

Analyse géomatique des niveaux d'eau

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Coûts (€)		Coûts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation	Pas de temps Résultats	Pas de temps Données		Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
				 						
Nappes libres	Ponctuelle	0,5 à 1km	Tronçon de cours d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt)	Instantané	Moyen	Fort	Fort	Moyen	Moyen

Description rapide

Cette méthode consiste à exploiter les observations ponctuelles des niveaux d'eau dans les nappes et dans les rivières pour en déduire les sens des échanges nappe/rivière et estimer les flux d'eau échangés. Cette méthode est adaptée à la caractérisation des échanges nappe/rivière dans un contexte hydrogéologique de nappe alluviale libre superficielle, ou aquifère de versant (milieu poreux) dont la connexion avec le cours d'eau est avérée. La méthode est plus rapide à mettre en œuvre qu'un modèle hydrogéologique. Elle permet de travailler sur des zones d'étude relativement étendues (entités hydrogéologiques) et sur lesquelles on dispose d'un minimum de données (suivi des niveaux d'eau de la nappe et de la rivière en plusieurs points). Elle est capable de caractériser les échanges pour chaque rive d'un cours d'eau (linéaire de berge) ainsi que l'absence d'échange. La qualité de la caractérisation des échanges dépend de la densité spatiale et temporelle des données disponibles et de la vérification de certaines hypothèses (échanges latéraux dominants). Cette méthode peut être utilisée pour produire un pré-diagnostic rapide, avant l'utilisation des autres méthodes présentées dans ce guide.

Principe de caractérisation des échanges

Le principe de la méthode est de caractériser les écoulements de la nappe à proximité des berges de la rivière en faisant l'hypothèse qu'ils représentent l'essentiel des échanges nappe/rivière. On suppose que le niveau de la nappe le long des berges est égal au niveau d'eau dans la rivière (pas de perte de charge) et que les écoulements en nappe sont principalement horizontaux. On considère que les échanges se font à travers une surface d'échange en plan vertical dont l'aire est évaluée avec le linéaire de berge considéré et la hauteur d'eau en rivière. On sait que les flux d'eau dans la nappe sont proportionnels à la pente de sa surface libre (application de la loi de Darcy ; encart : Formule de calcul). Les flux entrants ou sortants de la rivière sont donc estimés à partir de la pente entre la surface libre de la nappe à proximité de la berge et le niveau de la rivière (figure 12 page suivante). La perméabilité des alluvions influence la quantité d'eau échangée.

Formule de calcul

Loi de Darcy

$$Q = K.A. \frac{dH}{dL}$$

Q : débit en m³/s

A : section d'écoulement (surface d'infiltration ou d'échange) en m²

K : perméabilité en m/s

$\frac{dH}{dL}$: gradient hydraulique [pente (i)] de charge
(dH : variation du niveau piézométrique entre 2 puits ; dL : distance entre 2 puits).

Cette formule peut être utilisée pour calculer un flux (Q) entre la nappe et la rivière.

