

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRES PAR ANALYSE SPATIALE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

KAGAMBEGA Patindsaongo Zéphirin

Institut des Sciences des Sociétés (INSS/CNRST),

Email : kagambegazephirin@gmail.com

RÉSUMÉ

La partie ouest du Burkina Faso regorge d'importantes ressources en eau tant superficielle que souterraine. Les eaux souterraines et de surface constituent une ressource naturelle importante, tant pour l'approvisionnement en eau des populations, l'hydraulique agricole et pastorale que pour l'équilibre écologique des écosystèmes. En effet, les eaux souterraines sont en interaction permanente avec les eaux superficielles. Ainsi, les échanges existant entre les eaux souterraines et les cours d'eau assurent les débits dans chacun des réservoirs, mais influencent également la qualité des eaux. L'objectif de ce travail vise à identifier et à quantifier les échanges entre la nappe souterraine et le fleuve Kou par analyse spatiale. L'approche adoptée a consisté à l'utilisation des techniques d'analyse spatiale sous SIG et la loi de Darcy pour l'identification et le calcul du sens et du débit des échanges entre la nappe et la rivière. Cette étude montre qu'en amont de la zone d'étude, dans le site de Kapkodougou, la nappe alimente la rivière en rive droite sur une longueur de 30 m avec un débit de 52.36 m³/j. Pour la même saison en aval de la zone d'étude, dans le site de Diaradougou, la rivière alimente la nappe sur les 160 m avec un débit de 114.36 m³/j.

Mots clés : Échanges nappes/rivière, rivière Kou, analyse spatiale, TIN, Loi de Darcy

ABSTRACT

The western part of Burkina Faso is full of significant surface and underground water resources. Groundwater and surface water are an important natural resource, both for the water supply of populations, agricultural and pastoral hydraulics and for the ecological balance of ecosystems. Indeed, groundwater is in constant interaction with surface water. Thus, the exchanges existing between the groundwater and the watercourses ensure the flow rates in each of the reservoirs, but also influence the water quality. The objective of this work is to identify and quantify the exchanges between the groundwater and the Kou River by spatial analysis. The approach adopted consisted in the use of spatial analysis techniques under GIS and Darcy's law for the identification and calculation of the direction and flow of exchanges between the groundwater and the river. This study shows that upstream of the study area, in the Kapkodougou site, the aquifer feeds the river on the right bank over a length of 30m with a flow rate of 52.36m³/d. For the same season downstream of the study area, in

the Diaradougou site, the river fed the aquifer over 160m with a flow rate of 114.36m³/d.

Keywords: *cloths Exchanges / river, river Kou, spatial analysis, TIN, Darcy law*

INTRODUCTION

L'étude des échanges nappe-rivière est devenue une composante essentielle de la caractérisation hydrogéologique des bassins versants (M. Hayashi, D. Rosenberry, 2002, p.310 ; T.J. Yofe, 2016, p.31). L'interface nappe-rivière est considérée de nos jours comme une zone de transition caractérisée par une grande variabilité des processus physiques et biogéochimiques.

Les interactions nappe-rivière sont complexes et se développent de manière diverse suivant les échelles spatiales d'étude. Suivant l'échelle d'observation, les hétérogénéités fonctionnelles peuvent varier du centimètre au mètre (M. Brunke et T. Gonser, 1997, p.6 ; R. Woessner, 2000, p.15). Ces échanges complexes varient en fonction du secteur morphologique, de la saison, de l'hydraulique du cours d'eau, de la position relative du niveau de la nappe par rapport à celle du niveau de l'eau en surface, et des caractéristiques physiques de la couche de sédiments du fond du cours d'eau. Elles peuvent avoir lieu dans un sens comme dans l'autre.

Dans le cadre donc d'une gestion durable des bassins versants, il est crucial de comprendre et de quantifier les processus d'échanges entre les eaux souterraines et les eaux de surface. En effet, les eaux souterraines constituent une ressource naturelle importante. Elles représentent un réservoir d'où l'on peut tirer une eau de bonne qualité pour l'approvisionnement en eau potable ainsi que pour des applications dans l'industrie et l'agriculture. Elles sont également précieuses pour maintenir les zones humides et le débit des fleuves, et servent de tampon en périodes de sécheresse. Il est donc primordial de mettre en œuvre les mesures nécessaires pour prévenir la détérioration de leur qualité, et également de les protéger voire d'améliorer et de restaurer leur état suivant leur degré de pollution. À cet effet de nombreuses recherches ont été menées avec comme but la gestion qualitative ou quantitative de la ressource en eau du continuum surface-souterrain (D. Peyrard et al., 2008, p.4257 ; E. Sauret, 2013, p.33, p.295 ; J. Dujardin et al., 2014, p.1658 ; P. Goderniaux et al., 2009, p.124 ; T.A. Leaf et al., 2015, p.1668 ; Y. Cousquer, 2017, p.20). Cependant, l'identification et la quantification des échanges nappes-rivière reposent en général sur une méthode manuelle fastidieuse et gourmande en temps de travail si les calculs sont réalisés à la main, puis saisis sous SIG. Cette démarche est de plus entachée d'une part de subjectivité puisque le calcul des débits est effectué pour des zones sélectionnées ne représentant qu'une faible proportion du linéaire de berges. Il est possible de donner plus d'objectivité à cette

