the National Institute of Fisheries Research (INRH) Zodiac with reference FURUNO FCV-627/587 Fish Finder, including a global positioning system (GPS) receiver and depth-probe GPS of National Institute of Fisheries Research (<https://www.inrh.ma>). For each station, the surface sediment samples were separated into four subsamples, one for particle size analysis, one for the total organic carbon (TOC) analysis, and two others for chemical analysis of the major and trace elements. A WTW Multi-parameter Meter, model 3430, was used in situ to measure the physicochemical parameters (temperature, salinity, pH, and dissolved oxygen) of the water (0.5 m under the surface water of the lagoon for each station).

Sediment granulometry was measured with a laser particle size analyzer (Malvern Mastersizer 2000 ©) after preparing the sediments in a sodium hexametaphosphate solution (Gee, 2002). The particle-size distribution was calculated using Gradistat © Excel software (Blott, 2001) after each measurement and expressed as relative proportions (%) of sand (2 mm–63 μm), silt (63–2 μm), and clay (< 2 μm). TOC was measured with a LECO © carbon analyzer that estimates the percentages of CO_2 after a combustion of oxygen at 1400°C and a mineral decarbonization with a sulfuric acid solution (Andrews, 2008). Two analyses were used and the precision of the total carbon data is expressed by the range of standard deviations and estimated to 0.001–0.042. Granulometry and TOC were analyzed at LETG-Nantes, France (<https://letg.cnrs.fr/>).

The major elements were analyzed using a Bruker S1 Turbo SD hand-held X-ray fluorescence (HHXRF) spectrometer (Bruker AXS GmbH) using the certified standard reference material NIST 2702 at the National Center for Energy, Sciences and Nuclear Techniques (<https://www.cnesten.org.ma/>). The principle of the HHXRF technology is based on the fact that the incident rays eject electrons from the atoms of the elements in the sample, resulting in the emission of X-rays with energies that are characteristic of the elements present in the sample. The emitted X-rays are analyzed using a silicon drift detector. The results are immediately displayed and stored. All the sediment samples were analysed in two replicates. The recovery (%) and the relative standard deviation (RSD%) of the major elements from the Certified Reference Material (CRM) were 100.4–7.77 for Al, 83.8–2.72 for P, 108.2–2.85 for K, 112.5–9.33 for Ca, 99.9–5.61 for Ti, 99.6–3.13 for Mn, and 96.7–3.85 for Fe. Detection limits (ppm) of the analyzed elements were 1058 for Al, 16 for Fe, 10 for Mn, 795 for Si, 87 for P, 51 for K, 50 for Ca, and 23 for Ti.

Trace elements were analyzed using an Agilent 4200 microwave plasma atomic emission spectrometer (MP-AES) according to the NFX 31-147 standard analysis methods at the National Laboratory of Studies and Monitoring of Pollution (<https://labo.environnement.gov.ma/>). Sediments and Certified Reference Material (CRM) were digested in a microwave digestion system with mineralization by attack of 65% nitric acid HNO_3 (9 mL) and with hydrochloric acid HCL at 37% (2 mL) in a microwave oven of the “ETHOS One” type for digestion of the samples at a temperature of 180 °C for 40 min. A blank was included in each digestion. The CRMs were analyzed every 10 samples. The recovery (%) and RSD (%) of the trace elements from CRM were 110–1.25 for Cu, 100–0.53 for Pb, 105–1.24 for Zn, 95–0.54 for Cr, 105–0.63 for Co, and 110–0.26 for Ba. Detection limits (mg/kg) of the analyzed elements were 0.0003 for Cr, 0.0003 for Cu, 0.0044 for Pb, 0.0028 for Zn, 0.0031 for Co, and 0.0002 for Ba.

II.4. Statistical Methods

To test the season's effect, significant differences between the mean values of each parameter (major and trace elements, grain size, TOC, and physico-chemical parameters) between the wet and dry seasons were tested using the Kruskal–Wallis test; the normality being not verified overall (Shapiro–Wilk test, $p > 0.5$). Spearman's rank coefficient was calculated to test the relationship between the above parameters.

The data matrix by season (parameters values x sampling stations) was fourth-root transformed and the Pearson similarity calculated between the stations. Principal component analysis (PCA) was conducted on the environmental variables to explore the main gradients in the study area (Jackson, 2005). To identify the affinity groups of the stations, cluster analysis (CA) based on squared Euclidean distance and Ward's method as well as the SIMPROF test of similarity profile were used. The significance of the differences between the group stations and between seasons for all the parameters was investigated with permutational multivariate ANOVA (PERMANOVA).

The Shapiro–Wilk and Kruskal–Wallis tests were performed using IBM SPSS Statistics software version 20 while the Spearman test was performed using the R program. PCA and CA were performed with PRIMER v.6 software (Clarke & Gorley, 2006). All statistical methods were applied with a confidence level of 95% ($p < 0.05$).

The maps of the lagoon were produced with ESRI software ArcGIS Desktop 10.

II.5. Sediment Contamination and Risk Assessment Indices

Ecological risk was assessed using various indices (Table IV-1): enrichment factor (EF) (Sutherland, 2000), contamination factor (CF) (Hakanson, 1980), pollution-load index (PLI) (Tomlinson et al, 1980), and geoaccumulation index (Igeo) (Müller, 1979). For the EF calculation, normalization was used to quantify the anthropogenic metal pollution from the natural variability of trace elements. The major conservative elements commonly used for geochemical normalization are Al (Niencheski et al, 1994; Schropp et al, 1990; Bruland et al, 1974) and Fe (Okay et al, 2016; Maanan et al, 2013; Blomqvist et al, 1992; White and Tittlebaum, 1985), two of the most abundant elements on earth. In this study, Fe was selected as the reference element for calculation. Local background values (LBV) were elaborated from a previous study for some trace elements (Maanan et al, 2015). In order to study the ecological risk for the trace elements Pb, Cr, Zn, Cu, Co, and Ba, reference values were taken from Rudnick and Gao (2003). Sediment concentrations were compared with sediment-quality guidelines (SQGs) for marine ecosystems to evaluate the ecotoxicological risk (Long et al, 2000; Long et al, 1998; Long and MacDonald, 1998; Macdonald et al, 1996 ; Long et al, 1995): values below the effect range low (ERL) and threshold effect level (TEL) refer to essentially uncontaminated samples presenting a limited risk of toxicity. Mean sediment-quality guideline quotients (m-ERM-Q) were applied (Long et al, 2000; Long et al, 1998) to examine the potential biological effects of the toxicity of the trace elements in the surface sediment.

Table IV-1: Metal pollution index and descriptions.

Pollution Index	Formulation	Ecotoxicological Assessment						
Enrichment factor (EF) (Sutherland, 2000)	$(C_{\text{Trace metal}}/C_{\text{Fe}})_{\text{Sample}}/(C_{\text{Trace metal}}/C_{\text{Fe}})_{\text{Background}}$	$EF < 2$ Minimal pollution	$2 < EF < 5$ Moderate pollution	$5 < EF < 20$ Significant pollution	$20 < EF < 40$ Very strong pollution	$EF > 40$ Extreme pollution		
Geoaccumulation index (I_{geo}) (Müller, 1981 ; Müller, 1979)	$\log_2 (C_{\text{Trace metal}}/1.5 C_{\text{Background}})$	$I_{\text{geo}} < 0$ Unpolluted	$0 < I_{\text{geo}} < 1$ Unpolluted to moderately polluted	$1 < I_{\text{geo}} < 2$ Moderately polluted	$2 < I_{\text{geo}} < 3$ Moderately to strongly polluted	$3 < I_{\text{geo}} < 4$ Strongly polluted	$4 < I_{\text{geo}} < 5$ Strongly to extremely polluted	$I_{\text{geo}} > 5$ Extremely polluted
Contamination factor (CF) (Hakanson, 1980)	$C_{\text{Trace metal Sample}}/C_{\text{Trace metal Background}}$	$CF < 1$ Not polluted	$1 \leq CF < 2$ Mildly polluted	$2 \leq CF < 3$ Moderately polluted	$CF \geq 3$ Strongly polluted			
Pollution-load index (PLI) (Tomlinson et al, 1980)	$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n)^{1/n}$	$PLI < 1$ Unpolluted	$1 \leq PLI < 2$ Moderately polluted	$2 \leq PLI < 3$ Strongly polluted	$PLI \geq 3$ Very strongly polluted			
Mean effect range medium quotient (m-ERM-Q) (Long et al, 2000)	$\sum (C_{\text{Trace metal Sample}_i}/ERM_i)/n$ ERM i: values of effects range–median guidelines for metal I [31]	< 0.1 9% probability of toxicity	$0.1–0.5$ 21% probability of toxicity	$0.5–1.5$ 49% probability of toxicity	> 1.5 76% probability of toxicity			

III. Results

III.1. Seasonal Distribution of the Geochemical Parameters in Marchica Lagoon Sediment

III.1.1. Physicochemical Lagoon Parameters

The physicochemical parameters of the surface waters in the lagoon during the wet and dry seasons shown in Table IV-2 revealed seasonal variation in temperature ($T^{\circ}\text{C}$) ($p < 0.05$), with values fluctuating from 16.7 to 18.4 during the wet season and from 26 to 28.2 during the dry season. No differences ($p > 0.05$) for pH were found, with variation from 7.64 to 8.54 during the wet season and from 7.82 to 8.72 during the dry season. Salinity (Sal) varied from 22.1 to 36.9 during the wet season and from 34.5 to 38.5 during the dry season, with seasonal variation ($p < 0.05$). For dissolved oxygen (O_2), significant difference was observed ($p < 0.05$), with variation from 4.9 to 11.83 during the wet season and 4.91 to 7.33 during the dry season. The depth of the sediment samples varied from 0.5 near the border to 6.7 at the lagoon center.

Table IV-2: Physicochemical parameters of the surface waters in the lagoon during the wet and dry seasons.

		T °c	pH	O₂ (mg/l)	Sal (g/l)
Wet Season	Min–Max	16.7–18.4	7.64–8.54	4.9–11.83	22.1–36.9
	Mean $\pm$ SD	17.52 $\pm$ 0.46	8.25 $\pm$ 0.21	9.64 $\pm$ 1.58	35.28 $\pm$ 3.98
Dry Season	Min–Max	26–28.2	7.82–8.72	4.91–7.33	34.5–38.5
	Mean $\pm$ SD	27.09 $\pm$ 0.75	8.38 $\pm$ 0.29	6.57 $\pm$ 0.73	37.21 $\pm$ 0.97

Min: minimum, Max: maximum and SD: standard deviation.

III.1.2. Granulometry and TOC

The seasonal granulometric distribution and TOC sediment in the lagoon during 2018 are shown in Table IV-3. The sediment particle grain size analysis indicated seasonal variation ($p < 0.05$), while the analyzed TOC contents in the surface sediment were not affected seasonally ($p > 0.05$). Seven sampling stations were classified as muddy sand facies during the wet season and sandy mud during the dry season: near the eutrophication zone of the Beni Ensar lagoon side (S1); near the Beni Ensar sandbar border side (S3); near the marina zone (S2); near the area of the great Nador wastewater treatment plant outfall (S8); near the Selouane wadi (S9); in the area between Bouarg and Arekmane (S11); and center of the Arekmane lagoon

side (S13). The area near the Arekmane sandbar border side (S4 and S5) and the area near the Cabaillo wadi (S7) were characterized as sand facies during both seasons. The center of the lagoon (S6) was sand facies during the wet season and sandy mud during the dry season. The eutrophication zone side of Arekmane (S12) was muddy sand facies during the wet season and mud (fine silt) during the dry season. Near the Bouarg channel, characterized by agricultural effluents (S10), sediments were muddy sand facies during the wet season and sand during the dry season.

The TOC results ranged from 0.17% to 6.19% during wet season and from 0.38% to 6.5% during dry season. An elevated TOC value was observed near the sandbar border side of Beni Ensar (S3; depth: 2.85 m) during the wet and dry seasons.

Table IV-3: Seasonal and spatial concentrations of the grain size fractions (%), total organic carbon (TOC; %), major elements (%), and trace elements (mg/kg).

Station	Season	Granulometry (%)			TOC %	Facies Group	Major Elements (%)								Trace Elements (mg/kg)					
		Sand	Silt	Clay			Al	Fe	Mn	Si	Ti	Ca	P	K	Cu	Zn	Pb	Cr	Co	Ba
S1	Wet	80.7	18.6	0.7	3.20	Muddy Sand	4.86	4.00	0.049	14.10	0.35	12.11	0.14	1.94	15.37	3.42	204.58	24.86	< DL	179.56
	Dry	36.2	62.7	1.1	3.26	Sandy Mud	5.41	4.06	0.052	14.24	0.36	12.54	0.13	1.86	33.14	6.75	3039.51	30.92	8.61	197.23
S2	Wet	64.4	34.6	1.1	3.95	Muddy Sand	7.98	10.49	0.094	16.36	0.35	4.87	0.05	1.78	297.87	191.13	320.96	75.06	< DL	296.69
	Dry	16.7	81.1	2.3	2.93	Sandy Mud	8.89	10.56	0.099	16.29	0.35	4.90	0.05	1.87	651.72	346.36	291.58	94.44	< DL	415.23
S3	Wet	87.4	12.4	0.2	6.19	Muddy Sand	3.25	3.12	0.037	14.39	0.28	16.14	0.13	1.42	8711	40.17	192.06	53.85	< DL	207.60
	Dry	24.0	74.6	1.3	6.50	Sandy Mud	3.46	3.15	0.036	14.72	0.28	16.82	0.12	1.43	86.4	39.75	175.97	45.22	7.47	186.34
S4	Wet	95.1	4.9	0.1	5.34	Sand	0.21	1.07	0.039	9.06	0.09	33.50	0.18	0.29	10.01	2.68	145.15	20.96	< DL	65.31
	Dry	100.0	0.0	0.0	4.11	Sand	0.23	1.07	0.038	9.36	0.09	33.10	0.19	0.29	13.39	2.14	112.46	7.43	10.43	66.84
S5	Wet	95.0	4.9	0.1	5.43	Sand	0.47	1.77	0.049	9.53	0.10	33.53	0.16	0.45	13.51	2.43	131.83	6.25	<DL	89.30
	Dry	100.0	0.0	0.0	3.86	Sand	0.56	1.73	0.048	9.18	0.10	33.06	0.16	0.44	16.59	8.27	123.86	8.60	11.08	80.65
S6	Wet	94.3	5.5	0.2	5.30	Sand	5.34	4.29	0.054	18.48	0.37	9.95	0.08	2.16	12.41	2.54	146.19	2.24	< DL	97.60
	Dry	10.9	85.5	3.5	2.08	Sandy Mud	4.97	4.31	0.055	18.57	0.37	9.37	0.09	2.09	98.73	34.95	155.62	63.70	8.85	250.87
S7	Wet	90.5	9.1	0.4	0.17	Sand	6.80	11.78	0.102	20.20	0.52	4.19	0.08	2.58	200.4	63.48	225.34	35.54	< DL	986.22
	Dry	92.6	7.0	0.3	0.38	Sand	6.94	11.61	0.104	20.37	0.53	4.32	0.11	2.78	209.69	65.96	141.53	33.29	< DL	924.62
S8	Wet	75.9	23.6	0.5	5.89	Muddy Sand	3.84	3.86	0.039	18.13	0.40	13.14	0.11	1.87	89.48	22.67	165.52	26.97	< DL	464.99
	Dry	15.2	83.0	1.9	1.84	Sandy Mud	3.66	3.94	0.040	18.22	0.41	13.21	0.11	2.06	97.15	44.19	140.13	37.56	19.80	482.91
S9	Wet	78.5	20.6	0.9	1.94	Muddy Sand	3.59	3.59	0.035	17.89	0.40	14.01	0.11	1.50	58.75	8.40	2389.36	36.56	< DL	243.14
	Dry	42.3	55.5	2.2	2.09	Sandy Mud	3.92	3.61	0.036	18.22	0.40	14.06	0.10	1.61	39.79	9.40	130.27	38.2	13.12	203.24
S10	Wet	70.7	27.7	1.5	2.36	Muddy Sand	2.71	3.19	0.048	14.65	0.30	21.05	0.13	1.33	34.92	3.69	156.50	25.84	< DL	257.20
	Dry	91.8	7.3	0.8	2.03	Sand	2.89	3.35	0.048	15.12	0.30	20.92	0.13	1.24	25.59	4.35	121.50	8.33	11.33	307.42
S11	Wet	62.0	36.6	1.3	2.20	Muddy Sand	4.39	3.68	0.037	20.27	0.40	11.27	0.09	2.12	67.28	18.45	179.79	77.17	< DL	205.68
	Dry	20.4	77.2	2.4	2.79	Sandy Mud	4.82	3.76	0.037	20.63	0.40	11.46	0.09	1.91	73.55	30.00	120.86	65.27	18.2	181.75
S12	Wet	60.5	38.9	0.6	1.74	Muddy Sand	4.50	3.62	0.035	18.86	0.42	11.95	0.08	1.80	6448	16.57	156.27	64.82	< DL	195.65
	Dry	9.2	87.0	3.8	2.35	Mud	4.37	3.67	0.035	19.13	0.42	11.85	0.08	2.04	58.89	21.31	124.12	76.89	13.02	207.51
S13	Wet	60.3	38.6	1.1	3.63	Muddy Sand	4.81	4.04	0.047	18.76	0.40	11.25	0.08	2.03	74.28	26.9	163.14	59.04	< DL	157.17
	Dry	11.9	83.6	4.4	1.93	Sandy Mud	5.44	4.10	0.048	18.82	0.40	10.50	0.09	2.16	97.86	33.05	135.93	87.40	11.08	227.57

III.1.3. Major and Trace Elements

Seasonal variation of the major and trace sediment elements in the lagoon during 2018 are reported in Table IV-3. Except for Pb ($p < 0.05$), no significant differences for these elements among seasons were observed ($p > 0.05$), while Co was below the detection limit during the wet season.

The mean concentrations of the major elements during the wet and dry seasons were, in descending order, Si (16.29%) > Ca (15.12%) > Fe (4.52%) > Al (4.17%) > K (1.66%) > Ti (0.34%) > P (0.11%) > Mn (0.05%). The mean concentrations of the trace elements were, in descending order, Zn (674.45 mg/kg) > Pb (361.16 mg/kg) > Ba (276.09 mg/kg) > Cr (42.55 mg/kg) > Cu (40.35 mg/kg) > Co (5.12 mg/kg).

The concentration ranges of the major elements Al, Fe, Mn, Si, Ti, Ca, K, and P (%) during the two seasons were, respectively, 0.22–8.43, 1.07–11.70, 0.04–0.10, 9.21–20.45, 0.09–0.52, 4.25–33.30, 0.29–2.68, and 0.05–0.18, with maximal concentrations near the mouth of the Cabaillo wadi and the marina zone (S2 and S7) for Al, Fe, and Mn; near the mouth of Cabaillo wadi (S7) for Si, Ti, and K; and at the sandbar border near the inlet (S4 and S5) for Ca.

The concentration ranges of the trace elements (mg/kg) Zn, Pb, Ba, Cr, Cu, and Co during the two seasons were, respectively, 11.70–4398.70, 127.85–1622.05, 66.08–955.42, 7.43–84.75, 2.41–268.75, and <LD–9.90 (LD, limit of detection), with maximal concentrations at the sandbar border side of Beni Ensar and the eutrophication zone of Arekmane (S3 and S12) for Zn; at the eutrophication zone of Beni Ensar and near the Selouane wadi (S1 and S9) for Pb; at the Cabaillo wadi (S7) for Ba; at the marina zone (S2) for Cr and Cu; and the maximum near the outfall of the wastewater treatment plant (S8), and the minimum at S2 and S7 for Co.

III.2. Spatial Pattern and Correlation of the Geochemical Parameters, Granulometry, and TOC in Marchica Lagoon Sediment

All geochemical parameters were grouped into four significant clusters during the wet and dry seasons (Figure IV-2). The first group, G1, was the largest, with 9 stations (eutrophication zones northwest and southeast of lagoon, station near the agricultural channel, station near the outfall of the great Nador STEP (WWTP), 2 stations in the lagoon center, station at the sandbar border, and 3 stations near the mouths of wadis at Bouarg and Arekmane); this group is exposed to untreated wastewater from agglomerations of Beni Ensar and Arekmane, industrial wastewater from Selouane wadi, agricultural effluents from the Bouarg plain, and wastewater from the great Nador and Arekmane wastewater treatment plants. The second group, G2, represents the wet and dry stations of the marina. Two sampling sites from the sandbar were grouped into G3, which is under marine influence with Ca and P as the

dominant elements. G4 represents the wet and dry season station (S7) that lies near the mouth of the Cabaillo wadi and downstream from the iron mine.

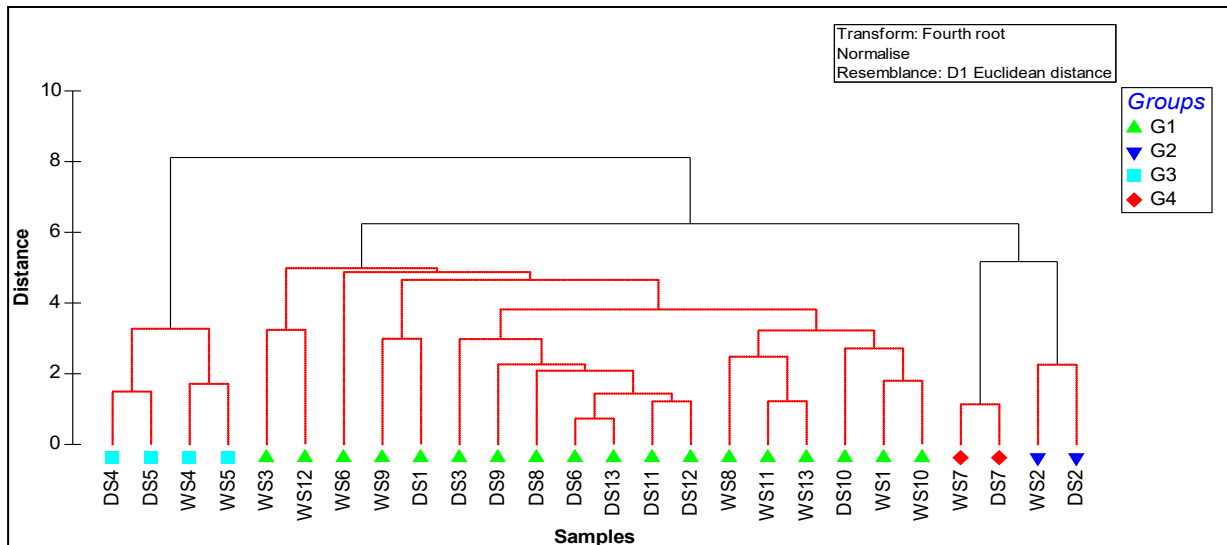


Figure IV-2: Dendrogram showing the cluster pattern during wet and dry seasons (WS, wet station and DS, dry station) of the geochemical parameters, granulometry, and TOC, on the basis of similarity.

Principal component analysis (PCA) was used to evaluate the geochemical processes in Marchica Lagoon and distinguish the potential sources of trace elements in the sediment (Figure IV-3). Two axes, PC1 and PC2, explained 68.1% of total variance. The first accounted for 52.7% of total variance, and showed positive loadings on Al, Fe, Mn, Si, Ti, K, silt, clay, Cu, Zn, Pb, Cr, and Ba, and negative loadings on Ca, P, TOC, sand, and Co. The second component accounted for 15.4% of total variance, and showed positive loadings on sand, and negative loadings on TOC and Co. PC1 suggested that the pressure exerted on G1, G2, and G4 could be attributed to Cu, Zn, Pb, Cr, and Ba in correlation with Al, Fe, Mn, Si, Ti, K, silt, and clay, with the maximal concentration at G4 and a decrease at G1. However, the pressure exerted on G3 was attributed to marine influence.

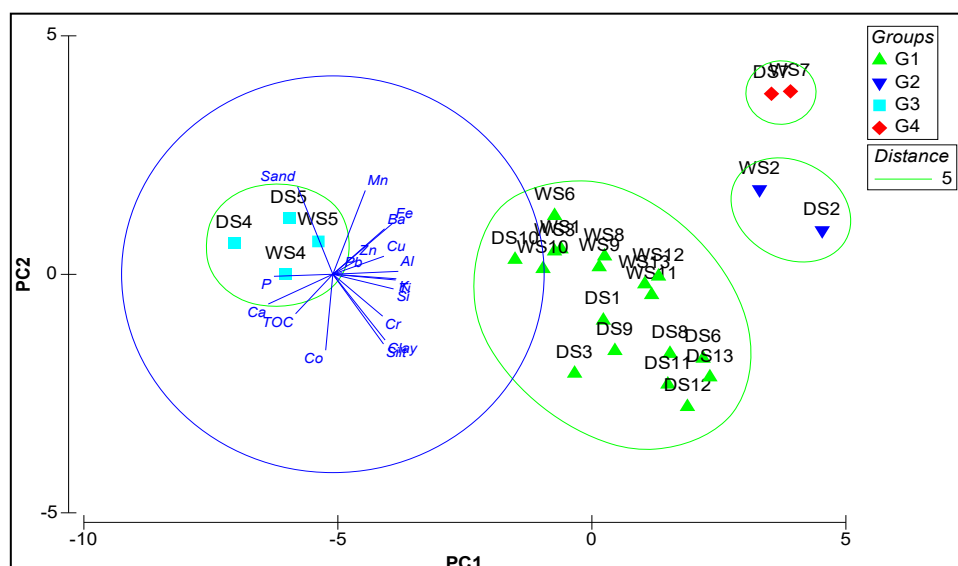


Figure IV-3: Principal component analysis (PCA) of the wet and dry seasons (WS, wet station and DS, dry station) for the geochemical parameters, granulometry, and TOC.

The PERMANOVA conducted for all the geochemical parameters, granulometry, and TOC in the lagoon revealed significant differences between group stations, while for seasonality this was not found; also, groups G2 and G4 were similar in the pairwise comparison, making them constitute a single group.

Spearman's correlation analysis was conducted to explore the relationship between the grain size, TOC, and major and trace elements in sediment and the physicochemical parameters of the surface waters (Table IV-4). All trace elements except Co showed a positive correlation with Al and Fe. A strong positive correlation was found between Al and Fe ($\rho = 0.95$, $p < 0.01$), K ($\rho = 0.76$, $p < 0.01$), Si ($\rho = 0.56$, $p < 0.05$), Cu ($\rho = 0.57$, $p < 0.05$), Pb ($\rho = 0.59$, $p < 0.05$), and Cr ($\rho = 0.60$, $p < 0.05$). Strongly positive correlation was also found between Fe and Mn ($\rho = 0.62$, $p < 0.05$), K ($\rho = 0.84$, $p < 0.01$), Si ($\rho = 0.60$, $p < 0.05$), and Cu ($\rho = 0.60$, $p < 0.01$). Highly positive correlation was found between Cu and Zn ($\rho = 0.86$, $p < 0.01$), Cr ($\rho = 0.71$, $p < 0.01$), and Ba ($\rho = 0.61$, $p < 0.05$); and between Zn and Cr ($\rho = 0.74$, $p < 0.01$) and Ba ($\rho = 0.60$, $p < 0.05$). Except for TOC with temperature, which shows a significant correlation ($\rho = 0.65$, $p < 0.05$), no other significant correlation was observed between the surface waters' physicochemical parameters (T °C, pH, O₂, and Sal) and TOC, granulometry, and the major and trace elements.

Table IV-4: Spearman's correlation coefficients of the major and trace elements, grain size fractions, and TOC in sediment and the physicochemical parameters of the surface waters in Marchica Lagoon.

	T °C	pH	O2	Sal	Sand	Silt	Clay	TOC	Al	Fe	Mn	Si	P	K	Ca	Ti	Cu	Zn	Pb	Cr	Co	Ba
T °C	1																					
pH	-0.46	1																				
O2	0.16	0.22	1																			
Sal	0.24	0.39	0.35	1																		
San	-0.21	-0.19	-0.19	-0.41	1																	
Silt	0.21	0.19	0.19	0.19	-1 **	1																
Clay	-0.09	0.51	0.24	0.24	-0.86	0.85	1															
TO	0.64*	-0.51	-0.06	-0.06	0.16	-0.16	-0.41	1														
Al	0.07	-0.13	0.17	0.17	-0.48	0.48	0.48	-0.42	1													
Fe	0.07	-0.22	-0.07	-0.07	-0.45	0.45	0.44	-0.40	0.95 **	1												
Mn	0.14	-0.33	-0.25	-0.25	0.22	-0.22	-0.18	0.00	0.54	0.62 *	1											
Si	-0.41	0.16	-0.19	-0.19	-0.59 *	0.59 *	0.65 *	-0.64 *	0.56 *	0.60 *	-0.05	1										
P	0.12	-0.16	-0.25	-0.25	0.82 **	-0.82	-0.82 **	0.42	-0.72 **	-0.68 *	-0.04	-0.75 **	1									
K	-0.17	-0.09	-0.29	-0.29	-0.51	0.51	0.53	-0.44	0.76 **	0.84 **	0.29	0.85 **	-0.65 *	1								
Ca	0.05	0.12	-0.02	-0.02	0.56 *	-0.56 *	-0.54	0.45	-0.95 **	-0.95 **	-0.47	-0.74 **	0.81 **	-0.86 **	1							
Ti	-0.42	0.07	-0.16	-0.16	-0.45	0.45	0.45	-0.71 **	0.51	0.58	-0.09	0.84 **	-0.57 *	0.76 *	-0.62 *	1						
Cu	0.08	-0.49	-0.16	-0.16	-0.52	0.52	0.24	-0.07	0.57 *	0.60 *	0.18	0.53	-0.65 *	0.54	-0.68 *	0.45	1					
Zn	-0.02	-0.26	0.02	0.02	-0.66 *	0.66 *	0.38	-0.14	0.43	0.42	-0.14	0.54	-0.68 *	0.44	-0.54	0.48	0.86	1				
Pb	0.27	-0.39	0.31	0.31	-0.19	0.19	0.07	-0.18	0.59 *	0.50	0.15	0.09	-0.23	0.29	-0.42	0.31	0.42	0.34	1			
Cr	0.06	0.07	0.31	0.31	-0.81	0.81	0.70 **	-0.31	0.60 *	0.50	-0.16	0.63 *	-0.86 *	0.48	-0.67 *	0.42	0.71	0.74 **	0.37	1		
Co	-0.19	0.42	-0.18	-0.18	-0.21	0.21	0.30	-0.19	-0.44	-0.35	-0.64	0.26	0.003	-0.03	0.33	0.30	-0.28	-0.17	-0.31	-0.06	1	
Ba	-0.19	-0.22	-0.16	-0.16	-0.23	0.23	0.12	-0.51	0.33	0.44	0.09	0.45	-0.39	0.31	-0.40	0.60 *	0.61 *	0.60 *	0.41	0.36	0.0	1

** Significant correlation at the 0.01 level; * significant correlation at the 0.05 level.

III.3. Ecological Risk of the Trace Elements in Marchica Lagoon Sediment

The spatial distribution of the wet and dry enrichment factors (EFs) in the lagoon is reported in Figure IV-4. According to [Sutherland \(2000\)](#), the Pb results revealed extreme pollution at the eutrophication zone of Beni Ensar during the dry season and at the mouth of the Selouane wadi during the wet season (S1 and S9); very strong pollution was observed at the sandbar border during the wet and dry season (S4); and significant pollution was found in all others stations during the wet and dry seasons, except near the Cabaillo wadi (S7), which was characterized by moderate pollution. The EF values for Zn indicated extreme pollution at the northwest sandbar border and at the eutrophication zone of Arekmane during the wet season (S3 and S12); moderate pollution at the marina zone (S2) during the dry season; and minimal pollution was observed in all other stations during both the wet and dry seasons. Minor enrichment of the trace elements Cr, Co, and Ba was found in the lagoon during both the wet and dry seasons. The EF values for Cu during the wet and dry seasons were under 2 in all stations, except in the marina zone (S2), which showed moderate pollution.

The spatial distribution of geoaccumulation index (Igeo) during wet and dry seasons is reported in Figure IV-5. According to the scale reported by [Müller \(1981\)](#), Igeo Pb results revealed a extreme pollution level at the mouth of Selouane wadi (S9) during wet season and the northwest eutrophication zone (S1) during dry season and all the other stations were between moderately to strongly polluted during wet and dry seasons. Igeo values for Cr, Co, and Ba were found to be at unpolluted levels for all stations in the lagoon during both wet and dry seasons. Igeo values of Cu were found during wet and dry seasons unpolluted except for the marina zone (S2) which were between moderately to strongly polluted and the mouth of Cabaillo wadi (S7) which were unpolluted to moderately polluted. For zinc, Igeo values during wet season were observed to be at a extreme pollution level at the sandbar border (S3) and at the eutrophication zone of Arekmane (S12); at a moderate pollution level at the marina zone (S2) and at unpolluted to moderate pollution at the mouth of Cabaillo wadi (S7); during dry season marina zone (S2) was found at moderate to strongly polluted and (S7) was at unpolluted to moderate pollution as during the wet season; the other stations were unpolluted during both wet and dry seasons.

The spatial distribution of the contamination factor (CF) during the wet and dry seasons in the superficial sediment in the lagoon is presented in Figure IV-6. The results indicated that all CF values of Pb during the wet and dry seasons were greater than 3, suggesting the presence of strong lead pollution in the study areas. For the CF values of zinc, 3 stations during the wet season (S2, S3 and S12) and 2 others (S2 and S7) during the dry season were observed to be strongly polluted, 1 station was found to be moderately polluted during the wet season (S7), 3 stations during the wet and dry seasons (S8, S11 and S13), and 2 others during the dry seasons (S3 and S6)

were found mildly polluted; the other stations were not polluted. The CF values of Cu indicated strong pollution at S2 during the wet and dry seasons, moderate pollution at S7 during the wet and dry seasons, mild pollution at S3 during the wet and dry seasons and at S8, S6, and S13 during the dry season, and no pollution in the other study areas. The CF values of Co during the dry season showed that no pollution was found except at 2 stations (S8 and S11), which were mildly polluted. The CF values of Cr were less than 1, suggesting no pollution in the study area except at the Marina zone during the dry season, which was mildly polluted. The CF values of Ba also showed no pollution except for S7 during the wet and dry seasons, where the CF values showed mild pollution.

The pollution-load index (PLI) values in the lagoon, reported in Figure IV-7, ranged from 0.22 to 3.33 during the wet season and from 0.27 to 1.39 during the dry season. The highest PLI value was observed at the station in the sandbar border (S3) during the wet season.

The biological-risk index (m-ERM-Q) for Pb, Zn, Cu, and Cr reported in Figure IV-8 shows that 4 stations (S1 during dry season, and S12, S3, and S9 during wet season) had values greater than 1.5, while the value of S2 was between 0.5 and 1.5 during both the wet and dry seasons, and all the other stations' values were between 0.1 and 0.5.

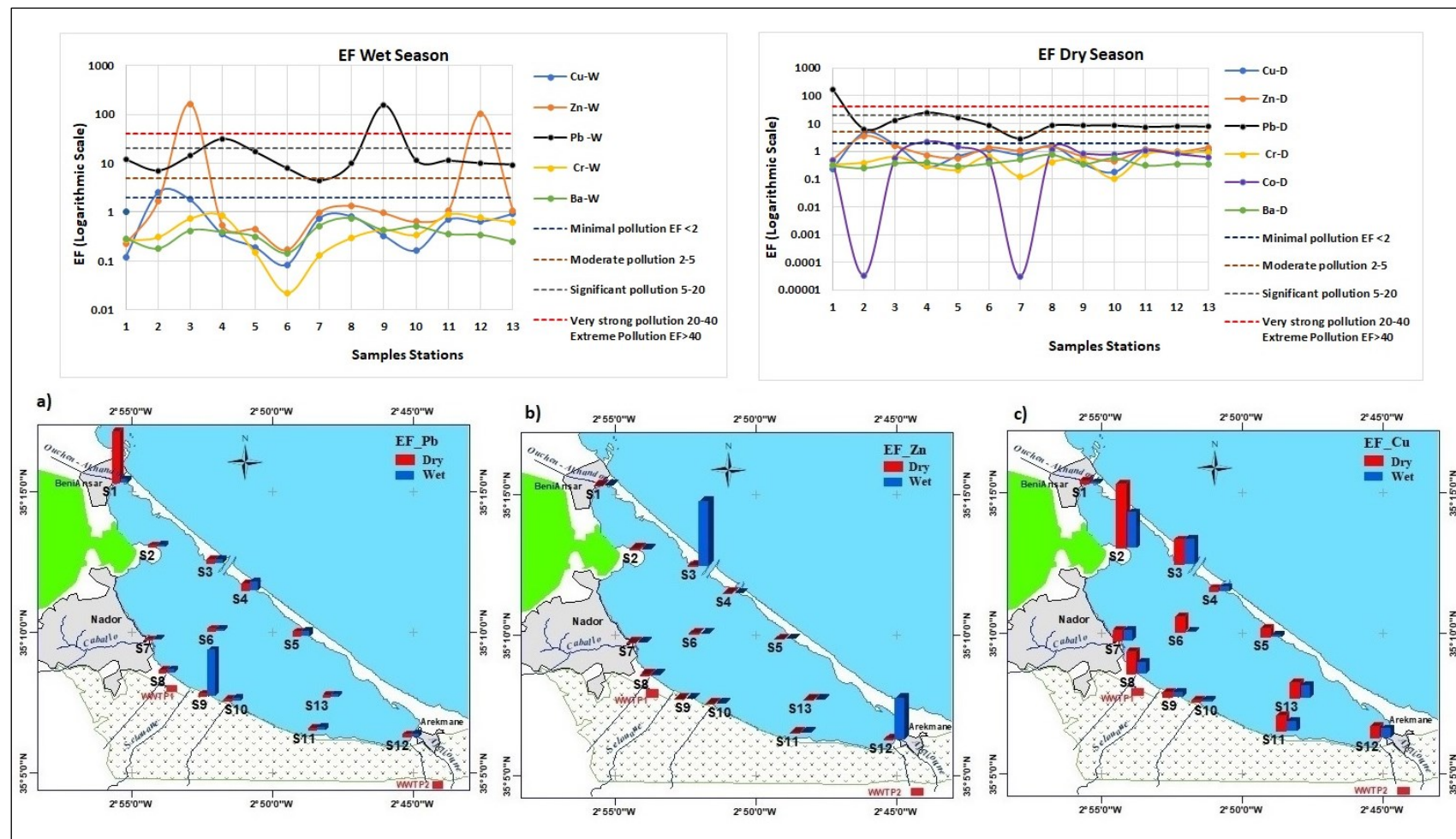


Figure IV-4: Wet and dry enrichment factor (EF): (a) EF of Pb; (b) EF of Zn; and (c) EF of Cu.

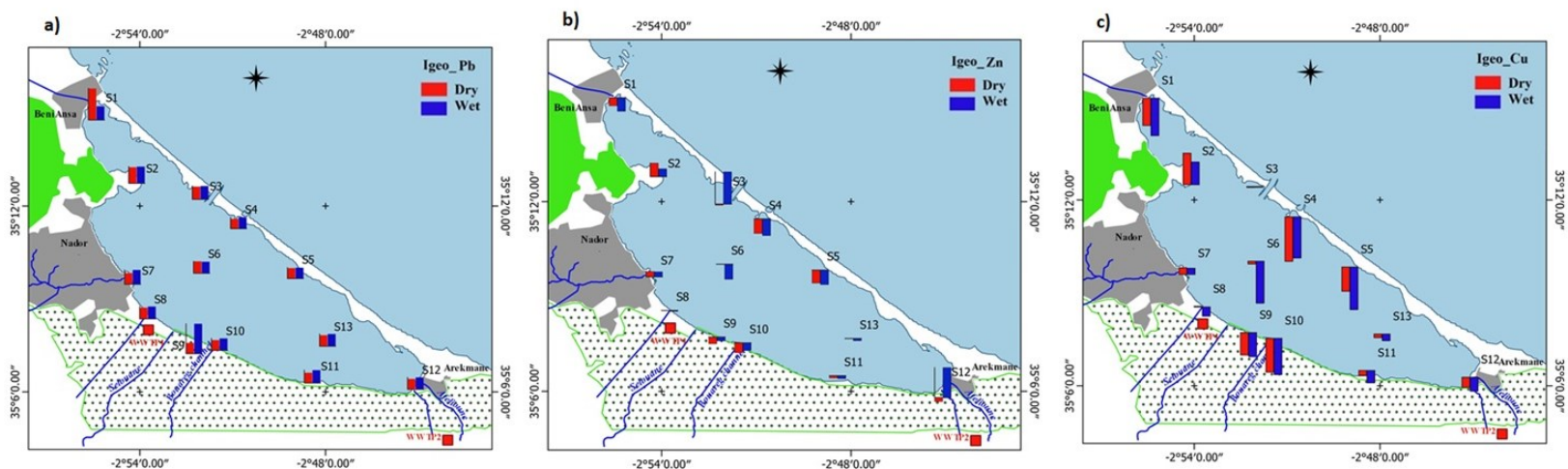
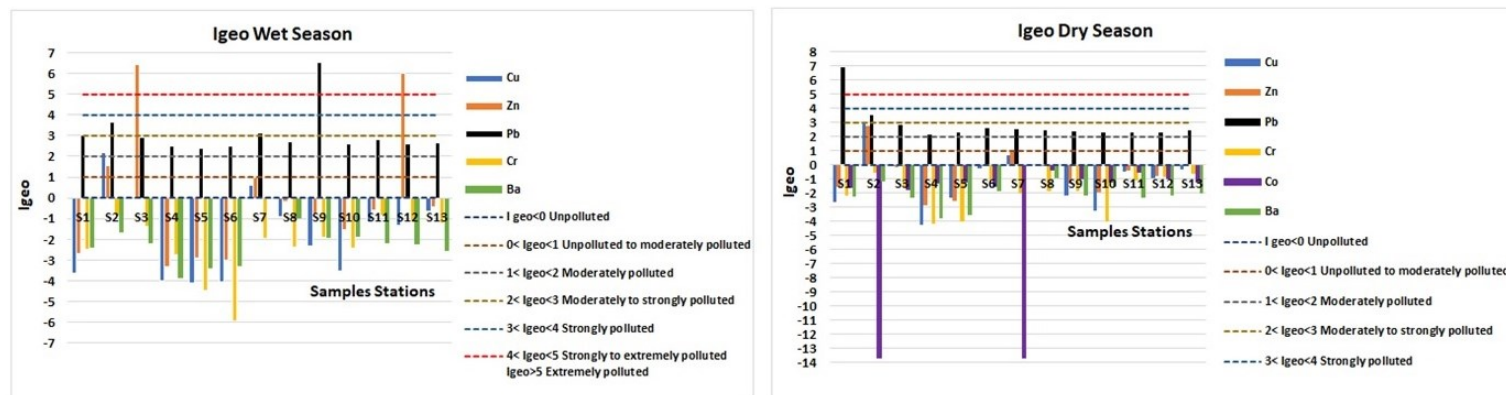


Figure IV-5: Wet and dry geoaccumulation index (Igeo): (a) Igeo of Pb; (b) Igeo of Zn; and (c) Igeo of Cu.

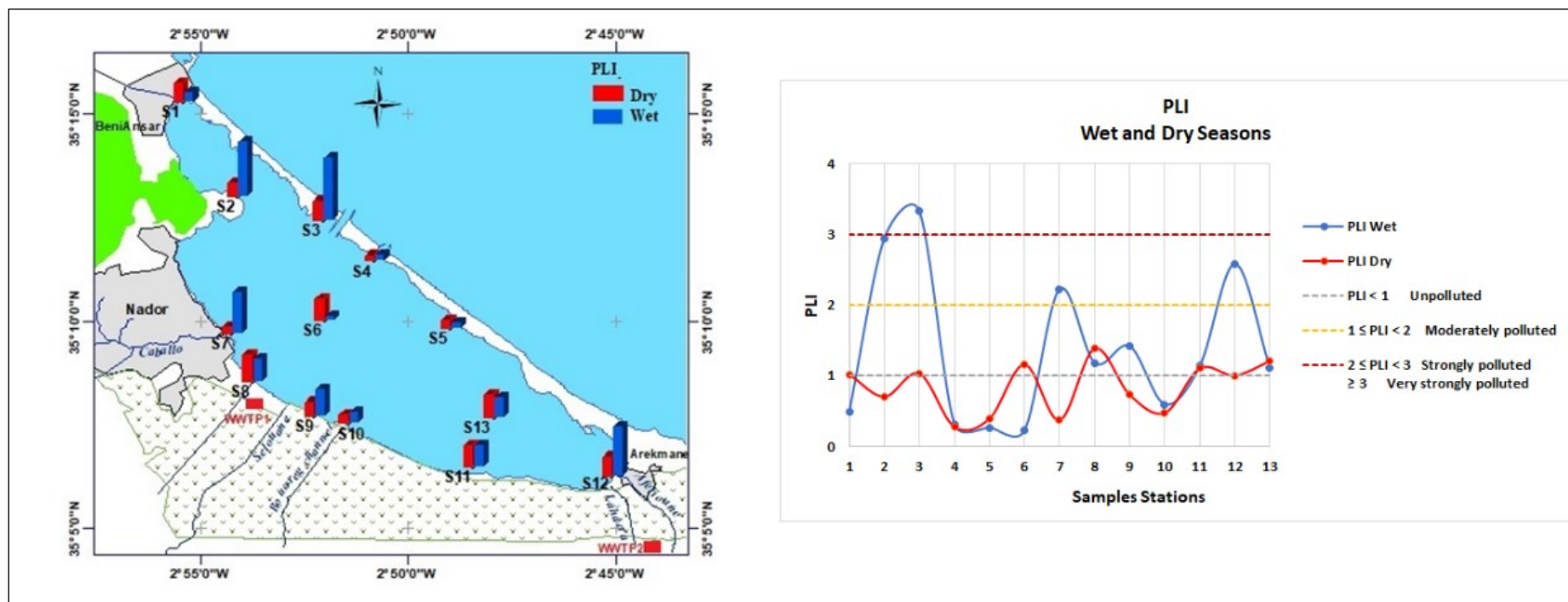


Figure IV-7: Wet and dry pollution-load index (PLI).

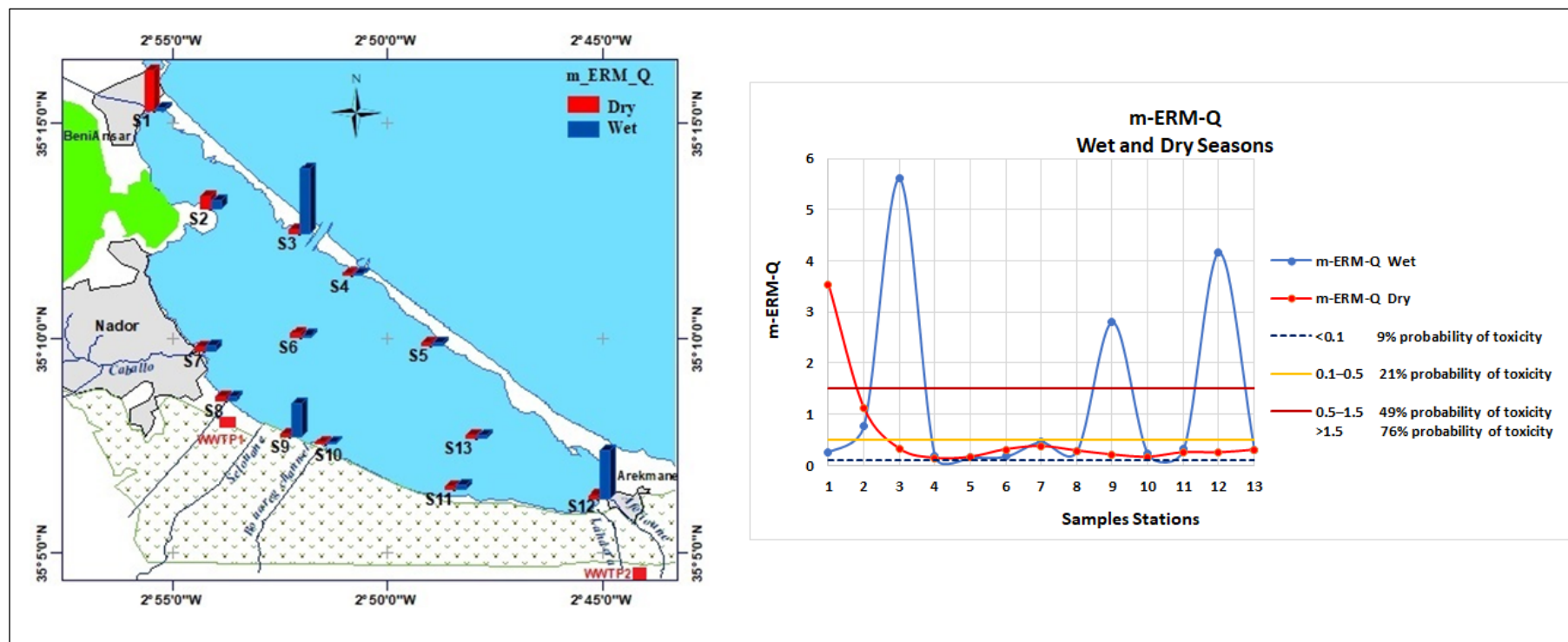


Figure IV-8: Wet and dry biological-risk index (m-ERM-Q).

The mean of wet and dry concentrations of Pb, Zn, Cr, and Cu were compared with the SQGs presented by [Macdonald et al. \(1996\)](#) and [Long et al. \(1995\)](#) in Table IV-5. All stations' sampling values for Pb were higher than their PEL, and those of S1, S2, and S9 were higher than their ERM. Three areas for Zn, covering S2, S3, and S12, were higher than their PEL and ERM. For Cu, only the marina area was higher than its PEL. Concentrations higher than PEL and ERM indicate risks for the marine biota. Stations that were between its TEL and PEL values were located, for Cr, in the marina zone, the eutrophication zone of Arekmane, and the station of the Arekmane side lagoon center; for Zn, in the area near Cabaillo wadi; and for Cu, in the center of the lagoon, in the eutrophication zone of Arekmane, and at the sandbar border near the inlet, indicating potential pollution at these stations. The other stations' values were lower than their TEL values for Cu, Zn, and Cr.

Table IV-5: Comparison of the trace element concentrations with background values and guidelines.

Lagoon Samples $n = 26$ (Wet and Dry)			Sediment-Quality Guidelines (SQGs)					
Metal (mg/kg)	Min - Max	Mean $\pm$ SD	Sediment-Quality Guidelines for Marine Water			Background Values	LBG	
			TEL	PEL	ERL	ERM		UCC
Cu	2.14–346.36	40.35 $\pm$ 73.09	18.7	108	34	270	28	37.5
Zn	10.01–8711.00	674.45 $\pm$ 2062.05	124	271	150	410	67	70.0
Pb	112.46–3039.51	361.16 $\pm$ 700.63	30.2	112	46.7	218	17	20.0
Cr	2.24–94.44	42.55 $\pm$ 26.95	52.3	160	81	370	92	55.0
Co	0.00–19.80	5.12 $\pm$ 6.56	-	-	-	-	17.3	-
Ba	65.31–986.22	276.09 $\pm$ 227.55	-	-	-	-	624	-

TEL, threshold effect level, and PEL, probable effect level ([MacDonald et al, 1996](#)); ERL, effect range low; and ERM, effects range median ([Long et al, 1995](#)); UCC, upper continental crust ([Rudnick and Gao, 2003](#)); LBG, local background ([Maanan et al, 2015](#)).

IV. Discussion

Sedimentation in the lagoon is essentially governed by turbulence at the inlet and intra-lagoon currents, which allow for the resuspension of particles and their transport in the lagoon through natural contributions of exogenous origin (erosion, decomposition of plant matter), or anthropogenic contributions (urban and agricultural discharges) and native production that generates microalgae debris ([SEEE/INRH, 2009](#)).

Lagoon granulometry showed that all stations except at the inlet areas were characterized by the highest content of sand during the wet season. The fine content was higher during the dry season, and the highest values were found at the Arekmane side of the lagoon center, the continental border at the marina zone, and the area of the great Nador wastewater treatment plant outfall. The clay content was also higher during the dry season and dominated the center part of the lagoon and

the eutrophication zone side of Arekmane, as indicated by [Aknaf et al. \(2017b\)](#). Sediment inputs are relatively important at the outlet of the wadis and on the sandbar border, especially near the inlet, as reported by [Lefebvre \(1997\)](#).

Concerning TOC, elevated values were recorded during the wet and dry season in the northwest sandbar border in the same area as that with the highest TOC value (20%) during the eutrophication period of the lagoon, with a mean value of 5% according to [SEEE/INRH \(2009\)](#). During the post restoration period, the TOC in the lagoon was reduced to a mean value of 3.9% in 2011, with a maximal value of 10.4% according to [Najih et al. \(2017\)](#). A significant decrease in TOC was likely due to the restoration actions, as reported by [Najih et al. \(2017\)](#).

Spearman's correlation coefficient matrix of the concentrations of grain size contents and major and trace elements in the surface sediment showed that the trace elements are associated with smaller grain size particles, which constitute important elements in the distribution of metals in sediments, as reported by [El Barjy et al. \(2020\)](#), [Watts et al. \(2017\)](#), [Hu et al. \(2013\)](#), [Whitney \(1975\)](#), and [Horowitz and Elrick \(1987\)](#).

Ecotoxicological risk assessment of the trace elements during the wet and dry seasons, by comparing the concentrations with sediment-quality guidelines (SQGs) and assessment indices, showed the existence of lead pollution in the lagoon, with peaks in the northwestern eutrophication zone during the dry season and near the Selouane wadi during the wet season. Indeed, during the wet season, a very high concentration of Pb was recorded at the mouth of the Selouane wadi, which contains the majority of the industrial units of the region. During the dry season, the same situation was noted at the eutrophication zone of Beni Ensar, which is under the influence of discharges from certain areas and industrial activities not yet connected to the wastewater treatment plant. Zn pollution was found in two lagoon areas during the wet season, with a maximum at the northwest sandbar border, followed by the southwestern eutrophication zone, which can be explained by the discharges from certain activities without treatment. Cu pollution was also found in two lagoon areas during the wet and dry seasons, with a maximum at the marina zone, followed by the mouth of Cabaillo wadi. On the other hand, for other trace elements Cr, Co, and Ba, no pollution was observed in the lagoon.

PLI values in the lagoon indicated that, during wet season, the northwestern sandbar border zone was very strongly polluted; the Marina zone, the mouth of Cabaillo wadi, and the southwest eutrophication zone were strongly polluted; and, during dry season, these areas were found between moderately polluted to unpolluted. The distribution of the biological-risk index reveals that the four zones of the lagoon may present a 76% probability of toxicity: during wet season, the area in the northwestern sandbar border, southeast eutrophication zone, and the mouth of the

Selouane wadi; and during the dry season, the northwestern eutrophication zone; in turn, the marina zone has a 49% probability of toxicity, at a potential risk to aquatic organisms according to [Long et al. \(2000\)](#). All other areas presented a low probability of toxicity, varying from 9% to 21%.

Generally, the trace element concentrations in the lagoon sediment depend on the hydrological state of the lagoon water and sediment entering the lagoon, which impacts the geochemical processes, as reported by [Barik et al. \(2020\)](#) and [Jain et al. \(2007\)](#). Principal factors that control the facies and changes in the characteristics of Marchica Lagoon sediment, according to [Hamoumi et al. \(2011\)](#), are related to the climate, the geological context of the watershed, the morphology of the lagoon, the position of the inlet, and anthropogenic activities. According to the study of [Maicu et al. \(2018\)](#), after restoration action concerning the construction of the new inlet between the Marchica Lagoon and Mediterranean Sea, the average water renewal time (WRT) decreased from approximatively 60 to 16 days, with an increasing trend during summer periods. This study showed that the lowest values of WRT are present in a restricted area close to the inlet where tidal flushing is the highest and higher values of WRT were recorded in the northern and southern areas where the residual circulation is negligible, which can explain the maximum lead pollution found in the northwest eutrophication zone during the dry season compared to the wet season.

The Marchica Lagoon watershed hosts one of the largest Moroccan iron mines, which was intensively exploited and abandoned without restoration. The significant quantity of tailings and waste rock around the abundant mining area exposed to air and water during rainy periods provides for the production of acid mine drainage, and the release of Fe and trace elements, according to [Cadmus et al. \(2018\)](#) and [Wittmann \(1981\)](#), into the surrounding wadis of the Marchica Lagoon, as proven by [Azzeddine and El Hassan \(2020\)](#) and [Lakrim et al. \(2014\)](#).

The PCA and Spearman's correlation coefficient matrix indicated that trace elements except Co are derived from the same content, as reported by [Maanan et al. \(2015\)](#), related to iron oxides or clays of the smectite or chlorite type, as reported by [Bloundi et al. \(2009\)](#). These findings suggested that, apart from geological sources, Pb, Zn, Cu, and Cr also originated from anthropogenic sources, as agriculture often uses chemical fertilizers and pesticides that contain these elements, so too industrialization, as reported by [Alloway \(2013\)](#) and [Nriagu and Pacyna \(1988\)](#). According to [De Lacerda \(1994\)](#), the higher lead concentrations recorded in the lagoon may have also originated from marine activities related to fishing boats, as mentioned by [Najih et al. \(2015\)](#).

Previous studies conducted by [Maanan et al. \(2015\)](#), [Bloundi et al. \(2009\)](#), [González et al. \(2007\)](#), and [Ruiz et al. \(2006\)](#) (Table IV-6) confirmed that the surface sediment

of the Marchica Lagoon is polluted by lead, zinc, and copper. For [Inani \(1995\)](#), the concentrations exceeding the SQGs in Marchica Lagoon mainly concern zinc and copper. This study confirmed that concentrations of these trace elements have significantly increased despite the restoration actions realized during the last decade, as proved by the Marchica Lagoon water quality assessment study ([Oujidi et al, 2020](#)).

In order to place the Marchica Lagoon in a regional context of trace-element pollution status, a comparison was made with other Mediterranean lagoons (Table IV-6). The comparison showed that the maximal concentrations of Pb, Zn, and Cu recorded in the Marchica Lagoon were higher than those in Bizerte Lagoon, as reported by [Barhoumi et al. \(2016\)](#) ; Berre Lagoon, as reported by [Arienzo et al. \(2013\)](#) ; Izmit Bay, as reported by [Tan et al. \(2020\)](#) ; Prokopos Lagoon, as reported by [Katsaros et al. \(2017\)](#) ; Málaga Bay, as reported by [Castillo et al. \(2013\)](#); Santa Gilla Lagoon, as reported by [Atzori et al. \(2018\)](#) ; Burullus Lake, as reported by [Melegy et al. \(2019\)](#) ; and Gialova Lagoon, as reported by [Kanellopoulos et al. \(2020\)](#).

Table IV-6: Comparison of the minimum and maximum trace elements (mg/kg) in sediment of Marchica Lagoon with previous studies and with others lagoons in the Mediterranean Sea.

