

Apports des techniques de suivi spécifiques de la piézométrie sur les échanges nappe-rivière



Chapitres

PARTIE 1 :

Apports des techniques de suivi spécifiques de la piézométrie sur les échanges nappe-rivière au sein du bassin versant/vallon

PARTIE 2 :

Mesurer les débits des petits cours d'eau : méthodes, comparaison, innovations

PARTIE 3 :

Vers des capteurs bas coût pour les analyses hydrochimiques in-situ : exemple des smartphones

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	8
PARTIE 1 : APPORTS DES TECHNIQUES DE SUIVI SPECIFIQUES DE LA PIEZOMETRIE SUR LES ECHANGES NAPPE-RIVIERE.....	10
1.1. RAPPELS THEORIQUES EN HYDROGEOLOGIE.....	10
1.1.1. PARAMETRES CONTROLANT LES ECHANGES NAPPE-RIVIERE	10
<i>Les gradients de niveau de nappe</i>	<i>10</i>
<i>Propriétés hydrauliques : porosité et perméabilité.....</i>	<i>12</i>
1.1.2. DEFINITION DES ECHANGES NAPPE-RIVIERE.....	16
<i>Typologie des échanges nappe-rivière</i>	<i>16</i>
<i>Variations spatiales et temporelles des échanges nappe-rivière.....</i>	<i>18</i>
<i>Cas particulier : les zones humides.....</i>	<i>19</i>
<i>La zone hyporhéique</i>	<i>20</i>
<i>Impacts anthropiques sur les échanges nappe rivières</i>	<i>22</i>
<i>Echanges nappe rivière et recharge granulaire</i>	<i>24</i>
CE QU'IL FAUT RETENIR	27
1.2. METHODOLOGIE PRATIQUE : LA PIEZOMETRIE COMME OUTIL POUR LE SUIVI DES OPERATIONS DE RESTAURATION	28
1.2.1. OPERATIONS DE RESTAURATION DE COURS D'EAU : BIEN DEFINIR LES OBJECTIFS.....	28
1.2.2. CAS D'UNE RESTAURATION DE COURS D'EAU : APPROCHE SIMPLIFIEE	28
<i>Résumé des différentes approches en fonction des objectifs poursuivis</i>	<i>29</i>
1.2.3 ANALYSE COMPLETE ET SPECIALISEE DES ECHANGES NAPPE-RIVIERE.....	33
CE QU'IL FAUT RETENIR	35
1.3. APPORT DE LA PIEZOMETRIE : EXEMPLES SUR DES SITES SUIVIS DANS LE PROJET BERCEAU.....	36
1.3.1. RESEAUX DE PIEZOMETRES INSTALLES DANS LE CADRE DU PROJET BERCEAU.....	36
<i>Réseau de piézomètres installé sur le ruisseau du Pas de l'Âne, bassin versant de la Flume, Vignoc (35 - Ile et Vilaine)</i>	<i>36</i>
<i>Réseau de piézomètres installé sur le ruisseau du Cô-Malville, bassin versant du Ninian, Ploërmel (56 - Morbihan).....</i>	<i>37</i>
1.3.2. METHODES POUR TRAITER ET INTERPRETER LES DONNEES.....	39
• <i>Analyse temporelle des données piézométriques.....</i>	<i>39</i>
• <i>Analyse spatiale des données piézométriques</i>	<i>45</i>
POUR ALLER PLUS LOIN... ..	47
<i>Statistiques</i>	<i>47</i>
<i>Cartes piézométriques.....</i>	<i>49</i>
<i>Modélisation hydrogéologique</i>	<i>50</i>
CE QU'IL FAUT RETENIR	51
1.4. SYNTHESE DE L'APPORT DE LA PIEZOMETRIE SUR LES CAS D'ETUDE DANS LE CADRE DU PROJET BERCEAU	52



CE QU'IL FAUT RETENIR	55
ANNEXE PIEZOMETRIE :.....	56
FICHES TECHNIQUES 1, 2, 3 ET 4	56
FICHE TECHNIQUE N° 1 - REALISATION DE MICRO-PIEZOMETRES	57
FICHE TECHNIQUE N° 2 - CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE – TEST HYDRAULIQUE.....	60
FICHE TECHNIQUE N° 3 - INSTALLATION D'UN LIMNIMETRE.....	62
FICHE TECHNIQUE N° 4 - CAPTEURS AUTOMATIQUES DE PRESSION	64
BIBLIOGRAPHIE	66
PARTIE 2 : MESURER LES DEBITS DES PETITS COURS D'EAU : METHODES, COMPARAISON, INNOVATIONS... 70	
INTRODUCTION PARTIE 2	70
2.1. PRINCIPES DES METHODES DE JAUGEAGE ETUDIEES.....	71
2.1.1. JAUGEAGE AU SEL	71
2.1.2. MESURE DES VITESSES D'ECOULEMENT PAR DIFFERENCE DE CHARGE.....	72
2.1.3. JAUGEAGES VIDEO.....	73
<i>Fudaa LPIV</i>	74
<i>TracTrac</i>	75
<i>Discharge</i>	75
2.2. EVALUATION ET COMPARAISON DES METHODES DE JAUGEAGES LORS DE TESTS IN-SITU	76
2.2.1. PROTOCOLES DE MESURE SUR LE TERRAIN	76
2.2.2. COMPARATIF DES DIFFERENTES METHODES DE MESURE DES DEBITS DES PETITS COURS D'EAU.....	78
2.2.4. SOURCES D'INCERTITUDE PROPRES A CHAQUE METHODE.....	80
2.3. HAUTEURS LIMNIMETRIQUES	81
2.3.1. DEFINITION ET ENJEUX SUR LES PETITS COURS D'EAU	81
2.3.2. CHOIX DE LA POSITION DE LA STATION LIMNIMETRIQUE	82
2.4. COURBES DE TARAGE	82
2.4. CONCLUSIONS.....	84
ANNEXE DEBITMETRIE :.....	86
FICHES TECHNIQUES 5, 6 ET 7.....	86
FICHE TECHNIQUE N° 5 - JAUGEAGE AU SEL	87
FICHE TECHNIQUE N° 6 - MESURE DE DEBIT A LA REGLE TRANSPARENTE	89
FICHE TECHNIQUE N° 7 - DEBITMETRIE VIDEO	91
BIBLIOGRAPHIE	93
PARTIE 3 : HYDROCHIMIE : VERS DES CAPTEURS BAS COUTS POUR LES MESURES IN-SITU DES CONCENTRATIONS EN NITRATES	94
INTRODUCTION.....	94
3.1. NITRATE APP : LA MESURE DE PARAMETRES HYDROCHIMIQUES PAR SMARTPHONE.....	94
3.2. ETUDE DES SOURCES D'INCERTITUDE SUR LA MESURE : EXPERIENCES EN LABORATOIRE ET RESULTATS	96
3.2.1. ANTECEDENTS.....	96
3.2.2. PROTOCOLES DES EXPERIENCES EN LABORATOIRE.....	97
<i>Influence de l'intensité lumineuse</i>	97



<i>Interpolation colorimétrique</i>	97
<i>Quantité d'eau sur la bandelette</i>	97
<i>Interférences avec d'autres éléments en solutions</i>	98
3.2.3. RESULTATS	98
<i>Influence de la luminosité</i>	98
<i>Influence de la quantité d'eau sur la bandelette</i>	99
<i>Présence d'autres éléments en solution (hors nitrites)</i>	102
<i>Présence de nitrites</i>	103
<i>Conclusions sur les tests en laboratoire</i>	104
3.2.4 PROTOCOLE OPTIMAL	104
<i>Incertitudes sur la mesure en utilisant le protocole optimal</i>	104
3.3. PHASE DE TEST SUR LE TERRAIN	106
3.3.1. OBJECTIFS	106
3.3.2. RESULTATS.....	107
<i>Carte des mesures</i>	107
<i>Variabilité temporelle</i>	107
<i>Comparaison avec les analyses en laboratoire</i>	108
3.4. CONCLUSIONS SUR L'APPLICATION NITRATE APP	109
ANNEXE HYDROCHIMIE :	111
FICHE TECHNIQUE N°8	111
<i>FICHE METHODE N°8 - MESURE DE CONCENTRATIONS EN NITRATES PAR SMARTPHONE</i>	112



Table des figures

Figure 1 : Sens des échanges nappe-rivière selon la configuration des isopièzes.....	10
Figure 2 : Variables utilisées pour le calcul d'un niveau piézométrique.....	11
Figure 3 : Porosité et perméabilité dans différents contextes aquifères. Notions d'hétérogénéité spatiale de la porosité et de la perméabilité.....	12
Figure 4 : Coupe schématique d'un aquifère libre pour le calcul de débit selon la loi de Darcy (1856).....	14
Figure 5 : Echelle des valeurs de conductivités hydrauliques en m/s en fonction du type de sédiment ou de roche, modifié d'après Freeze and Cherry, 1975.	15
Figure 6 : Vision globale des flux souterrains dans un bassin versant.	17
Figure 7 : Temps de résidence et lignes d'écoulement de l'eau souterraine dans le bassin versant de Pleine-Fougères. Virginie Vergnaud-Ayraud et al. (2015).	17
Figure 8 : Schémas descriptifs des différentes typologies des échanges nappe-rivière à l'échelle d'un bas-fond de vallée.....	18
Figure 9 : Schéma descriptif de la variation locale des échanges nappe-rivière lors d'un évènement de crue.....	19
Figure 10 : Schémas descriptifs des différents types de flux possibles au travers de la zone hyporhéique, à différentes échelles. D'après Flippo et al. (2014).	21
Figure 11 Schémas descriptifs de l'impact des drains sur le toit de la nappe et sur les échanges nappe rivière à l'échelle d'un bas-fond de vallée.....	22
Figure 12 : Schémas descriptifs de l'impact des pompages sur le toit de la nappe et sur les échanges nappe-rivière à l'échelle d'un bas-fond de vallée.....	23
Figure 13 : Impact de la perméabilité de la recharge granulaire sur la hauteur d'eau libre et sur les échanges nappe-rivière.....	26
Figure 14 : Importance relative des différents paramètres à prendre en compte lors d'un suivi des échanges nappe-rivière, en fonction de l'objectif suivi.....	31
Figure 15 : Degré d'information qu'il est possible d'obtenir en fonction du nombre de piézomètres installés sur le site d'étude.....	32
Figure 16 : Carte du réseau de piézomètres installés sur le site du Pas de l'Âne, bassin versant de La Flume, à Vignoc (35).....	37
Figure 17 : Carte du réseau de piézomètres installés sur le site du Cô-Malville, à Ploermel (56).....	38
Figure 18 : Chroniques de précipitations et de variations piézométriques et limnimétriques associées, sur le site du Cô-Malville, Ploermel (56).	39
Figure 19: Chroniques de précipitations site du Cô-Malville, Ploermel (56) : zoom sur un pic de crue en été (17/08/2019).....	41
Figure 20: Représentation schématique de l'inversion de gradients visible sur le zoom de la chronique piézométrique du 17/08/2020 – Figure 19 -.....	41
Figure 21 : Chroniques de précipitations site du Cô-Malville, Ploermel (56) : zoom sur un pic de crue en hiver (13/12/2020) le long du transect N1/N3.....	42
Figure 22 : Signal d'évapotranspiration sur la chronique piézométrique du Cô-Malville, Ploermel (56) en période d'étiage et éléments d'analyse du signal.....	43
Figure 23 : Chronique des gradients hydrauliques calculés entre la nappe et le cours d'eau pour deux piézomètres différents le long d'un versant : piézomètre proche de la berge (courbe jaune) ; piézomètre plus haut sur le versant (courbe bleue).....	44
Figure 24 : Exemples de transects réalisés sur le Cô-Malville, Ploermel (56) à différents stades hydrologiques ; avant, pendant et après la crue.....	46
Figure 25 : Exemple d'un bloc 3D réalisé pour le site d'étude du Cô-Malville, bassin versant du Ninian, Ploermel (56). lors d'une crue en juin 2019, avant la remise en talweg du cours d'eau.	47
Figure 26 : Quartiles calculés à partir des données de profondeurs de nappe dans les piézomètres sur une année hydrologique après restauration du Pas de l'Âne, Vignoc (35).	48
Figure 27 Distribution cumulée de la profondeur de nappe sur une année hydrologique (2019-2020) pour un piézomètre du bas-fond du site du Pas de l'Âne, Vignoc (35). Le trait horizontal représente le % de temps cumulé pour lequel le toit de la nappe est à moins de 50 cm de profondeur.....	48



Figure 28 : Carte piézométrique réalisée à partir de 15 données de niveau d'eau à l'aide du logiciel SURFER sur le site du Cô-Malville, à Ploermel (56). Les versants alimentent le cours d'eau de manière symétrique. Avant



restauration, la charge imposée par l'ancien canal d'amené restauration engendrait une asymétrie des flux des versants vers le bas-fond..... 49

Figure 29 : Bloc 3D légendés, montrant la dynamique du système nappe-rivière dans le cas où le cours d'eau est replacé dans le talweg. Illustration du site du Côté-Malville (piézomètres N1 à N10), avant restauration et hors étiage, en période de crue et hors période de crue. S'applique également au site du Pas de l'Âne..... 53

Figure 30 : Fiches synthétiques sous la forme de bloc 3D légendés, montrant la dynamique du système nappe-rivière dans les contextes où le cours d'eau est déplacé contre ou sur un versant. Illustration des sites du Pas de l'Âne (piézomètres F1 à F10) et du Côté-Malville (piézomètres N1 à N10), avant restauration et hors étiage, en période de crue et hors période de crue. 54

Figure 31 : Principe de la mesure de débit par jaugeage au sel (équation et paramètres) 71

Figure 32 : Règle transparente et différence de charge (Image : User guide, Young et. Al 2015) 72

Figure 33 : Relation entre la vitesse calculée à partir de l'équation BERCEAU (éq. 3) et Δh suivant une régression Polynomiale de 2ème ordre. Les courbes en pointillés représentent l'intervalle de confiance à 95 %. 73

Figure 34 : Illustration du calcul du champ de vitesse et de débit via l'interface de Fudaa 1.8.3. 75

Figure 35 : Différentes étapes de la mesure de débit par smartphone avec l'application Discharge 76

Figure 36 : Comparaison des jaugeages vidéo et des jaugeages à la règle transparente, avec les résultats obtenus par jaugeage au sel, sur différents sites de mesure et à différentes dates 78

Figure 37 Tableau comparatif des différentes méthodes de jaugeages explorées dans BERCEAU 79

Figure 38 Photographie d'un limnimètre installée sur un site d'étude du projet BERCEAU et schéma de fonctionnement de la mesure de hauteur d'eau 81

Figure 39 Courbe de tarage réalisée à partir de jaugeages au sel et de jaugeages vidéo, ruisseau du Pas de l'Âne, Bassin versant de la Flume, Vignoc (35)..... 83

Figure 40 : à gauche, vue en coupe d'une section d'un cours d'eau dont la géométrie est caractérisée par un changement de largeur entraînant une modification de la relation hauteur/débit ; à droite, l'ajustement de la courbe de tarage « par partie », en fonction de la géométrie du cours d'eau. 83

Figure 41 Courbe de tarage pour le site du Géant Endormi, ruisseau du Côté-Malville, bassin versant du Ninian, Ploërmel (56). La relation établie à partir de 20 cm est représentée ici seulement à titre indicatif. En effet, elle ne contient que 2 points et le calcul d'une régression linéaire n'est pas représentatif. L'enveloppe grisée représente l'intervalle de confiance à 75%. 84

Figure 42 Illustration de l'ensemble des éléments permettant la mesure de nitrates, par bandelettes colorimétriques et par l'application Nitrate App. De gauche à droite : application Nitrate App développée par Deltares, carte légende pour la mesure de nitrates (Deltares) et flacon de 25 bandelettes colorimétrique de marque Hach. 95

Figure 43 Schéma des différentes étapes de la mesure de Nitrates par smartphone via l'application Nitrate App..... 95

Figure 44 Concentrations en $\text{NO}_3\text{-N}$ mesurées par bandelette après 30 sec, 60 sec et 90 sec pour des températures (air et échantillon) de 2°C (a), 10°C (b) et 20°C (c) à partir de concentrations contrôlées en laboratoire. La ligne en pointillés représente la ligne de régression 1 :1. 96

Figure 45 Différents paramètres testés en laboratoire afin d'évaluer les sources d'incertitude sur la mesure de Nitrates par bandelette colorimétrique et smartphone. *(LDQ nitrites : 0.05 mg/L, incertitude (+/-0.01 mg/L) ; LDQ nitrates 0.01 mg/L, incertitudes (+/- 1.5 mg/L). Toutes les mesures par smartphone sont faites à 60 secondes (+/-1 seconde)..... 97

Figure 46 Résultats de l'expérience en laboratoire sur l'influence de l'intensité lumineuse lors de la mesure des nitrates par bandelette colorimétrique et smartphone. Incertitude sur la valeur de l'intensité lumineuse : 12 %. 98

Figure 47 Résultats protocole A) : Graphique sous forme de « boîte à moustache » ou box-plot, représentant la répartition statistique des résultats des séries de mesures pour les concentrations de référence suivantes : 5.3 mg/L, 50.5 mg/L et 101.3 mg/L. 99

Figure 48 : Résultats protocole B : Graphique sous forme de « boîte à moustache » ou box-plot, représentant la répartition statistique des résultats des séries de mesures pour les concentrations de référence suivantes : 5.3 mg/L, 22.6 mg/L, 50.7 mg/L et 101.3 mg/L 99

Figure 49 : Comparaison des résultats des mesures sans et avec agitation de la bandelette après trempage, pour une concentration de référence (50.5 mg/L \pm 1.5 mg/L). 101

Figure 50 : Evolution du coefficient de variation en fonction du nombre de mesure réalisées, pour différentes valeurs de concentration de référence, en suivant le protocole A ou le protocole B. 101

Figure 51 : Influence de la concentration en matières organiques et en chlorures sur la mesure de la concentration en nitrates. Les solutions ont été réalisées et contrôlées en laboratoire. 103

Figure 52 ; Schéma de la carte légende « nitrates » et des deux pastilles présentes sur la bandelettes. La pastille du bas mesure la concentration en nitrites et celle du haut la concentration en nitrates + nitrites103



Figure 53 : Principales conclusions à la suite des expériences en laboratoire sur les sources d'incertitude sur la mesure de nitrates via les bandelettes colorimétriques et l'application Nitrate App..... 104

Figure 54 : Densité de distribution des valeurs de biais relatifs selon les différents protocoles ; le biais relatif a été calculé pour chaque mesure selon l'équation :

Biais relatif = ($[NO_3^-]_{Labo} - [NO_3^-]_{Bandelettes}$)/ $[NO_3^-]_{reference}$ 105

Figure 55 : Proportion des organismes qui ont participé à la phase de test de Nitrate App en Bretagne 106

Figure 56 : Carte des mesures faites avec Nitrate App lors de la phase de test sur le terrain. Concentration en nitrate proportionnelle à la taille des points et graduée en fonction de la couleur..... 107

Figure 57 : Variabilité temporelle sur 4 points de mesure avec Nitrate App 108

Figure 58 : Comparaison entre les concentrations de nitrates mesurées en laboratoire et sur le terrain avec Nitrate App. Lignes en pointillés noir : droite 1 :1, les barres d'incertitudes correspondent à 1 sigma. 109



Introduction générale

L'amélioration de l'état quantitatif et qualitatif des masses d'eaux, qu'elles soient superficielles ou souterraines, et des écosystèmes qui leur sont rattachés est aujourd'hui au centre des préoccupations en termes de gestion environnementale. Si les bénéfices de la restauration des cours d'eau sur les ressources en eaux et les écosystèmes associés sont en théorie largement connus, l'évaluation de l'impact de ce type de travaux est plus difficile à mettre en pratique de manière systématique.

La caractérisation des échanges nappe-rivière est souvent indispensable pour comprendre les variations spatiales et temporelles des débits, des concentrations d'éléments dissous et des températures de l'eau dans les rivières. À ce titre, elle est souvent identifiée, voire envisagée, pour évaluer l'impact de projet de restauration. Caractériser les flux entre les nappes en connexion avec les cours d'eau reste jusqu'à présent une affaire de spécialistes dans le cadre de projets conséquents, reposant sur une instrumentation poussée.

La diffusion de méthodes pour diagnostiquer les échanges nappe-rivière sur un site est un enjeu important dans le suivi de l'impact de travaux de restauration de cours d'eau ou de zones humides. Afin de diminuer un certain niveau d'empirisme dans le retour d'expérience des opérations de restauration, une compréhension des modifications des flux hydrologiques (souterrains ou de surface) induite par les travaux est indispensable. La diffusion des savoirs et des techniques de mesures des échanges nappe-rivière est un préalable pour une application plus pertinente de ces techniques.

Une documentation spécifique doit être proposée pour faire le pont entre le savoir académique et la mise œuvre d'opérations in-situ par des non spécialistes en hydrologie/hydrogéologie. A cette fin, l'Office Français de la Biodiversité (OFB) a édité un *Guide technique sur les interactions nappes rivières et les outils pour comprendre et mesurer les échanges* (Paran, et al. ,2017). Ce guide est une bonne synthèse de ce qui peut être envisagé comme approches complémentaires pour effectuer un diagnostic hydrologique d'un site, avec des grilles de décision selon les caractéristiques des sites et des résultats des mesures. Il est destiné à un public assez large et n'est pas spécifique aux attentes des techniciens rivière. Ces derniers demandent en effet une description plus explicite et plus détaillée de la mise en œuvre in-situ des techniques de mesures et d'interprétation.

Dans le cadre du projet BERCEAU, nous avons cherché à compléter au mieux le guide de l'OFB, en ciblant comme public celui des techniciens rivière. La démarche est de proposer des techniques et des protocoles qui soient relativement (suffisamment) simples et bon marché ; afin que des non spécialistes puissent les adopter et fournir des informations significatives dans le suivi des restaurations. Le projet est également focalisé sur des contextes de petits cours d'eau bretons (1 à 5 mètres de larges), qui font l'objet d'une modification de leur morphométrie ou d'une remise en talweg. Ces contextes correspondent à une majorité des opérations de restauration en Bretagne.

Dans cette tâche 2 de BERCEAU, plusieurs approches ont été utilisées pour étudier l'impact des opérations de restauration sur les échanges nappes-rivière. Chacune de ces approches fait l'objet d'une partie de ce chapitre sur les échanges nappe-rivière. Un protocole de suivi hydrologique basé sur le suivi des hauteurs d'eau en nappe et en rivière (suivis piézométriques et limnimétriques) est la première approche qui constitue le corps principal de ce chapitre. Dans cette première partie sont présentés l'intérêt du suivi des niveaux selon différents cas de figures de restauration de cours d'eau et différentes stratégies d'installation des piézomètres. Pour mieux comprendre la logique du protocole proposé, nous avons rappelé en première partie de ce document quelques notions d'hydrogéologie. Dans une deuxième partie, nous présentons une



étude comparative de plusieurs protocoles pour la mesure et le suivi des débits dans les petits cours d'eau. Il nous est apparu nécessaire d'apporter quelques éléments sur la débitmétrie des cours d'eau suite aux sollicitations récurrentes des techniciens rivière sur ce point. En effet, une quantification de l'impact des opérations de restauration sur les débits est souvent recherchée pour mettre en exergue une modification des échanges nappe-rivière. Dans le même esprit, en troisième partie, nous présentons une technique bas coût de mesure in-situ en temps réel des concentrations en nitrates à l'aide d'une application smartphone. L'idée est ici de proposer un moyen de suivi de la qualité de l'eau et notamment du potentiel de dénitrification de la zone restaurée.

Des fiches techniques synthétiques, présentées en annexes de chacune des parties, permettent de décrire concrètement les protocoles à suivre sur le terrain et dans certains calculs en détaillant la séquence des actions concrètes à réaliser. Elles se présentent sous un format de fiches A4 plus facile à utiliser sur le terrain qu'un long document

Chaque partie peut se lire indépendamment avec une organisation identique qui comporte un texte, une annexe de fiches techniques et une bibliographie. Ceci pour rassembler les informations sur une thématique dans une seule partie et non pas dispersées dans ce chapitre sur la tâche 2.



PARTIE 1 : Apports des techniques de suivi spécifiques de la piézométrie sur les échanges nappe-rivière

1.1. Rappels théoriques en hydrogéologie

Les deux paramètres principaux qui contrôlent la quantité et le sens des flux dans un milieu poreux sont selon Darcy (1856) la perméabilité (soit la capacité du milieu à laisser passer l'eau) et le gradient hydraulique (soit le différentiel de niveau d'eau qui va permettre la mise en mouvement de l'eau). Les processus qui conditionnent les échanges nappe-rivière sont donc dépendants des propriétés hydrogéologiques du milieu et des conditions géomorphologiques qui fixent les conditions limites (gradients hydrauliques maximaux).

1.1.1. Paramètres contrôlant les échanges nappe-rivière

Les gradients de niveau de nappe

- **Surface du toit de la nappe**

La surface du toit de la nappe (ou surface piézométrique) constitue la limite entre la zone saturée (nappe) et la zone non saturée, située juste en dessous de la surface du sol. A l'échelle d'un bassin versant et pour les conditions climatiques rencontrées en Bretagne, le toit de la nappe suit globalement les variations du relief. Dans le cas le plus général et en supposant un milieu isotrope, le sens des écoulements souterrains suit plus ou moins la pente topographique, des points les plus hauts vers les points les plus bas. Ainsi, les niveaux de nappe les plus hauts se trouvent au sommet des versants et les niveaux bas au niveau des vallées et des rivières. La topographie et la surface du toit de la nappe ne sont pas strictement parallèles. Généralement lorsque le toit de la nappe intercepte la topographie, l'eau de la nappe suinte en surface pour former des zones sources de tête de bassin versant, des zones humides de bas-fond ou des échanges avec les cours d'eau adjacents. La représentation du toit de la nappe est similaire à celle de la topographie (Figure 1). Les courbes de niveaux étant remplacées par des courbes de mêmes niveaux du toit de la nappe ou piézométriques (isopièzes), qui ont été mesurés en différents points. L'ensemble des isopièzes constitue la carte piézométrique. L'écart de niveau entre deux isopièzes est fixé par l'application numérique qui calcul les valeurs interpolées entre les différents points mesurés.

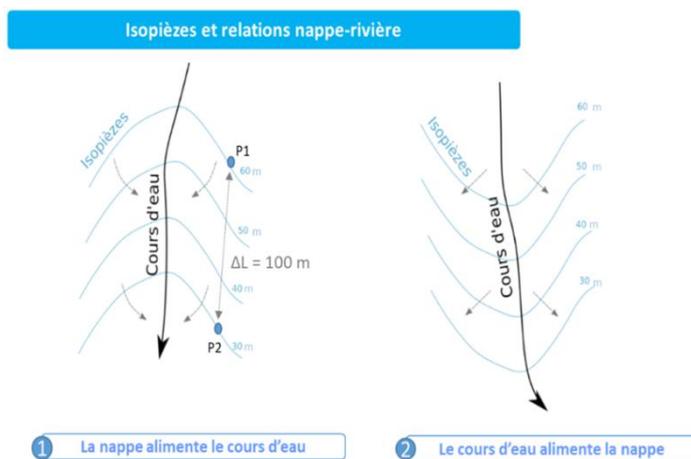


Figure 1 : Sens des échanges nappe-rivière selon la configuration des isopièzes

Comme une carte topographique, la carte piézométrique permet de visualiser les variations de niveaux et donc les sens d'écoulement. Pour une même perméabilité, plus les isopièzes sont rapprochées, plus la pente du toit de la nappe est importante, plus les flux d'eau sont importants. Sur une carte piézométrique, il est possible de lire le sens des interactions nappe-rivière selon que l'on se trouve sur une « crête » ou un « talweg » piézométrique.

- **Gradient hydraulique**

Le gradient hydraulique (ou pente hydraulique) représente le moteur de l'écoulement. C'est le différentiel de charge (ou différentiel de niveaux) entre deux points sur une même ligne de courant rapporté à la distance séparant les deux points. Autrement dit, le gradient hydraulique correspond à la pente de la surface piézométrique « i », égale à « $\Delta H/\Delta L$ », avec ΔH la différence de niveau d'eau entre les deux points et ΔL la longueur séparant les deux points.

On peut calculer le gradient hydraulique à partir des isopièzes. Il équivaut à la différence de niveau entre 2 isopièzes, divisée par la distance les séparant, soit en se référant à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** :

$$i_{(P1-P2)} = \frac{H_{P1} - H_{P2}}{\Delta L} = \frac{60 - 30}{1000} = 0.03 = 3\%$$

- **Obtention des hauteurs de toit de nappe ou niveaux piézométriques**

Par définition, le niveau piézométrique, ou niveau de nappe, est l'altitude du toit de la nappe. En pratique, il est déduit à partir de la mesure de la profondeur de la nappe dans un piézomètre ou un puits. Ainsi, afin d'obtenir le niveau piézométrique, exprimé en mNGF (Nivellement Général de la France), c'est-à-dire par rapport au niveau de la mer, considéré comme niveau zéro, ce niveau piézométrique ou altitude du toit de la nappe se calcule de la manière suivante (Figure 2):

$$\text{Niveau piézométrique (mNGF)} = \text{Altitude à la base du piézomètre (mNGF)} - \text{Profondeur du toit de la nappe (m)}$$

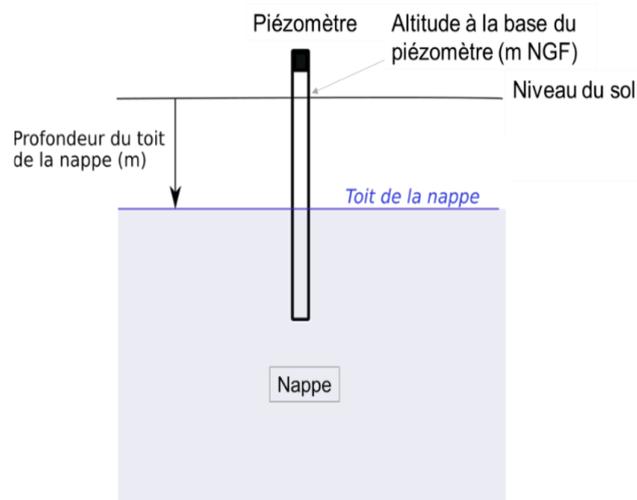


Figure 2 : Variables utilisées pour le calcul d'un niveau piézométrique

Ainsi, il est nécessaire de connaître l'altitude des points de mesures afin de pouvoir calculer les niveaux piézométriques. Dans des contextes où la pente topographique est faible, la précision des mesures d'altitudes piézométriques doit être centimétrique. Des techniques de mesure de hauteurs relatives précises doivent donc être utilisées. On repèrera un point avec ce degré de précision, visible depuis au moins un des piézomètres, puis on pourra faire du nivellement relatif par rapport à ce point. Pour le calcul des distances entre les piézomètres, la précision des mesures requise dépend de la distance à mesurer. Par exemple, si l'on souhaite une précision relative de 1%, il faudra une technique de mesure des distances précise à 10 cm (mètre ruban) ou 1 m (GPS) si les piézomètres sont respectivement distants de 10 m et 100 m.



Propriétés hydrauliques : porosité et perméabilité

A l'échelle microscopique, toutes les roches du sous-sol comprennent des interstices entre les grains solides appelés pores, susceptibles d'emmagasiner ou de libérer une certaine quantité d'eau. La porosité représente la fraction ou le pourcentage du volume des interstices présents dans la roche par rapport au volume de roche. Elle dépend de la taille des pores (elle-même en grande partie fonction de la taille des grains solides), de l'agencement des grains et de leur distribution granulométrique. La porosité est plus importante pour des grains bien triés (distribution granulométrique étroite) que pour des grains mal triés (distribution granulométrique étendue sur plusieurs ordres de grandeur de tailles). La porosité, qui permet de décrire la capacité d'emmagasinement des roches, varie de plusieurs dizaines de pourcent pour des roches meubles, tels que des sables ou des argiles, à moins d'un pourcent pour des roches ignées ayant été formées à quelques kilomètres de profondeur, comme un granite ou un gabbro. Les ressources en eau stockées dans le sous-sol sont potentiellement très importantes. Un sable ayant une porosité de 10 à 20% permet d'emmagasiner 100 à 200 litres d'eau par m³,

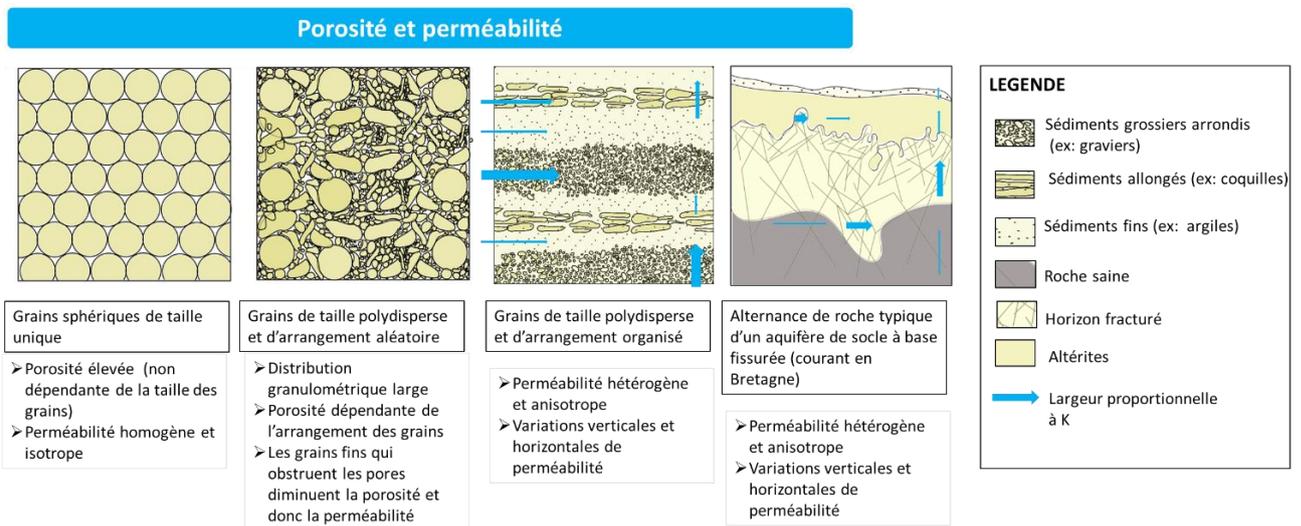


Figure 3 : Porosité et perméabilité dans différents contextes aquifères. Notions d'hétérogénéité spatiale de la porosité et de la perméabilité.

La perméabilité ou conductivité hydraulique (K) mesure la capacité d'une roche à laisser traverser l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique. Une roche poreuse sera perméable si ses pores sont efficacement reliés entre eux. La perméabilité est ainsi une propriété qui intègre les effets d'arrangement et de distribution de tailles et de formes des pores mais aussi de connectivité des pores entre eux. Elle s'exprime en m/s. Elle est généralement comprise entre 10^{-12} m/s, dans le cas d'argiles très peu perméables et 10^{-1} m/s, qui représente une valeur extrême de perméabilité pouvant être rencontrée dans le cas de graviers grossiers très perméables. En fonction du type d'aquifère (fracturé ou roches granulaires), de la superposition des couches rocheuses et de l'agencement des grains, la perméabilité peut varier verticalement mais aussi horizontalement.

Pour les roches ou les sédiments, la capacité à transmettre l'eau (ou perméabilité), dépend en partie de la porosité, même s'il reste difficile d'établir des lois physiques représentatives entre perméabilité et porosité. Toutefois, certains sédiments, tels que des argiles, sont connus pour avoir des porosités importantes, mais une très faible perméabilité. Inversement, un granite fracturé aura une faible porosité, mais pourra avoir une perméabilité non négligeable si les fractures sont ouvertes et connectées entre elles. Ces différents exemples montrent les relations complexes et non univoque qu'il peut y avoir entre porosité et perméabilité (Figure 3).



On peut différencier la capacité des corps rocheux à constituer des aquifères en fonction de leur perméabilité. Les roches à perméabilité élevée constituent ainsi de très bons aquifères potentiels, en permettant aisément l'infiltration, l'emmagasinement et la circulation des eaux souterraines des roches, mais aussi leur exploitation à travers des captages. Les matériaux comme les sables, les graviers, les calcaires karstifiés et les grès constituent en général de très bons réservoirs.

Au contraire, on appelle un aquiclude un corps rocheux de faible perméabilité, éventuellement capable d'emmagasiner une certaine quantité d'eau (qui peut être non négligeable à échelle régionale) mais dans lequel l'eau circule avec beaucoup de difficulté, et dont il est quasi-impossible de capter l'eau et donc d'exploiter les ressources. Dans les bassins sédimentaires qui sont caractérisés par la superposition de couches sédimentaires d'âge et de propriétés très différents, on distingue ainsi les réservoirs perméables susceptibles de constituer de très bons aquifères, des couches imperméables qui vont plutôt constituer les limites inférieures et supérieures de ces aquifères.

Il est ainsi fréquent de rencontrer en profondeur de bons réservoirs qui reposent sur une ou plusieurs couches sédimentaires imperméables, mais qui sont également surmontés d'un aquiclude. Dans ce cas-là, correspondant au cas d'un aquifère entre deux couches peu ou pas perméables, on parle d'aquifère confiné ou captif si le niveau piézométrique est supérieur au toit de la nappe (ici la limite supérieure de la couche perméable). A l'inverse, lorsque l'aquifère ou le réservoir n'est pas surmonté par une couche peu ou pas perméable, on parle d'aquifère à nappe libre. Le toit de la nappe se trouve alors au sein du réservoir (et non au-dessus) et est constitué par la surface piézométrique (Figure 4), qui est surmontée par une zone non-saturée.

Les nappes libres constituent le plus souvent la première nappe rencontrée dans le sous-sol, alors que les nappes captives se trouvent en général plus en profondeur. Même si ce guide ne traite pas d'exemple issu de bassins sédimentaires, cette distinction entre nappe libre et nappe captive est importante car elle témoigne d'une plus ou moins bonne connexion entre le réservoir et le cycle de l'eau superficiel en surface. Ainsi, les aquifères à nappe libre bénéficient en général d'une bonne recharge liée à l'infiltration des eaux de surface, mais sont aussi, pour la même raison, très vulnérables à d'éventuelles pollutions de surface. A l'inverse, les aquifères à nappe captive sont isolés de la surface par une couche peu ou pas perméable qui limite fortement la recharge, mais qui protège aussi le réservoir d'éventuelles pollutions de surface.

D'autres différences existent entre aquifère libre ou captif, mais celles-ci ne seront pas détaillées dans ce guide. On rappellera cependant qu'une caractérisation hydrogéologique complète d'un site nécessite de s'assurer au mieux de la géométrie des corps solides souterrains et de l'existence ou non d'une couche imperméable. La présence ou non d'une couche imperméable entre la nappe et la surface du sol ou la rivière va en effet limiter les interactions entre la nappe et les autres réservoirs hydrologiques. C'est donc une condition limite importante à prendre en compte dans les échanges nappe-rivière.

- **Perméabilité dans les échanges nappe-rivière**

La perméabilité représente la facilité pour l'eau à s'écouler dans un matériau. Elle est un paramètre déterminant dans les échanges nappe-rivière.

Loi de Darcy (1856)

$$Q = -K \times A \times \frac{\Delta H}{\Delta L} = -K \times A \times i$$

Où : Q = Débit en m³/s

K = Perméabilité ou conductivité hydraulique

La perméabilité est définie en tant que grandeur à travers l'équation de Darcy (1856) qui permet de calculer le débit en m³ s'écoulant à travers une surface A perpendiculaire à l'écoulement, en fonction du gradient hydraulique i , et de la conductivité hydraulique ou perméabilité K .

Application de la Loi de Darcy à travers une section d'aquifère

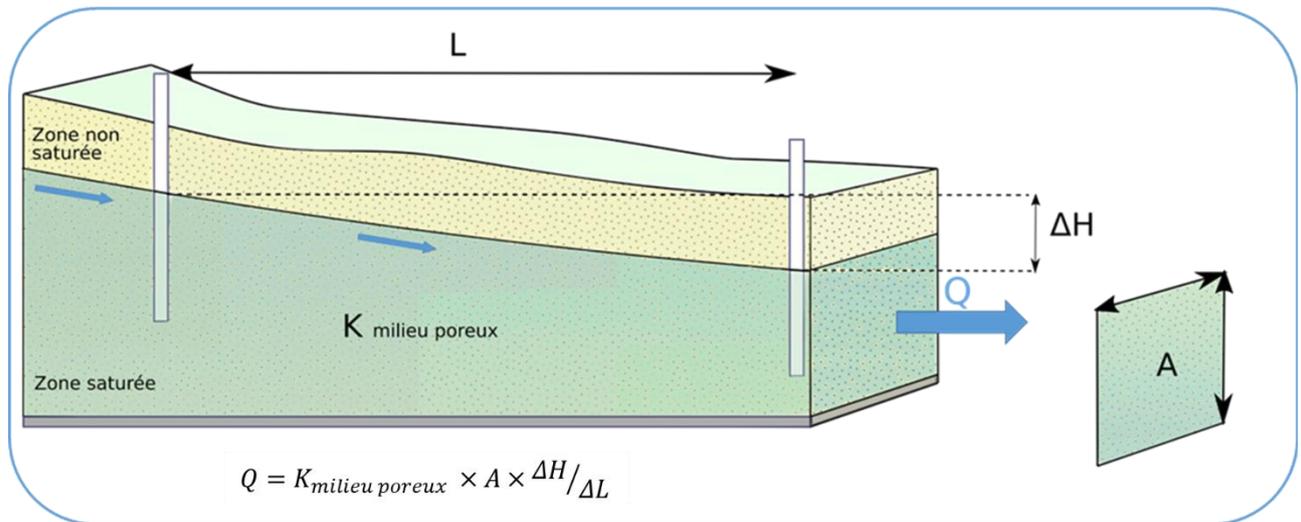


Figure 4 : Coupe schématique d'un aquifère libre pour le calcul de débit selon la loi de Darcy (1856)

Plus la perméabilité des sédiments à l'interface entre la rivière et la nappe est élevée, plus les flux peuvent être importants. La loi de Darcy (1856) a ses limites, car il s'agit d'une loi expérimentale qui n'est plus valable pour les très fortes ou très faibles valeurs de perméabilité.



Attention aux erreurs ! Comme l'équation de Darcy est une multiplication entre les divers facteurs, une erreur sur un des paramètres va se répercuter sur la valeur finale.

Par exemple, sur un piézomètre de nos sites d'étude, deux mesures de perméabilité ont été réalisées et ont conduit aux résultats suivants :

$$K1 = 9.6 \cdot 10^{-7} \text{ m/s et } K2 = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s.}$$

En supposant un gradient hydraulique $i = 0.001$ et une aire $A = 1 \text{ m}^2$, cela conduit à une estimation du débit d'écoulement :

$$Q1 = K1 \cdot i \cdot A = 0.0035 \text{ l/h et } Q2 = K2 \cdot i \cdot A = 0.0076 \text{ l/h.}$$

Le débit varie du simple au double en fonction de la perméabilité choisie pour le calcul. De telles erreurs sont fréquentes compte-tenu de la gamme de variation de la perméabilité dans les milieux naturels. Il est donc important d'évaluer l'erreur associées aux mesures de perméabilité et à tout calcul du débit par cette méthode.

- **Estimation de la perméabilité : le carottage ou relevé de log/ lithologie**

L'étude de la lithologie vise à déterminer la géométrie des corps solides souterrains. Ainsi, lorsque l'on souhaite mettre en place un suivi piézométriques, les premières questions à se poser sont les suivantes :

- Combien d'aquifères sont présents dans la zone étudiée ?
- Existe-il des couches de sédiments peu perméables capables de justifier la présence d'une nappe confinée ?
- S'il existe une couche peu perméable, jusqu'à quelle profondeur trouve-t-on l'aquifère libre et à partir de quelle profondeur se trouve l'aquifère confiné ?
- La distribution des grains est-elle homogène ?
- Quel est le type de sol ? Quels sont les matériaux présents et quelle est la gamme de perméabilité associée ?