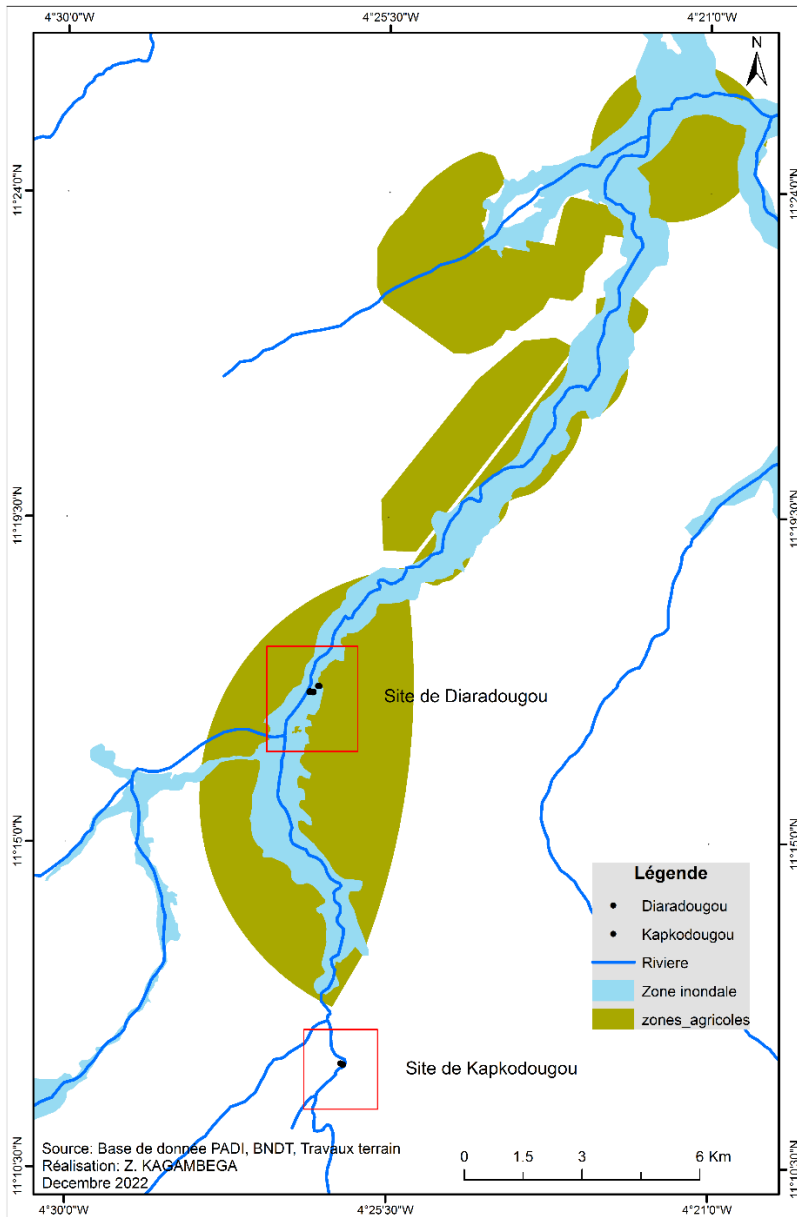
IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRES PAR ANALYSE SPATIALE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

méthode en élaborant une technique appropriée à partir des fonctions de bases disponibles sous SIG. Le caractère spatial des informations nécessite de mettre en œuvre un outil d'analyse spatial afin de mieux visualiser et interpréter les échanges nappe/rivière Kou. L'objectif principal poursuivi dans cette étude est de montrer l'efficacité des SIG dans l'identification et la quantification des échanges nappe/rivière Kou et partant, assurer une gestion coordonnée de la ressource en eau tant superficielle que souterraine.

1. MÉTHODOLOGIE

Cette étude concerne deux sites situés dans le bassin versant du Kou en saison sèche. Ce sont les sites de Kapkodougou et de Diaradougou situés respectivement en amont et dans la partie intermédiaire de la plaine alluviale. La carte 1 présente la situation de ces sites.

Carte 1 : Situation des deux sites de Kapkodougou et de Diaradougou



L'élaboration d'une technique appropriée à partir des fonctions de bases disponibles sous SIG permet de systématiser et d'automatiser le calcul,

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRES PAR ANALYSE SPATIALE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

d'identifier et de quantifier les échanges nappe-Kou sur la totalité du linéaire de berges des deux sites de la zone d'étude. Cette méthode permet de mieux représenter la réalité du terrain et d'obtenir plus rapidement des résultats. Il s'agit donc de calculer et représenter l'angle d'échange entre la nappe et le Kou par analyse spatiale sous SIG, ceci afin de déterminer le potentiel d'échange. Par exemple, si l'échange se fait dans le sens nappe vers Kou et si le sens d'écoulement de la nappe est perpendiculaire à celui du Kou, l'échange sera potentiellement important; si au contraire les deux écoulements sont parallèles, l'échange sera nul. Il convient donc de calculer et représenter les sens d'écoulement du fleuve et de la nappe pour connaître l'angle d'échange. Cette méthode est fondée sur l'utilisation des propriétés des TIN (Triangulated Irregular Network). Ils sont utilisés pour générer des surfaces, constituées d'un réseau de triangles irréguliers, à partir de données ponctuelles ou linéaires. Chaque triangle contient une valeur d'altitude, de pente et d'angle. Les données utilisées sont consignées dans le tableau 1

Tableau 1 : Données utilisées

	Données	Sources
Nappe alluviale	Données piézométriques Champs de perméabilité de l'aquifère(k)	Base de données PADI Sauret(2013)
Rivière Kou	Profil en long Profil en travers Cote d'altitude (ligne d'eau)	Donnée terrain Base de données PADI
Interface nappe-rivière	Contour des berges Surface d'échange	SIG Calcul et hypothèse
Généralité	image SRTM DEM	Base de données PADI

1.1. Description de la méthode d'analyse spatiale

La méthode d'analyse spatiale sous SIG réalisée dans ce travail s'appuie sur la méthode de Bornette et al, (2007). Elle repose sur une évaluation géométrique des échanges fondée sur l'analyse spatiale SIG et l'infiltration des eaux souterraines dans les alluvions perméables à partir notamment de données piézométriques. Les interactions hydrauliques entre l'aquifère (alluviale) et la rivière sont estimées à l'aide des gradients de nappe calculés, à l'interface nappe-rivière, à partir de données piézométriques interpolées par krigeage. Le calcul est fondé sur l'utilisation des outils d'analyse spatiale SIG, et plus particulièrement sur les propriétés des TIN (Triangulated Irregular Network).

