

Projet GeanTech : Mars- Sep. 2023

WP-2 : Approfondissement de la connaissance autour de l'eau



Les tâches visées dans ce WP sont démarrées au 9^{ème} mois dès le lancement du projet GeanTech et se sont focalisées durant cette période sur les volets suivant : 1) suivi des niveaux piézométriques et de la qualité des eaux des nappes souterraines, 2) Compréhension de la réponse hydrologique des haut bassins à travers une modélisation des écoulements de surface , 3) Estimation de la «Production d'eau» au niveau des zones montagneuses en Amont des barrages et 4) Effet des apports d'eau en montagne sur les fluctuations des stocks d'eau total des zones des nappes d'eau souterraines.

T2.1. Suivi de l'évolution piézométrique



Pour analyser l'évolution piézométrique des aquifères étudiés, nous avons examiné les données historiques de 34 piézomètres dans la plaine de Tadla et 32 piézomètres dans la plaine de Souss-Massa, collectées auprès des ABH pendant la première période du projet. Les Figures 1 et 2 donnent une idée de la diminution du niveau de la nappe phréatique dans la nappe de Souss-Massa et Tadla, respectivement.

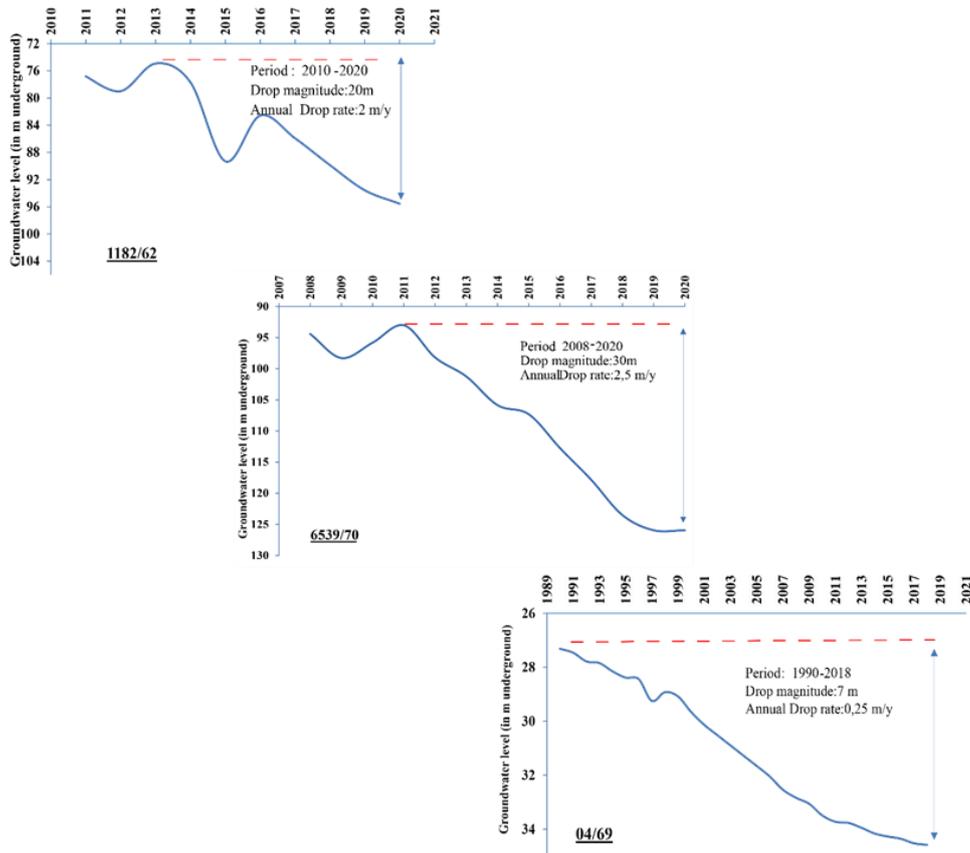


Figure 1: Evolution du niveau piézométrique de la nappe de Souss-Massa

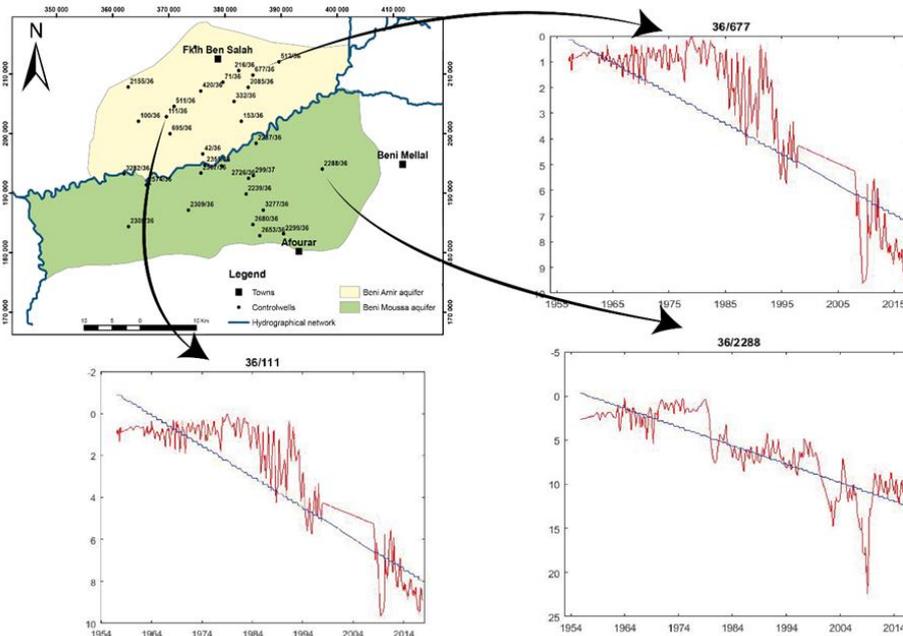


Figure 2: Évolution du niveau piézométrique de la nappe phréatique des aquifères de Beni Amir et Beni Moussa de 1954 à 2014.

En outre, afin de renforcer le réseau de suivi piézométrique des ABH, trois sondes (data loggers) de niveau d'eau et de conductivité électrique ont été installées dans la nappe de Souss (3 sondes) et dans la nappe de Tadla (2 sondes).

Au niveau d'Essaouira, nous avons réalisé une prévision du niveau des eaux souterraines dans le bassin d'Iguerounzar-Zelten, qui est un bassin non jaugé, comme c'est le cas pour la majorité des bassins de la région de Tensift. La rareté des données liées au NP constitue un obstacle majeur pour la production de connaissances afin d'agir de manière adéquate dans la protection et la gestion des ressources en eau. Grâce à cette étude, nous avons réussi à prédire le NP en utilisant une approche multidisciplinaire. Un calibrage et une validation du modèle SWAT ont été effectués pour simuler le bilan hydrique dans le bassin versant étudié. Le modèle a permis de résoudre le problème de rareté des données et d'absence de séries continues dans le temps. Les résultats de la modélisation hydrologique ont été fusionnés avec les données GRACE (9 km) à l'aide d'un algorithme d'apprentissage automatique pour prédire les variations du niveau piézométrique. Les résultats suggèrent que notre approche de prédiction du NP présente une précision et une fiabilité acceptables (figure ci-dessous).

