



Modélisation de la qualité des eaux de surface à l'échelle d'un bassin versant agricole tunisien : application du modèle PEGASE à la physico-chimie de l'oued Joumine

Modelling surface water quality at the scale of a Tunisian agricultural watershed: Application of PEGASE model to the Joumine oued physico-chemistry

Amira BOUKARI^{1,2}, Etienne EVERBECQ², Aline GRARD², Pol MAGERMANS², Sihem BENABDALLAH³, Hamadi HABAIEB¹ & Jean-François DELIEGE²

Abstract : The competition use of water resource is increasing in the Mediterranean region, and at the same time, the water quality is decreasing, particularly because of diffuse pollution. Some countries within this region are already suffering from water scarcity, which is increasingly threatened by global warming. In this study, we aimed to provide a picture of water quality at the scale of an agricultural catchment located in the northwest of Tunisia, the Joumine river watershed, by producing physically based simulations. We proposed a methodology involving, in addition to observations and field work experimentation, the mathematical representation of the "pressure–impact" relationships, modeled by the PEGASE model, a numerical simulation tool for the river ecosystem, developed by the R&D Unit of the Aquapôle of the University of Liège. The study highlighted the impact of agriculture in nitrate transfer and proved that the PEGASE model, initially designed for temperate regions, can be used to simulate water quality in Tunisia. Some discrepancies between simulated and measured concentrations could be improved by enhancing the representation of some process and the existing database particularly for specific hydrologic situations (rainfall events). The study of prospective scenarios of future trends in climate and land use, as well as human pressures and agricultural management practices will be interesting.

Keywords : surface water, modelling, PEGASE, diffuse pollution, agricultural practices.

Résumé : La dégradation de la qualité de l'eau et les utilisations concurrentielles de cette ressource s'accroissent, notamment en région méditerranéenne. Certains pays souffrant déjà de la rareté de leurs ressources en eau seront de plus en plus menacés par les dérèglements climatiques et la dégradation des ressources dans un futur proche. Dans le but de fournir une image de la qualité de l'eau à l'échelle du bassin versant agricole de l'oued Joumine, situé au nord-ouest de la Tunisie, les auteurs du présent travail proposent une méthode qui implique des observations et prospection terrain complétées par une représentation mathématique de la relation « pression – impact ». A cette fin, des simulations physiquement basées ont été réalisées en utilisant le modèle PEGASE, outil de planification et de simulation numérique de l'écosystème rivière, développé par l'Unité R&D de l'Aquapôle de l'Université de Liège. L'étude a montré l'importance des apports diffus des terres agricoles dans le transfert de nitrates et que le modèle PEGASE, initialement adapté aux caractéristiques des régions tempérées, peut être utilisé pour simuler la qualité des eaux en Tunisie. Certains écarts entre les valeurs simulées et les mesures peuvent être ajustés en assurant une meilleure représentation de certains processus et en améliorant la base de données existante notamment pour des conditions hydrologiques particulières (les épisodes pluvieux). Ceci rendra possible l'étude de différents scénarios prospectifs reflétant les projections climatiques futures, changement d'occupation du sol, pressions anthropiques et pratiques agricoles.

Mots-clés : eau de surface, modélisation, PEGASE, apports diffus, pratiques agricoles.

INTRODUCTION

La gestion des ressources en eau et des risques associés constitue une des préoccupations majeures de nos sociétés. Les pressions anthropiques et climatiques que subissent les hydrosystèmes, notamment en région méditerranéenne, nécessitent des actions visant à protéger les ressources hydriques tant du point de vue quantitatif que qualitatif.

¹ Université de Carthage, Institut National Agronomique de Tunisie, Laboratoire GREEN-TEAM, 43 Avenue Charles Nicolle 1082, Tunis Mahrajène, Tunisie (E-mail : boukari.amira@gmail.com)

² Unité R&D de l'Aquapôle, Université de Liège, Quartier Polytech 1, Allée de la découverte, 11-bât.B53, 4000 Liège, Belgique (E-mail : jfdeliege@ulg.ac.be)

³ Centre de Recherche et des Technologies des Eaux, Technopole de *Borj-Cédria* -Route touristique de Soliman BP 273-8020 Soliman, Tunisie

La Tunisie, située en bordure de la mer Méditerranée du côté nord du continent africain, se caractérise par des ressources en eau rares (disponibilité annuelle de moins de 450 m³/habitant (HELALI, 2013)), rendant sa disponibilité naturelle insuffisante pour satisfaire une demande en hausse. Elle a fait face à des problèmes de gestion et de préservation de ses ressources en eau afin de répondre à ses besoins et de renforcer ses capacités d'adaptation face à des pressions croissantes (aridité, variabilité des régimes pluviométriques, etc.). Sa stratégie s'est articulée essentiellement sur la mobilisation de la totalité des ressources en eau, l'économie de l'eau et la recherche de ressources non conventionnelles. Sur le plan qualitatif, un réseau national de surveillance de la pollution des eaux a été mis en place dans le cadre du Projet d'Investissement dans le Secteur de l'Eau (PISEAU). Dans le même esprit, un système de contrôle de la pollution des eaux a été élaboré dans le cadre du projet COPEAU. Depuis les années 70s, la Tunisie a élaboré un instrument juridique pour la gestion de l'eau, le code des eaux, qui constitue le référentiel en matière législative. Il porte sur les différents aspects de la mobilisation, l'utilisation et la protection de la ressource. Ce code a été modifié, mais nécessite d'être actualisé notamment à l'occasion de la validation de la stratégie nationale de gestion intégrée des eaux en cours d'élaboration (BEN REJEB JENHANI *et al.*, 2013; EC, 2012; MEKKI, 2009; REKAYA, 2013).

La Tunisie est de plus en plus confrontée à une équation difficile qui consiste d'une part à répondre à une demande et des besoins sectoriels croissants et d'autre part, à protéger quantitativement et qualitativement les ressources. Les tendances observées et le changement climatique attendu font craindre une accentuation des vulnérabilités des ressources du pays, essentiellement les ressources en eau (GIZ & MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT, 2012). De nouveaux modes de gestion sont donc à concevoir si on souhaite assurer un approvisionnement durable et suffisant en eau de bonne qualité. Des politiques ont été instaurées dans ce sens, comme la Directive Cadre sur l'eau (2000/60/CE) en Europe. Ces politiques imposent la protection des eaux et la préservation de leurs caractéristiques par bassin et district hydrographique en adoptant des plans de gestion et des programmes de mesures appropriés à chaque masse d'eau. Une telle démarche implique la prise en compte de l'ensemble des pressions (naturelles ou anthropiques, ponctuelles ou diffuses) pouvant avoir des répercussions quantitatives et qualitatives sur un cours d'eau et elle encourage la concertation des différents acteurs de l'eau.

Dans ce travail on compte appliquer un outil de planification utilisé sur des bassins versants en Europe et en train d'être testé en Afrique du Nord (l'Agrioune en Algérie et la Medjerda en Tunisie), sur un bassin versant agricole au nord de la Tunisie présentant des soucis de qualité d'eau. Le but étant d'évaluer l'impact des apports diffus des terres agricoles, principalement les nutriments azotés, sur la qualité des eaux de rivière alimentant un barrage destiné à la production d'eau potable.

PRESENTATION DE L'ETUDE

Une des principales approches scientifiques utilisée qui permet de répondre aux enjeux liés à ces différentes problématiques est la modélisation intégrée à l'échelle des bassins versants. Cette approche consiste à développer une représentation mathématique de l'hydrosystème et des différents processus explicatifs de son fonctionnement et de déterminer sa réponse aux différentes sollicitations (naturelles ou anthropiques) compte tenu de sa complexité et de son hétérogénéité (géomorphologie, occupation de sol, sols et géologie, réseau hydrographique) (HINGRAY *et al.*, 2009). Dans ce travail on vise à caractériser un bassin versant agricole situé au nord de la Tunisie en assurant des simulations physiquement basées avec l'outil dédié au calcul déterministe des écosystèmes rivières, le modèle PEGASE (Planification Et Gestion de l'ASSainissement des Eaux). Le bassin choisi est celui de l'oued Joumine (Figure 1).