La fonction « Create TIN from features » permet de générer à partir de données ponctuelles ou linéaires (comme c'est le cas pour les cartes piézométriques) un modèle de surface de la nappe phréatique composé par un réseau de triangles irréguliers. Chaque triangle contient trois valeurs : la pente, l'altitude et l'angle. Pour une nappe ces trois valeurs deviennent respectivement les suivantes : gradient de nappe, niveau de nappe et sens d'écoulement.

La méthode proposée permet de caractériser les échanges nappe-rivière tout le long de l'interface linéaire (berge), ou polyligne constituée par de nombreux segments. Caractériser les échanges signifie :

- 1) quantifier le débit échangé (Q_f exprimé en m^3/j) ;
- 2) identifier les sens de l'échange, par convention Q_{f+} indique une alimentation de la rivière par la nappe et Q_{f-} une alimentation de l'aquifère par la rivière.

Le débit d'infiltration (Q exprimé en m^3/s) à travers l'interface est calculé, pour chaque segment de la polyligne représentant la berge, avec la loi de Darcy (Équation 1) qui considère le gradient de nappe (i) obtenu à partir du TIN de nappe, la section d'échange unitaire (A exprimée en m^2/m) et la perméabilité de l'aquifère (K exprimé en m/s).

$$Q (m^3/s) = K \times A \times i \quad (1)$$

Les sens de l'échange sont donnés par le signe (+ ou -) du sinus de l'angle existant entre le sens d'écoulement de la nappe et celui de la rivière. Cet angle (D) est calculé, pour chaque segment de la polyligne de berge, en soustrayant la valeur d'angle du TIN de nappe à celui du TIN de la rivière.

De plus, le calcul du débit d'infiltration est pondéré par la valeur du sinus de l'angle D (Équation 2). En effet, si l'écoulement de la nappe et celui du fleuve sont parallèles ($D=0^\circ$), le débit d'échange (Q_p) est considéré comme nul ($\sin 0=0$). Au contraire, si les écoulements sont perpendiculaires ($D=90^\circ$) Q_p est considéré comme maximal ($\sin 90=1$). Pour d'autres valeurs d'angles, on a des situations intermédiaires. Par exemple si $D=45^\circ$ le facteur de pondération est de 0,7.

$$Q_p (m^3/s) = Q \times \sin(D) \quad (2)$$

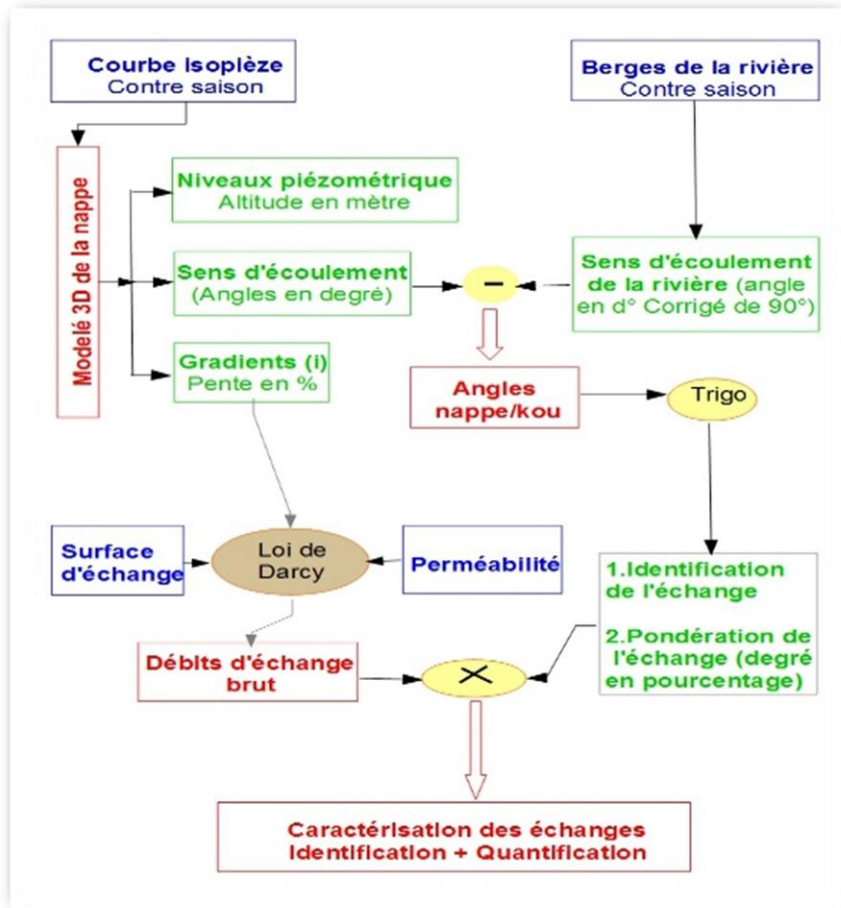
Q_p est calculé pour chaque segment de la polyligne de berge. L'estimation finale du débit d'échange (Q_f) est donnée par l'équation 3. Le débit d'infiltration final (Q_f) correspond à la somme du débit (Q_p) de chaque segment (1 à n) de la polyligne de berge multiplié par la longueur (L) de ces segments. Par mesure de commodité pour la manipulation des résultats, les débits d'échange sont exprimés en m^3 par jour.

$$Q_f (m^3/j) = \sum_{(1 \text{ à } n)} (Q_p \times L \times 86\,400) \quad (3)$$

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRES PAR ANALYSE SPATIALE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

La figure 1 présente le schéma de la méthodologie d'analyse spatiale

Figure 1 : Schéma de la méthode d'analyse spatiale sous SIG



Source : Bornette et al (2007) modifié

1.2. Conception du modèle avec modelbuilder pour l'identification et la quantification des échanges nappe-kou

Les modèles permettent d'automatiser les processus de géotraitement de manière simple et conviviale. Le modelbuilder permet en effet :