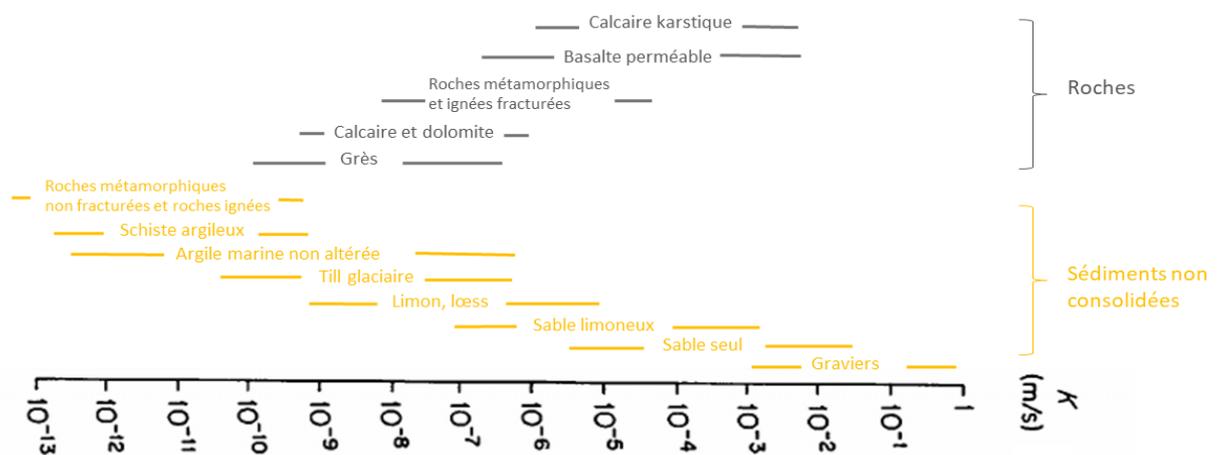


Figure 5 : Echelle des valeurs de conductivités hydrauliques en m/s en fonction du type de sédiment ou de roche, modifié d'après Freeze and Cherry, 1975.



La réalisation de carottes de sédiments sur un ou plusieurs mètres de profondeur, à l'aide d'une tarière manuelle, permet de caractériser spatialement les différents types de lithologie de surface et la manière dont sont superposées verticalement les roches présentes. Sur les carottes prélevées, on peut voir quels matériaux sont présents et à quelle profondeur. En fonction de la nature des roches, on peut estimer grossièrement une valeur de perméabilité correspondante (Figure 5), et supposer la présence de plusieurs aquifères si des couches très peu perméables sont identifiées.

Les informations collectées sont primordiales pour décider comment installer le réseau de piézomètres. En effet, à partir de ces données, on pourra déterminer la profondeur des piézomètres à construire, la position et la taille des crépines, ou encore l'espacement entre les différents piézomètres du réseau.

Une fois la carotte de sédiments retirée, plusieurs options s'offrent à vous à partir du trou creusé :

- 1) *Installer un piézomètre*
- 2) *Réaliser une version simplifiée de mesure de perméabilité (test hydraulique ou slug test, voir ci-dessous). Si après l'ajout d'un volume d'eau, le niveau d'eau dans le piézomètre revient au niveau initial en quelques minutes, alors la perméabilité est élevée (10^{-4} à 10^{-2} m/s). Si le niveau d'eau ne revient à son état initial qu'après plusieurs heures/jour, alors la perméabilité est faible (10^{-6} à 10^{-8} m/s).*
- 3) *Reboucher le trou avec la carotte de sédiment prélevée*

- **Méthode du « test hydraulique » : mesure de perméabilité**

Pour estimer la valeur de la perméabilité ou de conductivité hydraulique du milieu, il est nécessaire en général de réaliser des mesures in situ dans des piézomètres. Une méthode de mesure simple et bien adaptée pour des milieux semi-perméables et des mini-piezomètres est celle du « test hydraulique » ou « slug test » en anglais. Son principe est de suivre les variations du niveau d'eau dans le temps après une variation brusque de niveau d'eau, par exemple après l'injection rapide d'un volume (tube plein ou volume d'eau ajoutée). Cette méthode permet l'obtention de valeurs de perméabilités très locales (dans un rayon proche autour du piézomètre). La mesure de perméabilité et d'interprétation des données à partir de la méthode de Bouwer and Rice (1976) sont décrites dans l'Annexe 2, Fiche technique n°2 : « Test hydraulique »

1.1.2. Définition des échanges nappe-rivière

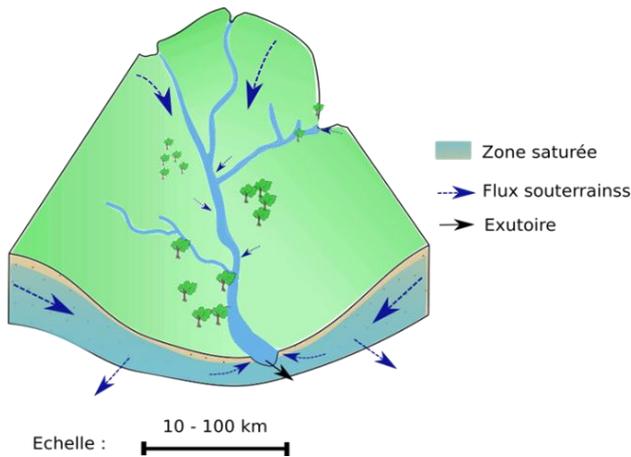
Typologie des échanges nappe-rivière

- **L'échelle du Bassin – versant**

Un bassin versant est organisé en un système de réservoirs interconnectés : nappe libre, nappe profonde, rivières, lacs, zones humides. L'eau s'infiltré et transite dans le bassin versant en empruntant diverses voies d'écoulement, jusqu'à atteindre un exutoire, soit un point de sortie du système souterrain, soit en général une rivière ou un plan d'eau (Figure 6).



Alimentation des eaux de surface par les eaux souterraines



A l'échelle des bassins versants Bretons (1 km - 10 000 km) les cours d'eau et autres réservoirs superficiels sont donc majoritairement alimentés par les eaux souterraines. L'altitude du toit de la nappe est plus élevée dans les versants que dans le fond de vallée. Les flux d'eau sont donc orientés des versants vers les fonds de vallée, et les rivières drainent généralement l'eau des aquifères du bassin.

Au sein d'un même bassin versant, les temps de résidence des masses d'eau peuvent être variables, en fonction du réservoir aquifère traversé, du stock d'eau, de la recharge mais aussi de la profondeur de circulation de l'eau. Les différentes voies ou chemins

Figure 6 : Vision globale des flux souterrains dans un bassin versant.

d'écoulement sont appelées « lignes d'écoulement ». Selon la voie empruntée, l'eau souterraine a des caractéristiques physico-chimiques variables. En général, les nappes de surface sont peu minéralisées et plus variables dans le temps. Au contraire, les nappes plus profondes sont plus minéralisées mais leur composition chimique est plus stable dans le temps (Figure 7).

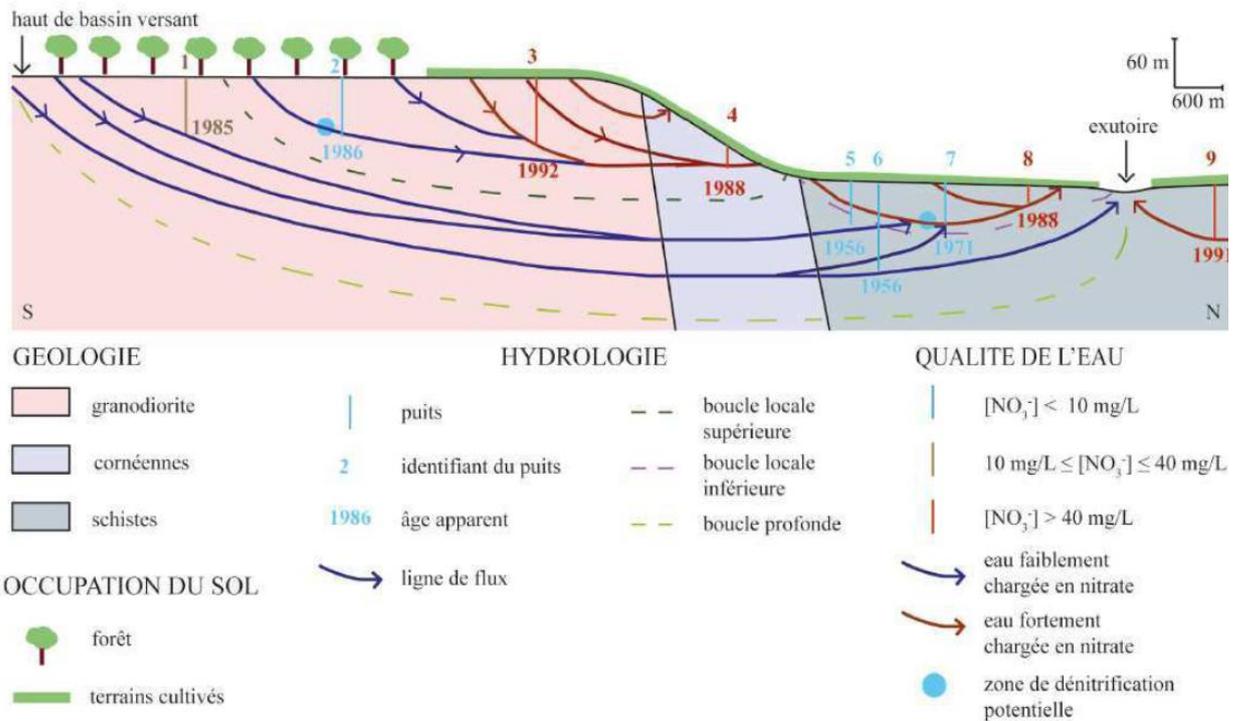


Figure 7 : Temps de résidence et lignes d'écoulement de l'eau souterraine dans le bassin versant de Pleine-Fougères. Virginie Vergnaud-Ayraud et al. (2015).



- **L'échelle de la vallée – la plaine alluviale**

A l'échelle d'une vallée (100 m -1 km), le sens de échanges nappe-rivière peut varier localement selon 3 types d'interactions entre la nappe et le cours d'eau (Figure 8). En Bretagne, le cas n°1 est le cas le plus général : la nappe alimente le cours d'eau à l'échelle du bassin versant et de la vallée. Comme on le verra par la suite, le cas n°2 peut être observé localement ou temporairement le long d'un cours d'eau en Bretagne, mais il n'est pas caractéristique du climat océanique tempéré observé en Bretagne. Le cas n°3 suppose une imperméabilisation des berges suite à des dépôts imperméables

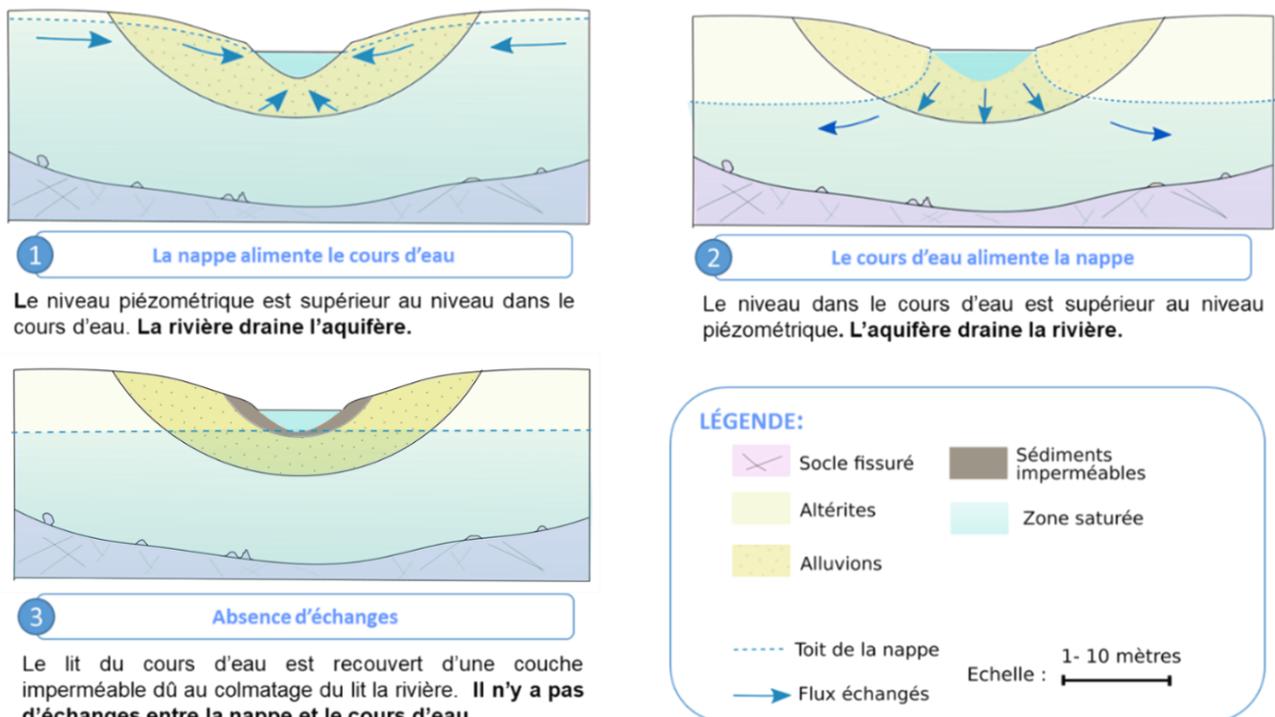


Figure 8 : Schémas descriptifs des différentes typologies des échanges nappe-rivière à l'échelle d'un bas-fond de vallée

Variations spatiales et temporelles des échanges nappe-rivière

Le type de relation entre la nappe et le cours d'eau peut varier dans le temps et dans l'espace.

- **Variations saisonnières**

Ces variations peuvent être saisonnières, c'est-à-dire que pour une même portion de rivière, au long de l'année, le type d'échange entre la nappe et la rivière varie. Un cours d'eau peut drainer la nappe en hiver, et inversement en été.

- **Inversion des flux en crue**

Le sens des échanges peut aussi varier sur des périodes plus courtes, par exemple lors d'un épisode de crue. Si la quantité de précipitation est assez importante, le niveau d'eau dans



le cours d'eau peut monter rapidement de manière significative, et passer temporairement au-dessus du niveau d'eau dans la nappe (Figure 9). Dans ce cas, avant la crue, la nappe alimente le cours d'eau puis, durant une courte période de temps, le sens des échanges s'inverse et la rivière alimente la nappe. L'eau est stockée temporairement dans les sédiments de la plaine alluviale et retournera dans le cours d'eau, quand le niveau de celui-ci sera revenu à son point initial. A noter que pour le contexte breton, ce processus de recharge de la nappe est très partiel dans le temps et l'espace, et négligeable si on le compare à la recharge provenant de versants pendant une année hydrologique.

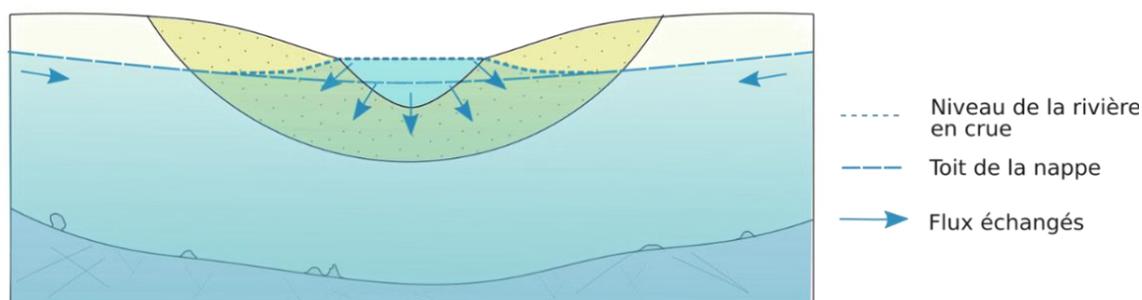


Figure 9 : Schéma descriptif de la variation locale des échanges nappe-rivière lors d'un évènement de crue.

Sur le site de restauration du ruisseau du Côt-Malville à Ploërmel, étudié dans le cadre du projet BERCEAU, sur l'année hydrologique 2019-2020 (du 1 octobre 2019 au 30 septembre 2020), la proportion de flux depuis la rivière vers la nappe à l'échelle du bas-fond représente moins de 10% des échanges totaux entre la nappe et la rivière.

- **Variations dans l'espace**

Les échanges nappe-rivière varient aussi dans l'espace. Par exemple, plusieurs des configurations schématisées ci-dessus peuvent avoir lieu au sein d'un même cours d'eau, de par la variabilité de la géomorphologie du cours d'eau : un apport d'eau de la nappe vers le cours d'eau à l'amont, puis une perte de la rivière vers la nappe à l'aval. Un site d'étude, où ce type de configuration a été démontrée, est décrit dans les pages 37 à 39 du « Guide technique - Interactions nappe-rivière : des outils pour comprendre et mesurer les échanges » de l'AFB (Paran, Frédéric, et al., 2017).

Cas particulier : les zones humides

Les zones humides de Bretagne sont très majoritairement alimentées par les eaux souterraines. Dans le cas le plus fréquent, les zones humides sont situées dans le bas-fond des vallées. Les apports d'eau de nappe proviennent des versants (apports latéraux) et de la nappe sous-jacente (apports verticaux). L'existence d'une zone humide dépend donc de la profondeur du toit de la nappe et de la dynamique de celle-ci. Quand le niveau du toit de la nappe est situé en dessous d'une certaine profondeur, la zone humide n'est plus alimentée de manière continue et n'est donc plus pérenne.

Par définition, un milieu peut être caractérisé de zone humide quand il est habituellement inondé ou gorgé d'eau douce, c'est-à-dire quand il est saturé en eau. Cela se traduit par la présence de végétation dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année. Il reste possible de caractériser une zone humide à partir des traits d'hydromorphismes présents dans le sol (voir note technique ci-contre).



Ces éléments de caractérisation ont montré leurs limites. Par exemple, en absence de végétation spontanée, en se référant donc au critère pédologique, on peut conclure sur la présence d'une zone humide en condition de présence de traits hydromorphiques dans les premiers 50 cm du sol. Or, ces traits d'hydromorphismes peuvent être anciens, et ne sont pas suffisants pour conclure sur l'existence ou la pérennité d'une zone humide.

L'ensemble des critères qui permettent la caractérisation de zone humide est finalement dépendant de la nappe. En effet, la végétation hygrophile n'apparaît qu'en cas d'engorgement prolongé du sol, et il en est de même pour l'hydromorphisme. L'existence de zone humide est très dépendante de la profondeur du toit de la nappe et de la dynamique de celle-ci. Il est alors légitime de privilégier un suivi piézométrique pour caractériser une zone humide, notamment dans un contexte de changement climatique. Cet aspect est développé dans la partie 2 du document, p 39.

La zone hyporhéique

- **Définition**

Les échanges entre nappe et rivière ont généralement lieu à l'interface entre la nappe et le cours d'eau dans une zone appelée zone hyporhéique. Celle-ci est définie comme l'ensemble des sédiments saturés en eau situés juste au-dessous et sur les côtés d'une rivière, qui contiennent une certaine proportion d'eau de surface (White, 1993). En d'autres termes, la zone hyporhéique correspond à une zone de mélange entre les eaux de surface, venant de la rivière, et les eaux souterraines, venant de la nappe. L'extension de la zone hyporhéique autour des cours d'eau est très variable selon les cours d'eau. Elle dépend de la perméabilité du substrat géologique et des alluvions, mais aussi de la morphologie du cours d'eau, ou encore de l'irrégularité du fond de la rivière (Figure 10). Rappelons que des flux d'eau sont engendrés dans un milieu perméable s'il est soumis à un gradient hydraulique comme la pente de la ligne d'eau d'un cours d'eau ou celui du toit d'une nappe.

Selon la Note technique du 26 juin 2017 relative à la caractérisation des zones humides, NOR: TREL1711655N):

- Cas 1 : en présence d'une végétation spontanée, une zone humide est caractérisée à la fois si les sols présentent les caractéristiques de telles zones (habituellement inondés ou gorgés d'eau), et si sont présentes, pendant au moins une partie de l'année, des plantes hygrophiles.
- Cas 2 : en l'absence de végétation, liée à des conditions naturelles (par exemple : certaines vasières, etc.) ou anthropiques (par exemple : parcelles labourées, etc.), ou en présence d'une végétation dite « non spontanée », une zone humide est caractérisée par le seul critère pédologique.

A noter que lorsque le critère pédologique ne peut être obtenu, il est possible de se référer au critère piézométrique.

En effet, la réglementation indique que « dans certains contextes particuliers l'excès d'eau prolongée ne se traduit pas par les traits d'hydromorphie habituels facilement reconnaissables. Une expertise des conditions hydrogéomorphologiques (en particulier profondeur maximale du toit de la nappe et durée d'engorgement en eau) doit être réalisée pour **apprécier la saturation prolongée par l'eau dans les cinquante premiers centimètres de sol.**

Source : Arrêté du 24 juin 2008 ; en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement. NOR: DEVO0813942A.

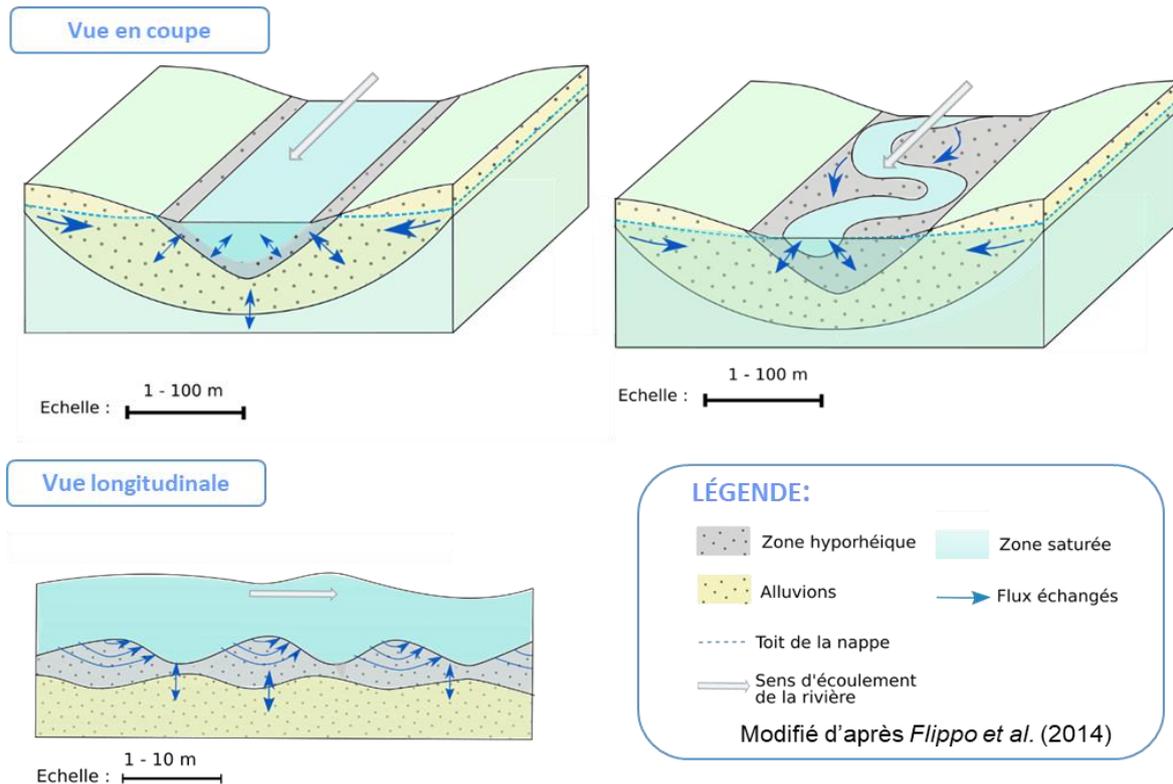


Figure 10 : Schémas descriptifs des différents types de flux possibles au travers de la zone hyporhéique, à différentes échelles. D'après Flippo et al. (2014).

- **Importance de la zone hyporhéique**

De nombreuses réactions se produisent dans la zone de mélange que constitue la zone hyporhéique et sont responsables de changements dans la composition chimique de l'eau de surface, qui est différente de celle de la nappe. La zone hyporhéique peut ainsi avoir un rôle dépurateur et conduire à une meilleure qualité de l'eau à l'aval du cours d'eau. Elle est également le siège d'une activité métabolique importante et de stockage de nutriments. Son rôle est donc non négligeable dans le maintien de la biodiversité et pour le bon fonctionnement des hydrosystèmes.

Les processus au sein de la zone hyporhéique dépendent de l'intensité des flux d'eau et d'éléments ou gaz dissous associés et par là même à la perméabilité du substrat. Du fait de la variabilité de la perméabilité spatiale en fonction de la nature des sédiments, les lignes de flux et l'amplitude des flux sont variables dans l'espace notamment avec la profondeur. La cartographie aux différentes échelles de cette variabilité reste encore un sujet complexe de recherche en développement.

La perméabilité peut évoluer dans le temps selon l'intensité des processus de colmatage ou de décolmatage sur les sédiments ou au sein de la matrice des alluvions. La maîtrise des processus de colmatage induit par l'activité anthropique est un des enjeux de la restauration des cours d'eau. Si l'apport de substrats avec une granulométrie grossière permet d'obtenir une couche sur la surface du lit du cours d'eau avec une perméabilité élevée et donc de satisfaire à une des conditions favorables à la mise en place de flux hyporhéiques oxygénés, cette action n'est pas suffisante si les conditions favorables au colmatage ne sont pas réduites (voir section « Colmatage » ci-dessous).



Impacts anthropiques sur les échanges nappe rivières

Au cours du temps, l'homme a souhaité maîtriser les hydrosystèmes avec du génie civil : canaux, drains, déplacements de cours d'eau, ouvrages régulateurs, imperméabilisation de berges... Toutes ces actions présentent des aspects positifs et pratiques dans la gestion de ressources comme dans les domaines de l'agriculture et de l'urbanisation. Mais ils montrent aujourd'hui leurs limites à cause de leur impact négatif sur le fonctionnement de ces hydrosystèmes.

Certaines activités anthropiques ont un impact direct sur les échanges nappe-rivière, qui peuvent affecter les masses d'eau de manière qualitative et quantitative. Il est aujourd'hui primordial de recenser tous les ouvrages présents sur le site d'étude et d'en tenir compte dans le contexte de la restauration. Nous citons ci-dessous plusieurs exemples d'impacts anthropiques sur les relations nappe-rivière.

- **Drains**

Par définition, un drain est un conduit placé dans un milieu poreux. Il permet un écoulement plus rapide et plus important que le milieu poreux afin d'évacuer l'eau stockée dans la partie superficielle du sous-sol (les drains enterrés agricoles sont un cas de figure particulier ou la perméabilité du drain est infinie). Qu'ils soient enterrés ou à ciel ouvert, ces ouvrages sont très courants notamment sur les parcelles agricoles. Ils visent à drainer les terrains pour permettre leur exploitation en évacuant rapidement l'eau infiltrée dans le sol. Le cycle de l'eau souterrain se trouve alors accéléré avec un rabattement de la hauteur du toit de la nappe autour du drain (Figure 11). Souvent, les eaux ainsi évacuées du versant se déversent directement dans le cours d'eau le plus proche.

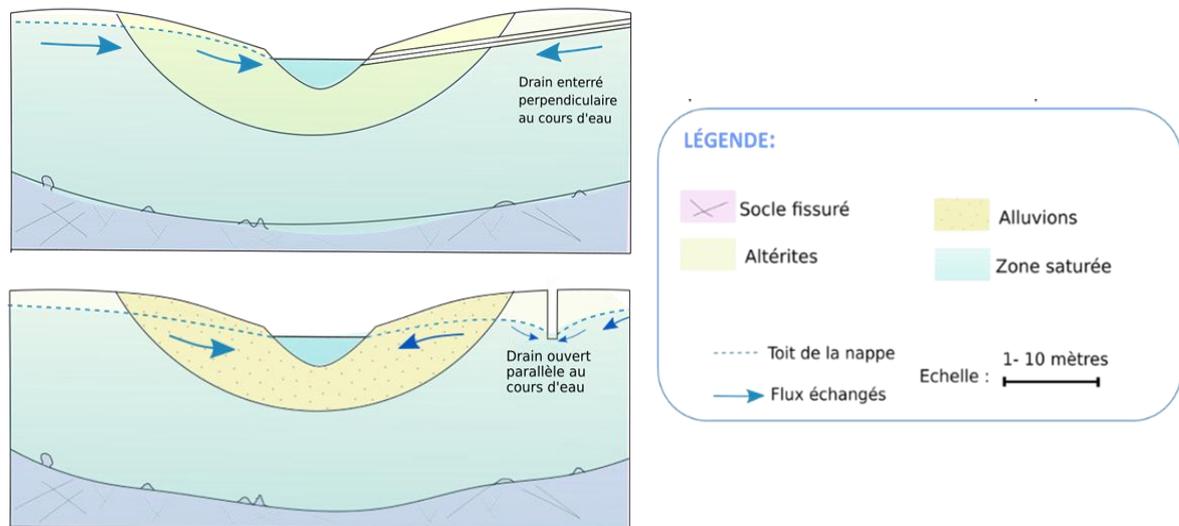


Figure 11 Schémas descriptifs de l'impact des drains sur le toit de la nappe et sur les échanges nappe rivières à l'échelle d'un bas-fond de vallée

Il en découle un impact sur le fonctionnement des hydrosystèmes associés à la nappe, sur la variabilité des flux d'eau dans le cours d'eau mais aussi sur l'extension des zones humides. L'impact le plus évident est la diminution de la capacité de stockage de l'eau dans la partie superficielle du sous-sol, notamment en hiver et au printemps lorsque les terrains étaient préalablement saturés en eau. La diminution de la capacité de stockage entraîne une restitution moindre de l'eau stockée durant les périodes de basses eaux et notamment lors des débits d'étiage. A l'inverse, on observe des montées de crue plus rapide lors des périodes humides où les drains fonctionnent à plein. Selon l'importance du réseau de drains, le débit des cours d'eau et la surface affectée par les drains dans les bassins-versants, on peut s'attendre à des



modifications plus ou moins importantes des chemins d'écoulement et du régime hydrologique des cours d'eau. Ce phénomène s'accroît d'autant plus que le réseau de drain est dense et profond.

• Pompages

Il est également bien connu et de plus en plus évident à grande échelle que les relations nappe-rivière peuvent aussi être modifiées par le pompage de ressource en eau souterraine. Afin d'assurer le maintien du niveau d'eau et de l'alimentation des forages, les forages d'exploitation sont en effet souvent localisés dans les fonds de vallées, proche des cours d'eau. Les alluvions bordant les cours d'eau sont aussi des lieux privilégiés d'exploitation des eaux souterraines car ils constituent souvent d'excellents réservoirs bien soutenus par la présence du cours d'eau.

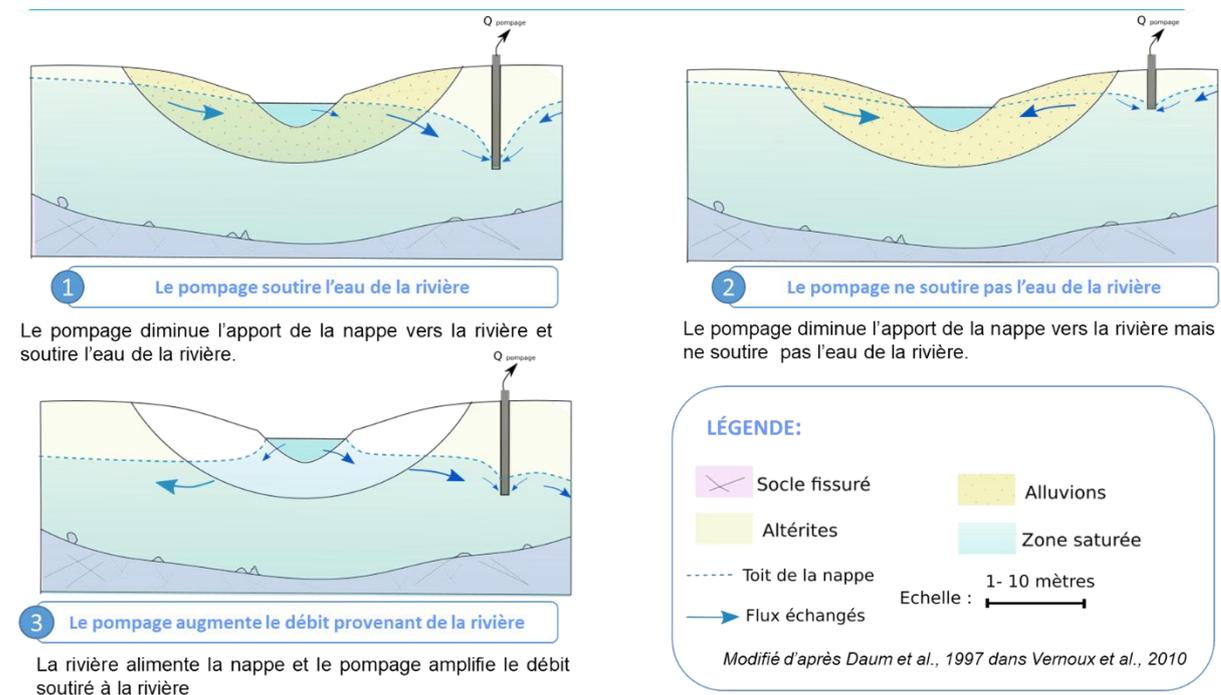


Figure 12 : Schémas descriptifs de l'impact des pompages sur le toit de la nappe et sur les échanges nappe-rivière à l'échelle d'un bas-fond de vallée

En Bretagne, compte tenu de la nature du sous-sol qui ne permet qu'une exploitation limitée des ressources en eau souterraine, les forages d'exploitation sont en général plutôt de faible débit et surtout liés aux besoins agricoles. Malgré tout, l'impact d'un pompage peut conduire à diminuer voire supprimer localement, l'apport de nappe au cours d'eau (Figure 12), ce qui peut entraîner une diminution locale du débit du cours d'eau. Dans le cas extrême d'un petit cours d'eau de faible débit mais d'un pompage conséquent, on peut observer un assèchement local du cours d'eau, et conduire à une sanction législative. Notons également que l'inversion des sens d'écoulement, et l'infiltration d'eau de la rivière vers le pompage peut induire aussi à une dégradation chimique de la qualité de l'eau exploitée selon la qualité de la rivière.

• Colmatage

Le colmatage des berges et du lit des cours d'eau représente l'obstruction des interstices dans l'interface nappe rivière, par le dépôt de sédiments fins ou le développement important d'un biofilm à la surface ou dans les sédiments du lit des cours d'eau. S'il est à un stade avancé, il peut empêcher les flux entre la nappe et la rivière. Et en conséquence limiter le rôle épurateur



de la zone hyporhéique et le maintien du bon état écologique du cours d'eau. La diminution significative de la vitesse de courant, l'augmentation de la concentration en particules fines en suspension et le développement important du biofilm sont trois facteurs qui concourent le plus souvent au colmatage. Un dépôt de particules fines est principalement dû à la présence d'ouvrages de rétention d'eau qui engendre, à l'amont de l'ouvrage, une diminution notable de la vitesse du courant et une sédimentation des matières en suspension. L'augmentation des concentrations en particules fines dans les cours d'eau trouve principalement son origine sur les versants, notamment où l'activité humaine favorise l'érosion des sols (certaines pratiques agricoles, urbanisation) et l'accélération des eaux de ruissellement. Un accroissement excessif du biofilm peut être engendré par une combinaison de facteurs physico-chimiques favorables comme l'augmentation de nutriments.

- **Cours d'eau anthropisé ou déplacé**

L'action de l'homme sur les caractéristiques hydrauliques et spatiales des cours d'eau entraîne des modifications profondes sur les échanges nappe-rivière. Déplacer un cours d'eau pour des raisons urbaines ou agricoles, ou modifier ses caractéristiques structurelles et morphologiques (gabarit, chenalisation, revêtement ou modification des berges, suppression des méandres, endiguement, etc.) modifie quantitativement et qualitativement les échanges entre le cours d'eau et la nappe adjacente. Un cours d'eau surcreusé a les mêmes impacts que les drains précédemment évoqués, en drainant la nappe et en abaissant le toit de la nappe. La chenalisation des cours d'eau avec des sections géométriques et des pentes régulières limite les flux dans la zone hyporhéique. La mise en place de seuils (barrages) augmente le linéaire du cours avec des vitesses d'écoulement faibles et des profondeurs importantes et favorise ainsi le colmatage du lit.

Dans le cadre du projet BERCEAU, deux sites de remise dans le talweg de cours initialement déplacés ont été suivis pour illustrer la dynamique du toit de la nappe de la zone de bas-fond en fonction du positionnement du cours d'eau. L'objectif est avant tout pédagogique en apportant des données concrètes sur la variabilité temporelle des échanges nappe-rivière afin de mieux comprendre le réel impact de ce type d'opération de restauration.

Echanges nappe rivière et recharge granulaire

La recharge granulaire d'un cours d'eau est une pratique appliquée fréquemment dans les opérations de restauration de cours d'eau, dans le but de ré-oxygéner le milieu et recréer un habitat favorable aux organismes et micro-organismes. Elle consiste à rehausser la ligne d'eau d'un cours d'eau par l'apport de sédiments grossiers. Cette modification de la ligne d'eau va avoir des impacts sur les échanges nappe rivière, qui diffèrent en fonction du contexte de saturation du bassin versant. Cependant, elle peut avoir un effet contreproductif sur le maintien d'une ligne d'eau suffisante pour la biodiversité, surtout en période d'étiage.

- ***Echanges nappe-rivière et recharge de la nappe***

Lorsque l'on augmente la hauteur de la ligne d'eau dans la rivière, la condition limite qui contrôle les flux de la nappe vers la rivière (hauteur de l'eau dans le cours d'eau) est alors modifiée. Le sens et la valeur du gradient sont modifiés par la rehausse de la ligne d'eau, en fonction du contexte de saturation du bassin versant.

Lorsque le niveau de la nappe est bas, une rehausse de la ligne d'eau peut induire une inversion des gradients. Cette inversion est limitée dans le temps (la durée pendant laquelle le niveau de nappes est inférieur au niveau dans le cours d'eau) et dans l'espace (zone dans laquelle le niveau de nappe est inférieur à celui du niveau d'eau dans le cours d'eau). Cette inversion locale de gradient engendre des flux de la rivière vers la nappe. On pourra alors observer une rehausse du niveau de la nappe dans la zone où le niveau de la nappe était



inférieur à la nouvelle altitude de la ligne d'eau dans le cours d'eau, jusqu'à ce que les gradients s'inversent de nouveau. Cette augmentation locale du niveau de nappe à proximité du cours d'eau peut participer au maintien des zones humides pendant de courtes périodes, notamment les périodes d'étiage.

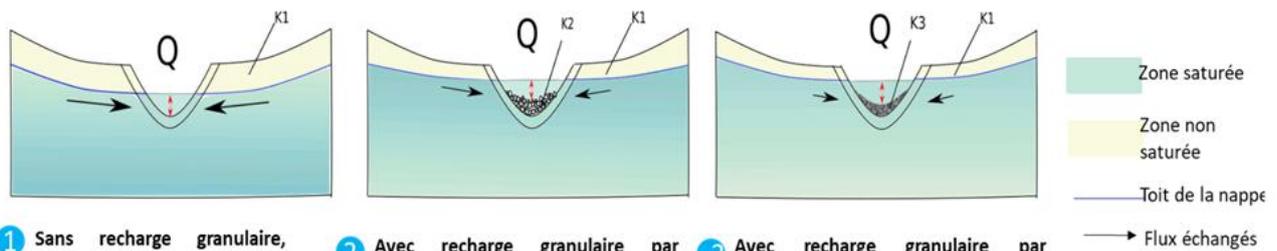
Au contraire, lorsque le niveau de la nappe sur les berges est déjà bien supérieur à celui de la rivière, la rehausse de la ligne d'eau diminue la différence de niveau entre la nappe et le cours d'eau et par là même le gradient hydraulique. Les flux de la nappe vers le cours d'eau diminuent, et la nappe se décharge plus lentement, avec un niveau qui se maintiendra tant que le niveau de la rivière ne diminue pas.

L'idée qu'une rehausse de la ligne d'eau par recharge granulaire participe à la recharge de la nappe en favorisant un débordement lors des crues est aussi répandue. Cependant, la nappe se recharge principalement par l'apport d'eau sur les versants. L'apport d'eau induit pendant la durée d'une crue est relativement faible par rapport à la quantité d'eau qui tombe sur les versants pour converger ensuite dans la vallée. Pour remonter l'altitude du toit de la nappe dans les fonds de vallée, il faut avant tout éviter de drainer artificiellement les versants.

- **Maintien d'une hauteur d'eau libre en surface**

Lorsque l'on apporte une recharge granulaire sur le lit du cours d'eau, on rehausse le niveau d'eau dans la rivière, proportionnellement au volume et à la porosité de la recharge granulaire. Lorsque le cours d'eau est en eau, l'écoulement se produira à la fois au travers et au-dessus des sédiments grossiers de la recharge granulaire. Les sédiments ajoutés peuvent drainer un débit non négligeable du fait de leur perméabilité le plus souvent importante (10^{-2} - 10^{-4} m/s par exemple). Si le débit est suffisant, une partie du débit passera au-dessus des sédiments avec une hauteur d'eau libre. Dans ce cas (cas n°2 sur la Figure 13), la hauteur d'eau libre sera toujours inférieure à celle observée dans le même cours d'eau sans recharge, pour un débit égal.

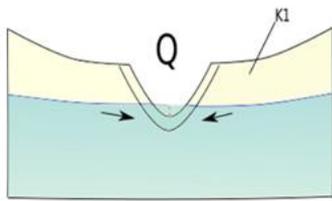
Cependant, si le débit de la rivière n'est pas supérieur au débit maximum que peuvent drainer ces sédiments grossiers, on peut observer une disparition de la ligne d'eau libre (« assèchement » du cours d'eau) notamment en période d'étiage. Il faudra attendre un colmatage du lit pour diminuer la perméabilité du lit par 10 ou par 100. Il est recommandé de réaliser la recharge pendant l'étiage pour s'assurer de ne pas diminuer la ligne d'eau en deçà de la hauteur minimale d'eau libre.



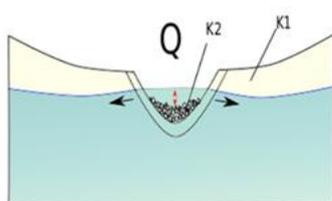
1 Sans recharge granulaire, niveau de nappe haut: la nappe est drainée par le cours d'eau, la hauteur d'eau libre est toujours supérieure à celle d'un cours d'eau avec recharge, pour le même débit.

2 Avec recharge granulaire par sédiments grossiers (K élevé): La ligne d'eau est plus haute que dans le cas n°1. Cependant, une partie du débit de la rivière transite par les sédiments grossiers de la recharge granulaire. La hauteur d'eau libre est inférieure au cas n°1.
Le niveau de la nappe est rehaussé par rapport au cas n°1, aux abords du cours d'eau. La décharge de la nappe est réduite.

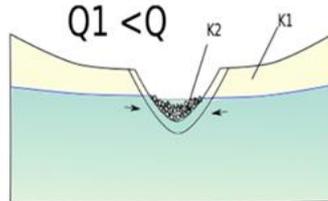
3 Avec recharge granulaire par sédiments fins (K faible): Les sédiments fins de faible perméabilité permettent de relever la ligne d'eau. La hauteur d'eau libre h3 est supérieure à celle du cas n°2 et inférieure au cas n°1.
Le niveau de la nappe est rehaussé par rapport au cas n°1 et 2, aux abords du cours d'eau. La décharge de la nappe est réduite.



4 Sans recharge granulaire, niveau de nappe bas (étiage): la nappe est drainée par le cours d'eau, la hauteur d'eau libre est faible de par la période.



5 Avec recharge granulaire par sédiments grossiers (K élevé): La ligne d'eau est plus haute que dans le cas n°1. La hauteur d'eau libre est inférieure au cas n°1.
Le niveau de la rivière passe au dessus du niveau de la nappe: la rivière alimente localement la nappe.



6 Avec recharge granulaire par sédiments grossiers (K élevé), $Q1 < Q$. Le contexte est le même que pour le cas n°5 mais le débit est plus faible. La capacité de drainage des sédiments est supérieure au débit du cours d'eau. La hauteur d'eau libre est quasi nulle, et le maintien du biotope menacé.

Figure 13 : Impact de la perméabilité de la recharge granulaire sur la hauteur d'eau libre et sur les échanges nappe-rivière



Ce qu'il faut retenir ...

- ⇒ Les principales grandeurs physiques qui contrôlent les interactions nappe rivière sont : **les gradients hydrauliques de nappe et la conductivité hydraulique des substrats.**
- ⇒ Les échanges entre la nappe et la rivière varient au cours de l'année **en fonction de l'état de saturation du bassin versant.**
- ⇒ La dynamique des **zones humides** est principalement **contrôlée par les variations de hauteur de nappe.**
- ⇒ Les **modifications sur les cours d'eau** peuvent **modifier le sens, l'amplitude et la fréquence des échanges nappe-rivière.**
- ⇒ **Toute implantation** sur un versant ou dans le fond de la vallée **de drains** (enterrés /à ciel ouvert) **ou de pompage accélère le transfert de l'eau en aval et diminue la capacité de stockage dans la nappe.**
- ⇒ **Le maintien d'un débit d'étiage et de la zone humide** connexe au cours d'eau **est induit principalement par le maintien de l'alimentation de la nappe** par les apports amonts et ceux des versants.