D'après la littérature, ses eaux sont relativement riches en nitrates (entre 80 et 150 mg/l) notamment en périodes pluvieuses et au début du printemps (AOUISSI *et al.*, 2014), périodes où les apports par lessivages des terres agricoles sont importants. AOUISSI *et al.* (2015) ont également confirmé que la principale contribution des charges de nitrates dans le bassin de Joumine provient de terres cultivées en blé. Depuis 1986, un accroissement de la superficie consacrée aux cultures céréalières, accompagnée d'une augmentation des quantités d'engrais appliquées, ont eu une incidence sur les concentrations de nitrates dans l'eau. Et une étude conduite par l'unité de recherche "Ecosystèmes et Ressources Aquatiques" à l'INAT¹ par BEN REJEB JENHANI *et al.*, (2013) a confirmé l'existence d'espèces phytoplanctoniques potentiellement toxiques dans la retenue du barrage Joumine, qui semble être liée à la disponibilité des nutriments et à des conditions hydroclimatiques favorables. Ceci peut menacer son exploitation pour la production d'eau potable. La présence des résidus de pesticides a été révélée en 2014 par le Laboratoire de Contrôle et d'Analyse des Pesticides du Ministère de l'Agriculture. Les valeurs enregistrées de certaines substances comme le triadimenol sont aux alentours de 7 et 8 µg/l au niveau de la retenue du barrage, dépassant les limites fixées par la norme tunisienne destinées à la production d'eau alimentaire NT 09-13 (INNORPI, 1983). Ceci justifie de conduire un travail de recherche sur cette zone à

¹ Institut National Agronomique de Tunisie

l'échelle synoptique du bassin versant en collaboration avec les gestionnaires impliqués (DG BGTH², l'ANPE³).

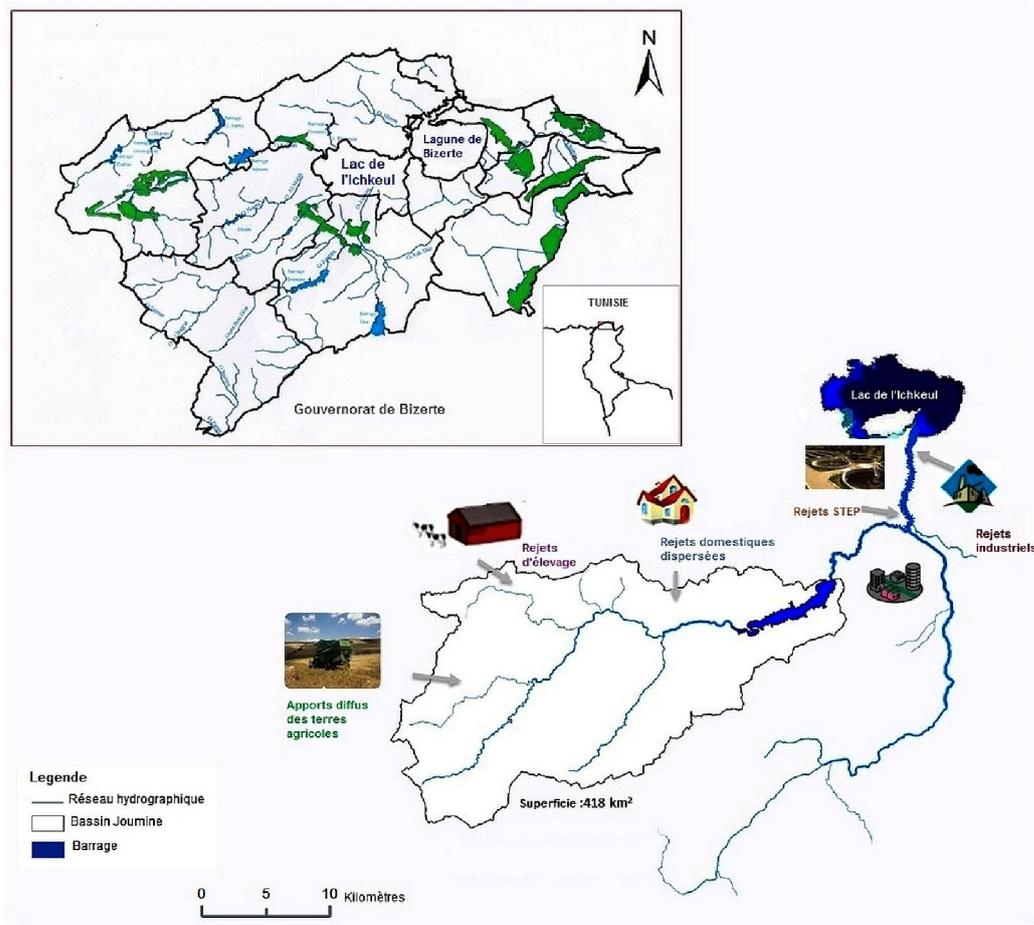


Figure 1. Localisation géographique du bassin versant étudié

Situation géographique et contexte hydro-climatique de la zone d'étude

Le bassin versant de barrage Joumine est un bassin rural agricole, situé au nord de la Tunisie, la région productrice d'eau du pays (plus que 80% des eaux de surface et 60% des ressources globales) (Figure 1). Il s'agit d'un sous-bassin de l'Ichkeul qui draine un territoire de 418 km² et assure un apport moyen annuel en eau de 116 Mm³. Il possède une forme allongée et une hypsométrie comprise entre 715 m et 45 m d'altitude. Son relief est montagneux, notamment dans la partie amont. Dans la partie aval du bassin, un barrage a été construit dans les années 80s par le ministère de l'équipement, dans le cadre du Plan directeur de l'utilisation des eaux du Nord de la Tunisie. L'aménagement du barrage avait pour but de satisfaire les besoins en eau potable de la région de Bizerte et du Grand Tunis et le transfert des eaux vers le Cap-Bon. Il contribue à l'irrigation de 1500 ha et à la protection de la plaine de Mateur contre les inondations.

Le bassin versant possède des caractéristiques rurales et l'utilisation des terres agricoles représente 57% de sa superficie. L'activité agricole dominante (environ 53% des terres cultivées) est consacrée à la production de blé, le reste étant couvert d'avoine, légumineuses, fourrages et tournesol. Environ 10% du bassin constitue des pâtures et prairies accueillant le bétail.

Le bassin se situe dans une région à climat subhumide caractérisée par une période hivernale humide (CUDENNEC et al., 2007; SLIMANI et al., 2007). Il est traversé par un réseau hydrographique dense dont l'oued Joumine représente l'affluent principal à écoulement quasi-permanent (Figure 5). La pluie moyenne annuelle sur le bassin est de 757 mm. La répartition mensuelle des pluies (Figure 2) se caractérise par une période automnale à pluviométrie modérée (27% de la pluie annuelle) tandis que presque la moitié du cumul de la pluie se fait en hiver (décembre-février) sous forme d'averses dont l'intensité est variable. La période

³ Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques

² Agence Nationale de Protection de l'Environnement

printanière cumule environ 22%, avant une période estivale sèche (environ 5%) qui s'étend de juin jusqu'au mois d'août.

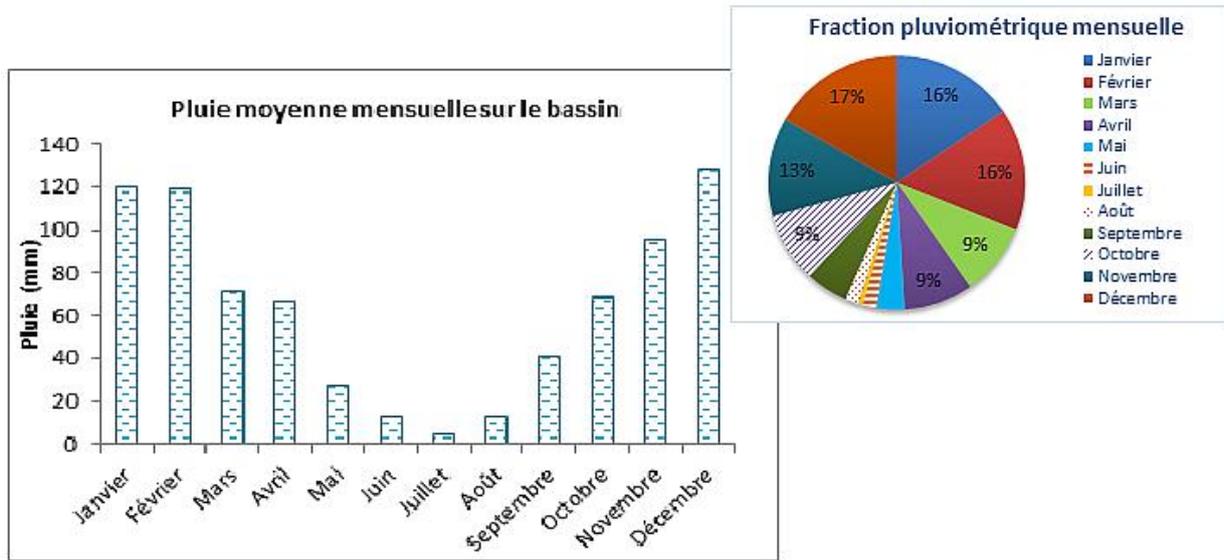


Figure 2. Répartition de la pluie moyenne mensuelle observée sur le bassin de l'oued Joumine dans les 8 stations pluviométriques (Joumine, Antra, Bazina, Ghezala, Béja, Smadah, oued Maden, Barrage) se situant dans le bassin et dans son proche voisinage pour la période 1986-2013