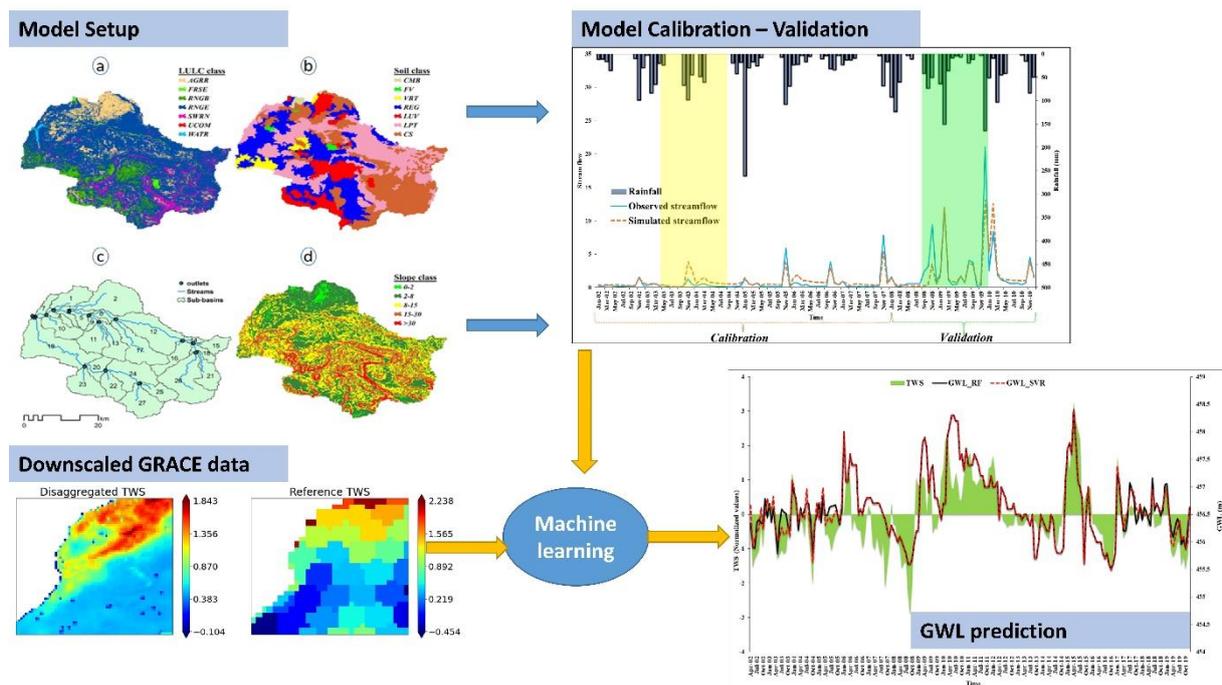


Figure 3 : Modélisation SWAT du niveau d'eau dans le bassin d'Essaouira

T2.2. Suivi de la qualité en utilisant des traceurs chimiques et isotopiques

Nappe de Sous-Massa

La figure 4 où l'on a reporté les valeurs de la salinité des eaux souterraines, collectées durant la première période du projet, permet de constater que les anomalies de minéralisation (valeurs > 2250 mg/l) se rencontrent, dans la plaine du Sous, depuis Ouled Teima jusqu'à l'océan Atlantique. Plus au Sud, dans la plaine de Massa, ces anomalies sont situées dans le secteur allant de Belfaa jusqu'à la ville de Massa mais aussi entre Tifnit et l'embouchure de l'oued Massa. En effet, le Sous amont contient des eaux de bonne qualité chimique, la salinité y varie entre 400 et 1000 mg/L ; en revanche des eaux très minéralisées avec des salinités pouvant dépasser 5000 mg/L se rencontrent au niveau du Sous moyen et aval.

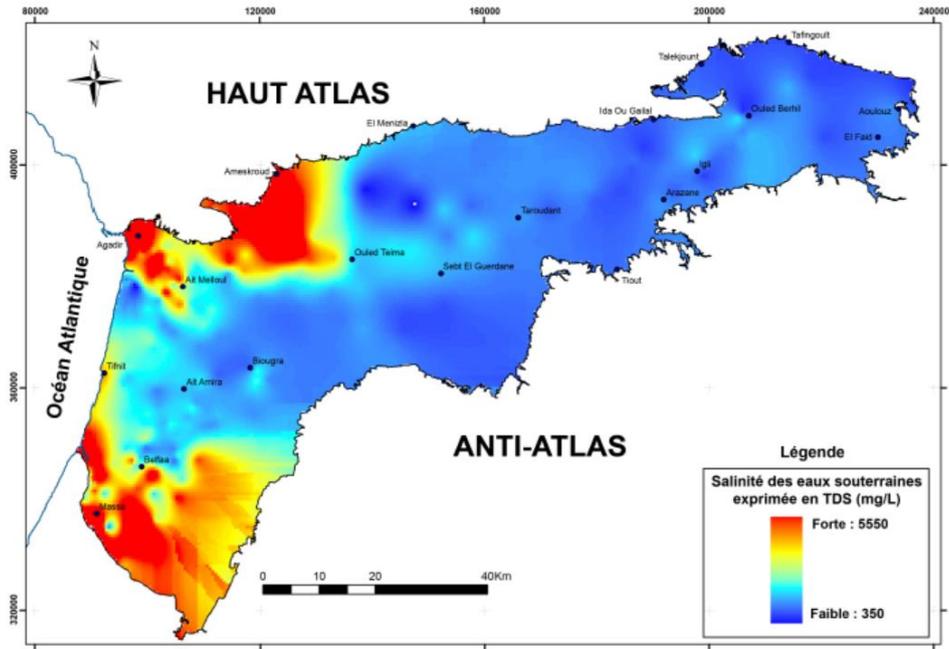


Figure 4: Répartition spatiale de la salinité des eaux souterraines de l'aquifère du Souss-Massa

Dans la nappe de Souss-Massa, les fortes teneurs en $\delta^{18}O$ sont généralement associées aux fortes teneurs en nitrates (Figure 5 et 6) indiquant que les eaux d'irrigation (enrichies isotopiquement en ^{18}O) s'infiltrent vers l'aquifère entraînant avec elles des quantités significatives de nitrates.