1.2. Méthodologie pratique : la piézométrie comme outil pour le suivi des opérations de restauration

La mise en place d'un protocole de suivi piézométrique lors d'une opération de restauration de cours d'eau doit englober de nombreux éléments. Dans cette partie, une méthodologie est proposée afin de faciliter la mise en œuvre de ce type de suivi par les acteurs et décisionnaires concernés. Dans cette partie du document, nous présentons des tableaux et organigrammes qui font la synthèse des paramètres à considérer lors d'opération de restauration, et peuvent servir de document de base au moment de planifier un suivi. Des fiches méthodes complémentaires sont insérées en annexe du document pour détailler certaines techniques ou outils.

Quel est l'objectif de la restauration ? Exemples : *Maintien du débit d'étiage, maintien d'une zone humide, amélioration de la qualité des masses d'eau, préservation de la biodiversité*

Quel est l'objectif du suivi piézométrique ? Exemples : *Définir les sens des échanges nappe-rivière, quantification des échanges, suivi du niveau de la nappe, suivi de la qualité des masses d'eau*

Sur quelle échelle spatiale est défini le projet ? Exemples : *dizaine de mètres, centaines de mètres (vallée), kilométrique (bassin versant)*

Sur combien de temps est défini le projet ? Exemples : *(< 1 an), moyen terme (2-3 ans), long terme (3 à 10 ans), très long terme (> 10 ans, par exemple les études reliées au changement climatique)*

Quels sont les moyens techniques et financiers disponibles ?

Quelles sont les contraintes et impératifs imposés ? Exemples : *Date limite, contraintes budgétaires*

1.2.1. Opérations de restauration de cours d'eau : bien définir les objectifs

Avant la mise en place de tout protocole de suivi, il est primordial de bien définir et comprendre les objectifs suivis, et de connaître les moyens dont on dispose pour l'atteindre.

En fonction des objectifs définis, on adapte le réseau de suivi : le nombre d'installations, le nombre de paramètres mesurés, la fréquence de mesure, ou encore la précision des instruments. L'étude des échanges nappe-rivière peut faire partie d'un projet nécessitant une analyse spécifique, haut de détail et de précision. Au contraire, dans d'autres cas, l'approche peut être beaucoup plus simple et peut être réalisée à partir d'un plus petit nombre de données avec un niveau de technicité plus accessible. Ces deux approches sont décrites ci-dessous.

1.2.2. Cas d'une restauration de cours d'eau : approche simplifiée

Dans beaucoup de cas, pour des raisons de moyens, économiques ou techniques ou tout simplement si une analyse poussée n'est pas souhaitée, ou n'est pas nécessaire, il est possible de se contenter de l'installation d'un faible nombre de piézomètres, et de la mesure de quelques paramètres seulement.



Résumé des différentes approches en fonction des objectifs poursuivis

- **Maintien du débit d'étiage**

De manière générale, comme il a été vu dans la première partie de ce document, les cours d'eau sont alimentés par l'eau souterraine contenue dans les versants du même bassin versant. En hiver, la proportion d'eau souterraine peut être plus faible compte tenu des autres apports qui lui parviennent, qui sont principalement les écoulements superficiels provenant de l'amont du bassin versant. Pendant les périodes estivales, caractérisées par des faibles débits et de faibles apports provenant de l'amont du réseau hydrographique, la part d'eau souterraine dans le cours d'eau est plus importante. Ceci est d'autant plus vrai pour les petits cours d'eau où un apport souterrain même minime peut être significatif.

Afin d'évaluer le soutien des débits d'étiage par la nappe, il est nécessaire de mesurer le niveau d'eau dans la rivière et de la nappe pour pouvoir suivre leur évolution au cours du temps, avant et après la restauration. Il est recommandé de placer au moins un piézomètre sur un versant, à une distance qui dépendra des paramètres du milieu (ex : perméabilité) afin de pouvoir mesurer le gradient hydraulique et suivre le sens des flux échangés entre la nappe et la rivière. Si les versants ne présentent pas un fonctionnement asymétrique apparent (topographie semblable sur les deux versants, absence d'ouvrage anthropique perturbant les flux), il peut être suffisant de placer un piézomètre sur un seul versant pour avoir une idée du sens des échanges nappe-rivière en ce point. Mais le résultat sera considéré comme « ponctuel » et il est possible que quelques mètres plus loin le système se comporte différemment, surtout si la zone est hétérogène en termes de substrat.

Dans le cas d'une configuration asymétrique, il est préférable de placer des piézomètres sur les deux versants. Plus le nombre de piézomètres est élevé, plus les résultats seront représentatifs de la zone étudiée. Les flux ne peuvent pas être quantifiés à partir de ces mesures uniquement mais l'importance des échanges peut être appréciée.

Du fait de la température assez constante de l'eau souterraine sur l'année, le flux de la nappe vers le cours d'eau joue un rôle de tamponnage thermique, favorisant le maintien de la biodiversité à l'étiage.

- **Maintien ou récupération de zone humide**

Les zones humides ont été très impactées par les modifications anthropiques du territoire, comme le drainage des terres pour l'agriculture, les ouvrages hydrauliques ou l'urbanisation. Aujourd'hui, les fonctions écologiques des zones humides sont reconnues : parmi elles, les fonctions de filtre biochimique (piégeage des matières en suspension, absorption et dégradation des phosphates et nitrates et autres contaminants), régulation des crues (dont écrêtement des débits), soutien des étiages, de réserve de biodiversité, et la liste n'est pas exhaustive. La restauration de zones humides est donc redevenue une priorité.

Afin de suivre la restauration de zones humides, le suivi du niveau du toit de la nappe est intéressant. Une chronique de la profondeur de saturation en eau du sol permet d'établir les fréquences de proximité de la nappe de la surface du sol à l'aide de valeurs statistiquement significatives. Cette approche, pour caractériser les zones humides, est complémentaire des critères biologiques et pédologiques d'hydromorphie recommandés. Ces derniers critères étant intégrateurs dans le temps de l'effet de la saturation en eau sur le biotope et les processus d'oxydo-réduction de la pédogénèse.

Le suivi du niveau de nappe présente l'intérêt d'être « instantané » et précis à l'échelle d'un cycle hydrologique. Avantage important pour mesurer l'impact d'une restauration dont le suivi est bien souvent limité à quelques cycles hydrologiques. Les critères biologiques et pédologiques peuvent avoir une certaine inertie d'évolution dans le temps sur plusieurs cycles



hydrologiques. En revanche, ils permettent d'évaluer directement la biodiversité. Biodiversité qui est la cible principale de la restauration. Les suivis concomitants du niveau de nappe et de la biodiversité des zones humides est d'un intérêt certain pour comprendre le couplage entre les dynamiques de ces deux variables. Développer simultanément ce type de suivis, à l'occasion des opérations de restauration, favoriserait la constitution d'une base de données originales avec des attendus importants sur la compréhension du couplage cycle de l'eau et biotopes

- **Stratégie captage eau potable**

Les extractions d'eau peuvent provoquer des changements dans les gradients hydrauliques et changer le sens des écoulements. Lorsque le puits d'extraction se trouve relativement proche du cours d'eau, il s'agit de contrôler que les eaux de surface ne soient pas captées par le pompage. Les eaux de surface sont en effet généralement plus contaminées que les eaux souterraines,

L'étude des échanges nappe-rivière peut s'appliquer à ce type de problématique. L'acquisition des hauteurs d'eau en nappe et en rivière permet de comparer les gradients hydrauliques en période de pompage, et hors période de pompage. La température ou la qualité chimique de l'eau pompée peuvent également donner des informations sur la provenance de l'eau. Une température ou une qualité de l'eau du pompage différente de celle de l'eau souterraine marque un apport d'eau de surface.

- **Quantification de flux nappe-rivière**

Comme vu dans la section 1, le débit nappe-rivière peut s'estimer à partir de la relation de Darcy. Il faut un minimum de deux points de mesures du niveau d'eau afin de calculer le gradient hydraulique et l'aire de la section mouillée à travers laquelle passe le flux d'eau (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Une valeur de perméabilité est également nécessaire. Elle s'obtient grâce à un ou plusieurs « slugs test » ou « test hydraulique » dans les piézomètres de la portion concernée. Attention, pour estimer le débit, la différence de charge doit être significative. Ce calcul permet d'approximer une valeur de débit, mais qu'il faut considérer avec précaution. L'incertitude sur les paramètres d'entrée comme la perméabilité et/ou l'épaisseur de l'aquifère induit une incertitude qui peut être importante dans l'estimation des débits

- **Les différentes stratégies de suivi de facteurs abiotiques**

Les Figure 14 et Figure 15 récapitulent les variables et l'intérêt de leur suivi selon les objectifs recherchés. La Figure 14 nous informe sur l'importance de chaque paramètre à mesurer en fonction de l'objectif suivi.



OBJECTIF SUIVI	PARAMÈTRES PHYSIQUES (mesure directe)					
	Hauteur d'eau rivière h_r	Hauteur d'eau nappe h_n	Température nappe* T_n	Température rivière T_r	Q rivière Q_r	Perméabilité K
Maintien du débit d'étiage	██████████	██████████	▬▬▬▬▬▬	▬▬▬▬▬▬	▬▬▬▬▬▬	▬▬▬▬▬▬
Maintien de zone humide	▬▬▬▬▬▬	██████████	▬▬▬▬▬▬	▬▬▬▬▬▬	▬▬▬▬▬▬	▬▬▬▬▬▬
Stratégie captage eau potable	██████████	██████████	▬▬▬▬▬▬	▬▬▬▬▬▬	██████████	██████████
Quantification flux nappe-rivière	██████████	██████████	▬▬▬▬▬▬	▬▬▬▬▬▬	▬▬▬▬▬▬	██████████

* Privilégier la mesure de la température de l'eau dans la nappe par l'insertion d'une sonde directement dans les sédiments. Dans un piézomètre le contact avec l'air peut fausser les données.

Nécessaire Facultatif
 Longueur proportionnelle à l'importance du paramètre pour l'objectif considéré

Figure 14 : Importance relative des différents paramètres à prendre en compte lors d'un suivi des échanges nappe-rivière, en fonction de l'objectif suivi

La Figure 15 permet d'évaluer les différents degrés d'information qu'il est possible d'obtenir en fonction du nombre de piézomètres installés sur la zone d'étude, et renvoie aux chapitres ou documents relatifs à chaque type d'information. A noter, que ces tableaux correspondent à des suivis à des échelles de petits bassins versants. Lors d'un suivi piézométrique à large échelle, la zone d'étude peut être composée de plusieurs réservoirs. Dans ce cas, il est nécessaire de mettre en place un ou plusieurs piézomètres dans chaque réservoir, afin de caractériser la différence de comportement entre les deux réservoirs. De même, le suivi longitudinal amont-aval des débits dans la rivière (Q_r) pour les bassins versants importants est une variable nécessaire pour évaluer la décharge de la nappe dans le réseau hydrographique. Le suivi de Q_r est indiqué ici comme peu intéressant car nous nous sommes principalement focalisés sur une problématique de suivi à l'échelle d'un versant ou de bassins versants sources. Les échelles d'observation pour lesquelles les distances de cours d'eau observés sont faibles ne permettent pas de faire des bilans précis des apports de nappe sur les tronçons de cours d'eau suivis.

Dans le cas des cours d'eau restaurés Bretons, l'échelle de l'étude est celle du vallon. A cette échelle, on peut trouver plusieurs réservoirs superposés verticalement, tels qu'un aquifère libre de surface et un aquifère sous-jacent confiné ou semi-confiné. Ainsi, il est important de se questionner lors de l'installation des piézomètres sur la possibilité de l'existence de plusieurs réservoirs. La réalisation de carottes sédimentaires à la tarière et l'observation des différentes lithologies superposées verticalement permet de caractériser les différents réservoirs.



TYPE D'INFORMATION	1 Piézomètre	1 Piézomètre + 1 Limnimètre	2 Piézomètres + 1 Limnimètre	3 Piézomètres + 1 Limnimètre	Réseau de piézomètres * + 1 ou + Limnimètre(s)	Section correspondante	
Perméabilité	1 seul piézomètre peut suffire, mais la représentativité spatiale augmente avec le nombre de piézomètres					1.1.1 – Perméabilité	
Chronique du niveau de nappe	Signaux → Dynamique des réponses possibles à une précipitation ou une variation de niveau d'eau dans la rivière Possibilité d'analyse de l'amplitude des réponses					2. 2– Analyse temporelle	
Chronique de la température	Privilégier la mesure de la température de l'eau dans la nappe par l'insertion d'une sonde directement dans les sédiments. Informations sur les flux de nappe.					Guide de L'OFB p. 67	
Chronique de la hauteur d'eau en rivière	Possible à partir du moment où un limnimètre est installé sur le cours d'eau. Pas de piézomètre nécessaire. Constitution d'un jeu de données sur la statistique des débits. Nécessaire pour quantifier le gradient hydraulique nappe vs rivière.					2. 2– Analyse temporelle	
Gradient hydraulique (sens des échanges nappe-rivière)	Sur une rive seulement		Possibilité d'obtention du gradient sur les deux rives			1.1.1 – Gradient hydraulique	
Transect 2D						2. 2– Analyse spatiale 2D	
Bloc 3D						Nécessite au minimum deux couples de piézomètres + 1 ou 2 limnimètres	2. 2– Analyse spatiale 3D
Débit échangé entre la nappe et la rivière	Représentativité de la valeur de débit augmente en fonction du nombre de piézomètre					1.1.1 Perméabilité et aussi Guide de L'OFB p. 47	
Carte piézométrique						Nécessite un réseau de piézomètres dense pour être représentative	Guide de L'OFB p. 51
Modèles hydrogéologiques							Guide de L'OFB p. 53

Légende

 Impossible d'obtenir le type d'information

 Réseau de piézomètres *

* Plus de 4 piézomètres

 Représentativité spatiale très faible

 Représentativité spatiale élevée

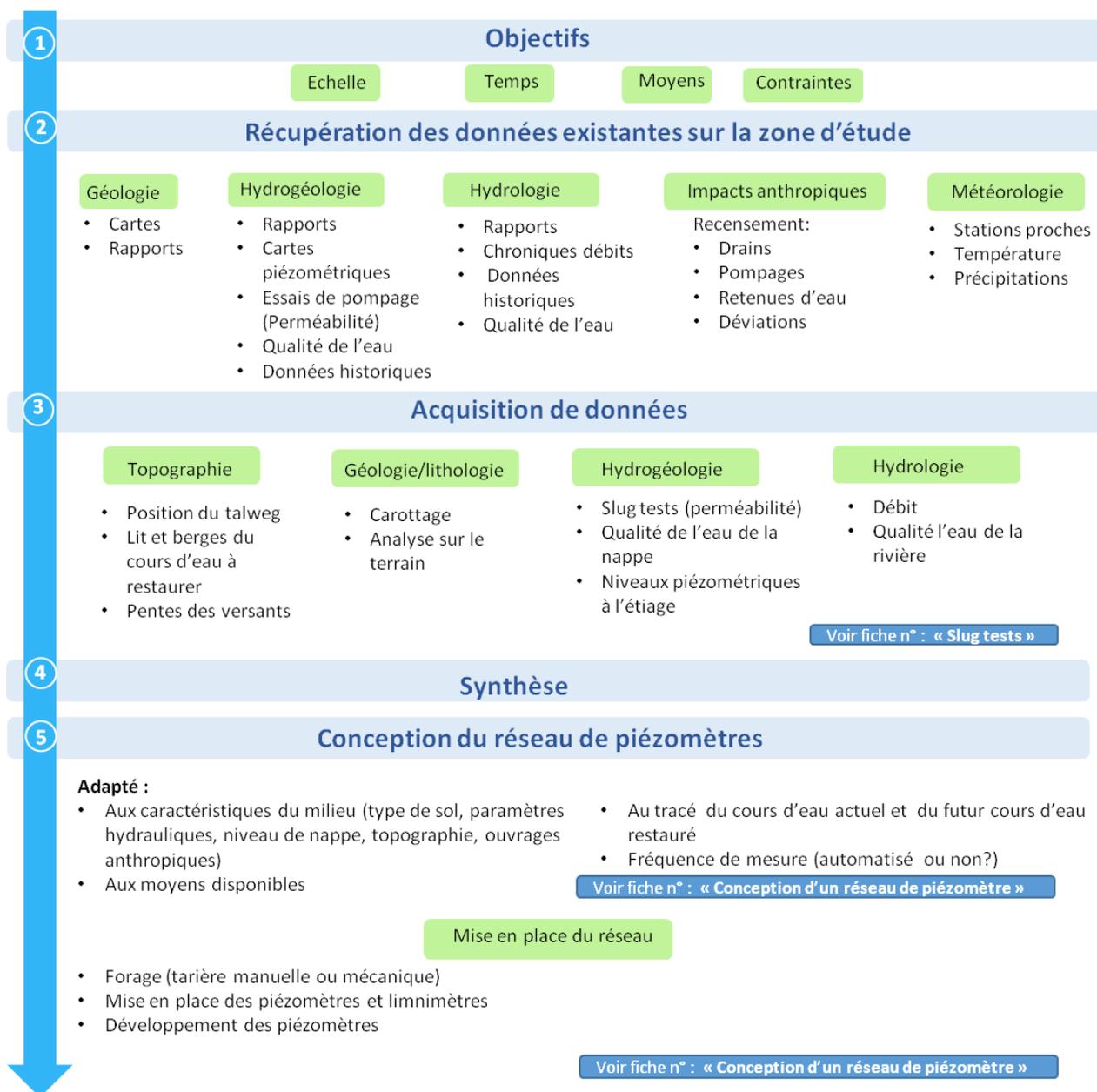
Figure 15 : Degré d'information qu'il est possible d'obtenir en fonction du nombre de piézomètres installés sur le site d'étude

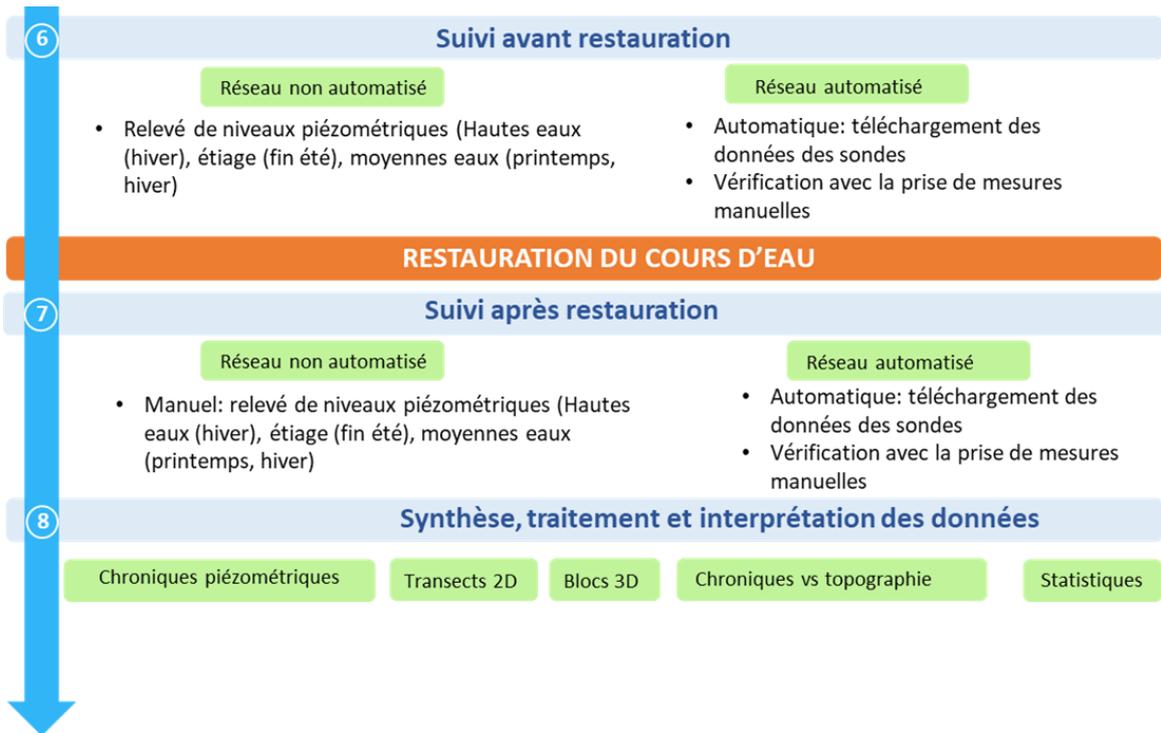
Si deux couches aquifères sont superposées, il convient alors de placer à minima un piézomètre dans chacune d'entre elles. La partie crépinée de chaque piézomètre doit être en contact avec une seule couche aquifère. L'installation d'un réseau de plusieurs piézomètres

permet d'étudier les différentes réponses spatiales à certaines sollicitations hydrologiques au sein d'un même réservoir.

1.2.3 Analyse complète et spécialisée des échanges nappe-rivière

Dans ce chapitre, nous évoquons le cas de figure d'une étude complète et « idéale » des échanges nappe-rivière au sein d'un bassin versant. Une telle étude est bien souvent hors de portée des techniciens rivière pour des raisons de temps et de moyens. Il nous semble utile de la mentionner afin de donner un cadre idéal qui peut inspirer et surtout présenter la séquence logique des actions et analyses à mener.





Les différentes étapes d'une analyse complète des échanges nappe-rivière sont résumées dans l'organigramme ci-dessus, depuis la phase préalable à la restauration jusqu'au traitement final des données. Ce cas de figure requiert une analyse plus complexe du site d'étude, comprenant un nombre de paramètres à définir plus important (étapes 1 à 4). Une synthèse des données existantes, portant sur divers aspects (géologie, hydrologies, plans et répertoires d'ouvrages anthropiques, etc.) et également sur l'acquisition des données manquantes, est alors nécessaire. Cette phase préparatoire du projet revête une grande importance. Elle permettra d'analyser la faisabilité du projet. Un réseau optimisé de piézomètres et adapté à l'objectif suivi pourra être conçu suite à cette analyse.

Ce qu'il faut retenir ...

- ⇒ Avant d'opérer à la restauration d'un cours d'eau, il est primordial de **bien établir les objectifs suivis et les moyens disponibles.**
- ⇒ En fonction de l'objectif suivi, adapter le nombre de piézomètres et les grandeurs mesurées.
- ⇒ Prévoir un **suivi d'une durée minimum d'un an avant restauration.**
- ⇒ **Choisir les méthodes de traitement de données qui permettent de répondre** à la problématique posée.



1.3. Apport de la piézométrie : exemples sur des sites suivis dans le projet BERCEAU

La piézométrie est un bon outil pour caractériser la dynamique des échanges nappe-rivière. Nous avons vu dans la première partie que les gradients hydrauliques déterminent le sens des écoulements et en partie leur intensité. L'utilisation de la piézométrie apparaît donc comme nécessaire pour caractériser et suivre les variations des échanges nappe-rivière dans le temps.

Une partie du projet BERCEAU consiste en l'étude approfondie de sites de restauration dans le but d'évaluer l'apport de la piézométrie dans l'évaluation de ces opérations de restauration et de proposer une méthodologie transposable sur d'autres sites d'études.

1.3.1. Réseaux de piézomètres installés dans le cadre du projet BERCEAU

Deux réseaux de piézomètres ont été installés sur deux sites de remise en talweg (le Pas de l'Âne à Vignoc et le Côté-Malville à Ploërmel). Une synthèse de leurs caractéristiques sont décrites ci-dessous. Une description plus détaillée de chaque site et des mesures effectuées sont développées dans l'annexe « sites multidisciplinaires ». La méthode de construction des micro-piezomètres est détaillée dans l'Annexe piézométrie :

Fiches techniques 1, 2, 3 et 4

Les fiches techniques sont regroupées dans les annexes ci-contre. Elles constituent des outils pratiques pour la mise en place de certaines techniques de suivi, tel que les piézomètres ou les limnimètres. D'autres décrivent les protocoles de mesures : jaugeages, test de perméabilité, etc.

Fiche technique N°1 - Réalisation de micro-piezomètres
Deux limnimètres ont été installés sur chaque site pour suivre les variations de hauteur d'eau dans le cours d'eau. La méthode utilisée sur les sites du projet BERCEAU pour construire et installer les limnimètres est détaillée dans l'Annexe 1 : Fiche méthode N°3, installation d'un limnimètre.

Réseau de piézomètres installé sur le ruisseau du Pas de l'Âne, bassin versant de la Flume, Vignoc (35 - Ile et Vilaine)

Dans cette zone d'étude, le cours d'eau avant restauration était situé dans le bas-fond de la vallée, mais positionné au pied d'un versant. Il était également surcreusé. L'objectif de cette restauration est de replacer la rivière dans le talweg, afin de rétablir la cohérence entre la topographie et les écoulements de surface, et de reconnecter le cours d'eau avec la zone humide qui lui est associée.

11 piézomètres (F1 à F11) ont été installés de janvier à avril 2019 (avant la date de restauration du cours d'eau). 8 d'entre eux sont dotés de sondes de pression absolues qui effectuent un enregistrement du niveau piézométrique toutes les 15 minutes. En août 2021, deux piézomètres ont été placés sur les berges (F12 et F13) et ont été également équipées de sondes, afin d'étudier plus précisément l'interface nappe-rivière (Figure 16). Pour plus d'informations sur les capteurs automatiques de pression et leur fonctionnement, se référer à la Fiche technique N°4 - Capteurs automatiques de pression .

Le site est également équipé de deux limnimètres (à l'amont et à l'aval de la portion restaurée) qui mesurent la hauteur d'eau dans le cours d'eau. En fonction du type de sonde utilisée, il est nécessaire d'installer un baromètre sur le site pour mesurer la pression atmosphérique et permettre la conversion des valeurs de pression absolue en hauteur d'eau.



Réseau de piézomètres installés sur le Pas de l'Âne, bassin versant de la Flume, Vignoc - 35

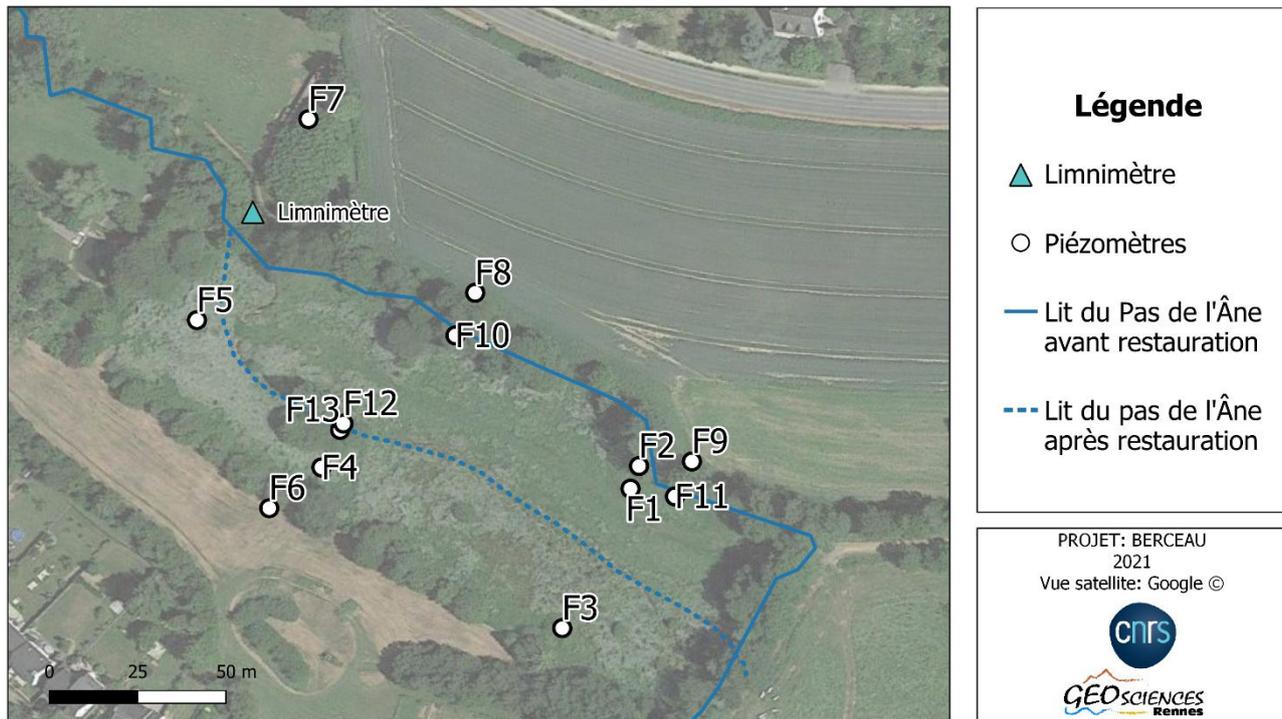


Figure 16 : Carte du réseau de piézomètres installés sur le site du Pas de l'Âne, bassin versant de La Flume, à Vignoc (35)

Les piézomètres ont été positionnés le long de 3 transects perpendiculaires au cours d'eau, à distance croissante du talweg, et en suivant la pente topographique. Des piézomètres sont situés dans le bas-fond et d'autres sur les versants.

Leur profondeur varie en fonction de la hauteur du toit de la nappe. F6, F7, F8 et F9 ont été installés sur les versants à l'aide d'une foreuse carotteuse et mesurent 3 à 5m de profondeur. Les autres piézomètres ont été réalisés à la tarière manuelle à une profondeur de 1 à 2m. Pour suivre l'amplitude maximale des niveaux de nappe sur les cycles hydrologiques, un piézomètre doit être en contact avec la nappe même quand son niveau est au plus bas, c'est-à-dire à l'étiage. Pour les piézomètres situés dans le bas-fond, l'altitude de la partie crépinée des piézomètres doit être si possible inférieure à celle du fond du cours (ou drain) adjacent pour documenter les périodes pendant lesquelles la nappe peut être déconnectée du cours d'eau.

La conductivité hydraulique a été mesurée par test hydraulique dans chaque piézomètre. Les valeurs mesurées sont comprises entre 10^{-6} m/s à 10^{-8} m/s et correspondent à des conductivités faibles.

Réseau de piézomètres installé sur le ruisseau du Côté-Malville, bassin versant du Ninian, Ploërmel (56 - Morbihan)

Sur ce site, le cours d'eau avant restauration est un canal d'aménée perché sur un versant. L'opération de restauration consiste à le replacer dans le talweg et effectuer une recharge en sédiment pour lui redonner une dynamique naturelle (Figure 17)

Le réseau est composé de 16 piézomètres dont 10 ont été installés avant la restauration (N1 à N10, entre avril et mai 2019) et 6 après la restauration (N11 à N16 du 22 au 23 juillet). 10 d'entre eux sont équipées de sondes de pression absolue. La mesure manuelle est possible dans les autres piézomètres. Les piézomètres N1, N2, N3, N4 mesurent de 3.5 à 5m de profondeur et ont été creusés à la foreuse-carotteuse. Les autres piézomètres mesurent entre 1 et 3 m et ont été creusés à la tarière manuelle lors d'un atelier de formation sur la piézométrie dans le cadre de BERCEAU. Le site compte aussi 2 limnimètres : un à l'amont et un à l'aval de la zone restaurée, et un baromètre.

Réseau de piézomètres installés sur le Côt-Malville, bassin versant du Ninian, Ploërmel (56)

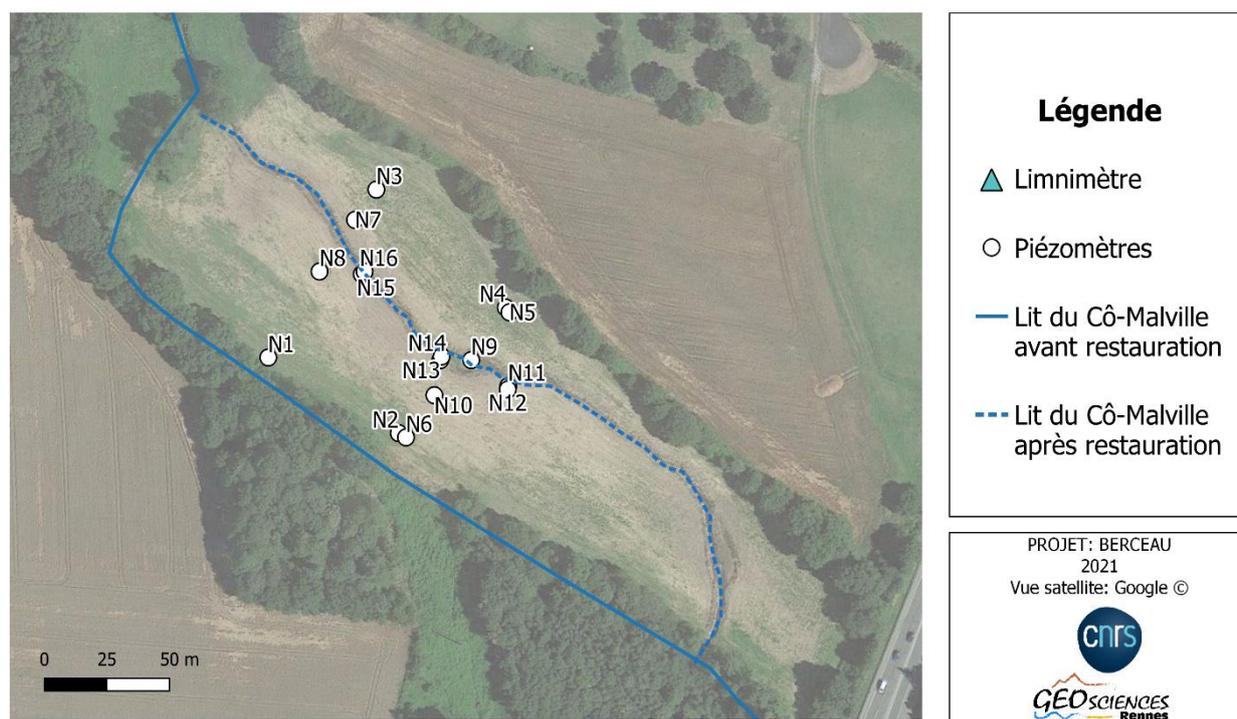


Figure 17 : Carte du réseau de piézomètres installés sur le site du Côt-Malville, à Ploërmel (56)

Les 10 premiers piézomètres ont été positionnés le long de deux transects perpendiculaires au cours d'eau. Ils sont répartis de part et d'autre du talweg, dans le bas-fond et sur les versants. Deux doublons de piézomètres (N2/N6 et N5/N4) ont été construits à différentes profondeurs (3,6 m/1,4 m et 1,9m/4,8 m) car lors du forage de N2 et N4, la possibilité de l'existence d'un aquifère captif a été mise en évidence par l'analyse de la carotte prélevée. Il s'agit donc d'étudier s'il existe une différence de comportement des deux aquifères.

Enfin, juste après la restauration, 3 paires de piézomètres (N11-N12, N13-14, N15-N16), ont été placés autour du cours d'eau restauré, avec respectivement pour chaque paire un piézomètre sur la berge et un autre dans le cours d'eau, dans l'objectif de suivre les interactions nappe-rivière proche de la rivière. Les piézomètres dans le cours d'eau n'ont pas résisté aux crues de l'hiver 2019/2020 et n'ont pas pu être valorisés.

La conductivité hydraulique a été mesurée par test hydraulique dans chaque piézomètre. La perméabilité du site d'étude est assez faible car elle est de l'ordre de 10^{-5} m/s à 10^{-7} m/s pour la plupart des points.

1.3.2. Méthodes pour traiter et interpréter les données

Il est possible d'utiliser les données enregistrées sur le réseau de mesures de différentes manières en fonction du résultat recherché. Cette section décrit les outils utilisés dans le projet BERCEAU afin de traiter et interpréter les données, et ainsi caractériser les échanges nappe-rivière.

- **Analyse temporelle des données piézométriques**

La chronique de niveau piézométrique est un graphique représentant les variations de hauteur d'eau dans les piézomètres et limnimètres au cours du temps. Les données horaires de précipitations enregistrées dans la station météorologique la plus proche du site étudié ont été ajoutées sur un second axe en ordonnées (Figure 18 : Chroniques de précipitations et de variations piézométriques et limnimétriques associées, sur le site du Côté-Malville, Ploermel (56)). Ce type de graphique représente les variations de hauteurs d'eau de la nappe et de la rivière au cours du temps, associées aux événements de précipitations.

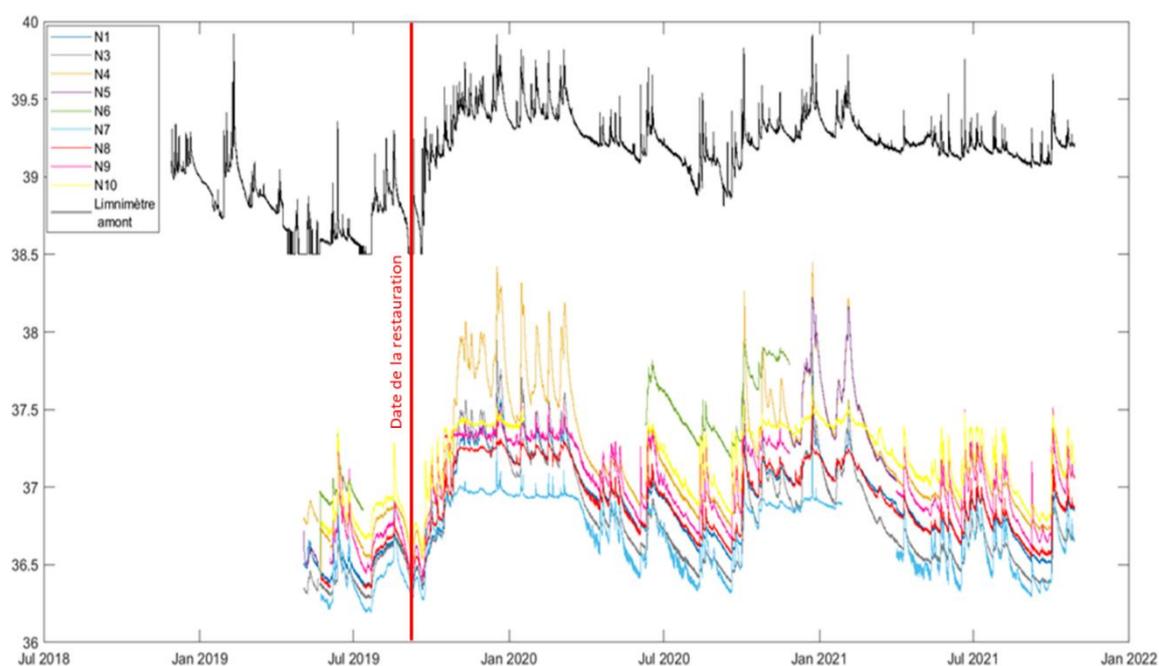


Figure 18 : Chroniques de précipitations et de variations piézométriques et limnimétriques associées, sur le site du Côté-Malville, Ploermel (56).

Une chronique piézométrique doit se lire avec précaution. Le niveau piézométrique représente une altitude en m NGF. La courbe représentant les piézomètres situés à des altitudes plus importantes (sur les versants) sont de facto au-dessus des autres courbes. Le niveau de l'eau mesuré au limnimètre amont dépend de l'altitude du limnimètre. On ne peut donc pas comparer ce niveau avec celui des piézomètres plus en aval pour étudier les relations entre la nappe et la rivière. Pour ce faire, il faut comparer le niveau d'eau des piézomètres sur les versants avec le niveau d'eau mesuré dans le ruisseau au droit de ces piézomètres. Dans le cas du Côté-Malville, le limnimètre a été positionné à l'amont de la zone restaurée.

NB : Pour faciliter l'analyse et la compréhension des chroniques, il est donc préférable de positionner le limnimètre au droit des transects de piézomètres pour observer directement les relations entre la nappe et le cours d'eau. Cette contrainte peut être difficile à respecter selon les configurations des sections de cours d'eau propices pour un suivi limnimétrique avant et après travaux.



La chronique peut être établie pour différentes échelles de temps (interannuelle, saisonnière, mensuelle, journalière, horaire). Sur une longue période (une ou plusieurs années), elle permet d'observer les oscillations générales de la nappe et du cours d'eau (périodes d'étiage, crues, niveaux les plus hauts, etc...).

Variations saisonnières

Une première analyse visuelle des chroniques sur le Côté-Malville (Figure 18) permet d'apprécier les variations saisonnières de niveau de nappe et de rivière. Les niveaux les plus bas sont enregistrés entre mai et octobre. Puis la nappe se recharge avec les pluies automnales, et les niveaux les plus hauts sont enregistrés entre novembre et mars. L'étude de la chronique permet également de différencier les comportements entre les piézomètres du bas-fond et les piézomètres situés sur les versants. En hiver, les piézomètres situés dans le bas-fond (sur l'exemple : N7, N8, N9, N10) sont presque saturés : les variations de hauteur d'eau sont moins prononcées et la courbe forme un plateau, ce qui signifie que le niveau de la nappe est au niveau du sol. Au début du printemps, le niveau de la nappe baisse globalement, mais le ressuyage (la « vidange » du réservoir, ou ici la baisse des niveaux piézométriques) est plus rapide sur les piézomètres situés sur les versants. La pente qui caractérise la baisse du niveau de nappe est fonction des caractéristiques du terrain (perméabilité, coefficient d'emmagasinement).

Variations interannuelles

Lorsque le suivi des hauteurs piézométriques est réalisé sur plusieurs années, on peut étudier les variations interannuelles sur la dynamique de la nappe. En effet, en fonction des conditions météorologiques, cette dynamique peut différer en fonction des années, surtout dans le contexte actuel de changement climatique. De plus, lors de la restauration d'un cours d'eau, il est possible d'étudier l'évolution du système étudié, avant et après restauration. Il est recommandé de commencer le suivi au moins 1 an ou plusieurs années avant la restauration du cours d'eau. Enfin, lors d'une restauration, la morphologie du cours d'eau va évoluer dans les années qui suivent, et l'étude des chroniques permet de donner des informations sur la réponse du système face à cette évolution.

Haute fréquence : à l'échelle d'une crue

En faisant un zoom sur la chronique piézométrique et limnimétrique, on peut observer la réponse de la nappe dans chacun des piézomètres ainsi que les variations de hauteur d'eau dans la rivière à l'échelle d'une crue. L'analyse de la chronique à l'échelle de la crue permet d'étudier de manière plus spécifique la dynamique du vallon lors d'un événement de précipitation. Ainsi, on peut observer les différences de comportements entre les différents piézomètres en fonction de leur position dans le vallon, en termes d'amplitude de réponse, ou de forme du signal. Il est par exemple possible de comprendre les différentes dynamiques de réponse dans la nappe en fonction de la période de la crue, en été ou en hiver.

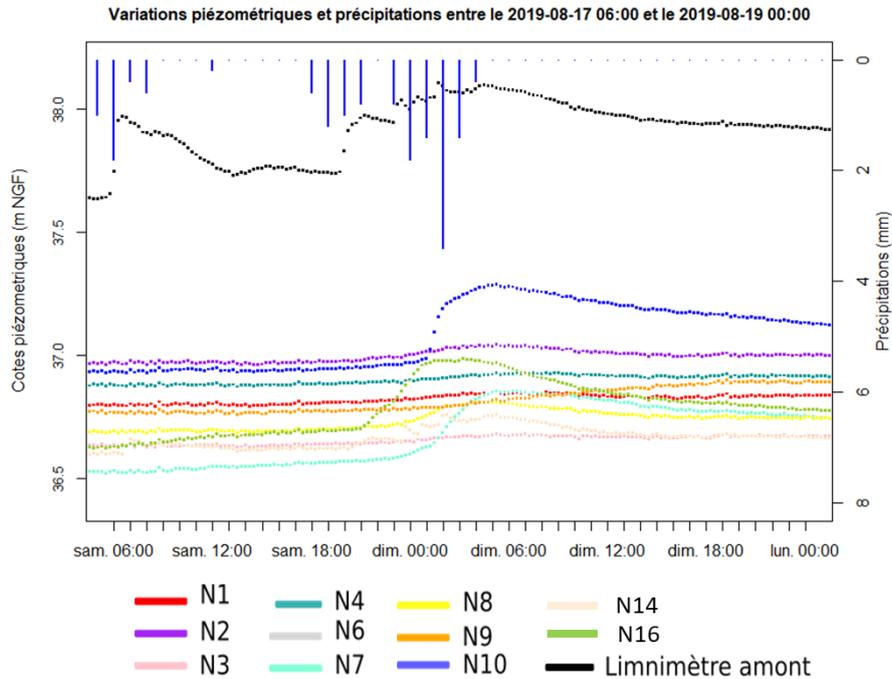


Figure 19: Chroniques de précipitations site du Côté-Malville, Ploermel (56) : zoom sur un pic de crue en été (17/08/2019)

Sur la Figure 19, il est possible d'observer les différentes réponses des piézomètres à un évènement de précipitations en été. Le limnimètre amont est situé plus en altitude que les piézomètres, ce qui explique que son niveau reste au-dessus de celui des piézomètres.