Les apports annuels enregistrés sur le bassin reflètent ces quantités de pluie. Ces apports ont une variabilité interannuelle prononcée (Figure 3). Ces deux dernières années ont enregistré les apports les plus faibles depuis 2001. La succession de deux années hydrologiques relativement sèches a eu pour conséquence la perte de 44% du stock d'eau disponible au Barrage Joumine depuis l'année hydrologique 2014-15.

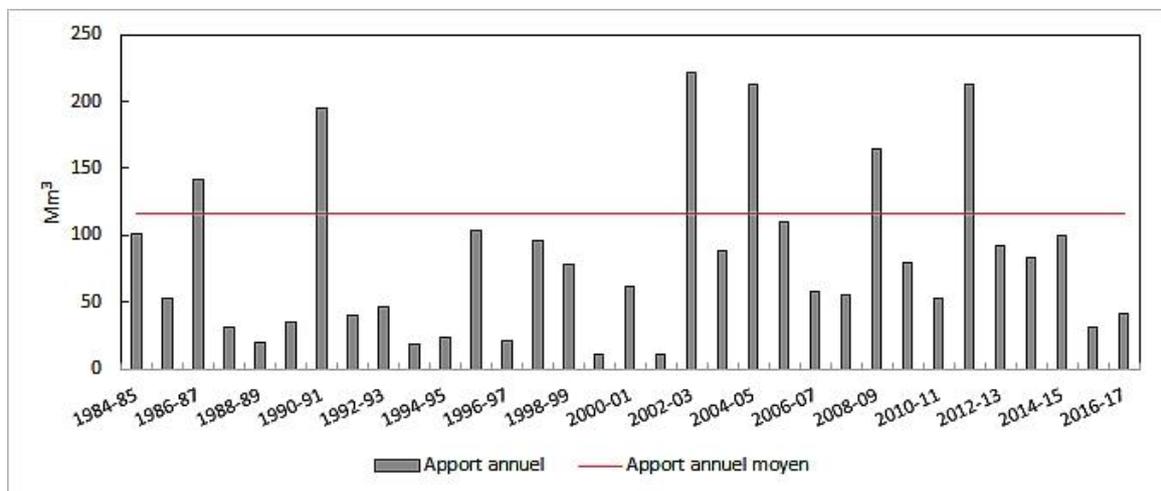


Figure 3. Variabilité annuelle des apports en eau du bassin de l'oued Joumine en amont du barrage

Le dépouillement des débits observés (Figure 4), montre qu'au début de l'année hydrologique (mois de septembre), le premier épisode pluvieux génère des pics de débits qui sont rapidement suivis d'une période de récession. Une fois que le sol est saturé en eau, la réponse du bassin devient de plus en plus rapide. Ceci est généralement observé entre décembre et avril. L'écoulement hypodermique est amélioré durant cette période en fonction des états d'humectation du sol. L'importance de l'écoulement latéral est liée à l'importance du taux d'infiltration du sol qui explique parfois les débits retardés.

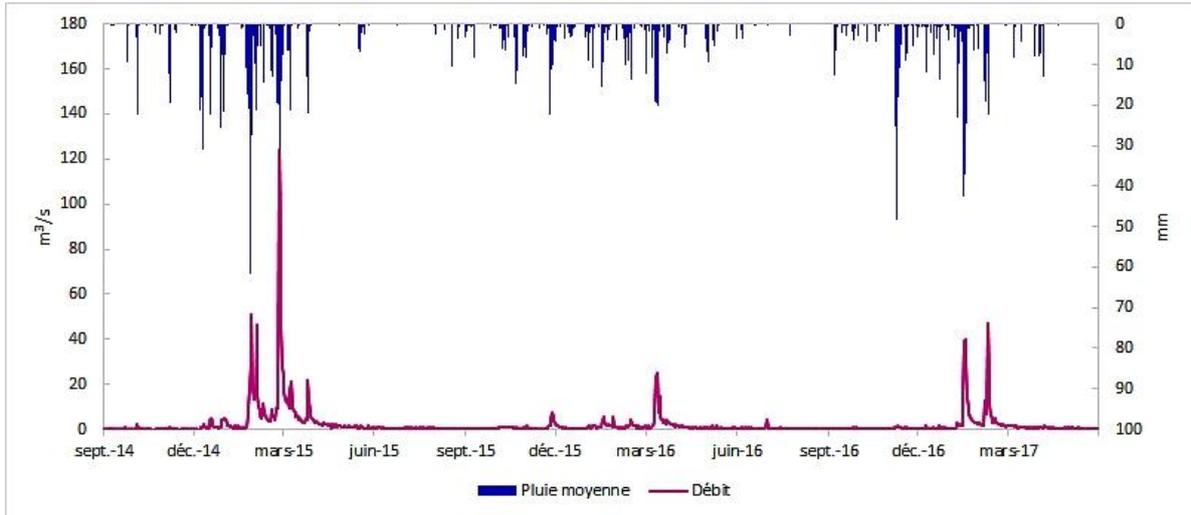


Figure 4. Pluie moyenne journalière sur le bassin et débits journaliers enregistrés sur la période de suivi à l'exutoire en amont de la retenue du barrage Joumine (547212 m E / 4090039 m N)

La zone hydrologique qui contribue le plus à l'alimentation du cours d'eau principal est la zone drainée par l'oued Bagrat (tronçon A₀₃-A₁₃) (Figure 6). À celle-ci s'ajoute la zone drainée par l'oued Boudissa (tronçon A₀₁-A₁₁) avec une contribution estimée à 22%.