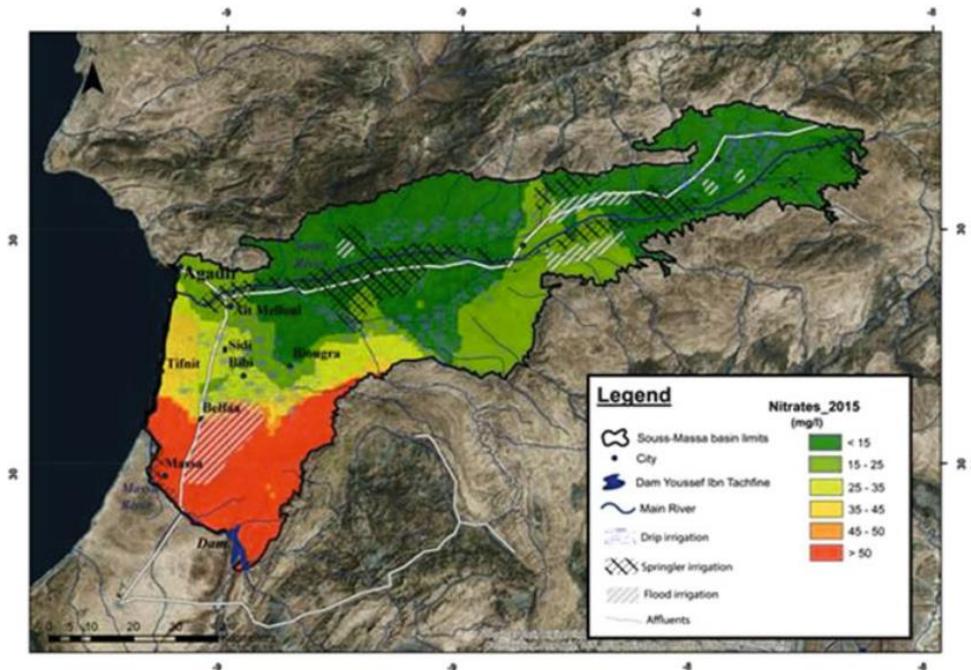


Figure 5: Répartition spatiale des nitrates dans les eaux souterraines de l'aquifère du Souss-Massa

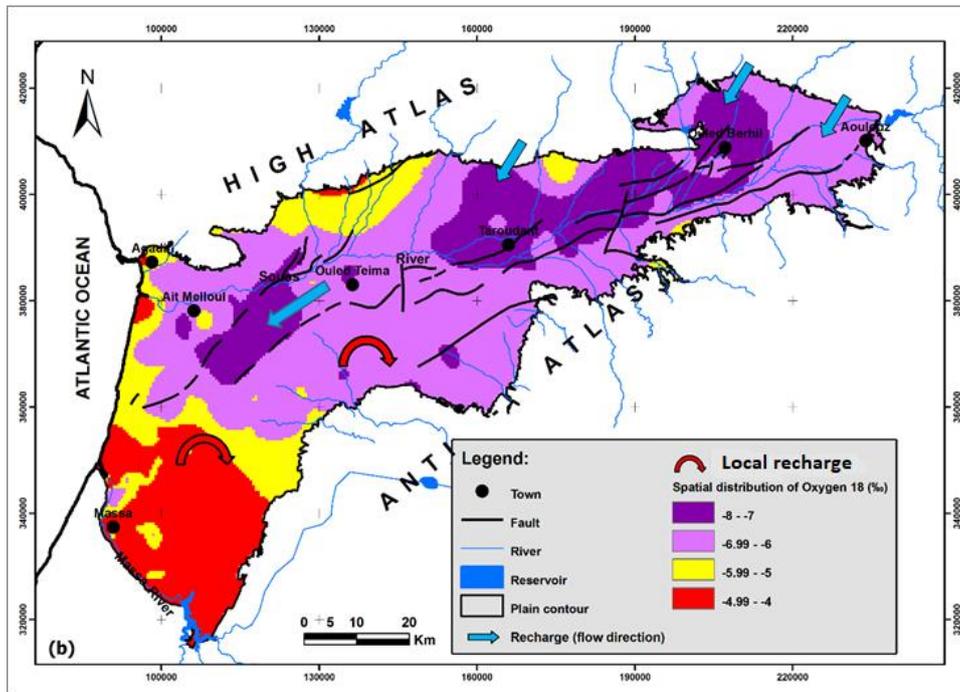


Figure 6: Répartition spatiale de l'oxygène 18 des eaux souterraines de l'aquifère du Souss-Massa

Oum Er-Rbia : Plaine de la Bahira

Dans le contexte de cette zone d'étude, nous avons lancé des campagnes d'échantillonnage ciblées pour collecter des échantillons à divers points localisés au sein de la plaine de Bahira (Figure ci-dessous). Le principal objectif de ces campagnes consistait à mener une analyse approfondie de la qualité des eaux souterraines. Nous avons fait les prélèvements de ces échantillons qui ont ensuite été soumis à des analyses chimiques, couvrant à la fois les éléments majeurs et les éléments traces, ainsi qu'à des analyses isotopiques.

Notre intention est de prolonger cette surveillance continue de la qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude, afin d'acquérir une perspective plus approfondie des variations spatio-temporelles de la composition des eaux souterraines. En adoptant cette approche analytique, nous espérons apporter des contributions significatives à la compréhension de la dynamique géochimique des eaux souterraines dans la région d'Oum Er-Rbia.

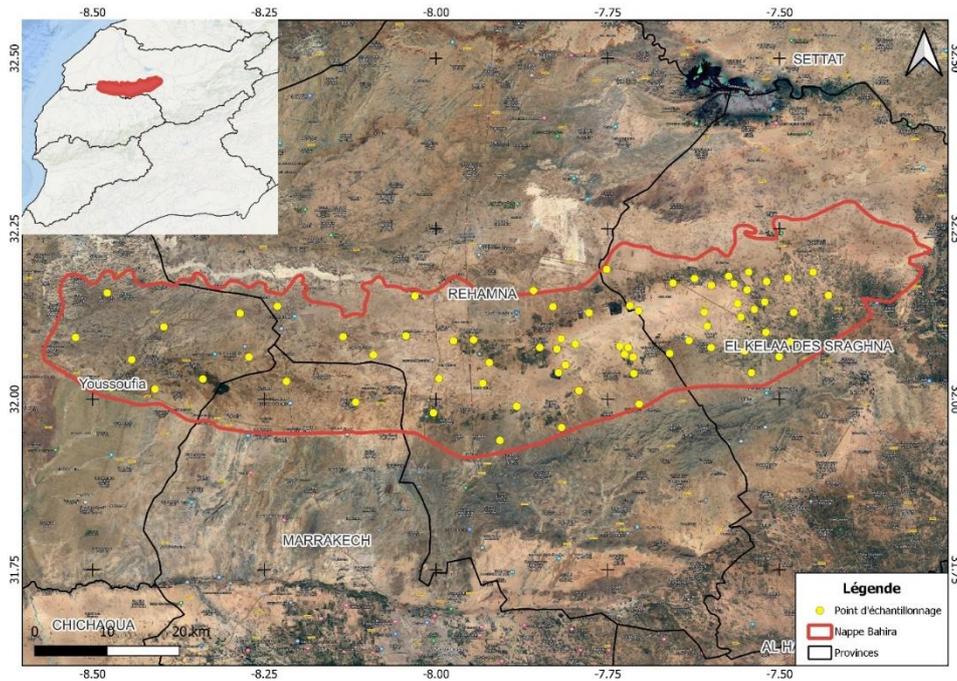


Figure 7 : points d'échantillonnage des eaux souterraines : nappe de Bahira

Oum Er Rbia Amont

Au niveau du Moyen Atlas du bassin d'Oum Er Rabia la caractérisation chimique est isotopique des sources et des lacs montre que : la composition chimique des eaux des sources est étroitement lié d'une part à la dissolution des formations aquifères et d'autre part au temps de séjours des eaux. De ce fait deux groupes de sources sont distingués, le premier qui un faciès Bicarbonaté calcique dont les eaux circule dans les formations marno –calcaire du lias, alors que le deuxième groupe est Chloruré et sulfatées sodiques et dont les eaux circulent dans les formations à dominances du Trias. La composition chimique des lacs du Moyen Atlas, est contrôlée d'une part par la dissolution des formations drainées suite à la circulation des eaux de surface depuis les hautes altitudes vers les lacs et d'autre part par l'effet de l'évaporation.