En été, lorsque le niveau de la nappe sur les versants est au plus bas, les piézomètres qui réagissent le plus après un épisode de pluie sont les piézomètres situés dans le bas-fond. On observe une augmentation moins prononcée du niveau de la nappe dans les versants. L'amplitude des réponses est plus grande en N10, N7, et N16 que dans les piézomètres situés sur les versants (N2, N4, N1, N3). Leur niveau passe momentanément au-dessus de celui des piézomètres situés sur les versants, avant de repasser au-dessous quelques heures plus tard. Cet évènement est représenté sous la forme de transect dans le schéma de la Figure 20.

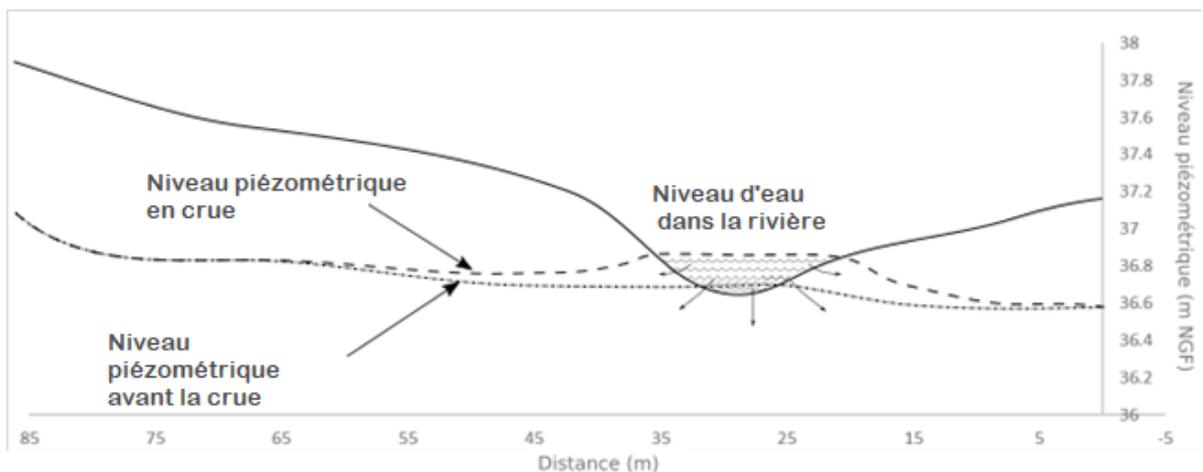


Figure 20: Représentation schématique de l'inversion de gradients visible sur le zoom de la chronique piézométrique du 17/08/2020 – Figure 19 -

L'analyse de cette chronique à l'échelle d'une crue permet donc d'identifier un phénomène local d'inversion de gradient lors de cet évènement précis. Les variations de niveau dans les



piézomètres sont donc à la fois le résultat des variations de niveau dans l'ensemble du bassin versant, et des apports de cours d'eau lors de l'épisode de crue.

Lors d'une crue en hiver, on peut identifier une dynamique différente. La Figure 21 représente la réponse piézométrique à un évènement de pluie entre le 16 et le 18 décembre 2020. Avant les pluies, le gradient de niveau de nappe entre les versants et le bas-fond est plus élevé qu'en été. En hiver lorsque le bassin versant est saturé, le niveau augmente dans tous les piézomètres et dans le cours d'eau de manière quasiment simultanée. Le drainage (ou la baisse de niveau de nappe) est plus lent dans les versants. Dans ce cas, on n'observe pas d'inversion de gradients. L'augmentation des niveaux dans les piézomètres n'est donc qu'une réponse de la nappe à l'apport d'eau par précipitation sur l'ensemble du bassin versant.

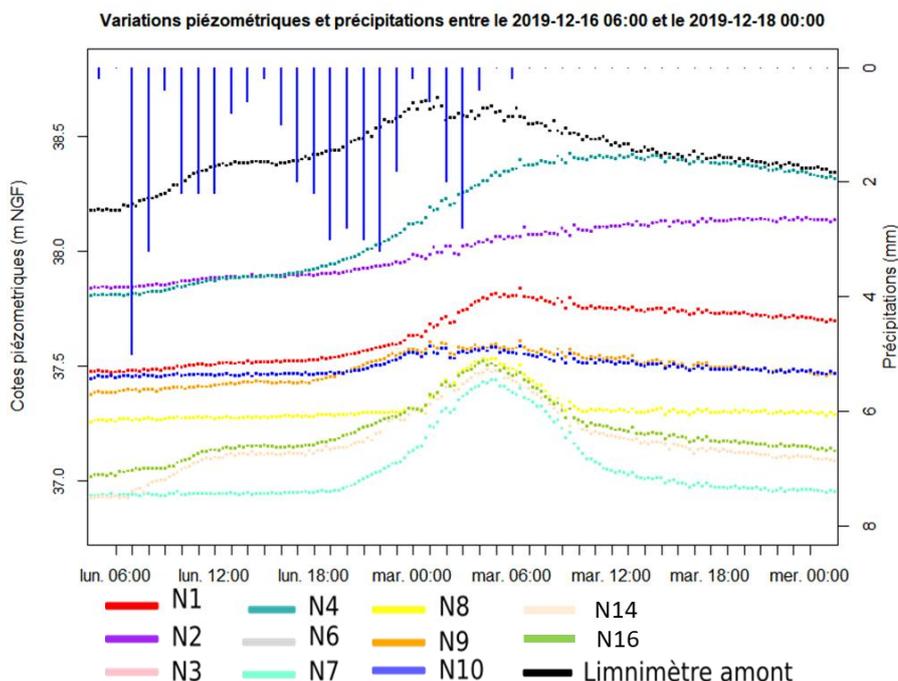


Figure 21 : Chroniques de précipitations site du Côté-Malville, Ploermel (56) : zoom sur une un pic de crue en hiver (13/12/2020) le long du transect N1/N3

L'analyse des chroniques à l'échelle d'une crue peut donc apporter des informations supplémentaires pour la compréhension locale des échanges nappe rivière. Cependant, cette dynamique peut varier en fonction de l'intensité de l'évènement pluvieux, l'état de saturation du bassin versant et bien d'autres facteurs, ce qui rend l'interprétation de ces signaux complexe.

- **Périodicité**

Sur une courte durée et pendant certaines périodes hydrologiques, il est aussi possible d'observer d'autres processus responsables de variations de l'altitude de la nappe, telles que l'évapotranspiration. On peut ainsi comparer l'intensité de l'évapotranspiration sur différentes périodes. Nous avons pu observer ce type de signal sur la chronique des limnimètres présent sur les sites du projet BERCEAU (Figure 22).



Signal d'évapotranspiration à l'été

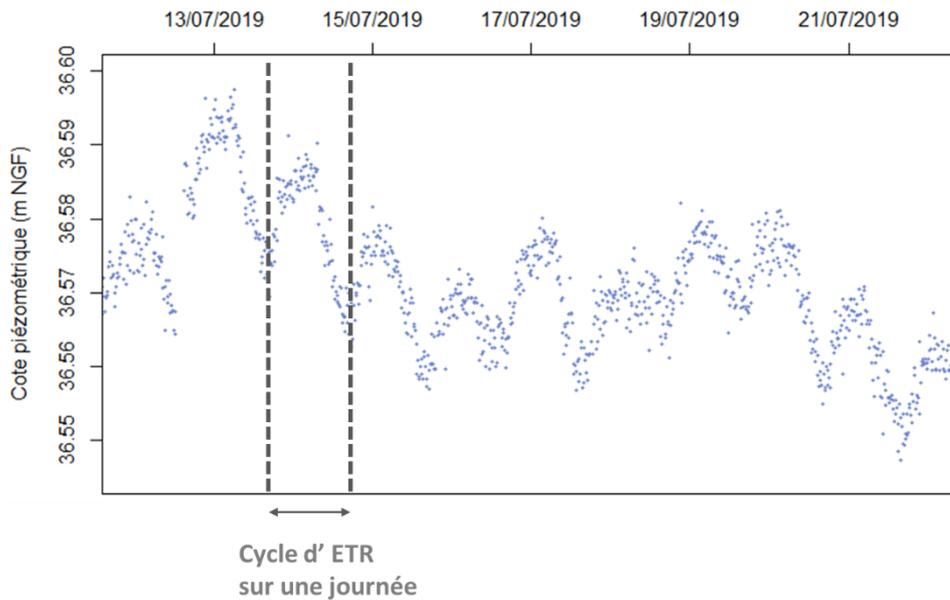


Figure 22 : Signal d'évapotranspiration sur la chronique piézométrique du Côté-Malville, Ploermel (56) en période d'été et éléments d'analyse du signal

Il existe des formules pour estimer l'évapotranspiration à partir de ces signaux périodiques. La plus connue d'entre elles est la formule de White (1932). Si elle permet une première approximation, de nombreuses sources d'erreur sont possibles. Entre autres, elle suppose une recharge constante pendant la nuit, ce qui n'est pas correct (Loheide, 2008). Cette formule dépend fortement de la précision de la valeur de la porosité de drainage S_y , bien que cette grandeur soit souvent difficile à estimer.

$$ET = 24r \pm s \times S_y$$

Où : $ET = \text{Evapotranspiration}$
 $s = \text{Variation de stock en 24h}$
 $S_y = \text{Porosité de drainage}$

- **Chroniques de gradients hydrauliques**

A partir des chroniques des piézomètres et des limnimètres, il est aussi possible de calculer des chroniques de gradients hydrauliques entre la nappe et le cours d'eau. Afin d'étudier le sens des gradients entre la nappe et la rivière, on calcule une valeur de gradient à chaque pas de temps t selon la formule suivante :





Cote piézométrique P1 (mNGF) – Hauteur d'eau L1 (mNGF)
Distance P1 – L1 (m)

Où : - P1 est un piézomètre situé sur un versant

-L1 est le limnimètre situé dans le cours d'eau au droit du piézomètre P1

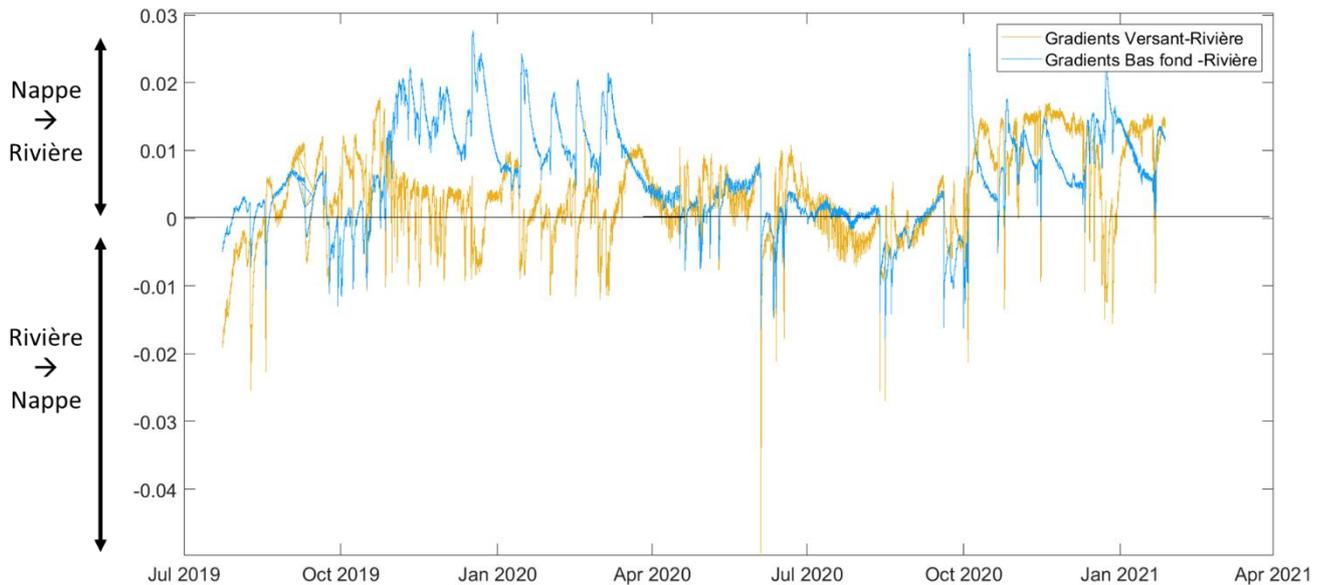


Figure 23 : Chronique des gradients hydrauliques calculés entre la nappe et le cours d'eau pour deux piézomètres différents le long d'un versant : piézomètre proche de la berge (courbe jaune) ; piézomètre plus haut sur le versant (courbe bleue)

Sur chacune des courbes de la Figure 23, les gradients hydrauliques calculés indiquent la direction et l'intensité des flux entre le piézomètre concerné et le cours d'eau. La courbe bleue représente les gradients calculés entre le cours d'eau et le piézomètre le plus éloigné du cours d'eau, situé sur le versant du vallon. Lorsque le gradient calculé est positif : le niveau de la nappe est supérieur au niveau d'eau dans le cours d'eau, et la nappe alimente le cours d'eau. A l'inverse, lorsque le gradient est négatif, la rivière alimente la nappe. Dans le cas du piézomètre situé sur le versant, à environ 25 m du cours d'eau, on peut remarquer que les inversions de gradient ne se produisent qu'en été : le reste de l'année, les gradients sont positifs. Les gradients positifs sont plus fréquents et sont caractérisés par une amplitude supérieure aux gradients négatifs. En tenant compte de la loi de Darcy qui énonce que les flux sont proportionnels aux gradients, on démontre donc que les flux nappe-rivière sont dominants (90% du temps) sur les flux rivière-nappe à l'échelle d'une année.

Lorsque l'on s'intéresse aux gradients de nappe aux abords du cours d'eau (moins de 10m dans le cas présent), on peut remarquer que l'inversion des gradients se produit plus fréquemment. En effet, le niveau de la nappe proche du cours d'eau est semblable à celui du cours d'eau hors période de crue. Ainsi, lorsque le niveau du cours d'eau augmente en crue, il est plus susceptible de passer au-dessus du niveau de la nappe dans les quelques mètres environnant le cours d'eau. Cependant, on peut constater que, durant la majorité de l'année, les flux proviennent de la nappe pour alimenter le cours d'eau, et l'inversion des flux ne se produit que lors des événements de pluie.

L'analyse des gradients en fonction de la zone du versant considérée permet de conclure sur plusieurs points : la majorité de l'année, les flux sont dirigés de la nappe vers la rivière. Lors d'épisodes de crue dans la rivière, une inversion des gradients peut se produire, et le sens des flux s'inverser. Cette inversion du sens des flux est localisée dans le temps et dans l'espace. Le



phénomène n'atteint pas les versants lorsque le niveau de la nappe est haut, en particulier en hiver. La hauteur de la nappe (corrélée à la topographie) impose une pression qui limite l'inversion des gradients dans l'espace.

- **Analyse spatiale des données piézométriques**

Une chronique de hauteurs d'eau permet d'étudier les temps de réponse du toit de la nappe suite à un évènement pluvieux sur le bassin versant ou une modification naturelle ou anthropique de l'hydrologie. Cette information reste néanmoins incomplète si l'on veut suivre le sens et l'amplitude des flux d'eau souterrains. Une information spatialisée est alors nécessaire avec la mise en place de plusieurs piézomètres. Nous évoquerons dans ce document deux types de représentations spatiales couramment utilisées, qui correspondent chacune à des stratégies de mise en place différentes des piézomètres.

- **Transects piézométriques**

Un transect piézométrique permet de représenter les données de hauteur d'eau dans l'espace en deux dimensions suivant un axe. Généralement, cet axe est supposé correspondre à la direction des sens d'écoulement et/ou des gradients de hauteurs piézométriques les plus importants. En pratique sur site, le choix de l'axe et la position des piézomètres sur cet axe nécessite une connaissance minimale du site afin de repérer des points particuliers pouvant avoir un impact sur la profondeur du toit de la nappe (drain enterré ou à ciel ouvert, pompage, singularité géologique (failles, contact lithologique)). Sur un terrain vierge d'information, la direction de l'axe est bien souvent calquée sur la direction de la plus grande pente topographique en fonction du point d'intérêt dont on cherche à définir l'impact sur les flux et sur le toit de la nappe (cours d'eau, drains, pompage).

Quant à la position des piézomètres sur cet axe, elle dépend du nombre de piézomètres que l'on peut installer, de la pente topographique et de la nature du terrain, notamment la perméabilité du milieu. Afin d'obtenir un transect représentatif de la zone, il doit être composé au minimum de 3 points : un point au niveau de la rivière et deux points sur les berges, plus ou moins distants en fonction des caractéristiques du milieu. Par exemple, plus le milieu est perméable, plus les points devront être distants pour que le gradient puisse s'observer nettement. Dans certains cas de figure, il sera peut-être nécessaire de réaliser des sondages et des mesures de perméabilité par test hydraulique (*Annexe 2 : Fiche technique N°2, conductivité hydraulique – Test hydraulique*). En revanche, des zones avec des contrastes de perméabilités seront marquées par des gradients piézométriques importants (ex. entre un cours d'eau et ses berges). Plus le transect comprend de points, plus il sera représentatif du toit de la nappe. Toutefois, si la pente du toit de la nappe (ou gradient hydraulique) est constante, ce qui peut arriver par exemple sur les plaines de faible pente, un nombre de points trop élevé ne sera pas utile. Il est aussi indispensable de déterminer au préalable les caractéristiques spatiales des points de mesure comme la distance entre les points, l'altitude des points, l'altitude du lit du cours d'eau et l'altitude des berges. A minima, la distance entre deux piézomètres doit correspondre à des différences de profondeur du toit de la nappe suffisantes pour être supérieures aux incertitudes de mesures induites par les appareils de mesure et le positionnement en altitude des piézomètres. Dans le meilleur des cas, cette incertitude est de quelques cm. L'installation d'un transect piézométrique résulte d'un compromis comme bien souvent entre moyens matériels, questions posées et caractéristiques du milieu. L'expérience de l'opérateur est ici importante.

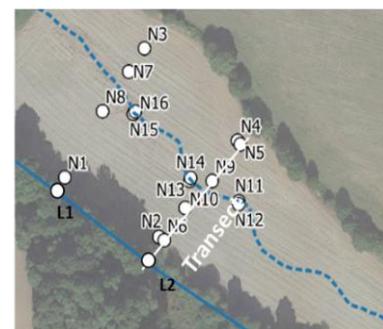
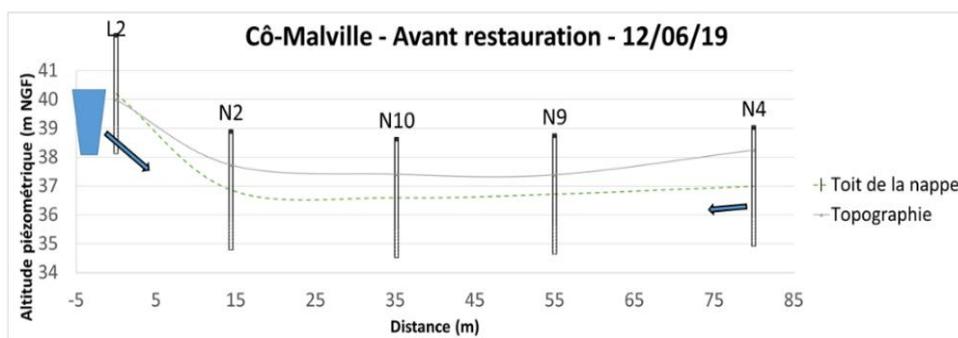
Du fait de l'alignement des piézomètres, les données peuvent être représentées sous forme d'un graphique où la distance entre les points de mesure sur l'axe des abscisses est associée aux hauteurs d'eau aux mêmes points, et la topographie en ordonnée. Les points du graphique pour un même instant « t » sont reliés entre eux par interpolation. En première estimation, une interpolation linéaire est souvent appliquée afin de représenter respectivement le toit de la nappe, et la surface topographique (Figure 24).



Ce type de représentation rend possible la visualisation de la forme du toit de la nappe à l'instant « t » choisi par l'utilisateur. En représentant la surface piézométrique à différents instants lors d'un évènement hydrologique (par exemple : avant une crue, au pic de la crue, et après la crue), on peut comprendre le sens des écoulements, la dynamique du toit de la nappe et en déduire celle des échanges nappe-rivière. Les chroniques temporelles sont utiles pour définir les instants auxquels on veut représenter le toit de la nappe. Il est possible d'y voir les différents stades hydrologiques (crue, étiage) et ainsi de sélectionner les dates et heures qui nous intéressent pour la représentation des transects.

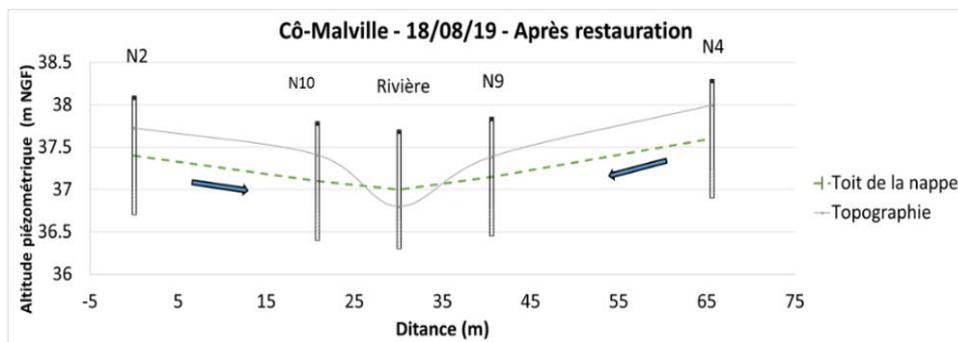
- Exemples de transects réalisés sur les sites du projet BERCEAU

Transects 2D: Bassin versant du Ninian, Ruisseau du Côt-Malville, Ploërmel



Avant restauration

- **Asymétrie des flux entre les versants:** le cours d'eau perché impose une charge : flux rivière vers nappe dans le bas fond
- **La rivière qui fait office de drain sur le versant :** Absence de zone humide



Après restauration

- Rétablissement de **la symétrie des flux vers le bas fond**
- Confirme une observation classique en hydrogéologie: **la rivière essentiellement alimentée par la nappe (hiver comme été)**

Figure 24 : Exemples de transects réalisés sur le Côt-Malville, Ploërmel (56) à différents stades hydrologiques ; avant, pendant et après la crue

Les deux transects ci-dessus représentent la topographie et le toit de la nappe le long des 4 piézomètres alignés perpendiculairement au cours d'eau, à l'amont de la zone restaurée du ruisseau du Côt-Malville, à Ploërmel (56). La géométrie du toit de la nappe est représentée avant et après restauration.

Avant restauration, le cours d'eau perché impose un niveau de nappe et un flux du cours d'eau vers la nappe dans le bas-fond. De plus, la rivière agit comme un drain et évacue vers l'aval une partie des apports destinés au bas-fond. Ceci entraîne une diminution de l'altitude du toit de la nappe et une limitation de l'extension de la zone humide dans le bas-fond,



Lorsque le cours d'eau est remis dans le talweg, après restauration, le transect permet d'observer le rétablissement de la symétrie des flux par rapport à l'axe du talweg : les apports du versant rive gauche, auparavant évacués, transitent à nouveau par le bas-fond, avec en conséquence une rehausse du toit de la nappe.

- **Représentation schématique en bloc diagramme**

Le bloc diagramme est une représentation schématique qui synthétise les données obtenues sur plusieurs transects, en 3 dimensions, à un instant « t » (Figure 25). Il a une portée pédagogique et son but est d'améliorer la compréhension du fonctionnement du système étudié. Il est construit à partir de deux transects au minimum, sur un logiciel de graphisme type Adobe ou Inkscape. Ici, le bloc diagramme illustre l'asymétrie des flux en fonction des versants lorsque le cours d'eau est déplacé et « perché » sur un versant.

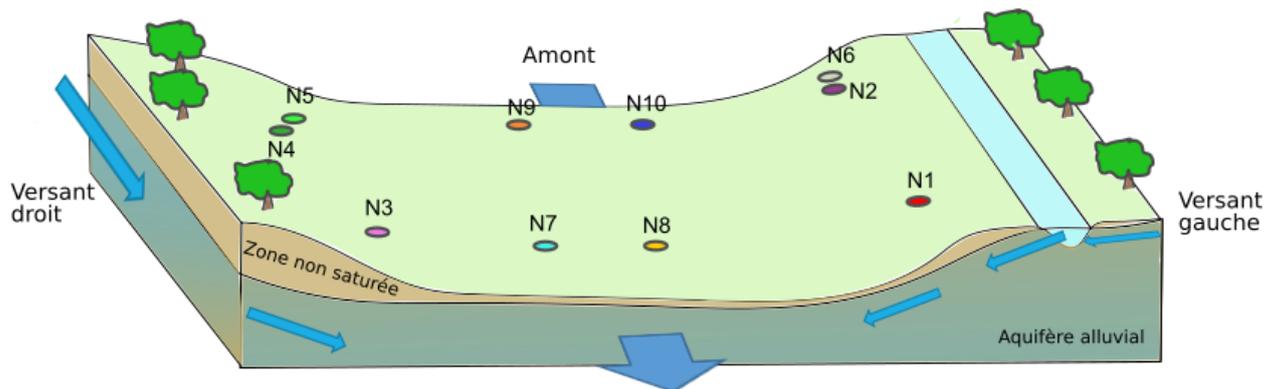


Figure 25 : Exemple d'un bloc 3D réalisé pour le site d'étude du Côté-Malville, bassin versant du Ninian, Ploërmel (56). lors d'une crue en juin 2019, avant la remise en talweg du cours d'eau.

POUR ALLER PLUS LOIN...

Statistiques

Il est également possible d'utiliser des données de profondeurs de la nappe pour une analyse statistique à partir des valeurs de distance entre le toit de la nappe et la topographie. Plusieurs grandeurs statistiques (moyenne, écart-type, histogrammes, fonction de densité de probabilité, etc.) peuvent être calculées et utilisées pour caractériser, entre autres, la proximité du toit de la nappe à la surface du sol ou la zone racinaire du couvert végétal. L'exemple des quartiles est cité ci-dessous.

S'il n'existe pas encore en France de critère précis pour la caractérisation de zones humides seulement à partir de la piézométrie, les critères qui permettent de conclure quant à l'existence de la zone humide sont étroitement liés aux fluctuations de la nappe (voir Cas particulier : les zones humides p19). Le critère « profondeur de nappe égale ou inférieure à 50 cm sur une durée prolongée » (Arrêté du 24 juin 2008 ; en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement) peut être considéré comme un indicateur de la présence et le maintien d'une zone humide dans le bas-fond, d'autant plus lorsqu'il est confirmé par la présence d'autres critères spécifiques aux zones humides tels que la végétation hydromorphe. Le critère piézométrique présente l'avantage d'établir, de manière quantitative à l'échelle annuelle, la sensibilité de la condition principale de maintien d'une zone humide (l'altitude de la nappe) à une modification du milieu. Ce critère peut être décliné sur une période plus courte (par exemple sur les mois d'été) si l'on souhaite adopter une définition d'une zone humide plus contraignante.

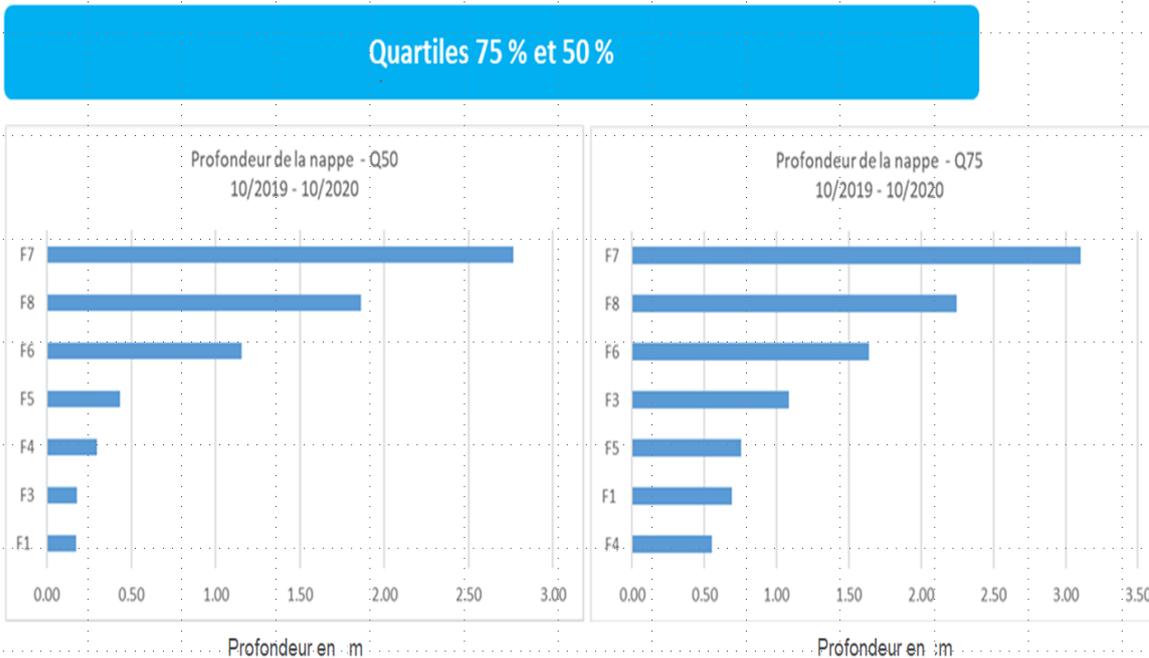


Figure 26 : Quartiles calculés à partir des données de profondeurs de nappe dans les piézomètres sur une année hydrologique après restauration du Pas de l'Âne, Vignoc (35).

Le calcul des quartiles 50 et 75 sur une année hydrologique permet de visualiser rapidement quels piézomètres sont susceptibles d'être concernés par des profondeurs de nappe inférieures à 50 cm sur respectivement 50 % et 75% de l'année hydrologique considérée (Figure 26).

A titre d'exemple, les quartiles 50 et 75 ont été calculés sur les données de profondeur enregistrée au sein des piézomètres du Pas de l'Âne (Vignoc) pendant une année hydrologique après restauration d'octobre 2019 à octobre 2020. On peut lire les résultats présentés dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** de la manière suivante. Dans le cas des piézomètres situés dans le bas-fond (F1, F3, F4 et F5), la profondeur de la nappe est inférieure à 50 cm sur plus de 50% du temps. Ce n'est pas le cas des piézomètres situés sur les versants (F6, F7, F8).

Attention, les données de précipitation cumulées sur les périodes considérées doivent être prises en compte pour comparer les statistiques de profondeur sur ces mêmes périodes.

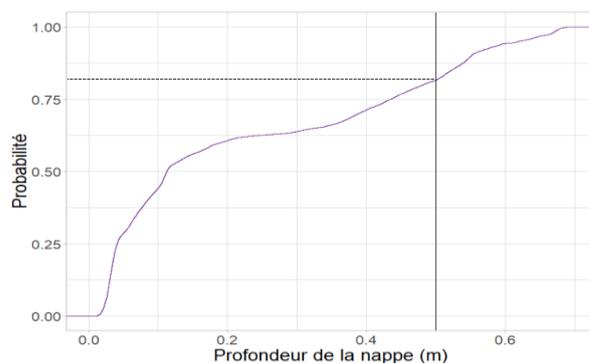


Figure 27 Distribution cumulée de la profondeur de nappe sur une année hydrologique (2019-2020) pour un piézomètre du bas-fond du site du Pas de l'Âne, Vignoc (35). Le trait horizontal représente le % de temps cumulé pour lequel le toit de la nappe est à moins de 50 cm de profondeur

Les statiques sur la profondeur de nappe peuvent également être représentées sous forme de courbe de distribution cumulée (Figure 27). Dans le cas du piézomètre F5, on peut lire sur le graphique que la profondeur de nappe est inférieure à 50 cm sur environ 80% de l'année hydrologique 2019- 2020.



Cartes piézométriques

Les cartes piézométriques sont des outils de base en hydrogéologie. Elles permettent de visualiser la géométrie du toit de la nappe grâce à la représentation des isopièzes. Il est dès lors possible de définir le sens des écoulements et d'estimer les gradients hydrauliques sur une distance donnée sur l'ensemble de la zone représentée par la carte. Elles peuvent se tracer à la main, en reliant tous les points de même hauteur d'eau (interpolation manuelle à l'aide d'une règle) ou elles peuvent se réaliser à l'aide de programmes d'interpolations spatiale (GIS, SURFER, etc.). Cependant, pour qu'elles soient représentatives, leur construction doit prendre en compte un nombre de piézomètres suffisamment important, bien distribués sur la zone d'études, et des conditions limites bien définies.

Dans le cas contraire, il faut considérer la carte piézométrique avec précaution car le résultat d'une interpolation à partir d'un faible nombre de points de mesure peut être hasardeux. L'hétérogénéité des caractéristiques du milieu en termes de perméabilité est un facteur déterminant pour définir la densité de point à mesurer. Une connaissance suffisante de ces caractéristiques est recommandée. Toutefois, lorsque le nombre de points est suffisant et lorsque les conditions hydrauliques dégagent une tendance forte, la carte piézométrique peut être représentative de la dynamique du toit de la nappe. Sous ces conditions, elle peut se révéler utile à l'interprétation et apporter des arguments pour démontrer l'efficacité de la restauration, comme sur l'exemple Figure 28 réalisé à partir de 15 points.

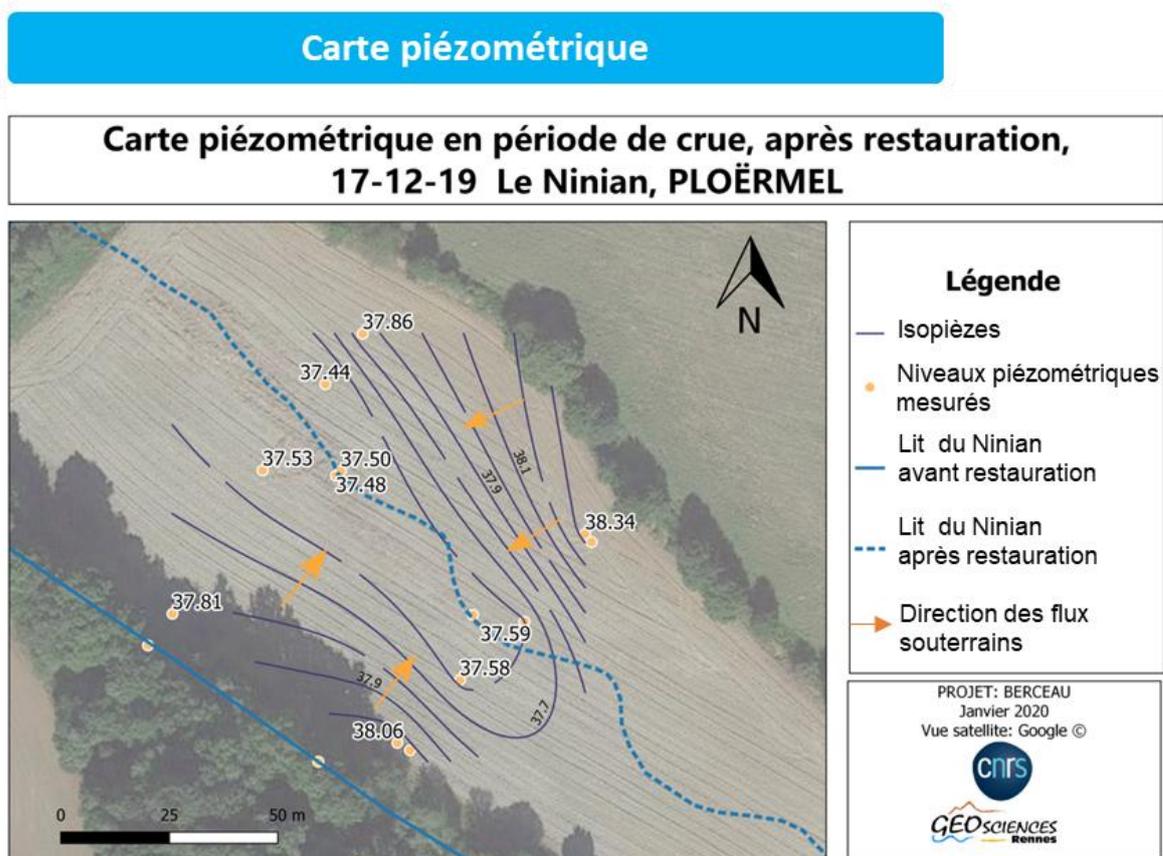


Figure 28 : Carte piézométrique réalisée à partir de 15 données de niveau d'eau à l'aide du logiciel SURFER sur le site du Côté-Malville, à Ploërmel (56). Les versants alimentent le cours d'eau de manière symétrique. Avant restauration, la charge imposée par l'ancien canal d'aménagement restauré engendrait une asymétrie des flux des versants vers le bas-fond.



Modélisation hydrogéologique

La modélisation hydrogéologique est également un outil efficace pour étudier les écoulements souterrains, et les transports de solutés associés. Elle est déjà très utilisée pour modéliser et quantifier les écoulements, par exemple dans le cas des échanges nappe-rivière (Flipo et al. 2012 ; Sun 2016 ; Bruner P. 2017 ; Pryet et al. 2015). Généralement basée sur la loi de conservation de la masse, elle repose sur des paramètres d'entrée (perméabilité, porosité, coefficient d'emmagasinement, transmissivité, température, etc), et conditions limites appliquées sur une représentation numérique discrétisée du milieu, en 2 ou 3 dimensions. Différents types de modèles existent en fonction des contextes hydrogéologiques. On peut citer les modèles hydrodynamiques distribués à base physique qui permettent d'intégrer les échanges nappe-rivière, tels que les modèles Marte (Modélisation d'aquifères par un maillage rectangulaire en régime transitoire pour le calcul hydrodynamique des écoulements ; Thiéry, 2006) ou FEFLOW (Trefry, 2007).

L'exactitude des résultats donnés par les modèles hydrogéologiques dépend beaucoup de la connaissance et de la précision des paramètres d'entrée, du niveau de discrétisation du milieu et de son homogénéité (isotropie). Dans un milieu hétérogène, les résultats sont souvent difficilement exploitables. La méthode à suivre pour l'utilisation des modèles hydrogéologiques dans l'étude des échanges nappe-rivière n'est pas décrite dans ce document. Elle est affaire d'hydrogéologues et nécessite une formation spécialisée qui va bien au-delà de ce qui est proposé dans BERCEAU. Certaines méthodologies pratiques spécifiques aux échanges nappe-rivière sont décrites dans « Guide technique des Interactions nappe-rivière » de l'AFB (Paran, Frédéric, et al., 2017). D'avantage de notions théoriques et pratiques sont disponibles dans l'ouvrage « Hydrogéologie quantitative, Marsily, G.D., 1981).



Ce qu'il faut retenir ...

- ⇒ Les **chroniques piézométriques** permettent d'étudier les variations de niveau de nappe et dans le cours d'eau, à différentes échelles temporelles.
- ⇒ Les **chroniques de gradients hydrauliques** donnent la possibilité de **repérer les moments où les flux nappe-rivière s'inversent et d'évaluer l'intensité relative de ces flux.**
- ⇒ Les **représentations en 2D et 3D** du toit de la nappe **montrent les sens des flux, et l'intensité des gradients** à des instants donnés.
- ⇒ Les **statistiques de profondeur de nappe** peuvent servir de critère en première approximation pour évaluer **l'effet de la restauration du cours d'eau sur la zone humide.**
- ⇒ Les **précipitations cumulées** sur la zone d'étude **doivent être prises en compte** pour comparer les statistiques sur différentes périodes données.

1.4. Synthèse de l'apport de la piézométrie sur les cas d'étude dans le cadre du projet BERCEAU

Dans le cadre du projet BERCEAU, 2 sites ont été suivis grâce à des réseaux de piézomètres. Pour le détail des résultats obtenus sur chacun des sites, se référer aux fiches multi-sites associées à ce document. Deux contextes non naturels ont été observés dans le cadre du projet BERCEAU, sur deux sites d'étude : le ruisseau du Pas de l'Âne (Vignoc, 35) et le ruisseau du Cô-Malville (Ploërmel, 56). Dans ces deux cas, le cours d'eau a historiquement été déplacé sur un versant, et ne passe plus par le fond de vallée. Ces systèmes correspondent à des cas généraux observables dans les bassins versants Bretons : « Cours d'eau « perché » sur un versant type canal d'amenée » pour le cas du Cô-Malville et « Cours d'eau surcreusé au pied d'un versant » dans le cas du Pas de l'Âne.

Dans le cas général et dans un contexte naturel, les cours d'eau sont positionnés dans le talweg (Figure 29). La géométrie des niveaux de nappe dans le bas-fond et sur les versants et les sens des flux dans ce contexte sont explicités dans la

Lorsque le cours d'eau est déplacé de sa position naturelle, on observe des modifications dans les gradients et dans les sens des flux. Les fonctionnements du système nappe-rivière pour les contextes "cours d'eau déplacé sur un versant » ou « en pied de versant » observés sur les sites de restauration de cours d'eau, suivis lors du projet BERCEAU, sont résumés dans la Figure 30. Ces contextes peuvent s'apparenter à des cas généraux et peuvent s'appliquer dans d'autres vallées aux caractéristiques similaires, lorsque la topographie et la géologie des versants est symétrique.



COURS D'EAU AU CENTRE DU TALWEG

Hors étiage

- La rivière est alimentée par les apports de nappe.
- Une partie des écoulements de nappe restent souterrains.

En crue

- Pendant l'épisode de crue, le niveau d'eau dans le cours d'eau est momentanément plus élevé que le niveau de la nappe au voisinage direct du cours d'eau ce qui induit localement des flux de la rivière vers la nappe.

Etiage

- Le cours d'eau draine la nappe dans le bas fond et cette action drainant s'arrête quand le niveau de la nappe est inférieur à l'altitude du cours d'eau.
- Le cours d'eau est alors à sec.

Dans le cas d'un cours d'eau positionné dans le talweg, les niveaux piézométriques sont symétriques par rapport à l'axe de la vallée

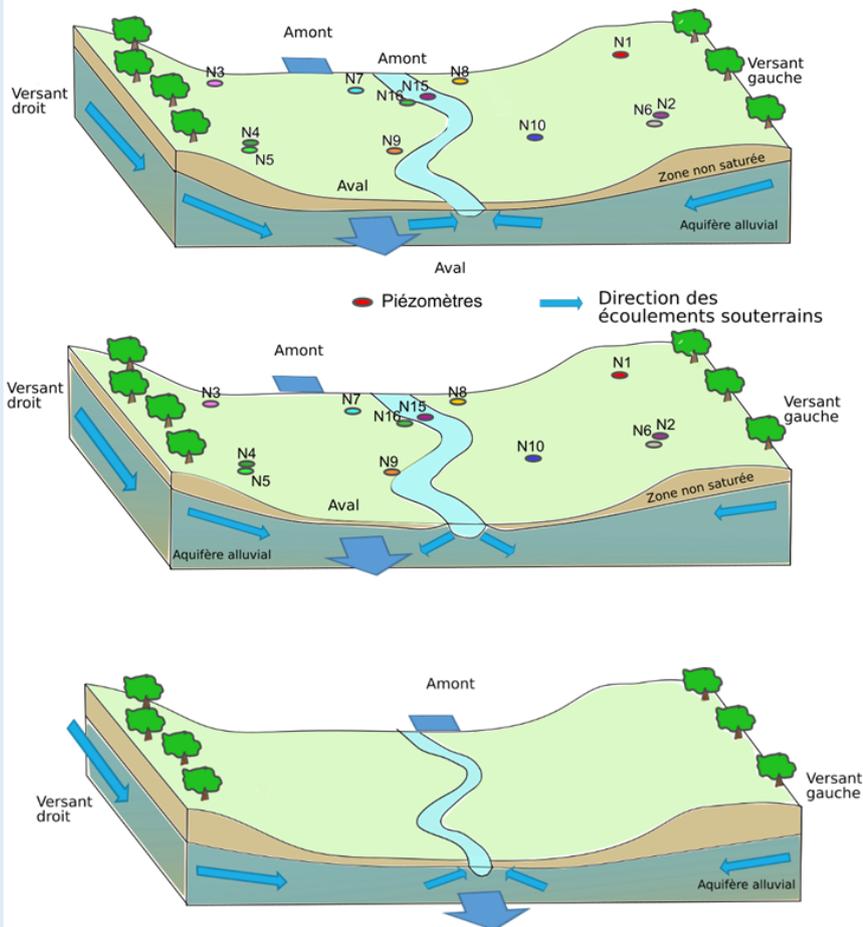


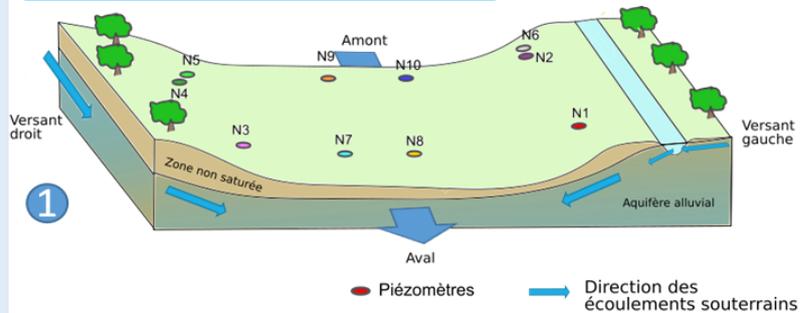
Figure 29 : Bloc 3D légendés, montrant la dynamique du système nappe-rivière dans le cas où le cours d'eau est replacé dans le talweg. Illustration du site du Côté-Malville (piézomètres N1 à N10), avant restauration et hors étiage, en période de crue et hors période de crue. S'applique également au site du Pas de l'Âne.