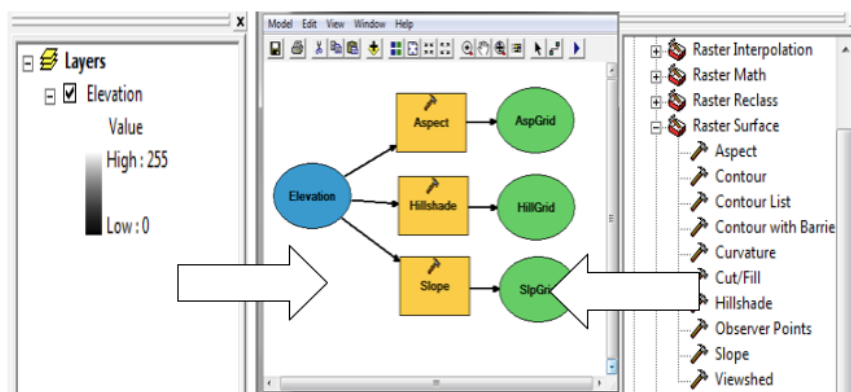
- ✚ La modélisation/simplification de problèmes complexes ;
- ✚ L'analyse rapide ;
- ✚ De créer un modèle, l'exécuter, changer ses paramètres, l'exécuter pour comparer les résultats ;

- ✚ La documentation graphique d'un travail ;
- ✚ De lancer le modèle "n" fois ;
- ✚ Le lancement de plusieurs outils en une seule action.

1.1.1. Création du model nappe-kou

L'environnement de modélisation graphique (figure 2) permet grâce à un simple glissement d'ajouter une nouvelle boîte à outils ou un nouveau modèle (avec ModelBuilder). Le paramétrage des outils, la définition des propriétés du diagramme et du modèle la sauvegarde, l'exécution, l'édition du modèle et le géotraitement se font tous dans ce cadre.

Figure 2 : Environnement de modélisation graphique



Source : Z. Kagambega, 2022

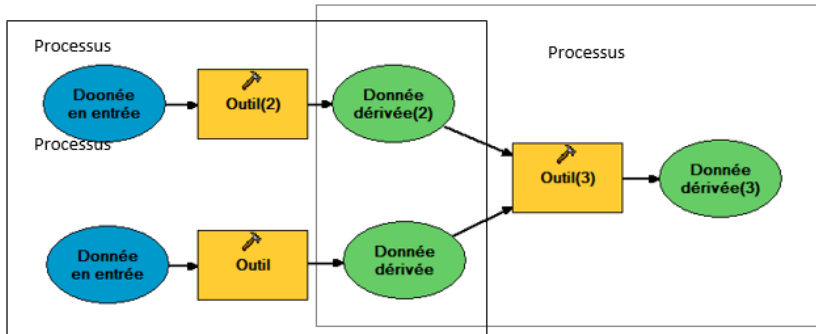
1.1.2. Les éléments du model

Les éléments du model (figure 3) sont constitués de :

- Donnée en entrée : donnée existante avant que le modèle ne soit exécuté (outil ovale de couleur bleue)
- Outil : fonction appliquée à la donnée en entrée (rectangle de couleur orange)
- Donnée dérivée : résultat (ovale de couleur verte)
- Processus : ensemble des éléments (on peut lancer un processus à la fois ou tous en même temps).

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRES PAR ANALYSE SPATIALE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

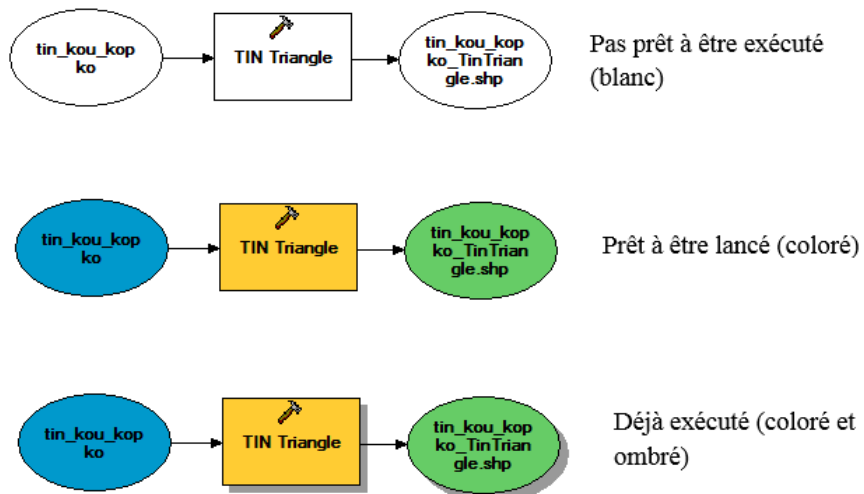
Figure 3 : Éléments du model graphique



Source : Z. Kagambega, 2022

Trois états de processus sont possibles. Ces états sont présentés dans la figure 4 :

Figure 4 : Différents états d'un processus



Source : Z. Kagambega, 2022

Tout ce processus a conduit à la mise en place du modèle. Ce modèle est un processus qui permet d'assembler des séquences d'outils de géotraitement, en

injectant la sortie d'un outil comme entrée d'un autre outil. Ainsi tout le traitement des données se fait de manière automatique.