La caractérisation isotopique des eaux du Moyen atlas d'Oum Er Rabia indique que l'alimentation des sources s'effectue d'une manière rapide sans influence notable de l'évaporation, (systèmes karstiques fracturés favorisant une infiltration rapide des eaux), et que les altitudes de recharge sont plus élevées que celles d'émergence avec un dénivelé de 600 m.

Tensift : Essaouira Aval

Une approche intégrée, combinant des analyses statistiques multivariées, des isotopes stables, des données hydrogéochimiques, hydrogéologiques et des données de télédétection, a été mise en œuvre pour approfondir la compréhension des processus de salinisation des eaux souterraines dans l'aquifère côtier d'Essaouira. Dans le cadre de cette étude, des données hydrogéochimiques issues de 223 échantillons d'eau souterraine collectés lors de dix campagnes d'échantillonnage entre 1990 et 2020, ainsi que des données sur les isotopes stables provenant de 80 échantillons d'eau souterraine sur la même période, ont été recueilli et analysées. Les résultats de l'étude ont révélé une hyper-salinisation continue due à la dissolution d'évaporites sur la période de 1990 à 2020, principalement attribuée à la dissolution de sel provenant du diapir triasique de Tidzi situé au sud-est de l'aquifère. Une intrusion d'eau de mer n'a été détectée que de 2009 à 2020 dans une petite zone près de l'océan. Les résultats de cette étude ont permis l'établissement d'un modèle tridimensionnel qui illustre clairement les

processus les plus importants dans l'aquifère côtier d'Essaouira, offrant ainsi des perspectives intéressantes pour la gestion durable des ressources en eau dans la zone d'Essaouira ainsi que dans des zones côtières similaires.

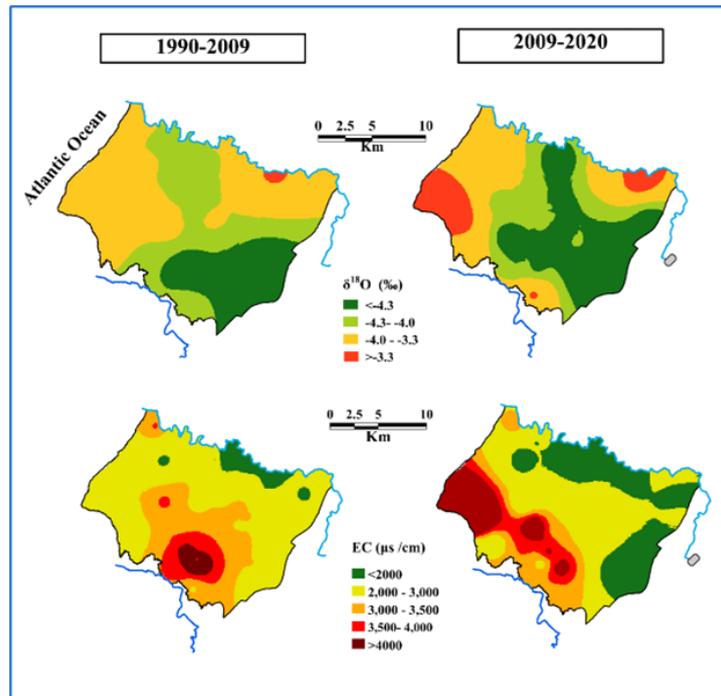


Figure 8 : Distribution des paramètres EC et l'oxygène 18 de la nappe d'Essaouira

T2.3. Modélisation du bilan hydrique et de la qualité des eaux

Dans l'objectif de comprendre et quantifier les fluctuations des composantes du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant, des travaux de modélisation des écoulements de surface à l'aide d'un modèle d'écoulement conceptuel et par les techniques d'intelligence artificielle ont été réalisés. Ainsi, les réponses des stocks d'eau souterraines au niveau des grands structures aquifères du Maroc a été analysé.

Modélisation des écoulements de surface : Oum Er Rbia

L'objectif de cette section est d'examiner la capacité du modèle SRM à prédire avec précision les débits d'eau dans le bassin de l'Oum Er Rbia, en prenant en compte les différentes caractéristiques de la région. Pour ce faire, nous avons choisi de se concentrer sur six sous-bassins spécifiques répartis le long des chaînes de montagnes de l'Oum Er-Rbia (Figure 9). Cette évaluation englobe une analyse de la sensibilité des paramètres du modèle et une étude de sa performance saisonnière à différentes échelles temporelles, notamment quotidienne, hebdomadaire et mensuelle.

L'analyse a été menée en suivant deux approches distinctes ; échelle globale traité le bassin en une unité distincte et échelle zonale dont le bassin est subdivisé en différentes tranches d'altitudes.

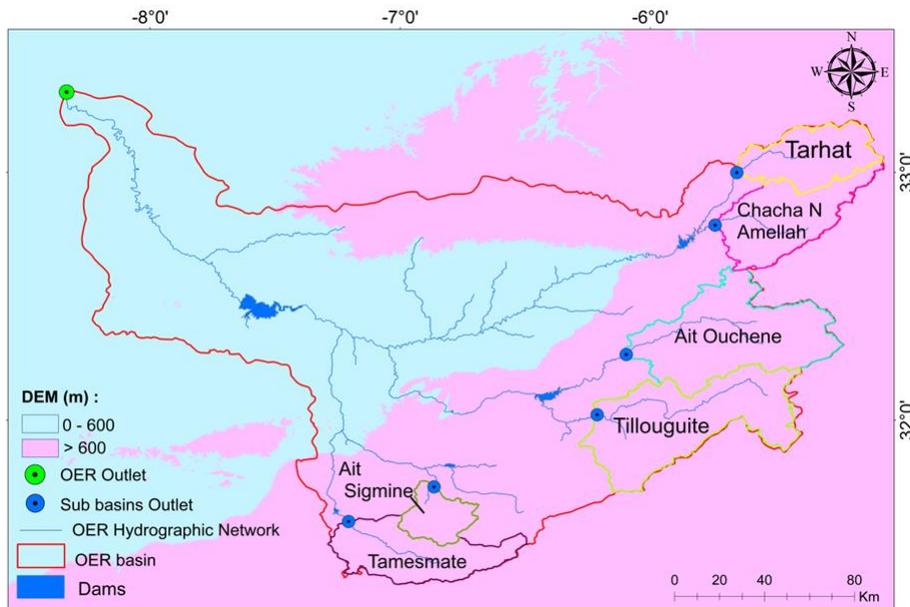


Figure 9 : Bassins de l'Oum Er-Rbia objet de cette étude

La figure 10 montre que la performance du modèle (critère KGE) s'améliore avec la prise en compte de la répartition altitudinale des variables d'entrées (neige, pluie et température) par rapport à l'approche globale, cas du bassin d'Ait Sigmime.