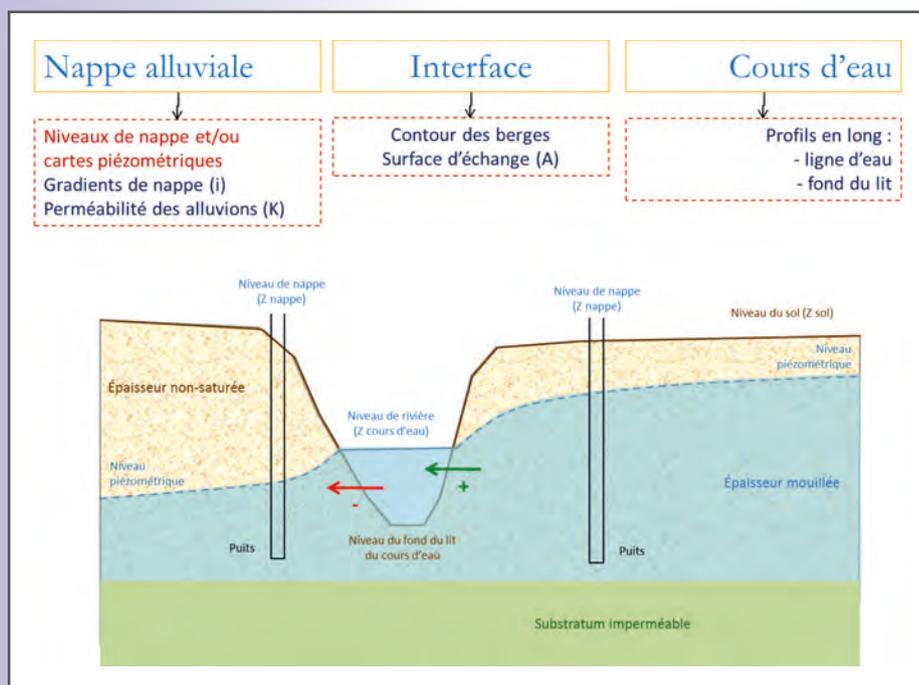


Figure 12. Principe de caractérisation des échanges avec l'analyse géomatique.

Il peut y avoir trois configurations :

- ✓ échanges de la nappe vers la rivière (cote de la nappe supérieure à celle du cours d'eau) ;
- ✓ de la rivière vers la nappe (cote du cours d'eau supérieure à celle de la nappe) ;
- ✓ pas d'échange ou équilibre (cotes de la nappe et du cours d'eau similaires ou berge très colmatée).

Pour les aquifères alluviaux importants, on dispose en général de données hydrauliques détaillées sous forme de cartes piézométriques, souvent en basses eaux, moyennes eaux, hautes eaux, ce qui permet de connaître la saisonnalité des interactions nappe/ri vière.

Il existe aussi des écoulements de nappe sous les rivières et parfois des nappes déconnectées des rivières. Ces configurations ne sont pas diagnosticables avec la méthode géomatique.

■ Protocole de mesure des échanges

Partant d'une carte piézométrique, digitalisée ou construite par interpolation, et de données de hauteurs d'eau synchrones en rivière, un maillage Tin (*Triangulated Irregular Network*) permet de restituer le modelé 3D de la surface de la nappe (figure 13). Un Tin contient les informations suivantes :

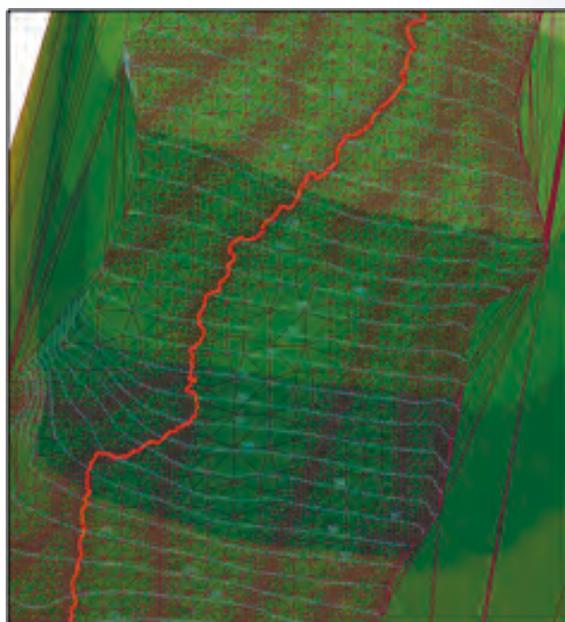
- ✓ « slope » ou pente (en %), c'est-à-dire le gradient (i) ;
- ✓ « aspect » ou direction de l'écoulement (en degré).