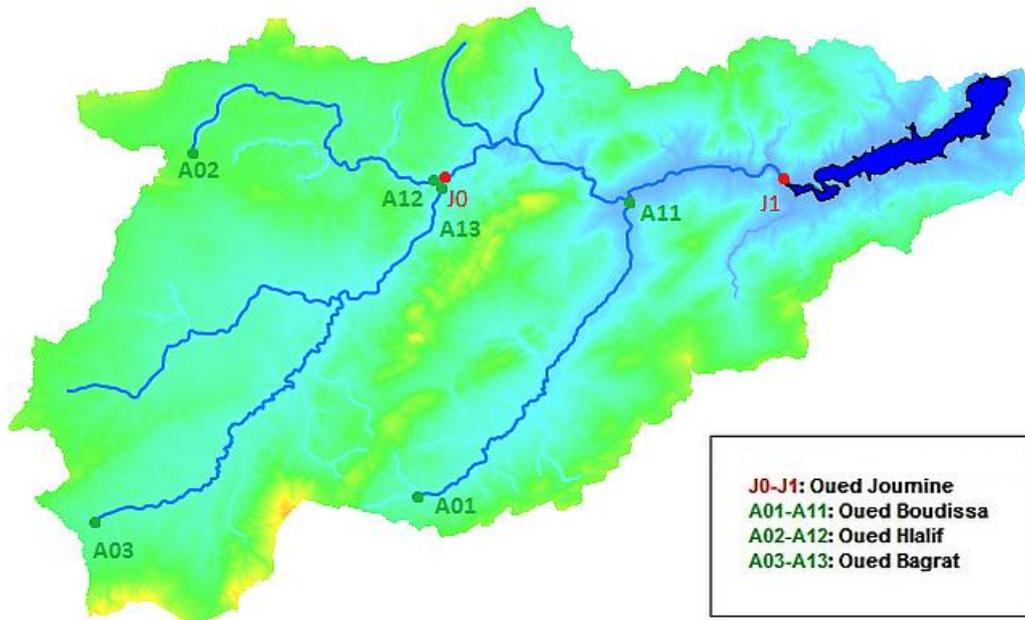


Figure 5. Réseau hydrographique du bassin étudié

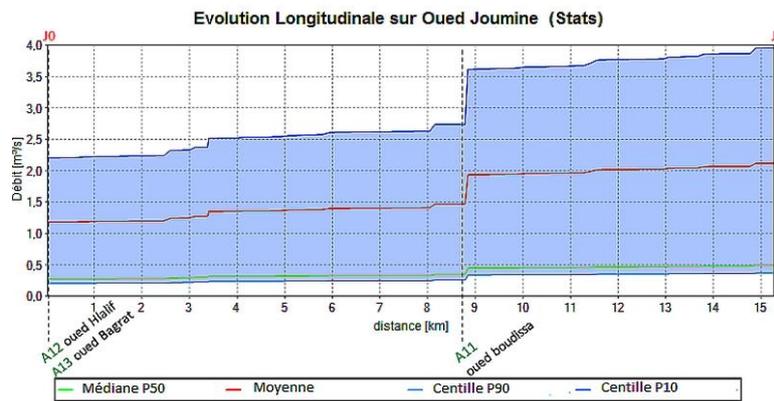


Figure 6. Statistiques sur les débits journaliers de la période de suivi

MATERIEL ET METHODES

Collecte des données

Les données géographiques

Pour caractériser la morphologie et le réseau hydrographique du bassin versant, nous avons utilisé une série de cartes topographiques (Hedhil, Mateur et Béja) à l'échelle 1 : 25 000. Ces cartes ont été géo-référencées sur le référentiel cartographique UTM, zone 32 de l'hémisphère nord, datum Carthage, afin de pouvoir procéder à la digitalisation des informations nécessaires à la représentation spatiale du bassin versant (contour du bassin, réseau hydrographique, sous-bassins, etc.). Le traitement géographique a été fait sous le logiciel ArcGIS version 10.3.1. Le modèle numérique de terrain (résolution 50 m) était disponible dans la base de données GIRE Ichkeul du laboratoire de recherche GREEN TEAM de l'INAT. Les données caractéristiques du sol ont été récupérées auprès de la Direction Générale de l'Aménagement et la Conservation des Terres Agricoles du Ministère de l'Agriculture (DG ACTA⁴). Un autre fichier reprenant la digitalisation des contours des limites administratives par délégation a été récupéré au CRDA⁵ de Bizerte.

Les séries temporelles

Ces données concernent principalement les données hydrométéorologiques journalières nécessaires à l'exécution du modèle PEGASE (débits, températures de l'eau, précipitations, insolation). Elles ont été collectées auprès de l'Institut National de la Météorologie (enregistrements de la station de Béja) et à la Direction Générale des Ressources en eau DGRE. D'autres données relatives à l'exploitation du barrage Joumine et au suivi de la qualité de l'eau de la retenue ont été récupérées de la DG BGTH⁶. Des informations relatives au cheptel (nombre de têtes de bovins, ovins et caprins par délégation) ont été collectées à l'Office de l'élevage et des pâturages.

Enquêtes sur les pratiques agricoles

Pour une meilleure connaissance des pratiques culturales spécifiques de la zone, une enquête a été menée auprès d'une trentaine d'agriculteurs au printemps de l'année 2015 tout en considérant le type d'assolement, la répartition spatiale sur le bassin, la disponibilité et la collaboration des agriculteurs. L'enquête a été conduite en collaboration avec la Cellule Territoriale de Vulgarisation de Joumine. Les différentes visites de terrain et les entretiens avec les agriculteurs nous ont permis de nous renseigner sur les pratiques culturales sur une superficie de 1871 ha. Des parcelles de différentes tailles ont été choisies selon leur proximité à l'oued Joumine et ses principaux affluents. A l'issue de cette enquête, les quantités de fertilisants et les formules phytosanitaires commerciales utilisées ont été identifiés non seulement pour nous guider sur les futurs échantillonnages et paramètres à analyser mais aussi pour une représentation explicite des apports diffus des sols.

⁴ Direction Générale de l'Aménagement et de Conservation des Terres Agricoles

⁵ Commissariat régional de développement agricole

⁶ Direction Générale des Barrages et Grands Travaux Hydrauliques

Caractérisation de l'occupation du sol

Dans le but de caractériser l'occupation du sol, une série temporelle d'images satellites LANDSAT 8 (7 bandes, résolution spatiale de 30 m) de l'année 2015 couvrant la partie nord de la Tunisie a été utilisée (path/row : 192/34). Tenant compte de la couverture nuageuse (couverture maximale de 7%) et du stade végétatif des cultures, une image prise le 5 mai 2015 a été sélectionnée. Elle est de niveau 2A, corrigée des effets atmosphériques (Landsat Surface Reflectance-L8 OLI/TIRS) et accompagnée d'un masque de nuages (*Landsat Surface Reflectance products courtesy of the U.S. Geological Survey*). Pour une meilleure exploitation de l'image, la zone d'étude a été extraite et des zones d'apprentissage ont été préparées pour différentes classes d'occupation du sol (localisation GPS de parcelles agricoles). Un masque a également été appliqué sur les maquis, forêts et l'arboriculture pour éviter toute source de confusion. Après une phase d'apprentissage (zones représentatives des différentes classes), un algorithme de classification supervisé monodate (méthode du maximum de vraisemblance) a servi à la classification par assimilation de tous les pixels à ceux des zones d'apprentissage. Le résultat a été validé par calcul de la matrice de confusion. A partir de ce calcul, on a pu conclure que 93% des pixels sont bien classés et 90% de ce bon classement n'est pas dû au hasard. Le produit final de ce traitement est une carte de 10 classes d'occupation du sol (arboricultures, céréales, fourrages, légumineuses, tournesol, maquis, forêts, sol nu, urbain, plan d'eau).

Expérimentations

Des campagnes de prélèvements ponctuelles ont été réalisées sur deux années hydrologiques depuis 2015, sur 8 points (Figure 7), de la fin de l'automne jusqu'à la fin du printemps (novembre-juin). L'emplacement des points de prélèvement a été choisi de manière à contrôler la contribution du cours d'eau principal (oued Joumine) et des principaux affluents compte tenu de la diversité des influences agricoles.

Des mesures ont été réalisées directement sur site par une sonde de mesure de pH et du potentiel RedOx Sen Tix 950, une sonde de mesure de conductivité TetraCon 925 et une sonde à oxygène FDO 925. Les matières particulaires sont quantifiées au laboratoire par la mesure des MES qui représentent la masse de dépôts secs (séchées à 105°C pendant 24h) obtenus après filtration d'échantillons (300-500 ml) en utilisant du papier filtre en fibres de verre de porosité 0.45 µm. La DCO est déterminée par la méthode à reflux en système ouvert tandis que les ions orthophosphates sont quantifiés par colorimétrie en réagissant avec le molybdate d'ammonium. Les concentrations en ions nitrate sont déterminées par les tests en cuve LCK340. Ces analyses sont réalisées au laboratoire de chimie de l'Institut National de Recherche en Génie Rural Eaux et Forêts (INRGREF) et au Laboratoire du Parc el Mourouj de l'ANPE.