2. RÉSULTAT

2.1. Représentation du sens d'écoulement de la rivière

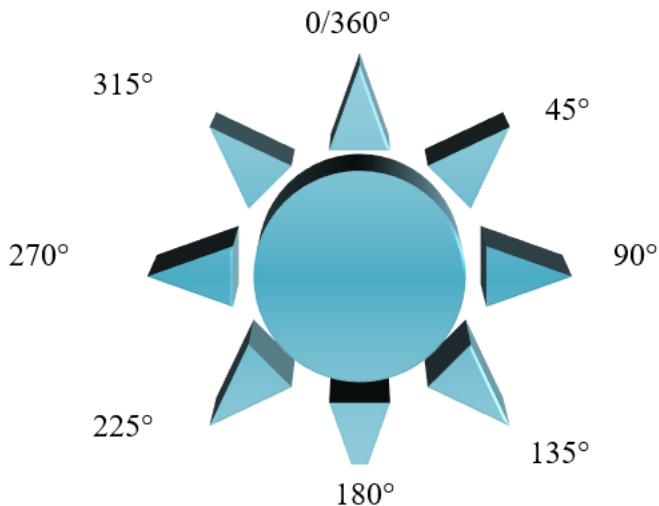
Pour la représentation du sens d'écoulement de la rivière, nous avons considéré la rive droite qui constitue la limite piézométrique de la nappe. Pour obtenir le sens d'écoulement, la polyligne des berges a été découpée en petits segments. L'utilité de ce découpage est que chaque segment n'aura qu'une seule orientation (contrairement aux tronçons des berges qui peuvent tourner).

Pour calculer l'orientation des segments (l'orientation doit être calculée en degrés, par rapport au Nord) on construit une zone tampon sur les polygones des rives ; une valeur quelconque a été affectée à la ligne limite extérieure du tampon, les rives proprement dites restant à 0. Le TIN circonscrit au fleuve et à la zone tampon donne pour chaque triangle une valeur « aspect » (angle) qui correspond à la perpendiculaire au vecteur de rive local ; la pente est de 100 % (45°), dans tout le buffer. L'orientation de chaque vecteur unitaire de rive est calculée par simple soustraction de 90° à l'angle d'orientation (gisement de 90°). Au final, chacun des triangles obtenus contient une valeur d'angle, comprise entre 0 et 360° (0-360° pour le nord, 90° pour l'est, 180° pour le sud et 270° pour l'ouest). Il convient dès lors de corriger cette valeur d'angle de 90° pour obtenir le sens d'écoulement de la rivière.

La transformation du TIN en triangle permet d'affecter les valeurs d'angle à chaque polygone triangle.

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRES PAR ANALYSE SPATIALE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

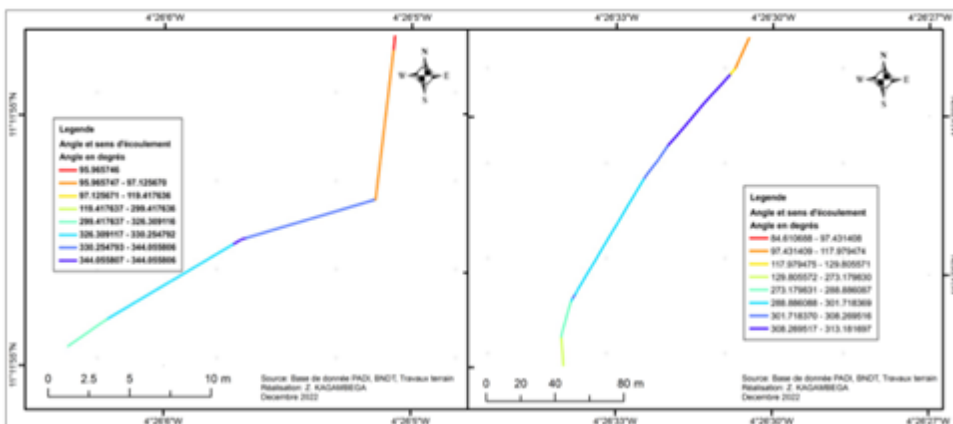
Figure 5 : Cadran de lecture des valeurs d'angle obtenues dans le Tin



Source : Z. Kagambega, 2022

Si la rivière s'écoule approximativement vers l'ouest, l'angle est d'environ 270°, si elle s'écoule approximativement vers le sud, l'angle est d'environ 180°. Ce sens est identique à celui que l'on peut interpréter sur une carte topographique quand on connaît la source et l'exutoire d'un cours d'eau. La carte 2 présente le sens d'écoulement de la rivière kou sur les deux sites.

Carte 2 : Carte du sens d'écoulement de la rivière kou sur le site de Kapkodougou et de Diaradougou

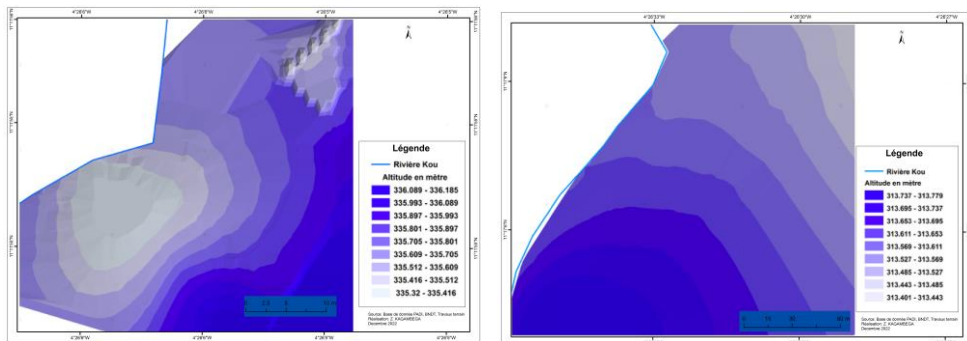


Les tronçons de la rivière sur le site de Kapkodougou sont orientés suivant deux directions préférentielles : une orientation sud-est dans les couleurs bleu et bleu clair, une orientation suivant le nord-est dans la couleur orange. Le site de Diaradougou présente une orientation globale vers le nord-est dans les couleurs orange et bleu et plus en bas du site une orientation tournée vers le sud dans un ton vert clair.