COURS D'EAU DEPLACÉ SUR UN VERSANT OU EN PIED DE VERSANT

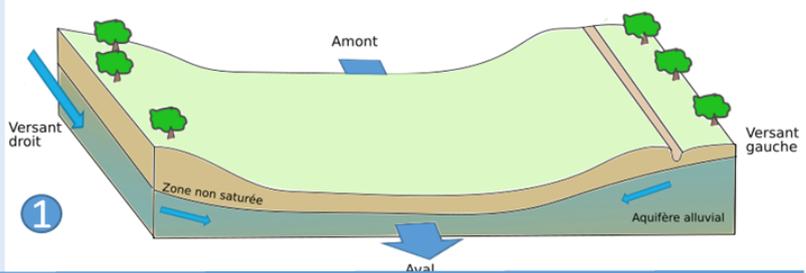
1 Cours d'eau déplacé sur le versant

- Tant qu'il y a un apport amont dans le chenal perché, on maintient un niveau de nappe indépendant du niveau de nappe plus haut sur le versant, ce qui engendre une **asymétrie des gradients piézométriques et des flux entre le versant droit et le versant gauche**
- Lorsqu'il n'y a plus d'apport amont dans le cours d'eau, le chenal peut drainer le versant.
- Quand le niveau piézométrique du versant droit est inférieur à l'altitude du fond du chenal on récupère une symétrie des apports des versants en direction du bas fond.

Apports d'eau amonts dans le cours d'eau



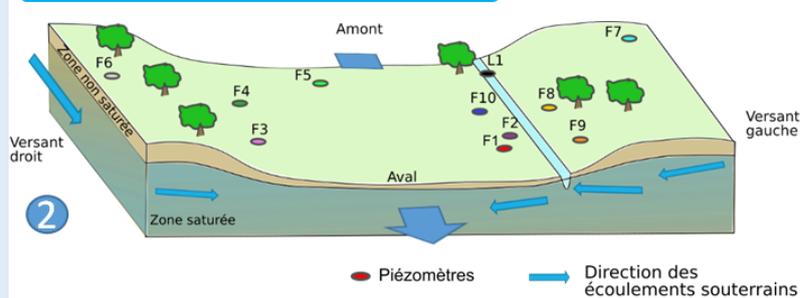
Pas d'apports d'eau amonts dans le cours d'eau



2 Cours d'eau déplacé en pied de versant

- Lorsque le chenal est positionné en pied de versant, il induit principalement une action drainante des flux arrivant dans le bas fond et notamment ceux du versant gauche.
- L'asymétrie des niveaux piézométriques entre les deux versants est moindre que dans le cas de figure du cours d'eau « perché ».
- Quand le niveau piézométrique sur le versant devient inférieur à l'altitude du fond du chenal, le cours d'eau draine uniquement le bas fond.
- Cette action drainant s'arrête quand le niveau piézométrique du bas fond est inférieur à l'altitude du chenal.

Apports d'eau amonts dans le cours d'eau



Pas d'apports d'eau amonts dans le cours d'eau

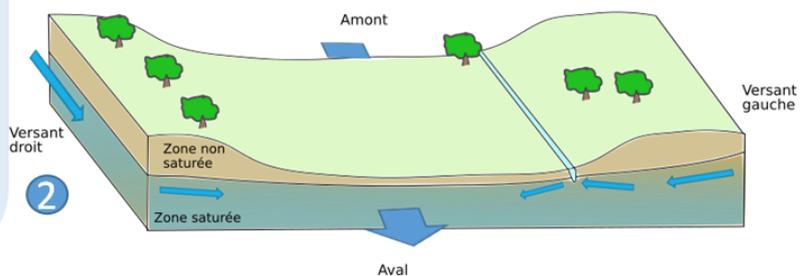


Figure 30 : Fiches synthétiques sous la forme de bloc 3D légendés, montrant la dynamique du système nappe-rivière dans les contextes où le cours d'eau est déplacé contre ou sur un versant. Illustration des sites du Pas de l'Âne (piézomètres F1 à F10) et du Côté-Malville (piézomètres N1 à N10), avant restauration et hors étiage, en période de crue et hors période de crue.



Ce qu'il faut retenir ...

- ⇒ La **position du cours d'eau dans le vallon est déterminante** dans le sens et la quantité des flux entre nappe et rivière.
- ⇒ En Bretagne, **l'eau présente dans le bas-fond provient majoritairement de la nappe** quel que soit le contexte (étiage ou crue)
- ⇒ **L'apport de la nappe au débit d'étiage des cours d'eau est maximum quand le cours d'eau se situe dans le talweg.** Plus le **cours d'eau est déplacé** en hauteur sur le versant, **plus le risque** d'assèchement du cours d'eau est important.



Annexe piezométrie :

Fiches techniques 1, 2, 3 et 4

Les fiches techniques sont regroupées dans les annexes ci-contre. Elles constituent des outils pratiques pour la mise en place de certaines techniques de suivi, tel que les piézomètres ou les limnimètres. D'autres décrivent les protocoles de mesures : jaugeages, test de perméabilité, etc.

Réalisation de micro-piézomètres

Réalisation micro-piézomètres

Fiche technique
1

Les piézomètres permettent d'étudier les nappes d'eau souterraines et leurs relations avec les cours d'eau. Les piézomètres de faible profondeur (<2m) dans des terrains meubles peuvent être réalisés à l'aide d'une tarière manuelle. Cette fiche présente la réalisation pas à pas d'un micro-piézomètre, pour un coût estimé de 120 € (hors tarière, sonde et protection métallique).

Les caractéristiques d'un piézomètre (profondeur, diamètre) et son implantation sont à définir au préalable en fonction des objectifs fixés et de la conductivité hydraulique de la nappe. Pour étudier les relations nappe-rivière, il est intéressant de placer plusieurs piézomètres suivant la topographie et à une distance croissante du cours d'eau (lignes perpendiculaires au cours d'eau par exemple).

La conductivité hydraulique de la nappe peut être caractérisée par un **slug test** : voir la fiche technique.

Etapas de réalisation

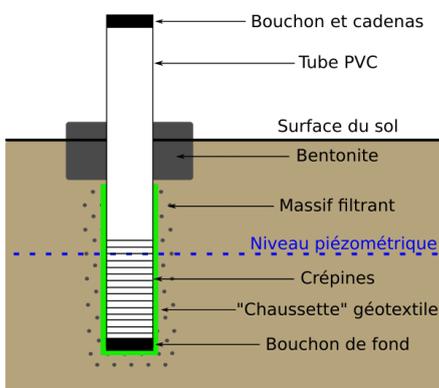
Le piézomètre est constitué d'un tube PVC en partie percé (= crépiné) pour laisser circuler l'eau. Il est possible d'acheter des tubes déjà préparés. Sinon pour un piézomètre "maison" : couper le tube de la longueur voulue et faire les crépines à l'aide d'une scie à métaux (fentes espacées de 1 cm) ou d'une perceuse (trous tous les 2 cm). Installer les crépines au minimum à 50 cm de profondeur par rapport au sol (boucher les crépines avec du scotch si besoin).

- 1 Réaliser le trou du piézomètre à la tarière manuelle. Observer la nature des matériaux rencontrés.
- 2 Boucher le tube à sa base pour éviter la remontée de matériaux dans le tube.
- 3 Scotcher un **géotextile** ("chaussette") autour du tube crépiné pour éviter l'obturation des crépines par les fines.
- 4 Installer dans le trou fait à la tarière le tube crépiné surmonté par un tube plein.
- 5 Remplir l'espace interstitiel entre le tube et le trou nu par un **massif filtrant** (=graviers de diamètre supérieur à la taille des crépines) afin d'éviter l'obturation des crépines par les fines.
- 6 Etanchéifier : verser de la **bentonite** (argile gonflante) sur la partie supérieure (au moins 5 cm d'épaisseur) du trou pour empêcher l'infiltration directe d'eau depuis la surface le long du tube.

Prendre des notes pendant l'installation :

- Date, lieu
- Nom du piézomètre
- Description du log de forage
- Caractéristiques du forage
- Repère de mesure pour la profondeur d'eau
- Etapes réalisées

→ cf fiche de terrain



- 7 **Développer** le piézomètre : pomper ou injecter de l'eau dans le piézomètre pour le nettoyer afin d'améliorer la circulation d'eau entre le milieu poreux et le piézomètre.
- 8 Protéger le piézomètre : mettre un bouchon fermé par un cadenas en haut du tube pour empêcher que l'eau de pluie n'entre et sécuriser l'installation.
- 9 Nivelier le piézomètre : à l'aide d'un GPS, d'une station topographique ou d'un niveau pour pouvoir comparer les niveaux d'eau entre piézomètres et calculer des gradients. Cela permet de calculer la cote piézométrique à partir d'une référence..
- 10 **Mesurer** et suivre la profondeur d'eau avec une sonde piézométrique et une sonde de pression automatique. Noter le repère de mesure, la date et l'heure à chaque mesure.



Matériel nécessaire

- ✓ Tarière pédologique de diamètre suffisant pour introduire le tube et prévoir l'introduction de massif filtrant (diamètre standard 80 mm)
- ✓ Tarière pédologique de diamètre supérieur pour réaliser un pré-trou de 30 cm de profondeur environ
- ✓ Tube PVC crépiné sur la partie inférieure, tube plein sur la partie supérieure (diamètre standard 63mm)
- ✓ Bouchon haut du tube et fond de tube
- ✓ Capot de protection métallique
- ✓ "Chaussette" géotextile
- ✓ Bentonite (argile gonflante) pour étanchéifier
- ✓ Massif filtrant (graviers lavés calibrés ou sable grossier)
- ✓ Cadenas et clé
- ✓ Niveau (pour vérifier la verticalité du tube)
- ✓ Pompe (manuelle ou péristaltique + batterie)
- ✓ Sonde piézométrique manuelle
- ✓ Sonde de mesure de pression programmable
- ✓ Fil kevlar ou câble pour accrocher la sonde
- ✓ Pince coupante (pour le fil ou câble)
- ✓ Colle pour PVC (si piézomètre maison)
- ✓ Marqueur permanent (pour écrire le nom du piézomètre sur le tube)
- ✓ Mètre pour mesurer les cotes verticales
- ✓ Carnet de terrain et appareil photo
- ✓ Seau

Points de vigilance sur l'installation des piézomètres :

- Avant de planifier la pose de piézomètres, vérifier à quelle profondeur il est possible de pénétrer avec la tarière manuelle. Cette technique peut être utilisée seulement dans des terrains meubles.
- Pour séparer les horizons étudiés, on peut choisir de crépiner seulement une partie du piézomètre. Dans ce cas, il faut mettre de la bentonite au-dessus du niveau crépiné afin d'empêcher les écoulements verticaux.
- L'installation de capots métalliques de protection est nécessaire lorsque les piézomètres sont installés sur des parcelles fauchées ou des lieux de passage. Les piézomètres peuvent être cachés par la végétation, penser à une signalétique (fanions par exemple).

Suivi de la profondeur d'eau

La profondeur d'eau peut être suivie automatiquement à l'aide d'un capteur de pression. Il faut également utiliser une sonde piézométrique manuelle pour des relevés ponctuels de contrôle (risque de dérive des capteurs).

Il existe deux types de capteurs de pression :

- **Capteur ventilé** : le capteur comporte un tube de ventilation qui permet de compenser automatiquement la pression atmosphérique. La pression mesurée correspond donc à la pression de la colonne d'eau (coûteux)
- **Capteur de pression absolue** : la mesure correspond à la somme de la pression de la colonne d'eau au-dessus du capteur et de la pression atmosphérique. Dans ce cas, il est indispensable de placer une sonde barométrique à proximité pour suivre la pression atmosphérique et corriger la mesure de pression. Un capteur **baro** peut être utilisé pour plusieurs capteurs de pression dans un rayon de 5 km environ.

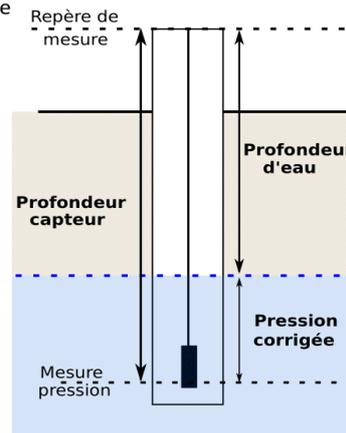
L'intervalle de mesure est adapté en fonction de l'objectif visé, c'est-à-dire de l'échelle de temps des variations observées :

Slug test dans un milieu perméable → intervalle de temps court (seconde)

Chronique long terme de piézométrie → intervalle plus long (15 min ou plus)

A chaque intervalle, le capteur enregistre la date et l'heure de mesure, la pression et la température. Pour obtenir la cote piézométrique en m NGF :

- 1 Corriger la pression mesurée à l'aide de la pression barométrique : logiciels mis à disposition par les marques de capteurs
- 2 Convertir la pression corrigée en mètres de colonne d'eau (mce)
- 3 Calculer la profondeur d'eau par rapport au repère de mesure = profondeur du capteur - pression corrigée
- 4 Calculer la cote piézométrique en m NGF = nivellement du piézomètre - profondeur d'eau



La mesure de profondeur du capteur se fait au niveau de la membrane de celui-ci.

Etre vigilant sur les repères de mesures : bien noter quel est le repère de mesure pour chaque piézomètre.

Faire un suivi de l'état du piézomètre : profondeur, étanchéité par rapport à la surface, éventuel bouchage...

Référence : Fiche technique du Réseau d'expérimentation sur la réhabilitation de zones humides en Bretagne



Réalisation de micro-piézomètres

Réalisation micro-piézomètres

Fiche terrain
1

Date : _____ Nom du piézomètre : _____

Lieu : _____

Méthode de forage : _____

Etapas réalisées :

<input type="checkbox"/> Géotextile	<input type="checkbox"/> Massif filtrant	<input type="checkbox"/> Bentonite
<input type="checkbox"/> Développement	<input type="checkbox"/> Bouchon haut et bas	<input type="checkbox"/> Cadenas
<input type="checkbox"/> Nivellement	<input type="checkbox"/> Mesure piézométrique	<input type="checkbox"/> Installation capteur pression

Repère de mesure : _____

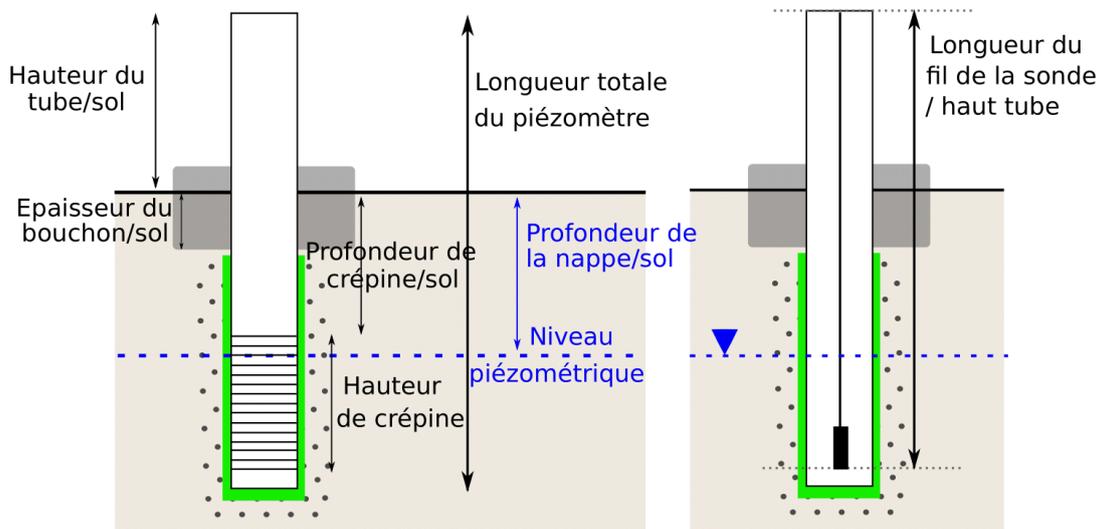
Log de forage

Décrire les matériaux rencontrés lors du creusement du trou de forage : nature du substrat, couleur, granulométrie, éléments, en lien avec la profondeur.

Profondeur	Nature, couleur, granulométrie...

Mesures de longueurs

Bien mesurer les longueurs lors de l'installation du piézomètre. Noter le repère de mesure :



Le test hydraulique (slug test)

Le test hydraulique permet de déterminer la conductivité hydraulique d'une nappe libre.

En pratique on peut introduire rapidement (ou extraire) un volume d'eau connu. Le niveau d'eau augmente jusqu'à une valeur maximale H_1 au-dessus du niveau piézométrique initial H_0 . Ensuite le niveau diminue car l'eau est drainée vers le milieu avoisinant.

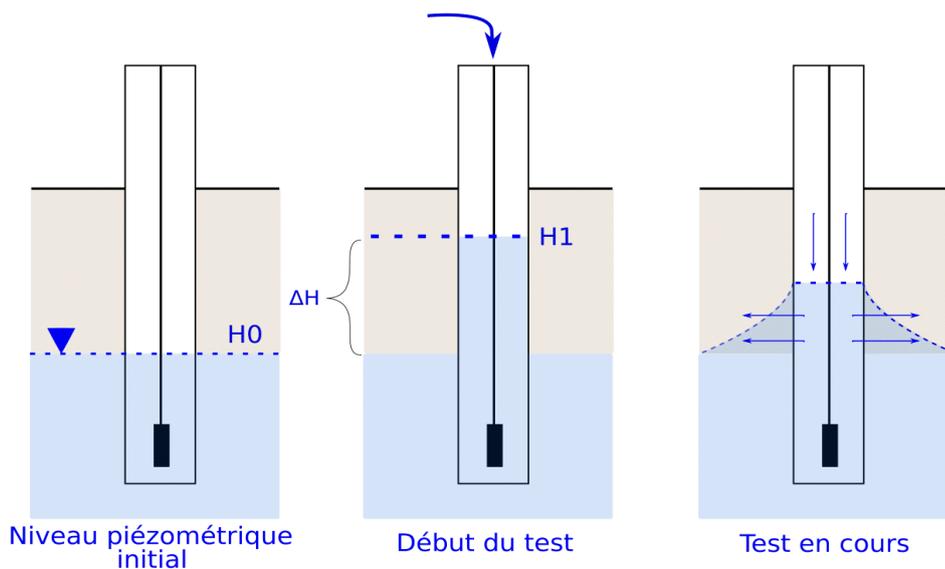
Le niveau d'eau est suivi en continu pendant le test jusqu'au retour au niveau initial - à l'aide d'une sonde piézométrique manuelle et d'un capteur de pression automatique.

Le traitement des données permet d'estimer la conductivité hydraulique K de la nappe autour du piézomètre. La solution utilisée pour interpréter les données est le modèle de Bouwer and Rice (1976).

Pour l'installation d'un piézomètre à la tarière pédologique : voir la fiche technique 1.

Matériel nécessaire

- ✓ Slug ou béccher de volume connu (1L)
- ✓ Capteur de pression automatique
- ✓ Ordinateur et câble pour programmation du capteur
- ✓ Chronomètre
- ✓ Sonde piézométrique manuelle
- ✓ Fil kevlar
- ✓ Pince coupante
- ✓ Carnet de terrain





Conductivité hydraulique : test hydraulique

Protocole

- 1 S'informer sur les caractéristiques du piézomètre (diamètre, profondeur, crépines) et du milieu (géologie, propriétés de la nappe).
- 2 Programmer le capteur de pression automatique avec un intervalle d'acquisition court (seconde pour milieu très perméable, minute pour peu perméable)
- 3 Mesurer et consigner le niveau d'eau initial H0 à l'aide de la sonde piézométrique manuelle
- 4 Installer le capteur dans le piézomètre. Si utilisation d'un slug, le capteur doit être placé plus profond que celui-ci.
- 5 Introduire rapidement le slug ou le volume d'eau connu (pour un micro-piézomètre, 1L est généralement suffisant). L'élévation de niveau d'eau doit être "instantanée".
- 6 Mesurer et consigner le niveau d'eau H1 à l'aide de la sonde piézométrique manuelle.
- 7 Prendre des mesures régulières avec la sonde piézométrique jusqu'au retour à l'équilibre.
- 8 Répéter le test 3 fois. La répétition est d'autant plus importante que le retour à l'équilibre est rapide.
- 9 Arrêter le capteur de pression et exporter les données. Les interpréter à l'aide de la feuille de calcul **Slug_test_solution.xlsx**. Dans la feuille de calcul compléter les caractéristiques du piézomètre (cases vertes). Les calculs se font automatiquement (cases rouges). Le calcul donne la conductivité hydraulique K (m/s) à partir de la solution de Bouwer and Rice (1976).

Prendre une bonne mesure piézométrique :

- Date et heure
- Nom du piézomètre
- Repère de mesure
- Mesure de la profondeur d'eau par rapport au repère
- Mesure de la profondeur du piézomètre

Solution de Bouwer and Rice (1976)

La solution de Bouwer and Rice est basée sur la résolution de l'équation de Thiem en régime permanent dans un puits. Elle peut être utilisée dans une nappe libre pour un puits complètement ou partiellement pénétrant, c'est-à-dire que l'intégralité de l'aquifère est crépiné ou non. C'est une technique plus rapide et simple qu'un essai de pompage.

Le logarithme de la variation de profondeur d'eau en fonction du temps est une droite. La pente de cette droite permet de déterminer la conductivité hydraulique K.

Références

Bouwer, H, Rice, R. C., A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, 12(3), 423-428, 1976.

Installation d'un limnimètre

Objectif : suivre les variations de hauteur d'eau dans des petits cours d'eau via une installation légère et à bas coût.

En général, les cours d'eau d'ordre de Strahler faibles ne sont pas équipés de station de jaugeage. Il est donc difficile d'étudier la dynamique de ces cours d'eau. Cette fiche propose l'installation d'un limnimètre à bas coût pour un suivi automatique des variations de hauteur d'eau dans les cours d'eau à l'aide de sondes de pression.

Il est également intéressant de connaître le débit du cours d'eau. Pour cela, il faut établir une courbe expérimentale entre hauteurs d'eau et débits (= courbe de tarage). Des mesures ponctuelles de débits doivent être prévues.

Emplacement du limnimètre

Bien choisir l'emplacement du limnimètre est crucial pour obtenir des données de bonne qualité :

- la section doit être homogène (où le débit peut être mesuré)
- le limnimètre doit être accessible depuis la berge même en crue,
- le limnimètre doit être immergé même en basses eaux.

Matériel nécessaire

- ✓ Tube PVC de diamètre 63mm de 2m de long
- ✓ Coude PVC 63mm
- ✓ Bouchon PVC 63mm
- ✓ 2 barres métalliques 2m
- ✓ Scie à métaux
- ✓ Colliers métalliques
- ✓ Outils : tournevis, masse, pince coupante
- ✓ Colliers métalliques
- ✓ Colle
- ✓ Accroche pour les sondes + écrou
- ✓ Niveau (pour vérifier la verticalité du tube)
- ✓ Sonde de pression absolue + sonde barométrique
- ✓ Ordinateur + connecteur pour la sonde
- ✓ Fil kevlar ou câble pour accrocher la sonde
- ✓ Gants
- ✓ Visseuse + forets

Principe de la mesure

La hauteur d'eau est suivie automatiquement à l'aide d'un capteur de pression absolue. La mesure correspond à la somme de la pression de la colonne d'eau au-dessus du capteur et de la pression atmosphérique.

Une sonde barométrique placée à proximité permet de mesurer la pression atmosphérique et de corriger la mesure de pression.



Limnimètre installé sur la Flume

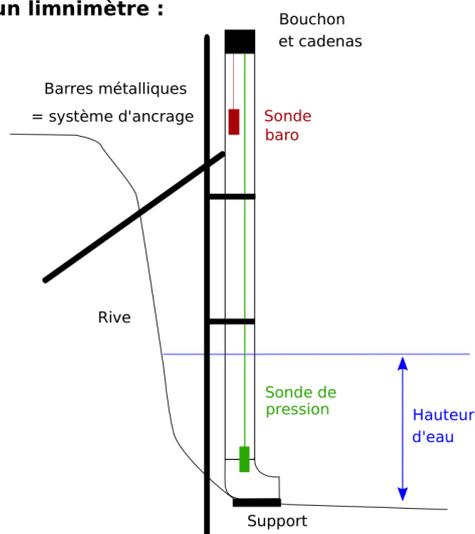


Etapes de réalisation

- 1 Choisir l'emplacement du limnimètre suivant les critères précédents.
- 2 Préparer le limnimètre : coller un "coude" à la base du tube, percer le bouchon pour mettre l'accroche pour les sondes.
- 3 Installer solidement le système d'ancrage (barres métalliques) dans la rive et dans le fond du cours d'eau. Caler le coude sur le fond du lit ou sur une roche pour éviter tout mouvement.
- 4 Accrocher le limnimètre au système d'ancrage (colliers métalliques).
- 5 Programmer les sondes (intervalles de quelques minutes, par exemple 15min) puis les installer dans le limnimètre. La sonde barométrique ne doit pas être immergée même en crue. La sonde de pression doit au contraire être immergée en permanence : l'installer au fond du limnimètre.

Lors de l'installation, noter la hauteur d'eau mesurée au pied du limnimètre. Cette mesure permettra de caler les données de sonde.

Schéma d'installation d'un limnimètre :



Points d'attention

- Le limnimètre peut être bouché par des sédiments : lors des relevés "nettoyer" le limnimètre en versant un seau d'eau depuis le haut du tube.
- Les sondes doivent pouvoir être relevées même en cas de crues.
- Pour l'établissement de la courbe de tarage (hauteur/débit) prévoir des mesures de débit régulières.

Capteurs automatiques de pression

Fiche technique
4
Capteurs automatiques de pression

Un capteur automatique de pression permet de mesurer et d'enregistrer la pression d'eau au-dessus du capteur, à un intervalle de temps régulier. Ils sont très utilisés dans les suivis de niveaux d'eau.

Principe d'utilisation

Il existe deux types de capteurs de pression :

- **Capteur de pression absolue** : la mesure correspond à la somme de la pression de la colonne d'eau au-dessus du capteur et de la pression atmosphérique. Dans ce cas, il est indispensable de placer un capteur barométrique à proximité pour suivre la pression atmosphérique afin de corriger la mesure de pression. Un capteur baro peut être utilisé pour plusieurs capteurs de pression dans un rayon de 5 km environ.

- **Capteur ventilé** : il permet de compenser automatiquement la pression atmosphérique. La pression mesurée correspond donc à la pression de la colonne d'eau uniquement. Ce dispositif est plus coûteux.

Quel intervalle de temps choisir entre les mesures ?

Il doit être adapté en fonction de l'objectif de la mesure.

Slug test dans un milieu perméable → Intervalle de temps court (seconde)
Chronique long terme de piézométrie → Intervalle plus long (15 min ou plus)

En pratique

- 1 Attacher la sonde au bout d'un fil. Noter la longueur depuis le bout du fil jusqu'à la membrane de la sonde (bas de la sonde).
- 2 Programmer la sonde à l'aide du logiciel adapté, en prenant soin de choisir l'intervalle et l'unité de mesure.
- 3 Immerger la sonde. Faire attention à ce qu'elle soit immergée tout au long de la mesure, surtout lorsque les mesures se réalisent sur de grandes périodes.
- 4 A la fin de la mesure, stopper l'enregistrement et télécharger les données.

Correction barométrique

Si l'on utilise un capteur de pression absolue : à chaque pas de temps, soustraire la valeur de pression atmosphérique à la mesure de pression totale enregistrée. Il en résulte la pression de la colonne d'eau au-dessus de la sonde.

Pression de la colonne d'eau (ex: en Bar) = Pression absolue - Pression atmosphérique

Certains logiciels fournis avec les sondes permettent un calcul automatique.

Calcul de la cote piézométrique en m NGF

La chronique obtenue comporte la date, l'heure, la pression corrigée et la température. La démarche pour obtenir les valeurs de cote piézométrique en m NGF est la suivante :

- 1 Convertir la pression corrigée en **mètres de colonne d'eau (mCE)**

Ex: 1 Bar = 10.197 mCE

- 2 Calculer la **profondeur d'eau par rapport au repère de mesure** (généralement le tube du piézomètre):

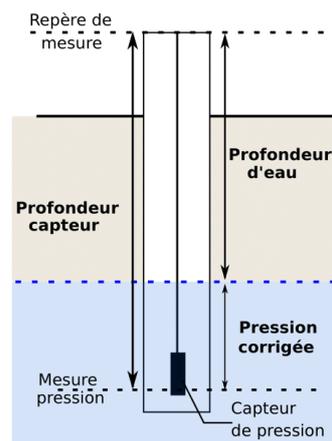
Profondeur d'eau/repère (m) = Profondeur capteur - Pression corrigée

- 3 Calculer la **profondeur par rapport au sol:**

Profondeur d'eau/sol (m) = Profondeur d'eau/repère - Hauteur du repère

- 4 Calculer la **cote piézométrique:**

Cote piézométrique (mNGF) = Altitude au sol du point de mesure - Profondeur d'eau/sol



La mesure de profondeur du capteur se fait au niveau de la membrane de celui-ci. Etre **vigilant sur les repères de mesures** : bien noter quel est le repère de mesure pour chaque piézomètre.

Exemple des sondes Rugged Troll 10ft

Se référer au **manuel d'utilisateur LevelTROLL** (pages 32-43).



Bibliographie

- Agence de l'eau RMC. (2015). *Caractérisation Des Échanges Nappes/ Rivières En Milieu Alluvionnaire, Guide méthodologique*.
- Ahmadi, S. H., & Sedghamiz, A. (2008). Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. *Environmental Monitoring and Assessment*, 138(1-3), 357-368. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9803-2>
- Baxter, C., Hauer, F. R., & Woessner, W. W. (2003). Transactions of the American Fisheries Society Measuring Groundwater – Stream Water Exchange: New Techniques for Installing Minipiezometers and Estimating Hydraulic Conductivity Measuring Groundwater – Stream Water Exchange: New. *Transactions of the American Fisheries Society*, 132(3), 493-502. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(2003\)132<0493](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2003)132<0493)
- Bouwer, H., Rice, R. C., & Water, U. S. (1976). *Test for Determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers With Completely or Partially Penetrating Wells*. 12(3).
- Bouwer, H. (1989). The Bouwer and Rice Slug Test—An Update a. *Groundwater*, 27(3), 304-309.
- Brown, D. L., Narasimhan, T. N., & Demir, Z. (1995). An evaluation of the Bouwer and Rice method of slug test analysis. *Water Resources Research*, 31(5), 1239-1246.
- Brunner, P., Therrien, R., Renard, P., Simmons, C. T., & Franssen, H. J. H. (2017). Advances in understanding river-groundwater interactions. *Reviews of Geophysics*, 55(3), 818-854.
- Butler Jr, J. J. (2019). *The design, performance, and analysis of slug tests*. Crc Press.
- Cardenas, M. B., Wilson, J. L., & Zlotnik, V. A. (2004). Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange. *Water Resources Research*, 40(8), 1-14. <https://doi.org/10.1029/2004WR003008>
- Chiaudani, A., Di Curzio, D., Palmucci, W., Pasculli, A., Polemio, M., & Rusi, S. (2017). Statistical and fractal approaches on long time-series to surface-water/groundwater relationship assessment: A central Italy alluvial plain case study. *Water (Switzerland)*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/w9110850>
- Darcy, Henry. *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application...* Victor Dalmont, 1856.
- Datry, T., Marmonier, P., & Lafont, M. (2008). La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau. *Ingénieries*, (54), 3-18.
- Fleckenstein, J. H., Niswonger, R. G., & Fogg, G. E. (2006). River-aquifer interactions, geologic



heterogeneity, and low-flow management. *Ground Water*, 44(6), 837–852.
<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00190.x>

- Flipo, N., Monteil, C., Poulin, M., de Fouquet, C., & Krimissa, M. (2012). Hybrid fitting of a hydrosystem model: Long-term insight into the Beauce aquifer functioning (France). *Water Resources Research*, 48(5).
- Flipo, N., Mouhri, A., Labarthe, B., Biancamaria, S., Rivière, A., & Weill, P. (2014). Continental hydrosystem modelling: The concept of nested stream-aquifer interfaces. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 3121–3149.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (No. 629.1 F7).
- Forum des Marais Atlantiques.(2013). *Boîte à outils « Zones Humides »*, Agence de l'eau Seine-Normandie
- Graillet, D., Paran, F., Dujardin, F., Marmonier, P., Bornette, G., Flipo, N., ... Chatelier, M. (2014). *Caractérisation des échanges nappes / rivières de l ' échelle du tronçon à l ' échelle régionale par métrique expérimentale ou modélisation*.
- Gribovszki, Z., Kalicz, P., Szilágyi, J., & Kucsara, M. (2008). Riparian zone evapotranspiration estimation from diurnal groundwater level fluctuations. *Journal of Hydrology*, 349(1–2), 6–17. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.10.049>
- Harvey, J. W., Wagner, B. J., & Bencala, K. E. (1996). By Was S); Hyporheic Exchange Persisted When Base Flow Was Decreasing By. *Water Resources Research*, 32(8), 2441–2451.
- Kalbus, E., Reinstorf, F., & Schirmer, M. (2006). Measuring methods for groundwater, surface water and their interactions: a review. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 3(4), 1809–1850. <https://doi.org/10.5194/hessd-3-1809-2006>
- Lalot, E., & Lalot, E. (2014). *Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l ' évaluation quantitative et la caractérisation des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières - Application au Rhône* .
- Landon, M. K., Rus, D. L., & Edwin Harvey, F. (2001). Comparison of instream methods for measuring hydraulic conductivity in sandy streambeds. *Ground Water*, 39(6), 870–885. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2001.tb02475.x>
- Lautz, L. K. (2008). Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in a semi-arid riparian zone. *Hydrogeology Journal*, 16(3), 483–497. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0239-0>
- Lewandowski, J., Meinikmann, K., & Krause, S. (2020). Groundwater-surface water interactions: Recent advances and interdisciplinary challenges. *Water (Switzerland)*, 12(1), 1–7. <https://doi.org/10.3390/w12010296>



- Lewis, Q. W., Lindroth, E. M., & Rhoads, B. L. (2018). Integrating unmanned aerial systems and LSPIV for rapid, cost-effective stream gauging. *Journal of Hydrology*, 560, 230–246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.008>
- Malard, F., Lafont, M., Burgherr, P., Ward, J.-V., 2001, A comparison of longitudinal patterns in hyporheic and benthic Oligochaete assemblages in a glacial river, Arctic, Antarctic and Alpine Research, n° 33(4), p. 457-466
- Mason, R. (2004). Evaluating a Radar-based, Non Contact Streamflow Measurement System in the San Joaquin River at Vernalis, California. *US Geological Survey Open File Report*.
- Marsily, G. D. (1981). Hydrogéologie quantitative. Collection Sciences de la terre.
- Mcmillan, H., Krueger, T., & Freer, J. (2012). Benchmarking observational uncertainties for hydrology: Rainfall, river discharge and water quality. *Hydrological Processes*, 26(26), 4078–4111. <https://doi.org/10.1002/hyp.9384>
- Paran, F., Graillet, D., Arthaud, F., Bornette, G., Chatelier, M., Douez, O., ... & Mouhri, A. (2017). Guide technique Interactions nappe-rivière Pirene-seine. (2015). Programme PIREN-Seine Rapport de synthèse 2011-2015 Volume 2 “ Interfaces nappe-rivière”
- Pryet, A., Labarthe, B., Saleh, F., Akopian, M., & Flipo, N. (2015). Reporting of stream-aquifer flow distribution at the regional scale with a distributed process-based model. *Water Resources Management*, 29(1), 139-159.
- Sun, X., Bernard-Jannin, L., Garneau, C., Volk, M., Arnold, J. G., Srinivasan, R., ... & Sánchez-Pérez, J. M. (2016). Improved simulation of river water and groundwater exchange in an alluvial plain using the SWAT model. *Hydrological Processes*, 30(2), 187-202.
- Thiéry, D., & Gutierrez, A. (2006). From modelling soil columns to large scale aquifers: an illustration of the MARTHE code capabilities. proceedings of the Blaubeuren, 6.
- Toth, J. (1995). Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology Journal*, 3(4), 4-16
- Trefry, M. G., & Muffels, C. (2007). FEFLOW: A finite-element ground water flow and transport modeling tool. *Groundwater*, 45(5), 525-528.
- Vergnaud-Ayraud, V., Aquilina, L., Labasque, T., & Abbott, B. (2015). *Impact du compartiment fracturé sur le temps de réponse des bassins : apports de la datation des eaux. Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues.*
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1998). Ground Water and Surface Water - A single Resource - U.S. Geological Survey Circular 1139. *USGS Publications, Circular 1(May)*, 79.



White, W. N. (1932). A method of estimating ground-water supplies based on discharge by plants and evaporation from soil: Results of investigations in Escalante Valley, Utah (Vol. 659). US Government Printing Office

White, D. S. (1993). Perspectives on defining and delineating hyporheic zones. *Journal of the North American Benthological Society*, 12(1), 61-69.

Zhang, P., Yuan, G., Shao, M. A., Yi, X., & Du, T. (2016). Performance of the White method for estimating groundwater evapotranspiration under conditions of deep and fluctuating groundwater. *Hydrological Processes*, 30(1), 106–118.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10552>



PARTIE 2 : Mesurer les débits des petits cours d'eau : méthodes, comparaison, innovations

Introduction partie 2

Le suivi des hauteurs d'eau et des débits lors de la restauration d'un cours d'eau apporte de nombreuses informations à l'heure d'évaluer l'efficacité de la restauration. Le débit d'un cours d'eau est un paramètre important sur de nombreux aspects. Il contrôle la morphologie du cours d'eau et la dynamique sédimentaire. Il reflète l'état de la connexion de la rivière à la nappe et de l'état de saturation du bassin versant suivant les conditions météorologiques. Il influe également sur les habitats et la biodiversité du cours d'eau. C'est donc un élément important à prendre en compte lors des suivis et des évaluations des opérations de restauration.

Le suivi des débits de petits cours nécessite des pas de temps de mesure fins (~15 à 20 minutes) pour bien décrire les variations temporelles rapides pendant les crues. La mesure directe des débits est de ce fait mal adaptée pour établir des chroniques de débits. La méthode classique est de suivre à l'aide de sondes les hauteurs d'eau à des sections bien identifiées (stations de jaugeage). Hauteurs d'eau qui sont traduites en débit en se référant à une courbe de tarage. Dans ce document, nous ne rappellerons pas les principes de l'hydrométrie mais nous apporterons un focus sur le cas particulier des petits cours d'eau.

Pour construire la courbe de tarage, il est nécessaire de mesurer une large gamme de débits et de hauteurs d'eau. Or, la difficulté principale dans la construction de cette courbe est de pouvoir mesurer une gamme de débits propres à chaque cours d'eau. En pratique, il est difficile d'effectuer un jaugeage lorsque le passage d'une crue est court (quelques heures). De plus, les méthodes de jaugeage ne sont pas toutes aussi précises selon les débits (difficulté à s'introduire dans le cours d'eau si la méthode de mesure est intrusive ou lame d'eau insuffisante aux faibles débits).

Les petits cours d'eau d'ordre de Strahler 1 ou 2 présentent des particularités en comparaison de rivières d'ordre de Strahler plus important. Les débits et les hauteurs d'eau y sont plus faibles, voire intermittents, avec un rapport entre la rugosité du fond et la hauteur souvent supérieur. Autant de caractéristiques qui peuvent limiter l'application de protocoles couramment mis en œuvre avec des moulinets ou des appareils acoustiques (ADCP). Le suivi des débits des petits cours d'eau peut être réalisé avec l'installation d'une section à seuil dont l'ouverture est calibrée pour obtenir les valeurs de débits avec des abaques. Mais la mise en place d'un seuil dans le cours de la rivière est antinomique avec les exigences de continuité hydro-sédimentaire. Le jaugeage au sel est une méthode bien adaptée pour les petits cours d'eau mais peut s'avérer imprécis pour des cours d'eau avec des circulations d'eau latérales secondaires importantes induites par la rugosité des berges.

Dans le cadre du projet BERCEAU, nous avons exploré l'utilisation de méthodes basées sur la mesure des vitesses de surface à l'aide de vidéos prises par des smartphones ou des pièges photographiques pour le jaugeage de petits cours d'eau. Ces techniques sont déjà développées depuis quelques années et n'ont pas encore fait l'objet d'une application pour des petits cours d'eau naturels.

L'objectif est de proposer de nouvelles méthodes de mesure de débit adaptées à ces cours d'eau, qui permettraient de construire la courbe de tarage rapidement, en limitant les moyens techniques, les déplacements et les coûts. Dans le cadre du projet BERCEAU, trois méthodes de mesure de débit à bas coût ont été testées. La première méthode est une méthode conventionnelle et largement documentée : le jaugeage au sel ou jaugeage par dilution. La seconde est une méthode basée sur la mesure d'une différence de charge sur le cours d'eau : la « velocity-head rod » ou « règle transparente ». La dernière méthode est celle du jaugeage vidéo.

Elle repose sur le calcul de vitesses de l'eau grâce à l'analyse de vidéos de traceurs flottants à la surface du cours d'eau. Les méthodes sont appliquées pour des gammes de débits différentes et sur plusieurs zones d'étude, puis sont comparées entre elles.

Dans le projet BERCEAU, afin de pouvoir mettre en évidence un éventuel impact des opérations de restauration sur les débits et les échanges nappe-rivière, un ou plusieurs limnimètres ont été installés à l'amont et à l'aval de chaque tronçon de cours d'eau restauré sur les sites du Pas de l'Âne et du Côté-Malville. La fréquence d'enregistrement des hauteurs d'eau dans la rivière est de 15 min. Pour chaque limnimètre, une courbe de tarage est construite à partir des différentes méthodes de jaugeage.

2.1. Principes des méthodes de jaugeage étudiées

2.1.1. Jaugeage au sel

Le jaugeage par dilution de sel est une méthode de mesure de débit consistant à injecter une solution saline et à mesurer sa dilution dans un cours d'eau, à travers la mesure de la conductivité électrique de l'eau. Elle est basée sur le principe de conservation de la masse (Figure 31). Cette méthode est peu coûteuse et est assez simple à mettre en application.

On injecte une masse connue de sel, préalablement dissoute dans un volume d'eau que l'on aura pris dans le cours d'eau. A l'aval de ce point, à une distance qui dépend du débit de la rivière, un conductimètre mesure la conductivité électrique à intervalle de temps régulier, ce qui permet de suivre le passage du "nuage de sel" en ce point. Le débit est calculé en divisant la masse de sel injectée par l'intégrale de la variation de concentration en sel en fonction du temps.