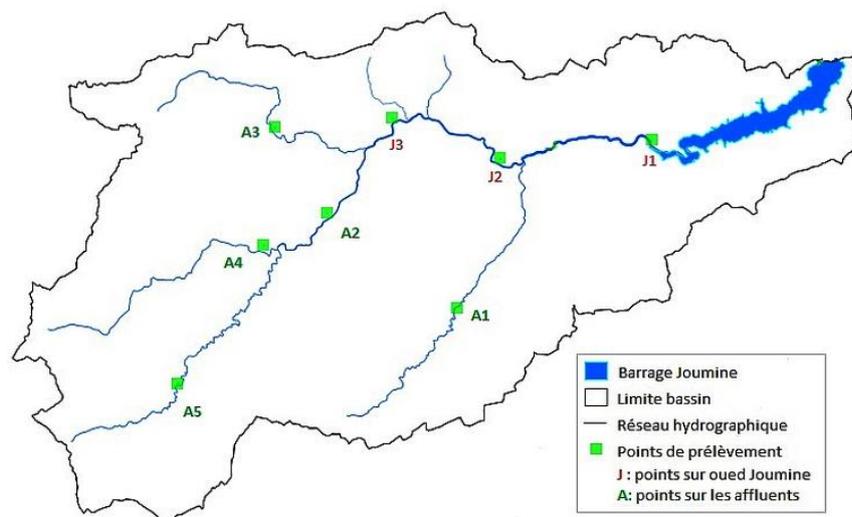


Figure 7. Le réseau de suivi de la qualité des eaux de surface de la zone d'étude

L'approche de modélisation

Présentation du modèle PEGASE

Le modèle PEGASE (Planification Et Gestion de l'Assainissement des Eaux) est un modèle intégré bassin versant-rivière dédié à la gestion des ressources en eau de surface à différentes échelles (bassin hydrographique, rivières, tronçon de rivière, masse d'eau). Il a été développé par l'Aquapôle de l'Université de Liège, et appliqué initialement pour la région Wallonne en Belgique puis adapté et appliqué à d'autres bassins en Flandre, en France et plusieurs pays européens (Pays-Bas, Allemagne, Luxembourg, Bulgarie) pour l'établissement des plans de gestion et le renforcement du monitoring et/ou la mise en place de la DCE.

En s'appuyant sur une représentation déterministe et physiquement basée de la dynamique du système, le modèle PEGASE permet de calculer la qualité de l'eau dans tout le réseau des rivières modélisées associées au bassin versant concerné en fonction des pressions auxquelles elles sont soumises (rejets et apports du bassin). Il propose une représentation des processus physico-chimiques contrôlés par les conditions environnementales (température, insolation, pentes, profondeur d'eau, etc.). Les paramètres ont une signification physique et sont déterminés à partir des mesures expérimentales ou des données de la littérature.

PEGASE est consacré à l'établissement de la relation pression / impact entre les différentes charges de pollution (naturelles et anthropiques) et l'étude des scénarios afin de calculer de façon prévisionnelle les améliorations de la qualité de l'eau qui résultent d'actions multiples telles que l'épuration ou la réduction des rejets (DELIEGE *et al.*, 2010; DELIEGE *et al.*, 2009; GRARD *et al.*, 2014).

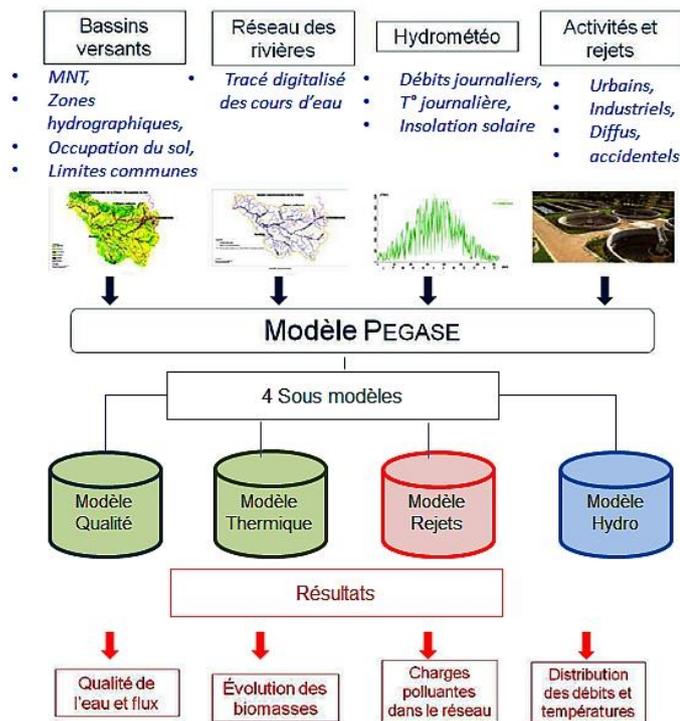


Figure 8. Organisation générale du modèle PEGASE (Aquapôle)

PEGASE est un modèle de rivière unidimensionnel qui utilise une méthode numérique lagrangienne. Il travaille à une résolution spatiale élevée avec une discrétisation détaillée du réseau hydrographique modélisé. Le bassin versant est divisé en mailles carrées pour associer à chaque maille un pourcentage d'occupation de sol (agricole, prairie, forêt, urbain, divers, etc.). Chacune de ces mailles est reliée au minimum à un point de calcul rivière (nœud) déterminé à partir du modèle numérique de terrain par le calcul du chemin de plus grande pente. Les rivières sont donc représentées par une série de segments et de nœuds (\approx tous les 200 m) et les apports du bassin et les rejets sont calculés à chaque nœud (AQUAPOLE, 2017).

Les apports diffus sont estimés à l'aide des fonctions d'apport des sols et les charges domestiques sont prises en compte sur base de la notion d'équivalent-habitant. Concernant les rejets directs d'élevage, ils sont

ajoutés aux nœuds rivière à partir des mailles accueillant le cheptel, réparti sur les surfaces de prairies et de cultures de chaque commune, étant donné que les statistiques relatives à l'élevage sont disponibles par unité administrative.

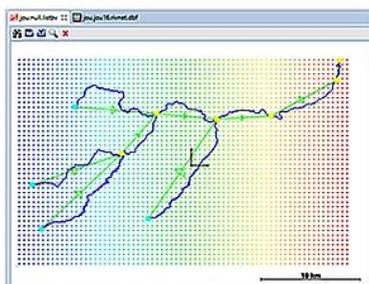
Les calculs sont faits à tout point du réseau avec un pas de temps journalier grâce à quatre sous-modèles (Figure 8). Le sous-modèle de transfert des flux d'eau permet le calcul des variables hydrodynamiques (débits dans les tronçons, vitesses, profondeur d'eau, temps de transfert, etc.), en utilisant des données de débit mesurés introduites au niveau des nœuds. Ainsi, les débits sont recalculés en tout point du réseau en utilisant une formulation de Manning, en fonction des surfaces des zones hydrographiques, des apports et des prélèvements en amont (AQUAPOLE, 2017). Le sous-modèle de calcul de la température de l'eau permet la prise en compte des rejets thermiques. Le sous-modèle rejets prend en considération les flux de pollution. Les principaux processus influençant la qualité de l'eau (production primaire, croissance et disparition de la biomasse bactérienne et la biomasse planctonique, dégradation de la matière organique, mécanismes d'auto-épuration, nitrification et dénitrification, processus de réaération) sont reproduits par le sous-modèle de la qualité de l'eau et du fonctionnement de l'écosystème aquatique.

Prétraitements et paramétrage du modèle PEGASE

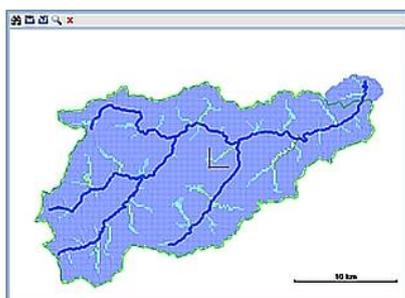
La mise en place du modèle sur l'oued Joumine a débuté par la construction de la base de données hydro-géographique. Ceci a nécessité un certain nombre de données spatiales comme le réseau hydrographique, les zones hydrographiques, le modèle numérique de terrain et l'occupation du sol. Des algorithmes de prétraitement PEGASE utiles pour la modélisation ont été appliqués pour la construction et la vérification de la topologie du réseau hydrographique, des profils altimétriques des rivières et de la connectivité (Figure 9). Ces prétraitements ont abouti à :

- L'enchaînement et l'orientation des segments de rivières pour la construction d'un réseau hydrographique topologiquement correct,
- La sélection des nœuds et la génération des profils altimétriques des rivières en imposant une altitude descendante et lissée vers l'aval,
- La génération de la connectivité bassin/rivière par le calcul de chemin de plus grande pente entre les mailles, et calcul des paramètres d'écoulement sur le bassin (distances aux rivières, différences d'altitudes, etc.)
- L'ajout des informations relatives à l'occupation du sol et le cheptel.