2.2. Représentation du sens d'écoulement de la nappe

Le sens d'écoulement de la nappe est obtenu par une génération d'un TIN avec les couvertures comprenant les courbes piézométriques, le niveau d'eau de la rivière et les limites du secteur étudié. Ce TIN a été transformé en triangle afin de pouvoir affecter les valeurs d'angles des polygones triangles aux segments de berges. Cela permet d'obtenir une couverture représentant le sens d'écoulement de la nappe au niveau des berges de la rivière. Si la nappe s'écoule approximativement vers le sud-ouest l'angle est d'environ 235° , si elle s'écoule approximativement vers le nord-ouest l'angle est d'environ 315° . Le sens d'écoulement de la nappe est le même que celui obtenu après interprétation d'une carte piézométrique : c'est-à-dire perpendiculaire aux isopièzes dans le sens de la pente. La carte 3 présente le niveau piézométrique de la nappe sur les deux sites.

Carte 3 : niveau piézométrique de la nappe en rive droite sur les sites de Kapkodougou et Diaradougou

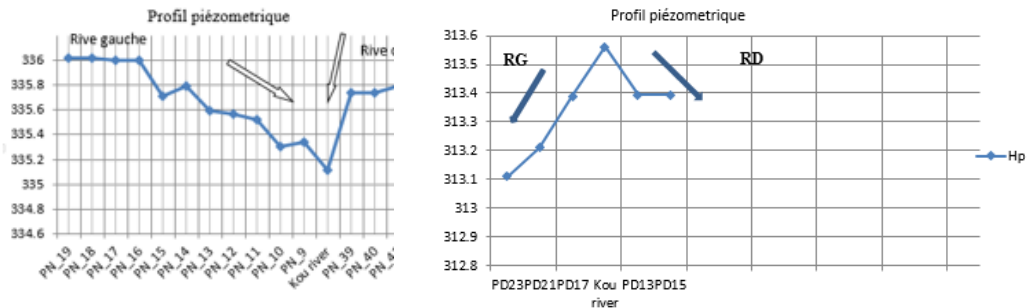


La carte 3 de représentation du niveau piézométrique de la nappe en rive droite est générée à partir des valeurs d'altitude du TIN. Elle représente le niveau de l'aquifère alluvial selon un dégradé de bleu, les zones les plus élevées en bleu foncé et les plus basses en bleu clair. L'écoulement dans l'ensemble est orienté vers la rivière. Un profil piézométrique (Figure 6) réalisé sur une section perpendiculaire au cours d'eau, montre une diminution des niveaux piézométriques à proximité du cours d'eau ce qui confirme le drainage de la plaine alluviale par la rivière sur cette section sur le site de Kapkodougou. Le niveau piézométrique de la nappe alluviale en rive droite sur le site de

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRES PAR ANALYSE SPATIALE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

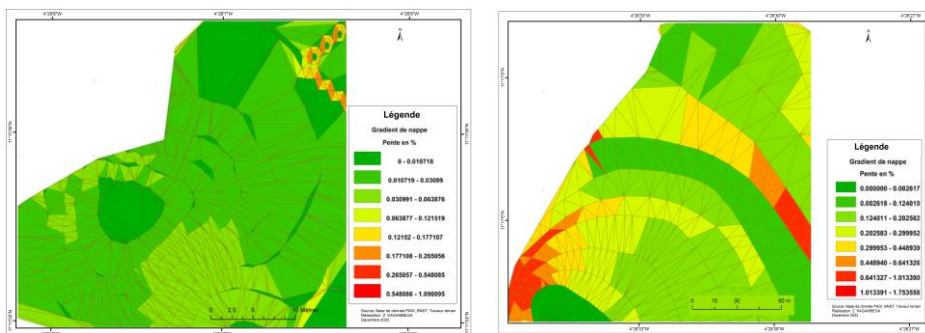
Diaradougou présente un écoulement global orienté vers la plaine. Le profil piézométrique réalisé sur une section perpendiculaire à la rivière Kou montre que la plaine alluviale semble drainer les eaux de la rivière Kou en contre-saison.

Figure 6 : Profil piézométrique sur le site de Kapkodougou et Diaradougou



La carte 4 représente le gradient de la nappe sur les deux sites. Sur le site de Kapkodougou nous constatons un écoulement général orienté nord-ouest, sud-est et nord-est. Sur le site de Diaradougou est l'écoulement de la nappe est orienté de façon générale suivant la direction nord-est, sud-est. Au centre-sud de ce site à l'approche de la rivière nous constatons une orientation dirigée nord-ouest.

Carte 4 : Gradient de la nappe en rive droite sur les deux sites

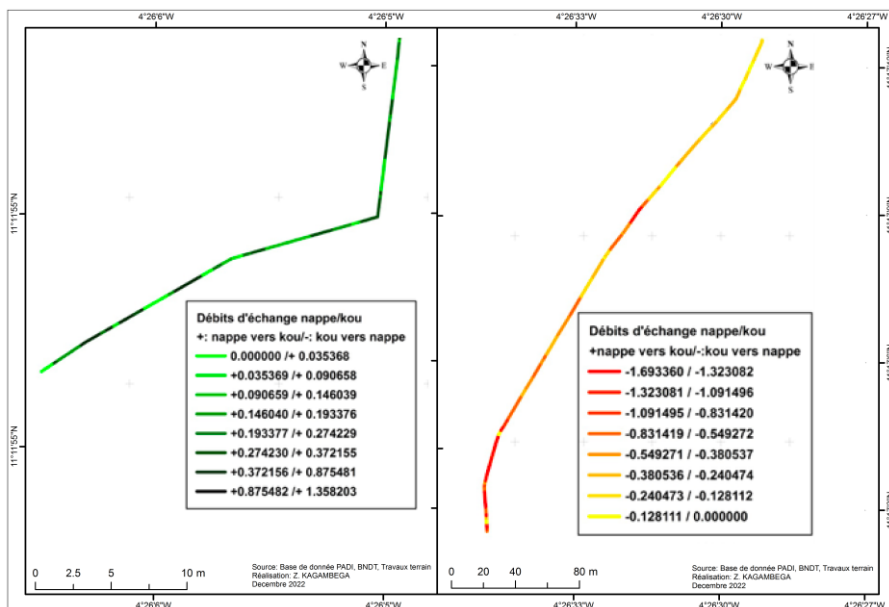


2.3. Représentation du débit d'échange nappe-Kou

La perméabilité des alluvions est issue des travaux de thèse de Sauret (2013), pour les épaisseurs mouillées, elles sont calculées par soustraction du niveau piézométrique et du niveau du substratum. Ces valeurs correspondent au