La rive du cours d'eau constitue une limite de la nappe. La surface d'échange, qui correspond par hypothèse à un plan vertical le long des berges, est évaluée à partir de

L'essentiel du protocole

1. Recherche des données existantes, prises de contact et sollicitation des détenteurs d'information
2. Repérage des puits et piézomètres et coordonnées des propriétaires ou des gestionnaires
3. Mesure des niveaux de nappes et nivellement/géolocalisation des puits avec un GPS à précision centimétrique
4. Mesure des niveaux d'eau des cours d'eau (ligne d'eau avec un GPS à précision centimétrique)
5. Digitalisation ou construction des cartes piézométriques par interpolation et digitalisation des linéaires de berge
7. Calcul de l'angle d'écoulement du cours d'eau et calcul de l'angle d'écoulement de la nappe et du gradient hydraulique (Tin)
9. Calcul de l'angle d'échange entre la nappe et le cours d'eau
10. Calcul du débit d'eau échangé avec la loi de Darcy et de l'incertitude

Figure 13. Tin (Réseau de triangles irréguliers) représentant le modelé du toit de la nappe alluviale de la plaine du Rhin. Ce Tin est construit à partir des niveaux de nappe issus d'un modèle maillé (Plate-forme Eau-Dyssée).



- le réseau de triangles
- le cours de l'Ill s'écoulant du sud vers le nord
- les isopièzes

données bathymétriques et de données de hauteur d'eau. Ces données peuvent être acquises lors de la réalisation d'un profil en long de la rivière en canoë avec un GPS embarqué et une sonde bathymétrique. La perméabilité de l'aquifère peut être estimée à l'aide de valeurs génériques issues de la littérature ou par essai de pompage.

Au final, l'analyse géomatique des niveaux d'eau diagnostique le sens des échanges et quantifie les volumes échangés sur le linéaire de berge étudié en utilisant la loi de Darcy (encart : Formule de calcul). L'approche géomatique (encarts : L'essentiel du protocole et Dispositifs/matériel) montre l'applicabilité et la simplicité de cette loi pour calculer des débits d'échanges nappe/rivière sur les secteurs étudiés.

Dispositifs / matériel

Matériel de mesure

Sonde piézométrique
Sonde bathymétrique
GPS + antenne (Photo 1 et Photo 2)
L'acquisition de chroniques de données nécessite plus de matériel :

- matériel d'enregistrement en continu ;
- sondes enregistreuses ;
- socles des sondes ;
- système de fixation des sondes ;
- ordinateur de terrain.

Logiciels

SIG
GPS

Prise de notes

Carnet de terrain / Fiche de terrain
Crayon papier, gomme

Orientation et informations

Cartes IGN 1/25 000°
Cartes géologiques BRGM 1/50 000°
Boussole
Marteau de géologue
Rapports et études

Outils et petit matériel

Trousse de secours
Caisse à outils

Navigation

Bateau gonflable (Photo 1) + rames
Gonfleur électrique et à pied
Gilets de sauvetage + casques
Moteur électrique + batterie + support
Socle pour GPS et antenne
Bidons et sacs étanches



Photo 1. GPS monté sur canoë.



Photo 2. Mesure GPS sur trépied.

© J. Jollivet

© H. Chapuis

■ Interprétation des données et des résultats

Les données nécessaires et essentielles sont de nature ponctuelle du point de vue de leur échelle spatiale (niveaux d'eau en rivière et en nappe). Le niveau de représentativité du diagnostic des échanges nappe/rievière est de l'ordre de 0,5 à 1 km. L'interprétation peut être étendue à l'échelle de l'entité hydrogéologique. Du point de vue temporel, la méthode propose un instantané des échanges. Il est possible d'étudier les variations saisonnières par comparaison de différents instantanés à des dates différentes (si les données sont disponibles).

Si la caractérisation du sens des échanges peut être assez précise lorsque la densité de points de mesure est importante, la quantification des échanges reste soumise à des hypothèses fortes ; en effet, l'écoulement des nappes est rarement horizontal à proximité de la rivière car une partie des échanges se fait verticalement (sous le lit de la rivière). De plus il est très difficile de connaître la perméabilité de l'aquifère concerné (forte variabilité spatiale, lit et berge colmatés). Les estimations des flux échangés donnent des ordres de grandeur, mais gagnent à être précisées par d'autres méthodes comme le dispositif Molonari et la modélisation associée (fiche outils n°3).