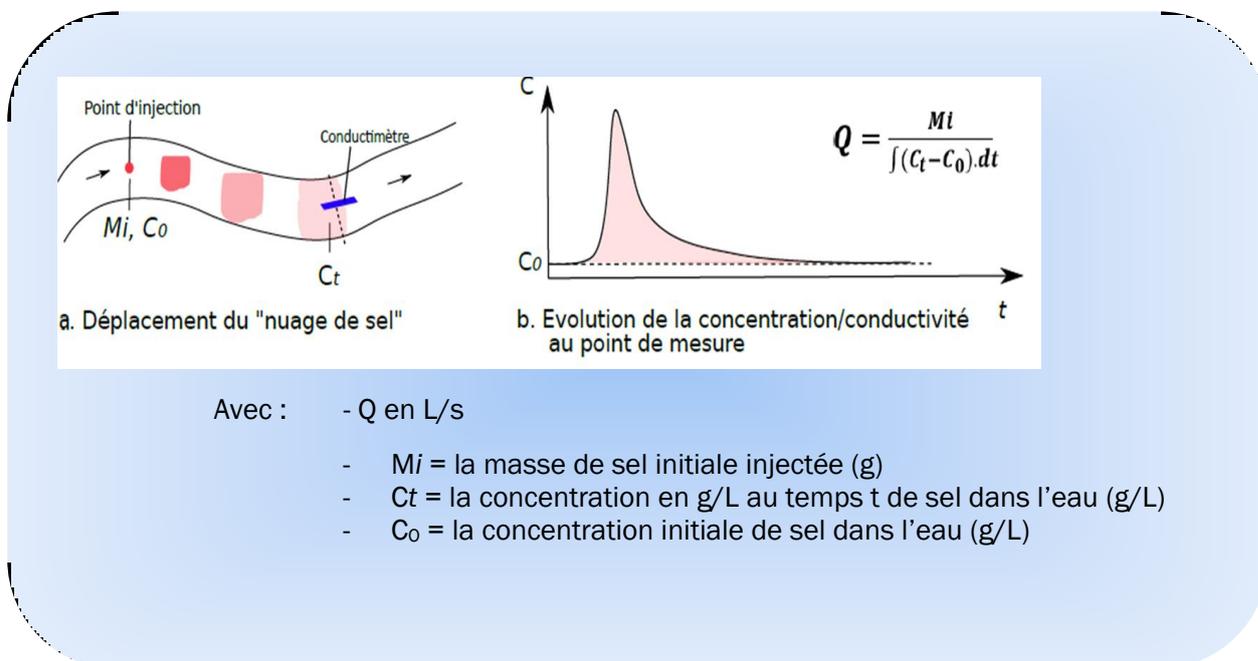


Figure 31 : Principe de la mesure de débit par jaugeage au sel (équation et paramètres)



J., 1976. ; Gilman, K., 1977 ; Day, T. J., & Day, T. T., 1977). Elle constitue ici un élément de référence et de comparaison avec les deux autres méthodes étudiées ici.

2.1.2. Mesure des vitesses d'écoulement par différence de charge.

Une autre méthode potentiellement intéressante pour jauger les petits cours d'eau, consiste à mesurer la vitesse moyenne en plusieurs points d'une section transversale à l'aide d'une règle transparente. Le débit est ensuite calculé selon la même méthodologie d'un jaugeage au moulinet : c'est-à-dire, en multipliant la vitesse mesurée par l'aire de la section mouillée correspondant à chaque point de mesure, et en effectuant la somme des produits obtenus.

Cette méthode est basée sur le théorème de Bernoulli selon lequel l'énergie cinétique de l'eau dans un écoulement est égale à son énergie potentielle :

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2 \text{ (Eq. 1)}$$

avec m la masse d'eau, g la pesanteur, h la différence de charge, et v la vitesse de l'eau

Il vient :

$$v = (2gh)^{0,5} \text{ (Eq. 2)}$$

En pratique, il s'agira de bloquer les écoulements avec une surface suffisamment large pour engendrer une différence de niveau d'eau (h) entre les faces amont et aval de la surface (Figure 32) et d'appliquer l'équation de calibration pour calculer la vitesse d'écoulement.

Cette méthode, très simple et peu coûteuse, a été proposée par les anglo-saxons dès les années 2000 (Fonstad et al., 2005, Pikes et al. 2016), et fait l'objet d'une fiche OFB (« Jaugeage par perche transparente ») pour sa mise en œuvre. Cette méthode de mesure de débit nécessite peu de matériel, à savoir une planche transparente d'une largeur d'environ 20 cm et d'une épaisseur de 2 cm. Afin de mesurer la vitesse de l'eau, la règle doit être placée dans le cours d'eau, la face la plus large perpendiculaire à l'écoulement. On peut alors observer une différence de charge entre l'avant et l'arrière de la règle à travers la fenêtre transparente de la règle. Les réglattes graduées fixées sur l'instrument permettent de mesurer cette différence de charge.

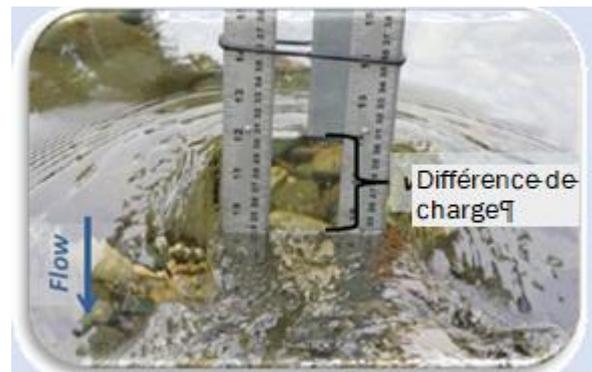


Figure 32 : Règle transparente et différence de charge (Image : User guide, Young et. Al 2015)



Dans le cadre du projet BERCEAU, nous avons testé cette méthode suivant les recommandations de Pikes et al. (2016) pour la construction de la règle transparente. La relation entre v et h a été calibrée en laboratoire dans un canal de section rectangulaire à débit contrôlé, afin d'obtenir l'équation de calibration propre à cette règle. L'équation empirique obtenue (équation BERCEAU) est la suivante :

$$V = 1.065 \times (2gh)^{0.5} - 0.104 \quad (\text{Eq. 3})$$

$$(R^2=0.92, a =1.065 (+/-0.05) \text{ et } b= -0/104 +/- (0.03))$$

Le modèle issu de l'équation 3, reliant la vitesse dans le cours d'eau et la différence de charge lue sur la règle, est représenté dans la Figure 33

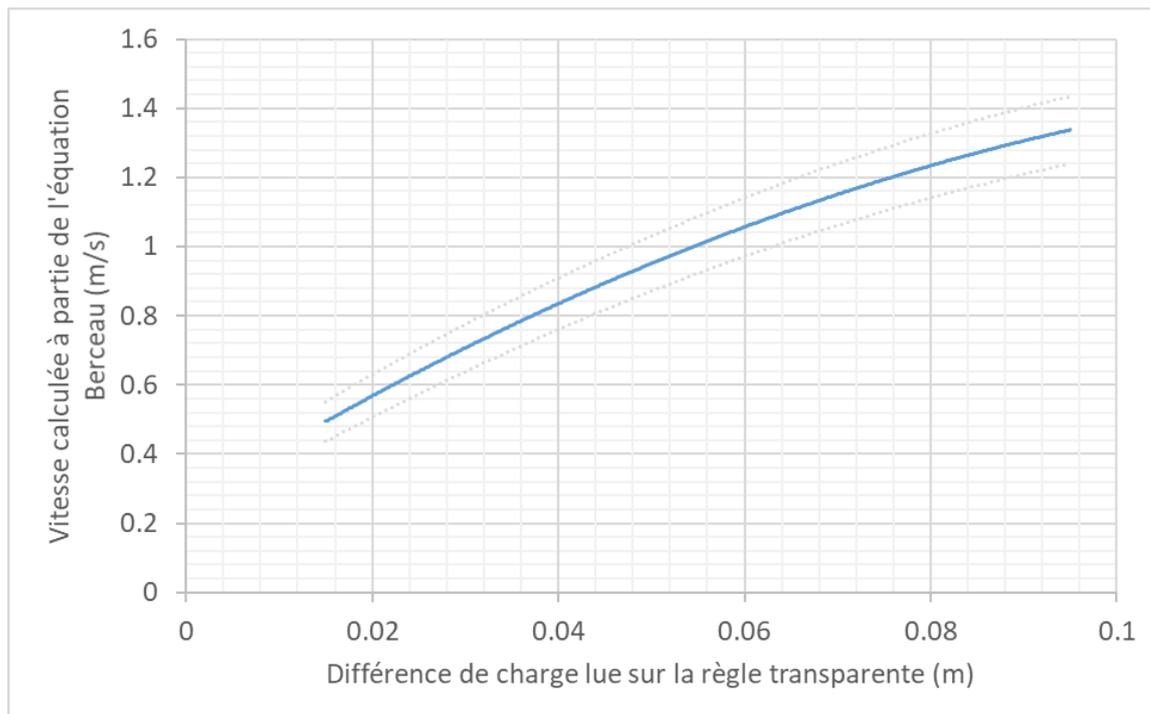


Figure 33 : Relation entre la vitesse calculée à partir de l'équation BERCEAU (éq. 3) et Δh suivant une régression Polynomiale de 2ème ordre. Les courbes en pointillés représentent l'intervalle de confiance à 95 %.

Pour les conseils de fabrication et plus d'informations sur cet outil, se référer au document suivant : Stream Velocity Rod User's Guide (Young et. Al, 2015). A noter que les données de calibration ne nécessitent pas de réaliser des mesures en canal expérimental. Cette phase de calibration peut être réalisée dans un cours d'eau qui permet des mesures indépendantes de débits avec une autre méthode.

La mesure de la vitesse par différence de charge présente des limites en fonction du type d'écoulements dans le cours d'eau jaugé. Elle sera imprécise pour des écoulements trop lents (quelques cm/s), trop rapides (~ 1 m/s) ou avec des remous (turbulence importante).

2.1.3. Jaugeages vidéo

Les méthodes de mesure de débit basées sur le traitement de séquences d'images d'un cours d'eau offrent une alternative peu coûteuse, accessible et innovatrice. Les prises de vues de la surface du cours d'eau peuvent être réalisées à l'aide d'une caméra ou d'un smartphone, depuis les berges, et enregistrées pour un traitement informatique postérieur. Le faible coût et la



rapidité de la prise de vue nécessaire à l'obtention du débit (une dizaine de secondes) permettent de réaliser des mesures par des non spécialistes de l'hydrométrie.

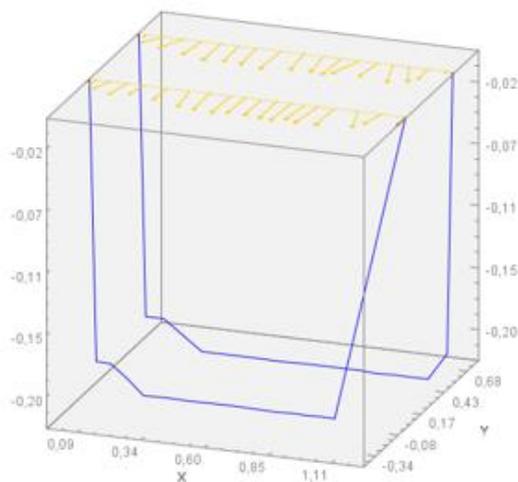
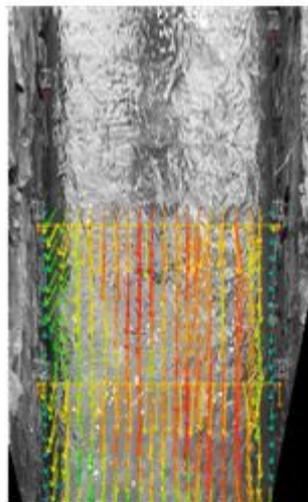
Le principe général de cette approche est de suivre, d'image en image, la signature optique de traceurs flottants et se déplaçant à la même vitesse que l'eau (feuilles, bulles de surface, particules jetées par l'opérateurs). Connaissant, la fréquence d'acquisition des images et les distances entre des points de repères sur l'image, il est possible de calculer les vitesses de déplacement des traceurs. Un champ de vitesses de surface est ainsi défini. Ce champ de vitesse est ensuite pondéré selon la profondeur et la position des traceurs sur une section transversale dont la géométrie doit être connue pour calculer une vitesse moyenne et un débit. L'utilisation des logiciels demande une compréhension minimale des méthodes de calcul par imagerie des vitesses de surface de l'eau, et notamment quelques principes généraux d'orthorectification d'images. Il n'est cependant pas nécessaire d'être un spécialiste du traitement d'image. Le grand avantage de cette approche est de pouvoir enregistrer des débits à des moments programmés, si l'on dispose de caméras programmables. Il est dès lors possible de réaliser une courbe de tarages avec des prises de vues réalisées lors d'une seule crue.

Dans le cadre du projet BERCEAU, nous avons testé l'applicabilité et la précision de trois logiciels de mesure des champs de vitesses de l'eau de surface, dans des contextes de petits cours d'eau bretons. Il s'agissait de lister les précautions à prendre lors des prises de vue in-situ et lors du traitement d'image, ainsi que d'évaluer les limites et sources d'incertitudes de ces méthodes. Afin d'éviter de surcharger le document, nous présentons ci-dessous sommairement les logiciels testés. Pour des présentations complètes et bien documentées, nous renvoyons le lecteur aux sites web qui sont actualisés régulièrement.

Fudaa LPIV

Fudaa est un logiciel open-access développé par l'IRSTEA et EDF pour le calcul de débit de rivières (Figure 34). La méthode de calcul utilisée est basée sur la technique Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV). Le public visé est principalement les jaugeurs de débits et les personnes familiarisées à l'hydrométrie. Le traitement des films enregistrés s'effectue en plusieurs étapes qu'il faut suivre méthodiquement pour réaliser le traitement des films. Conçu pour réaliser des jaugeages dans des contextes variés de cours d'eau, *Fudaa* offre la possibilité d'avoir la main sur le paramétrage de chaque étape du processus de calcul pour tenir compte des spécificités de la prise d'images réalisée. Avantage qui requiert une bonne compréhension du rôle de chaque paramètre du calcul.

Un autre avantage intéressant de *Fudaa* est de pouvoir réaliser des traitements automatisés de films, si les paramètres de prise de vue n'ont pas été modifiés. L'automatisation des traitements permet d'optimiser le temps de traitement de plusieurs séquences d'images obtenues par exemple lors d'une crue. Dans le projet BERCEAU, pour la phase de comparaison des différentes méthodes de débit, toutes les vidéos ont été traitées grâce à ce logiciel. Un tutorial complet de *Fudaa* sur le site <https://riverhydraulics.inrae.fr/outils/logiciels/fudaa-lspiv/> permet de s'initier à son utilisation.



Débit moyen:	0.166 m ³ /s
Ratio débit mesuré:	99.7 %
Conditions météo:	-
Date/Heure dépouillement:	-

Figure 34 : Illustration du calcul du champ de vitesse et de débit via l'interface de Fudaa 1.8.3.

TracTrac

TracTrac est un logiciel d'implémentation open-source sur Matlab ou Python, créé par J. Heyman, chercheur CNRS à Géosciences Rennes. Ce logiciel constitue un algorithme de suivi d'objets, capable de suivre simultanément plusieurs milliers d'objets sur une durée limitée. *TracTrac* est un algorithme PTV (Particle Tracking Velocimetry), utilisé pour estimer les vitesses d'écoulement des fluides. Il est aussi utilisé dans d'autres domaines, notamment en géomorphologie pour documenter les champs de vitesse des grains transportés dans des écoulements expérimentaux. L'algorithme PTV permet de détecter la présence d'objet dans l'image, et de suivre l'objet sur les images suivantes. Ce logiciel a été testé dans le cadre du projet BERCEAU pour obtenir des valeurs de vitesses sur toute la surface du cours d'eau, lorsque des traceurs sont présents. Le calcul du débit à partir du champ de vitesse n'est cependant pas automatisé dans le programme et nécessite de réaliser un petit code numérique supplémentaire. Pour des raisons pratiques de délais, il n'a pas été utilisé dans les phases de test de calcul de débit décrits dans la suite du document. En faisant les calculs de débits manuellement, on parvient cependant à de bons résultats.

Les codes et le tutoriel sont accessibles sur le site : <https://perso.univ-rennes1.fr/joris.heyman/trac.html>

Discharge

Discharge est une application sur smartphone conçue par l'entreprise *Photrack* sur des financements de la FAO (Food and Agriculture Organisation). L'un de ses objectifs est de fournir un outil de jaugeage pour suivre les débits dans des canaux d'irrigation. Cette application propose plusieurs versions (gratuite et payante), fournit une plateforme de calcul et d'intégration des mesures dans une base de données personnalisées avec le calcul des courbes de tarage associée à chaque station de jaugeage. *Discharge* combine la prise de vidéo et le calcul automatique du débit en direct, à partir de l'application (Figure 35). Elle utilise la méthode LSPIV pour le calcul des vitesses. L'application *Discharge* permet également de définir des sites d'étude : géométrie des sections, points de repères pour la prise de vidéo, géolocalisation,



enregistrement et envoi des données vers le serveur. La version gratuite ne permet le calcul de débit que dans des sections rectangulaires ou en trapèze et sur un nombre de sites limités. La version payante permet le même calcul sur des sections de cours d'eau irrégulières. Une courbe de tarage peut également être créée à partir des mesures effectuées selon l'option choisie. Tous les résultats sont visualisables sur une plateforme en ligne. Plus d'informations sur : <https://discharge.ch>.

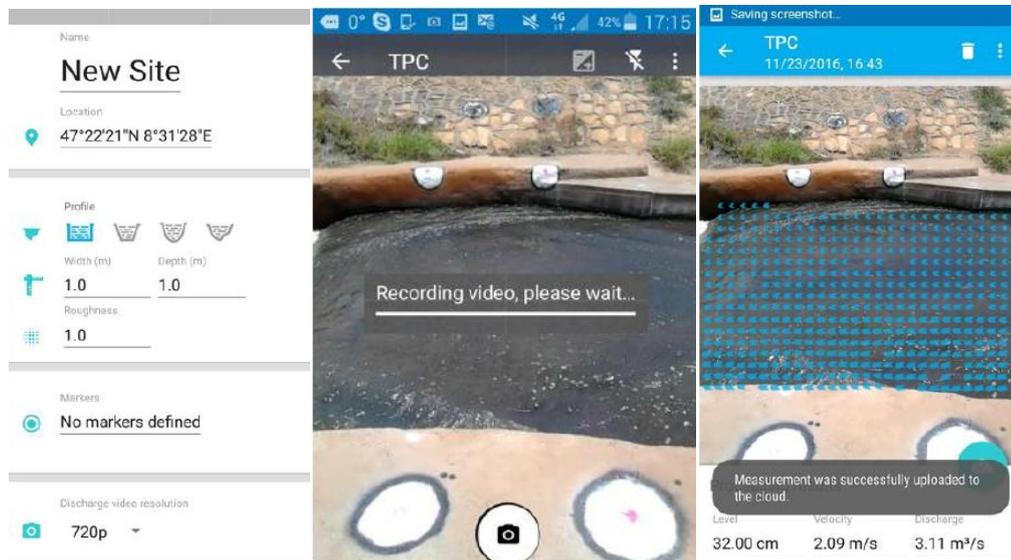


Figure 35 : Différentes étapes de la mesure de débit par smartphone avec l'application Discharge

D'une ergonomie volontairement simple, *Discharge* est relativement facile d'utilisation. En revanche, cette application présente des limites (ou des imprécisions) dans certaines configurations de cours d'eau. La grande différence avec *Fudaa*, est l'impossibilité de traiter à posteriori des films et d'en automatiser le traitement.

2.2. Evaluation et comparaison des méthodes de jaugeages lors de tests in-situ

2.2.1. Protocoles de mesure sur le terrain

Les protocoles de mesure in-situ de chacune des techniques sont détaillés dans les fiches techniques n°5, 6 et 7 qui sont présentées dans l'Annexe de la partie 2 à la fin de ce chapitre :

- fiche technique N°5 – Jaugeage au sel;
- fiche technique N°6 – Règle transparente;
- Fiche technique N°7 - Débitmétrie vidéo



Débitmétrie vidéo

Les méthodes de mesure de débits grâce à des traitements de séquences d'images offrent une alternative peu coûteuse, accessible et innovatrice. Elle permet la mesure du débit à l'aide d'une caméra ou d'un smartphone, depuis les berges du cours d'eau, et grâce à un traitement informatique postérieur. Le faible coût et la rapidité de la prise de vue nécessaire à l'obtention du débit peut permettre l'élaboration de courbes de tarage sur un temps réduit

Lors de la prise de vidéo, plusieurs paramètres doivent être pris en compte. Les principaux points d'attention sont les suivants

Points d'attentions généraux

- Ne pas utiliser de caméra à angle déformé (ex : Go-Pro, Fish-eyes)
- Stabiliser au maximum la prise de vue : à l'aide d'un trépied par exemple
- Les deux rives doivent être visibles sur la vidéo
- Privilégier un positionnement face ou au-dessus du cours d'eau
- Les caractéristiques du cours d'eau doivent être le plus homogène possible sur la portion filmée. L'aire de la section d'écoulement ne doit pas varier de manière trop importante (approfondissement soudain, saut, par exemple après un ouvrage comme une buse).

Points de repère (GRPs)

Les points de repères permettent l'orthorectification de la vidéo pour le calcul des vitesses

Mise à l'échelle

Prise de vue de dessus (pas de déformation)

2 points de repères (coordonnées X) = repérer 2 points d'espacement connu



Othorectification 2D

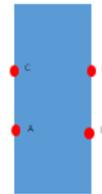
Prise de vue de vue légèrement déformée (ex: depuis la berge)

Minimum 4 points de repère (coordonnées X, Y) dans un repère orthonormé

Placer 4 points sur la surface libre de l'eau

Par exemple:

- 4 piquets (points toujours visible avec un niveau d'eau variable, avantageux pour une station fixe)
- Poser un cadre de dimensions connues sur la surface de l'eau au début de la vidéo)



Ex: A (0, 0); B (150, 0); C (100, 0); D (150, 100) X et Y en cm



Othorectification 3D

Prise de vue de vue très déformée (petit angle de prise de vue)

Minimum 4 points de repère (coordonnées X, Y, Z) dans un repère orthonormé

Privilégier des X, Y, Z différents, biens répartis dans l'espace



Points repérés avec de (X, Y, Z) variés et bien distribués dans l'espace

Ces fiches rappellent les principaux points d'attention pratiques pour la mise en œuvre des protocoles, mais ne dispensent pas l'opérateur de consulter les ouvrages ou sites internet spécifiques avec les tutoriaux afférents.

2.2.2. Comparatif des différentes méthodes de mesure des débits des petits cours d'eau

A différentes dates et sur les différents sites d'études, des mesures de débit ont été faites en parallèle avec la méthode du jaugeage au sel (méthode de référence) et avec les méthodes alternatives : la règle transparente et le jaugeage vidéo. L'ensemble des résultats montre une bonne correspondance des valeurs de débits mesurée quelles que soient les méthodes utilisées si ces dernières sont mises en œuvre avec précaution (Figure 36). Les barres d'erreurs des jaugeages vidéo représentent un écart-type des valeurs obtenues lorsque l'on fait varier les paramètres de calcul du logiciel *Fudaa*. Pour la règle, elles ont été calculées à partir des erreurs de lecture de différence de charge sur la règle.

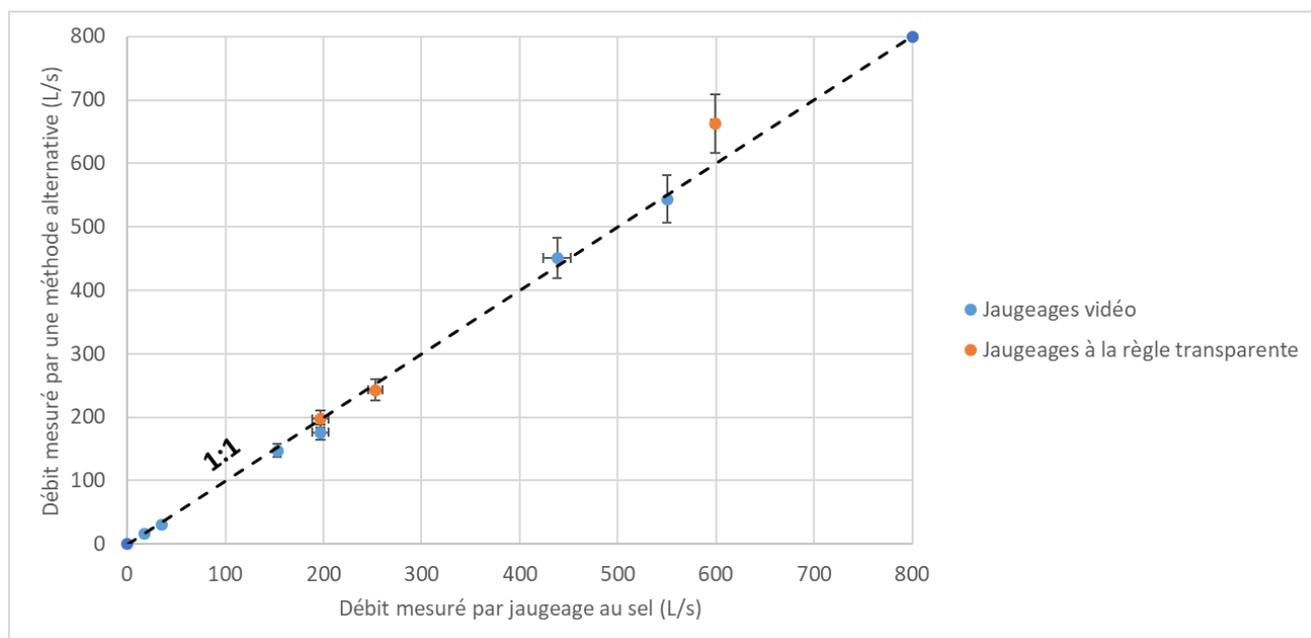


Figure 36 : Comparaison des jaugeages vidéo et des jaugeages à la règle transparente, avec les résultats obtenus par jaugeage au sel, sur différents sites de mesure et à différentes dates

A noter que les incertitudes peuvent varier de manière importante selon le nombre de verticales réalisées avec la règle transparente ou la qualité optique des traceurs détectés dans les vidéos. Nos tests montrent qu'il est possible de trouver des méthodes de mesures des débits alternatives au jaugeage au sel pour les petits cours d'eau avec un niveau d'incertitude similaire. Le choix de telle ou telle méthode est donc fonction principalement : du temps disponible sur le terrain et au bureau pour réaliser la mesure et le traitement des données, du matériel dont on dispose, et du milieu.

L'applicabilité et l'efficacité des différentes méthodes dépend grandement du milieu étudié, des objectifs suivis et des contraintes à respecter. La Figure 37 compare les différentes méthodes de mesure de débit en fonction de leurs avantages et inconvénients, et des milieux étudiés.



	+	-	Milieu adapté	Milieu non adapté
Jaugeage au sel	Facile à mettre en œuvre	Sensible aux effets de rétention du sel dans les circulations secondaires	Ecoulement uniforme, sans zone 'morte' ou de boucles de recirculation	Rugosité de berge importante par rapport à la largeur du cours d'eau
	Résultats faciles à traiter	Nécessité de main d'œuvre sur place	Remous pour activer le mélange de la solution saline dans la rivière	Trop profond pour un mélange efficace
	Faible coût (sauf achat de la sonde de conductivité)	Impact temporaire de la qualité de l'eau	Absence de précipitations ou de mélange ponctuel avec une eau de conductivité différente	
Règle transparente	Bas coût	Intrusive	Fond plat et / ou sans irrégularité importante de la bathymétrie	Vitesse trop faible (quelques cm/s) ou trop forte
	Mise en œuvre simple	Nécessité de main d'œuvre dans la rivière	Ecoulement peu turbulent	Ecoulement très turbulent
	Résultats facile à traiter (abaques)	Limité à une gamme des débits restreinte ; nécessité de faire une courbe de tarage	Section de cours d'eau rectiligne	Lit irrégulier (difficile de poser la règle sur des fonds très rugueux/accidentés)
	Obtention directe de la vitesse moyenne intégrée sur une verticale	Assez long et laborieux si la bathymétrie de la section est complexe	Hauteur d'eau comprise entre 5 et 75 cm	
Jaugeage vidéo (Fudaa)	Bas coût (hors coût camera) Logiciel de traitement en accès libre	Nécessité de présence de "traceurs" à la surface du cours d'eau (bulles/chips/feuilles...)	Eclairage homogène de la section mesurée	Variabilité spatiale de l'éclairage (reflets et zones d'ombre)
	Possible d'enregistrer des vidéos sans présence physique (caméras programmables) puis traitement à postériori	Forte dépendance aux conditions météorologiques (pluie, vent, lumière)		
	Non intrusive, adaptée pour une gamme de débits très large, voire turbulent	Le traitement des données nécessite une formation spécifique		
	Mise en œuvre in-situ rapide	Sensibilité au paramétrage du traitement de données		
	Matériel accessible à tous (caméra d'un smartphone)	Sensibilité aux données bathymétriques		
	Possibilité de prendre la vidéo depuis différents angles de vue	Nécessité un positionnement précis des points de repère pour la mise à l'échelle et l'orthorectification		
Jaugeage vidéo (Discharge)	Facilité de prise en main	Application gratuite limitée (sections rectangulaires et trapézoïdales seulement) Application payante pour l'accès à toutes les fonctionnalités	Traceurs visibles, indéformables, répartis de manière dense et homogène sur toute la surface du cours d'eau	Pluie (perturbation de la surface de l'eau)
	Calcul rapide et obtention des valeurs de débit directement sur le smartphone	Pas de possibilité d'enregistrement sans présence physique		
	Possibilité de réalisation automatiques de courbes de tarage	Prise de vue « de dessus » non autorisée par l'application → difficulté pour voir toute la section mesurée dans le champs de vision		
	Non intrusive, adaptée pour une gamme de débits très large, voire turbulent	Forte dépendance aux conditions météorologique		
	Plateforme web géoréférencée avec visualisation des résultats	Sections à géométrie irrégulières: nécessité de définir la station de mesure depuis un ordinateur		
		Peu de possibilité de contrôle des paramètres de calcul		

J a u g e a g e v i d é o s

Figure 37 Tableau comparatif des différentes méthodes de jaugeages explorées dans BERCEAU



2.2.4. Sources d'incertitude propres à chaque méthode

Chaque méthode de mesure de débit comprend des sources d'incertitude qui lui sont propres. Le tableau ci-dessous résume les sources d'incertitude pour chacune des méthodes testées dans le projet BERCEAU.

Sources d'erreurs et d'incertitudes dans le calcul du débit

% d'incertitude*

Sources d'erreurs et d'incertitudes dans le calcul du débit		% d'incertitude*
Jaugeages au sel	Distance de mélange insuffisante	5 - 10 %
	Piège de sel dans des boucles de recirculation	
	Pluie: diminue la conductivité du cours d'eau pendant le jaugeage: jaugeage non valide	
	Pas de temps pour mesurer la concentration	
Règle transparente	Lit irréguliers: erreurs sur la quantification de la surface de la section mouillée	5 - 10%
	Précision de la mesure de hauteur d'eau	
	Précision de la mesure de différence de charge (moins précise quand la vitesse de l'eau est importante)	
	Nombre de verticales trop faible	
	Incertitudes sur l'équation de calibration	
Jaugeage vidéo (Fudaa)	Précision de la mesure de la section mouillée	5 - 30%
	Absence de traceurs ou mauvaise répartition des traceurs	
	Mouvements des traceurs induits par un élément extérieur: personne dans le cours d'eau, vent, pluie	
	Caméra instable	
	Erreurs d'orthorectification induite par un mauvais positionnement des points de repère	
	Mauvaise définition de taille de la grille de calcul, et des aires de recherche de traceurs	
	Mauvais réglage des valeurs des paramètres (ex. coefficients de corrélation, coefficients de correction des vitesses, nombre d'images pour le calcul des vitesses moyennes, rayon d'interpolation des vecteurs vitesses)	
Jaugeage vidéo (Discharge)	Précision de la mesure de la section mouillée	
	Absence de traceurs ou mauvaise répartition des traceurs	
	Mouvements des traceurs induits par un élément extérieur: personne dans le cours d'eau, vent, pluie	
	Angle de prise de vue en dehors de la limite préconisée par le constructeur (perpendiculaire à la berge)	
	Champs de vision incomplet de la surface miroir de la station de mesure	
	Choix du coefficient de Manning Strickler	
	Incompatibilité des réglages prédéfinis dans l'application avec certains contextes (boite noire)	

* Incertitudes estimées avec les mesures réalisées dans le cadre du projet BERCEAU

Les méthodes qui comportent le moins de sources d'incertitude lorsque les mesures sont réalisées avec soin sont le jaugeage au sel et la règle transparente.

Dans le cas des jaugeages vidéo, avec un bon paramétrage et une prise de vue soignée, il est possible d'atteindre des degrés d'incertitude semblables aux deux autres méthodes (de l'ordre de 5%). Cependant, afin d'atteindre ce degré de précision, une formation du personnel technique à l'utilisation des logiciels est nécessaire. Les paramètres de prise de vidéo et de



calcul doivent être réglés de manière rigoureuse, ce qui nécessite une bonne compréhension de la signification de chacun des paramètres de réglage dans le calcul. En utilisant les paramètres par défaut ou un mauvais réglage, les résultats peuvent être très variables et l'incertitude élevée.

2.3. Hauteurs limnimétriques

2.3.1. Définition et enjeux sur les petits cours d'eau

Un limnimètre ou une station limnimétrique est une installation qui permet la mesure de la hauteur d'eau en un point du cours d'eau (Figure 38).

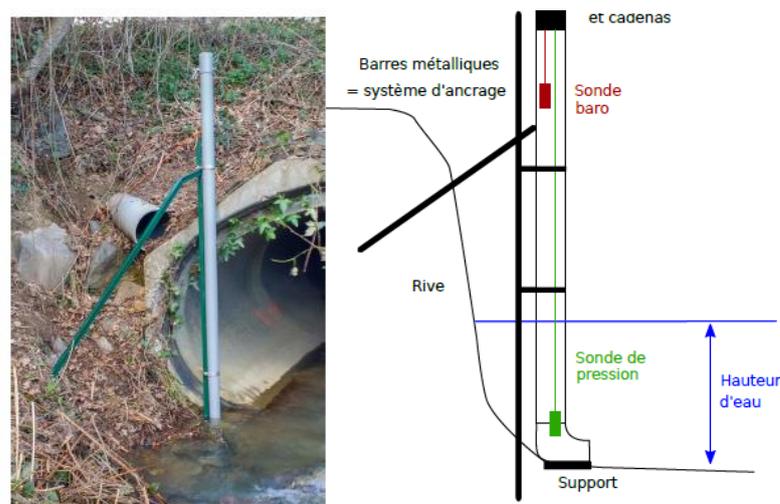


Figure 38 Photographie d'un limnimètre installée sur un site d'étude du projet BERCEAU et schéma de fonctionnement de la mesure de hauteur d'eau

Dans les petits cours d'eau, la mesure des hauteurs d'eau et des débits est généralement effectuée dans une section à seuil (seuil jaugeur) où la relation hauteur /débit est stabilisée par le seuil. Cependant, dans le cadre actuel des restaurations de cours d'eau, on cherche à rétablir et assurer la continuité sédimentaire et écologique : l'usage de seuils n'est donc pas recommandé. Dans ce cas, l'installation d'un limnimètre est plus adaptée.

Pour les limnimètres placés sur les sites d'étude du projet BERCEAU, le dispositif installé est un dispositif bas coût, fabriqué manuellement. Il est constitué d'un tube de PVC avec un coude à l'extrémité et d'une sonde de pression. Le tube est fixé à la rive par un système d'encrage métallique.

Cependant, avec ce type de station limnimétrique, il est difficile de mesurer précisément des petits débits pour lesquels on observe des variations de hauteur d'eau faibles. Les sondes de pression commerciales relativement peu chères (~500 €) ont bien souvent une précision de l'ordre du cm d'eau. La gamme de débits pour lesquels il sera possible de mesurer des hauteurs d'eau sera de ce fait limitée aux débits hors étiage. Il n'est par ailleurs pas conseillé de positionner la sonde au niveau du sol car le dépôt de sédiments fins à l'intérieur du tube pourrait perturber la mesure de pression. Il faut donc penser la conception du limnimètre et le choix de la section du cours d'eau de manière à enregistrer la plus grande gamme de hauteurs d'eau possible.



Dans le cadre d'un suivi piézométrique sur une zone restaurée, le limnimètre peut avoir une autre fonction que l'élaboration de la courbe de tarage ou le calcul du débit. Si un transect de piézomètres est installé de part et d'autre d'une section du cours d'eau dans le but de suivre les variations de niveau de nappe et d'étudier les échanges nappe-rivière, il est recommandé d'installer une station limnimétrique au droit des piézomètres. En effet, les piézomètres permettent la mesure de la hauteur du toit de la nappe le long du transect, et le limnimètre indique la hauteur d'eau dans le cours d'eau au droit du transect. Il est alors possible de calculer les gradients entre la nappe et le cours d'eau et de déterminer le sens et l'intensité des flux entre la nappe et la rivière.

2.3.2. Choix de la position de la station limnimétrique

Le choix de la section du cours d'eau où va être placé le limnimètre est primordial afin d'obtenir des données précises et représentatives des variations de hauteur d'eau dans le cours d'eau. Certains points d'attention doivent être pris en compte :

- Le point doit être accessible en toute saison. Attention à la variation de hauteur d'eau en période de crue, et à l'influence végétation berges qui peut être saisonnière et peut cacher le limnimètre en certaines saisons. Si le limnimètre est placé sur un banc de sédiment immergé en hiver, il peut être à sec à l'étiage.
- Chercher une section à la géométrie adaptée et qui sera représentative des variations de hauteur d'eau dans le cours d'eau. L'idéale est de choisir une section étroite et rectiligne sur une longueur longitudinale égale à au moins 10 fois la largeur transversale.
- Il faut également prévenir le risque d'envasement, et pouvoir purger régulièrement le limnimètre pour décoller les sédiments fins qui s'y seraient déposés.
- Le rapport rugosité de berge / largeur du cours d'eau est plus élevé dans les cours d'eau d'ordre 1 et 2 que dans ceux d'ordre 3 et 4. Ce rapport peut modifier la relation hauteur/débit proche des berges. Choisir une section où les berges sont plutôt rectilignes et peu rugueuses en comparaison de la largeur du cours d'eau.
- Eviter les zones où les risques d'embâcles sont importants. Celles-ci modifient les variations de hauteurs d'eau pour des débits équivalents.

Ces points d'attention mettent en évidence la difficulté de la mesure de hauteur d'eau dans les cours d'eau d'ordre 1 et 2. Sur les cours d'eau restaurés, il est possible de ne pas trouver de section qui regroupe tous les critères idéaux pour l'installation d'une station limnimétrique. Installer une station limnimétrique est une affaire de compromis.

2.4. Courbes de tarage

A chaque station limnimétrique du projet BERCEAU sont associées la chronique de hauteurs d'eau, la courbe de tarage et la chronique de débit. Elles sont détaillées dans les fiches multi-sites pour chaque site d'étude. A titre d'exemple, ces résultats sont présentés ici pour le site du Géant Endormi, sur le ruisseau du Pas de l'Âne, bassin versant de la Flume à Vignoc (Figure 39).

A partir des chroniques de hauteur d'eau et des valeurs de débits mesurées ponctuellement, il est possible de placer les points sur un graphique qui montre la relation entre les hauteurs d'eau sur une section et les débits. Il s'agit alors de trouver le ou les meilleurs ajustements afin de modéliser la relation hauteur/débit, et de l'extrapoler pour toute la gamme de débit. Le choix de cet ajustement doit se faire avec précaution et en tenant en compte de la géométrie de la section où est mesurée la hauteur d'eau.

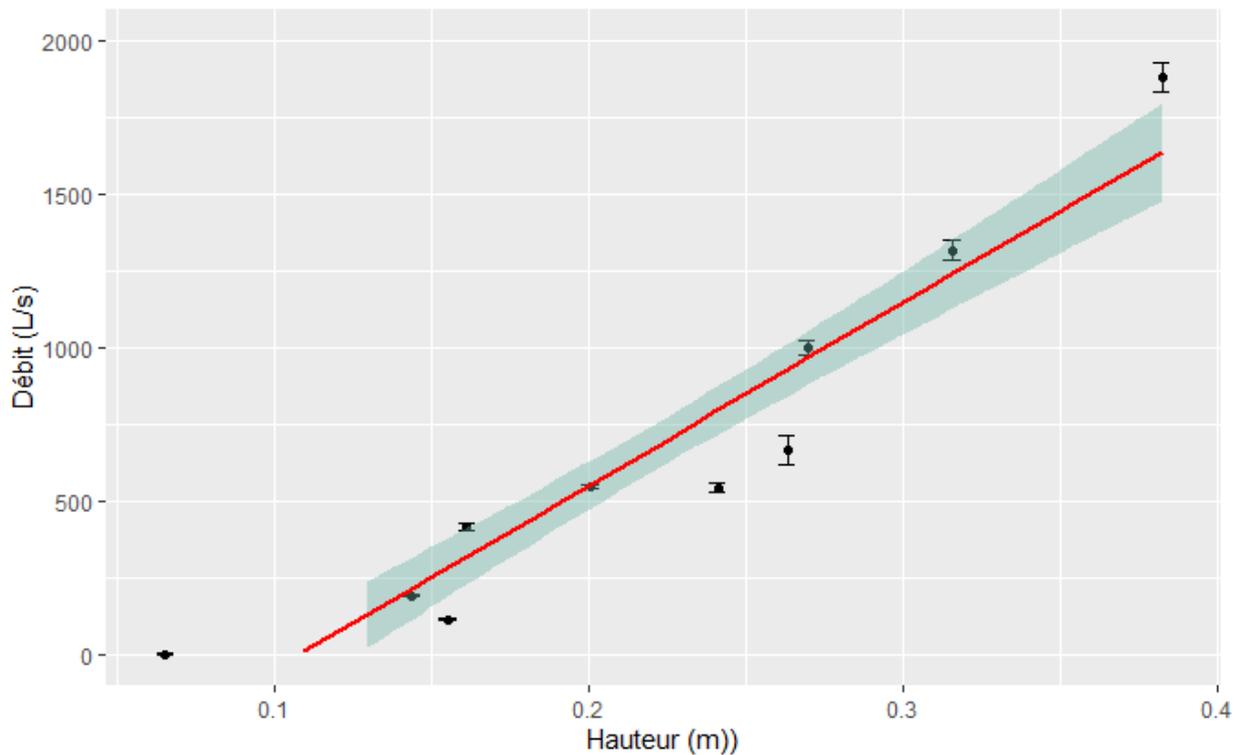


Figure 39 Courbe de tarage réalisée à partir de jaugeages au sel et de jaugeages vidéo, ruisseau du Pas de l'Âne, Bassin versant de la Flume, Vignoc (35)

Il ne faut pas faire l'erreur de vouloir à tout prix ajuster les données selon une tendance unique. En effet, selon la géométrie de la section, on peut souvent observer deux ou trois tendances (ou pentes) dans la relation hauteur/débit. La tendance peut être linéaire mais elle peut aussi être polynomiale ou exponentielle, ce qui s'explique également par la géométrie des sections étudiées. Si la section marque un changement brutal, c'est un argument pour faire des courbes de tarage « par partie », qui sera contrôlée par les limites de ces changements brusques de géométrie qui modifie la relation hauteur/débit. En effet, si la section s'élargit à partir d'une hauteur fixe, il faudra une variation de débit plus importante pour induire une variation de hauteur d'eau identique à celle observée dans la partie basse de la section (Figure 40).

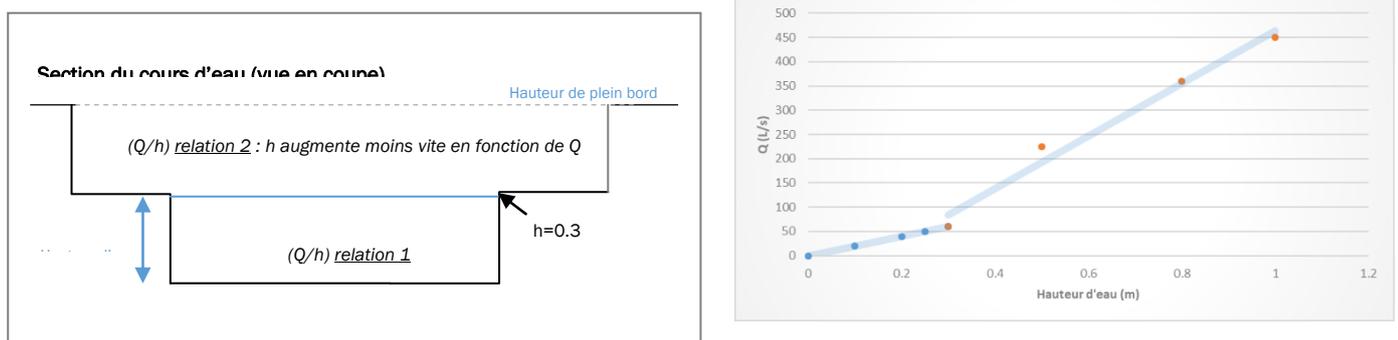


Figure 40 : à gauche, vue en coupe d'une section d'un cours d'eau dont la géométrie est caractérisée par un changement de largeur entraînant une modification de la relation hauteur/débit ; à droite, l'ajustement de la courbe de tarage « par partie », en fonction de la géométrie du cours d'eau.