	Localité	Pb	Zn	Cr	Cu	Co	References
Previous Studies	Marchica Lagoon, Morocco	131.83–2389.36	10.01–8711	2.24–77.17	2.43–191.13	<LD	Present Study (Wet Season)
		112.46–3039.51	13.39–651.72	7.43–94.44	2.14–346.36	<LD–19.80	Present Study (Dry Season)
		15–362	55.1–1250	22.4–172	10.2–398.4	-	Maanan et al. (2015)
		11–297	4–1190	9–139	4–466	0–120	Bloundi et al. (2009)
		3–416	13–1190	-	6–466	-	Ruiz et al. (2006)
		2.8–14	62–303	46–92.7	20–163	-	Inani (1995)
Mediterranean Sea	Gialova Lagoon. Greece	10–31	20–51	99–154	15–40	5–15	Kanellopoulos et al. (2020)
	Izmit Bay. Turkey	10–33.8	123.6–363.2	40.9–120.8	49.9–105.3	-	Tan et al. (2020)
	Burullus Lake. Egypt	5–42	35–190	23–144	15–80	-	Melegy et al. (2019)
	Santa Gillalagoon. Sardinia	45.8–216	51–140	12.1–52	-	-	Atzori et al. (2018)
	Prokoposlagoon. Greece	4.86–22.18	14.87–60.22	17.88–117.97	6.44–27.92	-	Katsaros et al. (2017)
	Bizerte Lagoon. Tunisia	62.8–211.2	318.6–1825.5	7.2–30.8	4.0–45.2	-	Barhoumi et al. (2016)
	Málaga Bay. Spain	7.92–37.1	-	4.31–26.0	6.57–21.2	-	Castillo et al. (2013)
	Berre lagoon. France	12–104	56.5–215	17.1–119	7–60.7	-	Arienzo et al. (2013)

V. Conclusion

This post restoration characterization of the trace elements Pb, Cu, Zn, Cr, Co, and Ba, and their correlation to the major elements Si, Al, Fe, Ti, Mn, K, P, Ca, grain size, and TOC in the surface sediment of the Marchica Lagoon during the wet and dry seasons, revealed that element abundance is regulated by the sediment grain size characteristics, and trace elements tend to be concentrated in finer sediment particles. Multivariate analysis and ecotoxicological risk assessment of the trace elements using sediment-quality guidelines (SQGs) and the pollution indices EF, Igeo, and CF revealed the contamination of Marchica Lagoon by Pb as the primary pollutant in all study areas, with two peaks in the mouth of the Selouane wadi during the wet season and the northwestern eutrophication zone during the dry season. Zn constituted a secondary pollutant, with two peaks in the northwest sandbar border and southwest eutrophication zone during the wet season and the mouth of the Cabaillo wadi during the dry season. Cu pollution was found in the marina zone and the mouth of the Cabaillo wadi during both the wet and dry seasons. Minimal pollution was found for Cr, Co, and Ba. The pollution-load index in the lagoon indicated that, during the wet season, the northwest sandbar border zone was very strongly polluted, and that the Marina zone, the mouth of the Cabaillo wadi, and the southwest eutrophication zone were strongly polluted; during dry season, these areas were found to be between moderately polluted and unpolluted. The biodiversity conservation of Marchica Lagoon requires an integrated environmental management plan that addresses watershed activities, especially the restoration of the abandoned iron mining site, as well as a continuous monitoring network with control and assessments, including all areas that were identified as polluted.

Chapitre V : Evaluation environnementale de la qualité des sédiments superficiels du bassin versant de la lagune de Marchica

Dans ce travail, la partie concernant l'étude des indices écotoxicologiques des éléments traces métalliques dans les sédiments superficiels de la zone d'influence au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica a fait l'objet d'une communication au niveau du 1st International Congress on Coastal Research (ICCR 2020), AlHoceima et d'une publication sous forme d'un Short Paper (Conference proceedings, indexée dans la base des données scopus) :

Oujidi, B., Kabriti, M., Tahri, M., Bensaber, A., Benchrif, A., Layachi, M., Maanan, M., Bazairi, H., Mhammdi, N & Snoussi, M. (2021). Assessment of the Coastal Marchica Watershed through Ecotoxicological Indices of Trace Elements in Superficial Sediments. In E3S Web of Conferences (Vol. 298, p. 03001) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129803001>

Abstract

The geochemical assessment of the sediment inputs from the Marchica watershed, which are the main sources of pollution in the Nador lagoon, is crucial for the protection of this Ramsar site and the conservation of its biodiversity. This study aims to analyze the seasonal distribution of trace elements Pb, Cu, Zn, Cr, Co, and Ba in the superficial sediments of the Marchica watershed, and their correlation to major elements, grain size, and total organic carbon. Samples were taken during the wet and dry seasons of 2018, in the main streams valley carrying the discharges to the lagoon. Five wadis were studied through a representative station for each one. Ecotoxicological indices (geoaccumulation index (Igeo), enrichment factor (EF) and contamination factor (CF)) and sediment-quality guidelines (SQGs) were used to evaluate the ecotoxicological risk. The results revealed during both wet and dry seasons a contamination by lead in all streams valley where concentrations were greater than TEL and PEL concentrations. The northwest stream valley, characterized by some industrial activities, and the stream valley crossing the abandoned mine were the most polluted by zinc and copper. Cr, Co and Ba were found to be at minimal pollution during both the wet and dry seasons. Pollution-load indices (PLI) were between 0.72 and 1.49 during wet season and between 0.91 and 2.47 during dry season. Despite the restoration actions achieved around the Marchica lagoon during the last decade by the Moroccan authorities, the watershed continues to have a negative impact on this ecosystem. An environmental management strategy is therefore necessary, taking into account the rehabilitation of the abandoned mining site as well as the updating of the environmental responsibility of industrial companies, particularly those installed before the implementation of the national law on environmental impact studies.

Keywords

Mediterranean Sea, Marchica watershed, Geochemical evaluation, Sediment ecotoxicity.

Résumé

L'évaluation géochimique des apports sédimentaires de la zone d'influence au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica, qui représentent les principales sources de pollution de la lagune de Nador, est cruciale pour la protection de ce site Ramsar et la conservation de sa biodiversité. Cette étude vise à analyser la distribution saisonnière des éléments traces Pb, Cu, Zn, Cr, Co et Ba dans les sédiments superficiels du bassin versant de la Marchica, et leur corrélation avec les éléments majeurs, la granulométrie et le carbone organique total. Des échantillons ont été prélevés pendant les saisons humides et sèches durant l'année 2018, dans les principaux cours d'eau transportant les rejets vers la lagune. Cinq oueds étudiés à travers une station représentative pour chacun. Des indices écotoxicologiques (indice de géoaccumulation (Igeo), facteur d'enrichissement (FE) et facteur de contamination (CF)) et normes de qualité des sédiments (SQG) ont été utilisés pour évaluer le risque écotoxicologique. Les résultats ont révélé durant la saison humide et la saison sèche une contamination par le plomb dans tous les cours d'eau étudiés où les concentrations étaient supérieures aux concentrations PEL et ERL. Le nord-ouest, caractérisée par quelques activités industrielles, et l'oued traversant la mine abandonnée étaient les plus polluées par le zinc et le cuivre. Les résultats d'analyse du Cr, Co et Ba ont dénotés des valeurs minimales de contamination des sédiments pendant les deux saisons humide et sèche. L'indice de charge de pollution (PLI) était compris entre 0,72 et 1,49 pendant la saison humide et compris entre 0,91 et 2,47 pendant la saison sèche. Malgré les actions de restauration réalisées autour de la lagune de Marchica au cours de la dernière décennie par le Gouvernement Marocain, le bassin versant continue d'avoir un impact négatif sur cet écosystème notamment à travers la pollution chimique. Une approche de gestion intégrée s'impose donc, incluant en priorité la réhabilitation des sites miniers de fer abandonnés, l'utilisation rationnelle des pesticides et engrais en agriculture et la responsabilité environnementale des unités industrielles, notamment celles installées avant la mise en œuvre de la loi nationale sur les études d'impact sur l'environnement.

Mots Clés

Mer Méditerranée, Bassin versant Marchica, Évaluation géochimique, Écotoxicité des sédiments.

I. Introduction

Les bassins versants entourant les lagunes côtières ont connu une urbanisation intense au cours des dernières années en raison des services écosystémiques offerts par ces écosystèmes. Toutefois, cette urbanisation accompagnée de l'intensification des activités humaines autour des lagunes côtières a eu des répercussions sur leur structure et leur fonction et a compromis leur intégrité écologique (Kennish, 2016 ; Kennish and Paerl, 2010). De nombreux cours d'eau sont pollués et ont impacté les océans côtiers provoquant des habitats dégradés ou des pêcheries réduites, malgré des efforts considérables de gestion et de restauration dans les zones côtières (Palmer, 2009). Les bassins versants drainent les sédiments vers les lagunes côtières à travers les ruisseaux et les rivières, en particulier pendant les périodes de pluie, dont la plupart flocculent et se déposent à l'embouchure des affluents (Kennish, 2016). La gestion des bassins versants s'étend à travers les bassins hydrographiques, portant principalement sur les activités qui affectent les flux hydrauliques, et secondairement sur les activités qui affectent la qualité de l'eau, y compris les entrées de sédiments et de contaminants chimiques (PNUE, 2015). L'évaluation des bassins versants notamment la caractérisation des apports de sédiments terrestres dans les mers constitue une étape très importante pour les gestionnaires de bassins versants en raison des effets des sédiments qui peuvent être nocifs sur les écosystèmes marins côtiers et pour identifier les besoins de restauration (Korman et al., 2020 ; Bohn et al., 2002 ; Roni et al., 2002). Parmi les principales actions de gestion des bassins versants : les études, la surveillance et le contrôle de la pollution (Arnold, 2010).

Le bassin versant de la lagune de Marchica constitue un exemple typique des écosystèmes paraliques exposés aux risques de contamination de natures différentes permettant d'impacter la lagune de Marchica. Depuis la création de l'Agence Marchica au cours de la dernière décennie, la lagune de Marchica a connu des changements importants dans sa protection et son développement et la mise en œuvre de projets touristiques autour de ce site Ramsar. Les principales actions aux abords de la lagune concernaient l'ouverture d'une nouvelle passe entre la lagune de Marchica et la mer Méditerranée ; une opération de dépollution des eaux de la lagune composée par la collecte des déchets solides et le dragage des embouchures et des oueds ainsi que le pourtour de la lagune ; la réhabilitation des anciens bassins lagunaires d'eaux usées de Nador en parc ornithologique permettant la reconstitution des milieux d'habitats naturels des oiseaux migrateurs et la création de la plage artificielle de Nador. Le premier projet touristique opérationnel concerne la presqu'île d'Atalayoun, qui abrite un port de plaisance et une académie de golf (<http://www.agencemarchica.gov.ma/>).

Cependant, le bassin versant de la Marchica, qui constitue le principal facteur impactant fortement la lagune, n'a pas été pris en compte par des actions de restauration et de réhabilitation à l'exception du traitement des eaux usées dans le cadre du programme national d'assainissement liquide mutualisé (PNAM) et de gestion des déchets solides le programme national pour les déchets ménagers (PNDM) tel que mentionné dans le rapport national du projet SEIS SUD II concernant le système de partage d'informations sur l'environnement

Département de l'Environnement (2019a). La gestion des bassins versants est donc très importante et offre une opportunité pour la conservation de la biodiversité et la promotion du développement durable (Tarlock, 2002). L'évaluation géochimique des apports de sédiments du bassin versant de la Marchica, qui représentent les principales sources de pollution de la lagune de Marchica, est cruciale pour la protection de ce site Ramsar et la conservation de sa biodiversité comme mentionné par le rapport National MEDPOL (Département de l'Environnement, 2016a) concernant l'évaluation et le contrôle de la pollution marine en mer Méditerranée dans le cadre de la convention de Barcelone.

Les objectifs de cette étude consistent à caractériser les sédiments du bassin versant de Marchica à travers :

1. L'analyse de la distribution saisonnière des éléments traces (Pb, Cu, Zn, Cr, Co et Ba) dans les sédiments superficiels du bassin versant de la lagune de Marchica, et leur corrélation avec les éléments majeurs, la granulométrie et le carbone organique total ;
2. L'évaluation du risque écologique des éléments traces dans les sédiments superficiels ;
3. L'identification des zones fortement polluées.

II. Méthodologie

II.1. Description de la zone d'étude

La zone d'influence de la lagune de Marchica couvre une superficie approximative de 700 km² et il est formé de quatre structures morphologiques, le massif volcanique du Gourougou au nord-ouest ; le massif de Beni Bouifrou à l'ouest ; le massif de Kebdana au sud ; et la plaine du Bouarg au sud-ouest (Raji et al., 2015 ; Bloundi et al., 2009 ; Zerrouqi, 2009 ; Dakki, 2003). Le réseau hydrographique du bassin versant de Marchica est composé de plusieurs vallées de ruisseaux intermittents, dont la majorité ont des apports importants pendant les périodes de pluie et atteignent la lagune de Marchica (Tribak and El Amrani, 2018 ; Boyauzan and Irzi, 2015 ; Bouchnan et al., 2014 ; Re et al., 2013 ; ABHM, 2009 ; Bloundi, 2005 ; Irzi, 2002). La zone d'influence de la lagune de Marchica se caractérise par la présence de trois stations d'épuration à savoir, la STEP d'Al Aaroui construite en 2004, la STEP du Grand Nador construite en 2010 et la STEP d'Arekmane construite en 2013. Malgré les efforts consentis dans le programme national d'assainissement liquide mutualisé, certaines communes de la zone d'influence ne sont pas encore raccordées au réseau d'assainissement liquide, notamment en milieu rural (Département de l'Environnement, 2019a). Les déchets solides des communes sont enfouis au niveau de la décharge contrôlée construite depuis 2011 à la commune d'Oulad Settout dans le cadre du programme national de déchets ménagers (Département de l'Environnement, 2019a). Le principal secteur industriel est situé entre les trois communes de Selouane, Al Aaroui et Oulad Settout et concerne principalement les industries chimiques et para-chimiques ; agro-alimentaires ; et les industries mécaniques et métallurgiques (Département de l'Environnement, 2016d). Le bassin versant se caractérise également par la

présence des sites abandonnés de mine de fer au niveau de la commune d'Iksane (Bouabdellah et al., 2016 ; Lebret, 2014 ; Bouabdellah et al., 2012). La principale ressource en eau souterraine est l'aquifère de Bouarg qui couvre une superficie de 190 km² et les principales caractéristiques de la plaine de Bouarg sont des activités agricoles intenses (Snoussi et al., 2010 ; El Yaouti et al., 2009). Le climat est méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux.

II.2. Réseau d'échantillonnage

Des échantillons de sédiments superficiels (0 - 5 cm) ont été prélevés pendant les saisons humides (Mars) et sèches (Juillet) de l'année 2018 dans les principaux oueds du bassin versant de la lagune de Marchica transportant des rejets vers la lagune de Marchica. Cinq oueds ont été étudiés à travers une station représentative pour chacun. Les principaux cours d'eau sont Akhandouk et Ouchen traversant la ville de Beni Ensar, Cabaillo traversant les villes d'Iksane, Zeghanghan, Beni Bouifrou, Ihaddaden et Nador ; Selouane traversant les villes d'Al Aaroui, Selouane et Bouarg ; et Affelioun et Lhdara traversant la ville d'Arekmane. Les stations d'échantillonnage représentées dans la Figure V-1 sont comme suit : W1 représente l'intersection de deux oueds Akhandouk et Ouchen ; W2 représente l'oued Cabaillo ; W3 représente l'oued Selouane ; W4 représente l'oued Affelioun ; et W5 représente l'oued Lhdara.



Figure V-1 : Description de la zone d'influence de la lagune de Marchica.

II.3. Méthodes d'analyse

Les analyses des éléments majeurs ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre de fluorescence X portable Bruker S1 Turbo SD (HHXRF) ; les analyses des éléments traces métalliques ont été réalisées par un spectromètre d'émission atomique à plasma micro-onde Agilent 4200 (MP-AES) ; les analyses granulométriques ont été mesurées par un granulomètre laser (Malvern Mastersizer 2000) et l'analyse du carbone organique total par un analyseur de carbone LECO. Les détails des analyses sont décrits au niveau du chapitre II.

II.4. Traitement statistique

La non-normalité des données a été vérifiée par le test de Shapiro-Wilk. Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé pour tester l'effet saisonnier. Les tests Shapiro-Wilk et Kruskal-Wallis ont été utilisés par le logiciel IBM SPSS Statistics version 20. L'ACP et l'analyse de Classification Automatique Hiérarchique ont été réalisées avec le logiciel PRIMER V.6. Toutes les méthodes statistiques ont été appliquées avec un niveau de confiance de 95 % ($p < 0,05$). La carte de la zone d'étude a été réalisée à l'aide de Google Earth Pro.

II.5. Indices d'évaluation des risques et de contamination des sédiments

Le risque écologique a été évalué à l'aide du facteur d'enrichissement (EF) (Sutherland, 2000), du facteur de contamination (CF) (Hakanson, 1980), de l'indice de charge de pollution (PLI) (Tomlinson, 1980), et de l'indice de géoaccumulation (Igeo) (Müller, 1981 ; Müller, 1979). Pour le calcul du facteur d'enrichissement, le fer a été choisi comme élément de référence pour la normalisation permettant de quantifier la pollution métallique anthropique à partir de la variabilité naturelle des éléments traces métalliques, et les valeurs de référence de Rudnick and Gao (2003) ont été utilisées en l'absence des valeurs de référence du background local. Les concentrations des ETM dans les sédiments ont été comparées aux normes de qualité des sédiments (SQGs) pour les écosystèmes d'eau douce afin d'évaluer le risque écotoxicologique selon Macdonald et al., (2000).

III. Résultats

III.1. Distribution saisonnière des paramètres géochimiques dans les sédiments de la zone d'influence au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica

III.1.1. Paramètres physicochimiques des eaux superficielles

Les paramètres physico-chimiques des eaux de surface pendant les deux saisons (humide et sèche) ont révélé une variation saisonnière uniquement en température (T °C) ($p < 0,05$). Les valeurs varient de 17,90 °C à 24,5°C pendant la saison humide et de 25 °C à 28,1 °C pendant la saison sèche. Le pH varie de 7,4 à 9,02 pendant la saison humide et de 7 à 8,45 pendant la saison sèche. La salinité varie de 2,8 à 10,8 pendant la saison humide et de 1,1 à 12,4 pendant

la saison sèche. L'oxygène dissous varie de 4,63 à 15,24 pendant la saison humide et de 1,8 à 9,36 pendant la saison sèche.

III.1.2. Granulométrie et carbone organique total

La distribution granulométrique et du carbone organique total dans les sédiments du bassin versant de la lagune de Marchica durant l'année 2018 sont présentés dans le tableau V-1. À l'exception de l'argile ($p < 0,05$), aucune variation saisonnière n'a été observée. Toutes les stations d'échantillonnage ont été classées en mélange du sable - boue avec excès du sable en saison humide et excès de la boue en saison sèche sauf la première station (W1 Intersection des deux oueds Ouchen et Akhandouk) qui était classée comme sable pendant la saison humide. Les résultats du carbone organique total variaient de 0,70 % à 4,58 % pendant la saison humide et de 1,82 % à 10,10 % pendant la saison sèche ; et la valeur la plus élevée a été enregistrée à Beni Ensar (W1) pendant la saison sèche.

III.1.3. Éléments majeurs et ETM

Éléments majeurs

Les concentrations des éléments majeurs, ETM, granulométrie et carbone organique total (TOC) sont rapportées dans le tableau V-1. Aucune différence significative pour ces éléments entre les saisons n'a été observée ($p > 0,05$).

Les concentrations minimales et maximales des éléments majeurs en % au cours des deux saisons sont respectivement de l'ordre de : Al (2,65 à 6,20) ; Fe (3,02 - 5,39) ; Mn (0,03 - 0,05) ; Si (15,00 - 20,11) ; Ti (0,31 - 0,46) ; Ca (5,87 - 19,64) ; K (1,34 - 2,44) ; et P (0,11 - 0,19). Les concentrations maximales des éléments majeurs ont été enregistrées au niveau de l'oued Cabaillo (W2) pour Al, Mn et Si; aux oueds Ouchen et Akhandouk (W1) pour Fe, Ti et K ; à l'oued Lhdara (W5) pour P, et à l'oued Selouane (W3) pour Ca.

Les concentrations moyennes des éléments majeurs enregistrés pendant les deux saisons (humide et sèche) sont dans l'ordre décroissant suivant : Si (17,63 %) > Ca (13,64 %) > Al (4,54 %) > Fe (3,90 %) > K (1,88 %) > Ti (0,39 %) > P (0,16 %) > Mn (0,04 %).

ETM

Les concentrations des éléments traces métalliques (mg/kg) sont rapportées dans le tableau V-1. À l'exception du Co ($p < 0,05$), aucune différence significative des éléments entre les saisons n'a été observée ($p > 0,05$).

Les concentrations minimales et maximales des éléments trace métalliques au cours des deux saisons sont respectivement de l'ordre de (en mg/kg) : Zn (56,95 - 592,35) ; Pb (114,63 - 217,53) ; Ba (183,85 - 1024,31) ; Cr (34,33 - 72,16) ; Cu (12,86 - 108,85) ; et Co (4,19 -

16,32). Les concentrations maximales des ETM ont été enregistrées au niveau d'oued Ouchen et Akhandouk (W1) pour Cu et Zn pendant la saison sèche ; à l'oued Cabaillo (W2) pendant la saison humide pour Pb et Ba ; à l'oued Affelioun (W4) en saison sèche pour Cr ; et à l'oued Lhdara (W4) en saison sèche pour Co.

Les concentrations moyennes des ETM enregistrés pendant les saisons humides et sèches sont dans l'ordre décroissant suivant : Ba (450,81 mg/kg) > Zn (149,66 mg/kg) > Pb (144,9116 mg/kg) > Cr (50,04 mg/kg) > Cu (36,47 mg/kg) > Co (9,78 mg/kg).

Tableau V-1 : Concentrations saisonnières et spatiales des fractions granulométriques (%), du carbone organique total (TOC ; %), des éléments majeurs (%) et des ETM (mg/kg) durant l'année 2018.

Code	Station	Saison	Granulométrie (%)			TOC (%)	Groupes Facies	Eléments majeurs (%)						ETM (mg/kg)							
			Sand	Silt	Clay			Al	Fe	Mn	Si	Ti	Ca	P	K	Cu	Zn	Pb	Cr	Co	Ba
W1	Intersection O. Ouchen - O. Akhandouk	Humide	93,4	6,48	0,14	0,7	Sand	5,39	5,39	0,03	19,07	0,46	6,21	0,11	2,31	16	71,12	115,05	54,39	8,07	196,2
		Sèche	49,45	49,50	1,04	10,1	Sandy Mud	5,66	5,01	0,03	19,19	0,45	5,87	0,11	2,44	108,8	592,35	205,08	46,87	14,55	814,75
W2	Oued Cabaillo	Humide	20,86	77,50	1,64	0,75	Muddy Sand	6,20	4,01	0,05	20,04	0,36	10,92	0,17	2,00	35,5	201,49	217,53	34,33	6,34	1024,3
		Sèche	10,00	88,10	1,90	1,82	Sandy Mud	5,60	3,93	0,05	20,11	0,36	10,80	0,18	1,78	70,36	213,47	158,72	63,63	8,09	616,76
W3	Oued Selouane	Humide	58,9	39,44	1,61	2,32	Muddy Sand	2,65	3,02	0,03	15,00	0,31	19,64	0,16	1,34	12,86	60,71	120,6	43,14	6,11	257,48
		Sèche	24,02	73,42	2,56	6,16	Sandy Mud	3,10	3,29	0,03	15,26	0,31	19,17	0,16	1,38	13,94	56,95	114,63	49,85	14,82	284,68
W4	Oued Affelioun	Humide	67,3	32	0,65	3,42	Muddy Sand	4,70	3,82	0,04	16,91	0,41	15,13	0,13	1,99	14,43	65,03	124,12	50,6	4,19	183,85
		Sèche	26,04	71,94	2,02	3,25	Sandy Mud	4,58	3,85	0,04	16,94	0,41	15,77	0,15	2,02	27,1	87,9	127,75	72,16	13,55	292,66
W5	Oued Lhdara	Humide	63,1	36,07	0,83	4,58	Muddy Sand	3,52	3,29	0,04	16,93	0,39	16,44	0,19	1,73	42,9	69,02	140,17	39,5	5,78	631,96
		Sèche	28,36	69,32	2,32	3,76	Sandy Mud	4,00	3,36	0,04	16,84	0,39	16,42	0,19	1,84	22,74	78,57	125,44	45,89	16,32	205,45

III.2. Distribution spatiale et corrélation des paramètres géochimiques, granulométrique et du carbone organique total dans les sédiments de la zone d'influence au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica

Tous les paramètres géochimiques ont été regroupés en quatre groupes significatifs pendant les deux saisons (humide et sèche) (Figure V-2). Le premier groupe G1 et le groupe G4, représentent respectivement la station d'intersection des oueds Ouchen et Akhandouk (W1) pendant la saison humide et la saison sèche, sont sous influence des rejets des eaux usées non traitées de certaines agglomérations de Beni Ensar et de certaines eaux usées industrielles. Le deuxième groupe G2, représente la station d'oued Cabaillo (W2) durant la saison humide et la saison sèche, est sous impact des rejets en période pluviale de la mine de fer abandonnée. Les autres stations W3, W4 et W5 durant les deux saisons ont été regroupées dans le groupe G3, qui est sous impact des rejets industriels de la ville de Sélouane, les effluents agricoles de la plaine de Bouarg, la station d'épuration d'Arekmane et les eaux usées non traitées de certaines agglomérations et activités commerciales d'Arekmane.

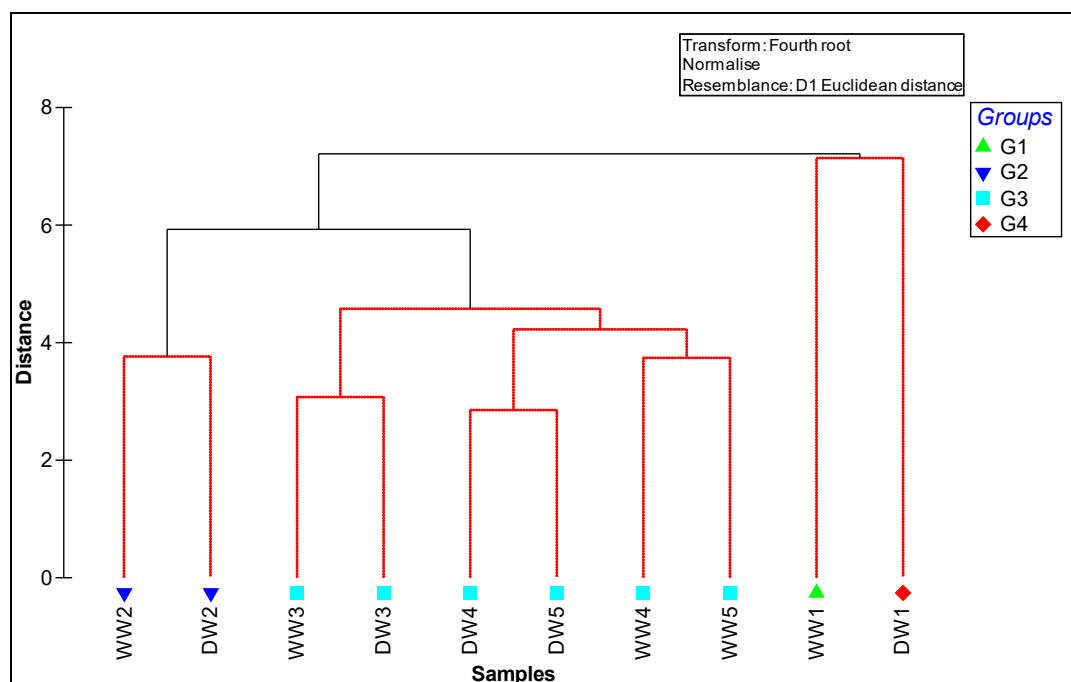


Figure V-2: Dendrogramme montrant les clusters (WS, station humide et DS, station sèche) des paramètres géochimiques, granulométriques et carbone organique total, sur la base de la similarité.

L'ACP a été utilisée pour évaluer les processus géochimiques dans le bassin versant de la lagune de Marchica et différencier les sources potentielles des ETM dans les sédiments (Figure V-3). Deux axes, PC1 et PC2, ont expliqué 67,7 % de la variance totale. Le premier axe PC1 représente 40,4 % de la variance totale avec des corrélations positives avec les éléments suivants Al, Fe, Si, Ti, K, Cu, Zn, Cr. Le deuxième axe PC2 représente 27,3 % de la variance totale avec des corrélations

positives avec les éléments suivants Silt, Clay, TOC, Mn, Pb, Co et Ba. PC1 suggère que la pression exercée sur G1 et G4 pourrait être attribuée aux Cu, Zn et Cr en corrélation avec Al, Fe, Si, Ti et K. Cependant, la pression exercée sur G2 et G3 pourrait être attribuée aux Pb, Co et Ba en corrélation avec Mn, Silt et TOC.

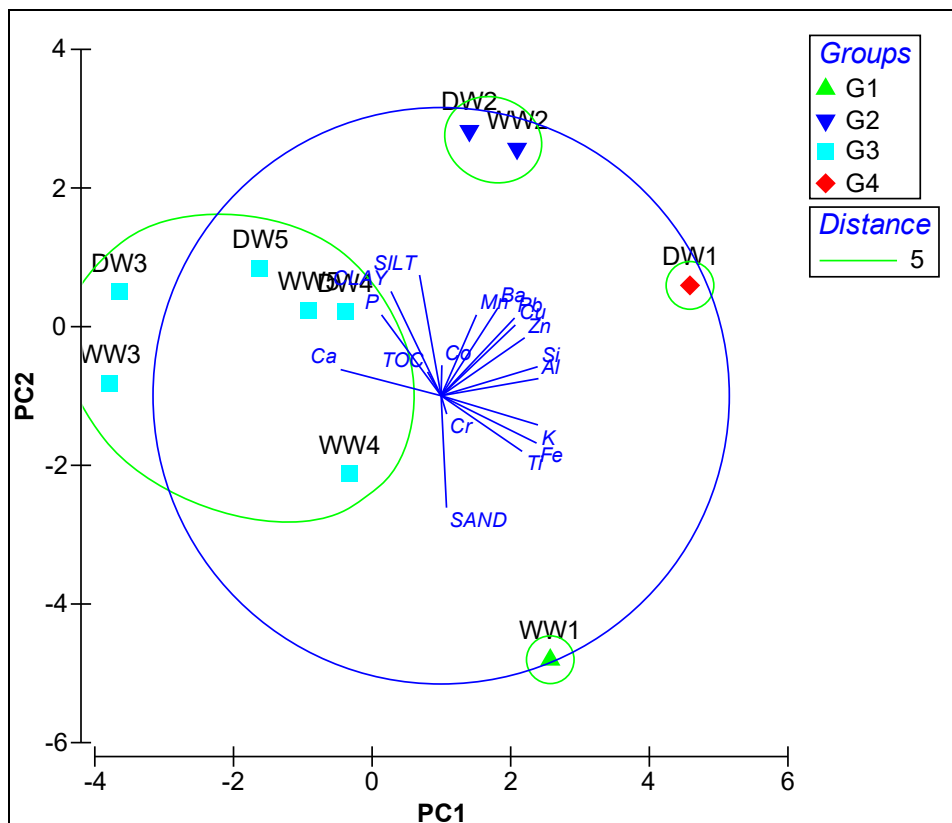


Figure V-3: Analyse en composantes principales (ACP) des paramètres géochimiques, la granulométrie et le carbone organique total (TOC) durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 (WW, Station Humide et DW, Station Sèche).

III.3. Risque écologique des éléments traces métalliques dans les sédiments du bassin versant de la lagune de Marchica

La répartition du facteur d'enrichissement durant les deux saisons (humide et sèche) (Figure V-4) indique que EF(Pb) montre un état de pollution entre modéré et importante et EF(Zn) montre une pollution minimale, sauf à la station W2 où il varie entre une pollution minimale et modérée pendant les deux saisons et entre une pollution modérée et importante à la station W1 en saison sèche. EF (Cu) montre une pollution minimale sauf aux stations W1 et W2 où une pollution modérée a été enregistrée. Les Facteurs d'enrichissement de Cr, Co et Ba montrent une pollution minimale pendant les deux saisons.

La distribution de l'indice de geoaccumulation durant les deux saisons (humide et sèche) (Figure V-5) révèle que Igeo (Pb) est modérément à fortement pollué pendant les deux saisons. Tous les autres indices d'Igeo sont compris entre un état non pollué à modérément pollué sauf pendant la saison sèche où Igeo (Zn) à la première station (W1) montre un état entre modérément à fortement pollué et Igeo (Cu) montre un état modérément pollué.

La répartition du facteur de contamination durant les deux saisons (humide et sèche) (Figure V-6) indique une forte pollution en Pb au niveau de toutes les stations. FC(Cu) et FC(Zn) montrent également un état fortement pollué à la première station (W1) pendant la saison sèche. FC(Co), FC(Cr) et FC(Ba) ont été identifiés avec une pollution minimale durant les deux saisons. Tous les autres facteurs de contamination sont classés entre un état non pollué et un état modérément pollué.

La distribution de l'indice de charge de pollution (PLI) varie de 0,72 à 1,49 pendant la saison humide et entre 0,91 et 2,47 pendant la saison sèche (Figure V-7).

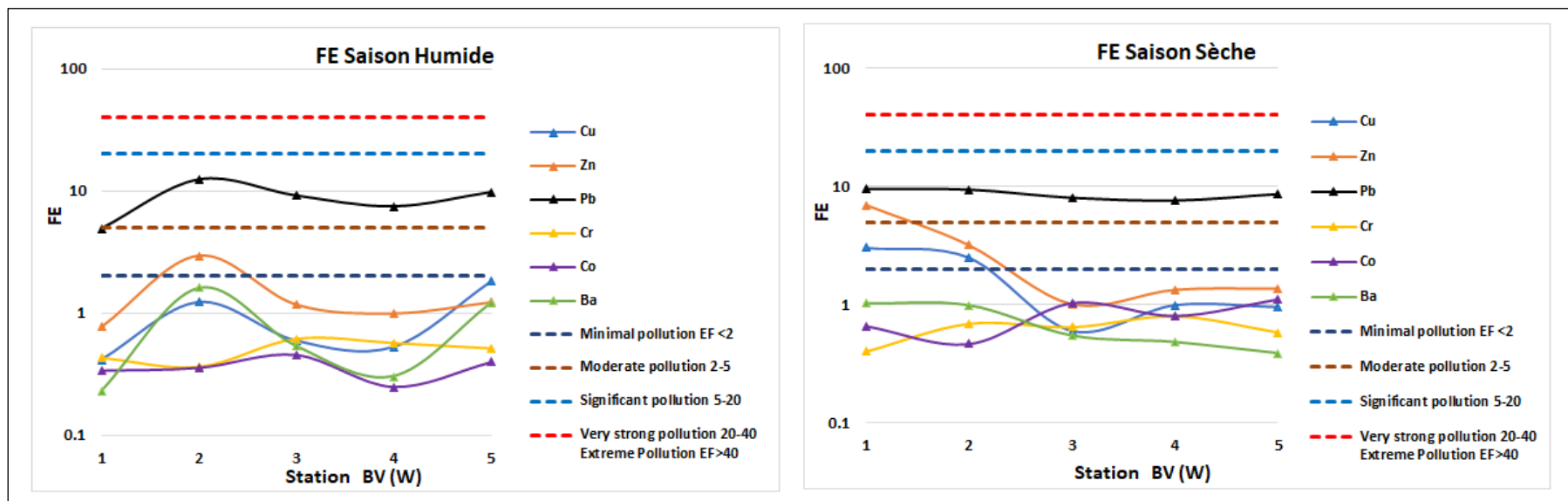


Figure V-4 : Variation du facteur d'enrichissement durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica.

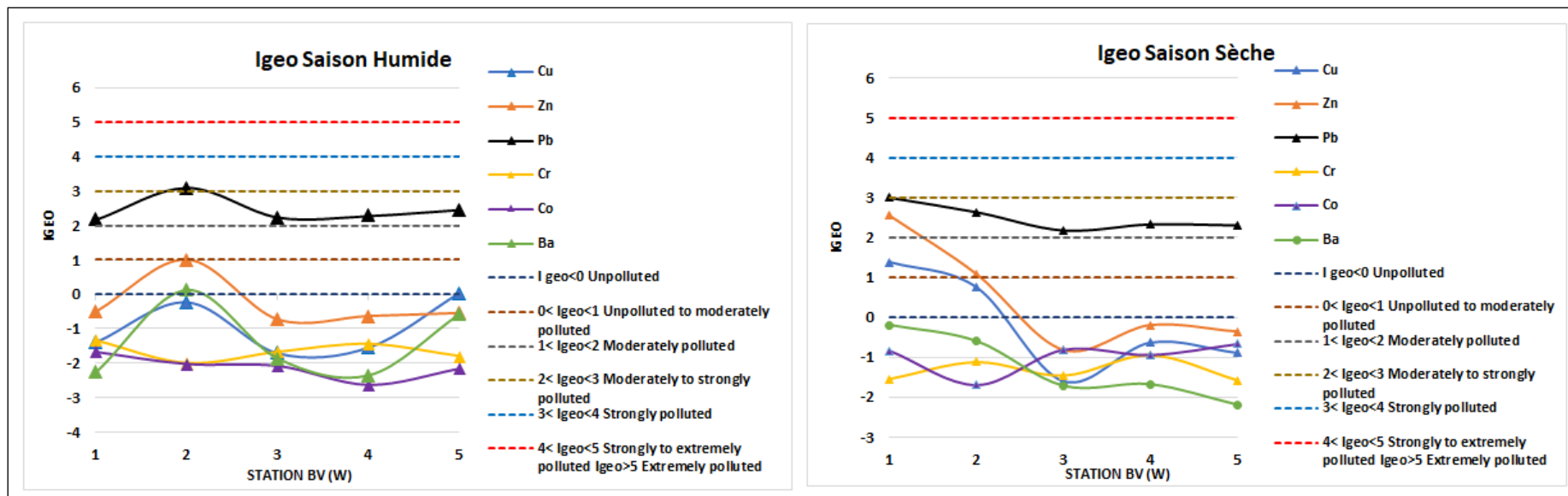


Figure V-5 : Variation de l'indice de géoaccumulation durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica.

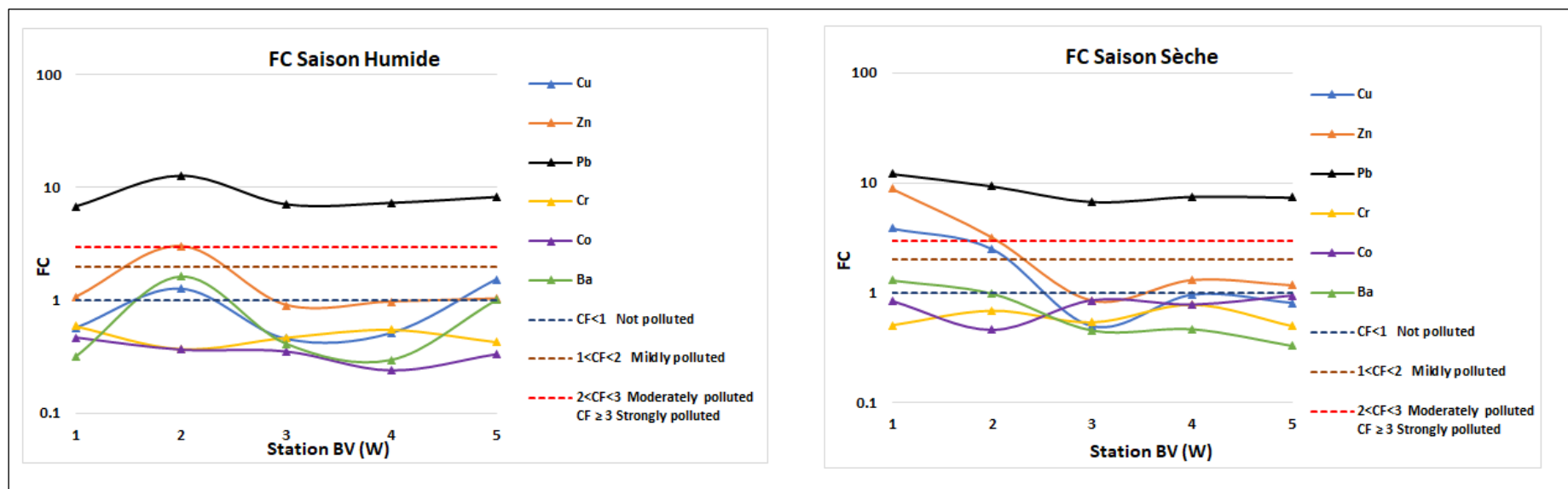


Figure V-6 : Variation du facteur de contamination durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica.

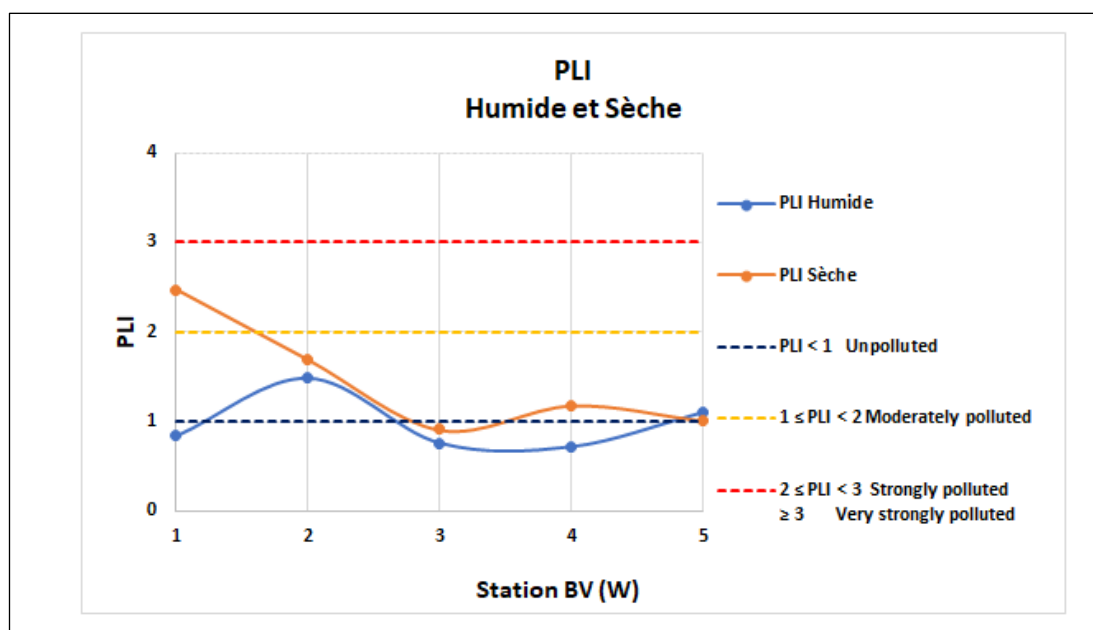


Figure V-7 : Variation de l'indice de charge de pollution (PLI) durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica.

Les concentrations moyennes en Pb, Zn, Cr et Cu ont été comparées aux valeurs guides recommandées pour la qualité des sédiments (SQGs) (MacDonald et al., 2000) (Tableau V-2). Les concentrations en Pb enregistrées au niveau de toutes les stations durant les deux saisons sont supérieures aux valeurs PEL et ERM indiquant une pollution potentielle. Les concentrations en Cu sont inférieures aux valeurs PEL à l'exception de 3 concentrations comprises entre TEL et PEL au niveau de la station W5 pendant la saison humide et au niveau des stations W1 et W2 pendant la saison sèche. Pour le Zn, les concentrations enregistrées durant la saison humide et sèche au niveau de la station W2 sont comprises entre TEL et PEL, la concentration enregistrée durant la saison sèche au niveau de la station W1 est supérieure au PEL et les autres concentrations sont inférieures aux valeurs TEL. Pour le Cr, toutes les valeurs sont comprises entre leurs concentrations TEL et PEL, à l'exception de la station W1 pendant la saison humide qui est inférieure à sa concentration TEL.

Tableau V-2 : Comparaison des concentrations en ETM avec les valeurs guides et backgrounds.

Bassin Versant n = 10 (Humide et Sèche)							
Metal (mg/kg)	Min–Max	Moyenne ± SD	Sediment-Quality Guidelines for Freshwater Ecosystems				Background Values
			TEL	PEL	ERL	ERM	
Cu	12.86 - 108.85	36.47 - 31.05	35.7	197	70	390	28
Zn	56.95 - 592.35	149.66 - 165.98	123	315	120	270	67
Pb	114.63 - 217.53	144.91 - 37.43	35	91.3	35	110	17
Cr	34.33 - 72.16	50.04 - 11.18	37.3	90	80	145	92
Co	4.19 - 16.32	9.78 - 4.51	-	-	-	-	17.3
Ba	183.85 - 1024.31	450.81 - 299.63	-	-	-	-	624

TEL, threshold effect level; PEL, probable effect level; ERL, effect range low and ERM, effects range median (MacDonald et al. (2000); UCC, Upper Continental Crust (Rudnick et Gao, 2003)).

IV. Discussion

L'évaluation du risque écotoxicologique à travers la comparaison des concentrations enregistrées dans cette étude avec les valeurs guides recommandées pour la qualité des sédiments (SQG) comme rapporté par [MacDonald et al. \(2000\)](#) et par l'évaluation des indices de pollution EF, CF et Igeo comme rapporté respectivement par [Sutherland \(2000\)](#) ; [Müller \(1981\)](#) ; [Hakanson \(1980\)](#) ; et [Müller \(1979\)](#) (Figures V-4, V-5 et V-6) montrent pendant les deux saisons (humide et sèche) une contamination par le plomb au niveau tous les oueds étudiés où les concentrations sont supérieures aux PEL et ERM.

La zone d'influence nord-ouest du bassin versant (oueds Ouchen et Akhandouk) caractérisée par quelques activités industrielles, et l'oued Cabaillo caractérisé par les rejets provenant du lessivage des sites miniers abandonnés de Fer sont les plus pollués en zinc et en cuivre. Pour les éléments Cr, Co et Ba, une pollution minimale a été enregistrée pendant les deux saisons. Les valeurs PLI ([Tomlinson, 1980](#)) (Figure V-7) montrent que durant la saison humide à l'exception d'oued Cabaillo et d'oued Lhdara qui sont modérément pollués, les autres oueds sont caractérisés par une pollution minimale ; alors que durant la saison sèche, la zone nord-ouest du bassin versant était fortement polluée et les autres oueds sont modérément pollués.

Généralement, les principales activités affectant les bassins versants sont les activités agricoles, minières, industrielles ainsi que d'autres utilisations consommatrices d'eau ; l'inondation, le ruissellement et l'introduction de polluants dans les cours d'eau ([Arnold, 2010](#)). En effet, le bassin versant nord-ouest de la lagune de Marchica draine les eaux pluviales du massif du Gourougou pour atteindre la lagune de Marchica par les oueds Ouchen et Akhandouk et les principales activités sont liées à l'agriculture et aux industries de la pêche au port de Beni Ensar ; et le bassin versant sud-est qui atteint la lagune de Marchica à travers les oueds Affelioun et Lhdara est caractérisé par l'agriculture irriguée et certaines activités industrielles dans la commune d'Arekmane. Les zones nord-ouest et sud-est reçoivent également le rejet de certaines eaux usées non traitées de certaines agglomérations et de certaines activités qui ne sont pas encore connectées au réseau d'assainissement ([ABHM, 2009](#)).

La zone d'influence au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica abrite des unités industrielles dont les principales activités sont liées à la sidérurgie au niveau des communes de Sélouane et d'Al Aaroui, la majorité des industries a été installée avant la mise en œuvre de la loi nationale des études d'impact sur l'environnement ; ainsi, le rejet des eaux industrielles étant sans traitement antérieur ([Département de l'Environnement, 2016d](#)). Cette zone d'influence est également caractérisée par une agriculture irriguée dans la plaine du Bouarg utilisant des pesticides et des fertilisants qui impactent fortement la nappe phréatique de Bouarg avec une qualité chimique médiocre comme rapporté par [Lyazidi et al., \(2020\)](#) ; [Ré and Sacchi \(2017\)](#) ; [Ré et al. \(2014\)](#) ; [Saddik \(2014\)](#) ; [Re et al. \(2013\)](#) ; [El Yaouti et al. \(2009\)](#) ; [El Mandour et al. \(2008\)](#) et [Snoussi \(2004\)](#).

La zone d'influence abrite également un gisement de minerai de fer, dont une partie a été intensivement exploitée et abandonnée sans réhabilitation, permettant ainsi la production de drainage minier acide et le relargage des ETM ayant des impacts

négatifs sur biodiversité de la zone humide notamment les espèces aquatiques ainsi qu'une contamination des eaux souterraines selon [Cadmus et al. \(2018\)](#) ; [Simate et al. \(2014\)](#) et [Bussière et al. \(2010\)](#) ; ce qui peut expliquer l'impact négatif du bassin versant sur la lagune de Marchica à travers l'oued Cabaillo, comme rapporté par [Khafouri et Talbi \(2020\)](#) et [Lakrim et al. \(2014\)](#).

Les résultats obtenus dans cette étude sont cohérents avec ceux du programme concernant la surveillance de la pollution tellurique en Méditerranée Marocaine ([Département de l'Environnement, 2016a](#)) qui ont montré une pollution par le zinc au niveau d'oued Selouane et d'oued Cabaillo pendant un suivi de trois ans (2013, 2014 et 2015) ; et une pollution par le plomb au niveau d'oued Cabaillo en 2015.

Cette étude est également en accord avec l'étude des sédiments superficiels de la lagune de Marchica après la réalisation des actions de restauration comme rapporté par [Oujidi et al. \(2021\)](#); [Saddik \(2017\)](#) et [Maanan et al. \(2015\)](#), ce qui peut confirmer aussi que le bassin versant a un impact négatif sur la lagune de Marchica malgré les actions de restauration réalisées autour de cette lagune.

V. Conclusion

Cette étude confirme à travers le risque écotoxicologique des éléments traces métalliques en utilisant les indices de pollution et les valeurs guides de qualité des sédiments SQGs, la contamination de la zone d'influence au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica par le plomb, le zinc et le cuivre. En conséquence, il est recommandé la mise en place d'un plan de gestion intégrée incluant la restauration des sites miniers abandonnés, l'utilisation rationnelle des pesticides et engrais dans l'agriculture, et la mise à niveau des unités industrielles, notamment celles installées avant la mise en œuvre de la loi nationale sur les études d'impact sur l'environnement.

Chapitre VI : Impact saisonnier du bassin versant sur la lagune de Marchica et corrélations Eaux - Sédiments

Résumé

L'impact saisonnier du bassin versant sur la lagune de Marchica durant l'année 2018 a été étudié pendant la saison humide et la saison sèche à travers la comparaison de la qualité des sédiments superficiels et la qualité des eaux superficielles et à travers les interactions Eaux - Sédiments entre ces deux écosystèmes. La comparaison des indices écotoxicologiques des sédiments montre, à l'exception des pics enregistrés au niveau de certaines stations d'échantillonnage de la lagune, une tendance de variation presque similaire de l'état de pollution entre ces deux écosystèmes. Les pics de pollution ont été enregistrés pour le plomb au niveau de l'embouchure de l'oued Selouane durant la saison humide et la zone eutrophisée de Béni Ensar durant la saison sèche. C'est le cas aussi pour le zinc au niveau de la station à côté de la nouvelle passe sur le cordon dunaire côté Béni Ensar et la zone eutrophisée d'Arekmane durant la saison humide. La comparaison des indices de charge de pollution (PLI) entre la lagune de Marchica et son bassin versant montre durant la saison humide un état de pollution variant entre minimal et très fort pour la lagune et un état de pollution fluctuant entre minimal et modéré pour le bassin versant. Durant la saison sèche, l'état de pollution varie entre minimal et modéré pour la lagune et un état de pollution entre minimal et fort pour le bassin versant. Les résultats de la qualité des eaux superficielles de l'année 2018 ont montré qu'au niveau de la lagune, les concentrations moyennes en Pb, Cd, Cr et Zn sont inférieures aux normes de l'USEPA 2016 alors que pour le Ni et Cu, des dépassements ont été identifiés par rapport à ces mêmes normes. Ces résultats sont similaires à ceux enregistrés durant l'année 2017 pour la qualité des eaux superficielles de la lagune. Au niveau du bassin versant, une qualité excellente a été enregistrée en 2018 à l'exception du Pb au niveau de l'intersection des deux oueds Ouchen et Akhandouk et du Ni au niveau d'oued Selouane qui ont été classés comme qualité moyenne. Ces résultats sont presque similaires à ceux de la qualité des eaux superficielles du bassin versant de l'année 2017. L'analyse de corrélation de Spearman réalisée simultanément pour les concentrations en éléments traces métalliques au niveau des eaux et sédiments durant la saison humide et la saison sèche et l'analyse automatique hiérarchique entre les stations d'échantillonnage de la lagune et celles du bassin versant durant la saison humide et la saison sèche montrent un impact saisonnier du bassin versant sur la lagune de Marchica caractérisé par les apports en éléments traces métalliques.

Mots Clés

Lagune de Marchica, Bassin versant, Eau, Sédiment, Corrélations Eaux-Sédiments, Impact du Bassin versant.

I. Introduction

L'objectif principal de cette étude est la caractérisation de l'impact du bassin versant sur la lagune de Marchica à travers la comparaison des sédiments superficiels et de l'état de pollution des eaux superficielles entre la lagune et les principaux oueds du bassin versant, et à travers les corrélations Eaux - Sédiments entre ces deux écosystèmes en se basant sur deux analyses réalisées simultanément durant la saison humide et la saison sèche : l'analyse de corrélation de Spearman pour les concentrations en éléments traces métalliques au niveau des eaux et sédiments et l'analyse automatique hiérarchique entre les stations d'échantillonnage de la lagune et du bassin versant.

II. Méthodologie

Durant deux années 2017 et 2018, des campagnes d'échantillonnage (humide et sèche) des eaux de surface au niveau de la lagune de Marchica et son bassin versant ont été réalisées. Durant l'année 2018, deux campagnes d'échantillonnage (humide et sèche) ont été réalisées pour analyser la qualité des sédiments superficiels au niveau de la lagune de Marchica et son bassin versant. Le réseau d'échantillonnage (Figure VI-1) est constitué de 13 stations au niveau de la lagune (S), cinq stations au niveau des principaux oueds du bassin versant (W1 à W5) et en plus, une station au niveau de la STEP Grand Nador (W*) pour le compartiment Eau. Les résultats d'analyses des éléments traces métalliques des sédiments de la lagune sont décrits dans le chapitre IV (Oujidi et al., 2021a) ; et ceux du bassin versant sont décrits dans le chapitre V (Oujidi et al., 2021b). Les résultats des ETM dans les eaux de la lagune et de son bassin versant sont décrits dans l'annexe 1. Le traitement statistique des résultats a été réalisé par le logiciel SPSS 20.

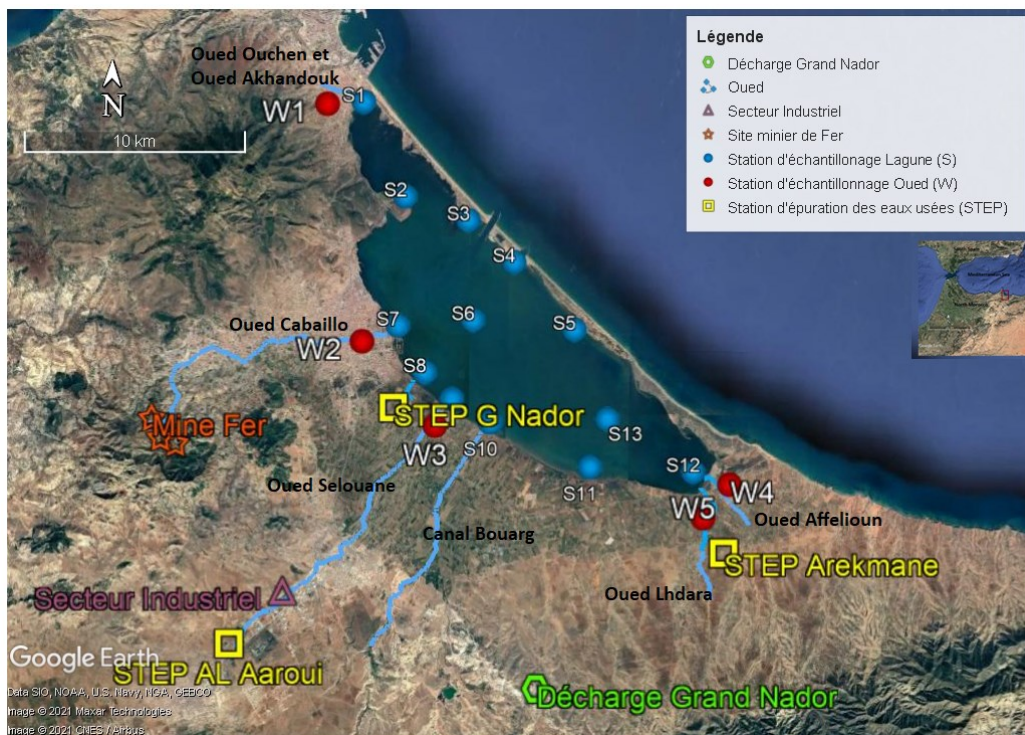


Figure VI-1: Réseau d'échantillonnage au niveau de la lagune de Marchica et son bassin versant.

III. Résultats

III.1. Comparaison des indices écotoxicologiques des sédiments entre la lagune et son bassin versant

III.1.1. Facteur d'enrichissement

La comparaison des facteurs d'enrichissement (FE) (Sutherland, 2000) des sédiments superficiels entre la lagune et les principaux oueds du bassin versant est mentionnée au niveau du tableau VI-1 et la figure VI-2.

Tableau VI-1: Facteurs d'enrichissement en ETM des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2018.

	Facteur d'enrichissement		Cu_S	Zn_S	Pb_S	Cr_S	Co_S	Ba_S
Saison Humide 2018	Lagune de Marchica	Min	0,08	0,17	4,42	0,02	<LD	0,14
		Max	2,55	163,60	153, 85	0,89	-	0,76
	W1		0,42	0,77	4,92	0,43	0,34	0,23
	W2		1,24	2,94	12,50	0,36	0,36	1,60
	W3		0,60	1,18	9,21	0,61	0,46	0,54
	W4		0,53	0,99	7,49	0,56	0,25	0,30
	W5		1,83	1,23	9,81	0,51	0,40	1,21
Saison Sèche 2018	Lagune de Marchica	Min	0,18	0,45	2,81	0,11	0,00003	0,25
		Max	4,59	3,61	173,08	0,91	2,22	0,77
	W1		3,04	6,92	9,43	0,40	0,66	1,02
	W2		2,51	3,18	9,30	0,69	0,47	0,98
	W3		0,59	1,01	8,02	0,64	1,02	0,54
	W4		0,99	1,34	7,65	0,80	0,80	0,48
	W5		0,95	1,37	8,60	0,58	1,10	0,38

III.1.2. Indice de géoaccumulation

La comparaison des indices de géoaccumulation (Igeo) (Müller, 1981 ; Müller, 1979) des sédiments superficiels entre la lagune et les principaux oueds du bassin versant est mentionnée au niveau du tableau VI-2 et la figure VI-3.

Tableau VI-2: Indices de géoaccumulation des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2018.

	Indice de géoaccumulation		Cu_S	Zn_S	Pb_S	Cr_S	Co_S	Ba_S
Saison Humide 2018	Lagune de Marchica	Min	-1,24	-1,00	0,71	-1,79	<LD	-1,16
		Max	0,66	1,94	1,97	-0,25		0,02
	Bassin versant	W1	-1,39	-0,50	2,17	-1,34	-1,68	-2,25
		W2	-0,24	1,00	3,09	-2,01	-2,03	0,13
		W3	-1,71	-0,73	2,24	-1,68	-2,09	-1,86
		W4	-1,54	-0,63	2,28	-1,45	-2,63	-2,35
		W5	0,03	-0,54	2,46	-1,80	-2,17	-0,57
Saison Sèche 2018	Lagune de Marchica	Min	- 1,29	- 0,87	0,64	-1,27	- 4,22	- 1,15
		Max	0,92	0,81	2,08	- 0,16	- 0,12	- 0,01
	Bassin versant	W1	1,37	2,56	3,01	-1,56	-0,83	-0,20
		W2	0,74	1,09	2,64	-1,12	-1,68	-0,60
		W3	-1,59	-0,82	2,17	-1,47	-0,81	-1,72
		W4	-0,63	-0,19	2,32	-0,93	-0,94	-1,68
		W5	-0,88	-0,35	2,30	-1,59	-0,67	-2,19

III.1.3. Facteur de contamination

La comparaison des facteurs de contamination (FC) ([Hakanson, 1980](#)) des sédiments superficiels entre la lagune et les principaux oueds du bassin versant montre est mentionnée au niveau du tableau VI-3 et la figure VI-4.