■ Valeurs guides et repères

- ✓ Profondeur de nappe : en général moins de 5 m
- ✓ Variation de niveau de nappe : moins de 0,5 m (faible), 0,5 à 2 m (moyenne), supérieure à 2 m (forte)
- ✓ Perméabilité des alluvions (ou de l'aquifère incisé) : 10^{-2} à 10^{-3} m/s (forte), 10^{-3} à 10^{-4} m/s (moyenne), inférieure à 10^{-4} m/s (faible)

■ Résultats : exemple sur un méandre de la Sèvre-Niortaise

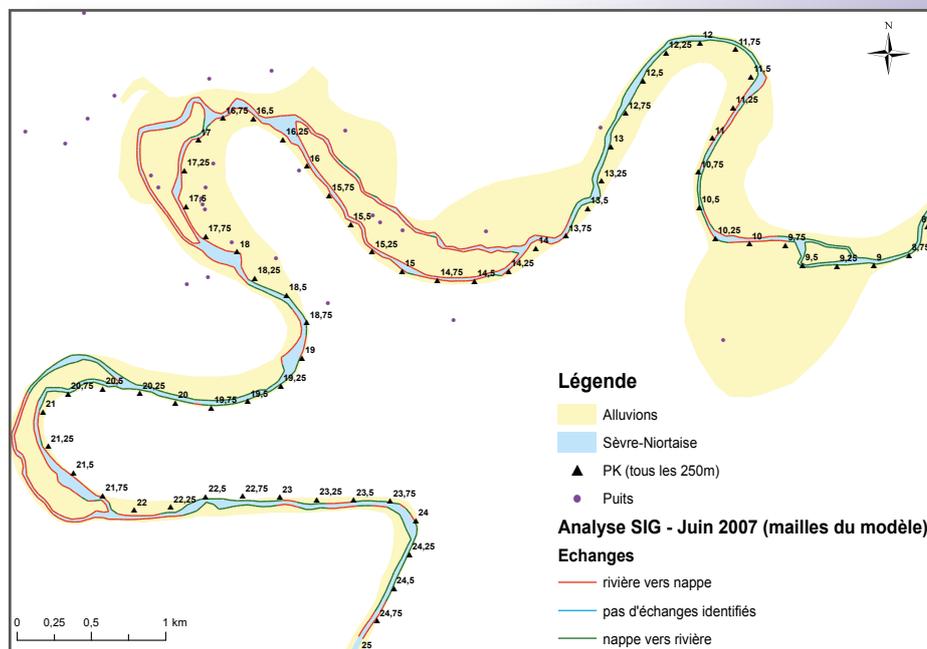
La figure 14 présente les résultats spatialisés des échanges nappes/Sèvre-Niortaise caractérisés à partir des données issues du modèle Marthe (BRGM) pour juin 2007. Les échanges ont été caractérisés à partir des valeurs contenues dans chaque maille du modèle. Cette figure présente différents éléments :

- ✓ un découpage du linéaire du cours d'eau en points kilométriques (PK : triangles noirs). PK 12 à 21 soit 9 km (le diagnostic représenté en amont et en aval de ces PK n'est pas représentatif car situé en dehors de la zone où le modèle est valide) ;
- ✓ le diagnostic du sens des échanges à partir de la méthode SIG. En vert foncé les flux d'eau de la nappe vers la rivière et en rouge les flux d'eau de la rivière vers la nappe. On n'observe pas de tronçons sur lesquels aucun échange n'est diagnostiqué ;
- ✓ la zone des alluvions est représentée en jaune, le cours de la Sèvre-Niortaise (qui s'écoule d'est en ouest) en bleu et les puits en violet.

La figure 14 montre la sectorisation spatiale des échanges nappe/rievière dans un contexte de fort méandrage, de bande alluviale de faible largeur et de fort impact des champs captant :

- ✓ à l'amont (PK 12 à 13,75) la nappe alimente la rivière aussi bien en rive droite qu'en rive gauche ;
- ✓ dans la zone centrale (PK 13,75 à 18,25), dans le méandre, c'est au contraire la rivière qui alimente la nappe. Cet effet est lié en partie à l'influence des captages ;
- ✓ à l'aval, (PK 18,25 à 21), c'est de nouveau la rivière qui draine l'aquifère.