La zone d'incertitude (différence entre les débits maximaux et minimaux) varie avec le débit : elle peut être très importante pour des débits faibles (difficulté de mesurer des hauteurs précisément à l'étiage), et est généralement importante pour les débits supérieurs aux débits plein bord (fuites, mesure non exhaustive des débits sur la section ennoyée). Ces données sont



bien souvent entachées d'erreurs de mesure qu'il faudra, dans la mesure du possible, estimer et reporter sur la courbe de tarage. Ce type de données peut induire des points écartés de la tendance moyenne et des régressions par partie faiblement consolidées (Figure 41). L'expertise du jaugeur sera ici primordiale pour prendre en compte ou non ces cas de figure.

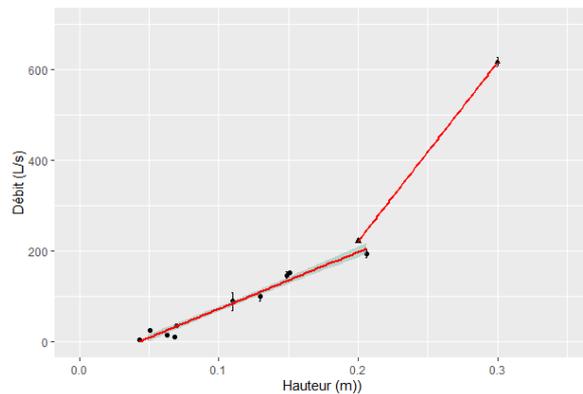


Figure 41 Courbe de tarage pour le site du Géant Endormi, ruisseau du Côté-Malville, bassin versant du Ninian, Ploërmel (56). La relation établie à partir de 20 cm est représentée ici seulement à titre indicatif. En effet, elle ne contient que 2 points et le calcul d'une régression linéaire n'est pas représentatif. L'enveloppe grisée représente l'intervalle de confiance à 75%.

La dispersion des points autour de chaque tendance dépend de la source d'incertitude principale de la méthode utilisée pour mesurer les hauteurs d'eau et les débits. Pour interpréter la courbe de tendance, il faut tenir compte des incertitudes sur ces mesures, et calculer les incertitudes sur les paramètres des ajustements pour estimer l'incertitude sur les débits calculés. Ce travail est indispensable pour améliorer la stratégie à adopter dans l'acquisition des données, en ciblant les contextes où l'incertitude est importante. Une courbe de tarage est empirique. De ce fait, elle peut évoluer dans le temps si la section où est mesurée la hauteur d'eau, change. Si tel est le cas, le suivi de la géométrie de la section (même qualitatif) permet de comprendre une augmentation de la dispersion des points autour de la tendance moyenne. A l'inverse, toute modification de la courbe de tarage dans le temps doit alerter sur la possibilité d'une modification de la section de jaugeage (géométrie, rugosité de fond ou des berges, végétation aquatique, embâcle, ...).

2.4. Conclusions

La construction de courbes de tarage et l'obtention des chroniques de débits est souvent l'un des principaux objectifs de la débitmétrie dans le cas des petits cours d'eau. Leur réalisation nécessite la mesure in-situ d'une large gamme de débits et de hauteurs d'eau. L'obtention de ces données est cependant difficile et parfois limitée. La méthode de mesure de débits peut en être la cause (méthode non adaptée au milieu ou aux conditions, contraintes de prix et de déplacement) mais également la méthodologie pour la mesure des hauteurs d'eau. En effet, il a été démontré dans le cadre du projet BERCEAU que la mesure des faibles hauteurs d'eau est impossible ou peu représentative avec les outils proposés ici. Ceci est une limite importante, surtout lorsque les objectifs de la restauration portent sur les débits d'étiage. Des méthodes d'hydrométrie plus adaptées nécessiteraient des installations plus conséquentes (formatage de la section en travers) et la mise en place de seuils qui vont à l'encontre de la continuité hydrosédimentaire.

L'autre limitation principale dans la réalisation des courbes de tarage est la mesure des hauts débits, du fait de leur probabilité d'occurrence et du caractère intrusif de la plupart des méthodes de débitmétrie.

La débitmétrie à l'aide de vidéo propose des solutions intéressantes vis-à-vis de ces deux limites. Elle est non-intrusive et dans le cas de certains logiciels (ex : Fudaa), la prise de vidéos en continu (et leur traitement à posteriori) permet de se déplacer moins fréquemment sur le



terrain, et de construire une courbe de tarage en un temps réduit. *Discharge* permet la mesure de débits de manière non intrusive, avec un résultat obtenu en temps réel in-situ, ce qui peut constituer une aide à la décision sur le terrain intéressante pour réaliser d'autres actions en fonction du débit.

Les techniques de débitmétrie présentées dans ce chapitre permettent, dans une certaine mesure, de simplifier la mesure des débits. Etablir des chroniques de débits avec les incertitudes associées requiert néanmoins de bien comprendre les paramètres des outils de calcul et d'avoir une expertise minimum pour interpréter les données.



Annexe débitmétrique :

Fiches techniques 5, 6 et 7

Fiche technique N° 5 - Jaugeage au sel

Jaugeage par dilution de sel

Fiche technique
5
Jaugeage par dilution de sel

Le jaugeage par dilution de sel est une méthode de mesure de débit consistant à l'injection d'une solution saline et en la mesure de sa dilution. Elle est basée sur le principe de conservation de la masse. Elle a l'avantage d'être peu coûteuse et d'être assez simple à mettre en application.

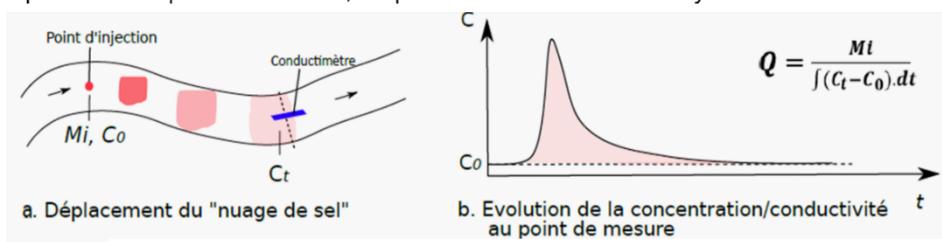
Matériel nécessaire

- ✓ 3 seaux, de volume minimum 20L
- ✓ 3 pots de sel de masse connue
- ✓ Sonde conductimétrique programmable (diver)
- ✓ Mélangeur (bâton, spatule)

Principe de la mesure

On injecte une masse connue de sel, préalablement dissoute dans un volume d'eau que l'on aura pris dans le cours d'eau. A l'aval de ce point, à une distance qui dépendra du débit de la rivière, on installe un conductimètre qui nous permettra de suivre le passage du "nuage de sel" en ce point.

A partir de l'équation suivante, on pourra calculer le débit moyen du cours d'eau.



- Avec :
- Q en L/s
 - M_i la masse de sel initiale injectée (g)
 - C_t la concentration en g/L au temps t de sel dans l'eau (g/L)
 - C_0 la concentration initiale de sel dans l'eau (g/L)

En pratique

Préparer le jaugeage

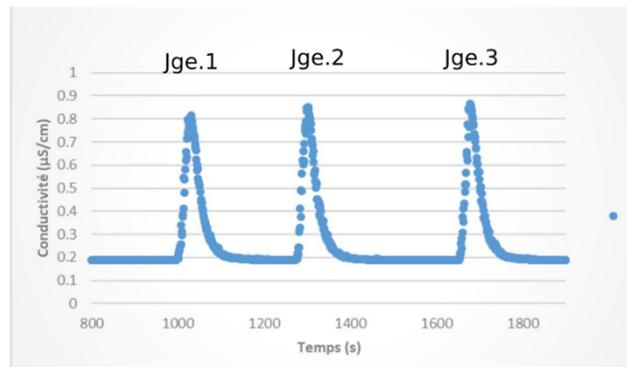
- 1 Choisir avec soin le tronçon sur lequel on effectuera la mesure. Il doit y avoir suffisamment de remous pour permettre le mélange latéral mais le moins de zones de recirculation latérale possible pour éviter une perte de sel.
- 2 Evaluer la "distance de bon mélange", soit la distance à laquelle on considère que la concentration en sel est égale sur toute la section d'écoulement. Une méthode simple pour estimer approximativement cette distance est de multiplier la largeur de la rivière par 50m. Ex: Largeur rivière: 2 m, distance de bon mélange: 100 m
- 3 Estimer la quantité de sel à injecter. Celle-ci dépend du débit. Comme approximation, on peut estimer que la quantité de sel pour 100 l/s est d'environ 500g.
- 4 On peut faire une première estimation du débit de la rivière en mesurant la vitesse d'un flotteur entre deux points, puis en multipliant cette vitesse par la section. Ceci permet de vérifier que les résultats du jaugeage au sel soient dans le même ordre de grandeur.



En pratique

Réaliser le jaugeage

- 5 Diluer chacun des 3 paquets de sel de masse connue dans chacun des 3 seaux, que l'on aura préalablement rempli d'eau de la rivière. Le sel est correctement dilué lorsqu'il ne reste aucun grain de sel dans le fond du seau. Bien noter la masse de sel qui correspond à chaque seau.
- 6 Programmer le conductimètre à 1 seconde d'intervalle entre chaque mesure. L'installer à l'aide d'un bâton ou d'une perche à la distance de "bon mélange" estimée, en positionnant la sonde si possible au milieu de la section ennyée.
- 7 Verser le contenu du premier seau, en prenant soin de le rincer rapidement avec l'eau de la rivière afin de perdre le moins de masse de sel possible.
- 8 En fonction du débit, attendre un laps de temps 't' avant l'injection du second seau. L'intégralité de la masse de sel doit avoir disparue à l'emplacement du conductimètre (retour à la conductivité initiale)
- 9 Répéter l'opération 3 fois.
- 10 Retirer la sonde et télécharger les données. Vérifier l'apparition de 3 pics de conductivité, et la disparition totale du sel entre chaque jaugeage (voir exemple ci-dessous).



Interprétation

Pour l'interprétation, utiliser la feuille de calcul **Interpretation_jaugeage_sel.xlsx** : elle permet de calculer le débit du cours d'eau par intégration des courbes de conductivité.

Les informations liées au calcul sont détaillées dans la feuille de calcul, onglet "A Lire".

Mesure de débit à la règle transparente

Fiche technique
N°6
Règle transparente

Cette méthode très simple et peu coûteuse a été proposée par les anglo-saxons dès les années 2000 (Fonstad et al., 2005, Pikes et al. 2016), et fait l'objet d'une fiche OFB (« Jaugeage par perche transparente ») pour sa mise en œuvre.

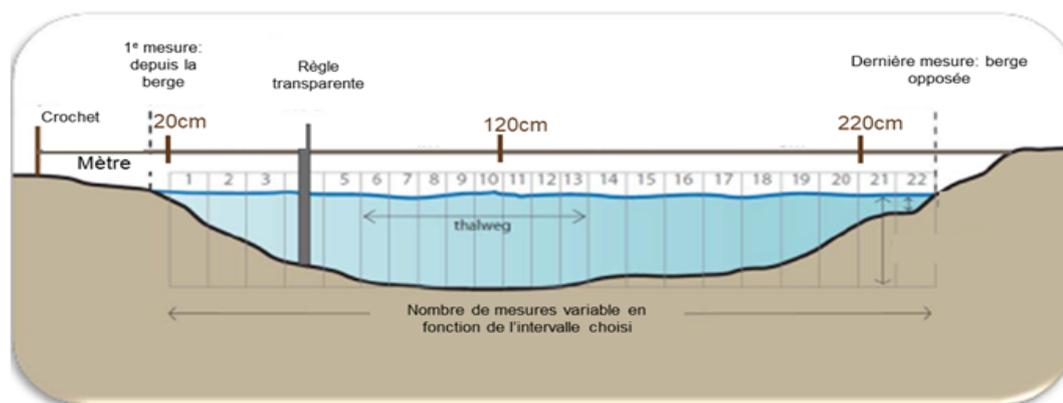
Placée perpendiculairement au cours d'eau, la règle bloque partiellement le flux. Une différence de charge est visible entre l'amont et l'aval de la règle. De multiples mesures de différence de charge sont prises sur toute la largeur du cours d'eau. Elles sont transformées en vitesses via une équation de calibration puis en débit grâce à la mesure simultanée de la section.

Matériel nécessaire

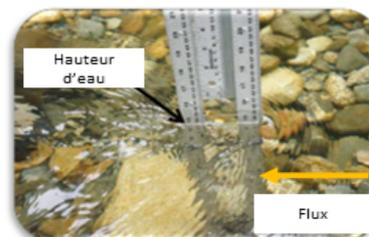
- ✓ Règle transparente
- ✓ Un mètre souple + crochets d'attache
- ✓ Feuille de terrain

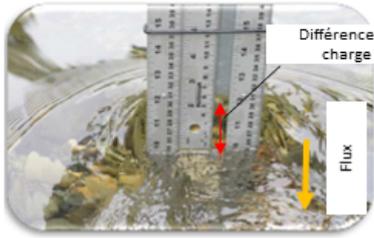
Protocole

- 1 Choisir une section adaptée pour la mesure (absence de virages, hauteur d'eau entre 5 et 75 cm, écoulement non turbulent, lit peu rugueux, berges accessibles)
- 2 Tendre le mètre souple entre les deux berges, perpendiculairement au flux (voir schéma de la section)



- 3 Se tenir à l'aval de la règle. Placer la règle contre une berge, la face la plus large parallèle au flux. Noter la distance correspondante sur le mètre. Noter en face la hauteur d'eau par rapport au lit de la rivière, lue sur les réglottes latérales de la règle transparente.



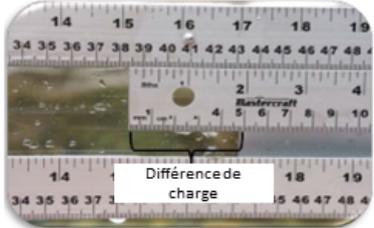


4 En restant au même endroit, retournez la règle en positionnant la face la plus large face au flux.

5 Faites glisser la réglette à l'arrière pour toucher la surface de l'eau à l'amont, puis faites et glisser la règle avant vers le bas pour toucher la surface de l'eau à l'aval.

6 Sortir la règle de l'eau et mesurer la différence de charge marquée par les réglettes et la noter sur la feuille de terrain, face à la distance correspondante sur le mètre

7 Répétez les étapes 3 à 6 à chaque emplacement d'échantillonnage sur toute la largeur du cours d'eau jusqu'à ce que la berge opposée soit atteinte. L'intervalle de mesure doit être choisi en fonction du degré de précision souhaité.



Modèle feuille de terrain

<u>Règle transparente</u>		
Date du jaugeage:		
Heure:		
Opérateur:		
Distance rive droite/rive gauche: 240 cm		
D : Distance lue sur le mètre (cm)	He: Hauteur d'eau mesurée (cm)	h: Différence de charge mesurée (cm)
(berge rive droite) 20	5	1
40	15	1
60	17	1.5
80	19	2
100	22	2.6
120		
140		
160		
180		
200		
220		
240		
(berge rive gauche) 260		
280		
300		

Calcul du débit

- Vitesse sur chaque point de mesure: à partir de la courbe de calibration
Equation du prototype BERCEAU: $V_i = 1.065 \times (2gh(i))^{0.5} - 0.104$ (1)
Où: $h(i)$ est la différence de charge en m, $V(i)$ la vitesse en m/s, $g=9.81$
- Aire de la section
Pour chaque intervalle: $A(i) = D(i+1) - D(i) * He(i)$
- Débit total
• $= \sum A_i * V_i$
Avec: - A en m²
- V en m/s

Traduit de :

Young, E.L. and R.G. Pike. 2015. Stream Velocity Rod User's Guide. BC Ministry of Environment. 6pp.

Consultez ce documents pour plus d'informations et pour le mode d'emploi de fabrication de la règle

Débitmétrie vidéo

Les méthodes de mesure de débits grâce à des traitements de séquences d'images offrent une alternative peu coûteuse, accessible et innovatrice. Elle permet la mesure du débit à l'aide d'une caméra ou d'un smartphone, depuis les berges du cours d'eau, et grâce à un traitement informatique postérieur. Le faible coût et la rapidité de la prise de vue nécessaire à l'obtention du débit peut permettre l'élaboration de courbes de tarage sur un temps réduit

Lors de la prise de vidéo, plusieurs paramètres doivent être pris en compte. Les principaux points d'attention sont les suivants

Points d'attentions généraux

- Ne pas utiliser de caméra à angle déformé (ex : Go-Pro, Fish-eyes)
- Stabiliser au maximum la prise de vue : à l'aide d'un trépied par exemple
- Les deux rives doivent être visibles sur la vidéo
- Privilégier un positionnement face ou au-dessus du cours d'eau
- Les caractéristiques du cours d'eau doivent être le plus homogène possible sur la portion filmée. L'aire de la section d'écoulement ne doit pas varier de manière trop importante (approfondissement soudain, saut, par exemple après un ouvrage comme une buse).

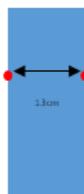
Points de repère (GRPs)

Les points de repères permettent l'orthorectification de la vidéo pour le calcul des vitesses

Mise à l'échelle

Prise de vue de dessus (pas de déformation)

2 points de repères (coordonnées X)
= repérer 2 points d'espacement connu



Othorectification 2D

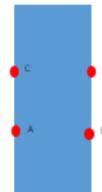
Prise de vue de vue légèrement déformée (ex: depuis la berge)

Minimum 4 points de repère (coordonnées X, Y) dans un repère orthonormé

Placer 4 points sur la surface libre de l'eau

Par exemple:

- 4 piquets (points toujours visible avec un niveau d'eau variable, avantageux pour une station fixe)
- Poser un cadre de dimensions connues sur la surface de l'eau au début de la vidéo



Ex: A (0, 0); B (150, 0); C (100, 0); D (150, 100)
X et Y en cm



Othorectification 3D

Prise de vue de vue très déformée (petit angle de prise de vue)

Minimum 4 points de repère (coordonnées X, Y, Z) dans un repère orthonormé

Privilégier des X, Y, Z différents, bien répartis dans l'espace



Points repérés avec de (X, Y, Z) variés et bien distribués dans l'espace



Influence des conditions météorologiques

Vent

Le vent peut modifier la trajectoire des traceurs. Si tel est le cas, ne pas faire de vidéo

Pluie

L'impact des gouttes de pluie sur la surface de l'eau peut perturber la trajectoire des traceurs. Il en résulte une incertitude importante sur le calcul des débits.. L'enregistrement de la vidéo doit se faire en absence de précipitations, ou lors de précipitations très faible sur une zone du cours d'eau couverte (arborée).

Luminosité

Les ombres, les reflets ou les motifs étincelants doivent être évités. Veiller à ce que les traceurs soient visibles, et que la lumière soit la plus homogène possible sur la partie du cours d'eau prise en vidéo.

Traceurs

- Choisir des traceurs biodégradables de taille adaptée. Pour un petit cours d'eau (largeur < 5m), on privilégiera une taille de l'ordre 0.5 à 2 cm : miels pops, corn flakes, chips d'emballage.
- Tenir compte des différentes vitesses de l'eau sur la section de mesure pour ensemercer en traceurs en premier les zones de faible vitesse
- Ne pas lancer les traceurs sur la zone pendant la vidéo, l'impact pourrait causer des vaguelettes et le passage des traceurs dans le champ de vision peut provoquer des erreurs de calcul.
- La densité de traceur doit être la plus importante possible ; enregistrer au moins 10 s de vidéos avec des traceurs sur toute la surface. Plus la densité est importante, plus le calcul sera précis.
- Les bulles sur le plan d'eau peuvent remplacer les traceurs artificiels.

Protocole de prise de vue

- 1 Se placer face au cours d'eau dans la mesure du possible, ou sur une des berges
- 2 Installer le smartphone ou la caméra sur un endroit stable, de préférence sur un trépied
- 3 S'assurer que dans la vidéo soient visibles: les GRPs, les deux berges, la totalité de la surface du cours d'eau
- 4 Si nécessaire (absence de traceurs naturels), ensemercer le cours d'eau avec les traceurs artificiels, à l'amont de la zone filmée
- 5 Prendre la vidéo lors du passage des traceurs dans la section voulue (20 secondes à 1 min de vidéo).

Recommandations: Avant de réaliser la mesure de débit, évaluer la vitesse de l'écoulement manuellement, grâce à un flotteur (ou des traceurs) et un chronomètre. Mesurer le temps parcouru par le traceur pour effectuer une certaine distance. Cela permettra de vérifier si le résultat n'est pas aberrant.

Post-traitement des vidéos

Pour le traitement des vidéos, et pour plus d'information, se référer au manuel d'utilisation des différents logiciels existants.

[Manuel utilisateur du logiciel Fudaa-LSPIV 1.7.3.pdf](https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv/files) » disponible sur <https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv/files>



Bibliographie

- Day, T. J. (1976). *On the precision of salt dilution gauging*. *Journal of Hydrology*, 31(3-4), 293-306.
- Day, T. J., & Day, T. T. (1977). *Field procedures and evaluation of a slug dilution gauging method in mountain streams*. *Journal of Hydrology (New Zealand)*, 113-133.
- Gilman, K. (1977). *DILUTION GAUGING ON THE RECESSON LIMB: 2. THE INTEGRATION METHOD/Mesures par dilution sur la courbe de tarissement: 2. Méthode par intégration*. *Hydrological Sciences Journal*, 22(4), 469-480.
- André, H. (1960). *Méthode chimique de dilution Procédé par intégration*. *La Houille Blanche*, 833-843.
- Heyman, J., *TracTrac: a massive object tracking algorithm to measure earth surface dynamics*, *Computers and Geosciences*, 128, 11-18, doi:10.1016/j.cageo.2019.03.007.
- Mark A. Fonstad, James P. Reichling & Jon W. Van de Grift (2005) *The Transparent Velocity-Head Rod for Inexpensive and Accurate Measurement of Stream Velocities*, *Journal of Geoscience Education*, 53:1, 44-52, DOI: 10.5408/1089-9995-53.1.44
- Robin G. Pike, Todd E. Redding & Carl J. Schwarz (2016) *Development and testing of a modified transparent velocity-head rod for stream discharge measurements*, *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques*, DOI:10.1080/07011784.2015.1127776
- Young, E.L. and R.G. Pike. (2015). *Stream Velocity Rod User's Guide*. BC Ministry of Environment. 6pp.
- Pour les étapes du traitement et les détails de fonctionnement de Fudaa-LSPIV, se référer au « Manuel utilisateur du logiciel Fudaa-LSPIV 1.7.3.pdf » disponible sur <https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv/files>



PARTIE 3 : Hydrochimie : vers des capteurs bas coûts pour les mesures in-situ des concentrations en nitrates

Introduction

Lors de l'évaluation des opérations de restauration de cours d'eau, le suivi de l'évolution des paramètres physico-chimiques de l'eau peut permettre de mieux comprendre l'évolution du système nappe-rivière dans le temps. Il est par exemple possible de déterminer si la zone restaurée recouvre ses fonctions naturelles à la suite d'une restauration, comme la dégradation des matières organiques et l'oxydation de l'azote ammoniacal dans les zones aérobies (ex : zone hyporhéique), ou encore la réduction des nitrates et sulfates dans les zones anoxiques (ex : zones humides).

La mesure de certains de ces paramètres chimiques peut alors se révéler importante dans la caractérisation de l'efficacité d'une restauration. Mais la mesure de la qualité de l'eau est généralement limitée par différents facteurs, dont entre autres : les coûts, le niveau de technicité, le délai d'analyse en laboratoire, la difficulté de mesure in-situ et l'obtention des valeurs de concentrations en temps réel.

Certains capteurs permettent des mesures in-situ et en continu de certains paramètres hydrochimiques, comme les sondes multi-paramètres. Mais leur prix est élevé et leur utilisation demande un peu d'expérience. Le développement de capteurs à faible coût vise à dépasser ces deux contraintes en permettant la mesure de différents paramètres à un large panel d'utilisateurs, du fait de l'accessibilité du prix, et de la simplicité de la technique. Dans le cadre du projet BERCEAU, nous avons affiné un protocole de mesure des concentrations en nitrates à l'aide d'un smartphone. Ce protocole permettrait de proposer un outil accessible à tous pour le suivi de certains paramètres physico-chimiques in-situ (nitrates, nitrites, ammonium et pH).

3.1. *Nitrate App* : la mesure de paramètres hydrochimiques par smartphone

L'application *Nitrate App* est une application gratuite pour smartphone, conçue par l'entreprise *Deltares* (Pays Bas). *Nitrate App* permet la mesure de différents paramètres physico-chimiques dans l'eau, tels que la concentration en nitrates, nitrites, ammonium et pH.

Nitrate App (Figure 42) utilise des bandelettes colorimétriques, et un algorithme d'interpolation colorimétrique à partir d'une photographie des bandelettes.



Figure 42 Illustration de l'ensemble des éléments permettant la mesure de nitrates, par bandelettes colorimétriques et par l'application Nitrate App. De gauche à droite : application Nitrate App développée par Deltares, carte légende pour la mesure de nitrates (Deltares) et flacon de 25 bandelettes colorimétrique de marque Hach.

Dans le cas des bandelettes colorimétriques traditionnelles (pour la mesure du pH par exemple), il suffit de tremper la bandelette dans la solution à mesurer, puis de comparer à l'œil nu la couleur de la pastille aux couleurs indiquées sur une légende, pour en déduire la valeur de la concentration de l'élément mesuré (voir Figure 43). L'innovation de *Nitrate App* consiste à éliminer la source d'erreur due à l'utilisateur lors de la lecture des résultats à l'œil nu. Un algorithme d'interpolation permet de mieux traduire les nuances de couleurs apparaissant sur les bandelettes en termes de concentrations. La couleur de la bandelette est comparée une gamme de couleurs beaucoup plus fine que celle généralement proposée avec les kits de colorimétrie de terrain.

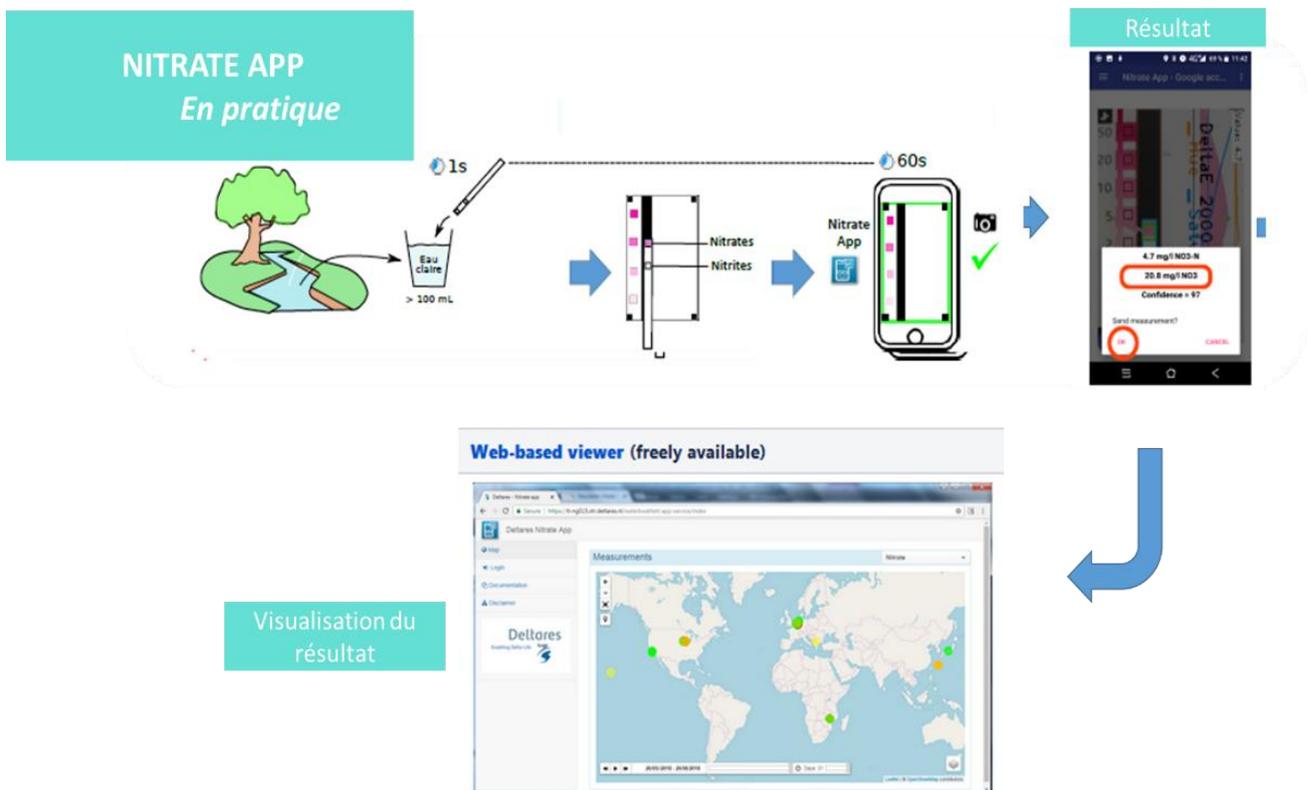


Figure 43 Schéma des différentes étapes de la mesure de Nitrates par smartphone via l'application Nitrate App



Le résultat de la mesure peut ensuite être : stocké dans une base de données en ligne, visualisé sur une carte, partagé avec d'autres utilisateurs et téléchargé gratuitement.



Volontairement développé à des fins de science participative, *Nitrate App* contribue à améliorer la couverture spatiale et temporelle de la mesure de la qualité de l'eau.

L'erreur sur la mesure de nitrates via *Nitrate App* annoncée par le fabricant est de +/- 30%. Cette incertitude sur la mesure doit être diminuée pour rendre cette méthode attractive dans le cadre d'un usage professionnel dans différents domaines d'application. L'objectif de cette étude est d'identifier les sources d'incertitude sur cette mesure, puis d'optimiser le protocole de mesure et de proposer une nouvelle gamme d'incertitude plus adaptée aux objectifs de suivi. A cette fin, des expériences ont été menées au laboratoire de *Géosciences Rennes*, puis ont été suivies d'une phase de test sur le terrain à l'échelle régionale.

3.2. Etude des sources d'incertitude sur la mesure : expériences en laboratoire et résultats

3.2.1. Antécédents

Les incertitudes sur la mesure des concentrations en nitrates peuvent provenir de plusieurs sources d'erreur : les variables qui contrôlent la réaction chimique sur la bandelette (temps, température et quantité d'eau) et les variables pour l'analyse d'image par l'application *Nitrate App* (intensité et homogénéité de l'éclairage). Des tests en laboratoire ont été déjà réalisés lors du projet TReNDS par SEGES (Coopération Agricole au Danemark) et l'université d'Arhus afin d'étudier l'influence de la température de l'échantillon (2°C, 10°C et 20°C) sur la mesure, et l'influence du temps choisi pour la prise de vue avec *Nitrate App* (30 secondes et 60 secondes) (Figure 44).

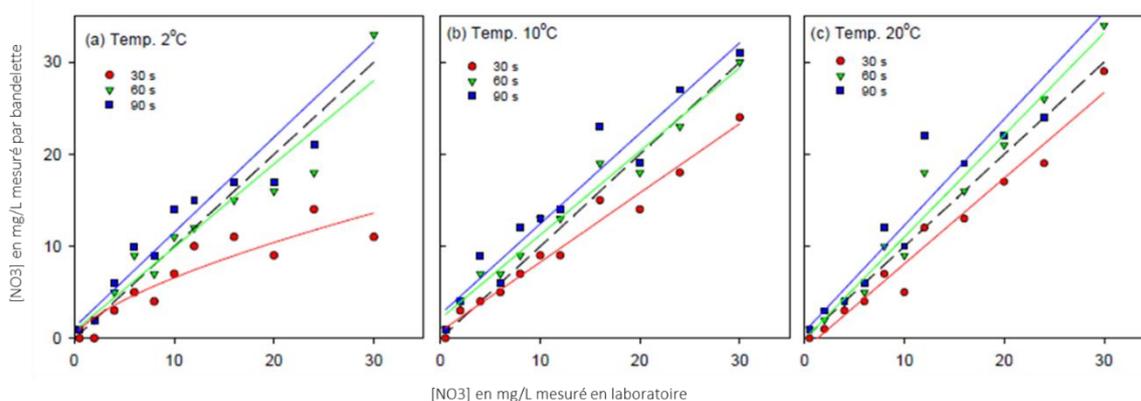


Figure 44 Concentrations en $\text{NO}_3\text{-N}$ mesurées par bandelette après 30 sec, 60 sec et 90 sec pour des températures (air et échantillon) de 2°C (a), 10°C (b) et 20°C (c) à partir de concentrations contrôlées en laboratoire. La ligne en pointillés représente la ligne de régression 1 :1.

Deux résultats principaux sont mis en évidence par ces graphiques. Lorsque la mesure se fait 30 secondes après trempage de la bandelette (comme recommandé par Hach), les concentrations en nitrates sont sous-estimées. Plus la température de l'air et de l'échantillon est basse, plus la cinétique de la réaction est lente, et donc plus la concentration en nitrates est sous-estimée. Pour l'ensemble des températures testées (2°C ; 10°C et 20°C), les mesures réalisées à 30 secondes mènent à une sous-estimation des concentrations et celle réalisées à 90 secondes à une surestimation des concentrations. Les valeurs obtenues lors des mesures à 60 secondes sont les plus proches des concentrations mesurées en laboratoire. Le temps de réaction et la température de l'air et de l'échantillon sont donc des paramètres importants pour cette mesure. 60 secondes est le temps de référence utilisé pour la suite du protocole expérimental. Une des applications des bandelettes colorimétriques est la mesure in-situ, où le

contrôle de la température n'est pas envisageable. Une légère sous-estimation des concentrations en nitrate est possible si la température est basse (<5 °C). L'incertitude due à ce facteur n'est pas quantifiée dans cette étude.

Par ailleurs, à la suite de ces tests, l'incertitude totale annoncée par l'entreprise SEGES est de $\pm 30\%$. Cette incertitude reste élevée, et n'est pas adaptée pour de nombreux domaines d'application. Dans le projet BERCEAU, nous avons déterminé d'autres paramètres pouvant être source d'erreurs sur la mesure. Il s'en est suivi une amélioration du protocole pour réduire l'incertitude sur la mesure.

3.2.2. Protocoles des expériences en laboratoire

Les sources d'incertitude sur la mesure ont été divisées en deux catégories : celles liées aux bandelettes colorimétriques et celles liées à la mesure par l'application *Nitrate App*. La Figure 45 résume es différents paramètres testés en laboratoire.

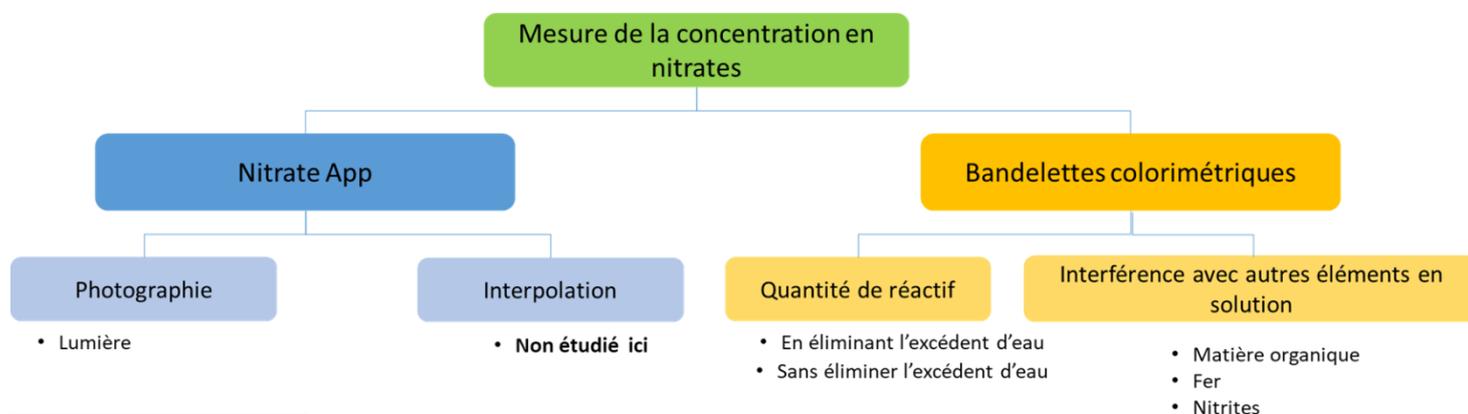


Figure 45 Différents paramètres testés en laboratoire afin d'évaluer les sources d'incertitude sur la mesure de Nitrates par bandelette colorimétrique et smartphone. *(LDQ nitrites : 0.05 mg/L, incertitude (+/-0.01 mg/L) ; LDQ nitrates 0.01 mg/L, incertitudes (+/- 1.5 mg/L). Toutes les mesures par smartphone sont faites à 60 secondes (+/-1 seconde).

Pour toutes les expériences, les échantillons mesurés par l'application *Nitrate App* ont été analysés par chromatographie ionique (Laboratoire *GeOHeLis* –Géosciences Rennes) * .

Influence de l'intensité lumineuse

Les mesures faites en laboratoire pour définir l'influence de la luminosité ont été effectuées avant d'avoir défini le protocole optimal mais avec le protocole préconisé par *Nitrate App*. Différentes solutions de concentration connues en nitrates sont mesurées à des intensités lumineuses variables. La mesure de luminosité est faite en Lux à l'aide du capteur photosensible d'un smartphone. Elle est mesurée en continu lors de l'expérience pour chaque mesure réalisée avec *Nitrate App* (avec son incertitude).

Interpolation colorimétrique

La méthode d'interpolation colorimétrique utilisée par l'application *Nitrate App* n'est pas étudiée ici.

Quantité d'eau sur la bandelette

Expérience 1 :

Après trempage de la bandelette dans la solution à mesurer (échantillon de concentration connue, mesurée en laboratoire), on teste 3 protocoles :

- **Protocole A** : Sans agiter la bandelette après trempage ;

- **Protocole B :** En donnant une tape avec le pouce et l'index sur la partie cartonnée de la bandelette (« pichenette ») après trempage ;
- **Protocole C :** En agitant la bandelette après trempage.

Expérience 2 :

On répète entre 10 et 12 fois successivement la mesure d'un échantillon de concentration connue, et ce pour différentes concentrations. On réalise cette expérience pour 3 concentrations différentes en appliquant le protocole A puis pour 5 concentrations différentes en appliquant le protocole B. On regarde l'évolution du coefficient de variation (CV : rapport de l'écart-type à la moyenne) en fonction du nombre de mesures réalisées. Plus la valeur du coefficient de variation est élevée, plus la dispersion autour de la moyenne est grande. Plus la valeur du coefficient de variation est faible, plus l'estimation est fidèle.

Interférences avec d'autres éléments en solutions

Une autre méthode d'analyse des nitrates dans l'eau est la méthode par spectroscopie UV. Basée sur la mesure de l'absorbance due au nitrate et largement utilisée pour la détermination du nitrate dans les échantillons d'eau, elle est sujette à des interférences (dues à l'absorption) avec différents éléments tels que : la matière organique, les oxydes de fer, les chlorures, les nitrites et les sédiments en suspensions. Par soucis de comparaison avec la méthode UV, nous avons testé si ces mêmes éléments perturbent la mesure par bandelette en les ajoutant à différentes concentrations dans les solutions de références qui ont servies d'échantillons.

3.2.3. Résultats

Influence de la luminosité

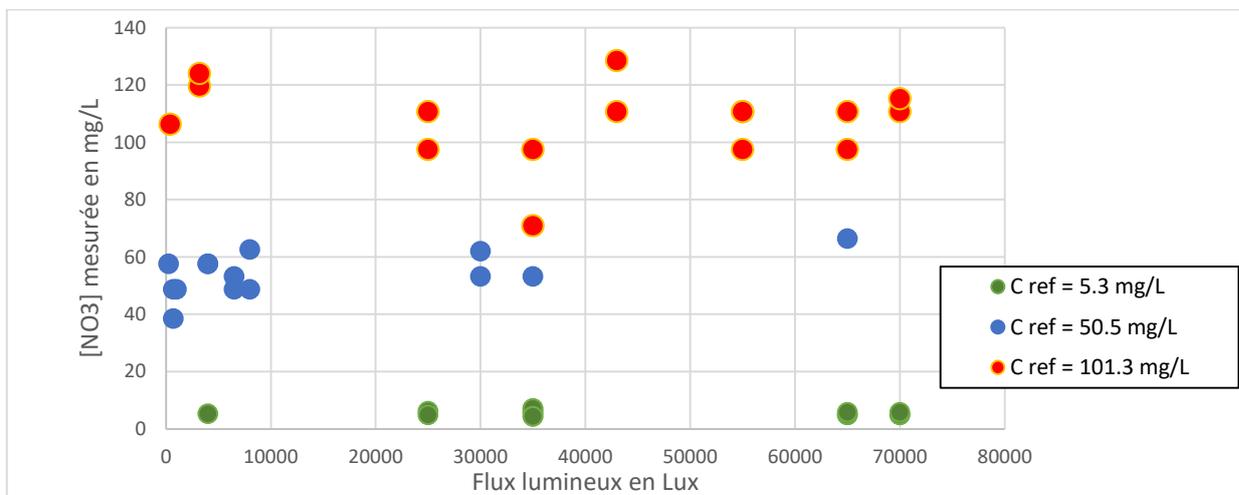


Figure 46 Résultats de l'expérience en laboratoire sur l'influence de l'intensité lumineuse lors de la mesure des nitrates par bandelette colorimétrique et smartphone. Incertitude sur la valeur de l'intensité lumineuse : 12 %.

La dispersion des valeurs mesurées autour des valeurs de référence correspond à l'incertitude sur la mesure annoncée par *Nitrate App* en appliquant le protocole de mesure original (+/- 30%) (Figure 46). La dispersion des valeurs mesurées ne dépend pas de l'intensité lumineuse.

L'hypothèse qui permet d'expliquer ces résultats est la suivante : le capteur photographique du smartphone, équipé d'un dispositif de balance des blancs, va automatiquement corriger la luminosité, à la fois sur la carte légende *Deltares* sur laquelle est représentée l'échelle colorimétrique de référence, et sur la bandelette. Une variation d'intensité lumineuse progressive ne va donc pas avoir d'influence sur le résultat, si le temps de variation de la lumière est inférieur au temps nécessaire pour effectuer la balance des blancs. Si la variation de lumière est trop rapide pour le capteur du smartphone, la mesure va être perturbée. De la même manière, si



la carte et la bandelette ne sont pas éclairées de façon homogène (présence d'ombre sur une partie de la légende, reflets), la mesure sera faussée. Il convient donc de s'assurer qu'il n'y ait pas de zone d'ombre sur la photo prise par l'application.

NB : dans les options de l'application, il est possible de choisir de sauvegarder toutes les photos prises par l'application. Ainsi, si une valeur paraît erronée, il est possible de vérifier l'absence d'ombre ou de reflets sur la photo prise à une date et heure donnée.

Influence de la quantité d'eau sur la bandelette

Expérience 1 : Comparaison de méthodes pour contrôler la quantité d'eau sur la bandelette :

Protocole A et B : Résultats

En suivant le protocole A (sans agiter), si les résultats sont corrects pour des faibles concentrations en nitrates (5mg/L), l'écart type des concentrations de 50 mg/L ou 100 mg/L est de l'ordre de 20 % (Figure 47). Pour le protocole B (avec « pichenette »), l'écart type maximal (à 100 mg/L) est de l'ordre de 6% (Figure 48, Tableau 1).