Tableau VI-3: Facteurs de contamination des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2018.

	Facteur de contamination		Cu_S	Zn_S	Pb_S	Cr_S	Co_S	Ba_S
Saison Humide 2018	Lagune de Marchica	Min	0,09	0,15	7,75	0,02	<LD	0,10
		Max	6,83	130,02	140,55	0,84		1,58
	Bassin versant	W1	0,57	1,06	6,77	0,59	<LD	0,31
		W2	1,27	3,01	12,80	0,37	0,37	1,64
		W3	0,46	0,91	7,09	0,47	0,35	0,41
		W4	0,51	0,97	7,30	0,55	0,24	0,29
		W5	1,53	1,03	8,24	0,43	0,33	1,01
Saison Sèche 2018	Lagune de Marchica	Min	0,08	0,20	6,61	0,08	0,0001	0,11
		Max	12,37	9,73	178,79	1,03	1,14	1,48
	Bassin versant	W1	3,89	8,84	12,06	0,51	0,84	1,31
		W2	2,51	3,19	9,34	0,69	0,47	0,99
		W3	0,50	0,85	6,74	0,54	0,86	0,46
		W4	0,97	1,31	7,51	0,78	0,78	0,47
		W5	0,81	1,17	7,38	0,50	0,94	0,33

III.1.4. Indice de charge de pollution

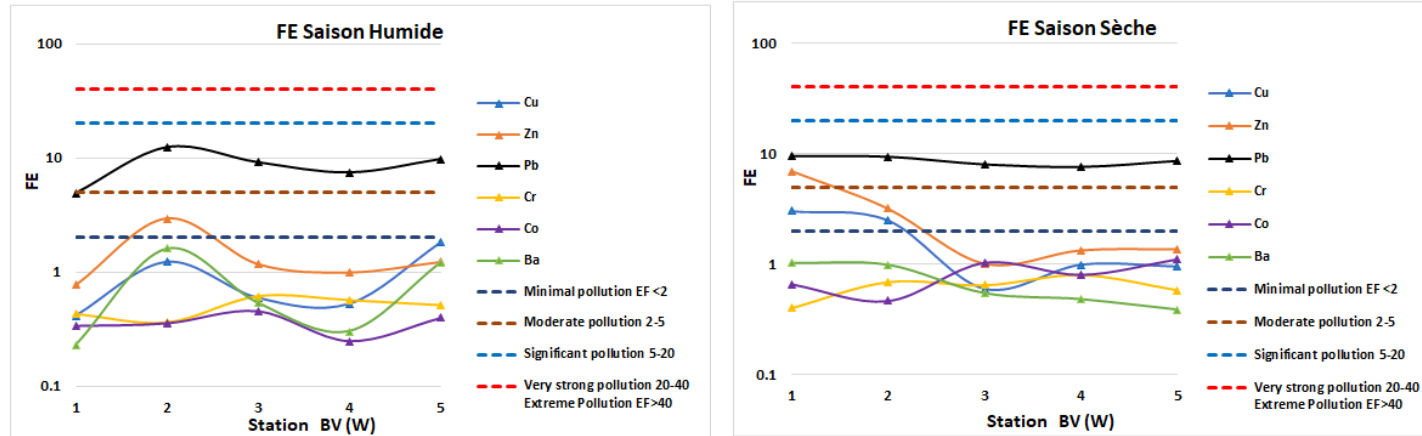
La comparaison des indices de charge de pollution (PLI) (Tomlinson et al., 1980) des sédiments superficiels entre la lagune et les principaux oueds du bassin versant montre (Tableau VI-4, Figure VI-5) :

1. Durant la saison humide, PLI enregistré au niveau de la lagune varie entre 0,22 et 3,33 et la valeur maximale a été enregistrée au niveau de la station S3. Pour le bassin versant, PLI varie dans l'ordre décroissant suivant : W2 (1,49) > W5 (1,11) > W1 (0,84) > W3 (0,76) > W4 (0,72).
2. Durant la saison sèche, PLI enregistré au niveau de la lagune varie entre 0,28 et 1,39 et la valeur maximale a été enregistrée au niveau de la station S8. Pour le bassin versant, PLI varie dans l'ordre décroissant suivant : W1 (2,47) > W2 (1,69) > W4 (1,18) > W5 (1,01) > W3 (0,91).

Tableau VI-4: Indice de charge de pollution des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2018.

	Indice de charge pollution		PLI
Saison Humide	Lagune de Marchica	Min - Max	0,22 - 3,33
	Bassin versant	W1	0,84
		W2	1,49
		W3	0,76
		W4	0,72
		W5	1,11
Saison Sèche 2018	Lagune de Marchica	Min - Max	0,28 - 1,39
	Bassin versant	W1	2,47
		W2	1,69
		W3	0,91
		W4	1,18
		W5	1,01

Bassin versant Marchica



Lagune de Marchica

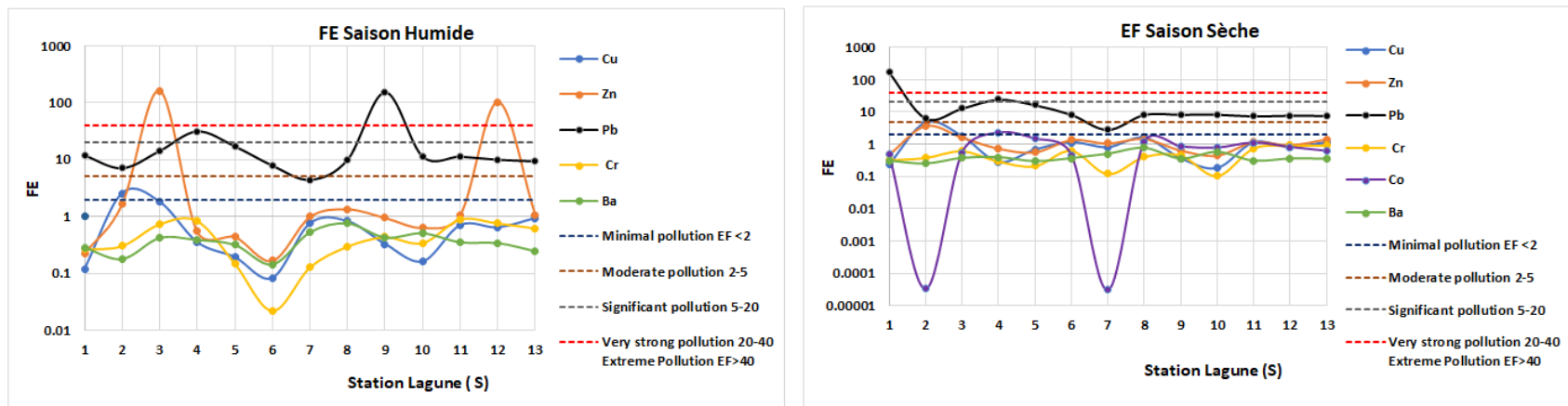
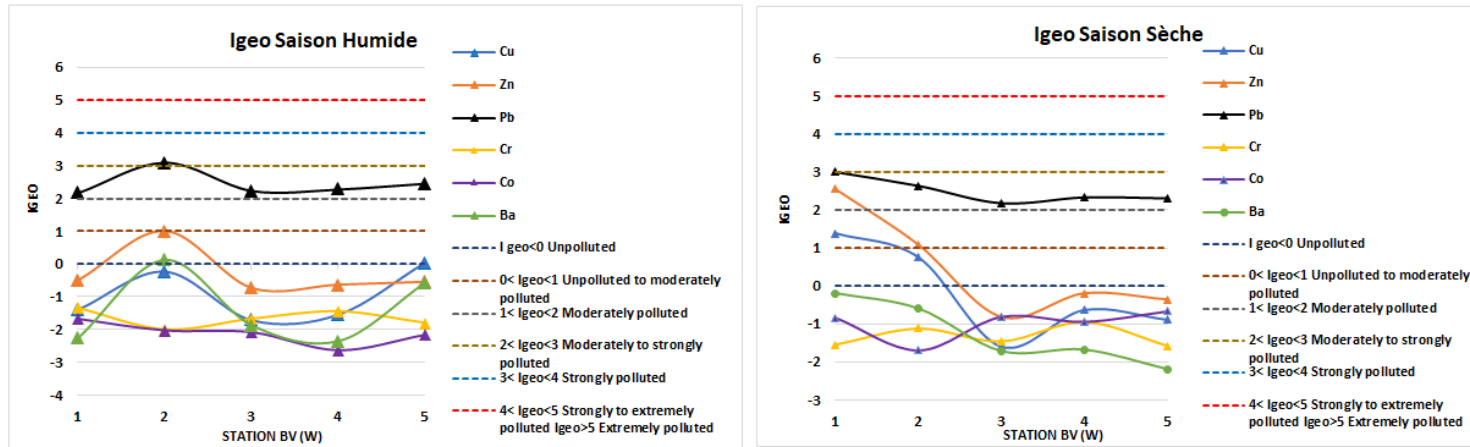


Figure VI-2: Comparaison des facteurs d'enrichissement entre la lagune de Marchica et son bassin versant durant l'année 2018.

Bassin versant Marchica



Lagune de Marchica

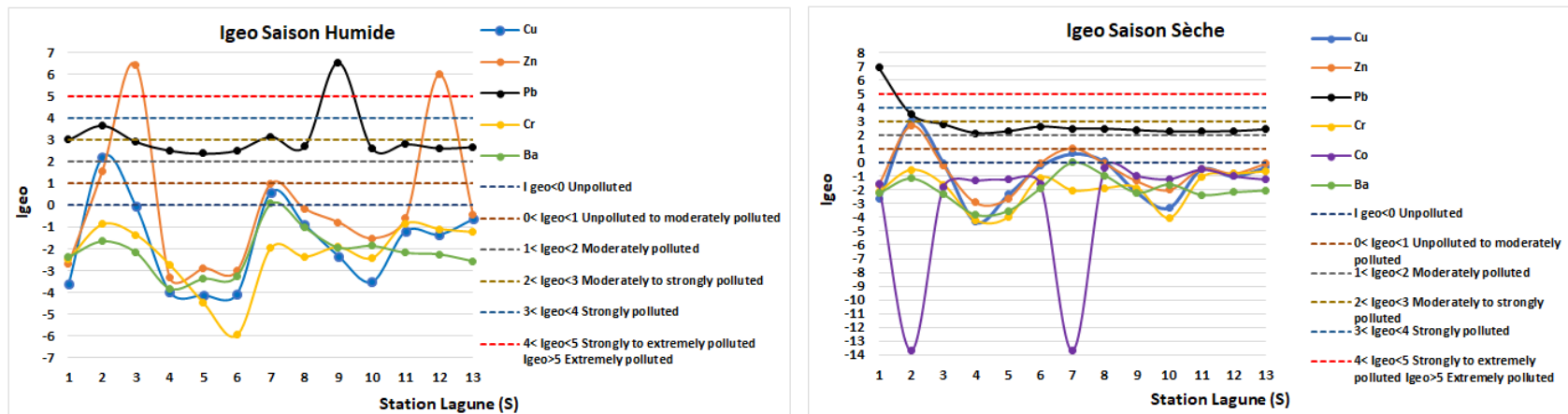
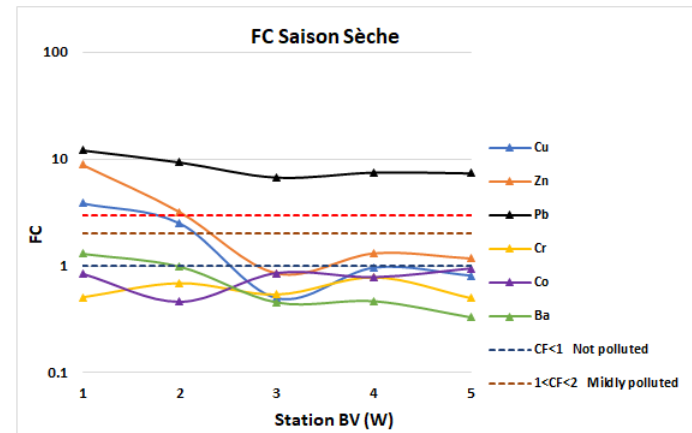
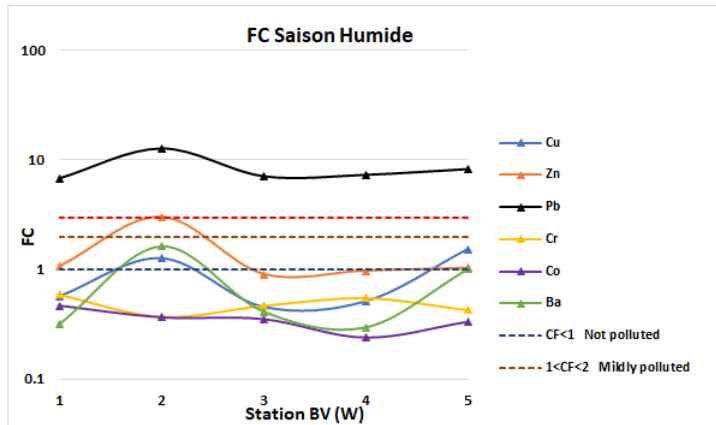


Figure VI-3: Comparaison des indices de géoaccumulation entre la lagune de Marchica et son bassin versant durant l'année 2018.

Bassin versant Marchica



Lagune de Marchica

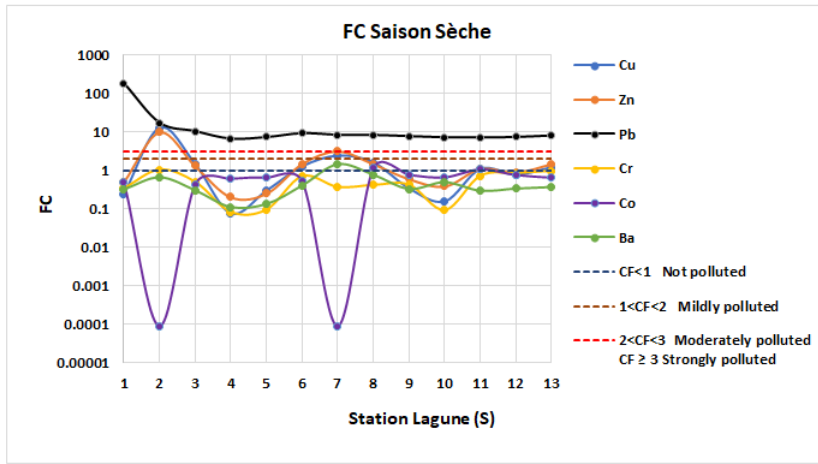
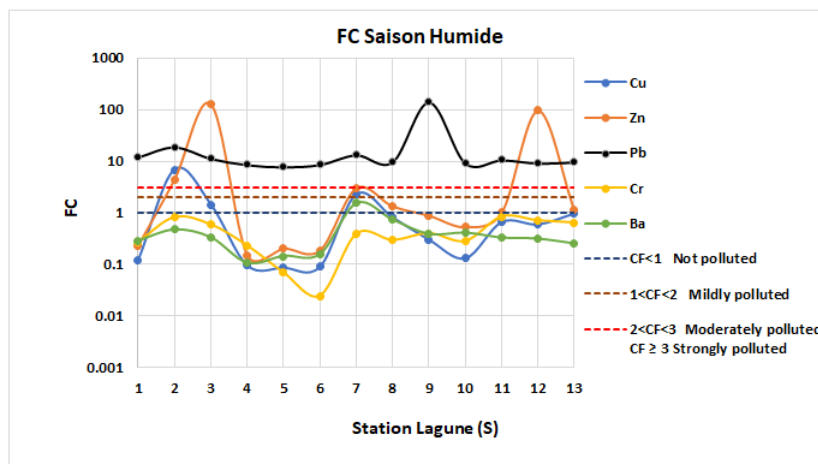


Figure VI-4: Comparaison des facteurs de contamination entre la lagune de Marchica et son bassin versant durant l'année 2018.

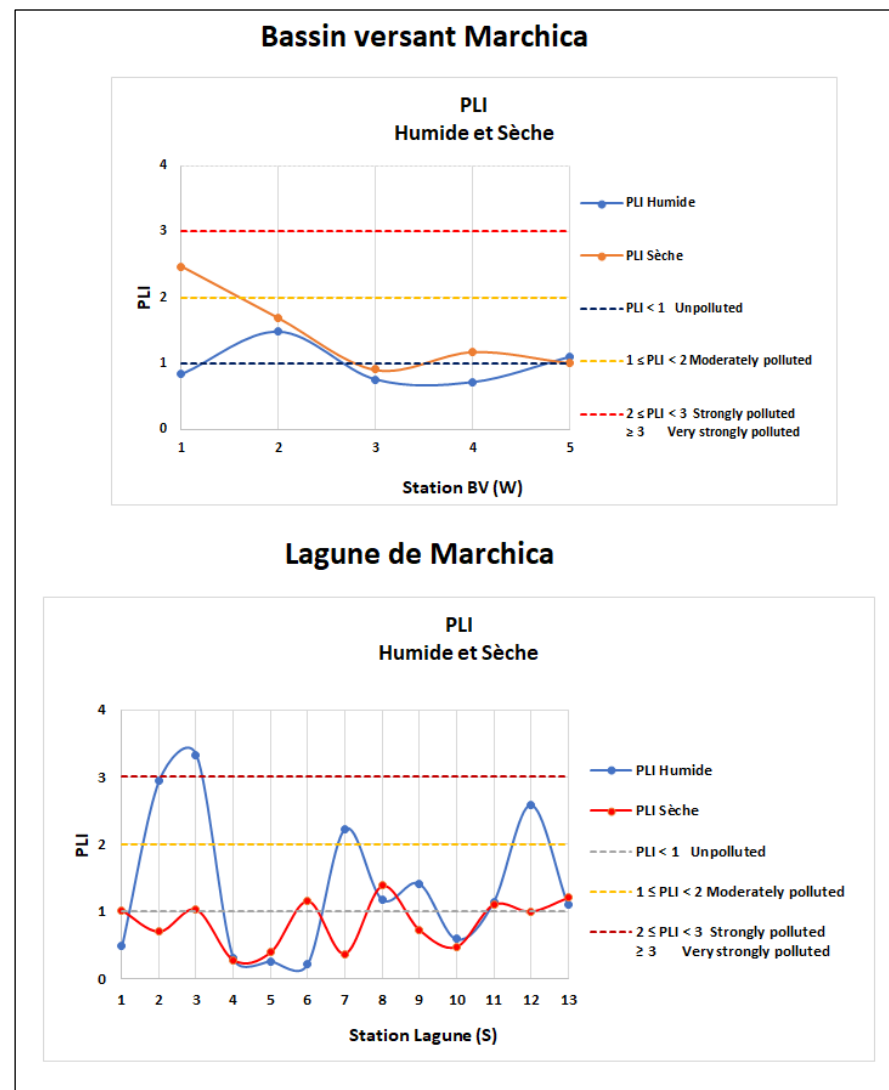


Figure VI-5: Comparaison des indices de charge de pollution entre la lagune de Marchica et son bassin versant durant l'année 2018.

III.2. Granulométrie et carbone organique total des sédiments de la lagune de Marchica et de son bassin versant

La variation de la granulométrie au niveau de la lagune et de son bassin versant montre que le sable est dominant durant la saison humide et le limon est dominant durant la saison sèche (Figure VI-6 et Figure VI-7). L'argile étant en fraction faible au niveau de la lagune (zone eutrophe d'Arekmane, la Marina et la zone centrale).

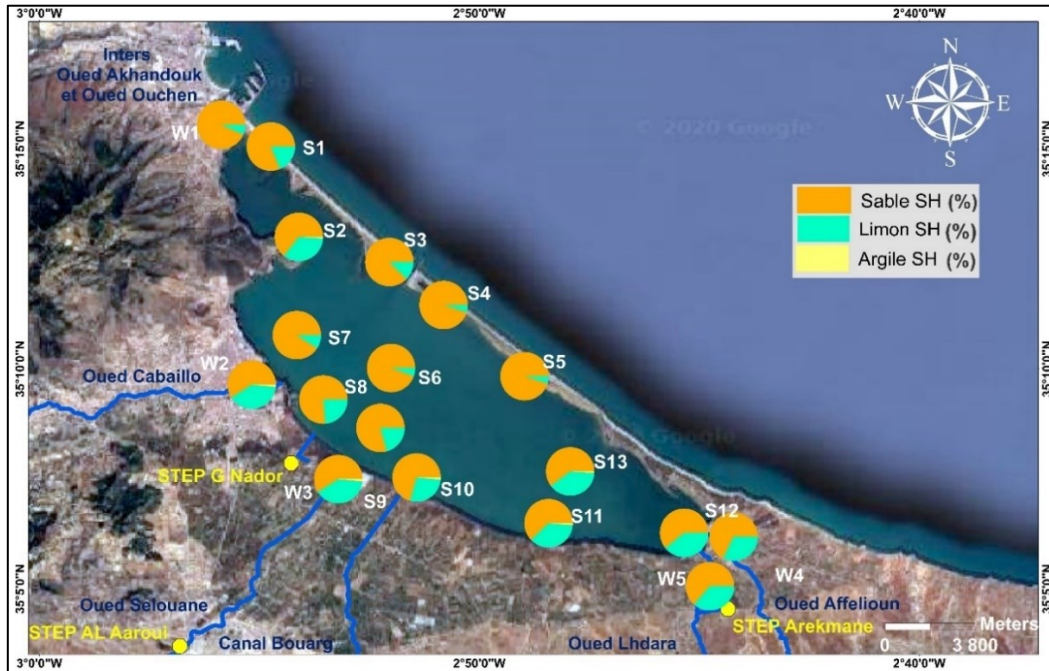


Figure VI-6: Variation de la granulométrie des sédiments superficiels de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant la saison humide de l'année 2018.

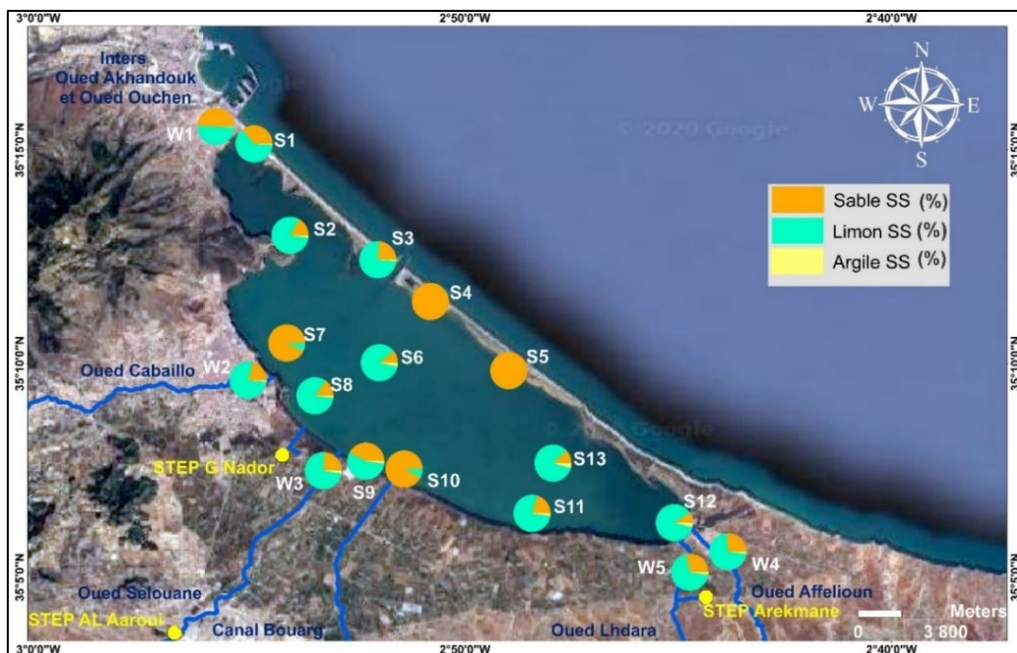


Figure VI-7 : Variation de la granulométrie des sédiments superficiels de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant la saison sèche de l'année 2018.

La variation du carbone organique total (COT) (Figure VI-8) montre que la valeur maximale est enregistrée au niveau du bassin versant (10%) durant la saison sèche. Au niveau de la lagune, la valeur maximale du COT est enregistrée au niveau de la station S3 durant les deux saisons (humide 6,1% et sèche 6,5%).

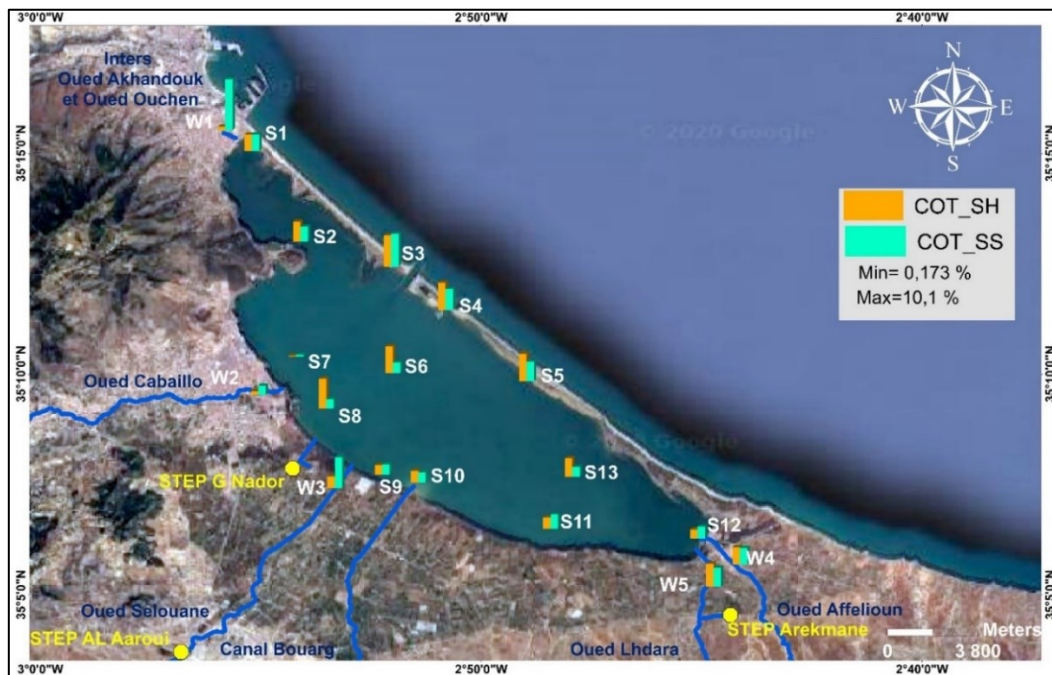


Figure VI-8 : Variation du COT des sédiments superficiels de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2018.

III.3. Comparaison des eaux superficielles entre la lagune de Marchica et son bassin versant

Les concentrations minimales et maximales de l'oxygène dissous au cours des années 2017 et 2018 (Annexe 1) au niveau de la lagune sont de 4,71 mg/l et 12,6 mg/l et au niveau du bassin versant sont de 2,81 mg/l et 11,6 mg/l.

Les concentrations minimales et maximales des éléments majeurs et traces enregistrées au cours des années 2017 et 2018 au niveau de la lagune (Annexe 1) sont respectivement de l'ordre de (mg/l) : Na (151,5 - 13140) ; K (80,21 - 479) ; Ca (88,85 - 705,8) ; Sr (0,2 - 12,58) ; Ti (<LD - 0,3) ; V (<LD - 0,34) ; Fe (0,05 - 3,02) ; Mn (0,001 - 0,21) et de l'ordre de (µg/l) : Pb (<LD - 8,19) ; Cd (0,03 - 0,35) ; Cu (4 - 53,08) ; Zn (<LD - 281) ; Ni (<LD - 70,20) ; Cr (2,73 - 62) et Co (0,82 - 6,19).

Les concentrations minimales et maximales des éléments majeurs et traces enregistrées au cours des années 2017 et 2018 au niveau du bassin versant (Annexe 1) sont respectivement de l'ordre de (mg/l) : Na (133 - 1100) ; K (14,05 - 273,40) ; Ca (48,89 - 404,80) ; Sr (0,97 - 6,08) ; Ti (0,004 - 0,21) ; V (<LD - 0,18) ; Fe (0,06 - 1,64) ; Mn (0,007 - 0,56) et de l'ordre de (µg/l) : Pb (<LD - 22,04) ; Cd (0,03 - 0,46) ; Cu (<LD - 25,01) ; Zn (3,70 - 148,60) ; Ni (4,34 - 39,17) ; Cr (0,77 - 31) et Co (0,85 - 3,63).

Les variations des concentrations moyennes annuelles de l'oxygène dissous dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les deux années 2017 et 2018 sont présentées dans la figure VI-9.

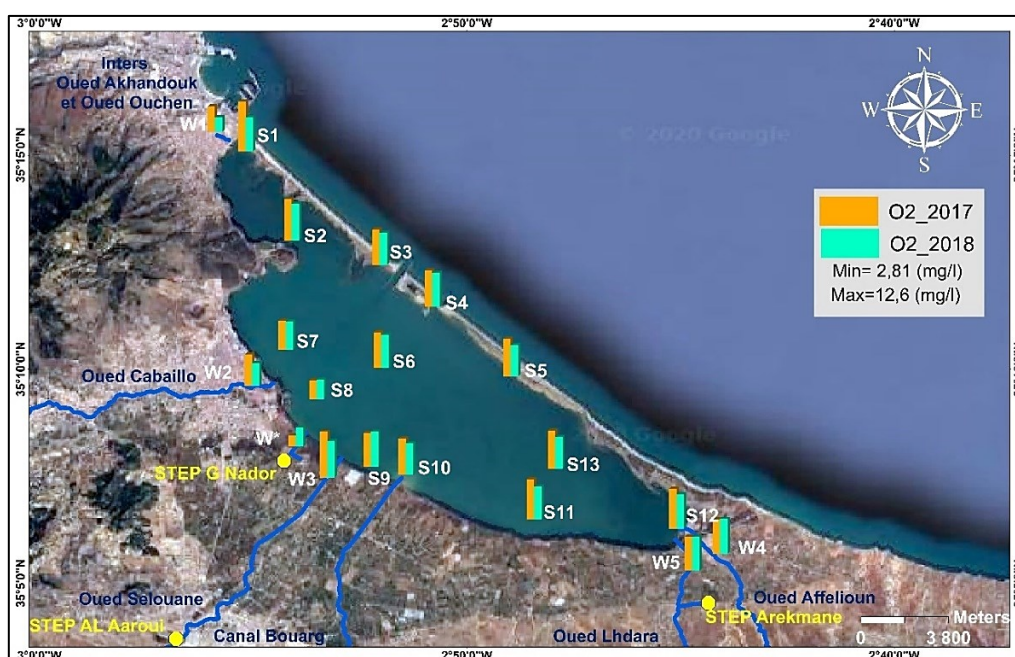


Figure VI-9 : Variation des concentrations moyennes annuelles de l'Oxygène Dissous dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

Les variations des concentrations moyennes annuelles des éléments traces et majeurs (Pb, Cd, Ni, Cr, Cu, Zn, Co Sr, V, Fe, Mn, Ti) dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les deux années 2017 et 2018 sont présentées dans les figures VI-10 à VI-21.

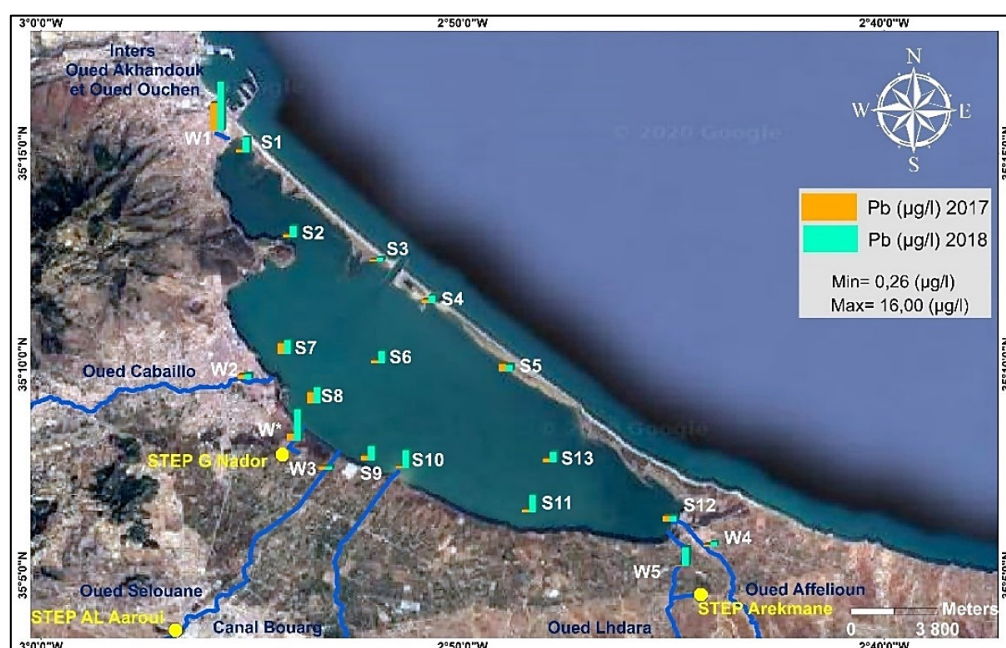


Figure VI-10 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Plomb dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

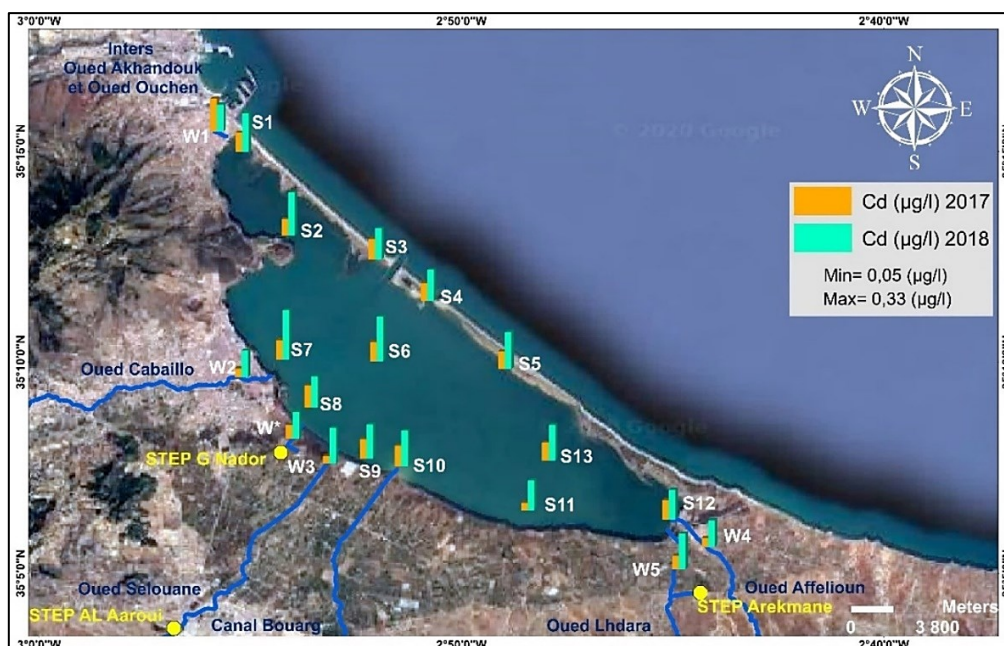


Figure VI-11 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Cadmium dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

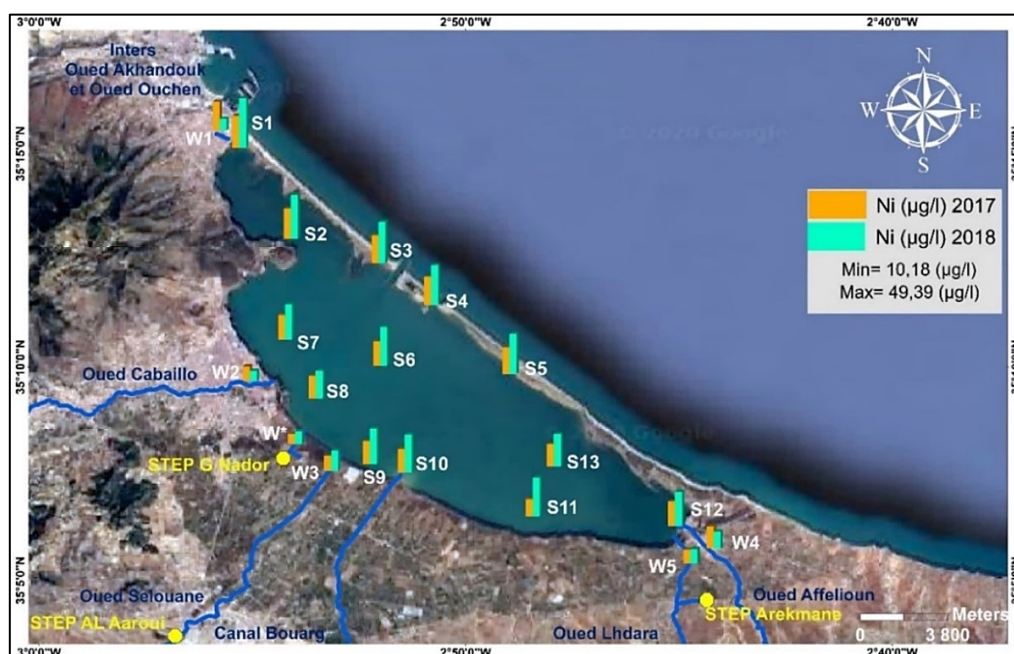


Figure VI-12 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Nickel dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

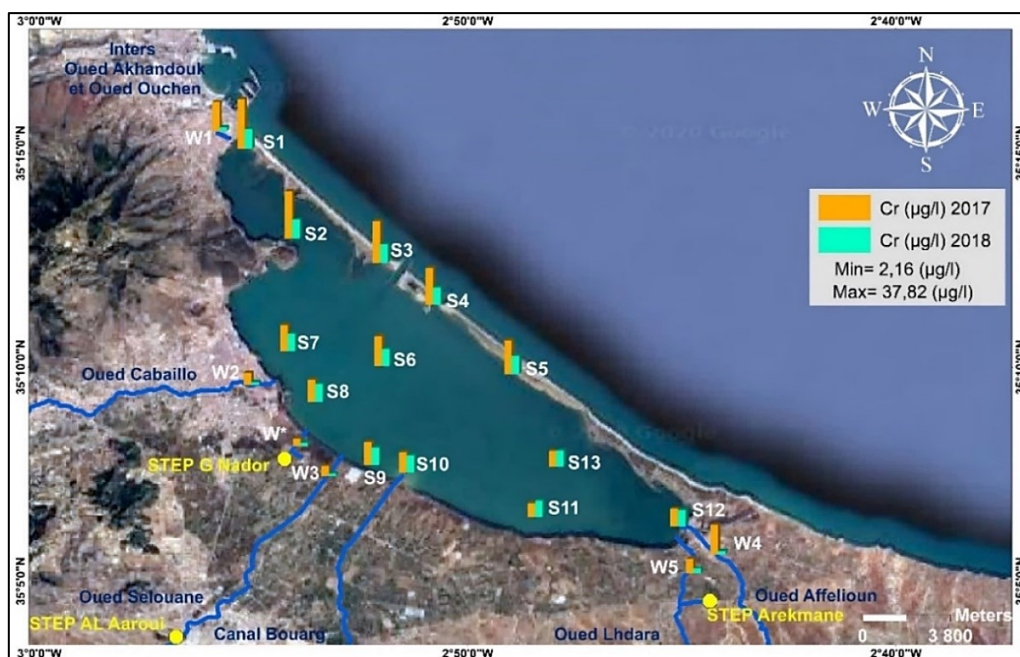


Figure VI-13 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Chrome dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

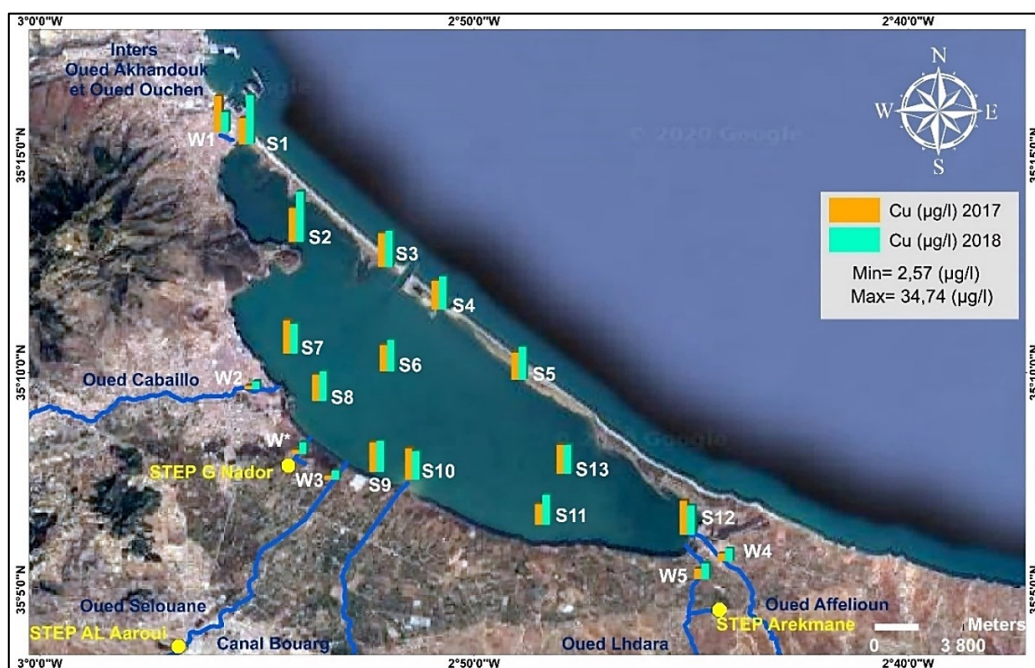


Figure VI-14 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Cuivre dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

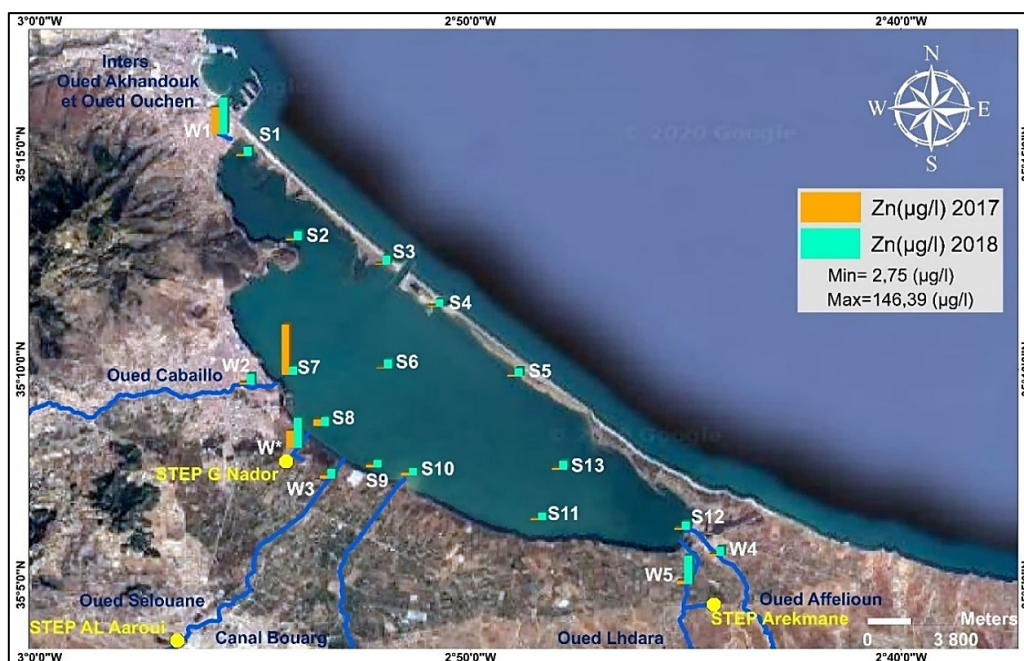


Figure VI-15 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Zinc dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

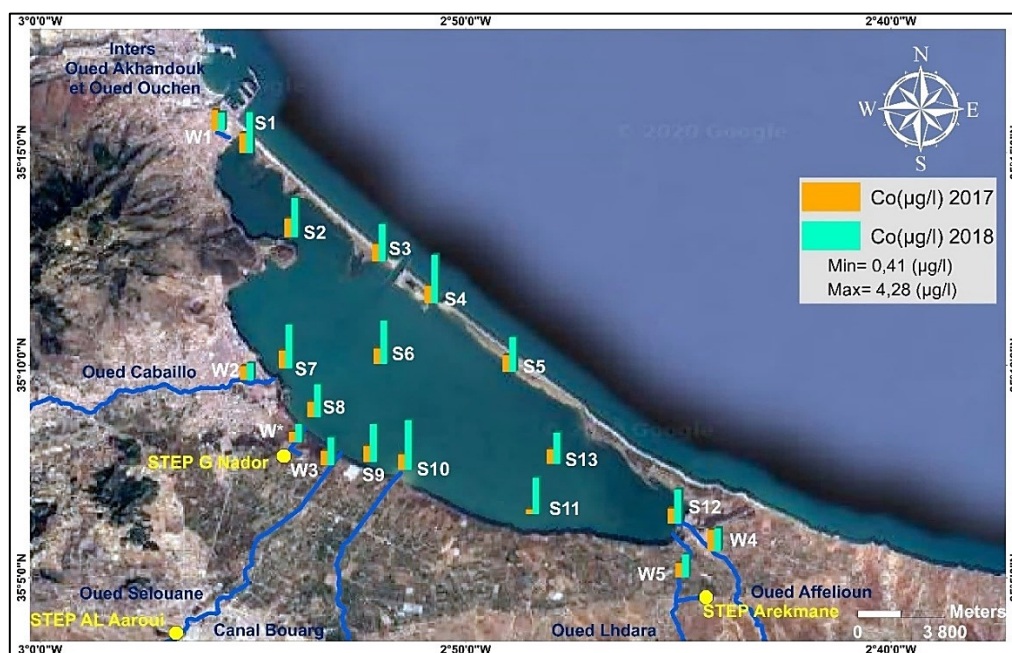


Figure VI-16 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Cobalt dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

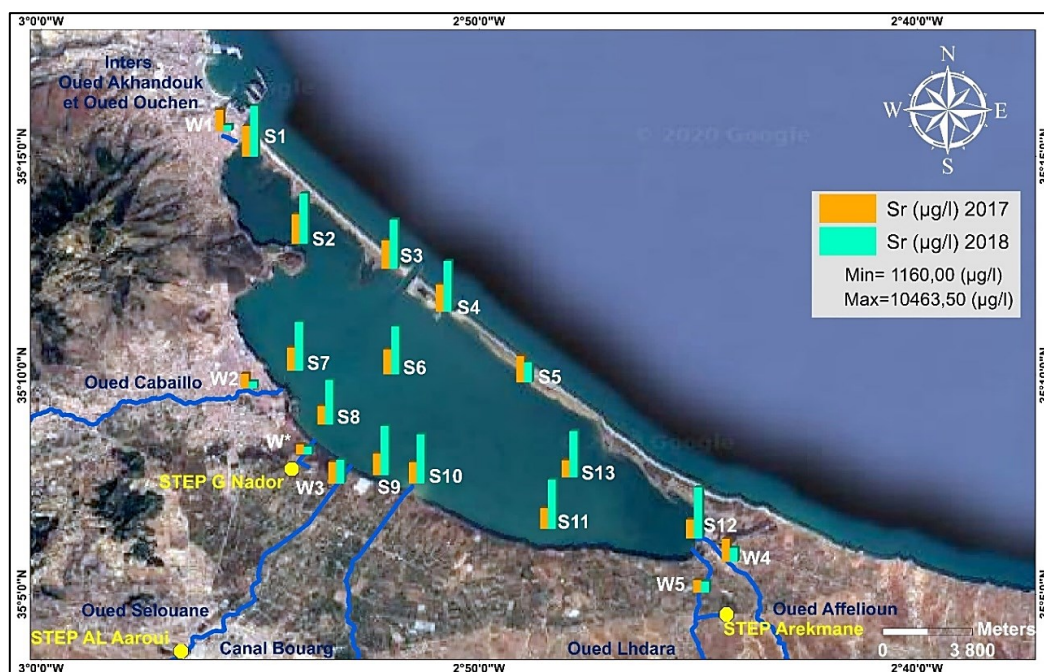


Figure VI-17 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Strontium dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.



Figure VI-18 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Vanadium dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant l'année 2017.

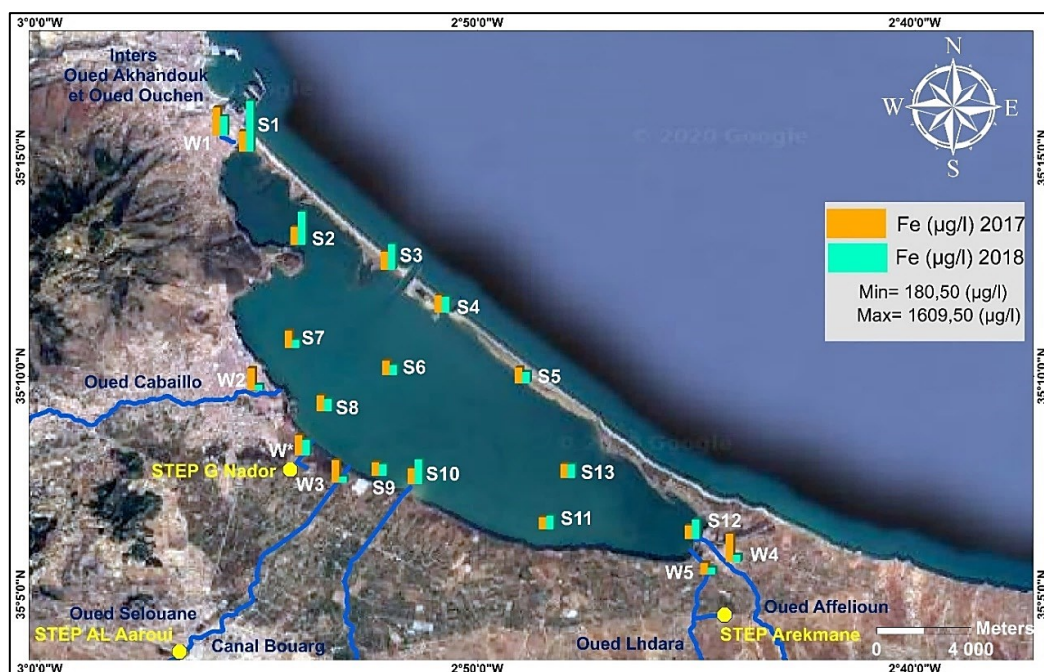


Figure VI-19 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Fer dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

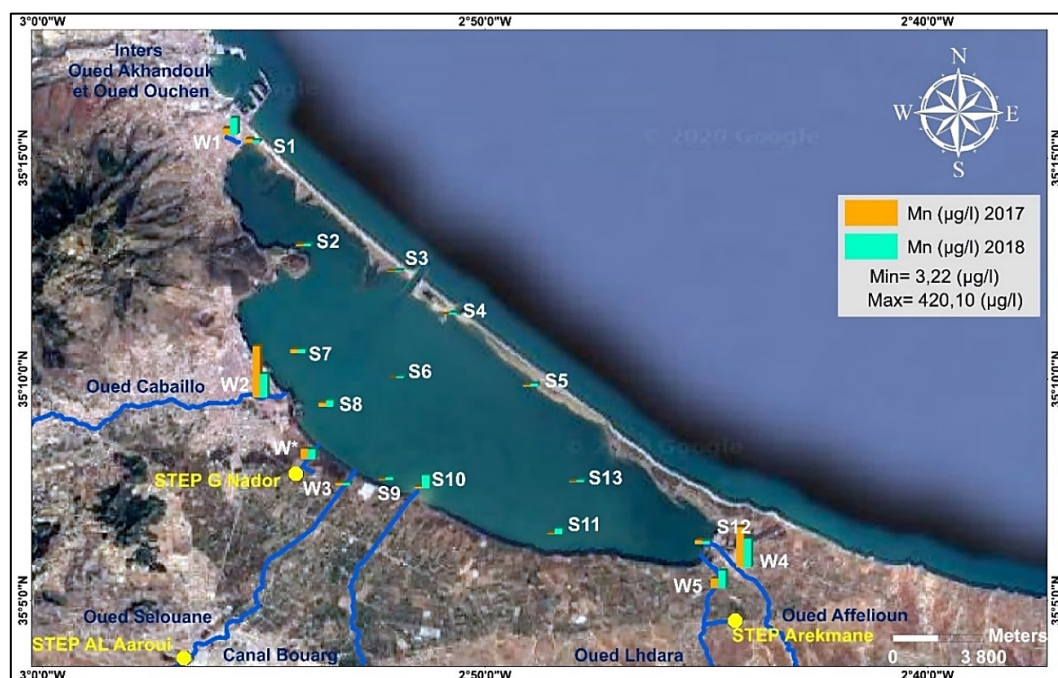


Figure VI-20 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Manganèse dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

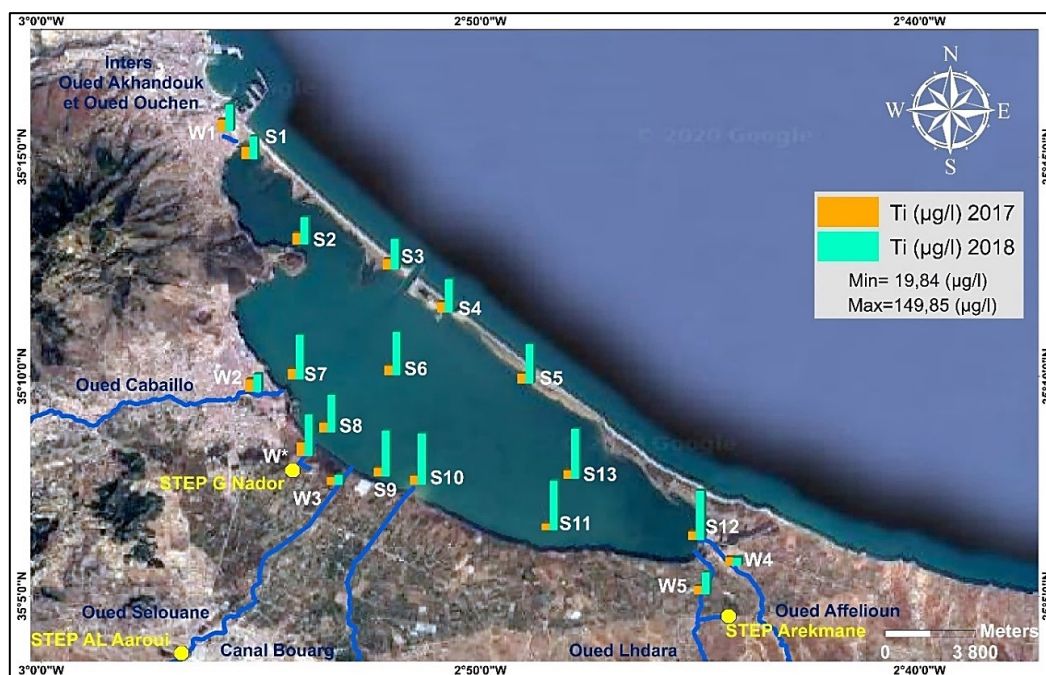


Figure VI-21 : Variation des concentrations moyennes annuelles du Titium dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica et de son bassin versant durant les années 2017 et 2018.

Les valeurs moyennes des concentrations des éléments traces métalliques au cours de l'année 2018 au niveau de la lagune varient dans l'ordre décroissant suivant : Ni > Zn > Cu > Cr > Pb > Cd (Tableau VI-5).

Les valeurs moyennes des concentrations des éléments traces métalliques au cours de l'année 2018 au niveau du bassin versant varient dans l'ordre décroissant suivant : Zn > Pb > Cu > Ni > Cr > Cd pour l'intersection des oueds Akhandouk et Ouchen ; Zn > Ni > Cu > Cr > Pb > Cd pour oued Cabaillo, oued Selouane et oued Affelioun ; et Zn > Ni > Cu > Pb > Cr > Cd pour oued Lhdara (Tableau VI-6).

Tableau VI-5: Concentrations moyennes des ETM au niveau des eaux superficielles de la lagune de Marchica durant l'année 2018.

ETM en µg/l		Pb_E	Cd_E	Cu_E	Zn_E	Ni_E	Cr_E
Saison humide 2018	Min	1,05	0,22	12,05	43,07	45,95	2,73
	Max	7,80	0,34	20,4	52,64	70,2	4,19
	Moy	3,34	0,31	17,90	47,80	65,93	3,45
Saison sèche 2018	Min	1,19	0,09	19,02	0,065	0,005	21,99
	Max	8,19	0,34	53,08	10,12	28,79	25,68
	Moy	4,27	0,18	28,63	0,84	10,20	23,50
Normes de préservation de la vie aquatique en eau salée USEPA (2016)		5.6	7,9	3,1	81	8,2	50 Cr (VI)

Tableau VI-6: Concentrations moyennes des ETM au niveau des eaux superficielles du bassin versant de la lagune de Marchica durant l'année 2018.

ETM en µg/l		Pb_E	Cd_E	Cu_E	Zn_E	Ni_E	Cr_E
Saison humide	W1	22,04	0,25	25,01	65,65	17,15	3,79
	W2	1,55	0,33	4,93	48,81	16,01	3,28
	W3	1,35	0,46	6,09	46,44	32,02	3,42
	W4	1,67	0,32	11,72	41,34	25,94	4,53
	W5	1,33	0,28	9,07	73,45	20,49	4,02
Saison sèche	W1	9,96	0,11	2,82	148,60	6,51	2,40
	W2	1,89	0,03	5,76	14,20	4,34	1,42
	W3	0,92	0,03	6,16	8,36	8,71	0,89
	W4	1,11	0,04	5,78	11,12	7,69	0,77
	W5	11,03	0,20	12,74	91,95	8,21	3,08
Grille nationale de qualité des eaux de surface (2002)	W1	Moyenne	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente
	W2	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente
	W3	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Moyenne	Excellente
	W4	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente
	W5	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente	Excellente

III.4. Corrélations Eaux - Sédiments entre la lagune de Marchica et son bassin versant

Afin d'identifier les interactions entre les eaux et les sédiments entre la lagune de Marchica et son bassin versant, une analyse de corrélation de Spearman a été réalisée pour les concentrations en ETM au niveau des eaux et sédiments durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018 ; et une analyse automatique hiérarchique a été réalisée simultanément pour les stations humides et sèches au niveau de la lagune et son bassin versant.

Les résultats de l'analyse de corrélation de Spearman des concentrations en ETM au niveau des eaux et sédiments de la lagune et son bassin versant sont présentés dans le tableau VI-7. Les résultats de l'analyse automatique hiérarchique des stations d'échantillonnage sont présentés dans la figure VI-22.

Tableau VI-7 : Matrice des coefficients de corrélation de Spearman des concentrations en ETM dans les eaux et sédiments de la lagune de Marchica et son bassin versant durant l'année 2018.