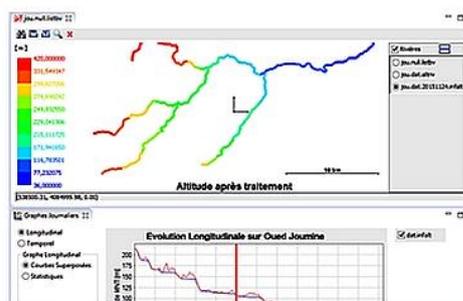
1. Construction et vérification de la topologie du réseau



3. Création de la relation rivière/bassin versant



2. Génération des profils altimétriques des rivières



4. Génération du principal fichier d'entrée de PEGASE

(codes rivières, altitudes, distances à la source, occupation du sol, etc.)

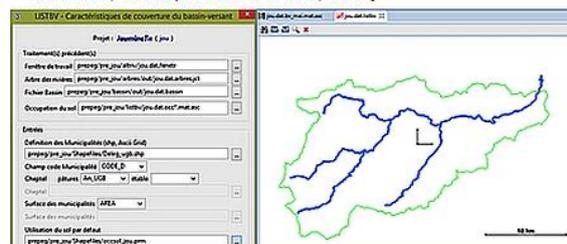


Figure 9. Prétraitement des données géographiques avec PEGASE

Une fois que les caractéristiques physiques du bassin hydrographique et des rivières ont été introduites, le prétraitement des informations de type rejets et stations de mesure (mesures des débits des rivières, insolation, température, qualité, rejets, etc.) a pu être réalisé afin de les mettre au bon format informatique et de les positionner sur le réseau hydrographique modélisé avec des informations spécifiques (charge rejetée, largeur de rivière, etc.).

Avant de lancer les simulations PEGASE, une étape de configuration est nécessaire, donnant ainsi les informations utiles pour leurs réalisations (période de simulation, paramètres non stationnaires, points de sorties de résultats, caractérisation des rejets, abattements, etc.) compte tenu des spécificités du contexte tunisien (estimation de l'équivalent habitant, imposition d'un débit caractéristique d'étiage pour les cours d'eau intermittents, etc.).

Grâce à ces caractéristiques basées sur la physique, peu de processus ou de paramètres doivent être calibrés. Toutefois, les mesures sont nécessaires pour la phase de validation des résultats des simulations de PEGASE par comparaison, pour un jour et un endroit donnés, entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées.

RESULTATS ET DISCUSSION

Pratiques culturales de la zone enquêtée

A partir des informations fournies par les agriculteurs, d'observations de terrain et de la carte d'occupation du sol, on a constaté que le bassin versant d'oued Joumine est caractérisé par une activité économique développée essentiellement autour de l'agriculture (Figure 10). La proportion des terres agricoles est relativement élevée (60%) et consacrée principalement aux grandes cultures. Environ 53% de ces terres sont des cultures céréalières conduites en pluvial. La plupart des exploitations sont de taille moyenne, d'une superficie de 20 à 50 ha. La zone est connue par une activité d'élevage importante. Plusieurs centres de collecte de lait sont installés dans le bassin principalement dans la partie nord-ouest. Le cheptel est constitué principalement d'ovins et de bovins. Sa taille varie en fonction de la taille de l'exploitation. La densité moyenne est de 25.65 UGB par km².



Figure 10. Paysages agricoles du bassin versant de l'oued Joumine

Simulation de la qualité physico-chimique de l'eau de l'oued Joumine

Les simulations réalisées sur deux années hydrologiques (2015-16 et 2016-17) sont des simulations non stationnaires de la qualité physico-chimique de l'eau. Dans cet article, nous avons sélectionné un panel de paramètres qui couvre certains indicateurs de la charge organique (DCO) et les teneurs en oxygène dissous, ainsi que les ions nitrates et phosphates qui renseignent sur la richesse du milieu en nutriments. Les valeurs calculées par le modèle sont comparées aux valeurs expérimentales mesurées durant les campagnes de suivi. Nous avons choisi de réaliser les comparaisons au km 15.25 de l'oued Joumine qui correspond à l'exutoire du bassin étudié pour avoir dans un premier temps une image globale sur la qualité de l'eau qui arrive à la retenue du barrage (Figure 13). Ces comparaisons permettent d'apprécier la qualité des résultats simulés et l'aptitude du modèle à représenter les processus qui interviennent dans la détermination de la qualité du cours d'eau étudié. Elles permettent également de suivre la variabilité saisonnière (Figure 12) des paramètres étudiés et d'estimer l'apport des différentes sources (apport par lessivage des sols, apport rejets d'élevage, apports rejets urbains) ainsi que la contribution des différentes zones hydrographiques drainées.

Les courbes de l'évolution temporelle des différents paramètres sélectionnés (Figure 12) montrent une variabilité saisonnière marquée notamment pour le nitrate. Les concentrations oscillent entre 1 et 5 mg N/l avec des pics enregistrés en hiver et au début du printemps (entre janvier et mars) qui peuvent atteindre 10 mg N/l. Ces pics coïncident avec les périodes d'apports de fertilisants azotés, principalement pour les cultures céréalières. La même tendance est observée pour la demande chimique en oxygène mais avec des fluctuations moins importantes. Les concentrations varient entre 12 et 17,5 mg O₂/l avec une valeur moyenne de 14 mg O₂/l. Ces valeurs marquent une certaine richesse du milieu en matières organiques qui peut nuire à la production de l'eau potable en réagissant avec les désinfectants comme le chlore, et en formant ainsi des sous-produits indésirables (les trihalométhanes, les acides chloroacétiques, etc.).

La concentration en oxygène de l'eau varie entre 9 et 12,5 mg O₂/l dans la limite des valeurs guides des réglementations européennes pour le respect de la vie biologique dans les eaux douces. Les valeurs faibles sont enregistrées en période estivale. Cette baisse s'explique par l'influence des fortes températures sur la solubilité de l'oxygène dans l'eau.

En ce qui concerne les phosphates, les valeurs simulées sont relativement stables. La corrélation est moins bonne avec les concentrations mesurées pour cet élément. Les concentrations maximales enregistrées sont aux alentours de 0,25 gP/m³. Une diminution des concentrations est notée en période de crue, probablement liée aux effets de dilutions d'une part, et à la capacité d'adsorption aux particules de fond, d'autre part.

Les résultats des simulations du modèle PEGASE sont en bonne corrélation ($R^2 > 0.6$) avec les valeurs mesurées pour la plupart des paramètres (oxygène dissous, DCO, NO₃), ce qui démontre que le modèle prend en compte la variabilité saisonnière de la qualité de l'eau dans le même ordre de variation que les valeurs mesurées. Toutefois, le modèle a tendance à sous-estimer certaines teneurs en nitrates dans l'eau. Des pics en nitrates liés à l'influence agricole et leurs pratiques associées (fertilisation, date d'application, quantité utilisée, fréquence, etc.) ne sont pas représentés par le modèle (Figure 13). Ceci peut être lié à l'importance du processus de dénitrification dans la réduction du nitrate dans PEGASE, notamment la dénitrification benthique qui dépend de la proportion de matière organique présente dans les sédiments. L'activité biologique joue également un rôle prédominant, notamment dans les conditions de faibles débits et de température importante.

La qualité de l'eau de l'oued Joumine est largement affectée par les occupations du sol et les pratiques culturales. En effet, le profil longitudinal des apports des différents éléments (C, N et P) montrent des apports variables en fonction des terrains parcourus et des zones hydrographiques drainées (Figure 11). L'apport carboné le plus élevé provient essentiellement des rejets urbains dispersés. Ces rejets proviennent principalement de la partie amont drainée par oued Hlalif et oued el Bagrat. Ils sont collectés au niveau des bassins de décantations et ne subissent aucun traitement avant de rejoindre le cours d'eau. Une contribution non négligeable en éléments carbonés provient de l'activité d'élevage et le lessivage des sols au niveau de la zone drainée par oued Boudissa (tronçon A01-A11). La richesse du milieu en éléments azotés est liée principalement à l'activité agricole. Ceci explique la variabilité saisonnière des teneurs en nitrates dans l'eau. L'évolution longitudinale des apports phosphorés confirme bien notre hypothèse que cet élément n'est pas influencé par les pratiques agricoles. En effet, le phosphore provient principalement de l'élevage et des rejets urbains (Figure 11).