Figure 14. Caractérisation des échanges nappe/Sèvre-Niortaise par analyse géomatique des niveaux d'eau. L'écoulement de la rivière se fait d'est en ouest.



■ Points forts

- ▶ Relativement rapide si l'on travaille à partir de données existantes (tableau 9) et simple (souplesse d'utilisation), reproductible
- ▶ Peu gourmand en données (*a minima* hauteurs d'eau rivière et nappe)
- ▶ Diagnostic de territoire relativement étendus (20 km)
- ▶ Bilans à différentes échelles (agrégation spatiale du kilomètre à l'entité hydro-géologique)
- ▶ Permet une estimation des débits d'échange (cette estimation reste toutefois indicative par rapport à une quantification effectuée avec un modèle)

Tableau 9. Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour l'analyse géomatique des niveaux d'eau.

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
TERRAIN		
Reconnaissance	2 jours	2
Nivellement des puits (GPS)	10 puits/jour	2
Relevé de la ligne d'eau d'un cours d'eau (GPS)	15 km de rivière /jour	4
Relevé bathymétrique de la profondeur d'un cours d'eau	6 sections de rivière/jour	3
Relevé piézométrique	25 puits/jour	2
Jaugeage (mesure de débit)	4 sections de rivière/jour	4
TRAITEMENT SIG		
Préparation des données pour l'analyse géomatique	10 jours	1
Analyse géomatique (traitement SIG)	5 jours	1
Calcul des débits	2 jours	1

■ Informations et données nécessaires

- ▶ Niveau (hauteur d'eau) de nappe et de rivière (h : cote ngf)
- ▶ Carte piézométrique (idéalement hautes eaux, moyennes eaux et basses eaux)
- ▶ Perméabilités au droit des berges
- ▶ Section d'écoulement

■ Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- ▶ Utilisable uniquement pour les nappes libres et superficielles en milieux alluviaux
- ▶ Fortement dépendant de l'existence et de la précision des données de départ
- ▶ Fortement dépendant du traitement de la piézométrie par un Tin ; des traitements géostatistiques (par ex. krigeage) pourraient améliorer les interpolations
- ▶ Ne tient pas réellement compte de l'état de colmatage des berges
- ▶ Diagnostic uniquement des transferts horizontaux
- ▶ Coûts matériel et logiciel (ces coûts peuvent être réduits si on utilise des données existantes et des logiciels libres)

■ Méthodes complémentaires

- ▶ Géochimie, notamment isotopes (fiche outils n°5)
- ▶ Végétation aquatique (fiche outils n° 6)
- ▶ Invertébrés souterrains (fiche outils n°7)
- ▶ Dispositifs Molonari ou modèle hydrogéologique pour préciser la quantification des échanges (fiches outils n°2 et 3)

Références et liens pour en savoir plus

Lalot E. (2014) *Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières – Application au Rhône*. Thèse de Doctorat. ENSM-SE.

Graillot D., Paran F., Bornette G., Marmonier P., Piscart C., Cadilhac L. (2014) *Coupling groundwater modeling and biological indicators for identifying river/aquifer exchanges*. SpringerPlus.2014, 3:68. DOI: 10.1186/10.1186/2193-1801-3-68.

Paran F., Dechomets R., Graillot D. (2008) *Identification et quantification des échanges nappes/rivière par analyse spatiale*. Géomatique expert, 2008 (64), p. 73-79.

Personnes ressources

Didier Graillot (Hydrogéologue) : UMR CNRS 5600 EVS, École des Mines de Saint-Etienne, GéoSciences et Environnement (GSE), didier.graillot@mines-stetienne.fr

Frédéric Paran (Analyse géomatique) : UMR CNRS 5600 EVS, École des Mines de Saint-Etienne, GéoSciences et Environnement (GSE), frederic.paran@mines-stetienne.fr