	Cu_S	Zn_S	Pb_S	Cr_S	Co_S	Ba_S	Ni_E	Cu_E	Zn_E	Pb_E	Cd_E	Cr_E	Co_E
Cu_S	1.000												
Zn_S	,898**	1.000											
Pb_S	,372*	,404*	1.000										
Cr_S	,604**	,624**	0.068	1.000									
Co_S	0.081	-0.039	-,551**	0.165	1.000								
Ba_S	,685**	,616**	0.305	0.204	0.078	1.000							
Ni_E	-0.324	-0.209	,440**	-0.276	-,782**	-0.316	1.000						
Cu_E	-0.111	-0.126	-0.005	-0.015	0.020	-,354*	-0.044	1.000					
Zn_E	0.067	0.174	0.292	-0.070	-,386*	0.095	,505**	-,562**	1.000				
Pb_E	0.032	0.019	-0.028	0.002	0.192	0.071	-0.189	0.254	-0.033	1.000			
Cd_E	-0.059	0.044	,392*	-0.204	-,752**	0.030	,676**	-0.075	,381*	0.014	1.000		
Cr_E	-0.069	-0.195	-0.096	-0.160	0.134	-0.189	-0.167	,750**	-,640**	0.260	-0.076	1.000	
Co_E	-,367*	-0.262	,342*	-,371*	-,758**	-0.276	,796**	0.208	0.165	-0.006	,666**	0.082	1.000

** La corrélation est significative au niveau 0,01 et * La corrélation est significative au niveau 0,05.

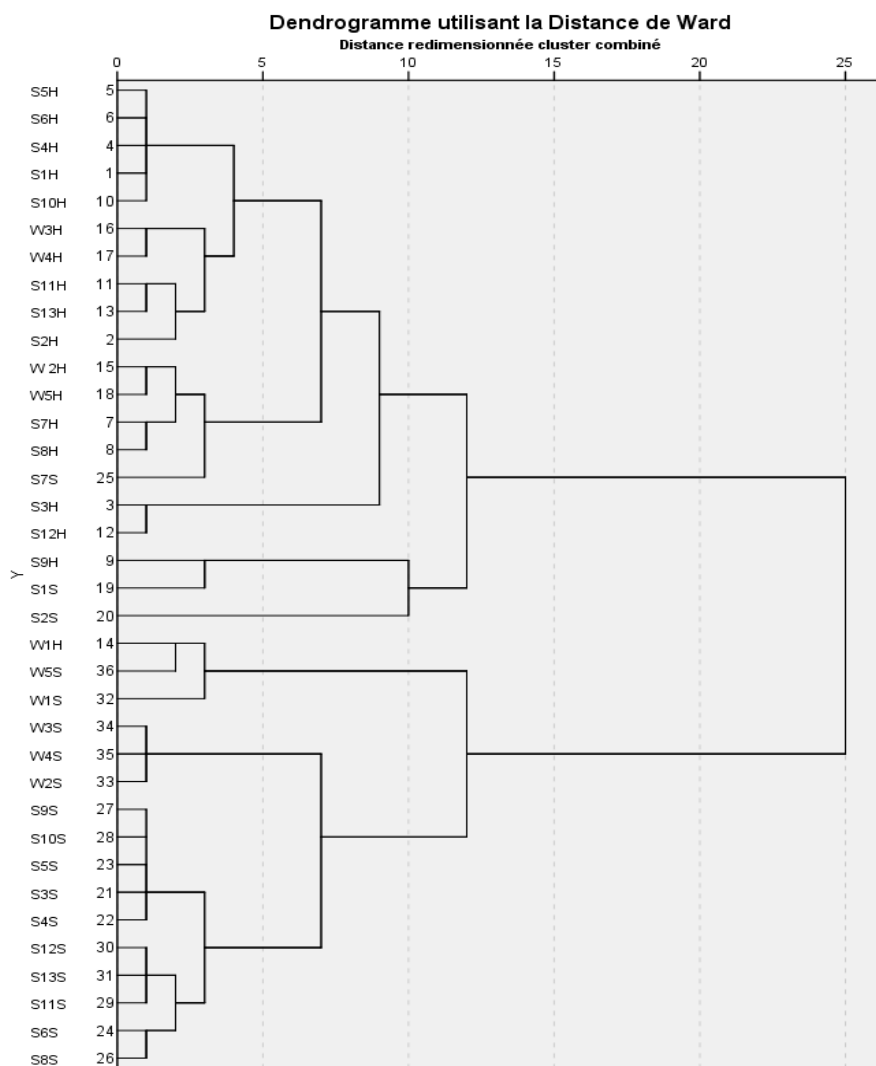


Figure VI-22: Dendrogramme issue de la classification automatique hiérarchique illustrant les stations de la saison humide (SH) et de la saison sèche (SS) de la lagune de Marchica et du bassin versant (WH et WS) durant l'année 2018 vis-à-vis des concentrations des ETM dans les eaux et sédiments.

L'analyse de corrélation de Spearman (Tableau VI-7) montre au niveau des eaux et des sédiments des corrélations positives très significatives (0,01) entre certaines paires d'ETM : (Cu_S - Zn_S); (Cu_S - Cr_S); (Cu_S - Ba_S); (Zn_S - Cr_S); (Zn_S - Ba_S); (Pb_S - Ni_E); (Ni_E - Zn_E); (Ni_E - Cd_E); (Ni_E - Co_E); (Cu_E - Cr_E) et (Cd_E - Co_E) ; et des corrélations positives significatives (0,05) entre d'autres paires d'ETM : (Cu_S - Pb_S); (Zn_S - Pb_S); (Pb_S - Cd_W); (Pb_S - Co_E) et (Zn_E - Cd_E).

La classification spatiale par analyse automatique hiérarchique des teneurs en ETM des eaux et sédiments superficiels dans les différentes stations de la saison humide et de la saison sèche au niveau de la lagune et son bassin versant (Figure VI-22) montre deux groupes de similarités :

- Groupe I: (S1H, S2H, S3H, S4H, S5H, S6H, S7H, S8H, S9H, S10H, S11H, S12H, S13H); (W2H, W3H, W4H, W5H); (S1S, S2S, S7S).
- Groupe II: (S3S, S4S, S5S, S6S, S8S, S9S, S10S, S11S, S12S, S13S); (W1S, W2S, W3S, W4S, W5S); (W1H).

Le groupe I représente les stations de la lagune et celles de son bassin versant durant la saison humide à l'exception de la station W1 qui représente l'intersection des deux oueds Ouchen et Akhandouk, et regroupe aussi 3 stations de la lagune durant la saison sèche (S1 représente la zone eutrophisée de Béni Ensar, S2 représente la zone Marina et S7 représente l'embouchure d'oued Cabaillo). Le groupe I montre des similarités entre toutes les stations de la lagune et la majorité des stations du bassin versant durant la saison humide. Le Groupe II représente les stations de la lagune et celles de son bassin versant durant la saison sèche à l'exception des trois stations S1, S2 et S7 qui ont été regroupées dans le groupe I, et regroupe aussi la station W1 de la saison humide. Le groupe II montre des similarités entre la majorité des stations de la lagune et toutes les stations du bassin versant durant la saison sèche.

L'analyse de variance ANOVA à trois facteurs et le test PERMANOVA ont été effectuées pour identifier les différences significatives dans les concentrations des ETM dans les compartiments Eau et Sédiment entre les différentes stations (Facteur 1), les différentes saisons (Facteur 2) et les systèmes (lagune ou bassin versant) (Facteur 3).

Le test ANOVA à trois facteurs montre des différences significatives ($p < 0.05$) du Pb, Cu et Cr entre les stations alors qu'aucune différence n'a été notée entre les saisons et les systèmes. Pour le Zn, aucune différence significative n'a été notée pour les 3 facteurs. Pour le Co, des différences significatives ont été notées entre les 3 facteurs. Le test PERMANOVA à 3 facteurs montre des différences significatives entre les différentes stations alors qu'aucune différence n'a été notée entre les saisons et les systèmes. Pairwise test montre que durant la saison humide et durant la saison sèche, des différences ont été notées entre les stations au niveau de chaque système.

IV. Discussion

IV.1. Compartiment Sédiment

La comparaison des facteurs d'enrichissement, d'indices de géoaccumulation et des facteurs de contamination entre la lagune de Marchica et son bassin versant (Figures VI-2, VI-3 et VI-4) ([Oujidi et al., 2021a,b](#)) montre ; à l'exception des pics enregistrés au niveau de certaines stations d'échantillonnage de la lagune ; une tendance de variation presque similaire de l'état de pollution.

La comparaison des indices de charge de pollution (PLI) entre la lagune de Marchica et son bassin versant incluant les pics de pollution (Figure VI-5) montre que :

- ❖ Durant la saison humide, un état de pollution variant entre minimal et très fort pour la lagune et un état de pollution entre minimal et modéré pour le bassin versant.
- ❖ Durant la saison sèche, un état de pollution variant entre minimal et modéré pour la lagune et un état de pollution entre minimal et fort pour le bassin versant.

Ainsi, on conclut que l'impact de la pollution du bassin versant sur la lagune par les éléments traces métalliques dans les sédiments superficiels varie fortement entre les deux saisons (humide et sèche).

IV.2. Compartiment Eau

Les concentrations moyennes de l'oxygène dissous dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica (Figure VI-9) montre une nette amélioration par rapport à l'état environnemental avant la restauration ([SEEE/INRH, 2009](#)) à l'exception de la zone recevant les rejets de la STEP du Grand Nador.

Les concentrations moyennes des éléments traces métalliques dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica durant l'année 2018 ont été comparées aux normes relatives à la protection de la vie aquatique dans les eaux salées ([USEPA, 2016](#)). Les résultats ont montré (Tableau VI-5) que les concentrations moyennes au niveau de la lagune de Marchica du Pb, Cd, Cr et Zn ont été inférieures aux normes [USEPA \(2016\)](#), et ceux du Cu et Ni ont été supérieurs à ces normes. Ces résultats sont similaires à ceux de l'année 2017 ([Oujidi et al., 2020](#)) comme illustrés dans les figures VI-10 à VI-15.

Les concentrations moyennes des éléments traces métalliques dans les eaux superficielles du bassin versant de la lagune de Marchica durant l'année 2018 ont été comparées avec la grille de qualité des eaux de surface ([Ministère de l'Équipement et Ministère chargé de l'Aménagement du territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement, 2002](#)). Les résultats ont dénoté (Tableau VI-6) une qualité excellente à l'exception de ceux des eaux de l'intersection des deux oueds Ouchen et Akhandouk pour le Pb et d'oued Selouane pour le Ni qui ont été classés comme qualité Moyenne. Ces résultats sont aussi presque similaires à ceux de l'année 2017 ([Oujidi et al., 2020](#)) comme illustrés dans les figures VI-10 à VI-15.

Pour les rejets de la STEP du Grand Nador, les concentrations ont été comparées avec les valeurs limites générales de rejet dans les eaux superficielles ([Ministère de l'Intérieur et al., 2013](#)). Les résultats montrent que les concentrations des ETM sont inférieures à ces valeurs limites générales de rejets. Ces résultats concordent bien avec ceux de l'année 2017 ([Oujidi et al., 2020](#)).

IV.3. Corrélations Eaux - Sédiments

Les sédiments superficiels constituent des réservoirs en éléments traces métalliques qui peuvent être libérés dans les eaux en provoquant des effets néfastes sur la santé des écosystèmes en raison de leur toxicité et de leur persistance ([Salati and Moore, 2010](#) ; [McCreedy et al., 2006](#) ; [Howarth and Nombela, 2003](#)). Les interfaces eaux-sédiments constituent des zones dynamiques qui régulent les flux de contaminants comme les éléments traces métalliques entre la colonne d'eau et les sédiments dans les écosystèmes marins et les eaux douce ([Mermillod-Blondin, 2011](#) ; [Covich et al., 2004](#) ; [Palmer et al., 1997](#)). Les compositions géochimiques des sédiments ont été identifiées comme des facteurs cruciaux affectant le mécanisme d'adsorption/désorption permettant la répartition des éléments traces métalliques ([Shen et al., 2020](#) ; [Huang et al., 2018](#) ; [Wang and Li., 2011](#)). L'évaluation des bassins versants constitue une étape très importante pour comprendre leur processus et identifier les besoins de restauration comme rapporté par [Bohn et al., \(2002\)](#) et [Roni et al. \(2002\)](#). La caractérisation des apports des sédiments terrestres dans les mers est primordiale pour les gestionnaires de bassins versants en raison des effets qui peuvent être nocifs des sédiments sur les écosystèmes marins côtiers comme rapporté par [Korman et al. \(2020\)](#).

Généralement, les rivières sont des sources importantes pour le transport de nombreux polluants terrestres vers la mer tels que les métaux lourds ([Xue et al., 2021](#) ; [Radakovitch et al., 2008](#) ; [Meybeck, 2004](#)). Les bassins versants drainent les sédiments vers les lagunes côtières à travers les rivières pendant les périodes de pluie dont la plupart se déposent à l'embouchure des affluents comme rapporté par [Kennish \(2016\)](#). Le dépôt des éléments traces métalliques dans les sédiments se produit par des interactions entre les sédiments et l'eau ([Korfali, 2001](#) ; [Piron et al., 1990](#)), principalement sous forme de réactions d'adsorption et de désorption, et sont fortement influencées par les caractéristiques physico-chimiques de l'eau et la minéralogie des sédiments ([Miranda et al., 2021](#) ; [Tian et al, 2020](#) ; [Ashayeri and Behnam, 2019](#) ; [Keshavarzifard et al., 2019](#) ; [Wijesiri et al., 2019](#) ; [Duodu et al., 2016](#) ; [Bradl, 2004](#)).

Dans cette étude, l'analyse de corrélation de Spearman entre les éléments traces métalliques dans les eaux et dans les sédiments montre des corrélations positives très significatives (0,01) et significatives (0,05) entre certaines paires d'ETM qui peuvent s'expliquer par l'existence de source de pollution similaire et aussi par les interactions entre les éléments traces métalliques au niveau des eaux et sédiments entre la lagune et son bassin versant ([Kokali et al., 2016](#) ; [Karbassi et al., 2008](#)).

L'analyse automatique hiérarchique des teneurs en ETM des eaux et des sédiments superficiels dans les différentes stations (saison humide et saison sèche) au niveau de la lagune et son bassin versant montre une classification spatiale en deux groupes de similarité confirmant l'impact du bassin versant saisonnier concernant les apports en éléments trace métalliques sur la lagune de Marchica.

Au niveau de la lagune de Marchica, les zones fortement polluées durant l'année 2018 (Oujidi et al., 2021 a) ont été caractérisées par des pics de pollution en plomb et en zinc au niveau des sédiments superficiels, montrant ainsi un état de pollution extrême ($FE > 40$). Quatre zones Hot Spot de pollution ont été identifiées :

- ❖ Deux zones eutrophisées : au niveau d'Arekmane durant la saison humide caractérisée par une pollution en zinc et au niveau de Béni Ensar durant la saison sèche caractérisée par une pollution en plomb. La durée de renouvellement des eaux dans ces deux zones étant plus lente par rapport aux autres zones de la lagune soit 20 à 35 jours (Maicu et al., 2021 ; Maicu et al., 2018 ; ANDA/INRH, 2018), permettant ainsi l'accumulation des polluants au niveau des sédiments ;
- ❖ Zone proche de la nouvelle passe située à côté de la digue sur la rive du cordon dunaire côté Béni Ensar durant la saison humide caractérisée par une pollution en zinc. Cette zone est caractérisée par sa proximité des sites de pêches et dont le temps de renouvellement des eaux est lent par rapport aux autres zones (Maicu et al., 2021 ; Maicu et al., 2018 ; ANDA/INRH, 2018) ;
- ❖ Zone d'embouchure d'oued Selouane durant la saison humide caractérisée par une pollution en plomb. Oued Selouane est caractérisé par un écoulement permanent acheminant les eaux usées traitées de la STEP d'AlAroui et les eaux de certaines activités industrielles des communes de Selouane et AlAroui.

Un état de pollution très forte ($20 < FE < 40$) en plomb durant les deux saisons a été enregistré au niveau de la zone à côté de l'ancienne passe sur la rive du cordon dunaire côté Arekmane. Cette zone est caractérisée par sa proximité des sites de pêches constituant des points de débarquements des pêcheurs pouvant impacter les eaux et sédiments de la zone par les rejets en Pb et en Zn provenant des carburants des barques et des huiles des moteurs (Najih et al., 2015 ; De Lacerda, 1994).

Un état de pollution modérée ($2 < FE < 5$) en cuivre durant les deux saisons a été enregistré au niveau de la station Marina, cette zone constituait un milieu de lavage des minerais de fer avant l'arrêt de cette activité et caractérisée actuellement par la présence d'un port de plaisance (www.agencemarchica.com).

Pour le reste des zones de la lagune, à l'exception du plomb ($2 < FE < 20$), un état de pollution entre modérée et importante en zinc et un état de pollution minimale en cuivre ont été enregistrés.

Pour le cobalt, chrome et baryum, un état de pollution minimale a été enregistré au niveau de toutes les zones de la lagune.

Au niveau du bassin versant, les zones fortement polluées durant l'année 2018 ont été caractérisées par des pics de pollution au niveau des sédiments superficiels montrant un état de pollution importante en plomb ($5 < EF < 20$) identifié au niveau de tous les oueds et en zinc au niveau de l'intersection d'oued Ouchen et oued Akhandouk durant la saison sèche.

Un état de pollution modérée en zinc ($2 < EF < 5$) a été enregistré au niveau de la station d'oued Cabaillo durant les deux saisons et en cuivre au niveau de l'intersection d'oued Ouchen et oued Akhandouk et au niveau d'oued Cabaillo.

Pour le cobalt, chrome et baryum, un état de pollution minimale a été enregistré au niveau de tous les oueds étudiés.

V. Conclusion

La comparaison des indices écotoxicologiques saisonniers (FE, Igeo, FC et PLI) entre la lagune de Marchica et son bassin versant montre une tendance de variation presque similaire entre ces deux écosystèmes. La corrélation de Spearman réalisée simultanément pour les concentrations en ETM au niveau des eaux et sédiments durant la saison humide et la saison sèche, et l'analyse automatique hiérarchique entre les stations d'échantillonnage de la lagune et du bassin versant durant la saison humide et la saison sèche montrent un impact saisonnier du bassin versant concernant les apports en éléments traces métalliques vers la lagune de Marchica. Ainsi, afin de protéger la zone humide, il est nécessaire de procéder régulièrement à l'évaluation de l'état environnemental de la lagune de Marchica et de son bassin versant à travers un réseau d'échantillonnage incluant les zones exposées à la pollution pour vérifier l'amélioration de son état environnemental et identifier les besoins de restauration nécessaires au niveau des deux composantes de l'écosystème lagune de Marchica et son bassin versant.

**Chapitre VII : Evaluation environnementale de la qualité de l'air
ambiant au niveau de la zone d'influence de la lagune de Marchica**

Résumé

Cette étude consiste en l'évaluation préliminaire de la qualité de l'air au niveau de la zone d'influence de la lagune de Marchica au niveau de la ville de Nador à travers la caractérisation des polluants gazeux : Dioxyde de soufre, Dioxyde d'azote, Monoxyde de carbone et Ozone ; des particules (PM_{10} et $PM_{2,5}$) et leur composition chimique ; et du Carbone suie (BC) dans les particules fines. Trois campagnes d'échantillonnage urbain ont été menées pendant la saison humide en octobre 2016 et avril 2017, et pendant la saison sèche en juillet 2018. Seize éléments ont été analysés à l'aide de deux techniques : La fluorescence X à réflexion totale (TXRF) et la spectrométrie d'émission atomique à plasma micro-ondes (MP-AES) ; et les concentrations en black carbone ont été mesurées à l'aide d'un instrument d'absorption multi-longueur d'onde pour le carbone suie (MABI). Les résultats ont montré que les concentrations de polluants gazeux étaient inférieures aux valeurs limites nationales de protection de la santé. Pour les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} , les valeurs moyennes des facteurs d'enrichissement (EF) étaient inférieures à 10 pour Ti, Mn, Sr, K, Al, Na, Ba et V, indiquant une source crustale ; les moyennes des autres éléments Ni, Cr, P, Ca, Cu et Pb étaient comprises entre 10 et 100, indiquant que ces éléments étaient modérément enrichis et, enfin, les facteurs d'enrichissement pour Zn étaient compris entre 100 et 1000, indiquant qu'une proportion significative de cet élément a une source non crustale et se réfère à un élément enrichi au niveau de la ville de Nador. Trois éléments traces Zn, Cu et Pb ont enregistré les valeurs les plus élevées des facteurs d'enrichissement indiquant qu'il s'agit des 3 principaux éléments toxiques anthropiques dans l'air de la ville de Nador. Une forte corrélation positive entre les $PM_{2,5}$ et l'humidité relative a été identifiée expliquant l'effet du climat sur la qualité de l'air. La variation du carbone suie dans les particules fines a indiqué que la contribution de la combustion de la biomasse était significative par rapport aux combustibles fossiles. L'évaluation des risques pour la santé humaine a révélé que la valeur la plus élevée de l'Excess Cancer Risk (ECR) pour les valeurs moyennes des PM_{10} et $PM_{2,5}$ était attribuée au chrome. L'établissement d'un plan de gestion de la qualité de l'air pour la ville de Nador est recommandé, y compris l'établissement d'une station de surveillance avec l'évaluation et le contrôle des activités qui génèrent la pollution de l'air.

Mots clés

Bassin méditerranéen ; Nadorcity ; Qualité de l'air ; Polluants gazeux ; PM_{10} ; $PM_{2,5}$; Carbone suie ; Rapport élémentaire.

I. Introduction

La pollution atmosphérique et son impact sur l'environnement en particulier la santé humaine constituent une préoccupation majeure des pouvoirs publics. Les polluants atmosphériques se distinguent en polluants primaires et polluants secondaires (Vaslin-Reimann, 2019 ; WHO, 2006) (Figure VII-1). Les polluants primaires sont constitués principalement par les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), les composés organiques volatils (COV), les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et les particules en suspension ; et sont directement rejetés dans l'air par une source identifiée liée essentiellement aux activités humaines comme le trafic routier, l'industrie, l'agriculture, le chauffage, etc. Les polluants secondaires sont formés par des réactions chimiques entre les différents polluants primaires dans l'air comme l'ozone (O_3) qui se forme lorsque les oxydes d'azote et les hydrocarbures réagissent sous l'influence des rayonnements ultraviolets du soleil ; et comme les pluies acides qui se forment de l'acidification des eaux de pluie après avoir capté des polluants de SO_2 et NO_x . Les polluants atmosphériques ont des effets néfastes sur le climat et sur l'environnement (Bodor et al., 2020 ; Cholakian et al., 2019 ; Jeong et al., 2011), et ils sont considérés comme causes de divers effets sur la santé, notamment le cancer (Bennett et al., 2019 ; Boffetta and Nyberg, 2003). Les PM_{10} et les $\text{PM}_{2,5}$ sont facilement piégées par les alvéoles pulmonaires et peuvent provoquer des lésions pulmonaires conduisant à un décès prématuré (Das et al., 2015 ; Pérez et al., 2008 ; Dockery and Pope, 1994 ; Dockery et al., 1993). L'exposition aux polluants atmosphériques peut accélérer la mortalité et la morbidité par des maladies respiratoires et cardiovasculaires chez les populations vivant dans des régions polluées (Pattenden et al., 2010 ; Pope III et Dockery, 2006 ; Gryparis et al., 2004). Le carbone suie est l'un des composants des particules fines qui peut agir comme un transporteur universel d'une grande variété de produits chimiques toxiques vers les poumons, les principales cellules de défense du corps et éventuellement la circulation sanguine systémique (Janssen et al., 2012).

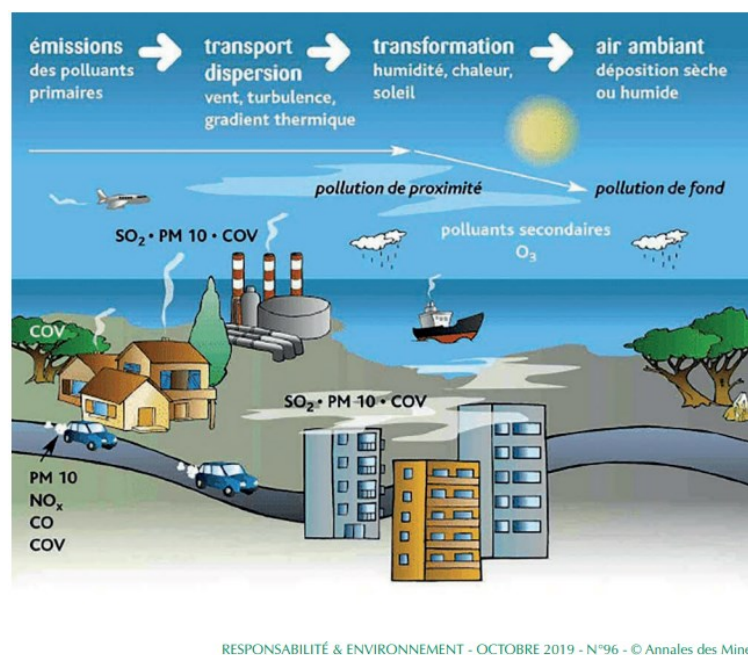


Figure VII-1: Schéma montrant les sources de polluants atmosphériques (in Vaslin-Reimann, 2019).

L'urbanisation rapide et le développement socio-économique sans la prise en considération de la protection de l'environnement aggravent les problèmes de pollution atmosphérique (Yang et al., 2020). Par conséquent, la caractérisation des particules en suspension et leur composition chimique sont essentiels pour quantifier l'impact des aérosols sur le climat et la santé humaine (Singh et al., 2020).

Au Maroc, les premières évaluations de la qualité de l'air dans les villes datent de l'année 1999. Les études réalisées à Casablanca et Mohammedia ont montré des relations significatives entre les niveaux de pollution atmosphérique et les atteintes à la santé publique (Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement et Ministère de la Santé, 1999 et 2002). Par ailleurs, dans le cadre d'une étude globale sur le coût de la dégradation de l'environnement au Maroc, réalisée en 2014, le coût de la dégradation de l'air a été estimé à près de 9,7 milliards de dirhams, soit 1,05 % du PIB. Suite à ces constats, les autorités marocaines ont élaboré et mis en œuvre le Programme National de l'Air (PNAir) en 2018, afin de renforcer le réseau national de surveillance de la qualité de l'air constitué actuellement par une trentaine de stations, de réduire les émissions atmosphériques générées par les secteurs du transport et de l'industrie, de renforcer le cadre réglementaire en matière de pollution atmosphérique, et d'améliorer la communication et la sensibilisation (MEMDD/ PNAir, 2018). Ce programme concerne dans un premier temps les grandes villes industrielles telles que Casablanca, Mohammedia, Rabat, Marrakech, etc. Plusieurs actions ont été prises par les autorités marocaines pour améliorer la qualité de l'air tel que la réduction de la concentration en soufre dans l'essence et le gasoil pour réduire les concentrations en SO₂ dans l'air ambiant ; et le contrôle des rejets gazeux des véhicules et l'incitation au renouvellement des véhicules les plus polluants (MEMDD/ PNAir, 2018). Des travaux de recherche ont été réalisés pour évaluer la qualité de l'air dans d'autres villes marocaines comme Salé, Tetouan, Kénitra et Meknes (Otmani et al., 2020 ; Benchrif et al., 2018 ; Tahri et al., 2017 ; Tahri et al., 2012 ; Bounakhla et al., 2009). Concernant les villes côtières méditerranéennes du Maroc, seule la ville de Tétouan a fait l'objet d'une étude récente sur l'air (Benchrif et al., 2018) malgré le fait que le bassin méditerranéen soit sensible à la fois au changement climatique et à la pollution atmosphérique, principalement en été (Doche et al., 2014). Concernant la ville de Nador, qui a subi des changements au cours de la dernière décennie pour se transformer d'une ville de contrebande à une ville touristique à travers le projet balnéaire de l'Agence Marchica- Med, la qualité de l'air requiert désormais un suivi régulier. Les objectifs de cette étude préliminaire, mais néanmoins première d'évaluation de la qualité de l'air au niveau de la ville de Nador sont axés sur :

- ❖ La caractérisation des polluants gazeux (SO₂, NO₂, CO et O₃) ;
- ❖ La caractérisation des deux principales fractions de particules en suspension (PM₁₀, PM_{2,5}) et leurs compositions élémentaires ;
- ❖ L'évaluation du risque écologique des éléments traces à travers les facteurs d'enrichissement dans les PM₁₀ et PM_{2,5} ;
- ❖ La caractérisation du carbone suie dans les particules fines ;
- ❖ La contribution à l'établissement d'un plan de gestion de la qualité de l'air au niveau de la ville de Nador.

II. Méthodologie

Les polluants gazeux SO_2 , NO_2 , CO et O_3 ont été mesurés respectivement par des analyseurs APSA-370 (HORIBA); Horiba, APNA-370; APMA-370 (HORIBA) et O341M (Environnement SA) durant deux campagnes (10 au 13 octobre 2016; du 05 au 08 avril 2017); et les particules PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ ont été mesurés pendant une période de deux semaines pendant la saison sèche (17 au 30 juillet 2018) par filtration à l'aide d'un dispositif composé de deux lignes qui fonctionnent en parallèle et simultanément pour collecter séparément les fractions grosses et fines des aérosols (Têtes de prélèvements URG de type Sharp Cut Cyclone avec un débit de $1\text{m}^3/\text{hr}$ (approx. 16.7 l/min)). Les appareils de mesure des polluants gazeux et des particules en suspension ont été placés sur la terrasse de la direction provinciale de l'équipement, du transport, de la logistique et de l'eau (DPETLE) (Figure VII-2), à une hauteur de 8 m au-dessus du sol et à environ 500 m de la lagune de Marchica, au centre de la ville de Nador. Les analyses chimiques des PM_{10} et $\text{PM}_{2,5}$ ont été réalisées au niveau du CNESTEN par deux méthodes: la spectrométrie d'émission atomique à plasma micro-ondes (MP-AES) pour mesurer les concentrations Al et Na; et la fluorescence X à réflexion totale (TXRF) pour mesurer les concentrations des éléments suivants P, K, Ca, V, Cr, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Zn, Sr, Pb et Ba. Le carbone suie (BC) a été mesuré dans la fraction $\text{PM}_{2,5}$ à l'aide d'un instrument d'absorption à plusieurs longueurs d'onde (MABI). Les détails des analyses réalisées sont décrits au niveau du chapitre II et les résultats sont décrits en annexe 3.

Le traitement statistique des résultats a été réalisé par l'analyse descriptive (min, max, moyenne et écart type) appliquée pour les concentrations des polluants gazeux, des particules en suspension et leurs compositions chimiques, le carbone suie et le facteur d'enrichissement; et par l'analyse des coefficients de corrélations Spearman réalisée par le programme R afin d'identifier la relation entre les concentrations des particules en suspension et les conditions climatiques dans l'air au niveau de la ville de Nador.

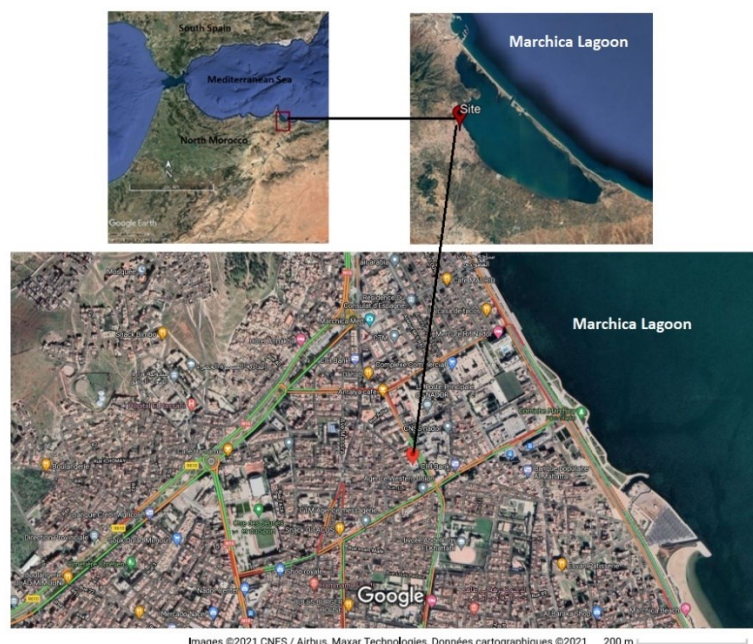


Figure VII-2: Situation du site d'échantillonnage (DPETLE) au niveau de la ville de Nador.

III. Résultats

III.1. Données météorologiques

Les données météorologiques pendant les périodes d'échantillonnage (température de l'air, précipitations, humidité relative et vitesse du vent) ont été obtenues de la station météorologique la plus proche de Melilla ((603380, GEML) ; (35.28, -2.95)), située à environ 15 km du site d'étude (<http://www.tutiempo.net>). Les périodes d'échantillonnage ont été caractérisées par l'absence des précipitations. La température a varié de 23,10°C à 28,20°C avec une valeur moyenne de 25,85°C ; la vitesse du vent a varié de 7 m/s à 12,4 m/s avec une valeur moyenne de 9,19 m/s et l'humidité relative a varié de 28 % à 63 % avec une valeur moyenne de 42,67 %.

III.2. Polluants gazeux

L'analyse descriptive (min, max, moyenne et écart-type) des polluants gazeux dans l'air de la ville de Nador durant les périodes d'échantillonnage est présentée au niveau du tableau VII-1.

Tableau VII-1: Analyse descriptive des polluants gazeux dans l'air de la ville de Nador durant les deux premières campagnes.

		SO ₂ (µg/m ³)	NO ₂ (µg/m ³)	CO (mg/m ³)	O ₃ (µg/m ³)
Octobre 2016	Minimum	0	8,1	0,0125	2,14
	Maximum	1,43	66,8	1,2	32,1
	Moyenne	0,08	29,7	0,35	14,73
	Ecart type	0,28	12,77	1,2	4,73
Avril 2017	Minimum	-	0	0,1	8,56
	Maximum	-	52,62	0,52	66,34
	Moyenne	-	20,41	0,3	44,25
	Ecart type	-	10,49	0,06	10,92
	Normes nationales	125 (24h)	200 (1h)	10 (8h)	110 (8h)

Les analyses descriptives des polluants gazeux au niveau de la ville de Nador sont présentées dans le tableau VII-1. Toutes les concentrations moyennes journalières de dioxyde de soufre sont très faibles avec un maximum de 1,43 µg/m³. Les concentrations de dioxyde d'azote varient entre 0,004 µg/m³ et 0,033 µg/m³ avec une moyenne de 0,015 µg/m³ lors de la première campagne et entre 0 et 0,026 µg/m³ avec une moyenne de 0,010 µg/m³ lors de la deuxième campagne (Figure VII-3). Les concentrations d'ozone varient entre 1 µg/m³ et 15 µg/m³ avec une moyenne de 6,9 µg/m³ lors de la première campagne et entre 4 µg/m³ et 31 µg/m³ avec une moyenne de 20,67 µg/m³ lors de la seconde campagne (Figure VII-3). Les concentrations en monoxyde de carbone variaient entre 0,012 mg/m³ et 1,2 mg/m³ lors de la première campagne et entre 0,1 mg/m³ et 0,52 mg/m³ lors de la deuxième campagne (Figure VII-4).

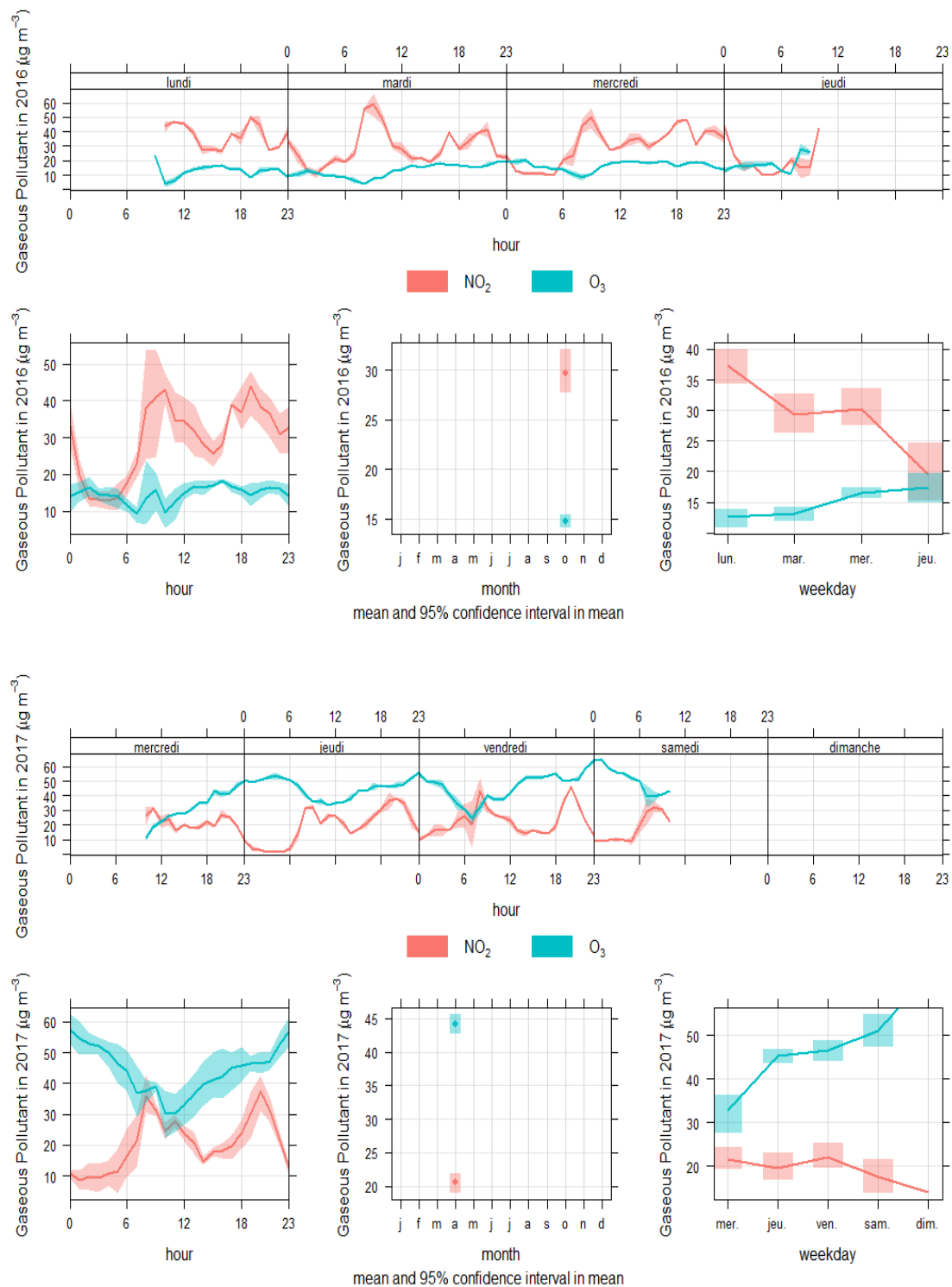


Figure VII-3: Variation du dioxyde d'azote et d'ozone au niveau de la ville de Nador durant les campagnes de 2016 et 2017.

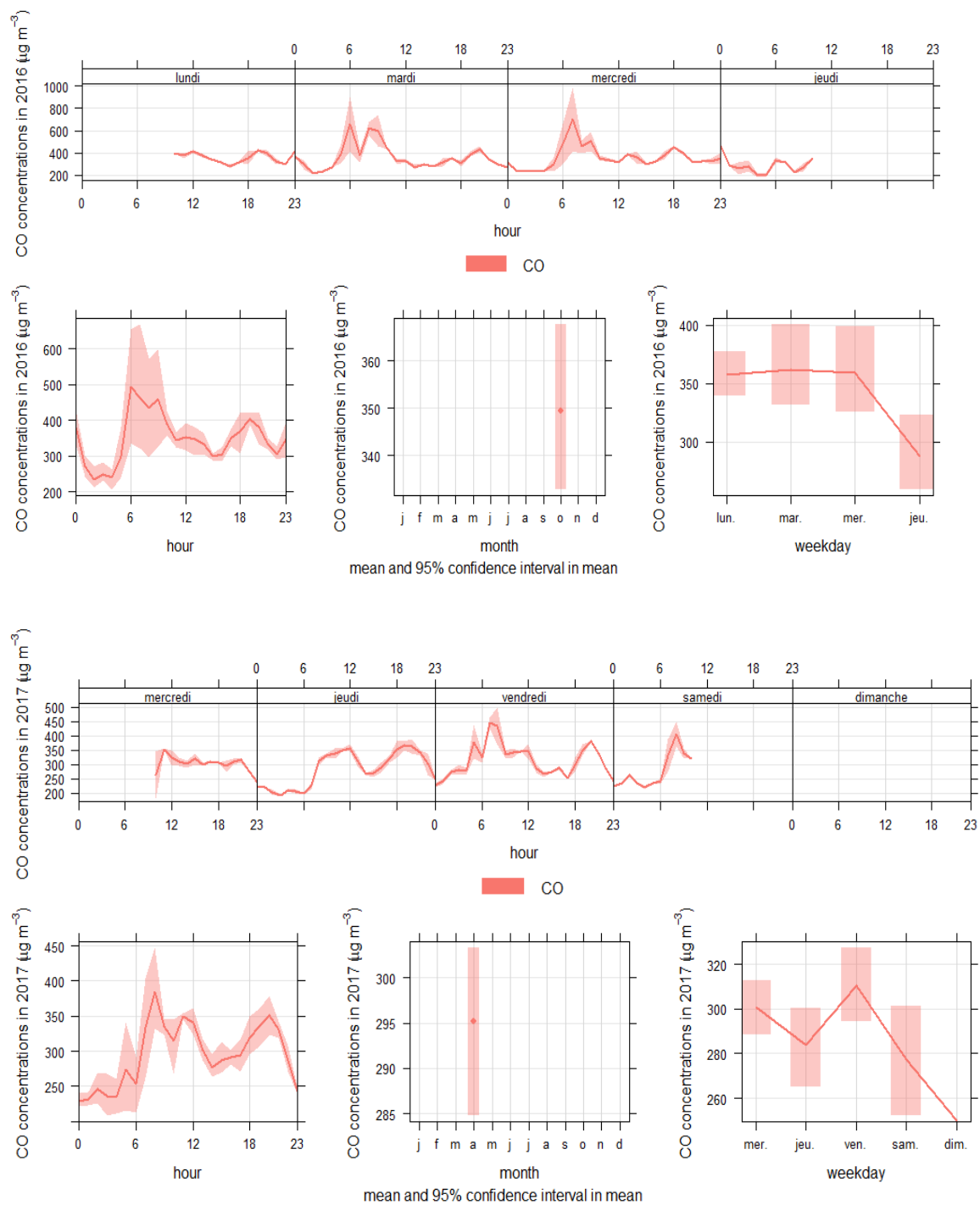


Figure VII-4: Variation du monoxyde de carbone au niveau de la ville de Nador durant les campagnes de 2016 et 2017.

III.3. Variation des concentrations des PM₁₀ et PM_{2,5}

L'analyse descriptive (min, max, moyenne et écart-type) des particules en suspension dans l'air de la ville de Nador durant la période d'échantillonnage est présentée au niveau du tableau VII-2.

Tableau VII-2: Analyse descriptive des particules en suspension (PM₁₀, PM_{2,5}) dans l'air de la ville de Nador durant la troisième campagne.

Nombre des échantillons (28) (14 pour PM ₁₀ et 14 pour PM _{2,5})		PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM _{2,5} / PM ₁₀
Juillet 2018	Minimum	24,36	13,53	0,35
	Maximum	57,28	32,95	0,83
	Moyenne	41,44	22,18	0,55
	Ecart type	8,86	5,88	0,16
	Normes nationales (24h)	50	-	-

Les concentrations des PM₁₀ pendant la saison sèche variaient de 24,36 µg/m³ à 57,28 µg/m³ avec une valeur moyenne de 41,44 µg/m³ (Figure VII-5). Les concentrations des PM_{2,5} pendant la saison sèche variaient de 13,53 µg/m³ à 32,95 µg/m³ avec une valeur moyenne de 22,17 µg/m³ (Figure VII-6). Le rapport PM_{2,5}/PM₁₀ variait de 0,35 à 0,83 avec une valeur moyenne de 0,55 comme le montre la Figure VII-7. Le rapport PM_{2,5}/PM₁₀ le plus élevé variant entre 0,5 et 0,8 indique que les particules fines PM_{2,5} constituent la composante prédominante des PM.

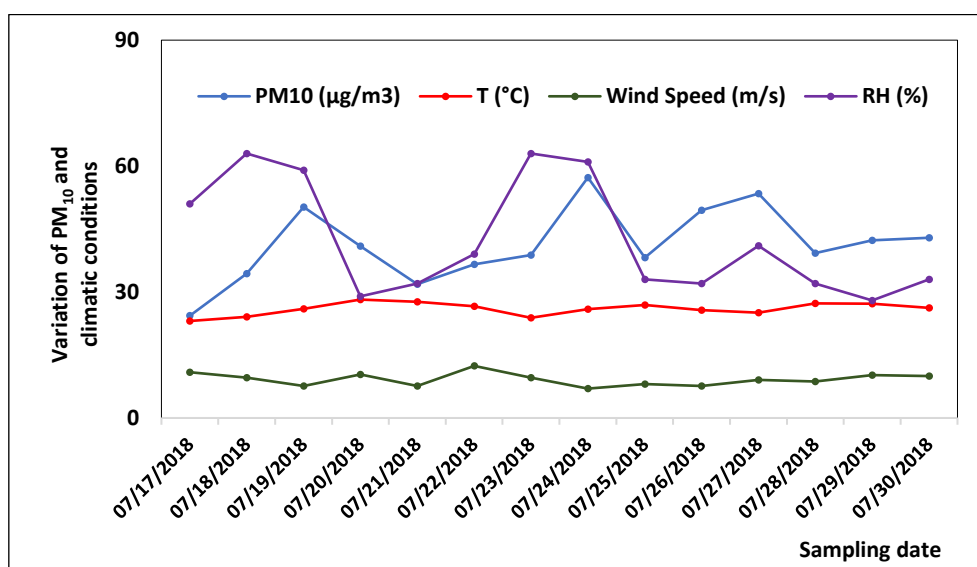


Figure VII-5: Variation des particules PM₁₀ et les conditions climatiques (Température, Vitesse du vent et Humidité Relative) au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.

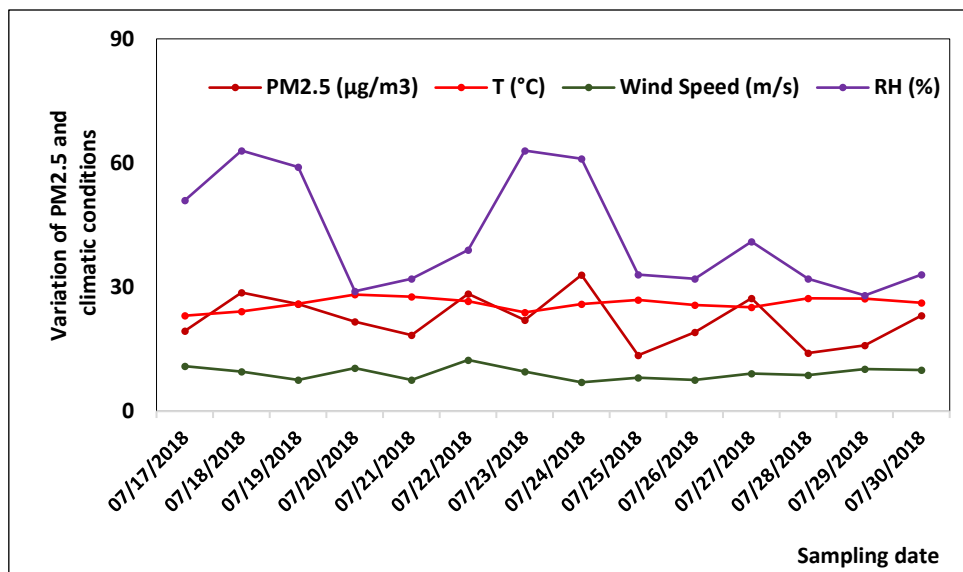


Figure VII-6: Variation des particules PM_{2,5} et les conditions climatiques (Température, Vitesse du vent et Humidité Relative) au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.

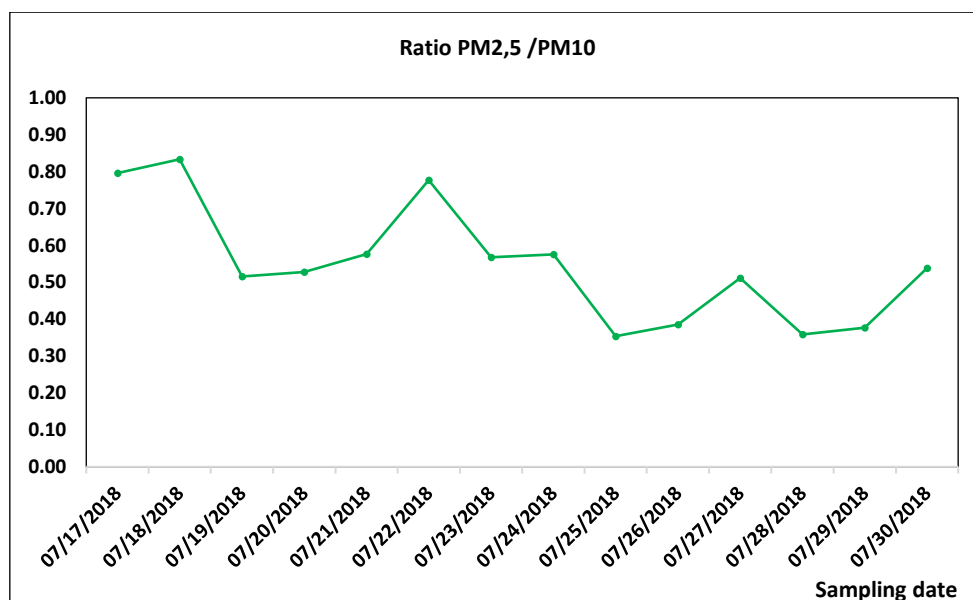


Figure VII-7: Variation du rapport PM_{2,5}/PM₁₀ au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.

III.4. Composition élémentaire des particules

Les compositions élémentaires des particules en suspension sont indiquées dans le tableau VII-3. Seize éléments ont été identifiés dans les échantillons des PM_{2,5} and PM₁₀ incluant Na, K, Ca, P, Al, Fe, Mn, Ti, Ba, V, Sr, Ni, Cu, Zn, Cr, and Pb.

Pour les PM₁₀, les moyennes des concentrations élémentaires (ng/m³) pendant la période d'échantillonnage se trouvent dans l'ordre décroissant suivant : Ca (8152,86) > Na (1034,15) > Al (869,91) > Fe (550,82) > K (254,84) > P (186,60) > Zn (99,61) > Ba (46,33) > Ti (24,46) > Cr (18,08) > Cu (11,29) > Mn (9,56) > V (9,22) > Pb (7,92) > Ni (7,71) > Sr (3,74).

Pour les PM_{2,5}, les moyennes des concentrations élémentaires (ng/m³) pendant la période d'échantillonnage se trouvent dans l'ordre décroissant suivant : Ca (6594,94) > Na (985,63) > Al (859,82) > Fe (434,50) > K (272,20) > P (208,56) > Zn (121,21) > Ba (27,44) > Cu (47,14) > Cr (19,09) > Ti (14,97) > Pb (10,09) > V (9,51) > Ni (8,49) > Mn (6,04) > Sr (2,88).

La comparaison des compositions élémentaires entre les PM_{2,5} et les PM₁₀ (Figure VII-8) montre que les concentrations de Pb, Cu, Zn, Cr, Ni, P, K et V étaient plus élevées dans la fraction de particules fines PM_{2,5} alors que les éléments majeurs Na, Al, Ca, Ti, Mn, Fe, Sr et Ba étaient plus élevés dans la fraction PM₁₀.

Tableau VII-3: Les compositions élémentaires des concentrations massiques des PM₁₀ et PM_{2,5} au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.

Eléments	Concentration dans PM ₁₀ (ng/m ³)			Concentration dans PM _{2,5} (ng/m ³)		
	Moyenne	Min - Max	Ecart type	Moyenne	Min - Max	Ecart type
Na	1383,88	1034,15 - 1686,12	226,91	985,63	714,64 - 1463,36	219,06
K	254,84	156,94 - 370,77	50,86	272,20	101,70 - 1171,52	264,07
Ca	8152,86	2480,52 - 11284,61	3576,69	6594,94	1164,49 - 11012,41	3472,55
P	186,60	85,77 - 359,60	69,36	208,56	71,00 - 642,58	177,61
Al	1188,04	869,91 - 1466,12	204,90	859,82	726,19 - 1168,48	115,44
Fe	550,82	197,62 - 1949,94	424,10	434,50	184,73 - 1849,86	492,85
Mn	9,56	4,25 - 21,66	4,24	6,04	2,03 - 18,60	3,94
Ti	24,46	9,57 - 80,58	17,14	14,97	7,33 - 61,99	13,93
V	9,22	4,00 - 17,89	4,65	9,51	3,94 - 18,33	4,90
Sr	3,74	1,79 - 6,38	1,79	2,88	1,83 - 8,26	1,81
Ni	7,71	3,99 - 10,83	2,05	8,49	4,04 - 16,53	3,15
Cu	11,29	5,96 - 23,83	4,61	47,14	3,67 - 214,18	72,42
Zn	99,61	65,96 - 159,09	28,44	121,21	38,55 - 268,60	76,36
Cr	18,08	12,40 - 23,83	2,70	19,09	14,80 - 47,52	8,34
Pb	7,92	3,83 - 13,70	3,08	10,09	4,04 - 33,06	7,91
Ba	46,33	16,53 - 104,12	29,02	27,44	5,76 - 70,25	20,49

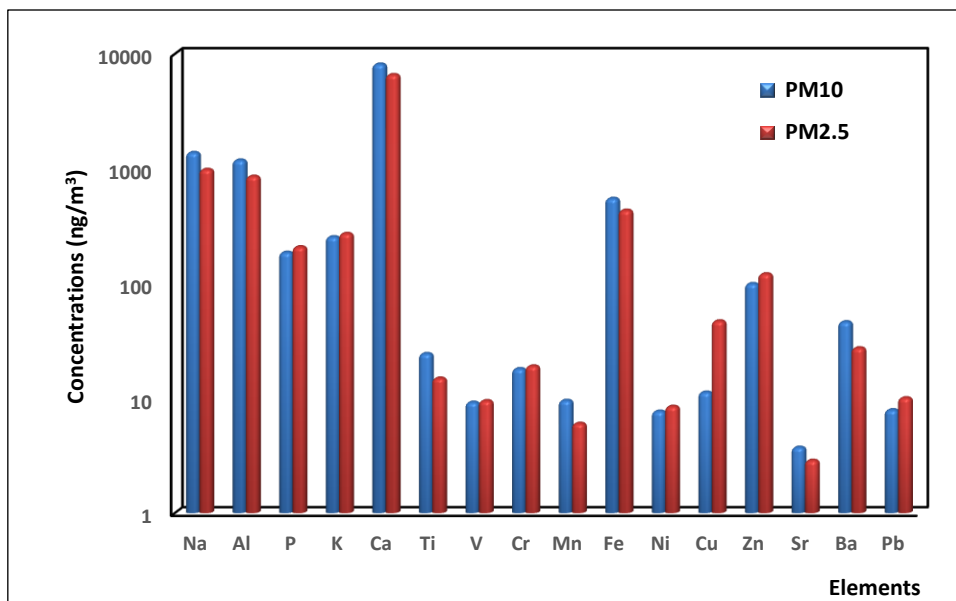


Figure VII-8: Concentrations moyennes des éléments dans les particules PM₁₀ et PM_{2,5} au niveau de la ville de Nador durant la période sèche.

III.5. Facteur d'enrichissement des éléments chimiques

Les valeurs moyennes des facteurs d'enrichissement (FE) au niveau des PM_{2,5} et des PM₁₀ sont inférieures à 10 pour Ti, Mn, Sr, K, Al, Na, Ba and V ; pour les autres éléments, la moyenne se situait entre 10 et 100 pour Ni, Cr, P, Ca, Cu et Pb, et enfin les facteurs d'enrichissement pour le Zn étaient supérieurs à 100 (Figure VII-9).

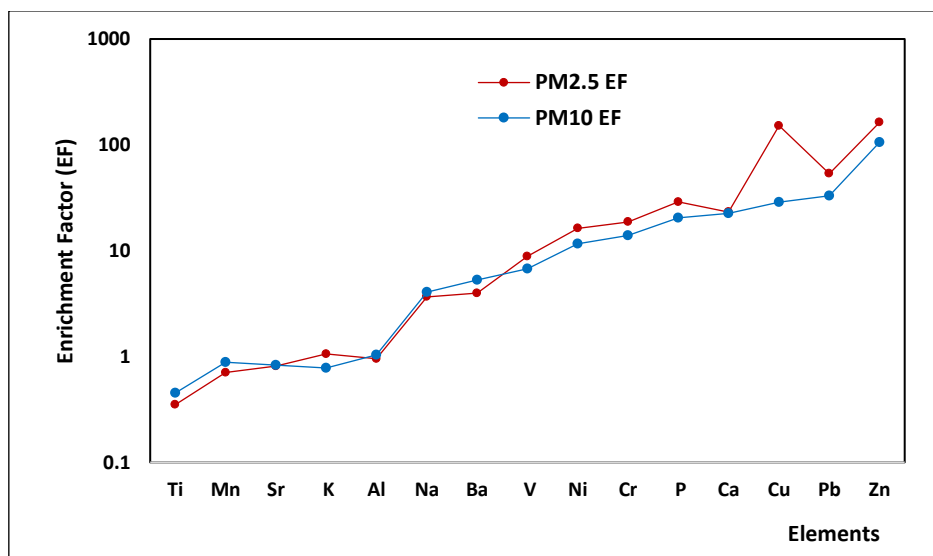


Figure VII-9: Variation des facteurs d'enrichissements des PM₁₀ and PM_{2,5}.

III.6. Carbone suie dans la fraction fine PM_{2,5}

Les contributions de la combustion de la biomasse (BBC) et des combustibles fossiles (FBC) dans les particules fines PM_{2,5} à l'aide de la mesure optique MABI sont présentées dans la Figure VII-10. Les concentrations du BBC variaient de 3,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à 8,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et les concentrations du FBC variaient de 0,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à 1,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

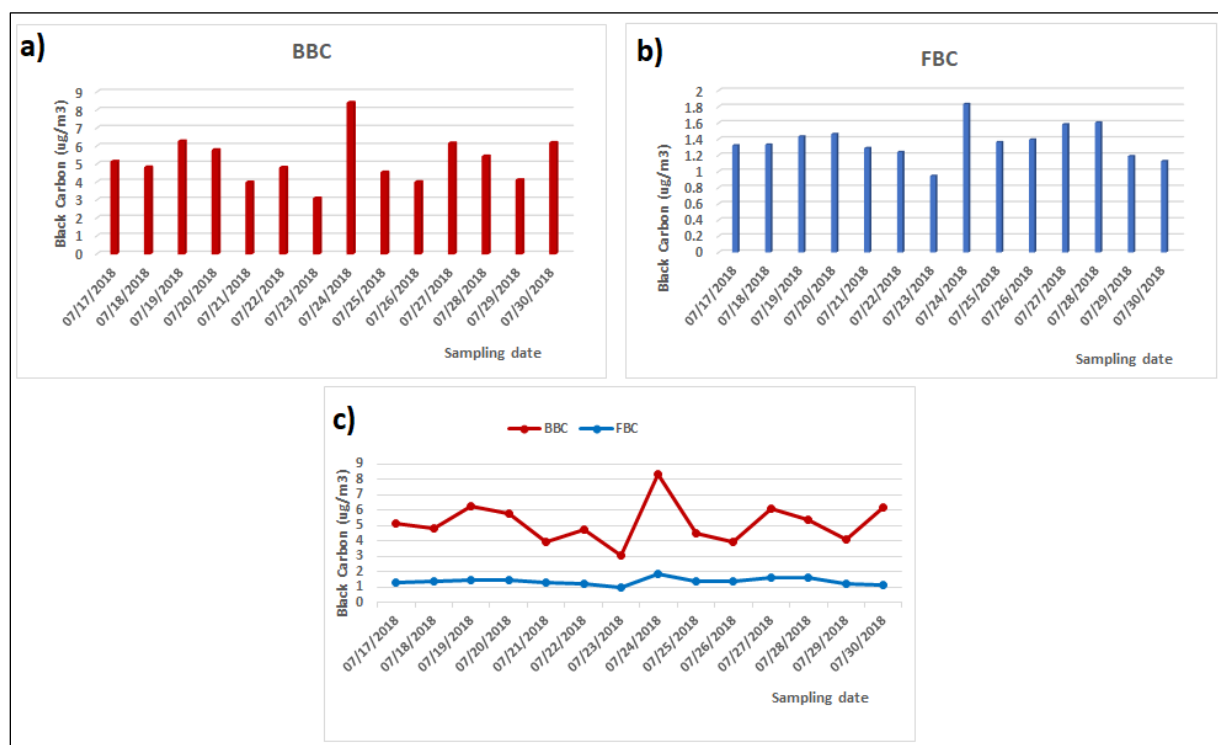


Figure VII-10: a) Biomass Black Carbon (BBC) au niveau de la ville de Nador ; b) Fossil Black Carbon (FBC) au niveau de la ville de Nador ; c) Comparaison entre BBC et FBC dans les PM_{2,5} au niveau de la ville de Nador.