niveau des berges à la surface d'échange (A) entre la nappe alluviale et la rivière Kou. Le gradient de nappe (i) est calculé par analyse géométrique, à l'aide du SIG. Les débits d'échanges totaux sont exprimés en m^3/j . La carte 5 présente les résultats spatialisés pour les deux sites de Kapkodougou et de Diaradougou en période de contre-saison. Le signe plus (+) traduit une alimentation de la rivière par la nappe et l'intensité du débit d'échange est représentée en vert (clair et foncé) quant au signe moins (-), il représente une alimentation de la nappe par la rivière. Les débits d'échange de la rivière vers la nappe sont représentés en orange et rouge. Pour le site de Kapkodougou, sur une longueur de 30 m la nappe alluviale alimente le Kou sur toute la période de la contre-saison avec un débit de $52.36 m^3/j$. Le site de Diaradougou a une longueur de 160 m et sur toute cette longueur, la nappe est alimentée par la rivière avec un débit de $114.36 m^3/j$. Ces résultats confirment l'évolution de la piézométrie dans la plaine et permettent de quantifier approximativement le volume d'eau échangé entre la rivière et la nappe sur les deux sites. Ils doivent être considérés à titre indicatif car certaines données comme la surface d'échange ayant servi pour l'évaluation des débits restent discutables.

Carte 5 : débits d'échange sur les sites de Kapkodougou et de Diaradougou



3. DISCUSSION

La rivière Kou draine la nappe par endroit

L'aquifère alluvial située en aval des sources de Nasso reçoit par interaction avec la rivière Kou les eaux souterraines des sources de Nasso (Ogou, 2008,

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRES PAR ANALYSE SPATIALE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

p.57). L'interprétation des échanges nappe alluviale/kou par Sauret (2013, p.84) montre que tout au long de l'année, le Kou est drainant en amont de la zone d'étude (Kapkodougou) tandis qu'à l'aval (Diaradougou à Badara) il est drainé. Les cartes du niveau piézométrique et du sens d'écoulement de la nappe ainsi que le profil piézométrique nous montrent une interaction entre le Kou et la plaine alluviale. En contre-saison sur le site de Kapkodougou la plaine alluviale alimente la nappe alluviale en rive droite. Sur le site de Diaradougou suivant la même période et sur la même rive le Kou cette fois-ci alimente la plaine.

La nappe alluviale contribue au débit de la rivière Kou et inversement.

Des mesures directes ponctuelles effectuées sur la rivière Kou par seepage meter (Sauret ,2013, p.138) visant à quantifier les flux d'eau échangés entre les eaux souterraines (bedrock et plaine alluviale) et la rivière Kou montrent que sur quatorze (14) points mesurés (Kapkodougou inclus), les flux d'eau gagnés par la rivière sont d'environ $4,8 \cdot 10^{-1}$ m/j et que par contre, elle perd de l'eau sur quatre (4) seep (Diaradougou inclus). Les flux d'eau perdus sont d'environ $-1,6510^{-1}$ m/j. Il précise toutefois que l'intérêt de ces résultats est de renseigner sur les tronçons de la rivière où ont lieu les échanges de flux avec la nappe sous-jacente et de fournir à titre indicatif des ordres de grandeur des flux d'eau localement échangés. Le résultat issu de l'analyse spatiale donne sur le site de Kapkodougou un débit d'environ 52.36 m³/j gagné par la rivière sur une longueur de 30 m. Les flux d'eau perdus par la rivière au profit de la nappe sur une longueur de 160 m sur le site de Diaradougou sont de l'ordre de -114.36 m³/j soit approximativement -21.44 m³/j sur 30 m. Ces résultats montrent une contribution importante de la nappe alluviale à l'alimentation de la rivière Kou. En effet, le système de fracturation du bassin permettrait donc une alimentation de la rivière par les eaux souterraines. Sauret (2008, p.69), à travers un modèle mathématique d'écoulement souterrain des aquifères du bassin du Kou, a montré que les failles du bassin du Kou servent de couloir de résurgence des eaux souterraines vers les aquifères superficiels, les sources et le Kou.

La spatialisation des échanges nappe/rivière à partir d'un SIG permet une gestion efficace des prélèvements d'eau

La représentation cartographique de ces résultats sur les linéaires de berges concernés permet de spatialiser : le sens des échanges, l'intensité de ses échanges ; les différences dans le temps et dans l'espace. Les résultats obtenus sur les échanges nappe/rivière fournissent bon nombre d'informations

appréciables pour l'alimentation des milieux aquatiques superficiels par les eaux souterraines (limitation de l'assèchement estival, le maintien de débit de tamponnage thermique des eaux de surface, le maintien des milieux oligotrophes...) et la préservation de l'eau pour usages anthropiques (ex : Alimentation en eau potable, dimensionnement des captages, réalimentation de nappe...) en vue de la prévention des conflits d'usage. Les éléments acquis apporteront également des indications utiles pour la restauration des milieux aquatiques.

L'identification et la quantification des échanges nappes-rivière repose généralement sur une métrique hydraulique mobilisant les méthodes de l'hydrogéologie quantitative. Les SIG comparativement aux méthodes hydrogéologiques constitue une méthode simple, peu coûteuse en temps, reproductible, adaptable aux différentes contraintes.