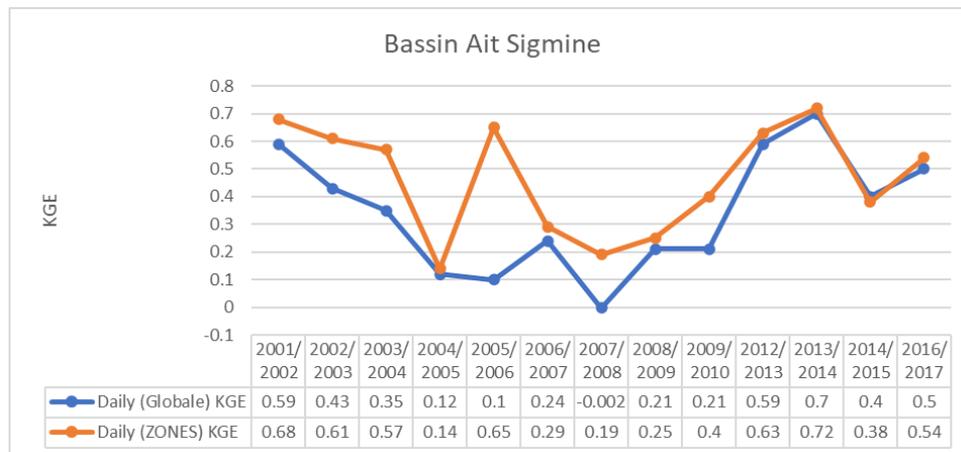


Figure 10: Performance du modèle SRM : Approches Globale vs Zonale (Cas du Bassin Ait Sigmime)

Une synthèse de la performance du modèle SRM sur l'ensemble des bassins d'Oum Er Rbia est présentée dans la figure 11. Un exemple des simulations des débits journaliers est illustré dans la figure 12 pour l'année de validation 2015/2016 du bassin d'Ait Ouchene.

En résumé, le modèle SRM offre de meilleures performances lorsque les sous-bassins sont subdivisés en zones d'altitude, et les données de chaque tranche sont utilisées comme entrée du modèle. Cette approche permet une représentation plus détaillée des variations spatiales de l'accumulation de neige, des taux de fonte et d'autres facteurs influençant la fonte des neiges. La subdivision des sous-bassins en zones d'altitude permet de mieux tenir compte de la variabilité au sein de chaque tranche d'altitude, ce qui permet de prendre en compte les conditions et les processus divers se produisant à différentes altitudes. En utilisant le bassin dans son ensemble, des informations spatiales importantes et des variations au sein du bassin peuvent être perdues, ce qui se traduit par des simulations moins précises.

Par conséquent, l'incorporation des zones d'altitude du sous-bassin offre une approche plus affinée et localisée pour la modélisation de la fonte des neiges et de l'écoulement qui en découle.

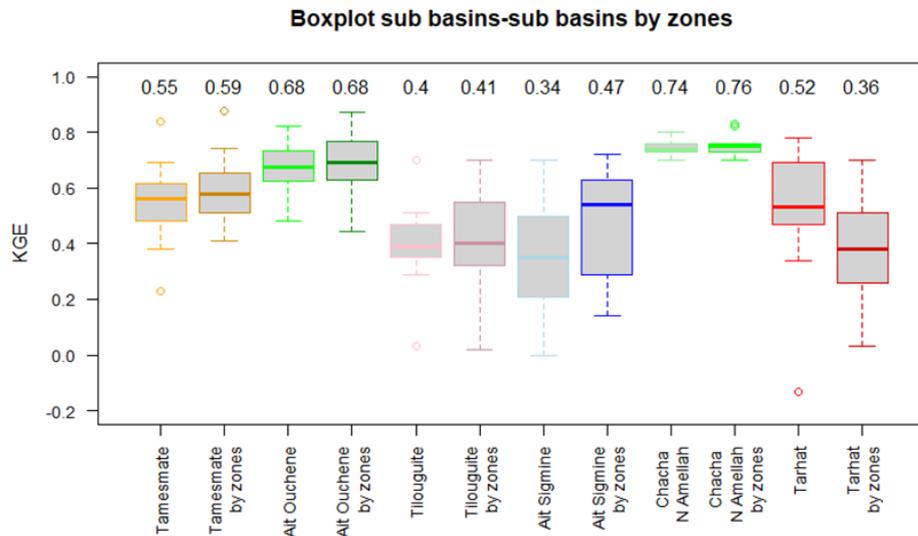


Figure 11 : Résultats du SRM pour l'ensemble des sous-bassin d'Oum Er Bia

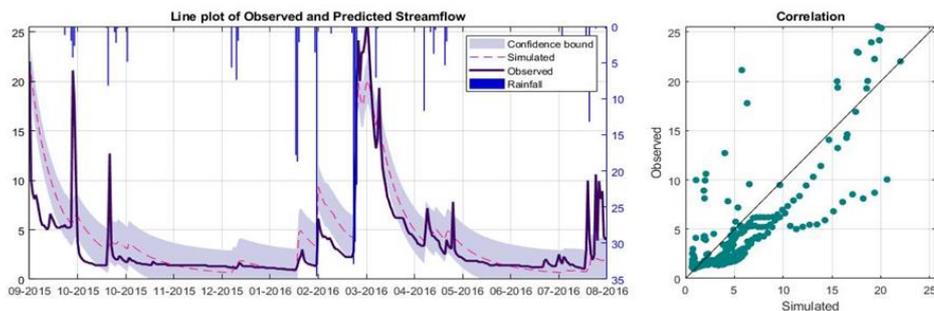


Figure 12 : Débit observé et simulé par SRM dans le sous-bassin d'Ait Ouchene (2015/2016).

Prédiction des écoulements de surface par les Techniques IAs : Cas de Tensift

En parallèle avec la modélisation conceptuel, les méthodes d'intelligence artificielles ont été testées pour prédire les écoulements de surface. Le potentiel des modèles d'intelligence artificielles se voit en leur efficacité à prédire les écoulements de surface même sur les zones moins gaugées.

Dans le cas du sous-bassin de Rheraya sur Tensift (Figure 13), deux modèles d'IA ont été testé pour l'estimation de la quantité d'eau générée au niveau de l'exutoire -Tahanaout-, le Random Forest (RF) et le Support Vector Regression (SVR).

Ces deux modèles s'appliquent pour les problèmes de régression notamment les applications hydrologiques. Le RF est un modèle ensembliste qui se base sur un nombre d'arbre de décision pour garantir une prédiction robuste de la variable en question. Alors que le SVR quant à lui, consiste à projeter les variables explicatives vers un repère multi-dimensionnel à travers une fonction noyau dans le but de caractériser la connexion entre ces variables et la variable estimée (de sortie).

Le sous-bassin Rheraya a une topographie montagneuse et couvre une superficie de 228 km². Son altitude varie entre 1060 à 4167 mètres au-dessus du niveau de la mer, et il est caractérisé par un climat semi-aride. Malgré qu'il soit le bassin le plus piloté de Tensift, il contient uniquement dix stations de mesures météorologiques.