IV. Discussion

IV.1. Polluants gazeux

Le dioxyde de soufre est émis dans l'atmosphère soit par des sources naturelles principalement les éruptions volcaniques ou par des sources anthropiques tel que la combustion des combustibles fossiles, le raffinage du pétrole, et les industries métallurgiques. Le SO₂ est toxique à des concentrations élevées. La valeur limite moyenne journalière nationale de protection de la santé étant de 125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Le SO₂ peut réagir avec les vapeurs d'eau atmosphérique permettant l'acidification des pluies à travers la production d'acide sulfurique (H₂SO₄) (Hache, 2014). Les concentrations moyennes journalières de dioxyde de soufre enregistrées par notre étude restent très inférieures par rapport à la valeur limite moyenne journalière nationale de protection de la santé.

Le dioxyde d'azote fait partie de la famille des oxydes d'azote (NO_x), il constitue un polluant indicateur des activités de combustion, notamment le trafic routier. Le NO₂ est toxique à des concentrations élevées. La valeur horaire nationale de protection de

la santé étant de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Le NO_2 peut réagir avec les vapeurs d'eau atmosphérique permettant l'acidification des pluies à travers la production d'acide nitrique (HNO_3) (Hache, 2014). Les concentrations de dioxyde d'azote enregistrées par notre étude sont très inférieures par rapport à la valeur horaire nationale de protection de la santé. Des pics maximums de NO_2 ont été enregistrés, lors des deux campagnes de mesures, au début de la journée et à la fin de l'après-midi, et la variation durant les jours de la semaine montre une diminution des concentrations en weekend (Figure VII-3) ; cette variation correspond aux heures de circulation intense du trafic routier.

L'ozone qui protège notre planète des UV dans la stratosphère, est un polluant dans la troposphère (couche la plus basse de l'atmosphère). Les concentrations d'ozone étaient très faibles par rapport à la valeur limite de protection de la santé (110 en moyenne sur une période de 8 heures). La variation du dioxyde d'azote et d'ozone montrent une tendance opposée durant les deux campagnes d'échantillonnage. La Figure VII-3 montre, entre la première campagne et la deuxième campagne, une tendance à la hausse des concentrations d'ozone et une tendance à la baisse des concentrations du dioxyde d'azote. Les concentrations les plus élevées en ozone sont enregistrées en fin de semaine. En effet, l'ozone est généralement formé, sous l'action du rayonnement solaire, sur base de plusieurs polluants précurseurs notamment les oxydes d'azote (NO_x) (Vaslin-Reimann, 2019) ; ainsi, la diminution des oxydes d'azote peut entraîner l'augmentation de l'ozone.

Le monoxyde de carbone est principalement produit dans les chaudières et les moteurs thermiques (Vaslin-Reimann, 2019). Il s'agit d'un gaz dangereux et très toxique à des concentrations élevées. La valeur journalière nationale de protection de la santé étant de $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ (maximum journalier de la moyenne sur 8 heures). Les concentrations en monoxyde de carbone enregistrées par notre étude sont très inférieures par rapport à la valeur journalière nationale de protection de la santé. Comme le cas de la variation du NO_2 , des pics maximums de CO ont été enregistrés, lors des deux campagnes de mesures, au début de la journée et à la fin de l'après-midi, et la variation durant les jours de la semaine montre des concentrations élevées en début de semaine avec une diminution en fin de semaine (Figure VII-4) ; cette variation correspond aux heures de circulation intense du trafic routier.

IV.2. Particules $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10}

Les particules en suspension sont généralement issues de la combustion d'énergies fossiles dans les véhicules, les centrales thermiques ou les industries, mais aussi de la combustion du bois (Vaslin-Reimann, 2019). Dans le cas de cette étude, trois valeurs journalières des PM_{10} ont été trouvées avec des dépassements de la valeur limite journalière nationale pour la protection de la santé soit $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 24h (Figure VII-5). Pour les $\text{PM}_{2,5}$, la valeur guide de l'Organisation Mondiale de la Santé étant de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 24h (WHO, 2021), les concentrations enregistrées par cette étude ont été supérieures à cette norme à l'exception de deux valeurs journalières (Figure VII-6).

Pour les $\text{PM}_{2,5}$ et les PM_{10} , les valeurs moyennes des facteurs d'enrichissement étaient inférieures à 10 pour Ti, Mn, Sr, K, Al, Na, Ba et V, ce qui indique que ces éléments présents dans les aérosols ne sont pas enrichis et ont une source crustale ;

les valeurs moyennes des facteurs d'enrichissement des autres éléments Ni, Cr, P, Ca, Cu et Pb étaient comprises entre 10 et 100 indiquant que ces éléments étaient modérément enrichis; et enfin le facteur d'enrichissement pour Zn était supérieur à 100 indiquant qu'une proportion significative de cet élément a une source non crustale et se réfère à un élément enrichi dans la ville de Nador (Figure VII-9) (Hamdan et al, 2021 ; Wu et al, 2019 ; Feng et al, 2016 ; Tahri et al, 2017 ; Das et al, 2015). L'enrichissement élevé en Zn, Pb et Cu indique que ces éléments traces constituent les principaux éléments anthropiques toxiques dans l'air de la ville de Nador.

Les conditions climatiques affectent généralement le transport et la distribution de la matière particulaire. Malgré la surveillance des particules pendant la seule période sèche (2 semaines, mesure quotidienne), l'analyse des coefficients de corrélation de Spearman entre les particules et les conditions climatiques (température, vitesse du vent et humidité relative) a montré une corrélation positive forte entre les PM_{2,5} et l'humidité relative ($r = 0,70$, $p < 0,01$), ce qui concorde avec les études précédentes indiquant que l'humidité relative influence significativement les particules de leur formation à leur dispersion (Lou et al., 2017; Liu et al., 2016a, b; Cheng et al., 2015; Wang et al., 2014).

IV.3. Black suie

Les contributions de la combustion de la biomasse (BBC) et des combustibles fossiles (FBC) dans les particules fines (PM_{2,5}) à l'aide de la mesure optique par le système MABI (Mutahi et al., 2021 ; Tusso et al., 2020) ont indiqué que la contribution du carbone suie issu de la biomasse était importante par rapport à celle du carbone suie d'origine fossile.

IV.4. Comparaison avec d'autres études

Afin de situer la ville de Nador dans un contexte régional de pollution atmosphérique, les résultats ont été comparés avec ceux d'autres villes Marocaines et du bassin méditerranéen (Tableau VII-4). Cette comparaison a montré que les concentrations moyennes en particules fines et leurs éléments traces étaient plus faibles dans la ville de Nador par rapport à Kenitra et Meknès à l'exception de deux éléments Cu et Zn qui étaient plus élevés dans la ville de Nador par rapport à la ville de Meknès (Bouh et al., 2013 ; Tahri et al., 2013). La comparaison avec Barcelone, Marseille et Genoa a montré que la concentration moyenne en particules fines et leurs éléments traces étaient plus élevés dans la ville de Nador (Salameh et al., 2015). Les éléments Cu, Zn, Cr et Ni se sont avérés être plus élevés que ceux enregistrés à Venise et Zn s'est avéré être plus élevé que les concentrations enregistrées au niveau de Thessaloniki (Salameh et al., 2015). Le Cu s'est avéré être plus élevé que les concentrations enregistrées au Caire (Shaltout et al., 2020). La concentration moyenne du BC dans les particules fines enregistrées dans la ville de Nador étant plus élevée que celle enregistrée au Caire et à Athènes (Shaltout et al., 2020 ; Kalogridis et al., 2018).

Tableau VII-4: Comparaison des concentrations moyennes des PM_{2,5} (µg/m³), de leurs concentrations en ETM (ng/m³) et du carbone suie (µg/m³) dans la ville de Nador avec d'autres localités au Maroc et au niveau du bassin méditerranéen.

Localité	Particule Fine							Références
	PM _{2,5}	Pb	Cu	Zn	Cr	Ni	BC	
Nador, Maroc	22,18	10,09	47,14	121,21	19,09	8,49	5,15	Présente Etude
Kenitra, Maroc	52	303	239	1301	81	161	-	Tahri et al. (2013)
Meknès, Maroc	29	152	29	111	82	12	-	Bouh et al. (2013)
Barcelona, Espagne	19	6	7	42	1,3	3	-	Salameh et al. (2015)
Marseille, France	17	8	17	24	2,1	4	-	
Genoa, Italie	14	6	6	19	-	7	-	
Venice, Italie	30	12	18	81	7	4	-	
Thessaloniki, Grèce	37	41	84	77	30	26	-	
Athens, Grèce	-	-	-	-	-	-	1,20	Kalogridis et al. (2018) (Median value)
Cairo, Egypte	70,2	70	25	240	-	10	2,76	Shaltout et al. (2020)

IV.5. Caractérisation des émissions anthropiques

Les éléments traces peuvent être émis dans l'atmosphère à partir d'une grande variété de sources naturelles telles que les volcans, les tempêtes de poussière, les feux de forêt et les embruns marins, et d'une variété de sources anthropiques comme la combustion de combustibles fossiles, la combustion de la biomasse, la production de fer et d'acier, le trafic routier, les émissions des navires, la production de ciment et l'incinération des déchets. Pour estimer les origines des sources potentielles dans la ville de Nador, la méthode de rapport élémentaire a été utilisée (Benetello et al., 2018 ; Ayrault et al., 2010 ; Arditoglou and Samara, 2005). Les rapports Fe/Al variaient entre 0,46 et 0,50 respectivement dans les PM₁₀ et PM_{2,5} de la ville de Nador et étaient similaires à ceux du sol de la croûte (0,4) (Chifflet et al., 2018 ; Reimann and Caritat, 1998). Pour les sources anthropiques, Zn, Pb et Cu étaient les principaux éléments anthropiques toxiques dans l'air de la ville de Nador dans cette étude ; et les mêmes résultats ont été trouvés également dans les sédiments de la lagune de Marchica autour de la ville de Nador (Oujidi et al., 2021) ; ainsi, il est crucial d'estimer les sources potentielles de ces polluants. La comparaison des rapports élémentaires anthropiques pour (1) Cu/Pb et Cu/Zn ; (2) Zn/Pb ; et (3) V/Ni dans la ville de Nador avec ceux d'autres études a montré (Tableau VII-5) que :

- (1) Les rapports Cu/Zn étaient de 0,11 et 0,39, et les ratios Cu/Pb étaient de 1,42 et 4,67 respectivement dans les PM₁₀ et PM_{2,5} de la ville de Nador. À l'exception des rapports Cu/Pb dans les PM_{2,5}, ces résultats étaient similaires à ceux de l'air ambiant de la région Veneto en Italie (les rapports Cu/Zn étaient de 0,1-0,4 et les rapports Cu/Pb étaient de 0,3 - 1,1) qui ont été attribués principalement aux émissions du trafic (Benetello et al., 2018). Pour le rapport Cu/Pb dans les PM_{2,5}, un rapport similaire (4,6) a été trouvé à Turin en Italie et il a été également attribué au trafic routier (Ziegler et al., 2021) ; de même, le rapport Cu/Pb (2,38) a été trouvé dans la pollution due au trafic routier en England - Wales et Scotland, United Kingdom (Font et al., 2015).

- (2) Les ratios Zn/Pb étaient 12,57 et 12,01 respectivement dans les PM₁₀ et PM_{2,5} à Nador. Un rapport Zn/Pb similaire a été trouvé pour la poussière de construction (11,30) à Fushun, en Chine (Kong et al, 2011). Des études antérieures ont indiqué que des rapports Zn/Pb ont été trouvés à Thessalonique, en Grèce pour les émissions des véhicules diesel (7,6), l'incinération de ferraille (8,4) et la cimenterie (42) (Arditsoglou & Samara, 2005 ; Samara et al, 2003). Des rapports Zn/Cu très élevés ont été trouvés pour la poussière de construction (1537,17) dans la ville de Raipur, en Inde (Matawle et al., 2015).
- (3) Les rapports V/Ni étaient respectivement de 1,19 et 1,12 dans les PM₁₀ et PM_{2,5} à Nador. Un rapport similaire a été trouvé dans les PM_{2,5} ambiant de la ville côtière de Gdynia en Pologne (1,19) provenant des sources industrielles mixtes locales avec des contributions possibles de la zone portuaire et des activités de navigation (Siudek, 2020).

Tableau VII-5: Comparaison des rapports élémentaires de la ville de Nador avec d'autres études.

Localité / Source	PM	Cu/Pb	Cu/Zn	Zn/Pb	V/Ni	Références
Nadorcity, Maroc	PM ₁₀	1,42	0,11	12,57	1,19	Présente Etude
Ambient PM	PM _{2,5}	4,67	0,39	12,01	1,12	
Turin, Italy	PM ₁₀	4,6	-	-	-	Ziegler et al. (2021)
Municipal solid waste incinerator						
Gdynia city Poland	PM _{2,5}	-	-	-	1,19	Siudek (2020)
Ambient PM						
Veneto region, Italy	PM _{2,5}	0,3-1,1	0,1-0,4	5-9	0,1-0,9	Benetello et al. (2018)
Ambient PM						
Raipur city, India	PM _{2,5}	44,83	0,03	1537,17	0,78	Matawle et al. (2015)
Construction Dust PM						
England -Wales and Scotland, United Kingdom (MWI)	PM ₁₀					Font et al. (2015)
Municipal waste incinerators						
Traffic		2,38	-	-	-	
Rural		0,51	-	-	-	
MWI		0,83	-	-	-	
Fushun, China	PM	-	-	11,30	0,57	Kong et al. (2011)
Construction Dust PM						
Thessaloniki, Greece	PM ₁₀					Arditsoglou & Samara (2005) ; Samara et al. (2003)
Industrialized urban area						
Cement plant		-	-	42	11	
Gasoline vehicles		-	-	3,4	0,02	
Diesel vehicles		-	-	7,6	0,15	
Oil burning		-	-	1,2	0,41	
Metal scrap incineration		-	-	8,4	5,9	

IV.6. Évaluation des risques des ETM liés à la santé humaine

Les éléments traces accumulés dans les particules en suspension peuvent provoquer le cancer lorsqu'ils sont introduits dans le corps humain via la respiration. Selon l'Agence de Protection de l'Environnement des Etats Unis (USEPA), les éléments chimiques sont classés en cinq groupes en termes de cancérogénicité : Groupe A

(Carcinogenic to Humans), Groupe B1 et B2 (Probably Carcinogenic to Humans); Groupe C (Possibly Carcinogenic to Humans); Groupe D (Not Classifiable as to Human Carcinogenicity); Groupe E (Evidence of Non-carcinogenicity for Humans). Parmi les éléments chimiques analysés dans cette étude, le Chrome (VI) et le Nickel classés dans le Groupe A, et le Plomb classé dans le Groupe B2 sont les métaux cancérigènes introduits par voie respiratoire et le Chrome (VI) représente un sur sept (1 /7) du Chrome total mesuré (Won et al., 2021 ; Das et al., 2015 ; Pandey et al., 2013 ; Hieu et Lee, 2010). Les risques liés à la santé humaine par des effets cancérigènes dans cette étude ont été caractérisés à l'aide de l'Excess Cancer Risk (ECR) (USEPA, 1989) :

$$\text{ECR(Inhalation)} = \text{Concentration trace élément } (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times \text{Risque Unitaire trace élément } (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$$

Le risque unitaire pour le Chrome et le Nickel sont fournis par Integrated Risk Information System (USEPA/IRIS). Le risque unitaire pour le Pb est en cours d'amendement par l'USEPA et la valeur de l'Office of Environmental Health Hazard Assessment, Agence de Protection de l'Environnement de California (OEHHA/CalEPA) a été utilisée.

Les valeurs estimées d'ECR en utilisant le risque d'inhalation pour les valeurs moyennes de PM₁₀ et PM_{2,5} à partir d'éléments traces cancérigènes dans la ville de Nador sont données dans le tableau VII-6. Les valeurs maximales d'ECR ont été enregistrées pour le Chrome $32,8 \times 10^{-6}$ et $30,9 \times 10^{-6}$ respectivement dans les PM₁₀ et PM_{2,5} et les valeurs minimales d'ECR ont été enregistrées pour le Plomb $0,12 \times 10^{-6}$ et $0,10 \times 10^{-6}$ respectivement dans les PM₁₀ et PM_{2,5}. Les valeurs ECR du Nickel pour PM₁₀ et PM_{2,5} se situaient entre celles du Chrome et du Plomb et étaient de $2,04 \times 10^{-6}$ et $1,85 \times 10^{-6}$ respectivement pour PM₁₀ et PM_{2,5}. L'ECR total des PM₁₀ et PM_{2,5} résultant de l'exposition par inhalation des trois éléments cancérigènes (Cr (VI), Ni et Pb) était de 68×10^{-6} , ce qui explique que 68 personnes sur un million, soit 34 personnes sur presque 500 000 habitants, autour de la ville de Nador peuvent être exposées au risque de développer un cancer.

Tableau VII-6: Excess Cancer Risk des éléments traces cancérigènes dans la ville de Nador.

Trace éléments	Particule en suspension	Concentration moyenne (ng/m ³)	Inhalation unit risk (μg/m ³) ⁻¹	Excess Cancer Risk
Cr (VI)	PM ₁₀	19,09/7 = 2,73	$1,2 \times 10^{-2}$	$32,8 \times 10^{-6}$
	PM _{2,5}	18,08/7 = 2,58		$30,9 \times 10^{-6}$
Ni	PM ₁₀	8,49	$2,4 \times 10^{-4}$	$2,04 \times 10^{-6}$
	PM _{2,5}	7,71		$1,85 \times 10^{-6}$
Pb	PM ₁₀	10,09	$1,2 \times 10^{-5}$	$0,12 \times 10^{-6}$
	PM _{2,5}	7,92		$0,10 \times 10^{-6}$
Total	PM ₁₀			$34,96 \times 10^{-6}$
	PM _{2,5}			$32,85 \times 10^{-6}$
	PM ₁₀ et PM _{2,5}			68×10^{-6}

V. Conclusion

La première évaluation de la qualité de l'air au niveau de la ville de Nador à travers la caractérisation des polluants gazeux, des particules en suspension PM_{10} , $PM_{2,5}$, leur composition chimique, et le carbone suie a montré que les concentrations des polluants gazeux étaient inférieures aux valeurs limites nationales de protection de la santé. Pour les particules en suspension, un quart des concentrations de particules PM_{10} mesurées dépassent la valeur limite quotidienne nationale pour la protection de la santé. Un enrichissement élevé en Zn et Cu ($100 < EF < 1000$) a été trouvé dans les $PM_{2,5}$ et un enrichissement élevé en Zn ($100 < EF < 1000$) suivi d'un enrichissement modéré en Cu et Pb ($10 < EF < 100$) a été trouvé dans les PM_{10} indiquant que ces éléments traces (Zn, Cu et Pb) étaient les principaux éléments anthropogéniques toxiques dans l'air de la ville de Nador. La distribution du carbone suie indique que la contribution de la biomasse était significative par rapport au carbone suie fossile. La valeur d'Excess Cancer Risk la plus élevée a été trouvée pour le chrome dans les particules PM_{10} et $PM_{2,5}$. L'établissement d'un plan de gestion de la qualité de l'air pour Nador est recommandé, y compris l'établissement d'au moins deux stations de surveillance urbaine et industrielle avec l'évaluation et le contrôle des activités qui génèrent la pollution de l'air.

Chapitre VIII : Gestion Intégrée des Zones Côtières, Approche opérationnelle vers un littoral durable de la lagune de Marchica

Résumé

Ce travail consiste à présenter l'approche GIZC concernant la gestion intégrée des zones côtières dans un contexte de développement durable comme approche opérationnelle vers un littoral durable de la lagune de Marchica. Des initiatives GIZC réalisées sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc ont été présentées. La capitalisation de ces expériences a permis de conclure que ces expériences, qui ont été financées par des bailleurs de fond dans le cadre des projets pilotes à durée limitée, ont permis d'instaurer les premiers principes de la GIZC. Ces initiatives ont contribué à la concrétisation d'une vision stratégique de gestion intégrée des zones côtières dans le cadre de gestion du littoral au Maroc qui a connu plusieurs étapes durant la dernière décennie : La ratification du protocole GIZC Méditerranéen en 2012, la promulgation de la loi 81-12 du littoral en 2015 et l'approbation du plan national du littoral (PNL) en 2019 qui constitue la base pour l'élaboration des schémas régionaux du littoral. L'étude de cas d'une gestion intégrée des zones côtières de l'écosystème lagune de Marchica et sa zone d'influence à travers une analyse SWOT a permis de conclure que la gestion de la lagune de Marchica sans la prise en considération de sa zone d'influence au niveau du bassin versant dans le cadre d'une approche GIZC ne peut pas aboutir à un développement durable de cet écosystème. Un contrat de gestion GIZC entre le gestionnaire principal de la lagune et les communes de la zone d'influence ainsi qu'avec d'autres partenaires notamment le conseil provincial et le conseil régional s'impose pour aboutir à un développement durable de la lagune de Marchica.

Mots clés

Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC), Gestion du littoral au Maroc, Initiatives sur LMO Maroc, lagune de Marchica, Analyse SWOT, Développement durable.

I. Introduction

A l'instar des zones côtières à l'échelle mondiale, le littoral marocain est de plus en plus soumis à de multiples pressions anthropiques avec des impacts cumulatifs sur les écosystèmes côtiers. L'écosystème lagunaire de la Marchica, s'est avéré être significativement sensible aux forçages naturels et anthropiques exercés non seulement directement sur la lagune, mais aussi sur son bassin versant. Par conséquent, toute tentative de réhabilitation ou en général de gestion de cet espace, ne peut se faire sans une vision intégrée de l'ensemble de l'environnement de la Marchica.

A l'échelle globale, et notamment méditerranéenne, les zones côtières ont fait l'objet d'une gestion sectorielle pendant plusieurs années dans le passé, mais la multiplication des usages et des activités a progressivement imposé la mise en œuvre d'une gestion plus intégrée notamment sur les plans géographique, disciplinaire et de gouvernance, afin de tenter d'apporter des réponses à différentes problématiques environnementales, sociales et économiques dans ces zones d'interface (Ritschard, 2017). Les efforts considérables qui ont été déployés sur tous les continents pour approfondir la compréhension du concept de Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) et mener des expériences de terrain, ont abouti à son adoption comme paradigme central du développement durable des littoraux (Billé, 2006). Il est donc important de rappeler ce concept et ses applications à l'échelle régionale (méditerranéenne), nationale et locale au niveau de la région de l'oriental.

Les objectifs de ce chapitre consistent donc à :

1. Présenter l'approche GIZC en tant que modèle de gestion de développement durable dans les zones côtières ;
2. Présenter la GIZC dans un contexte méditerranéen ;
3. Présenter les modalités de gestion du littoral au Maroc ;
4. Etudier le cas de l'écosystème lagune de Marchica et sa zone d'influence à travers la présentation des expériences GIZC réalisées et la capitalisation de ces expériences, et à travers la présentation des indicateurs environnementaux de développement durable et l'analyse SWOT de cet écosystème.

II. La GIZC, approche opérationnelle vers un littoral durable

La GIZC est considérée comme une approche de mise en œuvre des principes de développement durable dans les zones côtières (Cicin-Sain et al, 1998). Depuis la Conférence de Rio de 1992, plusieurs initiatives GIZC ont été lancées de par le monde dont les résultats ont montré l'intérêt pour la mise en œuvre effective de la GIZC (Henocque, 2006).

En Méditerranée, la prise de conscience de la dégradation de l'environnement a permis l'établissement de dispositifs de coopération au niveau régional visant la protection du milieu marin, connu sous le nom de Convention de Barcelone (PNUE/PAM, 1976). La dimension internationale accordée à la GIZC au niveau du chapitre 17 de l'Agenda 21 de Rio en 1992 a conduit à l'amendement de la Convention de Barcelone en 1995 en élargissant la portée de son application pour prendre en considération les zones côtières (PNUE/PAM/CAR/PAP, 2016). Dans le cadre de la mise en œuvre de cette convention, le Protocole GIZC a été adopté en 2008 et entré en vigueur en 2011 pour permettre aux pays méditerranéens de mieux

gérer leurs zones côtières et de faire face aux enjeux et défis environnementaux côtiers (PNUE/PAM, 2008).

La Gestion intégrée des zones côtières est définie par le Protocole GIZC comme étant « un processus dynamique de gestion et d'utilisation durables des zones côtières, prenant en compte simultanément la fragilité des écosystèmes et des paysages côtiers, la diversité des activités et des usages, leurs interactions, la vocation maritime de certains d'entre eux, ainsi que leurs impacts à la fois sur la partie marine et la partie terrestre ».

La GIZC est basée sur l'application d'une approche écosystémique dans l'aménagement et la gestion des zones côtières afin d'assurer leur développement durable. Elle prend en compte les interactions entre les différentes parties d'un écosystème, entre la terre et la mer, entre l'homme et la nature ainsi qu'entre l'utilisation des ressources marines et la capacité des écosystèmes à supporter ces utilisations (PNUE, 2015).

Le protocole GIZC représente par ailleurs, un outil très important pour les Etats Méditerranéens pour faire face aux risques littoraux liés au changement climatique ; il s'agit en effet d'un processus proactif et efficace pour mettre en œuvre l'adaptation (Snoussi and Flayou, 2016). L'institution d'une bande inconstructible qui ne doit pas être inférieure à 100m du rivage, stipulée par le protocole GIZC, constitue en elle-même une mesure d'adaptation aux changements climatiques.

III. Aperçu sur la gestion du milieu marin et du littoral au Maroc

Le Maroc s'est engagé à protéger son littoral méditerranéen en ratifiant la convention de Barcelone en 1980 et en adhérant aux sept protocoles se rapportant à cette Convention. Le dernier protocole GIZC a été ratifié en 2012. Le concept de la GIZC s'inscrit dans le cadre de l'application de la loi-cadre marocaine 11-03 promulguée en 2003 relative à la protection et la mise en valeur de l'environnement. Le Maroc a également renforcé la légitimité d'une approche intégrée du littoral dans la loi Cadre 99-12 portant Charte Nationale de l'Environnement et du Développement Durable. Cette loi-cadre promulguée en 2014, stipule dans son article 7 la promotion de la protection des écosystèmes marins et littoraux et des zones humides contre les impacts des activités susceptibles d'en altérer les eaux et les ressources. Avec l'approbation en 2015 de la loi 81-12 relative au littoral, le Maroc adopte effectivement l'approche GIZC. Cette loi a mis en place les règles fondamentales de la planification, de l'aménagement, de la protection, de la mise en valeur et de la conservation du littoral. Cette loi exige l'élaboration d'un plan national de gestion intégrée du littoral « Plan National du Littoral (PNL) » ainsi que des « Schémas Régionaux du Littoral (SRL) ».

Le PNL a été élaboré en 2019 et a décliné six axes stratégiques qui s'inscrivent dans une logique de développement territorial intégré et durable visant à concilier les dimensions économiques, sociales et culturelles avec les impératifs de protection de l'environnement (Figure VIII-1) (Département de l'Environnement, 2019b).

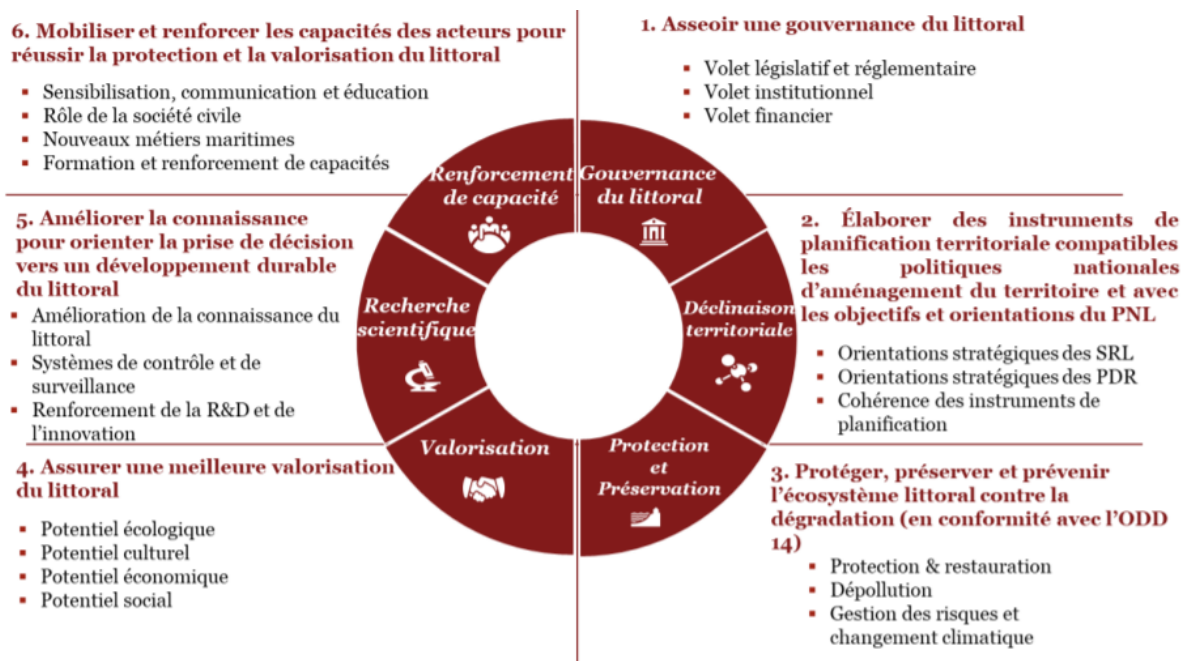


Figure VIII-1 : Axes stratégiques du Plan National du Littoral (PNL) au Maroc (Département de l'Environnement, 2019b).

Par ailleurs, de nombreux efforts ont été consentis par le Gouvernement Marocain pour honorer ses engagements vis-à-vis de la protection de son littoral en utilisant l'approche GIZC, parmi lesquels on peut citer : (Département de l'Environnement, 2020) :

- ❖ Le programme de surveillance de la pollution tellurique (programme national MEDPOL) concerne la surveillance de la pollution tellurique des eaux et sédiments des apports fluviaux et des rejets (cours d'eau, rejet des eaux usées et rejets des STEPs) permettant d'évaluer l'impact de la pollution tellurique sur les côtes méditerranéennes.
- ❖ Le programme IMAP récemment adopté par le Maroc englobe à la fois la pollution, les déchets marins, la biodiversité, les espèces non-indigènes, le littoral et l'hydrographie. Ce programme permettra une analyse quantitative intégrée de l'état de l'environnement marin et côtier et fournira la base d'une évaluation solide du bon état écologique de la Méditerranée marocaine.
- ❖ Le Plan d'Urgence National (PUN), institué par décret en 1996 et complété par son arrêté d'application en 2003, est un plan d'intervention en cas de pollution marine accidentelle par les hydrocarbures ou les substances nocives.
- ❖ Le programme National de Surveillance de la Qualité des Eaux de Baignade, initié en 1993 et s'insérant depuis 2002 dans le cadre des programmes « Plages Propres » et « Pavillon Bleu » initiés par la Fondation Mohamed VI pour la Protection de l'Environnement.
- ❖ La surveillance de la salubrité du littoral (RSSL) concernant la surveillance de toutes les composantes biotiques et abiotiques du milieu marin par l'INRH.

D'autres programmes nationaux contribuent aussi à la préservation des côtes méditerranéennes :

- ❖ Le programme national d'assainissement liquide mutualisé (PNAM)
- ❖ Le programme national des déchets ménagers (PNDM)
- ❖ Le mécanisme volontaire de dépollution industrielle (MVDIH) qui vise à apporter un soutien financier et technique aux unités industrielles pour installer des systèmes de prétraitement des eaux usées industrielles avant leur rejet dans l'environnement.

IV. Initiatives GIZC sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc

Le littoral méditerranéen oriental du Maroc est caractérisé par la présence de quatre sites d'intérêt biologique et écologique à savoir l'Embouchure de la Moulouya, la lagune de Marchica, le Cap des Trois Fourches et la Fôret Gourougou. Ce littoral a connu la réalisation de cinq initiatives de mise en œuvre de la GIZC durant les deux dernières décennies à travers une intense implication de la coopération internationale pour le développement dans la protection de son environnement (Garnaud and Rochette, 2012).

IV.1. Projet MedWetCoast

Le projet MedWetCoast réalisé durant la période 2000-2006 sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc consiste à la conservation et la protection de la biodiversité des zones humides et côtières d'importance mondiale et régionale du bassin méditerranéen (Tableau VIII-1) <https://medwet.org/2010/03/medwetcoast-project-for-the-conservation-of-wetlands-and-coastal-ecosystems-in-the-mediterranean-region/>

Tableau VIII-1: Projet MedWetCoast sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc.

Projet	Bailleurs de Fonds	Zones d'intervention	Coordination	Objectifs
MedWetCoast 2000- 2006 Phase étude	PNUD FFEM	Région de l'Oriental : • Embouchure Moulouya • Cap des trois fourches • Lagune de Nador • Jbel Gourougou • Béni-Snassen	Tour de valat, France MATEE, Maroc	• Assurer la conservation de la biodiversité dans des écosystèmes côtiers et des zones humides • Adoption du système d'inventaire MedWet, comme outil de base pour obtenir un registre commun des zones humides méditerranéennes. • Renforcement du cadre juridique et institutionnel pour assurer la protection de la biodiversité dans les zones humides et côtières • Gestion des problématiques environnementales considérées comme d'importance majeure • Participation, formation et sensibilisation

IV.2. Projet SMAPIII

Dans le cadre du Programme d'Actions Prioritaires à Court et Moyen Termes pour l'Environnement financé par la communauté européenne (SMAPIII), deux initiatives ont été consacrées au littoral méditerranéen oriental durant la période 2006-2008 pour promouvoir la GIZC : le Plan d'Action de Kala-Moulouya relatif au littoral Saïdia - Ras el Ma incluant le site de l'embouchure de la Moulouya au niveau de la province de Berkane, et le projet Cap Nador relatif à la gestion intégrée du littoral de la province de Nador à travers l'élaboration des plans d'actions intégrés sur 3 sites pilotes à savoir la commune rurale de Boudinar, la commune rurale de Beni Chiker, et la lagune de Nador permettant une gestion durable de la zone côtière. Cependant, les plans d'action GIZC élaborés dans le cadre du programme SMAP III n'ont pas pris en considération les risques des incidences des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer (Tableau VIII-2).

Tableau VIII-2: Projet SMAPIII sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc.

Projet	Bailleurs de Fonds	Zones d'intervention	Coordination	Objectifs
SMAP III Cap Nador 2006- 2008 Phase étude	Union Européenne	Littoral de la province de Nador : - Cap des trois fourches - Littoral de la commune de Boudinar - Lagune de Nador	EUCC, Chef de file en partenariat avec : - ENFI Salé, Maroc - Commune Rurale de Boudinar, Maroc - FUED, Maroc	- Mise en œuvre de la GIZC - Etablissement des Plans GIZC sur les zones d'intervention des provinces de Nador et Berkane - Élaboration d'une vision stratégique pour la gestion durable du littoral - Promouvoir le développement durable et la gestion intégrée des zones côtières de la zone - Participation, formation et sensibilisation des acteurs locaux
SMAP III Kala Moulouya 2006 -2008 Phase étude		Littoral de la province de Berkane : Saïdia - Ras El Ma	- Tour du Valat, France - MATEE, Maroc	

IV.3. Projet ACCMA

Le projet ACCMA réalisé durant la période 2007-2010 (<https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/handle/10625/46060>) a permis d'intégrer la composante changement climatique dans les plans d'action SMAPIII (CAP NADOR et Kala Moulouya) (Tableau VIII-3). Une analyse de la vulnérabilité des sites retenus et des principaux secteurs de la région a été effectuée dans le cadre de ce projet et certaines actions des Plans GIZC ont été actualisées selon une démarche participative avec les parties prenantes.

Tableau VIII-3: Projet ACCMA sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc.

Projet	Bailleurs de Fonds	Zones d'intervention	Coordination	Objectifs
ACCMA Adaptation au changement climatique au Maroc 2007- 2010	Centre de Recherche pour le Développement International (CRDI) du Canada et le Département for International Development (DFID) du Royaume Uni	Littoral des provinces de Nador, Berkane et Driouch : • Littoral de la commune de Boudinar • Cap des trois fourches • Lagune de Nador • Embouchure de la Moulouya	• ENFI Maroc • DMN Maroc • Interdisciplinary Centre for Environmental Research (CIRSA), University of Bologna, Italie • Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Allemagne • Université de Moncton • Faculté des Sciences de l'Education, Canada • UM5 • EUCC	• Sensibilisation des acteurs locaux sur les risques des changements climatiques • Evaluation de la vulnérabilité des principaux secteurs (Eau, Agriculture, Pêche, Tourisme) aux risques des changements climatiques • Développement de stratégies d'adaptation et de mesure de protection du littoral • Intégration des services gouvernementaux, des institutions de recherche et la société civile dans les réseaux d'échange d'expériences en matière de changements climatiques et de mesures d'adaptation • Engagement active les institutions (principaux décideurs au Maroc) dans une stratégie intégrée de planification côtière

IV.4. Projet Appui à la mise en œuvre d'un plan global de dépollution de la lagune de Marchica

Le projet appui à la mise en œuvre d'un plan global de dépollution et de protection de la lagune de Nador a été réalisé durant la période 2009-2012 (Tableau VIII-4). Le plan de gestion de la lagune de Marchica englobe des actions concertées pour atteindre des objectifs de développement durable ([Fondation Mohammed VI pour la Protection de l'Environnement, 2013a](#)). Ce plan comprend 4 axes : la dépollution de la lagune ; l'aménagement durable de la lagune et de son arrière-pays ; le suivi et la connaissance sur la lagune ; et l'éducation à l'environnement et la sensibilisation (<https://www.fm6e.org/>).

Tableau VIII-4: Projet appui à la mise en œuvre d'un plan global de dépollution et de protection de la lagune de Nador sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc.

Projet	Bailleurs de Fonds	Zone d'intervention	Coordination	Objectifs
Projet appui à la mise en œuvre d'un plan global de dépollution et de protection de la lagune de Nador 2009-2012	FFEM	Lagune de Marchica	Fondation Mohammed VI pour la protection de l'Environnement Maroc	• Communication et sensibilisation des acteurs locaux • Education à l'environnement et au développement durable • Elaboration des outils de sensibilisation et d'éducation : CD Interactif sur la lagune de Marchica • Création de l'Observatoire Marchica • Elaboration d'un plan de gestion de la lagune de Marchica • Elaboration des indicateurs environnementaux de suivi de l'état environnemental de la lagune • Elaboration d'un SIG Marchica

IV.5. Projet GIZC FEM_Banque Mondiale

Le projet GIZC FEM - Banque Mondiale du Royaume du Maroc s'inscrit dans le Programme « SUSTAINABLE MED » (Programme Régional de Développement Durable en Méditerranée) (Tableau VIII-5) (www.environnement.gov.ma). Ce projet consiste à concrétiser certaines actions des Plans GIZC proposés par le projet ACCMA dans les secteurs de la pêche, l'agriculture, le tourisme, la restauration des écosystèmes dégradés, la sensibilisation et la communication. Il est financé par le FEM et mis en œuvre par la Banque mondiale, ayant pour objectif d'accélérer la croissance, lutter contre la pauvreté, réduire les disparités sociales et contribuer à la durabilité d'exploitation des ressources naturelles dans la région méditerranéenne orientale du Maroc.

Tableau VIII-5: Projet GIZC/ FEM – Banque Mondiale sur le Littoral Méditerranéen Oriental du Maroc.

Projet	Bailleurs de Fonds	Zones d'intervention	Coordination	Objectifs
GIZC LMO Gestion Intégrée des Zones Côtières sur le Littoral Méditerranéen Oriental Phase Préparatoire 2010 - 2012 Phase Exécution 2012 - 2017	Financé par FEM et mis en œuvre par la Banque Mondiale (BM)	Littoral des provinces de Nador, Berkane et Driouch : • Lagune de Nador • Embouchure de la Moulouya • Cap des trois fourches • Littoral de la commune de Boudinar	Gouvernement Marocain / Département de l'Environnement en partenariat avec : • Département des Pêches Maritimes • Département de tourisme • Département des Eaux et Forêts • ANDA • ADA	• Contribuer à la durabilité des ressources naturelles dans la région méditerranéenne • Aider le Maroc à explorer des méthodes innovantes et des mesures de développement durable des zones côtières dans un contexte de changement climatique • Renforcer les capacités des institutions gouvernementales et des acteurs locaux en matière d'utilisation de l'approche GIZC • Répondre à trois défis de développement à long terme tels : (i) accélérer la croissance et la création d'emplois, (ii) réduire les disparités sociales, et (iii) garantir la durabilité. • Principaux projets pilotes : 1. Restauration des écosystèmes dégradés au niveau de l'Embouchure Moulouya 2. Installation d'une ferme d'algoculture au niveau de la lagune de Marchica 3. Installation d'une ferme de conchyliculture au large de Ras El Ma 4. Installation d'un récif artificiel au large de Boudinar 5. Mise en place d'une démarche intégrée de développement de l'écotourisme (Identification de circuit touristique à Béni Chiker et à Boudinar et réhabilitation environnementale des gîtes touristiques à Boudinar)

IV.6. Evaluation des initiatives GIZC

L'évaluation des projets GIZC réalisés sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc montre que ces expériences ont été focalisées sur la sensibilisation, la communication, la réalisation d'études liées aux zones pilotes notamment des études socio-économiques, des études concernant l'élaboration des plans d'actions GIZC et l'intégration du volet changement climatique aux plans GIZC élaborés, et des études de vulnérabilités aux changements climatiques des principaux secteurs de la région notamment l'eau, la pêche, l'agriculture et le tourisme.

Le projet d'appui à la mise en œuvre d'un plan global de dépollution et de protection de la lagune de Nador s'est distingué des autres initiatives par la création de l'Observatoire de la lagune de Marchica, dirigé par le Département de l'Environnement en tant qu'annexe de l'Observatoire Régional de l'Environnement et du Développement Durable pour assurer le suivi-évaluation de l'état environnemental de la lagune, le suivi de la mise en œuvre du plan global de gestion, la collecte des indicateurs disponibles et le partage de la connaissance.

Le projet GIZC FEM-Banque Mondiale a été marqué par la réalisation des projets pilotes permettant la durabilité des ressources naturelles et la création de l'emploi notamment la ferme pilote d'algoculture au niveau de la lagune de Marchica, la ferme de conchyliculture au niveau du littoral de la commune de Ras El Ma, le récif artificiel au niveau du large du littoral de Boudinar, et la mise en place d'une démarche intégrée de développement de l'écotourisme. Ce projet a permis aussi d'intégrer l'approche GIZC dans l'élaboration du plan d'action communal (PAC) au profit de 6 communes et l'élaboration d'un guide pour l'intégration de l'approche GIZC au profit des communes côtières ([Département de l'Environnement, 2016b](#)).

Toutes les initiatives GIZC réalisées sur le littoral méditerranéen oriental ont été financées par des bailleurs de fond dans le cadre de la coopération internationale pour la protection de l'environnement ([Garnaud and Rochette, 2012](#)). Ces initiatives sous forme de projets pilotes à durée limitée ont permis d'instaurer les principes de la GIZC et ont contribué à la concrétisation d'une vision stratégique de gestion intégrée du littoral marocain.

L'émergence de la GIZC s'inscrit donc dans une logique d'apports cumulatifs et de capitalisation d'expériences locales, qui peuvent être contextualisées par rapport à l'évolution des référentiels des politiques publiques et des perceptions locales de l'espace littoral. Toutefois, la mise en œuvre effective de la GIZC dans le moyen et long terme nécessite l'institutionnalisation d'une entité de coordination et un budget permanent pour opérationnaliser toutes les actions déclinées à travers les différentes études, et anticiper ainsi les impacts liés aux changements climatiques.

V. La lagune de Marchica et la GIZC

V.1. Diagnostic de territoire à travers l'analyse SWOT

L'écosystème lagunaire de Marchica a fait partie de toutes les initiatives GIZC réalisées sur le littoral méditerranéen oriental jusqu'à présent ; il n'en demeure pas moins que l'opérationnalisation de la GIZC, dans toutes ses dimensions, n'est pas

encore établie de manière normative. Afin de faciliter la lecture et la définition des enjeux du complexe lagune Marchica et sa zone d'influence, le diagnostic de territoire permet de mettre en évidence les forces et les potentialités, les problèmes et les faiblesses, les enjeux économiques, environnementaux, sociaux... ; il recherche également les causes des dysfonctionnements et surtout des axes d'amélioration et de progrès. Pour cela, nous avons utilisé le schéma méthodologique commun, du modèle SWOT ou AFOM, basé sur l'identification et la comparaison des facteurs positifs « Atouts » et « Opportunités », et des facteurs négatifs « Faiblesses » et « Menaces ». Les résultats sont présentés dans les Tableaux VIII-6 et VIII-7.

Tableau VIII-6: Analyse SWOT de l'écosystème lagune de Marchica et sa zone d'influence (Atouts et Faiblesses).

Atouts	Faiblesses
❖ Classement Ramsar ❖ Classement SIBE ❖ Biodiversité riche ❖ Services écosystémiques ❖ Présence d'une agence chargée de l'aménagement du site de la lagune de Marchica ❖ Existence d'un Observatoire Marchica assurant le suivi de l'état environnemental de l'écosystème lagune de Marchica et sa zone d'influence ❖ Existence d'un Observatoire Marchica « Marsad » scientifique au niveau de la faculté pluridisciplinaire de Nador ❖ Présence des activités économiques diversifiées : pêche, agriculture, mine et carrière, industrie, tourisme, commerce ❖ Création de l'emploi ❖ Potentialités touristiques importantes : Marchica-Med, 4 plages touristiques, forêt Gourougou, Marina, Parc ornithologique, activités nautiques, activités sportives ❖ Suivi de la qualité des eaux de baignades des plages	❖ Zone humide très vulnérable aux changements climatiques ❖ Résilience aux changements climatiques faible ❖ Risques aux impacts des changements climatiques : inondation, érosion, submersion marine, sécheresse ❖ Cordon dunaire très fragile ❖ Surexploitation des ressources halieutiques ❖ Zone d'intervention de l'agence chargée de l'aménagement du site de la lagune de Marchica très limitée par rapport à la zone d'influence de la lagune ❖ Manque des moyens de protection de l'environnement au niveau des communes de la zone d'influence ❖ Manque de cohérence entre les plans d'action communaux (PAC) et le plan de développement régional (PDR) ❖ Manque de coordination et de communication entre les gestionnaires et les acteurs locaux dans le cadre d'une gestion intégrée des zones côtières

Tableau VIII-7: Analyse SWOT de l'écosystème lagune de Marchica et sa zone d'influence (Opportunités et Menaces).

Opportunités	Menaces
❖ Plan de gestion de la lagune de Marchica ❖ Existence des programmes PNAM, PNDM et MVDIH ❖ Plan de Développement Régional (PDR) ❖ Schéma Régional d'Aménagement Territoriale (SRAT) ❖ PAC de la commune Arekmane intègre la GIZC et les principes de développements durables dans le cadre du projet GIZC / FEM - Banque Mondiale ❖ Plan directeur provincial des déchets ménagers en cours de finalisation ❖ Plan d'aménagement aquacole en cours de finalisation ❖ Installation des récifs artificiels ❖ Installation de fermes d'algoculture ❖ Installation des fermes de conchyliculture ❖ Développement des circuits écotouristiques ❖ Présence des ONG et associations environnementales ❖ Education environnementale	❖ Insuffisance du taux de raccordement des eaux usées ❖ Existence de point noir de rejets des eaux usées sans traitement au niveau de la lagune ❖ Plusieurs unités industrielles installées avant la loi des EIE et n'ayant de système de prétraitement préalable ❖ Rejets des eaux usées de certaines unités industrielles sans traitement dans des fosses septiques ou dans les oueds ❖ Pollution par les déchets solides à travers les oueds ❖ Pollution de l'air notamment par les particules en suspension ❖ Impact des sites miniers abandonnés sans réhabilitation environnementale à travers le lessivage en période pluviale ❖ Impact de la pollution agricole à travers le lessivage des nutriments, les métaux lourds et les pesticides ❖ Problème d'eutrophisation de la lagune ❖ Rejets des hydrocarbures et des huiles usagées des barques de pêches au niveau de la lagune ❖ Biodiversité menacée par les changements globaux ❖ Manque de contrôle et d'infraction

Cette analyse environnementale SWOT montre qu'il s'agit d'un écosystème riche et diversifié, avec de nombreux atouts, mais toujours soumis aux impacts négatifs de son bassin versant, malgré les nombreux efforts de restauration réalisés. L'analyse montre aussi que malgré l'existence de plusieurs programmes notamment le plan de développement régional (PDR), les plans de développement communaux (PAC) et le programme de l'Agence pour l'Aménagement du site de la lagune Marchica, ces programmes ne coordonnent pas leurs actions en matière de protection de la lagune Marchica. La deuxième faiblesse qui se dégage est la non prise en compte de la dimension spatiale "bassin versant- lagune" dans la gestion de la Marchica. Par conséquent, pour protéger cet écosystème paralique, les gestionnaires des zones côtières doivent participer à la planification des activités et au développement des politiques afférents aux bassins versants côtiers, comme recommandé dans le guide introductif : « Vers une gestion écosystémique des zones marines et côtières » (PNUE, 2015). Une attention particulière devra donc être portée, au cours de la prochaine décennie, à des actions de restauration en amont de lagune notamment dans sa zone d'influence, afin d'être en accord avec l'intégration spatiale préconisée dans le Protocole GIZC.

V.2. Le suivi de l'état environnemental de la Marchica

Il s'agit ici de rappeler les actions qui militent en faveur de la GIZC sur le long terme et notamment la création de l'Observatoire Marchica et le développement d'indicateurs environnementaux. En effet, depuis la création de l'Observatoire Marchica par la Fondation Mohammed VI pour la protection de l'Environnement en 2012, et dans le cadre du plan global de dépollution et de protection de la lagune de Nador, une batterie d'indicateurs a été développée afin de faire le suivi de l'état environnemental et garantir un développement socio-économique et culturel durable autour de la lagune de Marchica ; Ces indicateurs ont été élaborés sur une base éminemment participative et concertée entre tous les membres de l'Observatoire Marchica pour répondre à 4 principaux objectifs (Fondation Mohammed VI pour la Protection de l'Environnement, 2013b) :

1. Informer sur l'état de la biodiversité et des écosystèmes de la lagune (Indicateurs d'état).
2. Documenter les pressions exercées sur la lagune influençant sa santé environnementale (Indicateur de pressions et forces motrices).
3. Documenter les conséquences d'une dégradation ou amélioration de l'état de la lagune sur les services écologiques (Indicateurs d'impact).
4. Suivre la mise en place des efforts d'amélioration de l'état de la lagune dans le cadre du plan de gestion (Indicateurs de réponse).

L'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (RMC) en France a hébergé les premiers indicateurs de l'Observatoire Marchica sur sa plateforme de données Medtrix (<https://plateforme.medtrix.fr>) gérée et coordonnée par son partenaire Andromède océanologie. Les principaux indicateurs se rapportent aux « Poissons », « Herbiers », « Benthos », « Paramètres physico-chimiques », « Nutriments », « Eléments traces métalliques », (<https://plateforme.medtrix.fr>). Ces trois derniers indicateurs ont fait l'objet de suivi dans le cadre de ce travail de recherche durant les années 2017 et 2018 et les résultats de 2017 ont été hénégés sur la plateforme de medtrix (Annexes 1 et 2). L'accès aux données est consultable sur internet en s'inscrivant sur cette plateforme.

Afin de situer l'écosystème lagune de Marchica et sa zone d'influence dans un contexte régional, national et international, certains indicateurs de l'Observatoire Marchica ont été révisés durant l'année 2019 dans le cadre du projet SEIS II SUD lancé par l'Agence Européenne pour l'Environnement. Ce projet vise la contribution à la réduction de la pollution marine en Méditerranée, à travers le développement d'un Système de Partage d'Informations sur l'Environnement (SEIS), encourageant ainsi la production régulière et le partage de données environnementales fiables ([Département de l'Environnement, 2019a](#)). Ce projet est par ailleurs en cohérence avec la stratégie nationale de développement durable (SNDD), le système d'information régionale de l'environnement et du développement durable (SIREDD), et les objectifs du développement durable (ODD). Les indicateurs révisés permettent d'alimenter la base de données du système d'information régional de développement durable (SIREDD) Oriental Maroc (<https://siredd.environnement.gov.ma/oriental>), la plateforme Medtrix France et la plateforme Système d'Information et Base de Données du projet SEIS SUD II.

VI. Conclusion

L'évaluation des expériences GIZC sur le littoral méditerranéen oriental du Maroc, y compris la lagune de Marchica, a permis de souligner que ces expériences, bien que réalisées sous forme de projets à durée limitée, dans le cadre d'une coopération internationale, ont permis d'instaurer les fondements de base de la GIZC. Elles ont également contribué à la concrétisation d'une vision stratégique de gestion intégrée des zones côtières au Maroc. L'étude de cas de l'écosystème Marchica et sa zone d'influence, a montré que malgré les efforts de restauration réalisés dans la lagune durant la dernière décennie, celle-ci continue de recevoir les polluants telluriques en provenance de son bassin versant ; Il est par conséquent clair, que sans des mesures de remédiation dans l'ensemble de la zone d'influence de la lagune, cette dernière ne peut être réhabilitée et protégée durablement.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude, consacrée à l'évaluation environnementale intégrée de la Marchica, nous tenterons de faire ressortir les principaux résultats et enseignements acquis tout au long de ce travail de recherche. Nous rappellerons d'abord le contexte et les objectifs de ce travail, ensuite nous présenterons les principaux résultats des travaux de terrain et de laboratoire, et enfin nous proposerons des recommandations avec la gestion intégrée des zones côtières, comme approche la plus appropriée pour accompagner la transition de la lagune vers un état écologique plus durable et plus résilient aux changements globaux.

I. Rappel du contexte et principaux objectifs de recherche de la thèse

La majorité des travaux de recherche concernant l'évaluation environnementale de la lagune de Marchica ont été focalisés sur la caractérisation des eaux et des sédiments lagunaires, et n'ont généralement pas intégré le bassin versant de cette lagune, à l'exception de quelques études réalisées avant sa restauration. Toutefois, les résultats de surveillance du programme MEDPOL ont montré que l'état des principaux oueds du bassin versant de la Marchica est médiocre à dégradé, ce qui risque d'impacter négativement la lagune de Marchica, d'où la nécessité de réaliser régulièrement une évaluation environnementale de cet écosystème, notamment dans le cadre des changements globaux incluant les actions de restauration et les changements climatiques. Concernant la qualité de l'air, aucune étude n'a été réalisée au niveau de l'écosystème de la Marchica et son bassin versant ni avant ni après les actions de restauration. C'est dans ce cadre que s'inscrit le travail de recherche de cette thèse qui vise à réaliser une évaluation environnementale globale de l'écosystème de Marchica et son bassin versant à travers la caractérisation des trois compartiments : Eau, Sédiment et Air durant les années 2016, 2017 et 2018.

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention de partenariat entre la Faculté des Sciences de Rabat, l'Institut National de Recherche Halieutique, le Centre National de l'Energie, des Sciences et des Techniques Nucléaires et le Département de l'Environnement / Laboratoire National des Etudes et de la Surveillance de la Pollution. Cette collaboration multipartite illustre déjà notre vision de l'intégration, telle que préconisée par la GIZC. Ce cadre partenarial permet également d'accompagner la mise en place de l'Observatoire Marchica, afin de 'monitorer' l'état de l'environnement de l'écosystème et de renseigner certains indicateurs écologiques durant la dernière décennie 2010 -2020, et ce conformément aux engagements du Maroc à la Convention de Barcelone et ses protocoles.

II. Principaux résultats de l'évaluation environnementale de la lagune de Marchica et sa zone d'influence

Lagune de Marchica

L'évaluation de la qualité des eaux superficielles de la lagune a montré que l'état environnemental dépend des variations spatio-temporelles des apports de son bassin versant. La variation des concentrations des nutriments et la variation des concentrations des éléments majeurs et traces des eaux de surface de la lagune après restauration ont montré :

- ❖ Une forte amélioration de l'oxygène dissous durant les quatre campagnes (humides et sèches) des années 2017 et 2018 à l'exception de la station recevant les rejets de la STEP du Grand Nador et ce par rapport à son état environnemental avant la réalisation des actions de restauration ;

- ❖ Une nette amélioration des concentrations en nitrates et des concentrations en orthophosphates durant les deux campagnes de l'année 2017 au niveau de la lagune à l'exception de la station recevant les rejets de la STEP du Grand Nador, et ce par rapport à son état environnemental avant la réalisation des actions de restauration ;
- ❖ Des valeurs élevées en ammonium durant la saison sèche par rapport à la saison humide durant l'année 2017 au niveau de la lagune ;
- ❖ Les concentrations moyennes en Pb, Cd, Cr, Zn et Mn durant les saisons humides et sèches des années 2017 et 2018 sont inférieures aux normes USEPA 2016 concernant la préservation de la vie aquatique en eau salée. Tandis que les concentrations moyennes en Ni et Cu étaient plus élevées par rapport à ces normes. Les concentrations totales moyennes de Cr analysées durant les deux années sont inférieures à la valeur guide de l'USEPA 2016 concernant le Cr (VI). Les concentrations en Ni, Cu, Cr et Zn enregistrées dans cette étude sont très supérieures par rapport à celles enregistrées avant la restauration de la lagune ;
- ❖ L'analyse en composante principale (ACP) des concentrations en éléments majeurs et traces des eaux superficielles a montré des résultats similaires aux études réalisées avant la restauration ; à savoir l'existence de corrélations positives entre Fe et Mn et des corrélations positives entre Ni, Cu et Cr suggérant ainsi, qu'en plus des sources géologiques, ces éléments pourraient provenir de sources anthropiques, telles que le lessivage de la mine de fer abandonnée, les effluents industriels et le ruissellement agricole enrichi en engrais chimiques et en pesticides.

L'évaluation environnementale de la qualité des sédiments superficiels de la lagune durant la saison humide et la saison sèche de l'année 2018, à travers l'analyse multivariée et l'évaluation du risque écotoxicologique des ETM dans les sédiments, a révélé une contamination de la lagune par le plomb, le zinc et le cuivre. La distribution de l'indice de risque biologique révèle que quatre zones de la lagune peuvent présenter une forte probabilité de toxicité, constituant ainsi des zones de risque potentiel pour les organismes aquatiques (Hot Spot) :

- ❖ Deux zones eutrophisées : au niveau d'Arekmane durant la saison humide caractérisée par une pollution en zinc et au niveau de Béni Ensar durant la saison sèche caractérisée par une pollution en plomb, où le temps de renouvellement des eaux est plus lent par rapport aux autres zones de la lagune, facilitant ainsi l'accumulation des polluants au niveau des sédiments ;
- ❖ La zone proche de la nouvelle passe située à côté de la digue sur la rive du cordon dunaire côté Béni Ensar durant la saison humide caractérisée par une pollution en zinc. Cette zone est caractérisée par sa proximité des sites de pêches et dont le temps de renouvellement des eaux est lent par rapport aux autres zones ;
- ❖ La zone d'embouchure d'oued Selouane durant la saison humide caractérisée par une pollution en plomb, acheminant les eaux usées traitées de la STEP d'Al Aroui et les eaux de certaines activités industrielles des communes de Selouane et Al Aroui.

Concernant le COT des sédiments superficiels durant les deux saisons de l'année 2018, les résultats ont montré que les concentrations les plus élevées ont été enregistrées sur le cordon dunaire côté Béni Ensar. La distribution du COT dans la lagune montre une amélioration par rapport à l'état environnemental avant la restauration.