CONCLUSION

L'approche utilisée dans cette étude montre tout l'intérêt et la simplicité d'utilisation de la loi de Darcy pour calculer le débit d'échange nappe/rivière sur les deux sites. La carte du niveau piézométrique, du sens d'écoulement de la nappe ainsi que la spatialisation des débits d'échange ont permis de donner le sens du flux d'échange entre la plaine alluviale et la rivière Kou sur les sites de Kapkodougou et de Diaradougou. L'étude est faite en contre-saison où les enjeux sont plus importants à optimiser. Pour le site de Kapkodougou la rivière Kou draine les eaux de la nappe alluviale en rive droite. Le site de Diaradougou nous avons une alimentation de la nappe alluviale par la rivière sur la même rive. Cependant la méthode présentée dans cette recherche n'est utilisable que dans un contexte hydrogéologique où la loi de Darcy est applicable, c'est-à-dire dans des formations poreuses. Il convient dès lors d'affiner la génération des TIN pour supprimer les segments correspondants aux tronçons de berges sans valeur et de généraliser cette étude sur tout le long du linéaire des berges pour une meilleure gestion coordonnée de la ressource en eau tant superficielle que souterraine.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BRUNKE Matthias, GONSER Tom, 1997. The ecological significance of exchange process between rivers and groundwater. *Freshwater Biology* 37: 1-33.

DUJARDIN J, ANIBAS Christian, BRONDERS Jan, JAMIN Pierre, HAMONTS Kelly, DEJONGHE Winnie, BROUYERE Serge, BATELAAN Okke, 2014. Combining flux estimation techniques to improve

IDENTIFICATION ET QUANTIFICATION DES ÉCHANGES NAPPE-RIVIÈRES PAR ANALYSE SPATIALE DANS LE BASSIN VERSANT DU KOU

characterization of groundwater–surface-water interaction in the zenne river, belgium. *Hydrogeology Journal*, 22(7):1657–1668.

BORNETTE Gudrun, DECHOMETS Roland, FERREIRA David, GILBERT Janine, 2007. Évaluation des échanges nappes rivières et de la part des apports souterrains dans l'alimentation des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, zones humides), Application au fleuve Rhône et à ses aquifères superficiels. Rapport intermédiaire, Action recherche valorisation ZABR n°A11 ? Phase 1, *Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne (ENSM-SE) Cemagref (Lyon) 167p.*

GODERNIAUX Pascal, BROUYERE Serge, FOWLER, Hayley, BLENKINSOP Stephen, THERRIEN René, ORBAN Philippe, DASSARGUES Alain, 2009. Large scale surface–subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology*, 373(1):122–138.

HAYASHI Masaki, ROSENBERRY Donald, 2002. Effects of ground water exchange on the hydrology and ecology of surface water. *Groundwater*, 40 (3), 309-316

HAYASHI Masaki, FARROW Christopher, 2014. Watershed-scale response of groundwater recharge to inter-annual and inter-decadal variability in precipitation (Alberta, Canada), *Hydrogeol. J.* 2014, 22, 1825-1839

LEAF Andi, FIENEN Mike, HUNT Randy, and Buchwald Cheryl, 2015. Groundwater/surface-water interactions in the bad river watershed, wisconsin. Technical report, US Geological Survey/river-aquifer interactions. *Water Resources Research*, 50(2):1665–1688.

OGOUE Constant, 2008. Étude des potentialités aquifères de la plaine alluviale du Kou entre Nasso et Diaradougou. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'Équipement rural. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement 2iE. 78p

PARAN Frédéric, AUGÉARD Bénédicte, 2017. Guide technique Interactions nappe/rivière - Des outils pour comprendre et mesurer les échanges, Agence française pour la biodiversité/Armines, 106p.

PEYRARD Dimitri, SAUVAGE Sabine, VERVIER Philippe, SANCHEZ-PEREZ José-Miguel, and QUINTARD Michel, 2008. A coupled vertically integrated model to describe lateral exchanges between surface and subsurface

in large alluvial floodplains with a fully penetrating river. *Hydrological Processes*, 22(21) :4257–4273

SAURET Elie, 2013. Étude des potentialités hydrogéologiques d'une plaine alluviale en relation avec les eaux souterraines et de surface dans un contexte d'agriculture irriguée (Burkina Faso), thèse de doctorat Université de Liège (ULG) Faculté des Sciences Appliquées - Département ArGENCo Architecture, Géologie, Environnement et constructions Secteur GEO Géotechnologies, Hydrogéologie, Prospection Géophysique. 215p.

SAURET Elie, 2008. Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou. Diplôme d'Étude Approfondie (DEA) en Sciences Appliquées, Université de Liège, 96 pp.

TRAORE Faride, 2012. Optimisation de l'utilisation des ressources en eau du bassin du Kou pour des usages agricoles. Thèse de doctorat, Université de Liège, Liège. 195p

TRAORE Faride, GOMBERT Philippe, 1997. Variations des débits interannuels de la source de la Guinguette. Ministère de l'Environnement et de l'Eau Secrétariat Général, Direction Générale de l'Hydraulique des Hauts-Bassins du Burkina Faso. 8p.

WOESSNER Raymond, 2000. *Mythe et réalité de l'espace Rhin-Rhône. La dynamique industrielle comme facteur de recomposition territoriale*. Besançon, Presses universitaires francs-comtoises [Coll. « Annales littéraires de l'Université de Franche-Comté), 360 p. (ISBN 2913322-81-6)

YOFÉ Tirogo Justine, 2016. Étude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère sédimentaire du bassin du Kou au sud-ouest du Burkina Faso. Thèse en cotutelle, Laboratoire Hydrologie et Ressources en Eau (LEAH, 2iE) / Laboratoire Milieux environnementaux, Transferts et Interactions dans les Hydro systèmes et les Sols (METIS, UPMC) : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie) / Université Pierre et Marie Curie (UPMC). Réf : 2iE/2016-08. 260p

YOHANN Cousquer, 2017. Modélisation des échanges nappe-rivière à l'échelle intermédiaire : conceptualisation, calibration, simulation. *Hydrologie*. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux Montaigne, 205p.