PEGASE - Modeling River Water Quality

JOUMINE RIVER BASIN

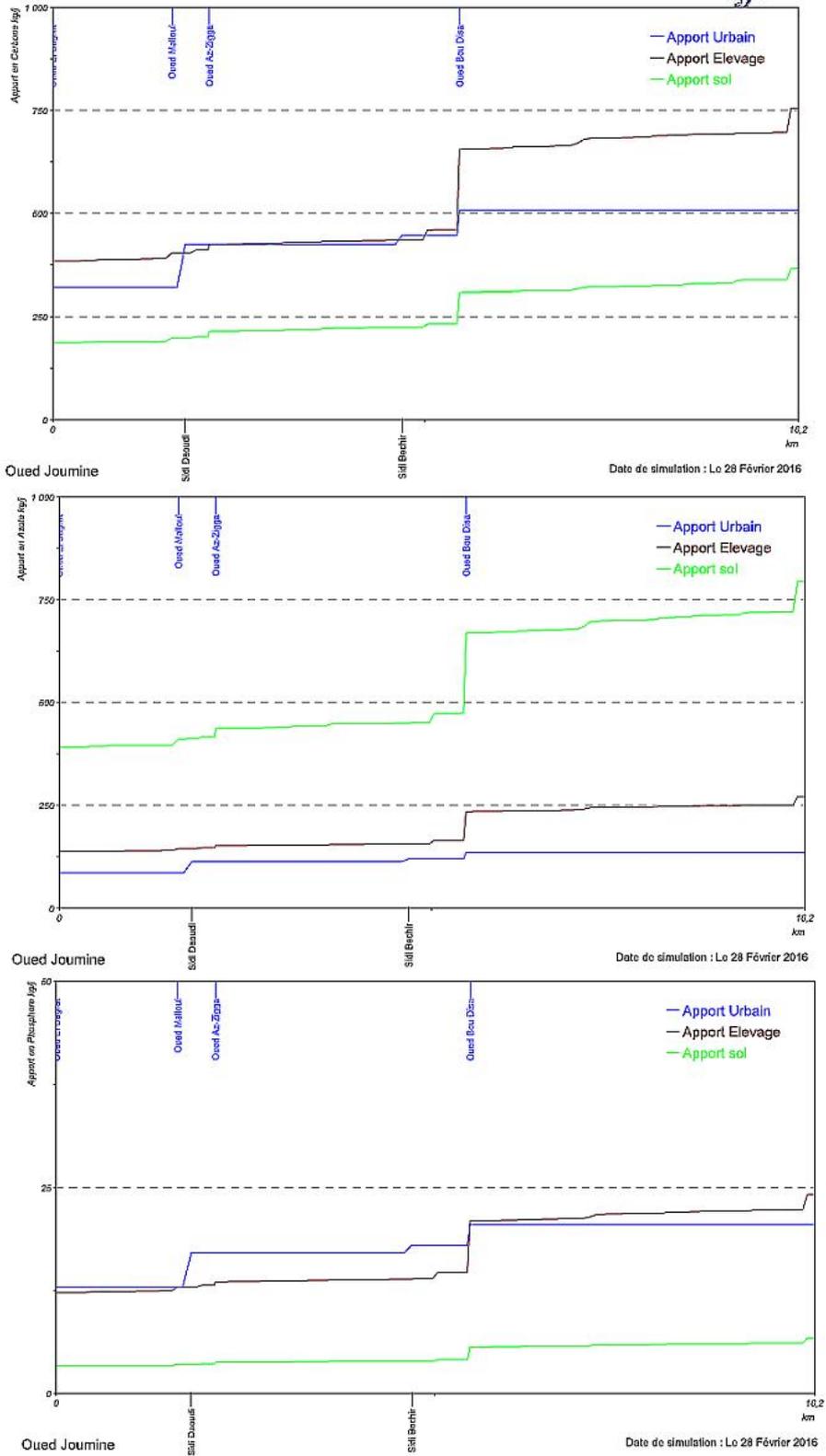


Figure 11. Profil longitudinal des apports carbonés, azotés et phosphorés des différentes sources (urbains, élevage et lessivage des sols)

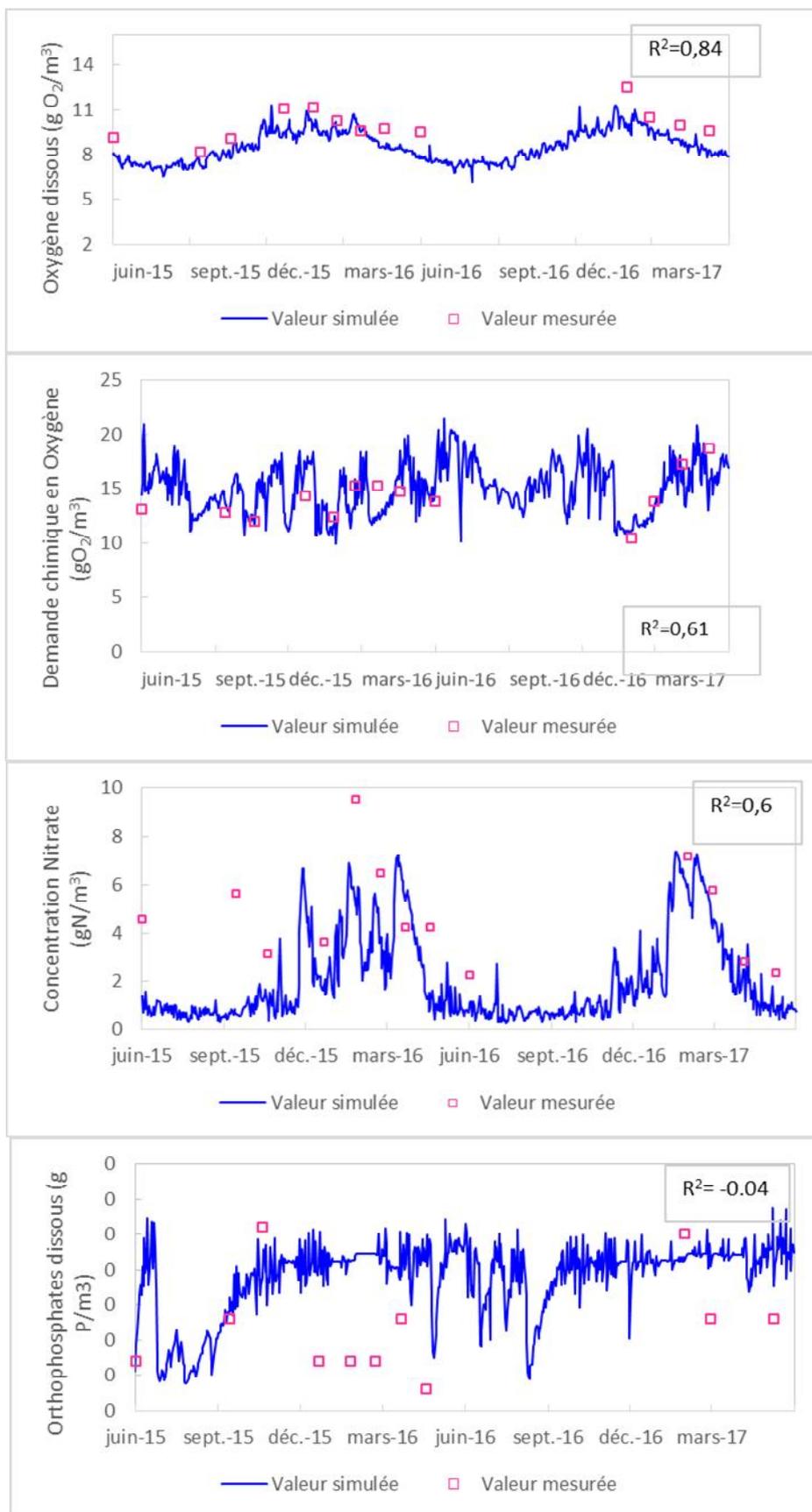


Figure 12. Évolution temporelle des valeurs simulées et mesurées en oxygène dissous, la DCO, le nitrate et les orthophosphates à l'exutoire du bassin versant