Zone d'influence de la lagune de Marchica

Les résultats d'analyse des éléments majeurs et traces dans les eaux superficielles du bassin versant de la lagune de Marchica, durant les deux années d'étude, montrent que l'état des oueds varie entre qualité moyenne, bonne et excellente, comparé aux normes nationales de qualité des eaux de surfaces. La caractérisation des paramètres in situ a montré que les valeurs minimales de la conductivité électrique, d'oxygène dissous, de pH et de salinité ont été enregistrées au niveau des rejets de la STEP du Grand Nador, et ce durant les deux saisons de l'année 2017. Ces rejets ont été aussi caractérisés par une turbidité très élevée durant la saison humide permettant de conclure probablement à un état de dysfonctionnement de la STEP du Grand Nador. Des valeurs minimales d'oxygène (<5) ont été aussi enregistrées au niveau de :

- ❖ L'intersection des oueds Ouchen et Akhandouk durant la saison humide en 2017 et durant les deux saisons en 2018 ;
- ❖ D'oued Affelioun et d'oued Cabaillo durant la saison sèche en 2017 ;
- ❖ D'oued Lhdara durant la saison sèche en 2018.

La caractérisation des nutriments durant l'année 2017 réalisée en comparant les résultats aux normes nationales de qualité des eaux de surfaces (2002) a montré que les eaux superficielles des oueds Ouchen et Akhandouk sont caractérisées par une mauvaise qualité pour l'ammonium et une très mauvaise qualité pour l'orthophosphate. Quant aux eaux superficielles des oueds Cabaillo et Lhdara, elles sont caractérisées par une mauvaise qualité tant pour l'ammonium que pour l'orthophosphate. Pour les Nitrates, les résultats varient entre une bonne et excellente qualité pour tous les oueds.

Pour la station d'épuration des eaux usées (STEP) du Grand Nador, les résultats obtenus ont été comparés aux valeurs limites générales marocaines de rejet dans les eaux de surface et eaux souterraines (2013) ; ils ont révélé des valeurs inférieures pour les éléments majeurs et traces durant les deux années 2017 et 2018.

L'évaluation environnementale de la qualité des sédiments du bassin versant de la Marchica durant l'année 2018 a révélé durant la saison humide et la saison sèche une contamination par le plomb dans tous les oueds étudiés. La zone d'influence nord-ouest du bassin versant (oueds Ouchen et Akhandouk) et l'oued Cabaillo, caractérisé par le drainage en période pluviale des rejets miniers abandonnés de fer, sont les plus pollués en zinc et en cuivre.

Quant à la qualité de l'air, les résultats des trois campagnes d'échantillonnage (2016, 2017 et 2018) ont montré que les concentrations de polluants gazeux étaient inférieures aux valeurs limites nationales de protection de la santé. Pour les $PM_{2,5}$ et les PM_{10} , les valeurs moyennes des facteurs d'enrichissement (EF) ont montré un enrichissement modéré pour Ni, Cr, P, Ca, Cu et Pb ; et qu'une proportion significative du zinc a été identifiée à une source non crustale et se réfère à un élément enrichi au niveau de la ville de Nador. Les facteurs d'enrichissement les plus élevés ont été attribués au zinc, cuivre et plomb indiquant qu'il s'agit des principaux éléments toxiques anthropiques dans l'air de la ville de Nador. La variation du carbone suie dans les particules fines a indiqué que la contribution de la combustion de la biomasse était significative par rapport aux combustibles fossiles.

III. Recommandations

L'écosystème Lagune de Marchica et sa zone d'influence recèle des potentialités naturelles et économiques diversifiées et très importantes. Toutefois, les secteurs productifs notamment l'industrie, l'agriculture, la pêche et le secteur minier n'ont pas été accompagnés par des

mesures adéquates de protection de l'environnement et du développement durable. Ainsi, suite à l'évaluation environnementale de cet écosystème, réalisée dans le cadre de ce travail de recherche, et afin de le protéger contre toute forme de pollution, il est recommandé la mise en œuvre des actions suivantes :

1. La réhabilitation environnementale des sites miniers de fer à la commune d'Iksane, exploités intensivement et abandonnés et qui constituent des impacts négatifs sur la lagune de Marchica à travers le lessivage en période pluviale.
2. La mise à niveau environnementale du secteur industriel notamment les unités installées avant la loi 12-03 des études d'impact sur l'environnement basée sur l'installation de système de prétraitement des rejets industriels avant leur émission dans le milieu naturel.
3. L'accompagnement des agriculteurs pour l'utilisation rationnelle des pesticides et engrais en agriculture afin de minimiser le lessivage des métaux lourds et d'autres polluants vers la lagune de Marchica et leur encouragement à l'utilisation de l'agriculture bio au niveau de la zone d'influence de la lagune.
4. L'extension du réseau d'assainissement et le raccordement des communes non encore raccordées au niveau de la zone d'influence de la lagune de Marchica dans le cadre du programme PNAM. Les futurs STEPs dans cette zone devraient être conçus avec une déviation des rejets à l'extérieur de la lagune afin de minimiser les risques de rejet des eaux usées sans traitement préalable lors des périodes de dysfonctionnement.
5. La réalisation des opérations de contrôle des rejets des déchets solides dans les oueds qui déversent dans la lagune de Marchica.
6. La réalisation des opérations de contrôle au niveau de la lagune de Marchica au profit des barques de pêche pour vérifier leur rejet notamment en huiles usagées.
7. La sensibilisation et communication pour le respect environnemental du site Ramsar.

En termes de législation nationale, le Maroc ne dispose pas encore de normes de qualité des eaux de surface du milieu marin. Les autorités compétentes sont invitées à l'élaboration de ces normes pour pouvoir procéder à une évaluation environnementale adaptée au contexte national.

La dernière décennie a été caractérisée par la ratification du protocole GIZC méditerranéen en 2011, la promulgation de la loi nationale du littoral 81-12 en 2015 et l'approbation du plan national du littoral en 2019. L'évaluation environnementale de la lagune de Marchica et sa zone d'influence a montré que les efforts réalisés en matière de dépollution et de restauration, durant la dernière décennie, ont permis d'améliorer la gestion des eaux usées et la gestion des déchets solides. Toutefois, la lagune n'est pas totalement préservée de la pollution véhiculée par les oueds de son bassin versant, notamment la pollution en nutriments et la pollution chimique ; nous incitant à conclure que toute gestion de la lagune sans la prise en considération de sa zone d'influence dans le cadre d'une approche GIZC ne peut aboutir à un développement durable de cet écosystème.

Enfin, afin de garantir un développement durable de la lagune de Marchica, il est recommandé l'élaboration d'un projet de contrat de gestion entre le gestionnaire principal : l'Agence pour l'Aménagement du site de la lagune Marchica et les communes de la zone d'influence de cette lagune, qui établit un planning d'actions de restauration durant la décennie en cours (2020-2030), dans le cadre d'une approche GIZC.

IV. Perspectives de recherche scientifique

En termes de perspective de recherche scientifique, il serait important de compléter ce travail de recherche par les études environnementales suivantes :

1. La caractérisation des éléments traces métalliques dans la composition du fond géochimique de la zone d'étude notamment au niveau des zones non polluées, dont les résultats vont permettre d'établir les valeurs de références du fond local (Local Background Values, LBV) pour les futurs travaux de recherche.
2. La réalisation d'un monitoring annuel de la lagune dans le cadre d'une collaboration entre le gestionnaire principal (Agence pour l'Aménagement du site de la lagune Marchica) et les partenaires scientifiques ;
3. La réalisation d'évaluation environnementale prenant en considération d'autres polluants qui n'ont pas été caractérisés dans le cadre de ce travail de recherche tel que les pesticides organochlorés (POC), les polychlorobiphényles (PCBs), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les microplastiques.
4. L'étude de la pollution tellurique sur le volet biote de la lagune de Marchica à travers la caractérisation des ETM, des POC, PCBs, HAP et des microplastiques dans le biote notamment les produits conchyliques de la lagune.
5. L'étude des déchets marins au niveau de la lagune de Marchica et les plages qui l'entourent.
6. Approfondir le travail sur la qualité de l'air mené dans le cadre de cette thèse en réalisant un suivi annuel notamment de la pollution industrielle à travers la caractérisation des gaz, des particules en suspension et leur contamination chimique ; et par la suite, la mise en place d'au moins de deux stations de surveillance de la qualité de l'air dans le cadre du programme PNAir (qualité de l'air urbain et qualité de l'air industriel) avec évaluation et contrôle des activités qui génèrent la pollution de l'air.
7. Impliquer les sciences sociales et économiques, afin de pousser plus loin l'intégration disciplinaires et comprendre les interactions et rétro-actions des impacts cumulatifs.
8. Compléter cette évaluation en intégrant les impacts attendus du changement climatique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Affian, K.; Robin, M.; Maanan, M.; Digbehi, B.; Djagoua, E.V. (2009).** Kouamé, F. Heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons in Ebrié lagoon sediments, Côte d'Ivoire. *Environ. Monit. Assess.*, 159, 531–541.
- Agence pour l'Aménagement du Site de la Lagune Marchica (2010).** Available online : <http://www.agencemarchica.gov.ma/>.
- Agence du bassin hydraulique de la Moulouya (ABHM) (2009).** Étude de protection du Grand Nador contre l'inondation. Rapport, 150 p.
- Aknaf, A., Akodad, M., Layachi, M., El Madani, F., Jaddar, A., Mesfioui, A., & Baghour, M. (2017a).** Study of the spatial and temporal variation of physical-chemical parameters characterizing the quality of surface waters of the lagoon Marchica–North-East Morocco. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 8(9), 3216-3225.
- Aknaf, A.; Akodad, M.; Hmeid, H.A.; Layachi, M.; Mesfioui, A.; Andich, K.; Baghour, M (2017b).** Granulometric Analysis and Environment of Deposits of Surface Sediments of the Marchica Lagoon (North-East of Morocco). In *Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration*; Springer: Cham, Switzerland; pp. 1677-1678.
- Aknaf, A., Akodad, M., Layachi, M., Baghour, M., Aknaf, A., Akodad, M. & Oudra, B. (2018).** Metal contamination of sediments in the Marchica lagoon (North-East Morocco): An ecotoxicological diagnostic. *SMETox Journal*, 1(2), 123-127.
- Allouche, N., Maanan, M., Gontara, M., Rollo, N., Jmal, I., Bouri, S. (2017).** A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. *Environ. Model. Softw.* 88, 168–182. Alloway, B.J., 2013. Sources of heavy metals and metalloids in soils. In: *Heavy Metals in Soils*. Springer, Dordrecht, pp. 11–50.
- Alloway, B. J. (2013).** Sources of heavy metals and metalloids in soils. In *Heavy metals in soils* (pp. 11-50). Springer, Dordrecht.
- ANDA/INRH (2018).** Agence Nationale de Développement d'Aquaculture/Institut National de la Recherche Halieutique, Etude pour la réalisation d'un plan d'aménagement et de développement de l'aquaculture au niveau de la lagune de Nador.
- Andrews, J. E., Samways, G., & Shimmield, G. B. (2008).** Historical storage budgets of organic carbon, nutrient and contaminant elements in saltmarsh sediments: Biogeochemical context for managed realignment, Humber Estuary, UK. *Science of the total environment*, 405(1-3), 1-13.
- Arditsoglou A and Samara C (2005).** Levels of total suspended particulate matter and major trace elements in Kosovo: a source identification and apportionment study. *Chemosphere* 59(5):669-678.
- Arienzo, M., Masuccio, A. A., & Ferrara, L. (2013).** Evaluation of sediment contamination by heavy metals, organochlorinated pesticides, and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Berre coastal lagoon (southeast France). *Archives of environmental contamination and toxicology*, 65(3), 396-406.
- Arnold, Craig Anthony (2010).** "Adaptive Watershed Planing and Climate Change." *Envtl. & Energy L. & Pol'y J.* 5: 417.

- Ashayeri, N.Y., Behnam, K. (2019).** Geochemical characteristics, partitioning, quantitative source apportionment, and ecological and health risk of heavy metals in sediments and water: A case study in Shadegan Wetland. *Iran. Mar. Pollut. Bull.* 149, 110495
- Atzori, G., Aru, V., Cesare Marincola, F., Chiarantini, L., Medas, D., Sarais, G., & Cabiddu, S. (2018).** Sediments distribution of trace metals in a coastal lagoon (Southern Sardinia, Mediterranean Sea): Assessment of contamination and ecological risk. *Chemistry and Ecology*, 34(8), 727-746.
- Ayrault S, Senhou A, Moskura M and Gaudry A. (2010).** Atmospheric trace element concentrations in total suspended particles near Paris, France. *Atmos Environ* 44(30):3700–3707.
- Azdimousa, A., & Bourgois, J. (1993).** Les communications entre l'Atlantique et la Méditerranée par le couloir sud-rifain du Tortonien à l'Actuel: stratigraphie séquentielle des bassins néogènes de la région du cap des Trois Fourches (Rif Oriental, Maroc). *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 17(2), 233-240.
- Azougay, A., El Hamdouni, R., Rezqi, H., Oujidi, M., Chourak, M., & Chaaraoui, A. (2020).** Geotechnical characterization of the Marchica Lagoon Site (Nador, Northeastern Morocco) and detection of potential problems. *Indian Geotechnical Journal*, 50(6), 1006-1023.
- Barhoumi, B.; Elbarhoumi, A.; Clérandeau, C.; Al-Rawabdeh, A.M.; Atyaoui, A.; Touil, S.; Cachot, J. (2016).** Using an integrated approach to assess the sediment quality of an Mediterranean lagoon, the Bizerte lagoon (Tunisia). *Ecotoxicology*, 25, 1082–1104.
- Barik, S.S.; Prusty, P.; Singh, R.K.; Tripathy, S.; Farooq, S.H.; Sharma, K. (2020).** Seasonal and spatial variations in elemental distributions in surface sediments of Chilika Lake in response to change in salinity and grain size distribution. *Environ. Earth Sci.*, 79, 1–18.
- Barnes, R.S.K. (1980).** Coastal Lagoons, Vol. 1. CUP Archive.
- Bazairi et Niazi, (2012).** Note Synthétique sur la pollution dans la Lagune de Nador (Mar Chica) : Eléments Pour l’observatoire de l’environnement. Le projet d’appui à la mise en œuvre d’un plan global de dépollution et de protection de la lagune de Nador.
- Bazairi (2021).** Potentialités de restauration écologique au Maroc. Site pilote de la lagune de Marchica. Webinaire : La restauration écologique, qu’est-ce que c’est ?
- Benchrif, A., Guinot, B., Bounakhla, M., Cachier, H., Damnati, B., Baghdad, B. (2018).** Aerosols in Northern Morocco: Input pathways and their chemical fingerprint. *Atmospheric Environment*, 174, 140-147.
- Benetello, F., Squizzato, S., Masiol, M., Khan, M. B., Visin, F., Formenton, G., Pavoni, B. (2018).** A procedure to evaluate the factors determining the elemental composition of PM 2.5. Case study: The Veneto region (northeastern Italy). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(4), 3823-3839.
- Bennett, J. E., Tamura-Wicks, H., Parks, R. M., Burnett, R. T., Pope III, C. A., Bechle, M. J., Marshall, J. D., Danaei, G., Ezzati, M. (2019).** Particulate matter air pollution and national and county life expectancy loss in the USA: A spatiotemporal analysis. *PLoS medicine*, 16(7), e1002856.

- Billé, R. (2006).** Gestion intégrée des zones côtières : quatre illusions bien ancrées. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 7(3).
- Blomqvist, S., Larsson, U., & Borg, H. (1992).** Heavy metal decrease in the sediments of a Baltic Bay following tertiary sewage treatment. *Marine Pollution Bulletin*, 24(5), 258-266.
- Bloundi, M.K., (2005).** Etude géochimique de la lagune de Nador (Maroc oriental): Impacts des Facteurs Anthropiques. Ph.D. Thesis, Université Mohamed V-Agdal, Rabat, Morocco.
- Bloundi, M. K., Duplay, J., & Quaranta, G. (2009).** Heavy metal contamination of coastal lagoon sediments by anthropogenic activities: the case of Nador (East Morocco). *Environmental Geology*, 56(5), 833-843.
- Blott, S. J., & Pye, K. (2001).** GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth surface processes and Landforms*, 26(11), 1237-1248.
- Bodor, Z., Bodor, K., Keresztesi, Á., Szép, R. (2020).** Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM 10 in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania). *Environmental Science and Pollution Research*, 27(30), 38181-38199.
- Boffetta, P. and Nyberg, F. (2003).** Contribution of environmental factors to cancer risk. *British medical bulletin*, 68(1), 71-94.
- Bohn, B. A., & Kershner, J. L. (2002).** Establishing aquatic restoration priorities using a watershed approach. *Journal of Environmental Management*, 64(4), 355-363.
- Bouabdellah, Mohammed, et al. (2012).** Les mines des Beni Bou Ifrou-Ouixane (Rif Oriental): un district ferrugineux néogène de type skarns The Beni Bou Ifrou-Ouixane mines (Eastern Rif), Neogene Skarn Type Iron Deposits. 357-362.
- Bouabdellah, M., Jabrane, R., Margoum, D., & Sadequi, M. (2016).** Skarn to porphyry-epithermal transition in the Ouixane Fe District, Northeast Morocco: interplay of meteoric water and magmatic-hydrothermal fluids. In *Mineral Deposits of North Africa* (pp. 201-225). Springer, Cham.
- Bouchnan, Rachid, Mina Amharref, and Abdes Samed Bernoussi (2014).** "Dynamic Vulnerability: Application to the Bou-Areg Aquifer (Morocco)." *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology (IOSR-JESTFT)* 8.12 (2014): 72-79.
- Bouh, H. A., Benyaich, F., Bounakhla, M., Noack, Y., Tahri, M., Zahry, F. (2013).** Variations Saisonnières des particules atmosphériques et ses composants chimiques dans la Ville de Meknès-Maroc (Seasonal variations of the atmospheric particles and its chemical components in Meknes city-Morocco). *J. Mater. Environ. Sci.* 4 (1) 49-62.
- Bounakhla, M., Zghaid, M., Zahry, F., Tahri, M., Benyaich, F., Noack, Y., Benkirane, O., Saidi, N. (2009).** Assessment of air pollution in the city of Kenitra Evaluation de la pollution atmosphérique de la ville de Kénitra.

- Boutahar, L., Maanan, M., Bououarour, O., Richir, J., Pouzet, P., Gobert, S., & Bazairi, H. (2019).** Biomonitoring environmental status in semi-enclosed coastal ecosystems using *Zostera noltei* meadows. *Ecological Indicators*, 104, 776-793.
- Boyauzan Amal, and Zoulikha Irzi (2015).** "Effets des aménagements sur les dynamiques morphosédimentaires de l'île barrière de la lagune Nador (Nord-Est du Maroc, région de l'Oriental)." *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens/Journal of Mediterranean geography* 125 (2015): 85-94.
- Bradl, H.B. (2004).** Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *J. Colloid Interface Sci.* 277 (1), 1–18.
- Bruland, K. W., Bertine, K., Koide, M., & Goldberg, E. D. (1974).** History of metal pollution in southern California coastal zone. *Environmental Science & Technology*, 8(5), 425-432.
- Bussière, Bruno (2010).** "Acid mine drainage from abandoned mine sites: problematic and reclamation approaches." *Advances in Environmental Geotechnics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. 111-125.
- Cadmus, P., Brinkman, S. F., & May, M. K. (2018).** Chronic toxicity of ferric iron for North American aquatic organisms: Derivation of a chronic water quality criterion using single species and mesocosm data. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 74(4), 605-615.
- Castillo, M. A., Trujillo, I. S., Alonso, E. V., de Torres, A. G., & Pavón, J. C. (2013).** Bioavailability of heavy metals in water and sediments from a typical Mediterranean Bay (Málaga Bay, Region of Andalucía, Southern Spain). *Marine pollution bulletin*, 76(1-2), 427-434.
- Cataudella, S., Crosetti, D., & Massa, F. (2015).** Mediterranean coastal lagoons: sustainable management and interactions among aquaculture, capture fisheries and the environment. *General Fisheries Commission for the Mediterranean. Studies and Reviews*, (95), I.
- Chaoui M., (1999).** Evaluation des apports telluriques au niveau du littoral méditerranéen des villes de Nador et d'Al-Hoceima. Thèse Doc. 3ème cycle, Univ. Chouaib Doukali. Fac des Sciences, El Jadida, 116 p.
- Cheng, Y., He, K. B., Du, Z. Y., Zheng, M., Duan, F. K., Ma, Y. L. (2015).** Humidity plays an important role in the PM_{2.5} pollution in Beijing. *Environmental pollution*, 197, 68-75.
- Chifflet, S., Amouroux, D., Bérail, S., Barre, J., Van, T. C., Baltrons, O., Brune, J., Dufour, A., Guinot, B., Mari, X. (2018).** Origins and discrimination between local and regional atmospheric pollution in Haiphong (Vietnam), based on metal (loid) concentrations and lead isotopic ratios in PM₁₀. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(26), 26653-26668.
- Cholakian, A., Colette, A., Coll, I., Ciarelli, G., Beekmann, M. (2019).** Future climatic drivers and their effect on PM₁₀ components in Europe and the Mediterranean Sea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(7), 4459-4484.
- Cicin-Sain, B., Knecht, R. W., Knecht, R., Jang, D., & Fisk, G. W. (1998).** Integrated coastal and ocean management: concepts and practices. Island press.

- Clarke, K. R., & Gorley, R. N. (2006).** PRIMER v6: User Manual/Tutorial. PRIMER-E, Plymouth, 192 pp. the text.
- Cloern, J.E. (2001).** Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 210, 223–253. doi:10.3354/meps210223.
- Covich, A, P., M, C, Austen, F, Ba" Rlocher, E, Chauvet, B, J, Cardinale, C, L, Biles, P, Inchausti, O, Dangles, M, Solan, M, O, Gessner, B, Statzner, And B, Moss. (2004).** The Role of Biodiversity in the Functioning of Freshwater and Marine Benthic Ecosystems. *BioScience*, 54(8), 767-775.
- Cramer, W., Guiot, J., & Marini, K. (2019).** Les risques liés aux changements climatiques et environnementaux dans la région Méditerranée. Une évaluation préliminaire par le réseau MedECC. L’interface science-décideurs – 2019.
- Cramer Wolfgang, Guiot Joel , Marini Katarzyna , Azzopardi Brian , Balzan Mario V, Cherif Semia , Doblas-Miranda Enrique , José Palma Lampreia Dos Santos Maria, Drobinski Philippe, Fader Marianela, El Rahman Hassoun Abed , Giupponi Carlo, Koubi Vassiliki, Lange Manfred, Lionello Piero, Carmen Llasat Maria, Moncada Stefano , Mrabet Rachid , Paz, Robert Savé Shlomit, Snoussi Maria, Toreti Andrea, T. Vafeidis Athanasios, Xoplaki Elena (2021).** MedECC 2020 Summary for Policymakers (Doctoral dissertation, Mediterranean Experts on Climate and Environmental change).
- Cuttelod, A., Garcia, N., Malak, D.A., Temple, H.J., Katariya, V., (2009).** The Mediterranean: a biodiversity hotspot under threat. In: Vie, J.-C., Hilton-Taylor, C., Stuart, S.N. (Eds.), *Wildlife in a Changing World: An Analysis of the 2008 IUCN Red List of Threatened Species*. International Union for Conservation of Nature, Gland, Switzerland.
- Dakki, M, (2003).** Diagnostic pour l’aménagement des zones humides du nord-est du Maroc: Sebkhia Bou Areg (lagune de Nador). In *MedWetCoast project Morocco, final report*, UNEP/Secr. Etat Env./Départ. Eaux & Forêt, Maroc, 55pp.
- Dakki, M., El Agbani, M. A., & Qninba, A. (Eds.) (2011).** Zones humides du Maroc inscrites jusqu'en 2005 sur la liste de la Convention de Ramsar. Institut Scientifique.
- Das, R., Khezri, B., Srivastava, B., Datta, S., Sikdar, P. K., Webster, R. D., & Wang, X. (2015).** Trace element composition of PM_{2.5} and PM₁₀ from Kolkata—a heavily polluted Indian metropolis. *Atmospheric Pollution Research*, 6(5), 742-750.
- Daskalakis KD, O'Connor TP (1995).** Normalization and elemental sediment contamination in the coastal United States. *Environ Sci Technol* 29:470–477.
- De Groot, R.; Brander, L.; Van Der Ploeg, S.; Costanza, R.; Bernard, F.; Braat, L.; Ronald, T.K.n.e.i.b.; Van Beukering, P. (2012).** Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem services*, 1(1), 50-61.
- De Lacerda, L. D. (1994).** Biogeochemistry of heavy metals in coastal lagoons. In *Elsevier Oceanography Series* (Vol. 60, pp. 221-241). Elsevier.
- Délégation de l'Industrie, du Commerce et des Nouvelles Technologies de Nador, (2019).** Indicateurs SIREDD Oriental.

- Département de l'Environnement, (2016a).** Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement. Rapport Evaluation de la Pollution Tellurique Véhiculée vers la Méditerranée au niveau des côtes Marocaines Période 2013-2015. Programme MEDPOL pour l'évaluation et le contrôle de la pollution marine en Méditerranée, Rapport 43pp.
- Département de l'Environnement (2016b).** Ministère de l'Energie, des Mines et du Développement Durable, Projet GIZC FEM-Banque Mondiale sur le Littoral Méditerranéen Oriental du Maroc / Guide Pour l'Intégration de l'Approche GIZC dans l'Elaboration du Plan d'Action Communal (PAC).
- Département de l'Environnement, (2016c).** Ministère de l'Energie, des Mines, et de l'Environnement. Projet GIZC FEM-Banque Mondiale/Ecotourisme-SMIT.
- Département de l'Environnement (2016d).** Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement /Laboratoire National des Etudes et de Surveillance de la Pollution, Rapport Mise à jour du Bilan de Base National d'émissions/Rejets de Polluants (BBN). Programme MEDPOL pour l'évaluation et le contrôle de la pollution marine en Méditerranée, Rapport 88 pp.
- Département de l'Environnement (2019a).** Ministère de l'Energie, des Mines et de l'Environnement, Étude relative à la mise en œuvre des activités du Projet SEIS II SUD. Rapport National sur les progrès de mise en œuvre du SEIS SUD II, Maroc.
- Département de l'Environnement (2019b).** Ministère de l'Energie, des Mines et du Développement Durable, Rapport Synthèse du projet de Plan National du Littoral.
- Département de l'Environnement/LNESP (2019).** Laboratoire National des Etudes et de la Surveillance de la Pollution / Programme Surveillance et Evaluation Intégrés de la Mer et des Côtes Méditerranéennes (IMAP)/ Note Cadrage et Agenda - Mission de confirmation des sites proposés pour la révision du programme Med Pol.
- Département de l'Environnement (2020).** Ministère de l'Energie, des Mines et de l'Environnement, 4^{ème} Rapport de l'Etat de l'Environnement.
- Département de l'Environnement (2021).** Laboratoire National des Etudes et de Surveillance de la Pollution. Rapport de Surveillance de la qualité des Eaux de baignade et du sable des plages du Maroc.
- Département de l'Equipeement (2011).** Direction des ports et du Domaine Public Maritime, Maroc. Rapport concernant la réalisation d'une nouvelle passe et réaménagement de l'ancienne passe de la lagune Marchica.
- Derolez, V. (2020).** Approche dynamique et intégrée de l'évaluation d'un socio-écosystème côtier : application à la lagune de Thau, son état écologique et ses bouquets de services écosystémiques sur la période 1970-2018 (Doctoral dissertation, Université Montpellier).
- Deslous-Paoli, J. M. (1996).** Proposition de programme. Atelier: Lagunes méditerranéennes. Programme : Mise en valeur des lagunes méditerranéennes.
- De Wit, R., Leruste, A., Le Fur, I., Sy, M. M., Bec, B., Ouisse, V., ... & Rey-Valette, H. (2020).** A multidisciplinary approach for restoration ecology of shallow coastal lagoons, a case study in South France. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8, 108.
- DIN 38405- 9 (2011).** German standard methods for examination of water, waste water and sludge - Anions (group D) - Part 9: Spectrometric determination of nitrate (D 9).

- Doche, C., Dufour, G., Foret, G., Eremenko, M., Cuesta, J., Beekmann, M., Kalabokas, P. (2014).** Summertime tropospheric-ozone variability over the Mediterranean basin observed with IASI. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(19), 10589-10600.
- Dockery, D. W., Pope, C. A., Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G., Speizer, F. E. (1993).** An association between air pollution and mortality in six US cities. *New England journal of medicine*, 329(24), 1753-1759.
- Dockery, D. W. and Pope, C. A. (1994).** Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual review of public health*, 15(1), 107-132.
- Duan, K., Li, K., Liang, S., Li, Y., Su, Y., & Wang, X. (2019).** Optimizing a coastal monitoring network using a water-quality response grid (WRG)-based sampling design for improved reliability and efficiency. *Marine pollution bulletin*, 145, 480-489.
- Duarte, C. M., Wu, J., Xiao, X., Bruhn, A., & Krause-Jensen, D. (2017).** Can seaweed farming play a role in climate change mitigation and adaptation?. *Frontiers in Marine Science*, 4, 100.
- Duodu, G.O., Goonetilleke, A., Ayoko, G.A., (2016).** Comparison of pollution indices for the assessment of heavy metal in Brisbane River sediment. *Environ. Pollut.* 219, 1077–1091.
- Eisenreich, S. J., Bernasconi, C., P. Campostrini, et al. (2005).** Climate Change and the European Water Dimension. A Report to the European Water Directors 2005. EU Report No. 21553, European Commission-Joint Research Centre, Ispra, Italy, p. 253.
- El Bakkali, S. (1995).** Volcanologie et magmatologie du système du Gourougou (Rif oriental, Maroc) (Doctoral dissertation, Clermont-Ferrand 2).
- El Barjy, M., Maanan, M., Maanan, M., Salhi, F., Tnoumi, A., & Zourarah, B. (2020).** Contamination and environmental risk assessment of heavy metals in marine sediments from Tahaddart estuary (NW of Morocco). *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(1), 87-102.
- El-Batrawy, O. A., El-Gammal, M. I., Mohamadein, L. I., Darwish, D. H., & El-Moselhy, K. M. (2018).** Impact assessment of some heavy metals on tilapia fish, *Oreochromis niloticus*, in Burullus Lake, Egypt. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 79(1), 1-12.
- El Mahrar, B., Abalansa, S., Newton, A., Icely, J. D., Snoussi, M., & Kacimi, I. (2020).** Social-environmental analysis for the management of coastal lagoons in North Africa. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 37.
- El Mandour, A., El Yaouti, F., Fakir, Y., Zarhloule, Y., & Benavente, J. (2008).** Evolution of groundwater salinity in the unconfined aquifer of Bou-Areg, Northeastern Mediterranean coast, Morocco. *Environmental Geology*, 54(3), 491-503.
- El Yaouti, F., El Mandour, A., Khattach, D., Benavente, J., & Kaufmann, O. (2009).** Salinization processes in the unconfined aquifer of Bou-Areg (NE Morocco): a geostatistical, geochemical, and tomographic study. *Applied Geochemistry*, 24(1), 16-31.

- Enamorado-Báez, S. M., Gómez-Guzmán, J. M., Chamizo, E., Abril, J. M. (2015).** Levels of 25 trace elements in high-volume air filter samples from Seville (2001–2002): Sources, enrichment factors and temporal variations. *Atmospheric Research*, 155, 118-129.
- Farmer, J. G. (1991).** The perturbation of historical pollution records in aquatic sediments. *Environmental Geochemistry and Health*, 13(2), 76-83.
- Fei, X. (2004).** Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation. In *Asian Pacific Phycology in the 21st Century: Prospects and Challenges* (pp. 145-151). Springer, Dordrecht.
- Feng, X., Fu, B., Lu, N., Zeng, Y., & Wu, B. (2013).** How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. *Scientific reports*, 3(1), 1-5.
- Feng, J., Yu, H., Su, X., Liu, S., Li, Y., Pan, Y., et al. (2016).** Chemical Composition and Source Apportionment of PM_{2.5} during Chinese Spring Festival at Xinxiang, a Heavily Polluted City in North China: Fireworks and Health Risks. *Atmos. Res.* 182, 176–188.
- Fondation Mohammed VI pour la Protection de l'Environnement (2013a).** Plan de Gestion de la lagune Marchica/ Projet appui à la mise en œuvre d'un plan global de dépollution et de protection de la lagune de Nador.
- Fondation Mohammed VI pour la Protection de l'Environnement (2013b).** Indicateurs de l'Observatoire de la lagune de Marchica / Projet appui à la mise en œuvre d'un plan global de dépollution et de protection de la lagune de Nador.
- Fondation Mohammed VI pour la protection de l'Environnement (2014).** Rapport annuel 2014.
- Font, A., de Hoogh, K., Leal-Sanchez, M., Ashworth, D. C., Brown, R. J., Hansell, A. L., & Fuller, G. W. (2015).** Using metal ratios to detect emissions from municipal waste incinerators in ambient air pollution data. *Atmospheric environment*, 113, 177-186.
- Franco, A., Torricelli, P., & Franzoi, P. (2009).** A habitat-specific fish-based approach to assess the ecological status of Mediterranean coastal lagoons. *Marine pollution bulletin*, 58(11), 1704-1717.
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., & Beguería, S. (2011).** Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 121-139.
- Garnaud, B., & Rochette, J. (2012).** Rôle et limites de l'approche projet dans l'aménagement du littoral à Nador (Maroc). *Revue Tiers Monde*, (3), 169-188.
- Gee, G. W., & Or, D. (2002).** 2.4 Particle-size analysis. *Methods of soil analysis*. Part, 4(598), 255-293.
- Giorgi, F., (2006).** Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33, L08707.
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008).** Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2), pp. 90-104.

- González, I., Águila, E., & Galán, E. (2007).** Partitioning, bioavailability and origin of heavy metals from the Nador Lagoon sediments (Morocco) as a basis for their management. *Environmental Geology*, 52(8), 1581-1593.
- Gourmelon, F. (2003).** La contribution des SIG à la connaissance et à la gestion de l'environnement littoral (Doctoral dissertation, Université de Bretagne occidentale-Brest).
- Gryparis, A., Forsberg, B., Katsouyanni, K., Analitis, A., Touloumi, G., Schwartz, J., Samoli, E., Medina, S., Anderson, H. R., Niciu, E. M., Wichmann, H. E., Kriz, B., Kosnik, M., Skorkovsky, J., Vonk, J. M., Dörtbudak, Z. (2004).** Acute effects of ozone on mortality from the "air pollution and health: a European approach" project. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 170(10), 1080-1087.
- Guelorget, O., Perthuisot, J. P., Frisoni, G. F., & Monti, D. (1987).** Le rôle du confinement dans l'organisation biogéologique de la lagune de Nador (Maroc). *Oceanologica acta*, 10(4), 435-444.
- Guillemin, M., & HOUZAY, J. P. (1982).** Etudes géologiques sur la Chaîne du Rif. III: Le Néogène post-nappes et le Quaternaire du Rif nord-oriental. Stratigraphie et tectonique des bassins de Mellila, du Kert, de Boudinar et du piedmont des Kebdana. *Notes du service géologique du Maroc*, (314), 7-238.
- Hache, E. (2014).** Apport de la bande de Chappuis pour la mesure de l'ozone depuis un satellite géostationnaire pour la surveillance de la qualité de l'air (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
- Hakanson, L. (1980).** An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water research*, 14(8), 975-1001.
- Halpern, B. S., Selkoe, K. A., Micheli, F., & Kappel, C. V. (2007).** Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats. *Conservation Biology*, 21(5), 1301-1315.
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., & Watson, R. (2008).** A global map of human impact on marine ecosystems. *science*, 319(5865), 948-952.
- Hamdan, NM., Alawadhi, H., and Shameer, M. (2021).** Physicochemical Characterization and Seasonal Variations of PM10 Aerosols in a Harsh Environment. *Front. Environ. Sci.* 9:666678. doi: 10.3389/fenvs.2021.666678.
- Hamoumi N., Hourimeche A., Chafik M., Hazim M. E., Terhzaz L., Kharbaoui R., Louaya A. (2011).** Contrôle et évolution des milieux sédimentaires de la lagune de Nador (littoral méditerranéen oriental, Maroc). *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Tanger, Maroc*, pp 177-180.
- Hamoumi, N. (2012).** Le complexe lagunaire de Nador (Maroc): fonctionnement, contrôle naturel et provoqué, scénarii d'évolution future. *Revue Paralia*, 5, 5-1.
- Hayzoun (2014).** Caractérisation et quantification de la charge polluante anthropique et industrielle dans le bassin du Sebou, Thèse de doctorat, école doctorale mer et sciences, Toulon.
- HCP (2014).** Haut-commissariat au Plan, Résultats de la population l'égale issue du recensement général de la population et de l'habitat.

- HCP (2015).** Haut-Commissariat au Plan, Annuaire statistique de la Région de l'Oriental 2015.
- HCP (2017a).** Haut-Commissariat au Plan, Monographie de la province de Nador.
- HCP (2017b).** Haut-Commissariat au Plan, Annuaire statistique de la Région de l'Oriental 2017.
- HCP (2019).** Haut-Commissariat au Plan, Annuaire statistique de la Région de l'Oriental 2019.
- Henocque, Y. (2006).** Leçons et futur de la gestion intégrée des zones côtières dans le monde. *VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement*, 7(3).
- Hernandez J. & Bellon H. (1985).** Chronologie K-Ar du volcanisme Miocène du Rif oriental (Maroc) : Implications tectoniques et magmatologiques. *Rev. Géol. dyn. & Géogr. phys.*, 26, pp. 85-94.
- Hieu, N. T. and Lee, B. K. (2010).** Characteristics of particulate matter and metals in the ambient air from a residential area in the largest industrial city in Korea. *Atmospheric Research*, 98(2-4), 526-537.
- Hill, R.A., Chapman, P.M., Mann, G.S., Lawrence, G.S., (2000).** Level of detail in ecological risk assessments. *Marine Pollution Bulletin* 40, 471–477.
- Hilmi, K. (2005).** Modélisation numérique de la circulation de deux milieux paraliqes du littoral marocain : la lagune de Oualidia (Atlantique) et la lagune de Nador (Méditerranée), Thèse de doctorat. Université Hassan II Mohammedia, 186 p.
- Hilmi, K., Ahmed, M., Mohammed, I., Benyounes, A., (2015).** Circulation marine de la lagune de Nador (Maroc) par modélisation hydrodynamique. *Eur. Sci. J. ESJ* 11 (32).
- Horowitz, A. J., & Elrick, K. A. (1987).** The relation of stream sediment surface area, grain size and composition to trace element chemistry. *Applied geochemistry*, 2(4), 437-451.
- Howarth, R. J., & Nombela, M, A, (2003).** Metals in the sediments of Ensenada de San Simon (inner Ria de Vigo), Galicia, NW Spain, *Applied Geochemistry*, 18, 973–996.
- Hsu, C. Y., Chiang, H. C., Lin, S. L., Chen, M. J., Lin, T. Y., & Chen, Y. C. (2016).** Elemental characterization and source apportionment of PM10 and PM2. 5 in the western coastal area of central Taiwan. *Science of the Total Environment*, 541, 1139-1150.
- Hu, B., Cui, R., Li, J., Wei, H., Zhao, J., Bai, F., & Ding, X. (2013).** Occurrence and distribution of heavy metals in surface sediments of the Changhua River Estuary and adjacent shelf (Hainan Island). *Marine Pollution Bulletin*, 76(1-2), 400-405.
- Huang, L., Jin, Q., Tandon, P., Li, A., Shan, A., & Du, J. (2018).** High-resolution insight into the competitive adsorption of heavy metals on natural sediment by site energy distribution. *Chemosphere*, 197, 411-419.
- Hubert, B. (2014).** Atelier de Réflexion Prospective (ARP) MERMED : Adaptation aux changements environnementaux en mer Méditerranée : quelles recherches et quels partenariats ? Synthèse des fiches prospectives : Le bassin méditerranéen à l'horizon 2030 : Quels défis à relever pour la mer Méditerranée ?

- Hubert, B., & Broin, M. (2014).** Atelier de réflexion prospective MERMED. Adaptation aux changements globaux en mer Méditerranée. Rapport final.
- Ifremer, Créocéan, Université Montpellier II (2000).** Mise à jour d'indicateurs du niveau d'eutrophisation des milieux lagunaires méditerranéens. Rapport final, tomes. 196 p.
- Inani, I. (1995).** Dynamique sédimentaire et pollution dans la lagune de Nador (Doctoral dissertation, Thèse DES, Océanologie, Fac. Sci. Rabat), 184p.
- INRH/ANDA, (2018).** Institut National de la Recherche Halieutique / Agence Nationale de Développement de l'Aquaculture, Etude du Plan d'Aménagement et de Développement de l'Aquaculture dans la Lagune Marchica.
- IPCC (2013).** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pages.
- Irzi, Zoulikha (2002).** "Les Environnements du Littoral méditerranéen du Maroc compris entre l'oued Kiss et le Cap des trois Fourches dynamique sédimentaire et évolution et écologie des foraminifères benthiques de la lagune de Nador." (2002).
- ISO/TS 18507 (2015).** Analyse chimique des surfaces — Utilisation de réflexion spectroscopie des rayons X de fluorescence totale dans l'analyse biologique et de l'environnement.
- Jackson, J. E. (2005).** A user's guide to principal components (Vol. 587). John Wiley & Sons.
- Jain, C. K., Malik, D. S., & Yadav, R. (2007).** Metal fractionation study on bed sediments of Lake Nainital, Uttaranchal, India. Environmental Monitoring and Assessment, 130(1), 129-139.
- Janssen, N. A., Gerlofs-Nijland, M. E., Lanki, T., Salonen, R. O., Cassee, F., & Hoek, G. (2012).** Health effects of black carbon, World Health Organization.
- Jeong, U., Kim, J., Lee, H., Jung, J., Kim, Y. J., Song, C. H., & Koo, J. H. (2011).** Estimation of the contributions of long range transported aerosol in East Asia to carbonaceous aerosol and PM concentrations in Seoul, Korea using highly time resolved measurements: a PSCF model approach. Journal of Environmental Monitoring, 13(7), 1905-1918.
- Kalogridis, A. C., Vratolis, S., Liakakou, E., Gerasopoulos, E., Mihalopoulos, N., Eleftheriadis, K. (2018).** Assessment of wood burning versus fossil fuel contribution to wintertime black carbon and carbon monoxide concentrations in Athens, Greece. Atmospheric Chemistry and Physics, 18(14), 10219-10236.
- Kanellopoulos Th.D., Eleftheriadi, E., Karageorgis, A.P., Kambouri, G., Papageorgiou, A., Stavrakaki, I. (2020).** Sediment grain size and elemental geochemistry in the coastal area of SW Messinia and the Gialova Lagoon. In: COASTAL H2020 Programme 2020, The SW Messinia case study: Environmental assessment of the freshwater and marine systems. Final Scientific Report. A.P. Karageorgis & Th.D. Kanellopoulos (eds), Hellenic Centre for Marine Research, p. 48-54.

- Karbassi, A. R., Monavari, S. M., Bidhendi, G. R. N., Nouri, J., & Nematpour, K. (2008).** Metal pollution assessment of sediment and water in the Shur River, Environmental monitoring and assessment, 147(1), 107-116.
- Kassila, J., Nhhala, H., Givernaud, T., Monsouri, M., Abrehouch, A., & Mosfioui, A. (2019).** Opportunities for the development of seaweed farming as a supplementary income for small-scale fishermen in Nador lagoon: experimental cultivations of *Gracilaria gracilis* (Stackhouse). Mediterranean Fisheries and Aquaculture Research, 2(1), 12-26.
- Katsaros, D., Panagiotaras, D., Kontopoulos, N., & Avramidis, P. (2017).** Sediments characteristics and heavy metals distribution of a very shallow protected coastal lagoon, Prokopos Lagoon Mediterranean Sea western Greece. Fres. Environ. Bull, 26(10), 6093-103.
- Kennish, M. J., & Paerl, H. W. (Eds.). (2010).** Coastal lagoons: critical habitats of environmental change. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2010; pp.1–15.
- Kennish, Michael J. (2016).** "Coastal lagoons." Encyclopedia of Estuaries; Kennish, MJ, Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands.
- Keshavarzifard, M., Moore, F., Sharifi, R., (2019).** The influence of physicochemical parameters on bioavailability and bioaccessibility of heavy metals in sediments of the intertidal zone of Asaluyeh region, Persian Gulf, Iran. Geochemistry 79 (1), 178–187.
- Khafouri Azzeddine and Talbi El Hassan (2020).** "Assessment of Metallic Contamination of Water Resources in the Area Around the Abandoned Mining Site of Ouixane (North East Morocco). In Proceedings of the 4th Edition of International Conference on Geo-IT and Water Resources 2020, Geo-IT and Water Resources, Al-Hoceima, Morocco, 11–12 March 2020; pp. 1–6.
- Kjerfve, B. (Ed.), (1994).** Coastal Lagoon Processes, Vol. 60. Elsevier.
- Kjerfve, B. (1986).** Comparative oceanography of coastal lagoons. In Estuarine variability (pp. 63-81). Academic Press.
- Kokali, A., Sulçe, S., Edjona, B. I. C. I., Zaira, P. O. G. A., & Dungu, E. (2016).** The Comparison of Quality Water and Sediments Between the Lagoons of Lezha. European Journal of Earth And Environment Vol, 3(2).
- Kong, S., Ji, Y., Lu, B., Chen, L., Han, B., Li, Z., Bai, Z. (2011).** Characterization of PM10 source profiles for fugitive dust in Fushun-a city famous for coal. Atmospheric Environment, 45(30), 5351-5365.
- Korfali, S. I., & Davies, B. E, (2001).** A comparison of metals in sediments and water in the river Nahr-Ibrahim, Lebanon, Environmental Geochemistry and Health, 25, 41–50, doi:10.1023/A:1021284126632.
- Korman, L. B., Goldsmith, S. T., Wagner, E. J., & Rodrigues, L. J. (2020).** Spatially distributed simulations of dry and wet season sediment yields: A case study in the lower Rio Loco watershed, Puerto Rico. Journal of South American Earth Sciences, 103, 102717.
- Krause-Jensen, D., and Duarte, C. M. (2016).** Substantial role of macroalgae in marine carbon sequestration. Nat. Geosci. 9, 737–742. doi: 10.1038/NGEO2790.

- Lakrim, M.; Mesrar, L.; El Aroussi, O.; Lahrach, A.; Beaabidate, L.; Garouani, A.; Chaouni, A.; Tabyaoui, H.; Jabrane, R (2014).** "Impact study of mining waste of the Nador mine on the environment (North-Eastern of Morocco)." *Revue LJEE*.
- Lauret, M., Oheix, J., Derolez, V., Laugier, T., (2011).** Guide de reconnaissance et de suivi des macrophytes des lagunes du Languedoc-Roussillon. Réseau de Suivi Lagunaire. 148 pp.
- Lawson, D. R., & Winchester, J. W. (1979).** A standard crustal aerosol as a reference for elemental enrichment factors. *Atmospheric Environment* (1967), 13(7), 925-930.
- Lebret, N., (2014).** Contexte Structural Et Métallogénique Des Skarns à Magnétite Des BeniBoulfrou (Rif Oriental, Maroc) Apports à L'évolution Géodynamique de la Méditerranée Occidentale (Doctoral dissertation). Université d'Orléans.
- Lee, S.Y., Dunn, R.J.K., Young, R.A., Connolly, R.M., Dale, P.E.R., Dehayr, R., Lemckert, C.J., Mckinnon, S., Powell, B., Teasdale, P.R., Welsh, D.T. (2006).** Impact of urbanization on coastal wetland structure and function. *Austral Ecology*, 31(2), 149-163.
- Lee, B. K. and Hieu, N. T. (2011).** Seasonal variation and sources of heavy metals in atmospheric aerosols in a residential area of Ulsan, Korea. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(6), 679-688.
- Lefebvre, A., Guelorget, O., Perthuisot, J. P., & Dafir, J. E. (1997).** Évolution biologique de la lagune de Nador (Maroc) au cours de la période 1982-1993. *Oceanologica Acta*, 20(2), 371-385.
- Lefeuvre, J. C. (1992).** Les conflits d'utilisation en zone littorale. In *Le littoral, ses contraintes environnementales et ses conflits d'utilisation*, Nantes, 1-4 juillet 1991 (pp. 205-231).
- Lenfant P., Gudefin A., Fonbonne S., Lecaillon G., Aronson J., Blin E., Lourie S.M., Boissery P., Loeuillard J.-L., Palmaro A., Herrouin G., Person J., (2015).** Restauration écologique des nurseries des petits fonds côtiers de Méditerranée. Orientations et principes.
- Leruste, A., Malet, N., Munaron, D., Derolez, V., Hatey, E., Collos, Y., ... & Bec, B. (2016).** First steps of ecological restoration in Mediterranean lagoons: shifts in phytoplankton communities. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 180, 190-203.
- Levin, L.A.; Boesch, D.F.; Covich, A.; Dahm, C.; Erséus, C.; Ewel, K.C.; Kneib, R.T.; Moldenke, A.; Palmer, M.A.; & Weslawski, J.M. (2001).** The function of marine critical transition zones and the importance of sediment biodiversity. *Ecosystems* 4(5), 430-451.
- Liu, Z., Hu, B., Zhang, J., Yu, Y., Wang, Y. (2016a).** Characteristics of aerosol size distributions and chemical compositions during wintertime pollution episodes in Beijing. *Atmospheric Research*, 168, 1-12.
- Liu, J., Zhu, L., Wang, H., Yang, Y., Liu, J., Qiu, D., Ma, W., Zhang, Z., Liu, J. (2016b).** Dry deposition of particulate matter at an urban forest, wetland and lake surface in Beijing. *Atmospheric Environment*, 125, 178-187.

- Long, E.R., Field, L.J., MacDonald, D.D., (1998).** Predicting toxicity in marine sediments with numerical sediment quality guidelines. *Environ. Toxicol. Chem.* 17, 714–727.
- Long, E.R. and MacDonald, D.D., (1998).** Recommended uses of empirically derived, sediment quality guidelines for marine and estuarine ecosystems. *Hum. Ecol. Risk Assess.*, 4, 1019–1039.
- Long, E.R.; MacDonald, D.D.; Severn, C.G.; Hong, C.B., (2000).** Classifying probabilities of acute toxicity in marine sediments with empirically derived sediment quality guidelines. *Environ. Toxicol. Chem. Int. J.*, 19, 2598–2601. 29.
- Long, E.R., MacDonald, D.D., Smith, S.L., Calder, F.D., (1995).** Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environ. Manage.* 19, 81–97.
- Lou, C., Liu, H., Li, Y., Peng, Y., Wang, J., Dai, L. (2017).** Relationships of relative humidity with PM 2.5 and PM 10 in the Yangtze River Delta, China. *Environmental monitoring and assessment*, 189(11), 1-16.
- Lyazidi, Rachida, et al. (2020).** "Groundwater modeling in the Mediterranean area: case of the Gareb-Bouareg coastal aquifer (Rif, Morocco)." *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration* 5.2 (2020): 1-24.
- Maanan, M., El Barjy, M., Hassou, N., Zidane, H., Zourarah, B., Maanan, M., (2018a).** Origin and potential ecological risk assessment of trace elements in the watershed topsoil and coastal sediment of the Oualidia lagoon, Morocco. *Hum. Ecol. Risk Assess.: Int. J.* 24 (3), 602–614.
- Maanan, M.; Landesman, C.; Maanan, M.; Zourarah, B.; Fattal, P.; Sahabi, M. (2013).** Evaluation of the anthropogenic influx of metal and metalloid contaminants into the Moulay Bouselham lagoon, Morocco, using chemometric methods coupled to geographical information systems. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2013, 20, 4729–4741.
- Maanan, M., Maanan, M., Rueff, H., Adouk, N., Zourarah, B., H., Rhinane, (2018b).** Assess the human and environmental vulnerability for coastal hazard by using a multi-criteria decision analysis. *Hum. Ecol. Risk Assess.: Int. J.* 24 (6), 1642–1658.
- Maanan, M.; Saddik, M.; Maanan, M.; Chaibi, M.; Assobhei, O.; Zourarah, B. (2015).** Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco. *Ecol. Indic.* 2015, 48, 616–626.
- Macdonald, D.D.; Carr, R.S.; Calder, F.D.; Long, E.R.; Ingersoll, C.G., (1996).** Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters. *Ecotoxicology*, 5, 253–278.
- Macdonald, D. D., Ingersoll, C. G., Berger, T. A., (2000).** Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 39, 20–31.
- Mahjoubi, R., Kamel, S., El Moumni, B., Noack, Y., & Parron, C. (2003).** Nature, origine et répartition de la phase argileuse de la lagune de Nador (Maroc nord oriental). *Geologica belgica*.

- Maicu, F., Abdellaoui, B., Bajo, M., Chair, A., Hilmi, K., & Umgieser, G. (2021).** Modelling the water dynamics of a tidal lagoon: The impact of human intervention in the Nador Lagoon (Morocco). *Continental Shelf Research*, 228, 104535.
- Maicu, F.; Abdellaoui, B.; Bajo, M.; Hilmi, K.; Umgieser, G (2018).** The use of the SHYFEM numerical model to assess the improvement in the hydrodynamics and in the water renewal of the Nador Lagoon (Morocco) after the construction of a new inlet. In *Proceedings of the 20th EGU General Assembly, EGU2018*, from the conference held, Vienna, Austria, 4–13 April 2018; p.12657.
- Malouli, I.M.; Zahri, Y.; Houssa, R.; Abdelaoui, B.; El Ouamari, N. (2002).** Pêche artisanale dans la lagune de Nador: Exploitation et aspects socio-économiques.
- Manohar, M., Atanacio, A., Button, D., Cohen, D. (2021).** MABI-A multi-wavelength absorption black carbon instrument for the measurement of fine light absorbing carbon particles. *Atmospheric Pollution Research*, 12(4), 133-140.
- Matawle, J.L., Pervez, S., Dewangan, S., Shrivastava, A., Tiwari, S., Pant, P., Deb, M.K., Pervez, Y. (2015).** Characterization of PM_{2.5} source profiles for traffic and dust sources in Raipur, India. *Aerosol Air Qual. Res.* 15: 2537–2548.
- McCready, S., Birch, G, F., & Long, E, R, (2006).** Metallic and organic contaminants in sediments of Sydney Harbour, Australia and vicinity—a chemical dataset for evaluating sediment quality guidelines, *Environment International*, 32, 455–465, doi:10.1016/j.envint.2005.10.006.
- Melegy, A.A.; El-Bady, M.S.; Metwally, H.I. (2019).** Monitoring of the changes in potential environmental risk of some heavy metals in water and sediments of Burullus Lake, Egypt. *Bull. Natl. Res. Cent.* 2019, 43, 1–13.
- MEMDD/ PNAir (2018).** Ministère de l’Energie, des Mines et du Développement Durable/ Programme National de l’Air.
- Ménesguen, A., & Lacroix, G. (2018).** Modelling the marine eutrophication: A review. *Science of The Total Environment*, 636, 339-354.
- Mermillod-Blondin, F, (2011).** The functional significance of bioturbation and biodeposition on biogeochemical processes at the water–sediment interface in freshwater and marine ecosystems, *Journal of the North American Benthological Society*, 30(3), 770-778.
- Meybeck, M. (2004).** The global change of continental aquatic systems: dominant impacts of human activities. *Water Science and Technology*, 49(7), 73-83.
- Millennium Ecosystem Assessment, (2005).** *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement et Ministère de la Santé (1999).** Casa-Airpol: Assessment of Air Pollution Impact on Population Health in Casablanca City, Campaigns of 1998-1999. Rabat.

- Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement et Ministère de la Santé (2002).** Mohammedia-Airpol: Study of Air Pollution and its Impact on the Health of Asthmatic Children in Mohammedia City, 2001-2002 Campaigns. Rabat.
- Ministère de l'Énergie et des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, Ministère de l'Intérieur et Ministère de la Santé (2009).** Décret n° 2-09-286 fixant les normes de qualité de l'air et les modalités de surveillance de l'air.
- Ministère de l'Équipement et Ministère chargé de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement (2002).** Arrêté conjoint N° 1275-01 définissant la grille de qualité des eaux de surface.
- Ministère de l'Intérieur ; Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement ; Ministère de l'Industrie, du Commerce et des Nouvelles Technologies et Ministère de l'Artisanat (2013).** Arrêté N° 2942-13 du 1er hja 1434 (7 octobre 2013) fixant les valeurs limites générales de rejet dans les eaux superficielles ou souterraines.
- Miranda, L. S., Wijesiri, B., Ayoko, G. A., Egodawatta, P., & Goonetilleke, A. (2021).** Water-sediment interactions and mobility of heavy metals in aquatic environments. *Water Research*, 202, 117386
- Mitsch, W.J., Bernal, B., Hernandez, M.E., (2015).** Ecosystem services of wetlands. *Int. J. Biodivers. Sci. Ecosyst. Serv. Manag.* 11.
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G., (2015).** *Wetlands*, fifth ed. Wiley.
- Morel, J. L. (1985).** Les Evenements Tectoniques Et Volcaniques Responsables De La Regression Messinienne Dans Le Maroc Septentrional: Exemple Du Bassin D'iaddouyine (Segangane-Rif Oriental-Maroc). *Bulletin De L'Institut Scientifique*, (9), 97-106.
- Moroccan General Limit Values for Discharge into Surface or Underground Waters, (2013).** Official bulletin no 6202. <http://www.sgg.gov.ma/Legislation/BulletinsOfficiels.aspx> (accessed 07 01 2019).
- Moroccan Standards for surface water Quality (2002).** Official bulletin no 5062. <http://www.sgg.gov.ma/Legislation/BulletinsOfficiels.aspx> (accessed 07 01 2019).
- Mostarih, M.M.M., Faïd, EL Madani, Hameed, Saleh Ali Yahya, Ouafae, EL Hachemi, Souad, Abdellaoui, Abdelhafid, Chafi (2016).** Evaluation physico-chimique de la qualité de l'eau de la lagune de Nador-Nord du Maroc oriental—après l'ouverture de la nouvelle passe. *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (12), 4795–5809.
- Muñoz-Vera, A., Castejón, J.M.P., Garcia, G., (2016).** Patterns of trace element bioaccumulation in jellyfish *Rhizostoma pulmo* (Cnidaria, Scyphozoa) in a Mediterranean coastal lagoon from SE Spain. *Mar. Pollut. Bull.* 110 (1), 143–154.
- Müller, G (1979).** Heavy metals in the sediment of the Rhine-Changes Seity. *Umsch. Wiss. Und. Tech.*, 79, 778–783.
- Müller, G (1981).** The heavy metal pollution of the sediments of Neckars and its tributary: A stocktaking. *Chem Zeit*, 105, 157–164.