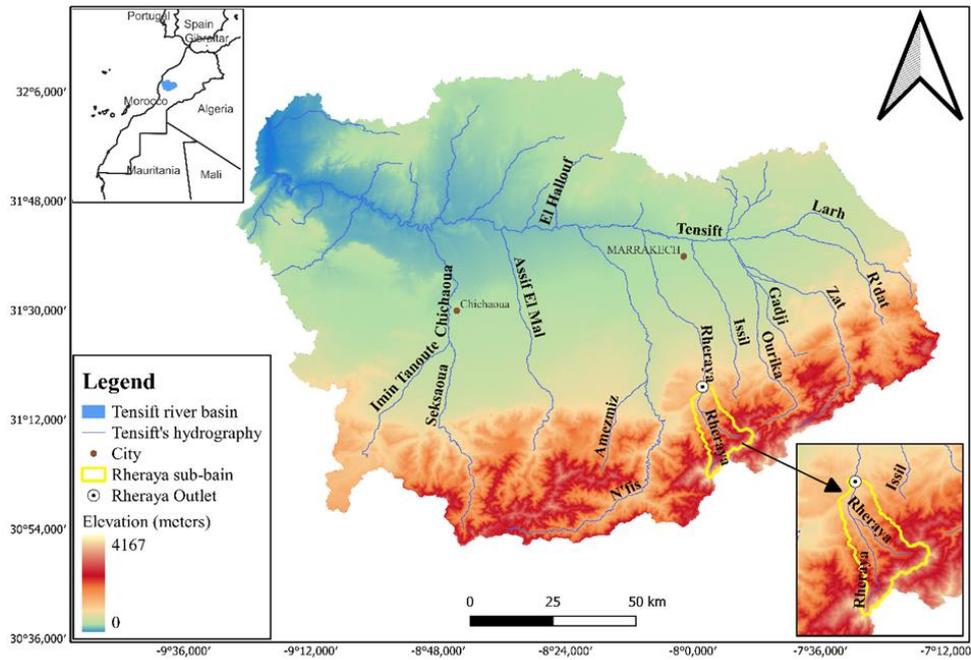


Figure 13: Localisation du sous-bassin versant de Rheraya à Tensift, Morocco.

Ainsi, sur une période de 13 années hydrologiques (de 2003 jusqu'à 2016), 3 variables explicatives ont été utilisées pour la simulation du débit : les précipitations, le SCA et le débit antécédant mesuré. Les résultats de validation sont représentés dans les figures 14, 15 et 16.

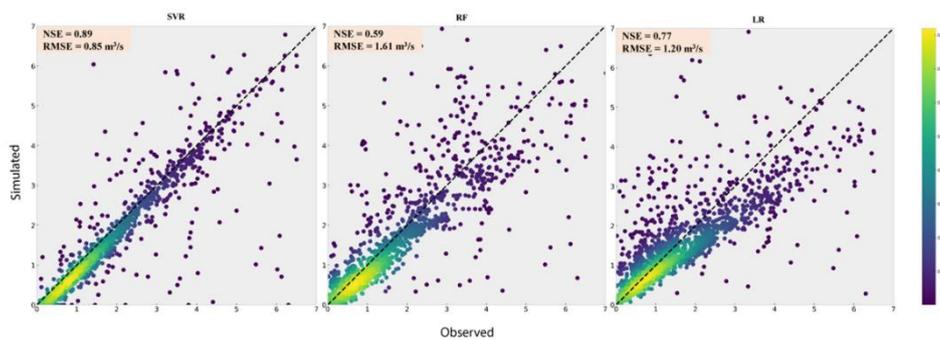


Figure 14 : Le débit observé et simulé sur la période 2003/2011 à Rheraya en utilisant trois modèles : (a) Random Forest, (b) Linear regression, et (c) Support Vector Regression.

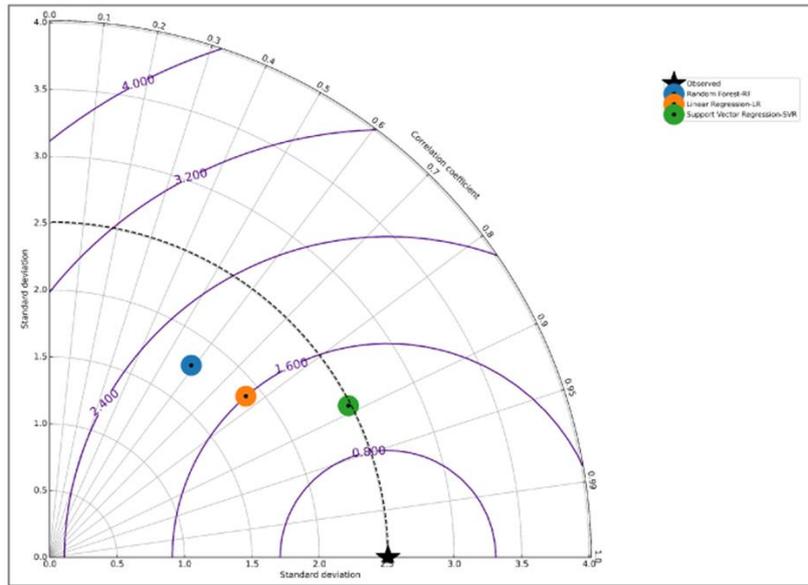


Figure 15 : Diagramme de Taylor pour les trois modèles utilisés pour la simulation du débit journalier au sous-basins de Rheraya : le support Vector Regression (SVR), Random Forest (RF) et Linear Regression (LR)