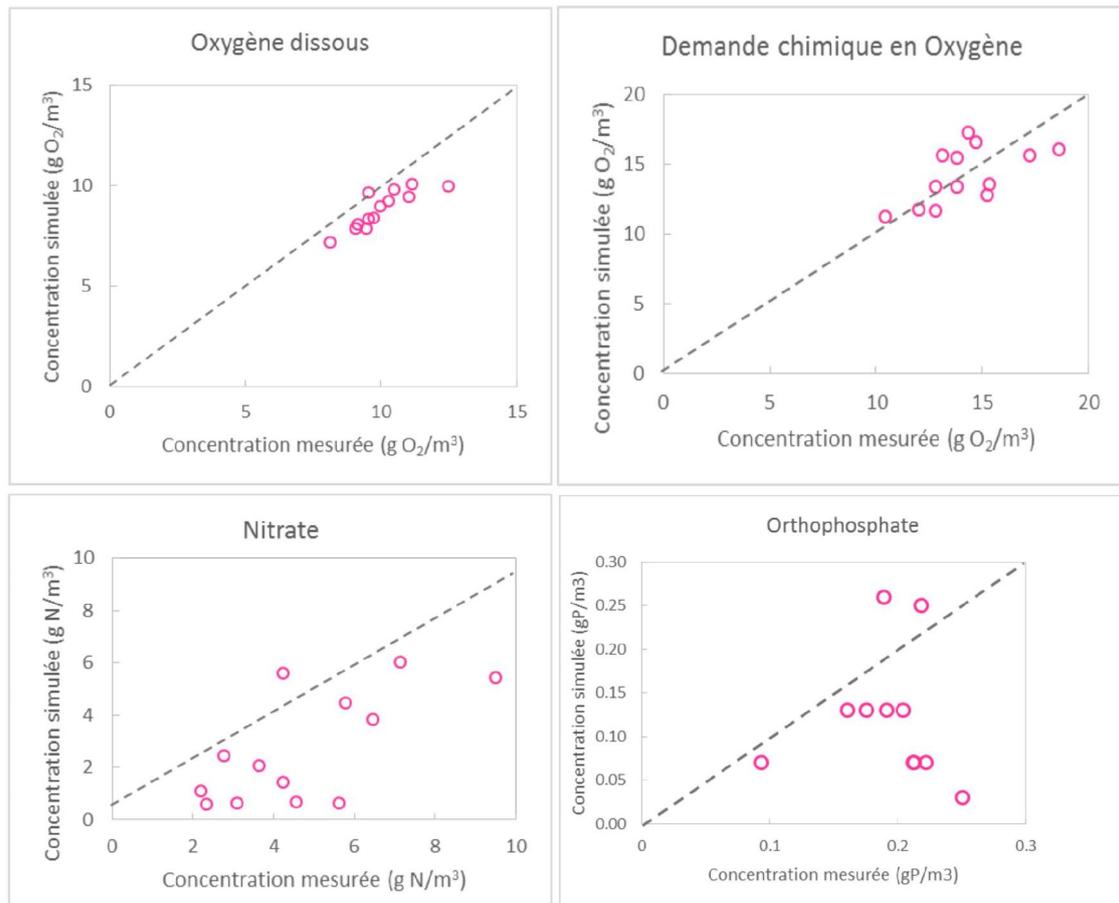


Figure 13. Corrélation entre les mesures et les valeurs simulées

CONCLUSION

Dans ce travail de recherche, l'outil PEGASE de gestion de la qualité des eaux des rivières, initialement adapté aux caractéristiques des régions tempérées, a été testé à l'échelle d'un bassin versant agricole en climat semi-aride pour simuler la qualité physico-chimique des eaux qui alimentent un barrage destiné à la production d'eau potable. Les résultats des premières simulations réalisées sur deux années hydrologiques étaient en bonne corrélation avec les mesures pour la plupart des paramètres étudiés, à l'exception du phosphore. Ils ont illustré la vulnérabilité des eaux de l'oued Joumine aux apports diffus des terres agricoles en nitrates. Ces apports sont variables dans l'espace et dans le temps, et sont plus marqués en période humide, plus précisément en fin d'automne et début du printemps.

Des écarts entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées ont été observés en certaines périodes. Ces écarts peuvent être attribués à une incertitude liée aux données d'entrées et à leur niveau de précision, l'importance de certains processus représentés, ainsi qu'à certaines pressions qui n'ont pas été pris en compte. Le processus de validation peut être amélioré en augmentant la fréquence des mesures pour des situations particulières (lors des événements pluvieux). L'étude de scénarios prospectifs sera donc possible et permettra de renseigner sur la réponse possible du bassin versant à différents types de sollicitation (climatique et anthropique).

BIBLIOGRAPHIE

- AOUISSI, J., BENABDALLAH, S., CHABAANE, Z. L., & CUDENNEC, C. - 2014. Modeling water quality to improve agricultural practices and land management in a Tunisian catchment using the Soil and Water Assessment Tool. *Journal of environmental quality*, 43, (1) :18–25.
- AOUISSI, J., CHABAANE, Z. L., BENABDALLAH, S., & CUDENNEC, C. - 2015. Assessing the hydrological impacts of agricultural changes upstream of the Tunisian World Heritage sea-connected Ichkeul Lake. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 365 : 61.
- AQUAPOLE, (2017). PEGOPERA Version 6.2 Manuel de référence – V. 6.211. Université de Liège. 276p.
- BEN REJEB JENHANI, A., BOUAICHA, N., EL HERRY, S., FATHALLI, A., ZEKRI, I., HAJ ZEKRI, S., BESBES, M., CHAHED, J., SHAYEB, H., & HAMDANE, A. - 2013. L'eau en Tunisie. *Techniques de l'ingénieur, Référence W3005*. 20p.
- CUDENNEC, C., LEDUC, C., & KOUTSOYIANNIS, D. - 2007. Dryland hydrology in Mediterranean regions—a review. *Hydrological Sciences Journal*, 52, (6) :1077-1087. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.6.1077>
- DELIEGE, J.-F., EVERBECQ, E., GRARD, A., BOUROUAG, M., MAGERMANS, P., & BLOCKX, C. - 2009. PEGASE, a software dedicated to Surface Water Quality Assessment and to European database reporting. Paper read at Proceedings of the European conference TOWARDS eENVIRONMENT, Opportunities of SEIS and SIZE: Integrating Environmental Knowledge in Europe, 2009. 8p.
- DELIEGE, J.-F., EVERBECQ, E., MAGERMANS, P., GRARD, A., BOUROUAG, T., BLOCKX, C., & SMITZ, J. - 2010. PEGASE, an integrated river/basin model dedicated to surface water quality assessment: application to cocaine. *Acta Clinica Belgica*, 65(sup1) : 42–48.
- EURONET consortium (EC). (2012). profil environnemental de la Tunisie 2012. 182p.
- GIZ, & Ministère de l'environnement. - 2012. *stratégie nationale sur le changement climatique* (note de synthèse) (p. 165).
- GRARD, A., EVERBECQ, E., MAGERMANS, P., BOUROUAG, M., & DELIEGE, J.-F. - 2014. Transnational modelling of the Meuse District with PegOpera simulation software. *International Journal of River Basin Management*, 1-13.
- HELALI M. - 2013. La gouvernance de l'eau potable, rôles et mécanismes. Second workshop « water table » about sustainable domestic water use in mediterranean regions-SWMED, 20 décembre 2013, Tunis, Tunisie.
- HINGRAY, B., PICOUET, C., & MUSY, A. - 2009. *Hydrologie: Une science pour l'ingénieur*. 21 - PPUR presses polytechniques. 600p.
- INNORPI, 1997 - Eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire ,NT 09-13, 1983 : 3p.
- MEKKI, K. (2009). La politique de l'eau en Tunisie, un portrait, conférence régionale sur la gouvernance de l'eau. *CITET-Tunis*,
- REKAYA. - 2013. *Indicateurs de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) en Tunisie* -. Présenté à séminaire technique sur les indicateurs de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), Barcelone.
- SLIMANI, M., CUDENNEC, C., & FEKI, H. - 2007. Structure du gradient pluviométrique de la transition Méditerranée–Sahara en Tunisie: déterminants géographiques et saisonnalité / Structure of the rainfall gradient in the Mediterranean–Sahara transition in Tunisia: geographical determinants and seasonality. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 6: 1088-1102. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.6.1088>