- Mutahi, A. W., Borgese, L., Marchesi, C., Gatari, M. J., & Depero, L. E. (2021).** Indoor and Outdoor Air Quality for Sustainable Life: A Case Study of Rural and Urban Settlements in Poor Neighbourhoods in Kenya. *Sustainability*, 13(4), 2417.
- Nachite, D., Maziane, F., Anfuso, G., Macias, A., (2018).** Beach litter characteristics along the moroccan mediterranean coast: Implications for coastal zone management. In: *Beach Management Tools-Concepts, Methodologies and Case Studies*. Springer, Cham, pp. 795–819.
- Najih, M., Berday, N., Lamrini, A., Nachite, D., Zahri, Y., (2015).** Situation de la pêche aux petits métiers après l'ouverture du nouveau chenal dans la lagune de Nador. *Rev. Marocaine Sci. Agron. Vétérinaires* 3 (1), 19–30.
- Najih, M.; Driss, N.; Nadia, B.; Roberto, P.; Abdeljaouad, L.; Nor-Dine, R (2017).** Caractérisation of the new status of Nador lagoon (Morocco) after the implementation of the management plan. *J. Mar. Sci. Eng.* 5, 7.
- Newton, A., Brito, A.C., Icely, J.D., Derolez, V., Clara, I., Angus, S., Schernewski, G., Inácio, M., I.Lillebø, .A., I.Sousa, A., Béjaoui, B., Solidoro, S., Tasic, M., Cañedo Argüelles, M., Yamamuro, M., Reizopoulou, S., Tseng, H.Chun., Canu, D., Roselli, L., Maanan, M., Cristina, S., Ruiz-Fernández, A.C., Kjerfve, B., RubioCisneros, N., PérezRuzafa, A., Marcos, C., Pastres, R., Pranovi, F., Snoussi, M., Turpie, J., Tuchkovenko, Y., Dyack, B., Brookes, J., Povilanskas, R., Khokhlov, V., (2018).** Assessing, quantifying and valuing the ecosystem services of coastal lagoons. *J. Nat. Conserv.* 44, 50–65.
- Newton, A., Icely, J., Cristina, S., Brito, A., Cardoso, A.C., Colijn, F., Riva, S.D., Gertz, F., Hansen, J., Ivanova, K.Holmer.M., Leppäkoski, E., Mocennim, C., Mudge, S., Murraye, N., Pejrup, M., Razinkovas, A., Reizopoulou, S., Pérez-Ruzafa, A., Schernewski, G., Schubert, H., Seeramu, L., Solidoro, C., Viaroli, P., Zaldívar, J.M., (2014).** An overview of ecological status, vulnerability and future perspectives of european large shallow, semi-enclosed coastal systems, lagoons and transitional waters. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 140, 95–122. Nriagu, J.O.; Pacyna, J.M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature* 1988, 333, 134–139.
- NF X31-147** Qualité des sols - Sols, sédiments - Mise en solution totale par attaque acide.
- Nichols, M., & Allen, G. (1981).** Sedimentary processes in coastal lagoons. UNESCO Technical Papers in Marine Science (UNESCO).
- Niencheski, L. F., Windom, H. L., & Smith, R. (1994).** Distribution of particulate trace metal in Patos Lagoon Estuary (Brazil). *Marine Pollution Bulletin*, 28(2), 96-102.
- NIST 2702.** INORGANICS IN MARINE SEDIMENT.
- Nixon, S.W., (1982).** Nutrient dynamics, primary production and fisheries yields of lagoons. *Oceanologia Acta* 5: 357T371.
- Nixon, S.W., (1995).** Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41, 199-2019.
- NM 03.7.008 (1989).** Eaux d'alimentation humaine -Détermination de la température.

- NM ISO 7150-1 (1999).** Qualité de l'eau. Dosage de l'ammonium. Partie 1 : Méthode spectrométrique manuelle.
- NM ISO 6777 (1999).** Qualité de l'eau - Dosage des nitrites - Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire.
- NM ISO 7890-1 (2001).** Qualité de l'eau –Dosage des nitrates - Partie 1 : Méthode spectrométrique au diméthyle-2,6 phénol.
- NM ISO 5664 (2001).** Qualité de l'eau. Dosage de l'ammonium. Méthode par distillation titrimétrie.
- NM ISO 7888 (2001).** Qualité de l'eau – Détermination de la conductivité électrique.
- NM ISO 17294-2 (2003).** Qualité de l'eau — Application de la spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS) — Partie 2: Dosage de 62 éléments.
- NM ISO 6878 (2012).** Qualité de l'eau. Dosage du phosphore. Méthode spectrométrique au molybdate d'ammonium.
- NM ISO 5667-3 (2012).** Qualité de l'eau, Échantillonnage. Partie 3 : Conservation et manipulation des échantillons d'eau.
- NM ISO 10523 (2012).** Qualité de l'eau - Détermination du pH.
- NM ISO 5814 (2014).** Qualité de l'eau - Dosage de l'oxygène dissous - Méthode électrochimique à la sonde.
- NM ISO 7027 (2012).** Qualité de l'eau - Détermination de la turbidité.
- Nriagu, J. O., & Pacyna, J. M. (1988).** Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *nature*, 333(6169), 134-139.
- Observatoire de la Lagune de Marchica (MAROC) -** Plateforme de surveillance MEDTRIX (<https://plateforme.medtrix.fr/>).
- OEHHA/CalEPA.** Office of Environmental Health Hazard Assessment/ California Environmental Protection Agency. Available online: <https://oehha.ca.gov/chemicals/lead-and-lead-compounds/>
- Okay, O. S., Ozmen, M., Güngördü, A., Yılmaz, A., Yakan, S. D., Karacık, B., & Schramm, K. W. (2016).** Heavy metal pollution in sediments and mussels: assessment by using pollution indices and metallothionein levels. *Environmental monitoring and assessment*, 188(6), 352.
- Olias, M., Nieto, J. M., Sarmiento, A. M., Cerón, J. C., & Cánovas, C. R. (2004).** Seasonal water quality variations in a river affected by acid mine drainage: the Odiel River (South West Spain). *Science of the total environment*, 333(1-3), 267-281.
- ORMVAM (2018).** Office Régional de Mise en Valeur Agricole, Mongraphie Subdivision Bouarg.
- ORMVAM (2010).** Office Régional de Mise en Valeur Agricole, Plan sectoriel pour l'atténuation de la pollution agricole dans la lagune de Nador.

- Otmani, A., Benchrif, A., Tahri, M., Bounakhla, M., El Bouch, M., Krombi, M. H. (2020).** Impact of Covid-19 lockdown on PM10, SO2 and NO2 concentrations in Salé City (Morocco). *Science of the total environment*, 735, 139541.
- Oujidi, B., El Bouch, M., Tahri, M., Layachi, M., Boutoumit, S., Bouchnan, R., Ouahidi, H., Bounakhla, M., El Ouamari, N., Maanan, M., Bazairi, H., Mhammdi, N., Snoussi, M. (2021).** Seasonal and Spatial Patterns of Ecotoxicological Indices of Trace Elements in Superficial Sediments of the Marchica Lagoon following Restoration Actions during the Last Decade. *Diversity*, 13(2), 51.
- Oujidi, B., Kabriti, M., Tahri, M., Bensaber, A., Benchrif, A., Layachi, M., Maanan, M., Bazairi, H., Mhammdi, N., & Snoussi, M. (2021, July).** Assessment of the Coastal Marchica Watershed through Ecotoxicological Indices of Trace Elements in Superficial Sediments. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 298, p. 03001).
- Oujidi, B., Tahri, M., Layachi, M., Abid, A., Bouchnan, R., Selfati, M., Bounakhla, M., El Bouch, M., Maanan, M., Bazairi, H., Snoussi, M. (2020).** Effects of the watershed on the seasonal variation of the surface water quality of a post-restoration coastal wetland: The case of the Nador lagoon (Mediterranean Sea, Morocco). *Regional Studies in Marine Science*, 35, 101127.
- Palmer, M, A., A, P, Covich, B, J, Finlay, J, Gibert, K, D, Hyde, R, K, Johnson, T, Kairesalo, P, S, Lake, C, R, Lovell, R, J, Naiman, C, Ricci, F, F, Sabater, And D, L, Strayer (1997).** Biodiversity And Ecosystem Processes in Freshwater Sediments, *Ambio* 26:571–577.
- Palmer, Margaret A. (2009).** "Reforming watershed restoration: science in need of application and applications in need of science." *Estuaries and coasts* 32.1 (2009): 1-17.
- Pandey, P., Patel, D. K., Khan, A. H., Barman, S. C., Murthy, R. C., Kisku, G. C. (2013).** Temporal distribution of fine particulates (PM2.5, PM10), potentially toxic metals, PAHs and Metal-bound carcinogenic risk in the population of Lucknow City, India. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 48(7), 730-745.
- Paquet H (1970).** Evolution géochimique des sédiments argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens et tropicaux à saisons contrastées. *Mém Serv Cart Géol Als-Lorr* 30:31–42 *Indian Geotech J* 123.
- Parlement Européen (2013).** Directive 2013/39/UE du Parlement européen et du Conseil du 12 août 2013 modifiant les directives 2000/60/CE et 2008/105/CE en ce qui concerne les substances prioritaires pour la politique dans le domaine de l'eau.
- Pattenden, S., Armstrong, B., Milojevic, A., Heal, M.R., Chalabi, Z., Doherty, R., Barratt, B., Kovats, R.S., Wilkinson, P. (2010).** Ozone, heat and mortality: acute effects in 15 British conurbations. *Occupational and environmental medicine*, 67(10), 699-707.
- Pérez-Ruzafa, A., Campillo, S., Fernández-Palacios, J. M., García-Lacunza, A., García-Oliva, M., Ibañez, H., ... & Marcos, C. (2019b).** Long-term dynamic in nutrients, chlorophyll a, and water quality parameters in a coastal lagoon during a process of eutrophication for decades, a sudden break and a relatively rapid recovery. *Frontiers in Marine Science*, 6, 26.

- Pérez-Ruzafa, A., Fernández, A. I., Marcos, C., Gilabert, J., Quispe, J. I., & García-Charton, J. A. (2005).** Spatial and temporal variations of hydrological conditions, nutrients and chlorophyll a in a Mediterranean coastal lagoon (Mar Menor, Spain). *Hydrobiologia*, 550(1), 11-27.
- Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C., & Pérez-Ruzafa, I. M. (2011a).** Mediterranean coastal lagoons in an ecosystem and aquatic resources management context. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 36(5-6), 160-166.
- Pérez-Ruzafa, A., Marcos, C., Pérez-Ruzafa, I. M., & Pérez-Marcos, M. (2011b).** Coastal lagoons: “transitional ecosystems” between transitional and coastal waters. *Journal of Coastal Conservation*, 15(3), 369-392.
- Pérez-Ruzafa, A.; Pérez-Ruzafa, I.M.; Newton, A.; Marcos, C. (2019a).** Coastal lagoons: Environmental variability, ecosystem complexity, and goods and services uniformity. In *Coasts and Estuaries Elsevier: Amsterdam, The Netherlands (2019)*; pp. 253–276.
- Pérez, N., Pey, J., Querol, X., Alastuey, A., López, J. M., Viana, M. (2008).** Partitioning of major and trace components in PM₁₀–PM_{2.5}–PM₁ at an urban site in Southern Europe. *Atmospheric Environment*, 42(8), 1677-1691.
- Pérez-Ruzafa, A., Quispe-Becerra, J.I., García-Charton, J.A., Marcos, C. (2004).** Composition, structure and distribution of the ichthyoplankton in a Mediterranean coastal lagoon. *J. Fish Biol.* 64 (1), 202–218.
- Piron, M., Pineau, A., & Mabele, R. M. (1990).** Sediment, parameters and distribution of metals in fine sediments of the Loire estuary. *Water, Air, and Soil Pollution*, 50(3), 267-277.
- Poissant, L., Schmit, J. P., & Beron, P. (1994).** Trace inorganic elements in rainfall in the Montreal Island. *Atmospheric Environment*, 28(2), 339-346.
- Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006).** Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the air & waste management association*, 56(6), 709-742.
- PNUE (2015).** Vers une gestion écosystémique des zones marines et côtières - Guide introductif.
- PNUE/PAM (1976).** La Convention de Barcelone pour la protection du milieu marin et du littoral de la Méditerranée. (<https://www.unep.org/unepmap/>).
- PNUE/PAM (2008).** Protocole relatif à la gestion intégrée des zones côtières (GIZC) de la Méditerranée. <https://www.unep.org/unepmap/fr/who-we-are/contracting-parties/iczmprotocol>
- PNUE/PAM (2017).** Cadre Régional pour l’Adaptation au Changement Climatique pour les Aires Côtières et Marines Méditerranéennes ONU Environnement/PAM Athènes, Grèce.
- PNUE/PAM/CAR/PAP (2016).** Cours MedOpen.
- Quintana, X., Boix, D., Gascón, S., Sala, J., & Comín, F. A. (2018).** Management and restoration of Mediterranean coastal lagoons in Europe. *Càtedra d'Ecosistemes Litorals Mediterranis, Parc Natural del Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter, Museu de la Mediterrània*.

- Radakovitch, O., Roussiez, V., Ollivier, P., Ludwig, W., Grenz, C., & Probst, J. L. (2008).** Input of particulate heavy metals from rivers and associated sedimentary deposits on the Gulf of Lion continental shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 77(2), 285-295.
- Raji, O. (2014).** Événements extrêmes du passé et paleo-environnements : reconstruction à partir des archives sédimentaires de la lagune Nador, Maroc. Maroc : Thèse de Doctorat, Université Mohammed V de Rabat.
- Raji, O., Dezileau, L., Grafenstein, U. V., Niazi, S., Snoussi, M., & Martinez, P. (2015).** Extreme sea events during the last millennium in the northeast of Morocco. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(2), 203-211.
- Raji, O., Dezileau, L., Tessier, B., Niazi, S., Snoussi, M., Von Grafenstein, U., & Poujol, A. (2018).** Climate and tectonic-driven sedimentary infill of a lagoon as revealed by high resolution seismic and core data (the Nador lagoon, NE Morocco). *Marine Geology*, 398, 99-111.
- Re, V., & Sacchi, E. (2017).** Tackling the salinity-pollution nexus in coastal aquifers from arid regions using nitrate and boron isotopes. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15), 13247-13261.
- Re, V., Sacchi, E., Martin-Bordes, J. L., Aureli, A., El Hamouti, N., Bouchnan, R., & Zuppi, G. M. (2013).** Processes affecting groundwater quality in arid zones: the case of the Bou-Areg coastal aquifer (North Morocco). *Applied Geochemistry*, 34, 181-198.
- Re, V., Sacchi, E., Mas-Pla, J., Menció, A., & El Amrani, N. (2014).** Identifying the effects of human pressure on groundwater quality to support water management strategies in coastal regions: a multi-tracer and statistical approach (Bou-Areg region, Morocco). *Science of the Total Environment*, 500, 211-223.
- Reimann C, de Caritat P. (1998).** Chemical elements in environment. Springer-Verlag, Berlin, p 398.
- Ritschard, L. (2017).** Représentations spatiales et Processus de Gestion Intégrée des Zones Côtières (GIZC) (Doctoral dissertation, Université de Bretagne Occidentale (UBO)).
- Roni, P., Beechie, T. J., Bilby, R. E., Leonetti, F. E., Pollock, M. M., & Pess, G. R. (2002).** A review of stream restoration techniques and a hierarchical strategy for prioritizing restoration in Pacific Northwest watersheds. *North American Journal of Fisheries Management*, 22(1), 1-20.
- Roselli, L., Fabbrocini, A., Manzo, C., D'Adamo, R. (2009).** Hydrological heterogeneity, nutrient dynamics and water quality of a non-tidal lentic ecosystem (Lesina Lagoon, Italy). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 84 (4), 539–552.
- Rosenzweig, C., G. Casassa, D.J. Karoly, A. Imeson, C. Liu, A. Menzel, S. Rawlins, T.L. Root, B. Seguin, P. Tryjanowski, and C.E. Hanson, (2007).** Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems.
- Rudnick, R. L., Gao, S., Holland, H. D., & Turekian, K. K. (2003).** Composition of the continental crust. *The crust*, 3, 1-64.

- Ruiz, F., Abad, M., Olías, M., Galán, E., González, I., Aguilá, E., & Cantano, M. (2006).** The present environmental scenario of the Nador Lagoon (Morocco). *Environmental Research*, 102(2), 215-229.
- Saddik, M (2014).** Contribution à la Gestion Intégrée du Littoral Marocain Méditerranéen : Diagnostic, Spatialisation et Évaluation de l'Etat de l'Environnement de la Lagune de Nador et de la zone cotière de Boudinar. Thèse de Doctorat, Université Chouaib Doukkali Faculté Des Sciences El Jadida.
- Saddik, M (2017).** Evaluation of the impact of anthropogenic actions on the Nador lagoon (Morocco) by the index of the sediment pollution load. *Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal*, 1(3), 07-10.
- Salameh, D., Detournay, A., Pey, J., Pérez, N., Liguori, F., Saraga, D., Bove, M.C., Brotto, P., Cassola, F., Massabò, D., Latella, A., Pillone, S. , Formentone, G. , Patti, S., Armengaud, A., Piga, D., Jaffrezo, J. L. , Bartzis, J., Tolis, E., Prati, P., Querol, X., Wortham, H., & Marchand, N. (2015).** PM2.5 chemical composition in five European Mediterranean cities: a 1-year study. *Atmospheric Research*, 155, 102-117.
- Salati, S., & Moore, F, (2010).** Assessment of heavy metal concentration in the Khoshk River water and sediment, Shiraz, Southwest Iran, *Environmental monitoring and assessment*, 164(1), 677-689.
- Samara, C., Kouimtzis, T., Tsitouridou, R., Kanias, G., Simeonov, V. (2003).** Chemical mass balance source apportionment of PM10 in an industrialized urban area of Northern Greece. *Atmospheric environment*, 37(1), 41-54.
- Schiff, K. C., & Weisberg, S. B. (1999).** Iron as a reference element for determining trace metal enrichment in Southern California coastal shelf sediments. *Marine Environmental Research*, 48(2), 161-176.
- Schropp, S. J., Lewis, F. G., Windom, H. L., Ryan, J. D., Calder, F. D., & Burney, L. C. (1990).** Interpretation of metal concentrations in estuarine sediments of Florida using aluminum as a reference element. *Estuaries*, 13(3), 227-235.
- SEEE/INRH (2009).** Secrétariat d'Etat chargé de l'Eau et de l'Environnement/ Institut National de la Recherche Halieutique, Rapport d'eutrophisation de la Lagune de Nador, Rapport 71 pages.
- Seghetta, M., Tørring, D., Bruhn, A., Thomsen, M. (2016).** Bioextraction potential of seaweed in Denmark - An instrument for circular nutrient management. *Science of the Total Environment* 563, 513-529.
- Selfati, M., El Ouamari, N., Franco, A., Lenfant, P., Lecaillon, G., Mesfioui, A., & Bazairi, H. (2019).** Fish assemblages of the Marchica lagoon (Mediterranean, Morocco): Spatial patterns and environmental drivers. *Regional Studies in Marine Science*, 32, 100896.
- Shaltout, A. A., Boman, J., Hassan, S. K., Abozied, A. M., Al-Ashkar, E. A., Abd-Elkader, O. H., Yassin, M. A., Al-Tamimi, J. H. (2020).** Elemental Composition of PM2.5 Aerosol in a Residential–Industrial Area of a Mediterranean Megacity. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 78(1), 68-78.

- Shen, T., Tang, Y., Li, Y. J., Liu, Y., & Hu, H. (2020).** An experimental study about the effects of phosphorus loading in river sediment on the transport of lead and cadmium at sediment-water interface. *Science of The Total Environment*, 720, 137535.
- Simate, G. S., & Ndlovu, S. (2014).** Acid mine drainage: Challenges and opportunities. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1785-1803.
- Singh, G. K., Choudhary, V., Gupta, T., Paul, D. (2020).** Investigation of size distribution and mass characteristics of ambient aerosols and their combustion sources during post-monsoon in northern India. *Atmospheric Pollution Research*, 11(1), 170-178.
- Siudek, P. (2020).** Seasonal variability of trace elements in fine particulate matter (PM 2.5) in a coastal city of northern Poland—profile analysis and source identification. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 22(11), 2230-2243.
- Snoussi, M. (2004).** Review of certain basic elements for the assessment of environmental flows in the Lower Moulouya. IUCN International Union for Conservation of Nature, Gland.
- Snoussi, Maria, et al. (2010).** "Climate change and sea-level rise: Agis-based vulnerability and impact assessment, the case of the Moroccan coast." *Geomatic Solutions for Coastal Environments*; Nova Science Publishers Inc.: Hauppauge, NY, USA : 275-310.
- Snoussi, M., & Flayou, L. (2016).** La GIZC : Une approche proactive et adaptative pour faire face aux risques littoraux liés au changement climatique. *Paysages géographiques N* 2, 63.
- Sutherland, R. A. (2000).** Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental geology*, 39(6), 611-627.
- Tahri, M., Benchrif, A., Bounakhla, M., Benyaich, F., Noack, Y. (2017).** Seasonal variation and risk assessment of PM2. 5 and PM2. 5–10 in the ambient air of Kenitra, Morocco. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 19(11), 1427-1436.
- Tahri, M., Bounakhla, M., Bouh, H. A., Benyaïch, F., Noack, Y., Essaid, B. (2012).** Application of nuclear analytical techniques (XRF and NAA) to the evaluation of air quality in Moroccan cities-case of Meknes city. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 7(2), 231-238.
- Tahri, M., Bounakhla, M., Zghaid, M., Benchrif, A., Zahry, F., Noack, Y., Benyaïch, F. (2013).** TXRF characterization and source identification by positive matrix factorization of airborne particulate matter sampled in Kenitra City (Morocco). *X-Ray Spectrometry*, 42(4), 284-289.
- Tan, İ., & Aslan, E. (2020).** Metal pollution status and ecological risk assessment in marine sediments of the inner Izmit Bay. *Regional Studies in Marine Science*, 33, 100850.
- Tanguy, Y. M., Dumas-Pilhou, C., & Loubersac, L. (2020).** Un référentiel géographique du Littoral en Nouvelle-Calédonie : pour quoi faire ? *Revue Environnement Nouvelle-Calédonie*, (30), 30-32.
- Tarlock, A. D. (2002).** The potential role of local governments in watershed management. *Pace Env'tl. L. Rev.*, 20, 149.

- Tessier, E., Garnier, C., Mulot, J. U., Lenoble, V., Arnaud, M., Raynaud, M., Mounier, S., (2011).** Study of the spatial and historical distribution of sediment inorganic contamination in the Toulon bay (France). *Marine Pollution Bulletin* 62, 2075–2086.
- Tian, K., Wu, Q., Liu, P., Hu, W., Huang, B., Shi, B., ,,, & Wang, T, (2020).** Ecological risk assessment of heavy metals in sediments and water from the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea, *Environment international*, 136, 105512.
- Tolvanen, A., & Aronson, J. (2016).** Ecological restoration, ecosystem services, and land use: a European perspective. *Ecology and Society*, 21(4).
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., & Jeffrey, D. W. (1980).** Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoländer meeresuntersuchungen*, 33(1-4), 566-575.
- Tribak, A., & El Amrani, H. (2018).** Urban occupancy of areas with flood risk and territorial dynamics: The case of the great Nador agglomerations (Morocco). *Revista de Estudios Andaluces*, 36, 55-71.
- Tuso, C. A. T., Magtaas, R. A. H., Punzalan, J. M., Yee, J. R., Bautista, A. T., & Pabroa, P. C. B. (2020).** Air particulate matter, black carbon, and elemental concentrations and source apportionment in Calaca, Batangas. *Philipp. J. Sci*, 149, 117-127.
- UNEP/ EEA. Report No 4 (2006).** Priority Issues in the Mediterranean Environment. United Nations Environment Program/ European Environment Agency/, ISSN 1725-9177.
- UNEP/MAP/MEDPOL (2015).** MED pol program for the assessment and control of marine pollution in the mediterranean. <https://wedocs.unep.org/rest/bitstreams/1472/retrieve> (accessed 07 01 2019).
- USEPA (1989).** Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I, Human Health Evaluation Manual (Part A), 540/1–89/002.
- USEPA (2016).** National recommended water quality criteria - aquatic life criteria. Available online: <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-qualitycriteria-aquatic-life-criteria-table> (accessed 07 01 2019).
- USEPA/IRIS (U.S. Environmental Protection Agency/Integrated Risk Information System, IRIS Substance List).** Available online: <https://www.epa.gov/iris>
- Valavanidis, A., Vlachogianni, T., (2010).** Metal Pollution in Ecosystems. *Ecotoxicology Studies and Risk Assessment in the Marine Environment*. Dept. of Chemistry, University of Athens University Campus Zografou, p. 15784, *Science advances on Environment, Toxicology & Ecotoxicology issues*.
- Valiela I., (2006).** Global coastal change. Blackwell Publishing, Malden.
- Vaslin-Reimann, S. (2019).** Présentation générale de la pollution de l'air. In *Annales des Mines-Responsabilite et environnement* (No. 4, pp. 5-8). FFE.

- Velasco, A.M.; Pérez-Ruzafa, A.; Martínez-Paz, J.M.; Marcos, C. (2018).** Ecosystem services and main environmental risks in a coastal lagoon (Mar Menor, Murcia, SE Spain): The public perception. *J. Nat. Conserv.*, 43, 180–189.
- Wang, X., & Li, Y. (2011).** Measurement of Cu and Zn adsorption onto surficial sediment components: New evidence for less importance of clay minerals. *Journal of hazardous materials*, 189(3), 719-723.
- Wang, Y., Yao, L., Wang, L., Liu, Z., Ji, D., Tang, G., Zhang, J., Sun, Y., Hu, B. Xin, J. (2014).** Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China. *Science China Earth Sciences*, 57(1), 14-25.
- Watts, M. J., Mitra, S., Marriott, A. L., & Sarkar, S. K. (2017).** Source, distribution and ecotoxicological assessment of multielements in superficial sediments of a tropical turbid estuarine environment: a multivariate approach. *Marine pollution bulletin*, 115(1-2), 130-140.
- Wei, X., Han, L., Gao, B., Zhou, H., Lu, J., & Wan, X. (2016).** Distribution, bioavailability, and potential risk assessment of the metals in tributary sediments of Three Gorges Reservoir: the impact of water impoundment. *Ecological indicators*, 61, 667-675.
- White, K. D., & Tittlebaum, M. E. (1985).** Metal distribution and contamination in sediments. *Journal of Environmental Engineering*, 111(2), 161-175.
- Whitney, P. R. (1975).** Relationship of manganese-iron oxides and associated heavy metals to grain size in stream sediments. *Journal of Geochemical Exploration*, 4(2), 251-263.
- WHO (2006).** World Health Organization / Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide.
- WHO (2021).** World Health Organization / Global Air Quality Guidelines, Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.
- Wijesiri, B., Liu, A., He, B., Yang, B., Zhao, X., Ayoko, G.A., Goonetilleke, A., (2019).** Behaviour of metals in an urban river and the pollution of estuarine environment. *Water Res.* 164, 114911
- Wittmann, G. (1981).** Toxic metals. In: *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 3–70.
- Won, S. R., Shim, I. K., Kim, J., Ji, H. A., Lee, Y., Lee, J., Ghim, Y. S. (2021).** PM_{2.5} and trace elements in underground shopping districts in the Seoul metropolitan area, Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(1), 297.
- Wu, L., Luo, X.-S., Li, H., Cang, L., Yang, J., Yang, J., Zhao, Z., Tang, M. (2019).** Seasonal Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metals in Atmospheric PM_{2.5} from Four Functional Areas of Nanjing City, Eastern China. *Atmosphere* 10, 419. doi:10.3390/atmos10070419.
- Xiao, X., Agusti, S., Lin, F., Li, K., Pan, Y., Yu, Y. , Duarte, C. M. (2017).** Nutrient removal from Chinese coastal waters by large-scale seaweed aquaculture. *Scientific Reports*, 7, 46613.

- Xue, S., Jian, H., Yang, F., Liu, Q., & Yao, Q. (2021).** Impact of water-sediment regulation on the concentration and transport of dissolved heavy metals in the middle and lower reaches of the Yellow River. *Science of The Total Environment*, 150535.
- Yahyaoui AM, Dakki M, Hoepffner C, Demnati A (1997).** Le Bassin du Gareb-Bou-Areg (Rif Oriental): une re'gion—cle' pour l'interpre'tation de la structuration alpine de la cha'ne rifaine. *Ge'ol Me'diterr* 24(1–2):73–92.
- Yang, D., Chen, Y., Miao, C., Liu, D. (2020).** Spatiotemporal variation of PM2.5 concentrations and its relationship to urbanization in the Yangtze River delta region, China. *Atmospheric Pollution Research*, 11(3), 491-498.
- Zerrouqi, Z. (2009).** Doctorat en BIOLOGIE (Doctoral dissertation, Université Mohammed Premier). Contribution à l'étude des performances des stations d'épuration des villes Nador et de Béni Ensar et du degré de pollution de leur milieu récepteur (La lagune de Nador, Maroc Oriental).
- Zerrouqi, Z., Sbaa, M., Chafi, A., Aqil, H. (2013).** Contribution à l'étude de la qualité des eaux de la lagune de Nador : Impact de l'anthropisation. *Bull. Inst. Sci., Rabat, Sect. Sci. Vie* 35, 51–59.
- Zhang, H., Walker, T. R., Davis, E., & Ma, G. (2019).** Ecological risk assessment of metals in small craft harbour sediments in Nova Scotia, Canada. *Marine pollution bulletin*, 146, 466-475.
- Ziegler, D., Malandrino, M., Barolo, C., Adami, G., Sacco, M., Pitasi, F., Abollino, O., Giacomino, A. (2021).** Influence of start-up phase of an incinerator on inorganic composition and lead isotope ratios of the atmospheric PM10. *Chemosphere*, 266, 12909.

WEB REFERENCES

- ❖ <http://agencemarchica.gov.ma/>
- ❖ <https://www.anda.gov.ma/fr/aquaculture-sociale>
- ❖ <https://aunador.ma/fr/planification-urbaine/etat-des-documents-d-urbanisme>
- ❖ <https://www.cnesten.org.ma>
- ❖ www.environnement.gov.ma
- ❖ <https://www.epa.gov/iris>
- ❖ <https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-qualitycriteria-aquatic-life-criteria-table>
- ❖ <https://www.fm6e.org>
- ❖ <http://gizc.environnement.gov.ma/projet-gizc-dans-la-region-de-loriental/activites/amelioration-de-la-peche/>
- ❖ <https://www.hcp.ma/region-oriental/>
- ❖ <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/handle/10625/46060>
- ❖ <https://www.inrh.ma>
- ❖ <https://labo.environnement.gov.ma>
- ❖ <https://letg.cnrs.fr>
- ❖ www.mcinet.gov.ma
- ❖ <https://www.medecc.org/>
- ❖ <https://medwet.org/2010/03/medwetcoast-project-for-the-conservation-of-wetlands-and-coastal-ecosystems-in-the-mediterranean-region/>
- ❖ www.onp.ma
- ❖ <https://oehha.ca.gov/chemicals/lead-and-lead-compounds>
- ❖ <https://plateforme.medtrix.fr>
- ❖ <https://rsis.ramsar.org/ris/1484>
- ❖ <https://siredd.environnement.gov.ma/oriental>
- ❖ <http://www.tutiempo.net/>
- ❖ https://ufmsecretariat.org/wp-content/uploads/2019/10/MedECC-Booklet_FR_WEB.pdf
- ❖ <https://www.unep.org/unepmap/>
- ❖ <https://www.unep.org/unepmap/fr/who-we-are/contracting-parties/iczm-protocol>

ANNEXES

I. Annexe 1

Les résultats des analyses des eaux superficielles au niveau de la lagune de Marchica et son bassin versant durant les années 2017 - 2018

Tableau 1 : Les concentrations des paramètres physico-chimiques et des éléments majeurs et traces dans les eaux superficielles du bassin versant de la lagune de Marchica durant l'année 2017.

			T°c	pH	O ₂ (mg/l)	Sal (g/l)	Cond (ms/cm)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Sr (mg/l)	Ti (mg/l)	V (mg/l)	Fe (µg/l)	Mn (µg/l)	Cu (µg/l)	Zn (µg/l)	Pb (µg/l)	Cr (µg/l)	Co (µg/l)	Cd (µg/l)	Ni (µg/l)
Bassin versant	Saison humide 2017	W1	23,9	8,19	2,08	12,8	21,3	910,50	163,50	219,50	4,19	0.056	0.18	495	74	25	148	15	30	N	194	18
		W2	23	7,61	14	7,2	12,54	752,30	52,32	324,40	4,55	0.051	<LD	306	519	<LD	5	1	15	N	50	14
		W3	22,9	8,4	10,67	5,9	10,51	738,60	15,51	263,30	5,74	0.041	<LD	182	29	<LD	13	1	12	N	29	12
		W4	26,4	8,15	13,19	17,6	28,5	797,50	216,90	242,80	5,34	0.044	0.18	144	103	2	6	<LD	31	N	31	17
		W5	28,6	9,04	10,92	9	15,3	1035,00	122,50	156,80	3,41	0.036	<LD	62	47	5	9	<LD	15	N	47	13
		W*	21,9	7,69	4,02	3,1	5,73	721,80	24,49	139,20	2,94	0.044	0.003	473	77	<LD	68	4	9	N	90	9
	Saison Sèche 2017	W1	33,7	8,94	10,6	36,7	54,8	417,50	210,00	237,90	4,50	0,014	0.008	1287	33,8	24,54	8,444	3,044	14,31	3,585	0,239	39,17
		W2	32	7,82	1,8	4,5	7,95	267,60	52,06	183,50	1,50	0,024	0.010	1116	321,2	5,16	6,27	1,892	4,03	2,459	0,073	15,31
		W3	26	8,03	12,5	5,8	10,21	269,90	14,05	263,60	3,18	0,006	0.005	1246	6,78	5,134	3,697	1,178	3,741	2,547	0,066	17,62
		W4	28,5	7,95	4,2	30,4	46,6	546,60	273,40	307,30	4,04	0,007	0.005	1644	557,7	8,856	4,954	1,214	13,96	3,629	0,094	27,24
		W5	26,8	8,29	6,22	9,1	45,5	322,30	112,90	146,20	1,83	0,013	0.004	698	111	9,23	9,927	0,524	7,128	2,527	0,139	14,95
		W*	27,8	7,81	1,6	1,9	3,68	255,10	25,57	146,00	1,24	0,036	0.005	813	91,22	5,926	32,63	0,352	2,348	1,751	0,084	12,27

Tableau 2 : Les concentrations des paramètres physico-chimiques et des éléments majeurs et traces des eaux superficielles du bassin versant de la lagune de Marchica durant l'année 2018.

			T°c	pH	O ₂ (mg/l)	Sal (g/l)	Cond (ms/cm)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Sr (mg/l)	Ti (mg/l)	Fe (µg/l)	Mn (µg/l)	Cu (µg/l)	Zn (µg/l)	Pb (µg/l)	Cr (µg/l)	Co (µg/l)	Cd (µg/l)	Ni (µg/l)
Bassin versant	Saison humide 2018	W1	17,9	8,06	4,63	3	5,64	133,10	36,67	142,20	1,35	0.13	208	198,30	25,01	65,65	22,04	3,79	1,89	0,246	17,15
		W2	21,6	7,4	6	2,8	5,18	150,80	25,19	167,60	1,67	0.09	172	371,20	4,93	48,81	1,56	3,28	2,05	0,326	16,01
		W3	21,1	8,01	9,6	6,4	11,27	152,90	18,05	404,80	6,08	0.06	237	35,03	6,09	46,44	1,35	3,42	3,14	0,457	32,02
		W4	20,7	7,89	8,24	10,8	18,39	148,20	131,10	226,10	3,83	0.04	166	437,60	11,72	41,34	1,67	4,53	2,69	0,323	25,94
		W5	24,5	9,02	15,24	6,4	11,29	156,40	97,47	219,80	2,75	0.10	135	184,30	9,07	73,45	1,33	4,02	2,33	0,276	20,49
		W*	21,4	7,56	6,95	1,9	3,62	146,90	30,98	181,00	2,18	0.21	276	62,42	12,06	82,80	11,00	3,04	1,91	0,237	19,52
	Saison Sèche 2018	W1	26	7	2,5	1,1	2,11	164,10	20,94	48,89	0,97	0.03	1003	76,71	2,822	148,6	9,963	2,396	1,209	0,114	6,507
		W2	25	7,69	5,4	2,6	4,78	655,40	21,09	63,53	1,10	0.01	189	17,32	5,764	14,2	1,893	1,417	0,853	0,03	4,344
		W3	28,1	8,13	8,85	6	10,55	889,90	15,00	131,70	3,72	0.004	143	7,768	6,157	8,362	0,924	0,894	1,718	0,025	8,709
		W4	27,8	8,45	9,36	12,4	20,7	1100	137,10	71,32	1,90	0.004	296	28,6	5,782	11,12	1,113	0,77	1,235	0,039	7,689
		W5	26,8	7,39	1,8	7	12,15	903,50	99,35	82,00	1,90	0.032	320	106,1	12,74	91,95	11,03	3,078	1,639	0,203	8,208
		W*	27,4	7,7	2,8	1,7	3,23	354,10	27,57	59,89	1,11	0.04	692	103,2	3,821	92	9,545	2,252	1,191	0,129	6,637

Tableau 3 : Les concentrations des paramètres physico-chimiques et des éléments majeurs et traces dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica durant l'année 2017.

			T°C	pH	O ₂ (mg/l)	Sal (g/l)	Cond (ms/cm)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Sr (mg/l)	Ti (mg/l)	V (mg/l)	Fe (µg/l)	Mn (µg/l)	Cu (µg/l)	Zn (µg/l)	Pb (µg/l)	Cr (µg/l)	Co (µg/l)	Cd (µg/l)	Ni (µg/l)
Lagune Marchica	Saison humide 2017	S1	21,4	8,92	13,8	36,1	54,7	813,10	385,90	380,60	8,11	0,061	0,34	241	48	4	5	<LD	62	N	0,051	27
		S2	20	8,39	10,75	35,7	54,3	916,70	376,50	375,40	7,95	0,054	0,33	248	15	4	3	<LD	60	N	0,031	26
		S3	18,8	8,29	9,61	35,5	54	950,80	361,20	360,10	7,71	0,046	0,28	266	6	4	4	<LD	52	N	0,032	24
		S4	18,6	8,32	9,8	35,4	54,2	957,90	342,50	341,90	7,33	0,043	0,24	203	7	4	3	<LD	45	N	0,035	24
		S5	18,6	8,34	10	35,3	54	948,00	331,70	327,90	7,10	0,039	0,20	193	7	4	3	3	40	N	0,034	23
		S6	19,4	8,27	9,62	35	53,3	927,60	315,80	315,00	6,73	0,035	0,17	171	4	4	2	<LD	35	N	0,031	22
		S7	18,8	8,07	7,57	33	50,7	870,90	273,10	290,40	6,27	0,038	0,13	346	38	14	281	3	29	N	0,042	23
		S8	20	7,73	5,58	27,5	43	871,30	172,30	227,50	4,86	0,033	0,09	267	43	10	27	4	22	N	0,072	21
		S9	19,3	8,23	7,72	35,3	53,9	761,80	268,20	270,90	5,78	0,029	0,09	187	7	11	13	1	23	N	0,041	22
		S10	19,2	8,42	9	35,2	53,8	696,50	249,40	256,60	5,41	0,029	0,08	289	14	14	15	1	20	N	0,035	23
		S11	19,4	8,53	10,76	35,5	54,3	632,70	228,60	229,00	4,86	0,026	0,07	73	10	13	5	<LD	18	N	0,041	24
		S12	19,3	8,79	10,2	36,9	55,9	588,90	216,50	216,70	4,68	0,027	0,06	102	30	17	4	1	16	N	0,032	25
		S13	18,5	8,37	9,97	35,5	54,2	530,50	193,20	192,40	4,09	0,026	0,05	53	5	13	4	<LD	13	N	0,032	22
	Saison Sèche 2017	S1	29,1	8,43	11,4	36,8	55,2	363,60	178,60	201,30	4,4	0,012	0,005	1057	17,66	31,72	4,575	1,849	13,64	3,466	0,208	37,02
		S2	28	8,33	10,2	36,1	54,4	332,40	156,70	176,80	4,13	0,013	0,005	888	16,43	42,65	4,09	1,951	12,02	3,218	0,186	34,33
		S3	26,9	8,19	8,51	35,6	53,8	331,70	153,20	172,90	3,93	0,016	0,005	891	5,467	42,15	3,054	1,257	11,68	2,998	0,25	32,22
		S4	26,5	8,19	8,72	35,6	53,7	317,90	145,60	163,70	3,82	0,018	0,004	875	4,161	35,17	3,411	1,953	11,23	2,957	0,198	32,12
		S5	26,7	8,28	8,84	35,9	54,1	281,10	129,10	144,80	3,72	0,020	0,004	798	8,99	33,52	4,008	1,76	11,46	2,897	0,214	29,79
		S6	25,8	8,16	8,63	35,3	53,5	242,40	112,20	125,80	3,42	0,022	0,004	746	2,447	32,6	3,494	1,84	10,98	2,673	0,222	27,29
		S7	26,6	8,1	7,06	35	52,9	221,60	102,80	115,20	3,23	0,023	0,004	741	25,49	32,02	11,78	3,674	11,01	3,124	0,216	26,37
		S8	26,8	7,86	3,84	38,6	44	202,70	81,77	105,60	2,90	0,022	0,005	739	23,79	25,83	13,28	3,179	11	2,648	0,228	24,64
		S9	27,9	8,3	9,44	35,5	53,5	184,90	85,07	95,44	3,18	0,023	0,004	674	5,928	29,58	4,352	2,036	11,58	2,78	0,224	24,64
		S10	27,8	8,36	9,21	35,6	53,6	177,10	81,92	92,28	3,15	0,023	0,004	691	14,35	29,28	2,201	0,36	11,11	2,682	0,239	23,88
		S11	28,2	8,44	9,4	36	54,2	170,70	80,21	88,85	3,64	0,014	<LD	704	8,287	15,84	4,798	1,502	3,287	0,821	0,054	11,04
		S12	28,9	8,6	10,08	37,2	55,6	170,90	81,42	89,27	3,11	0,023	0,004	746	30,26	29,41	4,835	2,45	11,11	2,612	0,233	23,78
		S13	27,9	8,3	9,25	35,7	53,9	176,50	83,66	91,93	2,95	0,023	0,004	822	6,703	26,6	4,991	2,409	10,95	2,503	0,207	22,32

Tableau 4 : Les concentrations des paramètres physico-chimiques et des éléments majeurs et traces dans les eaux superficielles de la lagune de Marchica durant l'année 2018.

			T°c	pH	O ₂ (mg/l)	Sal (g/l)	Cond (ms/cm)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Ca (mg/l)	Sr (mg/l)	Ti (mg/l)	Fe (µg/l)	Mn (µg/l)	Cu (µg/l)	Zn (µg/l)	Pb (µg/l)	Cr (µg/l)	Co (µg/l)	Cd (µg/l)	Ni (µg/l)
Lagune Marchica	Saison humide 2018	S1	17,6	8,3	9,98	36,6	55,8	192,60	380,60	523,10	8,27	0.13	200,000	14,06	18,44	43,85	7,62	4,19	4,17	0,339	69,99
		S2	17,6	8,48	11,83	36,7	56	185,00	373,00	509,50	8,09	0.16	194,000	26,77	16,39	51,17	4,00	3,83	4,23	0,326	69,16
		S3	17,3	8,29	9,75	36,5	55,8	184,50	376,90	505,70	8,16	0.18	220,000	13,81	17,14	52,64	1,27	3,61	4,15	0,308	67,56
		S4	16,7	8,3	10,05	36,6	55,9	190,20	386,80	532,20	8,26	0.20	229,000	28,04	16,79	43,77	1,11	3,40	4,13	0,304	68,56
		S5	17,2	8,27	9,92	36,5	55,7	202,40	408,30	555,20	8,18	0.23	276,000	27,16	17,08	47,77	2,84	3,58	4,23	0,281	67,65
		S6	17,2	8,29	10,2	36,9	55,8	214,50	432,20	589,60	8,03	0.26	302,000	27,32	18,03	51,33	1,99	3,54	4,25	0,308	68,41
		S7	17,5	8,17	8,72	36,3	55,3	220,60	431,10	586,50	8,12	0.26	232,000	46,57	17,33	47,89	1,05	3,11	4,16	0,320	65,59
		S8	18,3	7,64	4,9	22,1	35,4	151,50	221,60	389,10	6,61	0.22	237,000	95,38	12,05	51,61	4,75	3,49	3,09	0,222	45,95
		S9	17,7	8,23	10,6	35,5	54,5	237,70	449,10	624,00	8,29	0.27	275,000	41,65	19,30	43,76	5,18	3,30	4,18	0,335	66,83
		S10	18,4	8,24	9,65	36	54,9	255,00	479,00	705,80	8,30	0.30	742,000	209,10	20,32	44,09	7,80	3,96	6,19	0,325	70,20
		S11	17,7	8,17	9,62	35,9	54,9	225,40	418,10	579,80	8,25	0.29	310,000	79,33	19,43	43,07	2,94	3,32	4,17	0,291	66,05
		S12	17,1	8,54	10,21	36,5	55,7	240,41	475,12	602,13	8,52	0.29	360,000	18,50	20,06	48,80	1,09	2,84	4,00	0,305	66,86
		S13	17,4	8,38	9,94	36,6	55,7	237,58	452,42	598,41	8,41	0.29	232,000	17,45	20,40	51,63	1,82	2,73	3,77	0,319	64,33
	Saison Sèche 2018	S1	28,1	8,41	7,33	37,9	56,7	13140	477,70	482,60	12,56	<LD	3019	29,26	48,73	10,12	2,201	25,68	2,884	0,172	28,79
		S2	28,1	7,97	6,75	37,6	56,3	12340	438,60	465,50	12,58	<LD	1901	12,45	53,08	<LD	3,515	25,09	2,536	0,257	18,92
		S3	27,4	7,82	6,73	37,1	55,8	11730	406,80	446,10	12,00	<LD	1420	3,161	32,39	<LD	1,191	24,76	2,34	0,117	14,84
		S4	28,2	8,26	7,31	37,3	55,9	12380	435,50	438,60	12,46	<LD	765	7,598	28,49	<LD	3,665	23,48	4,173	0,106	10,87
		S5	27,2	8,54	5,86	37,5	52,2	12200	441,80	435,10	0,20	<LD	439	15,58	27,93	<LD	1,315	24,36	1,787	0,218	12,52
		S6	27,3	8,28	6,84	36,8	55,4	11650	427,10	428,00	11,62	<LD	341	0,901	25,62	<LD	6,019	22,93	3,231	0,283	9,892
		S7	26	8,06	5,74	37	55,7	11940	420,30	429,70	11,90	<LD	271	17,9	23,86	<LD	7,677	23,4	3,417	0,345	4,54
		S8	26,7	8,35	4,91	34,5	52	11430	405,10	432,50	11,70	<LD	551	12,17	28,68	<LD	5,85	23,75	2,643	0,197	9,637
		S9	26,2	8,66	7,28	36,8	55,3	12040	434,50	433,60	11,97	<LD	462	4,442	23,02	<LD	4,258	23,16	2,335	0,12	4,755
		S10	26	8,72	6,47	36,8	55,4	11660	409,90	440,40	11,91	<LD	795	2,023	19,02	<LD	4,133	22,56	2,369	0,158	5,169
		S11	26,9	8,64	6,82	38	57,1	12010	434,60	434,70	12,03	<LD	570	12,19	22,34	<LD	8,194	21,99	2,153	0,117	11,55
		S12	26,9	8,67	7,18	38,5	57,5	12240	440,00	434,30	12,41	<LD	862	28,04	19,8	<LD	2,413	22,35	1,879	0,09	1,161
		S13	27,2	8,54	6,17	37,9	56,8	10560	374,30	391,20	10,61	<LD	635	15,52	19,28	<LD	5,099	22	1,666	0,162	<LD

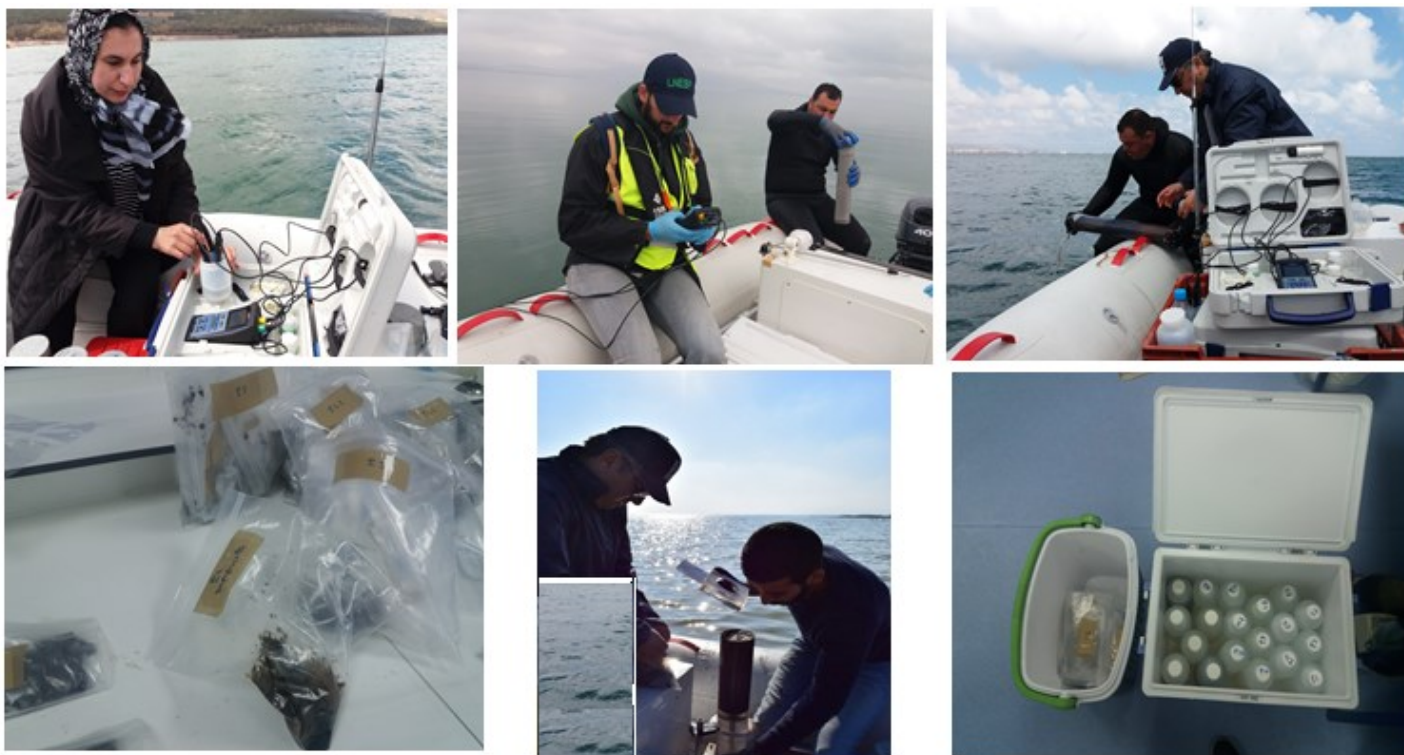


Figure 1 : Mission de terrain / Photos d'échantillonnage au niveau de la lagune de Marchica (Eau -Sédiment).



Figure 2 : Mission de terrain / Photos d'échantillonnage au niveau du bassin versant de la lagune de Marchica (Eau -Sédiment).

II. Annexe 2

Indicateur Qualité des eaux superficielles de la Lagune de Marchica

- Observatoire Marchica –



Projet Lag-Nad 2016

I Description de l'indicateur

❖ Contexte

Suite aux différents aménagements réalisés autour de l'écosystème lagune Marchica durant la dernière décennie en vue de sa valorisation touristique et socio-économique et la préservation de ses qualités biologiques et écologiques en tant que zone humide, et afin de procéder à l'évaluation de l'état environnemental de cet écosystème, un partenariat a été développé dans le cadre du projet «**Lag-Nad 2016**» entre le Département de l'Environnement à travers le Laboratoire National d'Etudes et de Surveillance de la Pollution (LNEP), l'Institut National de la Recherche Halieutique (INRH), le Centre National des Sciences et Techniques Nucléaires (CNETEN) et la Faculté des Sciences de Rabat. La qualité des eaux de l'écosystème lagune Marchica représente un enjeu très important d'évaluation environnementale dans le cadre du projet **Lag-Nad 2016**.

❖ Objectifs

- Evaluer la qualité des eaux de surface de l'écosystème lagune Marchica à travers la caractérisation de certains paramètres physico-chimiques, nutriments et éléments traces métalliques.
- Comparer les résultats avec les normes en vigueur afin de statuer sur l'état environnemental de l'écosystème.
- Identifier les zones fortement impactées par la pollution en nutriments et en métaux lourds.
- Alerter les gestionnaires et les décideurs sur l'état de santé de l'écosystème.
- Situer la lagune de Marchica dans un contexte méditerranéen.

II Méthodologie de calcul de l'indicateur et de son évaluation

❖ Protocole d'échantillonnage

Le réseau d'échantillonnage est basé sur un échantillonnage couvrant l'ensemble de la surface de la lagune et capturant toutes les sources potentielles de pollution. Il comprend deux stations au niveau des zones d'eutrophisation au Nord-Ouest (S1) et au Sud-Est (S12), deux stations près des embouchures des principaux affluents (S7, S9) une station près des rejets agricoles (S10), une station sur la borure continentale entre Bouarg et Arekmane (S11), une station près des rejets de la station d'épuration du Grand Nador (STEP, S8), une station à côté de la Marina (S2) qui représente le premier site touristique de Marchica, trois stations sur le cordon dunaire (S3, S4 et S5), et deux autres stations au centre de la lagune (S6 et S13). Au total, 13 stations ont été échantillonnées à l'intérieur de la lagune.



Figure 1 : Réseau d'échantillonnage au niveau de la lagune de Marchica.

❖ Méthode d'analyse

Pendant deux campagnes humide (avril) et sèche (juillet) durant l'année 2017, des échantillons d'eau ont été collectés dans des bouteilles en plastique polypropylène à 0,5 m sous la surface de l'eau pour la lagune. Les échantillons prélevés ont été stockés conformément aux directives de la norme internationale pour le stockage et la manipulation des échantillons NM ISO 5667-3. Les paramètres physicochimiques ont été mesurés in situ à l'aide d'une sonde à eau multi-paramètres (WTW, MULTI 3430). Les nutriments ont été analysés à l'aide du spectrophotomètre UV / VIS (Perkin Elmer, Lambda 35 UV) au Laboratoire National d'Etudes et de Surveillance de la Pollution, Maroc (LNESP). Les éléments traces ont été déterminés à l'aide de la méthode ICP-MS Thermo Scientific XSERIES 2 au Centre National des Sciences et Technologies Nucléaires, Maroc (CNESTEN). Les coordonnées des stations au niveau de la lagune (S) et les résultats des analyses sont donnés au niveau du tableau Excel.

❖ Méthode d'évaluation

En l'absence d'une réglementation nationale concernant les normes de qualité des eaux côtières et afin de situer la lagune de Marchica dans un contexte méditerranéen, les résultats ont été comparés à la grille de classement des eaux vis-à-vis d'eutrophisation « Mise à jour d'indicateurs du niveau d'eutrophisation des milieux lagunaires méditerranéens » (Ifremer, 2000) pour évaluer la qualité des eaux de la lagune Marchica selon 5 grilles allant du Bleu au Rouge pendant l'année moyennant la période humide et la période sèche (Tableau 1).

Tableau 1 : Grille de qualité annuelle des eaux vis-à-vis d'eutrophisation (Ifremer, 2000).

ANNEE			BLEU		VERT		JAUNE		ORANGE		ROUGE
TUR	(NTU)	0	-	10	-	20	-	30	-	40	
PO ₄ ³⁻	(μM)	0	-	0,3	-	1	-	1,5	-	4	
NITRI	(μM)	0	-	0,5	-	1	-	5	-	10	
NITRA	(μM)	0	-	7	-	10	-	20	-	30	
AMMO	(μM)	0	-	7	-	10	-	20	-	30	

Pour la qualité chimique, les concentrations du Pb et Cd sont comparés aux normes de qualité environnementale (NQE) pour les substances prioritaires et certains autres polluants (MA : moyenne annuelle, Directive 2013/39/UE du Parlement Européen et du Conseil du 12 août 2013) :

NQE-MA Plomb : 1,3 μg/l

NQE-MA Cadmium : 0,2 μg/l ;

NQE-MA Nickel et ses composés : 8,6 μg/l

III Qualité des eaux superficielles

❖ Sous indicateur 1 : Qualité physico-chimique et Eutrophisation

Tableau 2 : Qualité annuelle des eaux de surface de la région Nord-Ouest de la lagune de Marchica selon la grille d'Ifremer (2000).

ANNEE 2017			BLEU		VERT		JAUNE		ORANGE		ROUGE
TUR	(NTU)	0	8,03	10		20		30		40	
PO ₄ ³⁻	(μM)	0	0,26	0,3		1		1,5		4	
NITRI	(μM)	0		0,5	0,88	1		5		10	
NITRA	(μM)	0	4	7		10		20		30	
AMMO	(μM)	0		7		10		20		30	133

Tableau 3 : Qualité annuelle des eaux de surface de la région Sud-Est de la lagune de Marchica selon la grille d'Ifremer (2000).

ANNEE 2017			BLEU		VERT		JAUNE		ORANGE		ROUGE
TUR	(NTU)	0	8,03	10		20		30		40	
PO4 ³⁻	(µM)	0	0,26	0,3		1		1,5		4	
NITRI	(µM)	0	0,41	0,5		1		5		10	
NITRA	(µM)	0	4	7		10		20		30	
AMMO	(µM)	0		7		10		20		30	128

Tableau 4 : Qualité annuelle des eaux de surface de la région Centre de la lagune de Marchica selon la grille d'Ifremer (2000).

ANNEE 2017			BLEU		VERT		JAUNE		ORANGE		ROUGE
TUR	(NTU)	0	1,5	10		20		30		40	
PO4 ³⁻	(µM)	0	0,26	0,3		1		1,5		4	
NITRI	(µM)	0	0,44	0,5		1		5		10	
NITRA	(µM)	0	4	7		10		20		30	
AMMO	(µM)	0		7		10		20		30	134

Tableau 5 : Qualité annuelle des eaux de surface de la région Bordure Continentale de la lagune de Marchica selon la grille d'Ifremer (2000).

ANNEE 2017			BLEU		VERT		JAUNE		ORANGE		ROUGE
TUR	(NTU)	0		10		20		30	30,8	40	
PO4 ³⁻	(µM)	0		0,3		1		1,5		4	5,8
NITRI	(µM)	0		0,5	0,67	1		5		10	
NITRA	(µM)	0	4	7		10		20		30	
AMMO	(µM)	0		7		10		20		30	88,51

Les concentrations annuelles des nutriments comparés à la grille de classement des eaux vis-à-vis d'eutrophisation (Ifremer, 2000) ont montré que :

- ❖ Pour le nitrate, la grille montre un classement bleu au niveau de toutes les régions de la lagune et durant les deux périodes de l'année (humide et sèche).
- ❖ Pour le nitrite, la grille montre un classement bleu au niveau de la région sud-est et la région centre de la lagune, un classement vert au niveau de la région nord-ouest et la région bordure continentale.

- ❖ Pour l'ammonium, la grille montre un classement annuel rouge à l'exception de la zone recevant les eaux usées traitées du Grand Nador. Ce classement étant très défavorable en été par rapport à l'hiver.
- ❖ Pour l'orthophosphate, la grille montre un classement bleu au niveau de toutes les régions à l'exception de la bordure continentale.