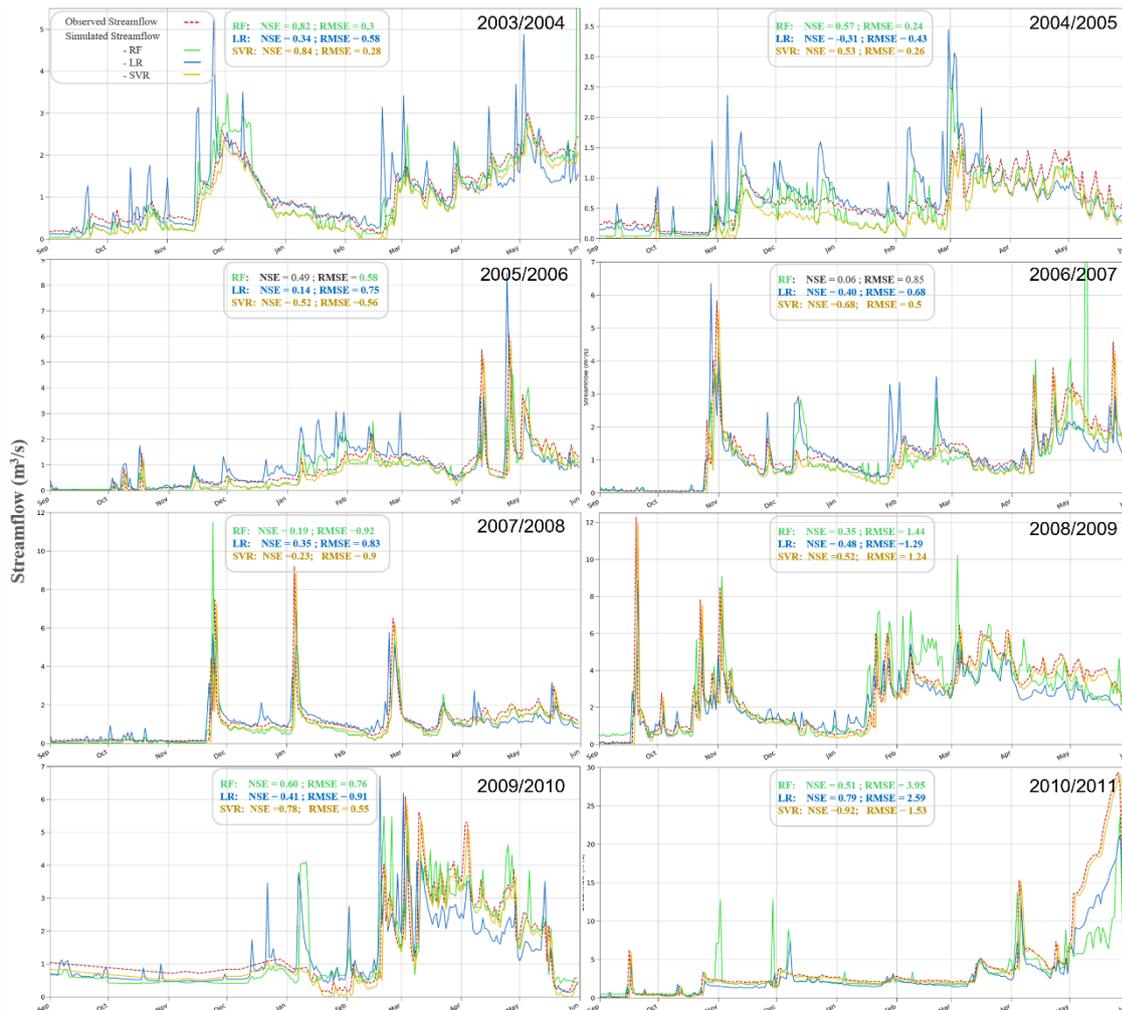


Figure 16: Le débit observé contre celui simulé par les modèles SVR, RF et LR sur chaque année hydrologique de la période 2003/2011.

Etude de la réponse des eaux souterraines au couvert nival : 3 bassins (OER, Tensif et Souss)

Au cours des dernières décennies, les réserves d'eau souterraine ont subi une pression importante due à des facteurs anthropogéniques et naturels. Pour répondre à la demande croissante en eau potable et en eau d'irrigation, la dépendance à l'égard des eaux souterraines s'est considérablement accrue. Cette augmentation, combinée à l'irrégularité de l'approvisionnement en eau de surface, a entraîné un déséquilibre entre la consommation et la reconstitution naturelle du réservoir souterrain. Par conséquent, on a observé une baisse importante du niveau des eaux souterraines, en particulier dans les régions semi-arides et arides.

Dans ce travail, nous visons à analyser l'interaction de la couverture neigeuse, qui est l'un des principaux contributeurs au processus de réalimentation naturelle, avec la réserve d'eau souterraine dans les principaux aquifères marocains. Pour ce faire, nous avons utilisé les observations satellitaires de la zone de couverture neigeuse (SCA) de MODIS et des anomalies de stockage d'eau terrestre (TWS) de la mission GRACE. Les séries temporelles SCA et TWS ont été analysées sur les grands bassins marocain à différentes altitudes. Les résultats globaux ont révélé que les fluctuations TWS sont en corrélation avec les changements de SCA. La relation était particulièrement forte avec un décalage de deux à trois mois entre les deux sources de données.

La stratégie suivie dans ce travail est d'évaluer le temps de décalage annuel optimal indiquant une période de recharge potentielle à partir de la fonte des neiges pour chaque bassin versant. À cette fin, nous avons utilisé une analyse statistique basée sur le coefficient de corrélation de Pearson entre le signal GWS et les séries temporelles SCA. La figure 17 montre un exemple du lien entre les anomalies interannuelles du GWS et du SCA dans le cas du bassin de l'Oum Er Rbia. Les deux signatures présentent une forte corrélation pendant la saison des neiges, en particulier pendant la période de régression des surfaces enneigées, entre le pic de SCA et l'anomalie positive du GWS, ce qui indique un épisode de réalimentation. La corrélation est plus significative lorsqu'on utilise une série de GWS retardée d'environ 1 à 2 mois ($R^2 > 0,9$).

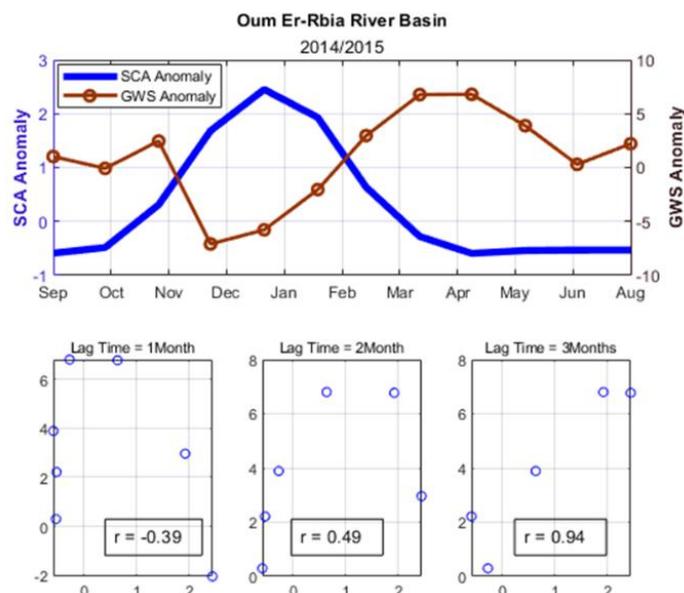


Figure 17 : Exemple montrant l'évolution du TWS et du SCA à l'échelle interannuelle sur le bassin d'Oum Er Rbia, et sa corrélation en utilisant différents délais de 1 à 3 mois à partir de la valeur maximale du SCA.

A la base de la méthodologie ci-dessus, nous avons examiné la variation du délai des réponses de la variation du stock d'eau souterraine, signe d'une contribution potentielle de la fonte des neiges, en relation avec la régression des surfaces enneigées au niveau des bassins d'Oum Er Rbia, Tensift et Souss au cours de la période de 2003 à 2016 (Figure 18).