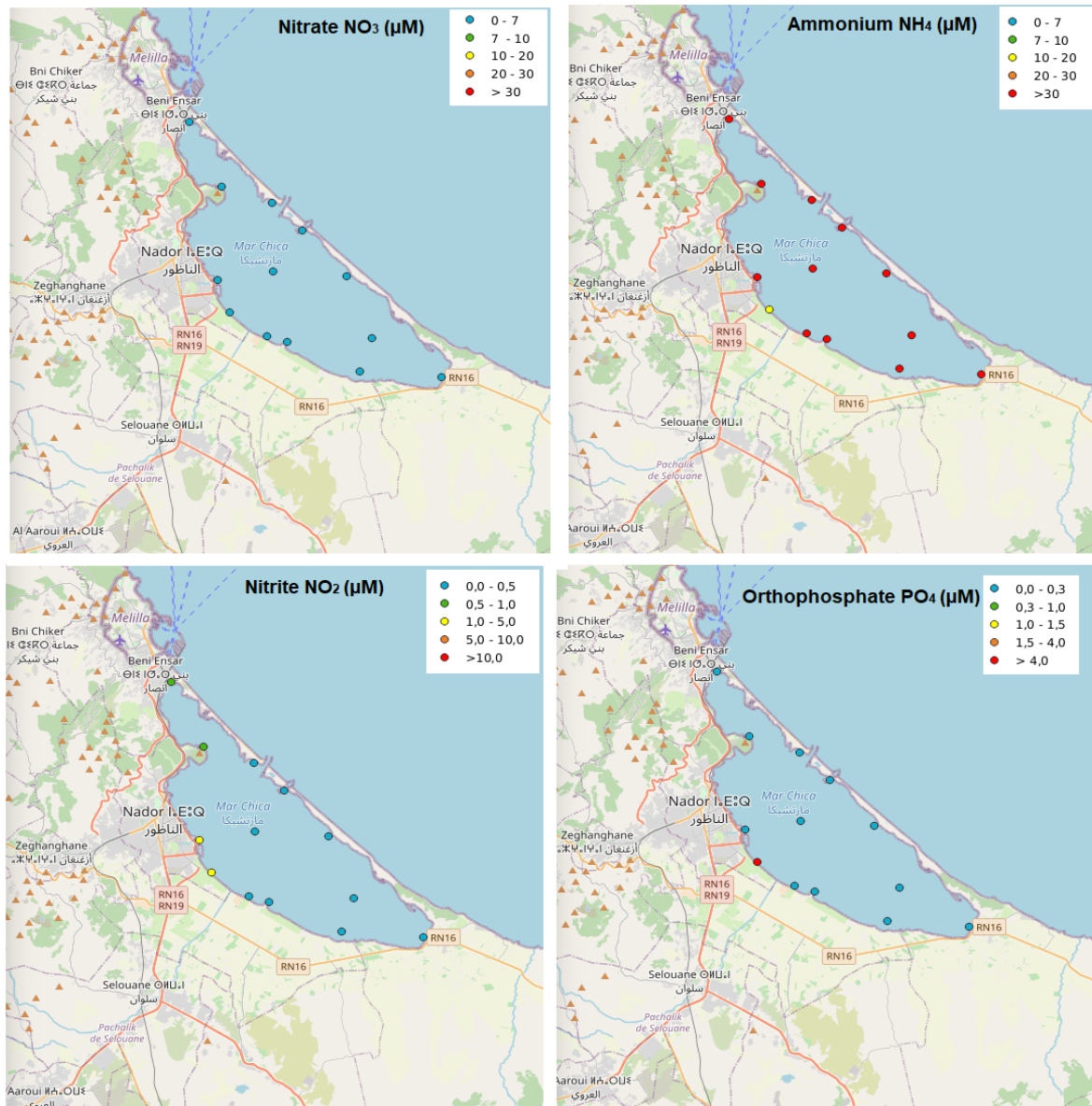


Figure 2 : Les concentrations moyennes annuelles des nutriments des eaux superficielles de la lagune de Marchica durant l'année 2017 (<https://plateforme.medtrix.fr>)

Sous indicateur 2 : Qualité chimique

Pour les éléments traces métalliques, la comparaison des concentrations annuelles moyennes du plomb, cadmium et nickel ont été comparées par rapport aux moyennes annuelles (NQE -MA) de la Directive 2013/39/UE du Parlement Européen et du Conseil du 12 août 2013. Les résultats ont montré que durant les deux années 2017 et 2018 :

- ❖ Les teneurs moyennes annuelles en Cd dépassent légèrement la moyenne annuelle (NQE Cadmium).
- ❖ Les teneurs moyennes annuelles en Pb et en Ni sont très élevés par rapport aux moyennes annuelles (NQE Plomb ; NQE Nickel).

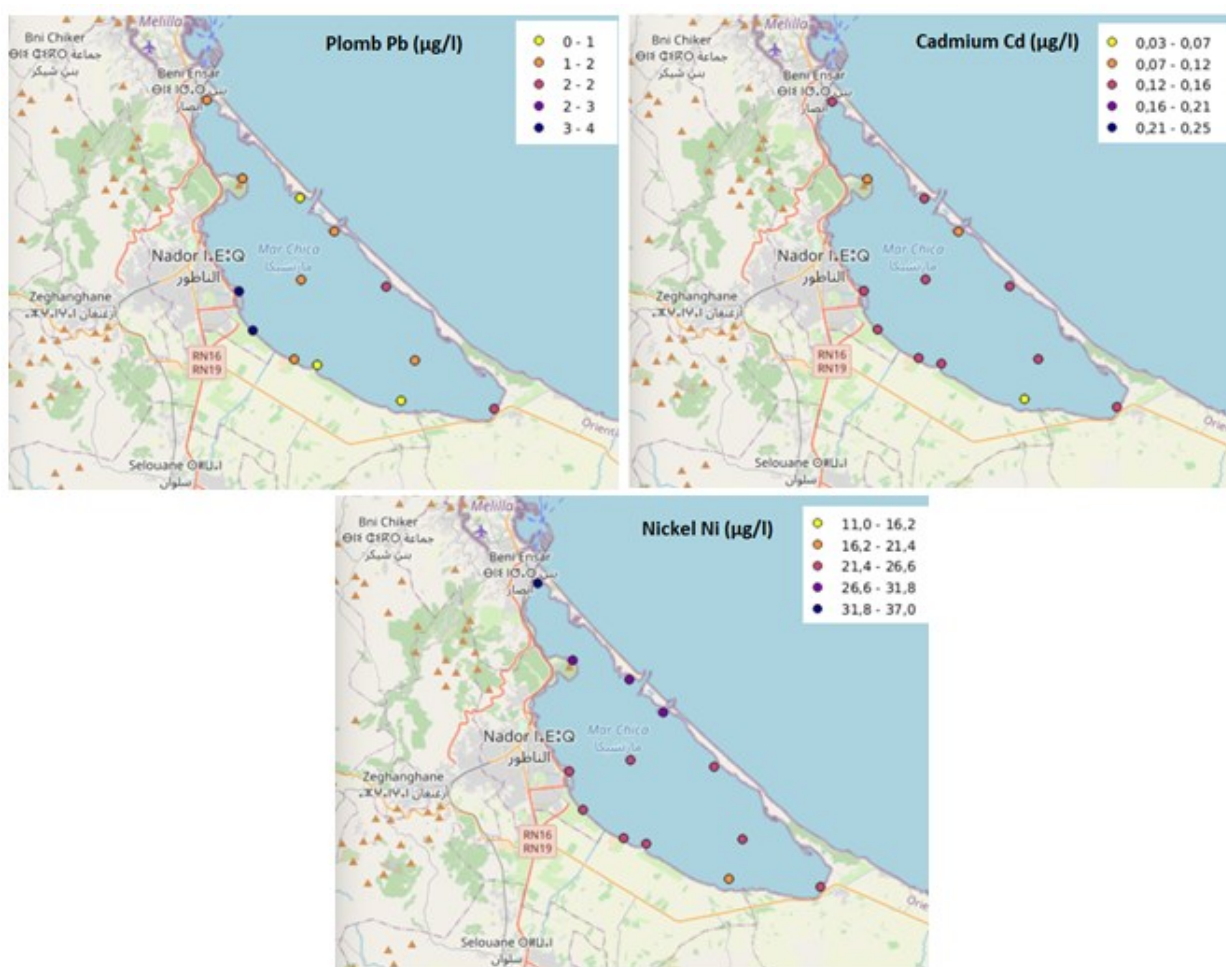


Figure 3 : Les concentrations moyennes annuelles du plomb, cadmium et nickel au niveau des eaux superficielles de la lagune de Marchica durant l'année 2018 (<https://plateforme.medtrix.fr/>).

III. Annexe 3

Les résultats des analyses de l'air durant les trois campagnes des années 2016, 2017 et 2018

Tableau 1 : Concentrations journalières des deux fractions (PM₁₀ et PM_{2,5}) de la matière en suspension en µg/m³ (Campagne 17 – 30 Juillet 2018 à Nador).

N° Filtre	Date/Heure de Démarrage	Date/Heure d'Arrêt	PM ₁₀ (µg/m ³)
N3	17/07/2018 12:40	18/07/2018 13:30	24,36
N5	18/07/2018 13:40	19/07/2018 13:40	34,39
N7	19/07/2018 13:50	20/07/2018 13:50	50,23
N9	20/07/2018 14:00	21/07/2018 14:00	40,98
N11	21/07/2018 14:10	22/07/2018 14:10	31,85
N13	22/07/2018 14:20	23/07/2018 14:20	36,56
N15	23/07/2018 14:30	24/07/2018 15:00	38,83
N17	24/07/2018 15:10	25/07/2018 15:10	57,28
N19	25/07/2018 15:20	26/07/2018 15:20	38,23
N21	26/07/2018 15:30	27/07/2018 15:30	49,52
N23	27/07/2018 15:40	28/07/2018 15:40	53,46
N25	28/07/2018 15:50	29/07/2018 15:50	39,24
N27	29/07/2018 16:00	30/07/2018 16:00	42,30
N29	30/07/2018 16:10	31/07/2018 16:10	42,93
N° Filtre	Date/Heure de Démarrage	Date/Heure d'Arrêt	PM _{2,5} (µg/m ³)
N4	17/07/2018 12:50	18/07/2018 13:30	19,40
N6	18/07/2018 13:40	19/07/2018 13:40	28,66
N8	19/07/2018 13:50	20/07/2018 13:50	25,91
N10	20/07/2018 14:00	21/07/2018 14:00	21,63
N12	21/07/2018 14:10	22/07/2018 14:10	18,37
N14	22/07/2018 14:20	23/07/2018 14:20	28,39
N16	23/07/2018 14:30	24/07/2018 15:00	22,06
N18	24/07/2018 15:10	25/07/2018 15:10	32,95
N20	25/07/2018 15:20	26/07/2018 15:20	13,53
N22	26/07/2018 15:30	27/07/2018 15:30	19,10
N24	27/07/2018 15:40	28/07/2018 15:40	27,33
N26	28/07/2018 15:50	29/07/2018 15:50	14,09
N28	29/07/2018 16:00	30/07/2018 16:00	15,95
N30	30/07/2018 16:10	31/07/2018 16:10	23,12

Tableau 2 : Concentrations journalières du carbone suie (BC) dans la fraction fine (PM_{2,5}) obtenues par des mesures optiques à sept longueurs d'onde (en ng/m³) (Campagne 17 – 30 Juillet 2018 à Nador).

Ech.	405nm	465nm	525nm	639nm	870nm	940nm	1050nm
N4	5599,17	5514,83	5252,59	5109,56	4551,83	4355,63	4277,00
N6	5368,06	5248,40	5000,21	4793,87	4307,10	4136,91	4036,65
N8	6766,29	6678,58	6395,84	6237,06	5688,22	5520,25	5334,20
N10	6354,40	6225,18	5917,69	5748,15	5232,48	5070,28	4891,76
N12	4526,68	4373,44	4175,48	3949,66	3523,27	3334,34	3238,07
N14	5271,85	5112,48	4877,53	4775,67	4372,49	4239,57	4032,80
N16	3495,37	3395,67	3177,15	3066,86	2750,74	2676,97	2549,92
N18	9089,69	9023,53	8645,53	8381,46	7624,79	7283,83	7257,31
N20	5193,19	5037,97	4718,94	4506,69	4032,98	3896,24	3830,78
N22	4690,75	4536,72	4181,97	3967,44	3457,57	3346,02	3297,23
N24	6758,95	6666,33	6399,81	6126,76	5519,05	5256,35	5177,16
N26	6217,07	6010,63	5669,00	5400,78	4886,90	4713,17	4612,19
N28	4765,38	4598,66	4296,26	4083,03	3647,35	3560,43	3576,79
N30	6604,68	6554,76	6297,06	6155,31	5710,83	5498,50	5477,79



Figure 1 : Photos d'échantillonnage du compartiment Air à la ville de Nador.

Tableau 3 : Concentrations du dioxyde de soufre (SO₂) (Campagne du 10 au 13 octobre 2016 à Nador).

Time	SO ₂ (ppm)	10/11/2016 06:00	<LD	10/12/2016 02:30	<LD
10/10/2016 10:00	0.0005	10/11/2016 06:30	<LD	10/12/2016 03:00	<LD
10/10/2016 10:30	0.0004	10/11/2016 07:00	<LD	10/12/2016 03:30	<LD
10/10/2016 11:00	0.0004	10/11/2016 07:30	<LD	10/12/2016 04:00	<LD
10/10/2016 11:30	0.0005	10/11/2016 08:00	<LD	10/12/2016 04:30	<LD
10/10/2016 12:00	0.0002	10/11/2016 08:30	<LD	10/12/2016 05:00	<LD
10/10/2016 12:30	<LD	10/11/2016 09:00	<LD	10/12/2016 05:30	<LD
10/10/2016 13:00	0	10/11/2016 09:30	<LD	10/12/2016 06:00	<LD
10/10/2016 13:30	0.0001	10/11/2016 10:00	<LD	10/12/2016 06:30	<LD
10/10/2016 14:00	0.0003	10/11/2016 10:30	<LD	10/12/2016 07:00	<LD
10/10/2016 14:30	0.0004	10/11/2016 11:00	<LD	10/12/2016 07:30	<LD
10/10/2016 15:00	0.0004	10/11/2016 11:30	<LD	10/12/2016 08:00	<LD
10/10/2016 15:30	0.0004	10/11/2016 12:00	<LD	10/12/2016 08:30	<LD
10/10/2016 16:00	0.0002	10/11/2016 12:30	<LD	10/12/2016 09:00	<LD
10/10/2016 16:30	0.0002	10/11/2016 13:00	<LD	10/12/2016 09:30	<LD
10/10/2016 17:00	0.0001	10/11/2016 13:30	<LD	10/12/2016 10:00	<LD
10/10/2016 17:30	0	10/11/2016 14:00	<LD	10/12/2016 10:30	<LD
10/10/2016 18:00	<LD	10/11/2016 14:30	<LD	10/12/2016 11:00	<LD
10/10/2016 18:30	<LD	10/11/2016 15:00	<LD	10/12/2016 11:30	<LD
10/10/2016 19:00	<LD	10/11/2016 15:30	<LD	10/12/2016 12:00	<LD
10/10/2016 19:30	<LD	10/11/2016 16:00	<LD	10/12/2016 12:30	<LD
10/10/2016 20:00	<LD	10/11/2016 16:30	<LD	10/12/2016 13:00	<LD
10/10/2016 20:30	<LD	10/11/2016 17:00	<LD	10/12/2016 13:30	<LD
10/10/2016 21:00	<LD	10/11/2016 17:30	<LD	10/12/2016 14:00	<LD
10/10/2016 21:30	<LD	10/11/2016 18:00	<LD	10/12/2016 14:30	<LD
10/10/2016 22:00	<LD	10/11/2016 18:30	<LD	10/12/2016 15:00	<LD
10/10/2016 22:30	<LD	10/11/2016 19:00	<LD	10/12/2016 15:30	<LD
10/10/2016 23:00	<LD	10/11/2016 19:30	<LD	10/12/2016 16:00	<LD
10/10/2016 23:30	<LD	10/11/2016 20:00	<LD	10/12/2016 16:30	<LD
10/11/2016 00:00	<LD	10/11/2016 20:30	<LD	10/12/2016 17:00	<LD
10/11/2016 00:30	<LD	10/11/2016 21:00	<LD	10/12/2016 17:30	<LD
10/11/2016 01:00	<LD	10/11/2016 21:30	<LD	10/12/2016 18:00	<LD
10/11/2016 01:30	<LD	10/11/2016 22:00	<LD	10/12/2016 18:30	<LD
10/11/2016 02:00	<LD	10/11/2016 22:30	<LD	10/12/2016 19:00	<LD
10/11/2016 02:30	<LD	10/11/2016 23:00	<LD	10/12/2016 19:30	<LD
10/11/2016 03:00	<LD	10/11/2016 23:30	<LD	10/12/2016 20:00	<LD
10/11/2016 03:30	<LD	10/12/2016 00:00	<LD	10/12/2016 20:30	<LD
10/11/2016 04:00	<LD	10/12/2016 00:30	<LD	10/12/2016 21:00	<LD
10/11/2016 04:30	<LD	10/12/2016 01:00	<LD	10/12/2016 21:30	<LD
10/11/2016 05:00	<LD	10/12/2016 01:30	<LD	10/12/2016 22:00	<LD
10/11/2016 05:30	<LD	10/12/2016 02:00	<LD		

10/12/2016 22:30	<LD
10/12/2016 23:00	<LD
10/12/2016 23:30	<LD
10/13/2016 00:00	<LD
10/13/2016 00:30	<LD
10/13/2016 01:00	<LD
10/13/2016 01:30	<LD
10/13/2016 02:00	<LD
10/13/2016 02:30	<LD
10/13/2016 03:00	<LD
10/13/2016 03:30	<LD
10/13/2016 04:00	<LD
10/13/2016 04:30	<LD
10/13/2016 05:00	<LD
10/13/2016 05:30	<LD
10/13/2016 06:00	<LD
10/13/2016 06:30	<LD
10/13/2016 07:00	<LD
10/13/2016 07:30	<LD
10/13/2016 08:00	<LD
10/13/2016 08:30	<LD
10/13/2016 09:00	<LD
10/13/2016 09:30	<LD
10/13/2016 10:00	<LD

Tableau 4 : Concentrations du dioxyde d’azote (NO₂) (Campagnes du 10 au 13 octobre 2016 et du 05 au 08 avril 2017 à Nador).

Time	NO ₂ (ppm)		11/10/2016 06:00	0.01		12/10/2016 02:30	0.005
10/10/2016 10:00	0.02		11/10/2016 06:30	0.009		12/10/2016 03:00	0.005
10/10/2016 10:30	0.023		11/10/2016 07:00	0.011		12/10/2016 03:30	0.006
10/10/2016 11:00	0.023		11/10/2016 07:30	0.014		12/10/2016 04:00	0.005
10/10/2016 11:30	0.023		11/10/2016 08:00	0.028		12/10/2016 04:30	0.006
10/10/2016 12:00	0.022		11/10/2016 08:30	0.027		12/10/2016 05:00	0.005
10/10/2016 12:30	0.023		11/10/2016 09:00	0.033		12/10/2016 05:30	0.005
10/10/2016 13:00	0.021		11/10/2016 09:30	0.025		12/10/2016 06:00	0.011
10/10/2016 13:30	0.018		11/10/2016 10:00	0.026		12/10/2016 06:30	0.009
10/10/2016 14:00	0.015		11/10/2016 10:30	0.022		12/10/2016 07:00	0.008
10/10/2016 14:30	0.012		11/10/2016 11:00	0.016		12/10/2016 07:30	0.015
10/10/2016 15:00	0.013		11/10/2016 11:30	0.014		12/10/2016 08:00	0.019
10/10/2016 15:30	0.015		11/10/2016 12:00	0.012		12/10/2016 08:30	0.024
10/10/2016 16:00	0.014		11/10/2016 12:30	0.016		12/10/2016 09:00	0.028
10/10/2016 16:30	0.012		11/10/2016 13:00	0.012		12/10/2016 09:30	0.021
10/10/2016 17:00	0.019		11/10/2016 13:30	0.009		12/10/2016 10:00	0.02
10/10/2016 17:30	0.019		11/10/2016 14:00	0.011		12/10/2016 10:30	0.017
10/10/2016 18:00	0.015		11/10/2016 14:30	0.011		12/10/2016 11:00	0.014
10/10/2016 18:30	0.02		11/10/2016 15:00	0.01		12/10/2016 11:30	0.013
10/10/2016 19:00	0.025		11/10/2016 15:30	0.009		12/10/2016 12:00	0.015
10/10/2016 19:30	0.024		11/10/2016 16:00	0.011		12/10/2016 12:30	0.014
10/10/2016 20:00	0.025		11/10/2016 16:30	0.014		12/10/2016 13:00	0.015
10/10/2016 20:30	0.019		11/10/2016 17:00	0.02		12/10/2016 13:30	0.019
10/10/2016 21:00	0.014		11/10/2016 17:30	0.019		12/10/2016 14:00	0.019
10/10/2016 21:30	0.013		11/10/2016 18:00	0.015		12/10/2016 14:30	0.016
10/10/2016 22:00	0.014		11/10/2016 18:30	0.013		12/10/2016 15:00	0.013
10/10/2016 22:30	0.015		11/10/2016 19:00	0.014		12/10/2016 15:30	0.016
10/10/2016 23:00	0.018		11/10/2016 19:30	0.019		12/10/2016 16:00	0.017
10/10/2016 23:30	0.022		11/10/2016 20:00	0.02		12/10/2016 16:30	0.016
11/10/2016 00:00	0.018		11/10/2016 20:30	0.019		12/10/2016 17:00	0.019
11/10/2016 00:30	0.015		11/10/2016 21:00	0.018		12/10/2016 17:30	0.019
11/10/2016 01:00	0.014		11/10/2016 21:30	0.023		12/10/2016 18:00	0.022
11/10/2016 01:30	0.009		11/10/2016 22:00	0.011		12/10/2016 18:30	0.024
11/10/2016 02:00	0.008		11/10/2016 22:30	0.012		12/10/2016 19:00	0.024
11/10/2016 02:30	0.006		11/10/2016 23:00	0.01		12/10/2016 19:30	0.024
11/10/2016 03:00	0.004		11/10/2016 23:30	0.012		12/10/2016 20:00	0.016
11/10/2016 03:30	0.007		12/10/2016 00:00	0.011		12/10/2016 20:30	0.015
11/10/2016 04:00	0.008		12/10/2016 00:30	0.012		12/10/2016 21:00	0.019
11/10/2016 04:30	0.009		12/10/2016 01:00	0.006		12/10/2016 21:30	0.021
11/10/2016 05:00	0.012		12/10/2016 01:30	0.007		12/10/2016 22:00	0.018
11/10/2016 05:30	0.009		12/10/2016 02:00	0.006		12/10/2016 22:30	0.022

12/10/2016 23:00	0.019
12/10/2016 23:30	0.016
13/10/2016 00:00	0.02
13/10/2016 00:30	0.023
13/10/2016 01:00	0.011
13/10/2016 01:30	0.012
13/10/2016 02:00	0.006
13/10/2016 02:30	0.009
13/10/2016 03:00	0.009
13/10/2016 03:30	0.008
13/10/2016 04:00	0.005
13/10/2016 04:30	0.005
13/10/2016 05:00	0.005
13/10/2016 05:30	0.005
10/132016 06:00	0.006
13/10/2016 06:30	0.007
13/10/2016 07:00	0.009
13/10/2016 07:30	0.011
13/10/2016 08:00	0.011
13/10/2016 08:30	0.004
13/10/2016 09:00	0.005
13/10/2016 09:30	0.01
13/10/2016 10:00	0.021
05/04/2017 10:00	0.010
05/04/2017 10:30	0.016
05/04/2017 11:00	0.016
05/04/2017 11:30	0.015
05/04/2017 12:00	0.013
05/04/2017 12:30	0.009
05/04/2017 13:00	0.010
05/04/2017 13:30	0.014
05/04/2017 14:00	0.009
05/04/2017 14:30	0.007
05/04/2017 15:00	0.010
05/04/2017 15:30	0.010
05/04/2017 16:00	0.009
05/04/2017 16:30	0.009
05/04/2017 17:00	0.008
05/04/2017 17:30	0.010
05/04/2017 18:00	0.012
05/04/2017 18:30	0.010
05/04/2017 19:00	0.009
05/04/2017 19:30	0.010

05/04/2017 20:00	0.015
05/04/2017 20:30	0.012
05/04/2017 21:00	0.013
05/04/2017 21:30	0.012
05/04/2017 22:00	0.010
05/04/2017 22:30	0.009
05/04/2017 23:00	0.006
05/04/2017 23:30	0.004
06/04/2017 00:00	0.005
06/04/2017 00:30	0.005
06/04/2017 01:00	0.003
06/04/2017 01:30	0.001
06/04/2017 02:00	0.002
06/04/2017 02:30	0.001
06/04/2017 03:00	0.001
06/04/2017 03:30	0.001
06/04/2017 04:00	0.000
06/04/2017 04:30	0.001
06/04/2017 05:00	0.001
06/04/2017 05:30	0.001
06/04/2017 06:00	0.001
06/04/2017 06:30	0.003
06/04/2017 07:00	0.005
06/04/2017 07:30	0.009
06/04/2017 08:00	0.015
06/04/2017 08:30	0.016
06/04/2017 09:00	0.017
06/04/2017 09:30	0.015
06/04/2017 10:00	0.011
06/04/2017 10:30	0.010
06/04/2017 11:00	0.012
06/04/2017 11:30	0.014
06/04/2017 12:00	0.013
06/04/2017 12:30	0.013
06/04/2017 13:00	0.012
06/04/2017 13:30	0.009
06/04/2017 14:00	0.007
06/04/2017 14:30	0.007
06/04/2017 15:00	0.008
06/04/2017 15:30	0.009
06/04/2017 16:00	0.009
06/04/2017 16:30	0.012
06/04/2017 17:00	0.014
06/04/2017 17:30	0.012

06/04/2017 18:00	0.014
06/04/2017 18:30	0.016
06/04/2017 19:00	0.015
06/04/2017 19:30	0.021
06/04/2017 20:00	0.019
06/04/2017 20:30	0.019
06/04/2017 21:00	0.019
06/04/2017 21:30	0.016
06/04/2017 22:00	0.014
06/04/2017 22:30	0.009
06/04/2017 23:00	0.008
06/04/2017 23:30	0.007
07/04/2017 00:00	0.004
07/04/2017 00:30	0.006
07/04/2017 01:00	0.007
07/04/2017 01:30	0.006
07/04/2017 02:00	0.01
07/04/2017 02:30	0.006
07/04/2017 03:00	0.006
07/04/2017 03:30	0.01
07/04/2017 04:00	0.008
07/04/2017 04:30	0.008
07/04/2017 05:00	0.009
07/04/2017 05:30	0.014
07/04/2017 06:00	0.009
07/04/2017 06:30	0.017
07/04/2017 07:00	0.0023
07/04/2017 07:30	0.018
07/04/2017 08:00	0.026
07/04/2017 08:30	0.017
07/04/2017 09:00	0.017
07/04/2017 09:30	0.014
07/04/2017 10:00	0.013
07/04/2017 10:30	0.014
07/04/2017 11:00	0.013
07/04/2017 11:30	0.012
07/04/2017 12:00	0.013
07/04/2017 12:30	0.010
07/04/2017 13:00	0.009
07/04/2017 13:30	0.007
07/04/2017 14:00	0.006
07/04/2017 14:30	0.008
07/04/2017 15:00	0.008
07/04/2017 15:30	0.008

07/04/2017 16:00	0.008
07/04/2017 16:30	0.007
07/04/2017 17:00	0.007
07/04/2017 17:30	0.007
07/04/2017 18:00	0.008
07/04/2017 18:30	0.011
07/04/2017 19:00	0.016
07/04/2017 19:30	0.019
07/04/2017 20:00	0.023
07/04/2017 20:30	0.023
07/04/2017 21:00	0.018
07/04/2017 21:30	0.015
07/04/2017 22:00	0.011
07/04/2017 22:30	0.011
07/04/2017 23:00	0.007
07/04/2017 23:30	0.006
08/04/2017 00:00	0.007
08/04/2017 00:30	0.005
08/04/2017 01:00	0.004
08/04/2017 01:30	0.005
08/04/2017 02:00	0.005
08/04/2017 02:30	0.005
08/04/2017 03:00	0.006
08/04/2017 03:30	0.004
08/04/2017 04:00	0.005
08/04/2017 04:30	0.005
08/04/2017 05:00	0.003
08/04/2017 05:30	0.006
08/04/2017 06:00	0.007
08/04/2017 06:30	0.012
08/04/2017 07:00	0.010

08/04/2017 07:30	0.019
08/04/2017 08:00	0.018
08/04/2017 08:30	0.014
08/04/2017 09:00	0.016
08/04/2017 09:30	0.014
08/04/2017 10:00	0.011

Tableau 5 : Concentrations du monoxyde de carbone (CO) (Campagnes du 10 au 13 octobre 2016 et du 05 au 08 avril 2017 à Nador).

Time	CO (ppm)	10/10/2016 19:30	0.36	11/10/2016 05:30	0.53
10/10/2016 09:45	0.01	10/10/2016 19:45	0.36	11/10/2016 05:45	0.78
10/10/2016 10:00	<LD	10/10/2016 20:00	0.32	11/10/2016 06:00	0.67
10/10/2016 10:15	0.26	10/10/2016 20:15	0.31	11/10/2016 06:15	0.45
10/10/2016 10:30	0.37	10/10/2016 20:30	0.28	11/10/2016 06:30	0.22
10/10/2016 10:45	0.3	10/10/2016 20:45	0.29	11/10/2016 06:45	0.26
10/10/2016 11:00	0.27	10/10/2016 21:00	0.28	11/10/2016 07:00	0.25
10/10/2016 11:15	0.29	10/10/2016 21:15	0.24	11/10/2016 07:15	0.27
10/10/2016 11:30	0.34	10/10/2016 21:30	0.24	11/10/2016 07:30	0.42
10/10/2016 11:45	0.3	10/10/2016 21:45	0.24	11/10/2016 07:45	0.47
10/10/2016 12:00	0.34	10/10/2016 22:00	0.23	11/10/2016 08:00	0.43
10/10/2016 12:15	0.35	10/10/2016 22:15	0.26	11/10/2016 08:15	0.48
10/10/2016 12:30	0.33	10/10/2016 22:30	0.22	11/10/2016 08:30	0.61
10/10/2016 12:45	0.33	10/10/2016 22:45	0.3	11/10/2016 08:45	0.64
10/10/2016 13:00	0.3	10/10/2016 23:00	0.33	11/10/2016 09:00	0.55
10/10/2016 13:15	0.3	10/10/2016 23:15	0.37	11/10/2016 09:15	0.39
10/10/2016 13:30	0.28	10/10/2016 23:30	0.32	11/10/2016 09:30	0.34
10/10/2016 13:45	0.28	10/10/2016 23:45	0.3	11/10/2016 09:45	0.4
10/10/2016 14:00	0.26	11/10/2016 00:00	0.3	11/10/2016 10:00	0.31
10/10/2016 14:15	0.28	11/10/2016 00:15	0.3	11/10/2016 10:15	0.3
10/10/2016 14:30	0.27	11/10/2016 00:30	0.28	11/10/2016 10:30	0.4
10/10/2016 14:45	0.25	11/10/2016 00:45	0.26	11/10/2016 10:45	0.32
10/10/2016 15:00	0.26	11/10/2016 01:00	0.28	11/10/2016 11:00	0.24
10/10/2016 15:15	0.28	11/10/2016 01:15	0.22	11/10/2016 11:15	0.21
10/10/2016 15:30	0.23	11/10/2016 01:30	0.18	11/10/2016 11:30	0.27
10/10/2016 15:45	0.23	11/10/2016 01:45	0.17	11/10/2016 11:45	0.22
10/10/2016 16:00	0.24	11/10/2016 02:00	0.18	11/10/2016 12:00	0.28
10/10/2016 16:15	0.19	11/10/2016 02:15	0.16	11/10/2016 12:15	0.26
10/10/2016 16:30	0.23	11/10/2016 02:30	0.17	11/10/2016 12:30	0.29
10/10/2016 16:45	0.23	11/10/2016 02:45	0.17	11/10/2016 12:45	0.22
10/10/2016 17:00	0.27	11/10/2016 03:00	0.2	11/10/2016 13:00	0.19
10/10/2016 17:15	0.26	11/10/2016 03:15	0.17	11/10/2016 13:15	0.21
10/10/2016 17:30	0.26	11/10/2016 03:30	0.2	11/10/2016 13:30	0.26
10/10/2016 17:45	0.23	11/10/2016 03:45	0.22	11/10/2016 13:45	0.23
10/10/2016 18:00	0.24	11/10/2016 04:00	0.21	11/10/2016 14:00	0.24
10/10/2016 18:15	0.31	11/10/2016 04:15	0.23	11/10/2016 14:15	0.24
10/10/2016 18:30	0.35	11/10/2016 04:30	0.22	11/10/2016 14:30	0.25
10/10/2016 18:45	0.37	11/10/2016 04:45	0.24	11/10/2016 14:45	0.22
10/10/2016 19:00	0.3	11/10/2016 05:00	0.25	11/10/2016 15:00	0.22
10/10/2016 19:15	0.32	11/10/2016 05:15	0.23	11/10/2016 15:15	0.21

11/10/2016 15:30	0.24
11/10/2016 15:45	0.22
11/10/2016 16:00	0.23
11/10/2016 16:15	0.26
11/10/2016 16:30	0.3
11/10/2016 16:45	0.27
11/10/2016 17:00	0.3
11/10/2016 17:15	0.32
11/10/2016 17:30	0.25
11/10/2016 17:45	0.21
11/10/2016 18:00	0.24
11/10/2016 18:15	0.25
11/10/2016 18:30	0.28
11/10/2016 18:45	0.31
11/10/2016 19:00	0.28
11/10/2016 19:15	0.32
11/10/2016 19:30	0.34
11/10/2016 19:45	0.34
11/10/2016 20:00	0.39
11/10/2016 20:15	0.36
11/10/2016 20:30	0.29
11/10/2016 20:45	0.27
11/10/2016 21:00	0.28
11/10/2016 21:15	0.35
11/10/2016 21:30	0.2
11/10/2016 21:45	0.19
11/10/2016 22:00	0.27
11/10/2016 22:15	0.25
11/10/2016 22:30	0.23
11/10/2016 22:45	0.22
11/10/2016 23:00	0.23
11/10/2016 23:15	0.2
11/10/2016 23:30	0.22
11/10/2016 23:45	0.26
12/10/2016 00:00	0.24
12/10/2016 00:15	0.28
12/10/2016 00:30	0.22
12/10/2016 00:45	0.19
12/10/2016 01:00	0.18
12/10/2016 01:15	0.19
12/10/2016 01:30	0.19
12/10/2016 01:45	0.2
12/10/2016 02:00	0.18

12/10/2016 02:15	0.18
12/10/2016 02:30	0.18
12/10/2016 02:45	0.18
12/10/2016 03:00	0.19
12/10/2016 03:15	0.21
12/10/2016 03:30	0.18
12/10/2016 03:45	0.19
12/10/2016 04:00	0.2
12/10/2016 04:15	0.2
12/10/2016 04:30	0.2
12/10/2016 04:45	0.2
12/10/2016 05:00	0.18
12/10/2016 05:15	0.18
12/10/2016 05:30	0.4
12/10/2016 05:45	0.48
12/10/2016 06:00	0.58
12/10/2016 06:15	0.24
12/10/2016 06:30	0.24
12/10/2016 06:45	0.96
12/10/2016 07:00	0.62
12/10/2016 07:15	0.33
12/10/2016 07:30	0.33
12/10/2016 07:45	0.34
12/10/2016 08:00	0.29
12/10/2016 08:15	0.36
12/10/2016 08:30	0.47
12/10/2016 08:45	0.45
12/10/2016 09:00	0.49
12/10/2016 09:15	0.33
12/10/2016 09:30	0.34
12/10/2016 09:45	0.35
12/10/2016 10:00	0.25
12/10/2016 10:15	0.31
12/10/2016 10:30	0.23
12/10/2016 10:45	0.29
12/10/2016 11:00	0.27
12/10/2016 11:15	0.24
12/10/2016 11:30	0.26
12/10/2016 11:45	0.26
12/10/2016 12:00	0.26
12/10/2016 12:15	0.25
12/10/2016 12:30	0.25
12/10/2016 12:45	0.32

12/10/2016 13:00	0.3
12/10/2016 13:15	0.33
12/10/2016 13:30	0.28
12/10/2016 13:45	0.35
12/10/2016 14:00	0.31
12/10/2016 14:15	0.27
12/10/2016 14:30	0.22
12/10/2016 14:45	0.23
12/10/2016 15:00	0.24
12/10/2016 15:15	0.25
12/10/2016 15:30	0.24
12/10/2016 15:45	0.26
12/10/2016 16:00	0.25
12/10/2016 16:15	0.27
12/10/2016 16:30	0.25
12/10/2016 16:45	0.26
12/10/2016 17:00	0.29
12/10/2016 17:15	0.31
12/10/2016 17:30	0.35
12/10/2016 17:45	0.37
12/10/2016 18:00	0.36
12/10/2016 18:15	0.34
12/10/2016 18:30	0.37
12/10/2016 18:45	0.34
12/10/2016 19:00	0.33
12/10/2016 19:15	0.32
12/10/2016 19:30	0.28
12/10/2016 19:45	0.28
12/10/2016 20:00	0.21
12/10/2016 20:15	0.26
12/10/2016 20:30	0.25
12/10/2016 20:45	0.24
12/10/2016 21:00	0.29
12/10/2016 21:15	0.29
12/10/2016 21:30	0.23
12/10/2016 21:45	0.26
12/10/2016 22:00	0.22
12/10/2016 22:15	0.27
12/10/2016 22:30	0.3
12/10/2016 22:45	0.25
12/10/2016 23:00	0.24
12/10/2016 23:15	0.33
12/10/2016 23:30	0.31

12/10/2016 23:45	0.34
13/10/2016 00:00	0.43
13/10/2016 00:15	0.42
13/10/2016 00:30	0.29
13/10/2016 00:45	0.23
13/10/2016 01:00	0.23
13/10/2016 01:15	0.23
13/10/2016 01:30	0.22
13/10/2016 01:45	0.17
13/10/2016 02:00	0.16
13/10/2016 02:15	0.25
13/10/2016 02:30	0.26
13/10/2016 02:45	0.27
13/10/2016 03:00	0.26
13/10/2016 03:15	0.2
13/10/2016 03:30	0.17
13/10/2016 03:45	0.15
13/10/2016 04:00	0.14
13/10/2016 04:15	0.15
13/10/2016 04:30	0.19
13/10/2016 04:45	0.16
13/10/2016 05:00	0.15
13/10/2016 05:15	0.16
13/10/2016 05:30	0.2
13/10/2016 05:45	0.32
13/10/2016 06:00	0.26
13/10/2016 06:15	0.26
13/10/2016 06:30	0.23
13/10/2016 06:45	0.23
13/10/2016 07:00	0.27
13/10/2016 07:15	0.25
13/10/2016 07:30	0.25
13/10/2016 07:45	0.23
13/10/2016 08:00	0.16
13/10/2016 08:15	0.16
13/10/2016 08:30	0.18
13/10/2016 08:45	0.19
13/10/2016 09:00	0.19
13/10/2016 09:15	0.21
13/10/2016 09:30	0.28
13/10/2016 09:45	0.3
13/10/2016 10:00	0.26
05/04/2017 09:45	0.12

05/04/2017 10:00	0.17
05/04/2017 10:15	0.22
05/04/2017 10:30	0.33
05/04/2017 10:45	0.29
05/04/2017 11:00	0.28
05/04/2017 11:15	0.28
05/04/2017 11:30	0.28
05/04/2017 11:45	0.28
05/04/2017 12:00	0.28
05/04/2017 12:15	0.24
05/04/2017 12:30	0.23
05/04/2017 12:45	0.22
05/04/2017 13:00	0.25
05/04/2017 13:15	0.29
05/04/2017 13:30	0.23
05/04/2017 13:45	0.26
05/04/2017 14:00	0.2
05/04/2017 14:15	0.25
05/04/2017 14:30	0.25
05/04/2017 14:45	0.21
05/04/2017 15:00	0.27
05/04/2017 15:15	0.3
05/04/2017 15:30	0.24
05/04/2017 15:45	0.24
05/04/2017 16:00	0.23
05/04/2017 16:15	0.22
05/04/2017 16:30	0.27
05/04/2017 16:45	0.22
05/04/2017 17:00	0.27
05/04/2017 17:15	0.27
05/04/2017 17:30	0.23
05/04/2017 17:45	0.22
05/04/2017 18:00	0.27
05/04/2017 18:15	0.24
05/04/2017 18:30	0.25
05/04/2017 18:45	0.22
05/04/2017 19:00	0.22
05/04/2017 19:15	0.27
05/04/2017 19:30	0.23
05/04/2017 19:45	0.24
05/04/2017 20:00	0.27
05/04/2017 20:15	0.22
05/04/2017 20:30	0.26

05/04/2017 20:45	0.26
05/04/2017 21:00	0.26
05/04/2017 21:15	0.26
05/04/2017 21:30	0.23
05/04/2017 21:45	0.21
05/04/2017 22:00	0.23
05/04/2017 22:15	0.23
05/04/2017 22:30	0.21
05/04/2017 22:45	0.2
05/04/2017 23:00	0.18
05/04/2017 23:15	0.19
05/04/2017 23:30	0.19
05/04/2017 23:45	0.18
06/04/2017 00:00	0.17
06/04/2017 00:15	0.17
06/04/2017 00:30	0.18
06/04/2017 00:45	0.18
06/04/2017 01:00	0.17
06/04/2017 01:15	0.18
06/04/2017 01:30	0.17
06/04/2017 01:45	0.17
06/04/2017 02:00	0.17
06/04/2017 02:15	0.16
06/04/2017 02:30	0.15
06/04/2017 02:45	0.15
06/04/2017 03:00	0.15
06/04/2017 03:15	0.15
06/04/2017 03:30	0.16
06/04/2017 03:45	0.16
06/04/2017 04:00	0.17
06/04/2017 04:15	0.16
06/04/2017 04:30	0.18
06/04/2017 04:45	0.18
06/04/2017 05:00	0.16
06/04/2017 05:15	0.16
06/04/2017 05:30	0.16
06/04/2017 05:45	0.16
06/04/2017 06:00	0.15
06/04/2017 06:15	0.15
06/04/2017 06:30	0.17
06/04/2017 06:45	0.17
06/04/2017 07:00	0.17
06/04/2017 07:15	0.18

06/04/2017 07:30	0.2
06/04/2017 07:45	0.21
06/04/2017 08:00	0.27
06/04/2017 08:15	0.27
06/04/2017 08:30	0.25
06/04/2017 08:45	0.26
06/04/2017 09:00	0.26
06/04/2017 09:15	0.28
06/04/2017 09:30	0.26
06/04/2017 09:45	0.26
06/04/2017 10:00	0.25
06/04/2017 10:15	0.27
06/04/2017 10:30	0.3
06/04/2017 10:45	0.26
06/04/2017 11:00	0.29
06/04/2017 11:15	0.31
06/04/2017 11:30	0.26
06/04/2017 11:45	0.33
06/04/2017 12:00	0.26
06/04/2017 12:15	0.27
06/04/2017 12:30	0.28
06/04/2017 12:45	0.29
06/04/2017 13:00	0.24
06/04/2017 13:15	0.22
06/04/2017 13:30	0.25
06/04/2017 13:45	0.22
06/04/2017 14:00	0.2
06/04/2017 14:15	0.22
06/04/2017 14:30	0.21
06/04/2017 14:45	0.21
06/04/2017 15:00	0.2
06/04/2017 15:15	0.21
06/04/2017 15:30	0.24
06/04/2017 15:45	0.22
06/04/2017 16:00	0.21
06/04/2017 16:15	0.25
06/04/2017 16:30	0.24
06/04/2017 16:45	0.25
06/04/2017 17:00	0.28
06/04/2017 17:15	0.25
06/04/2017 17:30	0.24
06/04/2017 17:45	0.28
06/04/2017 18:00	0.24

06/04/2017 18:15	0.27
06/04/2017 18:30	0.34
06/04/2017 18:45	0.29
06/04/2017 19:00	0.27
06/04/2017 19:15	0.31
06/04/2017 19:30	0.3
06/04/2017 19:45	0.31
06/04/2017 20:00	0.31
06/04/2017 20:15	0.26
06/04/2017 20:30	0.28
06/04/2017 20:45	0.26
06/04/2017 21:00	0.27
06/04/2017 21:15	0.27
06/04/2017 21:30	0.29
06/04/2017 21:45	0.29
06/04/2017 22:00	0.25
06/04/2017 22:15	0.22
06/04/2017 22:30	0.2
06/04/2017 22:45	0.21
06/04/2017 23:00	0.2
06/04/2017 23:15	0.2
06/04/2017 23:30	0.19
06/04/2017 23:45	0.19
07/04/2017 00:00	0.17
07/04/2017 00:15	0.18
07/04/2017 00:30	0.2
07/04/2017 00:45	0.21
07/04/2017 01:00	0.19
07/04/2017 01:15	0.18
07/04/2017 01:30	0.19
07/04/2017 01:45	0.21
07/04/2017 02:00	0.21
07/04/2017 02:15	0.22
07/04/2017 02:30	0.23
07/04/2017 02:45	0.2
07/04/2017 03:00	0.22
07/04/2017 03:15	0.24
07/04/2017 03:30	0.24
07/04/2017 03:45	0.24
07/04/2017 04:00	0.22
07/04/2017 04:15	0.2
07/04/2017 04:30	0.22
07/04/2017 04:45	0.26

07/04/2017 05:00	0.25
07/04/2017 05:15	0.35
07/04/2017 05:30	0.35
07/04/2017 05:45	0.25
07/04/2017 06:00	0.24
07/04/2017 06:15	0.26
07/04/2017 06:30	0.28
07/04/2017 06:45	0.27
07/04/2017 07:00	0.41
07/04/2017 07:15	0.41
07/04/2017 07:30	0.33
07/04/2017 07:45	0.42
07/04/2017 08:00	0.38
07/04/2017 08:15	0.31
07/04/2017 08:30	0.28
07/04/2017 08:45	0.26
07/04/2017 09:00	0.25
07/04/2017 09:15	0.29
07/04/2017 09:30	0.27
07/04/2017 09:45	0.22
07/04/2017 10:00	0.3
07/04/2017 10:15	0.31
07/04/2017 10:30	0.26
07/04/2017 10:45	0.27
07/04/2017 11:00	0.28
07/04/2017 11:15	0.29
07/04/2017 11:30	0.26
07/04/2017 11:45	0.3
07/04/2017 12:00	0.29
07/04/2017 12:15	0.26
07/04/2017 12:30	0.25
07/04/2017 12:45	0.24
07/04/2017 13:00	0.24
07/04/2017 13:15	0.21
07/04/2017 13:30	0.22
07/04/2017 13:45	0.21
07/04/2017 14:00	0.2
07/04/2017 14:15	0.21
07/04/2017 14:30	0.23
07/04/2017 14:45	0.22
07/04/2017 15:00	0.22
07/04/2017 15:15	0.21
07/04/2017 15:30	0.22

07/04/2017 15:45	0.24
07/04/2017 16:00	0.23
07/04/2017 16:15	0.23
07/04/2017 16:30	0.22
07/04/2017 16:45	0.2
07/04/2017 17:00	0.2
07/04/2017 17:15	0.21
07/04/2017 17:30	0.2
07/04/2017 17:45	0.21
07/04/2017 18:00	0.23
07/04/2017 18:15	0.28
07/04/2017 18:30	0.24
07/04/2017 18:45	0.27
07/04/2017 19:00	0.26
07/04/2017 19:15	0.29
07/04/2017 19:30	0.3
07/04/2017 19:45	0.3
07/04/2017 20:00	0.31
07/04/2017 20:15	0.33
07/04/2017 20:30	0.28
07/04/2017 20:45	0.27
07/04/2017 21:00	0.26
07/04/2017 21:15	0.29
07/04/2017 21:30	0.26
07/04/2017 21:45	0.23
07/04/2017 22:00	0.22
07/04/2017 22:15	0.23
07/04/2017 22:30	0.23
07/04/2017 22:45	0.21

07/04/2017 23:00	0.18
07/04/2017 23:15	0.19
07/04/2017 23:30	0.19
07/04/2017 23:45	0.2
08/04/2017 00:00	0.2
08/04/2017 00:15	0.18
08/04/2017 00:30	0.18
08/04/2017 00:45	0.2
08/04/2017 01:00	0.18
08/04/2017 01:15	0.18
08/04/2017 01:30	0.19
08/04/2017 01:45	0.21
08/04/2017 02:00	0.2
08/04/2017 02:15	0.21
08/04/2017 02:30	0.22
08/04/2017 02:45	0.19
08/04/2017 03:00	0.19
08/04/2017 03:15	0.19
08/04/2017 03:30	0.18
08/04/2017 03:45	0.17
08/04/2017 04:00	0.17
08/04/2017 04:15	0.17
08/04/2017 04:30	0.19
08/04/2017 04:45	0.2
08/04/2017 05:00	0.18
08/04/2017 05:15	0.18
08/04/2017 05:30	0.19
08/04/2017 05:45	0.18
08/04/2017 06:00	0.19

08/04/2017 06:15	0.19
08/04/2017 06:30	0.21
08/04/2017 06:45	0.19
08/04/2017 07:00	0.25
08/04/2017 07:15	0.32
08/04/2017 07:30	0.3
08/04/2017 07:45	0.35
08/04/2017 08:00	0.37
08/04/2017 08:15	0.28
08/04/2017 08:30	0.3
08/04/2017 08:45	0.29
08/04/2017 09:00	0.28
08/04/2017 09:15	0.26
08/04/2017 09:30	0.25
08/04/2017 09:45	0.25
08/04/2017 10:00	0.26
08/04/2017 10:15	0.08

Tableau 6 : Concentrations d'ozone (O₃) (Campagnes du 10 au 13 octobre 2016 et du 05 au 08 avril 2017 à Nador).

Time	O ₃ (ppb)				
10/10/2016 10:00	1	11/10/2016 06:00	4	12/10/2016 02:30	9
10/10/2016 10:30	3	11/10/2016 06:30	4	12/10/2016 03:00	7
10/10/2016 11:00	2	11/10/2016 07:00	4	12/10/2016 03:30	7
10/10/2016 11:30	4	11/10/2016 07:30	2	12/10/2016 04:00	8
10/10/2016 12:00	5	11/10/2016 08:00	2	12/10/2016 04:30	7
10/10/2016 12:30	6	11/10/2016 08:30	2	12/10/2016 05:00	7
10/10/2016 13:00	6	11/10/2016 09:00	3	12/10/2016 05:30	6
10/10/2016 13:30	7	11/10/2016 09:30	4	12/10/2016 06:00	6
10/10/2016 14:00	6	11/10/2016 10:00	4	12/10/2016 06:30	7
10/10/2016 14:30	8	11/10/2016 10:30	4	12/10/2016 07:00	6
10/10/2016 15:00	7	11/10/2016 11:00	6	12/10/2016 07:30	4
10/10/2016 15:30	8	11/10/2016 11:30	6	12/10/2016 08:00	5
10/10/2016 16:00	8	11/10/2016 12:00	6	12/10/2016 08:30	3
10/10/2016 16:30	8	11/10/2016 12:30	7	12/10/2016 09:00	5
10/10/2016 17:00	7	11/10/2016 13:00	8	12/10/2016 09:30	5
10/10/2016 17:30	6	11/10/2016 13:30	8	12/10/2016 10:00	7
10/10/2016 18:00	7	11/10/2016 14:00	7	12/10/2016 10:30	8
10/10/2016 18:30	6	11/10/2016 14:30	7	12/10/2016 11:00	8
10/10/2016 19:00	4	11/10/2016 15:00	8	12/10/2016 11:30	9
10/10/2016 19:30	4	11/10/2016 15:30	8	12/10/2016 12:00	9
10/10/2016 20:00	5	11/10/2016 16:00	9	12/10/2016 12:30	9
10/10/2016 20:30	7	11/10/2016 16:30	8	12/10/2016 13:00	9
10/10/2016 21:00	7	11/10/2016 17:00	8	12/10/2016 13:30	9
10/10/2016 21:30	6	11/10/2016 17:30	8	12/10/2016 14:00	9
10/10/2016 22:00	7	11/10/2016 18:00	8	12/10/2016 14:30	9
10/10/2016 22:30	6	11/10/2016 18:30	8	12/10/2016 15:00	8
10/10/2016 23:00	4	11/10/2016 19:00	8	12/10/2016 15:30	9
10/10/2016 23:30	4	11/10/2016 19:30	7	12/10/2016 16:00	9
11/10/2016 00:00	4	11/10/2016 20:00	7	12/10/2016 16:30	9
11/10/2016 00:30	5	11/10/2016 20:30	7	12/10/2016 17:00	9
11/10/2016 01:00	4	11/10/2016 21:00	7	12/10/2016 17:30	9
11/10/2016 01:30	6	11/10/2016 21:30	9	12/10/2016 18:00	8
11/10/2016 02:00	5	11/10/2016 22:00	9	12/10/2016 18:30	7
11/10/2016 02:30	7	11/10/2016 22:30	9	12/10/2016 19:00	8
11/10/2016 03:00	6	11/10/2016 23:00	9	12/10/2016 19:30	9
11/10/2016 03:30	5	11/10/2016 23:30	9	12/10/2016 20:00	9
11/10/2016 04:00	5	12/10/2016 00:00	9	12/10/2016 20:30	9
11/10/2016 04:30	4	12/10/2016 00:30	9	12/10/2016 21:00	8
11/10/2016 05:00	4	12/10/2016 01:00	10	12/10/2016 21:30	9
11/10/2016 05:30	5	12/10/2016 01:30	8	12/10/2016 22:00	7
		12/10/2016 02:00	10	12/10/2016 22:30	7

12/10/2016 23:00	7
12/10/2016 23:30	6
13/10/2016 00:00	5
13/10/2016 00:30	7
13/10/2016 01:00	7
13/10/2016 01:30	8
13/10/2016 02:00	9
13/10/2016 02:30	6
13/10/2016 03:00	7
13/10/2016 03:30	9
13/10/2016 04:00	9
13/10/2016 04:30	7
13/10/2016 05:00	9
13/10/2016 05:30	8
10/13/2016 06:00	6
13/10/2016 06:30	6
13/10/2016 07:00	5
13/10/2016 07:30	5
13/10/2016 08:00	11
13/10/2016 08:30	15
13/10/2016 09:00	13
13/10/2016 09:30	11
05/04/2017 10:00	4
05/04/2017 10:30	6
05/04/2017 11:00	8
05/04/2017 11:30	10
05/04/2017 12:00	10
05/04/2017 12:30	11
05/04/2017 13:00	12
05/04/2017 13:30	12
05/04/2017 14:00	13
05/04/2017 14:30	13
05/04/2017 15:00	13
05/04/2017 15:30	13
05/04/2017 16:00	14
05/04/2017 16:30	15
05/04/2017 17:00	16
05/04/2017 17:30	17
05/04/2017 18:00	16
05/04/2017 18:30	17
05/04/2017 19:00	19
05/04/2017 19:30	21
05/04/2017 20:00	20
05/04/2017 20:30	18

05/04/2017 21:00	19
05/04/2017 21:30	20
05/04/2017 22:00	21
05/04/2017 22:30	23
05/04/2017 23:00	24
05/04/2017 23:30	23
06/04/2017 00:00	24
06/04/2017 00:30	24
06/04/2017 01:00	23
06/04/2017 01:30	23
06/04/2017 02:00	24
06/04/2017 02:30	24
06/04/2017 03:00	24
06/04/2017 03:30	25
06/04/2017 04:00	26
06/04/2017 04:30	24
06/04/2017 05:00	25
06/04/2017 05:30	24
06/04/2017 06:00	24
06/04/2017 06:30	24
06/04/2017 07:00	23
06/04/2017 07:30	21
06/04/2017 08:00	20
06/04/2017 08:30	18
06/04/2017 09:00	17
06/04/2017 09:30	17
06/04/2017 10:00	18
06/04/2017 10:30	16
06/04/2017 11:00	16
06/04/2017 11:30	16
06/04/2017 12:00	16
06/04/2017 12:30	17
06/04/2017 13:00	17
06/04/2017 13:30	17
06/04/2017 14:00	17
06/04/2017 14:30	19
06/04/2017 15:00	20
06/04/2017 15:30	20
06/04/2017 16:00	20
06/04/2017 16:30	20
06/04/2017 17:00	20
06/04/2017 17:30	23
06/04/2017 18:00	22
06/04/2017 18:30	22

06/04/2017 19:00	21
06/04/2017 19:30	22
06/04/2017 20:00	21
06/04/2017 20:30	23
06/04/2017 21:00	22
06/04/2017 21:30	23
06/04/2017 22:00	24
06/04/2017 22:30	25
06/04/2017 23:00	26
06/04/2017 23:30	26
07/04/2017 00:00	26
07/04/2017 00:30	27
07/04/2017 01:00	23
07/04/2017 01:30	24
07/04/2017 02:00	22
07/04/2017 02:30	24
07/04/2017 03:00	24
07/04/2017 03:30	21
07/04/2017 04:00	18
07/04/2017 04:30	20
07/04/2017 05:00	18
07/04/2017 05:30	14
07/04/2017 06:00	14
07/04/2017 06:30	15
07/04/2017 07:00	13
07/04/2017 07:30	10
07/04/2017 08:00	13
07/04/2017 08:30	17
07/04/2017 09:00	18
07/04/2017 09:30	19
07/04/2017 10:00	18
07/04/2017 10:30	17
07/04/2017 11:00	17
07/04/2017 11:30	18
07/04/2017 12:00	19
07/04/2017 12:30	20
07/04/2017 13:00	22
07/04/2017 13:30	23
07/04/2017 14:00	24
07/04/2017 14:30	25
07/04/2017 15:00	25
07/04/2017 15:30	24
07/04/2017 16:00	24
07/04/2017 16:30	25

07/04/2017 17:00	25
07/04/2017 17:30	25
07/04/2017 18:00	26
07/04/2017 18:30	25
07/04/2017 19:00	23
07/04/2017 19:30	24
07/04/2017 20:00	24
07/04/2017 20:30	24
07/04/2017 21:00	23
07/04/2017 21:30	25
07/04/2017 22:00	27
07/04/2017 22:30	28
07/04/2017 23:00	29
07/04/2017 23:30	31
08/04/2017 00:00	30
08/04/2017 00:30	30
08/04/2017 01:00	30
08/04/2017 01:30	31
08/04/2017 02:00	28
08/04/2017 02:30	27
08/04/2017 03:00	26
08/04/2017 03:30	26
08/04/2017 04:00	26
08/04/2017 04:30	25
08/04/2017 05:00	25
08/04/2017 05:30	24
08/04/2017 06:00	23
08/04/2017 06:30	24
08/04/2017 07:00	22
08/04/2017 07:30	15
08/04/2017 08:00	17
08/04/2017 08:30	20
08/04/2017 09:00	19
08/04/2017 09:30	19
08/04/2017 10:00	20

Résumé

L'objectif principal de ce travail consistait à réaliser une évaluation environnementale intégrée de la lagune de Marchica et de son bassin versant dans le cadre des changements globaux actuels et ce à travers la caractérisation des compartiments : Eau, Sédiment et Air durant la période 2016 - 2018. A l'exception de la zone recevant les rejets de la STEP du Grand Nador, la caractérisation de la qualité des eaux superficielles a montré une nette amélioration de l'oxygène dissous, des nitrates et des orthophosphates par rapport à l'état environnemental de la lagune avant les actions de restauration réalisées dans le site depuis 2010. La caractérisation des sédiments superficiels, à travers la comparaison des indices écotoxicologiques saisonniers et les corrélations Eaux - Sédiments entre la lagune et son bassin versant, a montré une tendance de variation de l'état environnemental presque similaire de ces deux écosystèmes. La qualité de l'air urbain de la ville de Nador a montré un enrichissement modéré en Ni, Cr, Cu et Pb et un enrichissement fort en Zn au niveau des PM_{2,5} et PM₁₀. L'analyse SWOT a permis de conclure que le développement durable de la lagune de Marchica nécessite la prise en considération de la protection environnementale de sa zone d'influence dans le cadre d'une approche GIZC.

Mots clés

Lagune de Marchica et son bassin versant, Evaluation environnementale, Eau, Sédiment, Air.

Abstract

The main objective of this work was to conduct an integrated environmental assessment of the Marchica lagoon and its watershed in the context of current global changes and this through the characterization of the compartments: Water, Sediment and Air during the period 2016 - 2018. With the exception of the area receiving the discharges of the Grand Nador WWTP, the characterization of surface water quality revealed a clear improvement in dissolved oxygen, nitrates and orthophosphates compared to the environmental state of the lagoon before the restoration actions realized in the site since 2010. The characterization of surface sediments, through the comparison of seasonal ecotoxicological indices and Water-Sediment correlations between the lagoon and its watershed, showed a trend of variation in the environmental state of these two ecosystems almost similar. The urban air quality of the Nador city showed a moderate enrichment of Ni, Cr, Cu and Pb and a strong enrichment of Zn in PM_{2,5} and PM₁₀. The SWOT analysis led to conclude that the sustainable development of the Marchica lagoon requires the consideration of the environmental protection of its area of influence within the context of an ICZM approach.

Key Words

Marchica Lagoon and its watershed, Environmental assessment, Water, Sediment, Air.