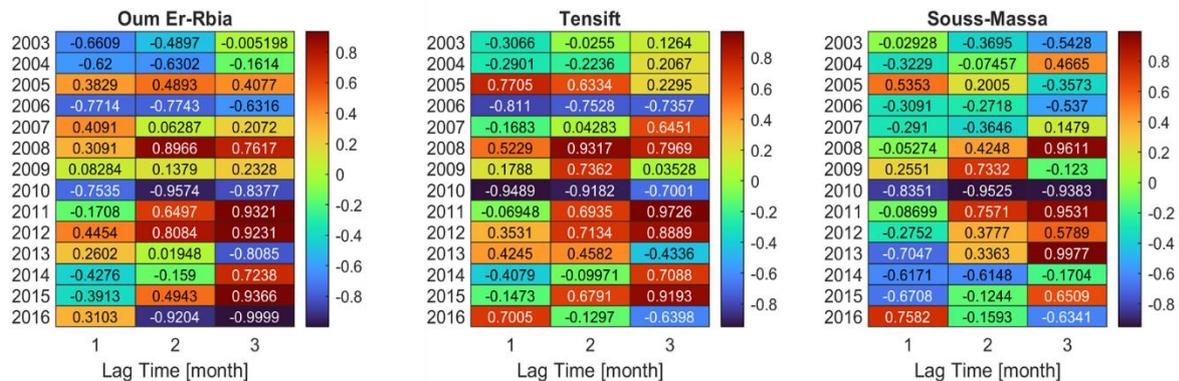


Figure 18: Corrélation annuelle (r) entre les SCA et les anomalies du TWS retardées de 1, 2 et 3 mois.

Modélisation Hydrodynamique

- **Tensift : Nappe du Haouz.**
 - Révision approfondie du modèle conceptuel de la nappe du Haouz (notamment en terme de géométrie, paramètres hydrodynamiques et conditions aux limites) avec utilisation de nouvelles approches basées sur le Machine learning
 - Lancement de nouveaux essais de pompage de la nappe pour renforcer les données sur la transmissivité existantes
 - Calage en permanent (en cours) du modèle hydrodynamique de la nappe du Haouz Mejjat
- **Oum Er Rbia : Nappe de la Bahira.**

Dans la région de la Bahira, nous sommes actuellement engagés dans le développement de modèles hydrologiques avancés, en particulier le modèle SWAT. Le modèle est actuellement en phase de calibration, utilisant des données collectées entre 1985 et 2020. Une fois cette phase de calibration et de validation achevée avec succès, nous avons l'intention d'intégrer ce modèle hydrologique avec MODFLOW pour une évaluation plus complète. Cette intégration nous permettra d'obtenir des informations essentielles sur la qualité de l'eau dans la région de la Bahira, en particulier en ce qui concerne la salinité.

Notre travail actuel consiste à collecter des données de terrain exhaustives et à mettre en place les bases nécessaires à l'élaboration de ces modèles. La phase de calibration, qui utilise des données historiques, est essentielle pour garantir la précision et la fiabilité de ces modèles. Climatiques permettra de projeter avec succès les dynamiques spatio-temporelles de la salinité de l'eau sous différentes conditions climatiques futures.

T2.4. « Production d'eau » au niveau des zones montagneuses

- **Souss-Massa : Bassin d'Igudi**

L'analyse en cours du bassin hydrographique d'Igudi vise à appréhender l'empreinte hydrique (Water Footprint : WF) en examinant les fluctuations temporelles et spatiales des trois éléments constitutifs

de cette empreinte. De plus, elle cherche à évaluer la viabilité de l'usage actuel de l'eau dans le secteur agricole et à identifier des approches envisageables pour améliorer la qualité de l'eau.

Trois missions de terrain ont été réalisées. Ces sorties de terrain avaient comme but de collecter des échantillons d'eau pour les analyser. Nous avons pu collecter les échantillons d'eau depuis les différents points sources, au niveau d'Oued Iguidi ainsi que l'exutoire. Les sorties de terrain ont été aussi utilisées pour valider et assurer les informations sur land use et les cultures pratiquées sur la zone d'étude. Des sites d'échantillonnages représentatifs ont été choisis (indiqués sur la figure 19). La sortie de terrain a aidé pour identifier et documenter précisément les types d'utilisation des terres présents.

Les informations rassemblées et les entrées préparées sont actuellement en cours d'exploitation dans le cadre d'une étude de modélisation menée avec le modèle SWAT-plus.

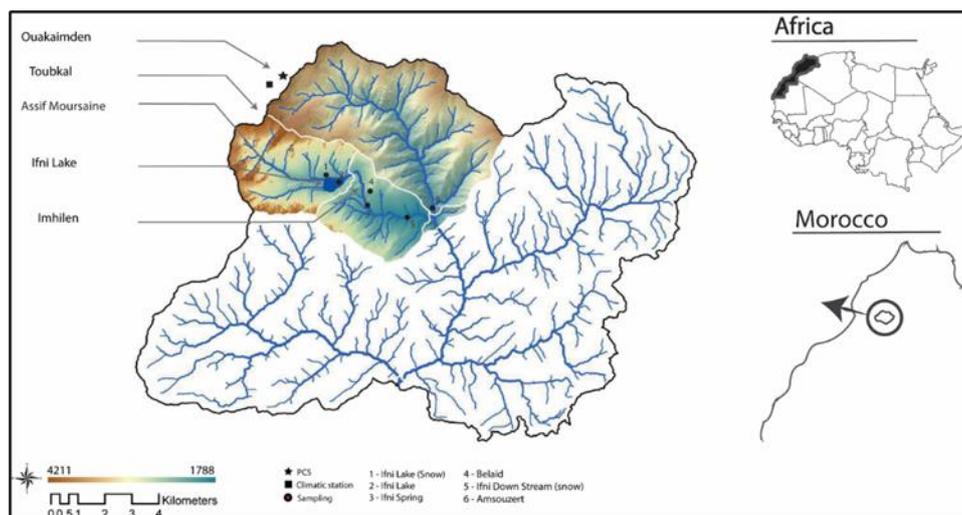


Figure 19 : Localisation du bassin d'Iguidi et des sites d'échantillonnage

- **Oum Er-Rbia et Ourika (Haut et Moyen Atlas) :**

Dans les montagnes de l'Atlas, plus précisément dans les bassins de High Oum Er-rbiaa (HOER) et d'Ourika, cette étude vise à identifier les processus de recharge au sein de bassins versants semi-arides, spécifiquement les bassins d'Ourika et du Haut Oum Er-rbiaa (HOER). Cela se fait par le suivi mensuel de la neige, des précipitations, de l'eau de surface et des isotopes des eaux souterraines, en plus de l'utilisation de données de télédétection. L'analyse des isotopes des eaux souterraines et des précipitations révèle une importante hétérogénéité spatiale, principalement due aux variations géologiques dans chaque aquifère. Les schémas temporels montrent une recharge directe pendant les précipitations hivernales et une réponse retardée en été lorsque la fonte des neiges renouvelle les eaux souterraines vers la fin de la saison de fonte. Le jeu de données "Gravity Recovery and Climate Experiment" (GRACE) confirme également une corrélation entre des valeurs élevées de stockage total d'eau (TWS) et les isotopes des eaux souterraines, indiquant une augmentation de l'extraction des eaux souterraines entre mars et juin pour compenser le faible niveau de précipitations. L'analyse des données isotopiques indique que 50% de la recharge des eaux souterraines dans l'aquifère jurassique en amont et 80% dans les aquifères triasiques-paléozoïques en aval du bassin de HOER proviennent de la fonte des neiges. De même, dans le bassin d'Ourika, la fonte des neiges contribue respectivement à 30% et 50% de la recharge des eaux souterraines dans les zones amont et aval, en raison des variations des taux de fonte à différentes altitudes et des différences lithologiques dans chaque bassin. (Rhoujjati et al., 2023).