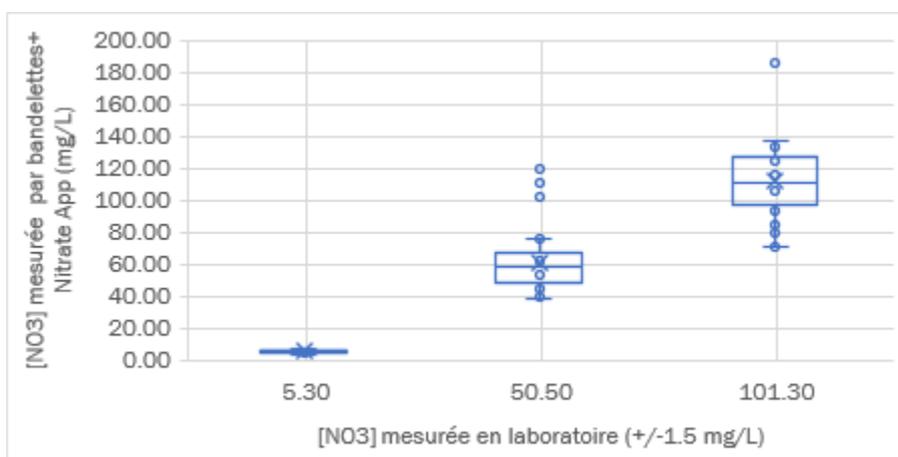


Figure 47 Résultats protocole A) : Graphique sous forme de « boîte à moustache » ou box-plot, représentant la répartition statistique des résultats des séries de mesures pour les concentrations de référence suivantes : 5.3 mg/L, 50.5 mg/L et 101.3 mg/L.

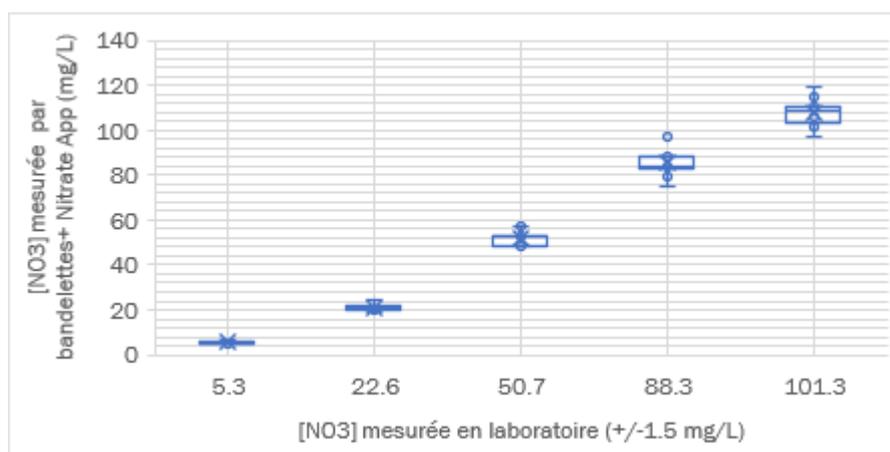


Figure 48 : Résultats protocole B : Graphique sous forme de « boîte à moustache » ou box-plot, représentant la répartition statistique des résultats des séries de mesures pour les concentrations de référence suivantes : 5.3 mg/L, 22.6 mg/L, 50.7 mg/L et 101.3 mg/L



Tableau 1 : Statistiques sur les résultats de l'expérience 1 en suivant les protocoles A et B.

Protocole A : Sans éliminer l'excédent d'eau				Protocole B : En éliminant l'excédent d'eau grâce à une pichenette			
Concentration de l'échantillon mesurée en laboratoire (± 1.5 mg/L)	Nombre de mesures	Moyenne des mesures par bandelette (mg/L)	Ecart type (mg/L)	Concentration de l'échantillon mesurée en laboratoire (± 1.5 mg/L)	Nombre de mesures	Moyenne des mesures par bandelette (mg/L)	Ecart type (mg/L)
5.30	27.00	5.47	1.01	5.30	12.00	5.63	0.47
50.50	46.00	60.68	18.04	22.00	7.00	21.07	1.63
101.30	32.00	111.70	22.96	50.50	13.00	52.15	3.23
				88.00	10	85.51	5.94
				101.30	12	108.15	6.09

Si l'on s'intéresse à l'ajustement linéaire des mesures pour chaque protocole : les équations et incertitude sur les pentes sont les suivantes :

Protocole A (sans agiter) : $y = 1.10 (+/0.05) - 2.24 (+/-3.10)$ ($R^2 = 83$)

Protocole B (avec « pichenette ») : $y = 1.07 (+/0.01) - 1.31(+/-1.02)$ ($R^2 = 99$)

L'ajustement résultant du protocole B se rapproche davantage de la droite 1:1. Il est caractérisé par un R^2 plus élevé et très proche de 1, et les incertitudes associées à la pente et à l'ordonnée à l'origine sont plus faibles.

Protocoles C : Résultats

Le protocole C est testé de manière plus succincte : à six reprises, pour une concentration de référence de 50.1 mg/L, on teste successivement une mesure avec une bandelette sans agiter après trempage, puis une mesure en agitant après trempage.

Il apparaît que si l'excédent d'eau présent sur la bandelette (sans agiter) induit une surestimation des concentrations en nitrates, à contrario, trop agiter la bandelette induit dans la majorité des cas une sous-estimation des valeurs avec une dispersion des valeurs plus faible (Figure 49).

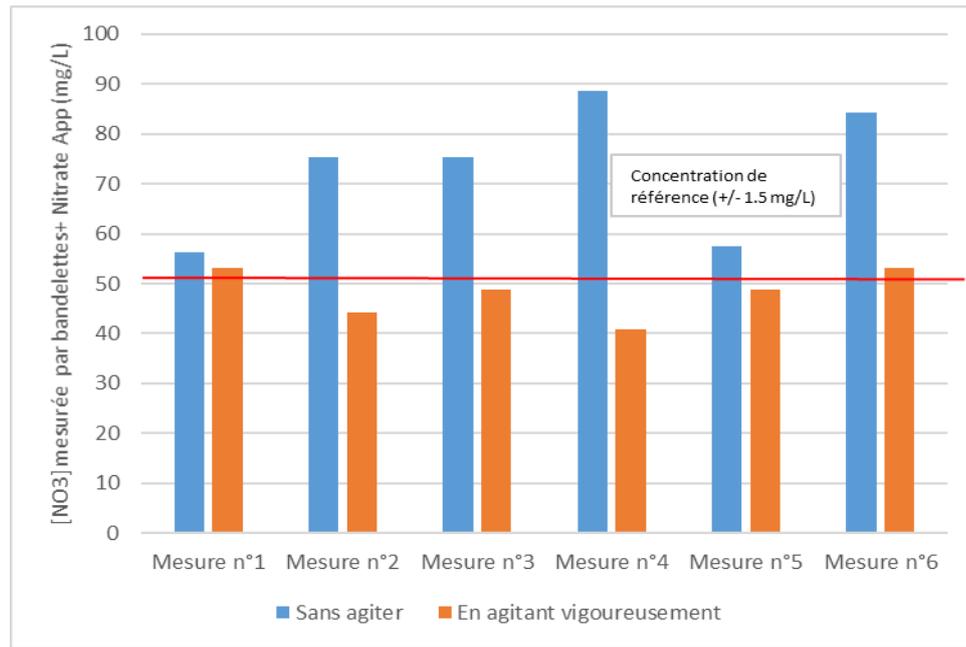


Figure 49 : Comparaison des résultats des mesures sans et avec agitation de la bandelette après trempage, pour une concentration de référence ($50.5 \text{ mg/L} \pm 1.5 \text{ mg/L}$).

Expérience 2 : Evolution du coefficient de variation selon le nombre de mesures, en fonction de protocole appliqué (A ou B)

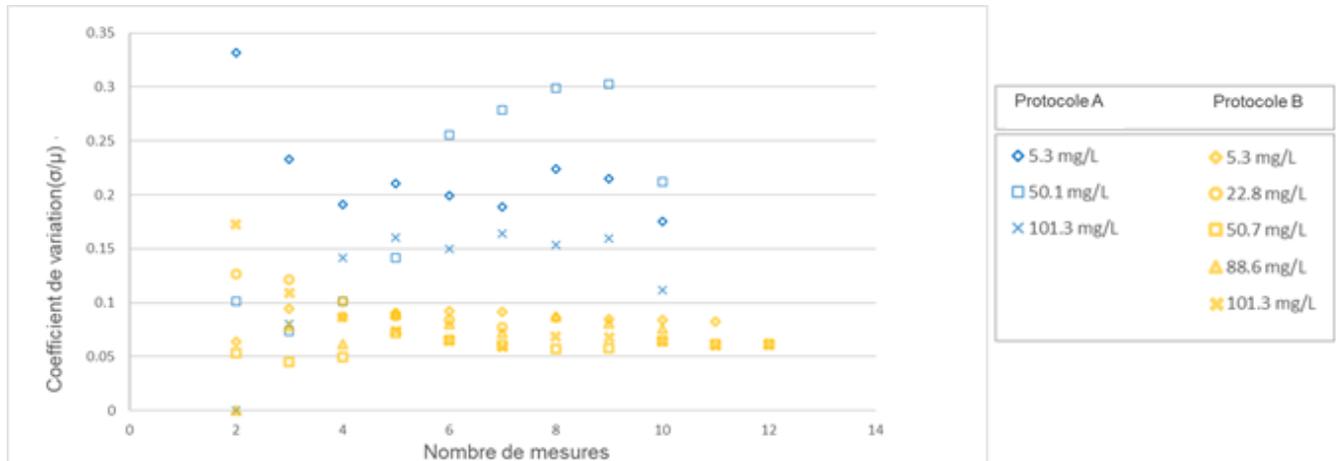


Figure 50 : Evolution du coefficient de variation en fonction du nombre de mesure réalisées, pour différentes valeurs de concentration de référence, en suivant le protocole A ou le protocole B.

La Figure 50 met en évidence l'efficacité du protocole B par rapport au protocole A. En appliquant le protocole A, le coefficient de variation ne se stabilise pas en fonction du nombre de mesures. Avec le protocole B, le coefficient de variation se stabilise en dessous de 0.1 au bout de la sixième mesure. La dispersion des valeurs la plus importante se produit lorsque le volume d'eau déposé sur la bandelette n'est pas suffisamment contrôlé. La difficulté est ici de définir un protocole simple, pratique et standard, pour obtenir un volume d'eau sur la bandelette qui soit répétable quel que soit l'observateur. Ceci avec un minimum de matériel à emporter in-situ. Agiter la bandelette ne semble pas être un protocole satisfaisant car les volumes d'eau en contact avec les réactifs de la bandelette dépendent de la manière dont la bandelette est agitée.

L'intensité du pulse mécanique induit par une « pichenette » semble reproductible pour un même observateur ou différents observateurs. L'application de ce protocole réduit sensiblement la variabilité des mesures et sera considéré dans la suite comme le protocole standard pour tester l'influence des paramètres.

Présence d'autres éléments en solution (hors nitrites)

Pour tester l'influence d'une concentration en oxyde de fer et de sédiment en suspension, nous avons appliqué le protocole B sur des solutions de laboratoire avec des concentrations en nitrate relativement faibles, ce qui correspond aux concentrations couramment rencontrées en Bretagne. Pour les oxydes de fer III et les matières organiques, la gamme choisie de concentrations est plus large de manière à valider le résultat sur un large panel de contextes chimiques. Pour les sédiments en suspension, la gamme de concentration en limon siliceux est faible car pour les fortes concentrations, l'eau est naturellement colorée et perturbe rapidement l'analyse des couleurs. Pour les chlorures, la gamme de concentrations est très large de manière à couvrir des contextes estuariens et de lagunes.

Les résultats (Figure 51, Tableau 2,) ne montrent pas une augmentation de la dispersion ou une tendance des valeurs notables qui seraient liées aux concentrations en oxyde de fer, sédiment en suspension ou matières organiques. Une sous-estimation assez nette est observée pour des valeurs de chlorures élevées (50 et 100 g/l). Nous n'avons pas d'éléments pour mieux comprendre cet effet. Néanmoins, pour des concentrations de 30 g/l en chlorures, similaires à celles de l'eau de mer, nous n'observons pas d'effet notable.

Tableau 2 : Résultats des expériences sur les interférences possibles sur la mesure de nitrates en présences d'autres éléments en solution

Paramètre testé	[Paramètre testé] (mg/L)	[NO3] (mg/L) Laboratoire	[NO3] Nitrate App (mg/L)
Oxydes de fer III	20	0	0
			0
			0
	20	5.3	5.3
			5.3
			5.8
	100	50.7	52.8
			48.7
			55
Sédiments en suspension	10	0	0
			0
			0
	10	22	22.4
			19.3
			22

- NB : pour toutes les expériences réalisées, $[Cl^-] = [SO_4^{2-}] = [NO_3]$. Le calcul des incertitudes sur la mesure est donc valable pour des concentrations de chlorures et sulfates inférieures ou égales à celles de nitrates.

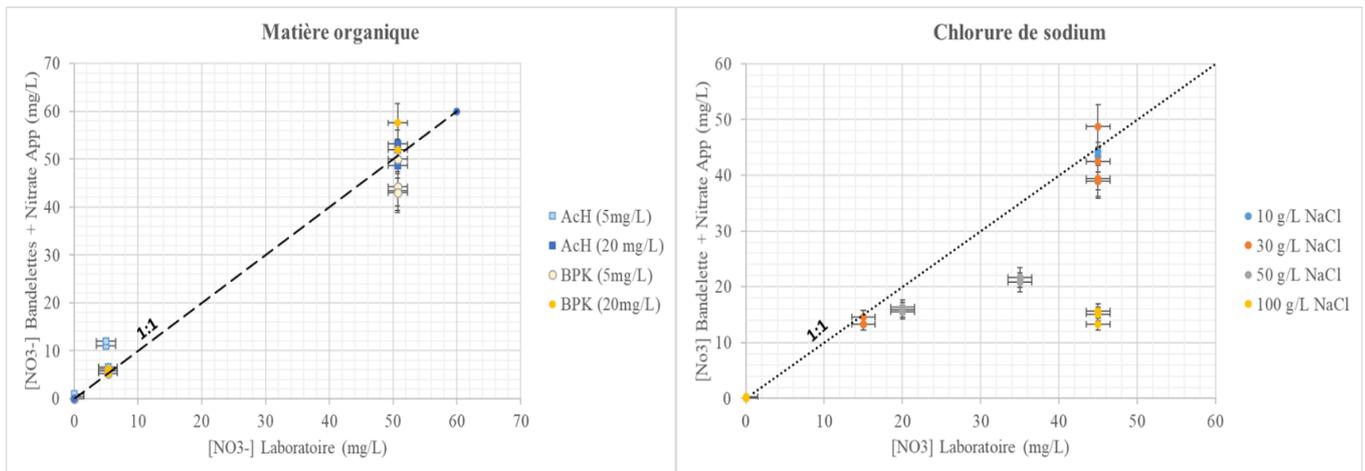


Figure 51 : Influence de la concentration en matières organiques et en chlorures sur la mesure de la concentration en nitrates. Les solutions ont été réalisées et contrôlées en laboratoire.

Présence de nitrites

Deux pastilles sont présentes sur la bandelette destinée à la mesure de nitrates (Figure 52). La pastille supérieure de la bandelette, scannée par *Nitrate App* lorsque la carte légende « Nitrates » est utilisée, donne en réalité la valeur de la concentration égale à la somme des nitrites et des nitrates présents en solution ($[NO_2^-] + [NO_3^-]$). La pastille inférieure de la bandelette mesure la concentration en nitrites seulement. Dans la grande majorité des cas, seuls les nitrates sont présents en solution dans la plupart des eaux de surface. En l'absence de coloration de la pastille inférieure, la concentration mesurée est celle des nitrates exclusivement (tous les tests décrits antérieurement ont été réalisés dans des échantillons dépourvus de nitrites).

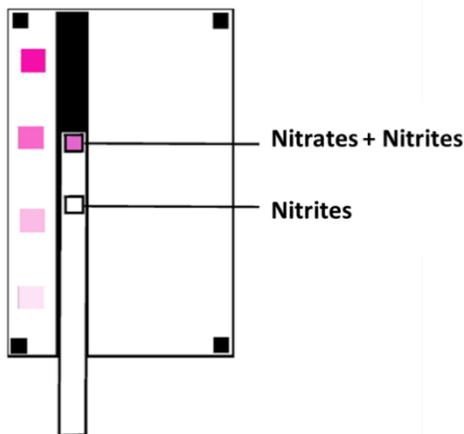


Figure 52 ; Schéma de la carte légende « nitrates » et des deux pastilles présentes sur la bandelette. La pastille du bas mesure la concentration en nitrites et celle du haut la concentration en nitrates + nitrites

Si la pastille inférieure se colore, cela indique la présence de nitrites. Les nitrites proviennent de la réduction de nitrates et sont donc généralement présents plutôt dans les eaux souterraines. Pour connaître la concentration en nitrites, il faut se munir de la carte légende « nitrites » et mesurer la concentration de la même manière que pour les nitrates. En théorie, pour connaître la concentration réelle en nitrates, il convient alors d'ôter la concentration en nitrites mesurée à l'aide de la carte « nitrites » à celle mesurée à l'aide de la carte « nitrates ».

Cependant, les concentrations naturelles en nitrites des eaux de surface et souterraines sont généralement bien inférieures aux concentrations en nitrates. La variation de la concentration en nitrates mesurée par l'application *Nitrate App* due à la présence de nitrites, est généralement moins importante que la variabilité des résultats due à l'incertitude sur la mesure. L'impact de la présence de nitrites sur la mesure des nitrates est donc minime.



Conclusions sur les tests en laboratoire

A partir des analyses réalisées en laboratoire, les conclusions générales sur les sources d'incertitudes sont résumées dans la Figure 53 :

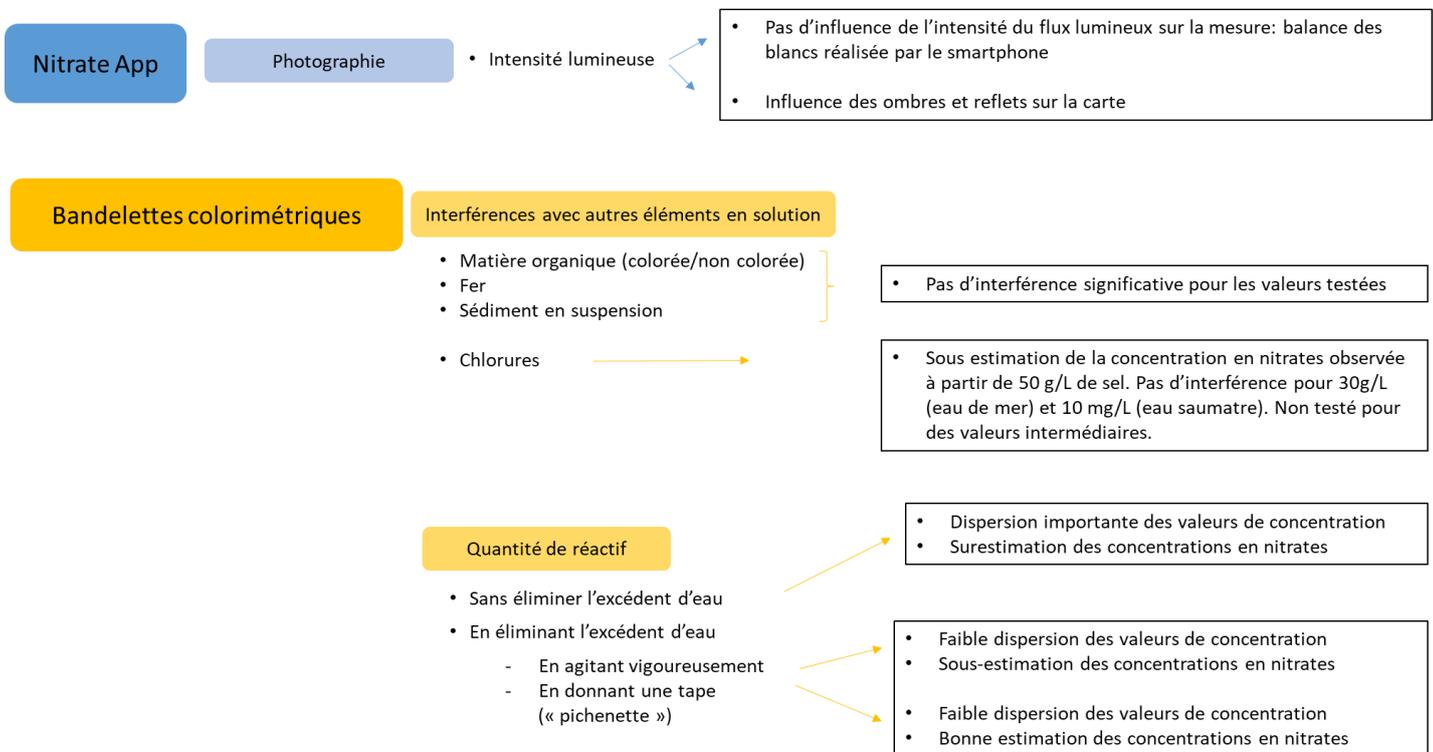


Figure 53 : Principales conclusions à la suite des expériences en laboratoire sur les sources d'incertitude sur la mesure de nitrates via les bandelettes colorimétriques et l'application Nitrate App

3.2.4 Protocole optimal

En tenant compte de ces résultats, le protocole optimal de mesure, afin de réduire les incertitudes, est le suivant :

1. Tremper la bandelette une seconde dans la solution à mesurer ;
2. Donner une tape avec le pouce et l'index sur la partie cartonnée de la bandelette ;
3. Poser la bandelette sur la carte légende « nitrates », veiller à l'absence d'ombre ou de reflet sur la carte, et à ce que la lumière soit stable au moment de la prise de photo ;
4. Prendre la photo à 60 secondes précisément ;
5. Si la pastille correspondant aux nitrites se colore, faire une nouvelle mesure avec la carte légende « nitrites » à 60 secondes précisément également. Soustraire la valeur à la première concentration mesurée avec la carte « nitrates »

Ce protocole optimal est illustré et détaillé dans la fiche annexe [Fiche technique N° 8 - **Erreur ! source du renvoi introuvable.**].

Incertitudes sur la mesure en utilisant le protocole optimal

A partir des concentrations obtenues à la suite d'une série de mesures réalisée avec le protocole optimal (54 mesures, pour 5 concentrations de référence), les incertitudes sur la mesure sont calculées selon la méthode des incertitudes élargie de type A (ou intervalle de confiance à 95%).



$$x_i = \frac{t * s}{\sqrt{N}}$$

Où : t = *facteur de student* pour l'intervalle de confiance 95 % et fonction du nombre de mesures pour chaque concentration de référence ; s = *écart type*.

Tableau 3 : Incertitudes calculées à partir des répétitions de mesures pour des concentrations connues en nitrates

Concentration de hantillon mesurée laboratoire (mg/L)	Nombre de mesures	Moyenne (mg/L)	Ecart type (mg/L)	Incertitude type (mg/L)	Incertitude élargie (P=95%) –Student (mg/L)	Incertitude élargie relative (%)
5.3 ± 1.5	12	5.61	0.47	0.14	0.25	4.8
22.6 ± 1.5	7	21.02	1.63	0.66	1.26	5.73
50.7 ± 1.5	13	52.05	3.23	0.93	1.65	3.26
88.3 ± 1.5	10	85.33	5.94	1.98	3.59	4.08
101.3 ± 1.5	12	107.99	6.09	1.84	4.48	4.43

La densité de distribution des valeurs suivant les différents protocoles (sans enlever l'excédent d'eau et en enlevant l'excédent d'eau avec une pichenette) est représentée dans la Figure 54.

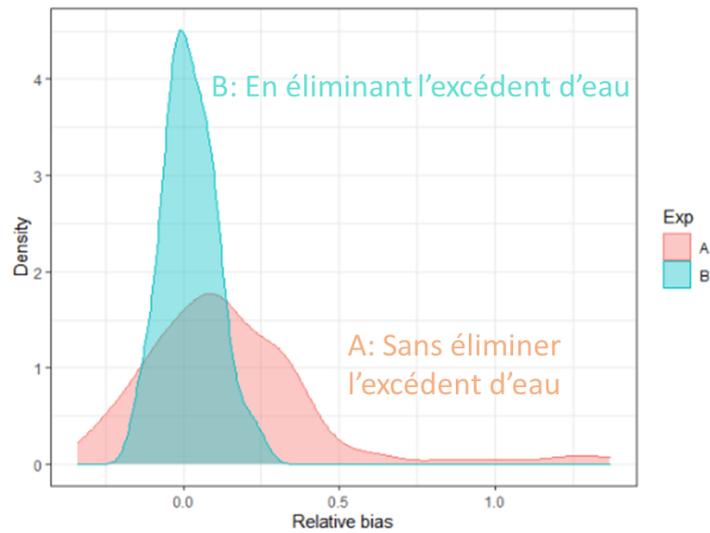


Figure 54 : Densité de distribution des valeurs de biais relatifs selon les différents protocoles ; le biais relatif a été calculé pour chaque mesure selon l'équation : $Biais\ relatif = \frac{([NO3-]_{Labo} - [NO3-]_{Bandelettes})}{[NO3-]_{reference}}$

A partir de cette distribution, on peut calculer les écarts types qui correspondent aux incertitudes sur la valeur, pour un intervalle de confiance (tableau 4). Le pourcentage correspondant à un écart type représente les incertitudes associées à 68 % des valeurs du jeu de données. Le pourcentage correspondant à deux écarts types représente les incertitudes associées à 95 % des valeurs du jeu de données.



	1σ (CI= 68%)	2σ (CI=95%)
Protocole A	29%	58%
Protocole B	8%	16%

Tableau 4 : Ecart type calculé sur les biais relatifs en fonction des différents protocoles

L'application du protocole B permet d'obtenir des valeurs de concentration en nitrates avec une incertitude relative de +/- 8% (+/- 1σ) à comparer aux +/- 30 % induit avec le protocole A. Ce niveau d'incertitude permet une utilisation de *Nitrate app* beaucoup plus fiable avec un niveau de confiance comparable à d'autres méthodes de mesures de nitrates.

3.3. Phase de test sur le terrain

3.3.1. Objectifs

Le protocole optimal A a été testé sur le terrain en Bretagne par un groupe de 7 personnes avec des profils variés, représentant différents types d'organismes (Figure 55). Le but de cette phase de test est d'évaluer les incertitudes sur la mesure en contextes in-situ, en faisant varier les observateurs et les conditions de mesure. Il s'agit également d'évaluer l'intérêt de la méthode dans différents domaines d'application, et de connaître le ressenti des utilisateurs potentiels de *Nitrate app*.

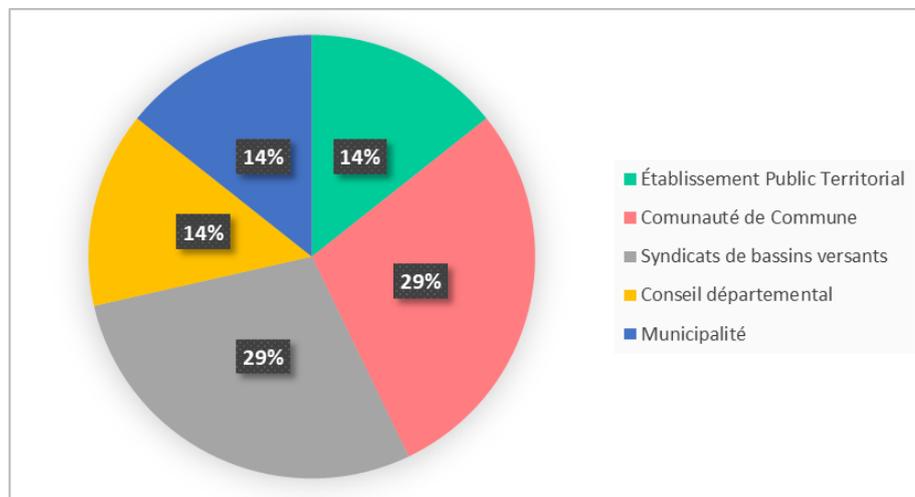


Figure 55 : Proportion des organismes qui ont participé à la phase de test de Nitrate App en Bretagne

Les principaux objectifs visés par les testeurs qui se sont portés volontaires pour le test de l'application *Nitrate App* dans le cadre de leurs activités professionnelles sont les suivants :

- Identification de sources de pollutions,
- Évaluation de la restauration de cours d'eau,
- Évaluation de la qualité des masses d'eau,
- Mesure de gradients de teneurs en nitrates,
- Évaluation de la capacité dépurative d'un système type zone humide,
- Auto-évaluation des concentrations en nitrates dans un contexte agricole.



La grande majorité des mesures a été réalisée dans des cours d'eau. Des mesures ont également été faites dans des drains, zones humides, flaques, eau souterraine ou dans des étangs.

3.3.2. Résultats

Carte des mesures

Au total, on peut compter 147 mesures de nitrates lors de cette phase de test, réalisées entre juillet et septembre 2021, réparties entre l'Ille-et-Vilaine, le Morbihan et le Finistère (Figure 56).

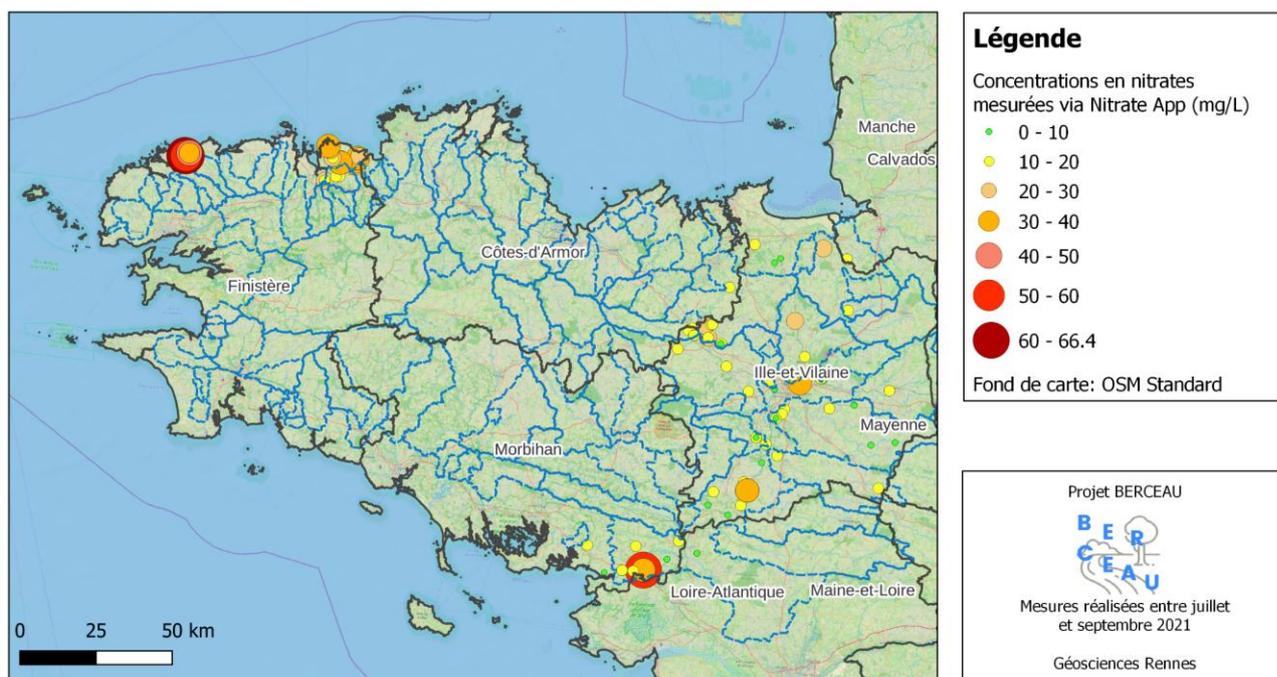


Figure 56 : Carte des mesures faites avec Nitrate App lors de la phase de test sur le terrain. Concentration en nitrate proportionnelle à la taille des points et graduée en fonction de la couleur.

Variabilité temporelle

Certains testeurs ont choisi de mesurer des gradients longitudinaux (ex : le long de la Vilaine), tandis que d'autres ont pu mesurer des variations temporelles en répétant des mesures sur un même point (Figure 57). L'utilisation de *Nitrate App* a permis de répondre à ces différents objectifs. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer la forte variabilité temporelle des concentrations en nitrates en fonction des conditions climatiques, en particulier des précipitations. Ceci montre la nécessité de prendre en compte cette variabilité lors de suivi des nitrates. L'utilisation des bandelettes et de l'application *Nitrate App* peut permettre d'augmenter la fréquence de suivis afin d'apprécier cette variabilité.

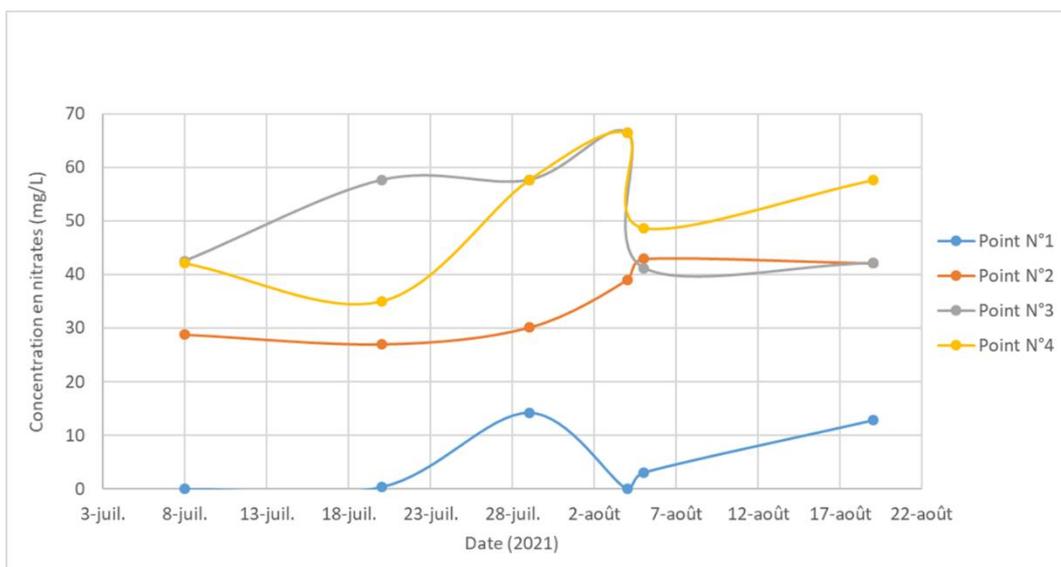


Figure 57 : Variabilité temporelle sur 4 points de mesure avec Nitrate App

Comparaison avec les analyses en laboratoire

Plusieurs testeurs ont réalisé des mesures sur le terrain *Nitrate App* avec, en parallèle, un prélèvement d'échantillons pour une analyse en laboratoire agréé. Les laboratoires d'analyses sont différents selon les « testeurs ». Nous avons ainsi pu comparer les valeurs de concentration. Pour des raisons de coûts pris en charge par les « testeurs », il n'a pas été possible de réaliser une étude en aveugle pour obtenir des données objectives sur les niveaux d'incertitudes des analyses faites en laboratoires. Les niveaux d'incertitudes appliqués aux valeurs obtenues par les laboratoires agréés, sont ceux annoncés par les manipulateurs sondés par téléphone. A noter que le niveau de maîtrise des incertitudes des analyses est très variable selon les manipulateurs et les méthodes d'analyses. La comparaison des valeurs obtenues avec *Nitrate app* et celles des analyses en laboratoire (Figure 58), montre une bonne correspondance pour une majorité de valeurs (proche de la droite 1 :1). Certaines valeurs s'écartent significativement de la droite 1 :1.

Incertitude Nitrate App	Incertitude analyse en laboratoire
8% en laboratoire - protocole optimal	6 à 20 % selon le laboratoire

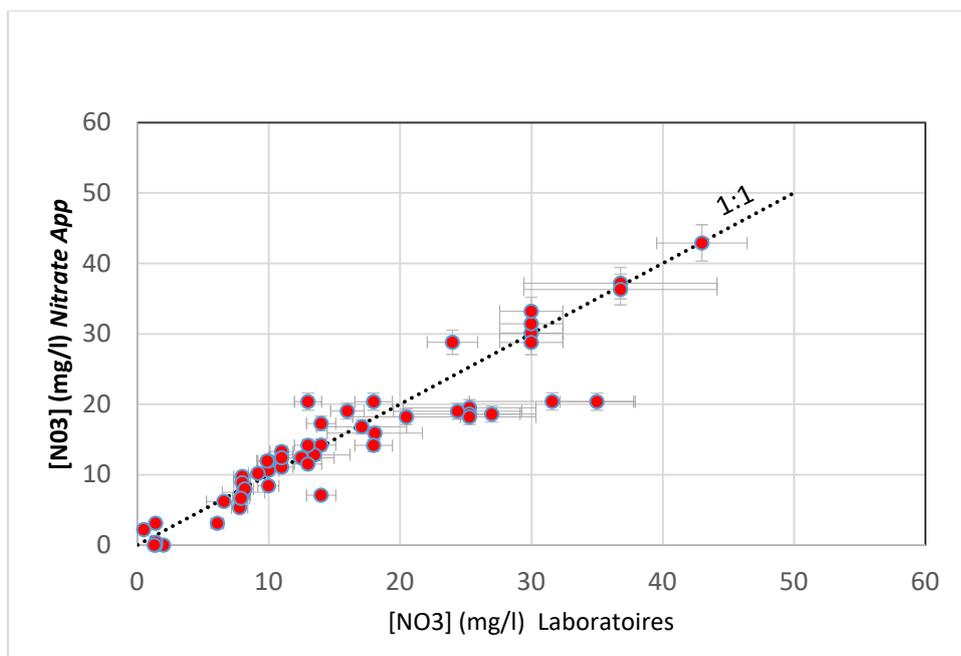


Figure 58 : Comparaison entre les concentrations de nitrates mesurées en laboratoire et sur le terrain avec Nitrate App. Lignes en pointillés noir : droite 1 :1, les barres d'incertitudes correspondent à 1 sigma.

Ces écarts peuvent être liés à différents facteurs. En premier lieu, il existe un biais lié à l'observateur. Le non-respect strict du protocole, et en particulier des 60 secondes précises de temps de réaction, entraîne une variabilité dans les résultats. Parmi les personnes qui ont participé à la phase de test, 3 personnes ont estimé respecter strictement le protocole pour 95 à 100 % des mesures, 3 personnes entre 75 et 85 % des mesures et une personne pour 50 % des mesures. Enfin, la majorité des données qui s'éloignent le plus de la droite 1 :1 est caractérisée par une plus grande incertitude sur la mesure en laboratoire (20%), ce qui peut également être une cause de dispersion des valeurs.

3.4. Conclusions sur l'application Nitrate App

Les mesures réalisées en laboratoire ont permis d'identifier des sources d'incertitude. La source d'incertitude principale est la quantité d'eau présente sur la bandelette. Les meilleurs résultats s'obtiennent en enlevant l'excédent d'eau sur la bandelette après l'avoir trempée dans l'échantillon à mesurer. Il est également conseillé de respecter avec rigueur le temps de réaction (60 secondes). Le non-respect du temps de réaction est la seconde source importante de variabilité des mesures. Des interactions avec d'autres éléments en solution sont possibles, en particulier avec les nitrites et avec la matière organique (si elle est présente en plus grande quantité que les nitrates). En respectant le protocole « optimal » qui découle de ces expériences, on parvient à une incertitude de +/- 8% en prenant en compte des observateurs multiples (intervalle de confiance 68%).

A la suite de la phase de test, tous les utilisateurs ont formulé des avis positifs sur cette méthode de mesure. La méthode se démarque par différents avantages face aux méthodes conventionnelles : des mesures à bas coût, la possibilité d'un résultat immédiat, la mesure in-situ, le degré de précision du résultat, la transportabilité de l'outil ou encore la création automatique de base de données géo-référencées.

La mesure à l'aide d'application smartphone rend possible de nouvelles applications : le développement de la science participative, l'auto-évaluation et amélioration des pratiques agricoles, l'identification de sources de pollutions par des spécialistes mais également par le grand public. La précision des mesures autorise également son usage à des fins de gestion du



territoire (suivi de qualité de masses d'eau, évaluation d'opération de restauration), dans le domaine de la recharge ou pour une utilisation dans le domaine scolaire. On peut également imaginer l'élargissement de cette méthode à d'autres paramètres physico-chimiques, tels que les phosphates, le sulfate ou le potassium. Ceci nécessite cependant que cette méthode de mesure soit certifiée à terme.



Annexe hydrochimie : Fiche technique N°8

Fiche méthode n°8 - Mesure de concentrations en nitrates par smartphone

Mesure de concentrations en nitrates par smartphone

Les bandelettes colorimétriques Hach® associées à l'application sur smartphone Nitrate App de Deltares® consistent un outil simple pour mesurer et suivre la concentration en nitrates dans les eaux superficielles ou souterraines.

Matériel nécessaire



Nitrate App¹

¹ Téléchargement gratuit via PlayStore ou AppStore

² Commande via : order-nl@hach.com

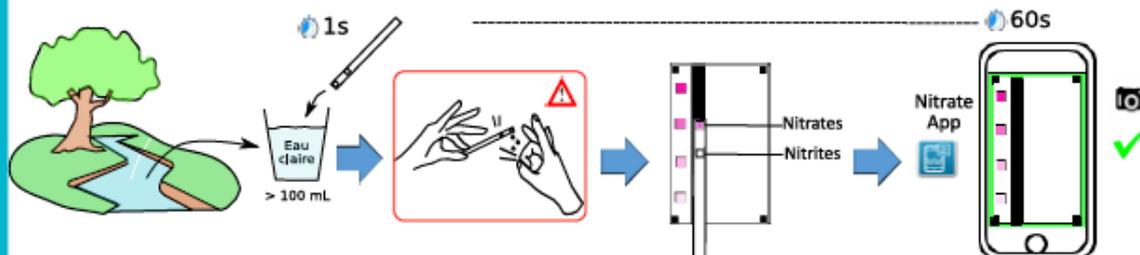


Carte Deltares²



Bandelettes de mesure de nitrates²

En pratique



Précautions:

- Avoir les mains propres et sèches
- Refermez aussitôt le pot de bandelettes après ouverture

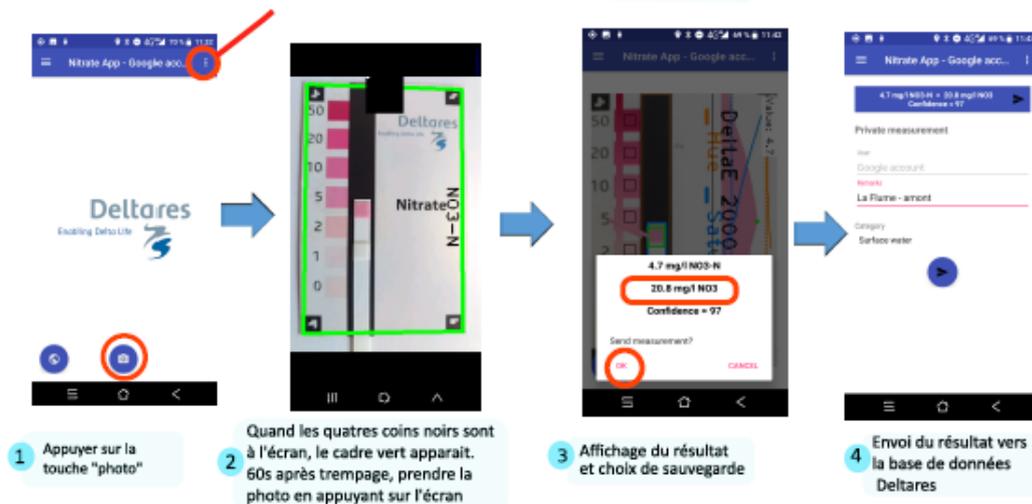
⚠ Juste après avoir trempé la bandelette dans l'échantillon, enlever l'excédent d'eau sur la pastille à l'aide d'une "pichenette" c'est à dire en donnant une tape avec le index sur la partie cartonnée de la bandelette. Cette étape est cruciale pour améliorer la précision de la mesure

⚠ Rincer trois fois le récipient avec l'eau que vous souhaitez mesurer

⚠ Pour une mesure dans un piézomètre, purger avant prélèvement afin d'évacuer l'eau stagnante

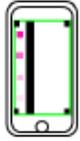
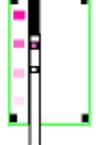
Séquence d'affichage sur le smartphone lors d'une mesure

💡 Pour plus d'options, accédez à l'onglet "Settings"

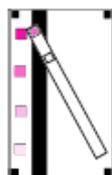


⚠ Veuillez à ce que la lumière soit constante pendant les 5s avant la prise de la photo, et que carte soit éclairée de manière uniforme

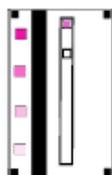


OPTIMUM DE MESURE				
DISTANCE DE PRISE DE VUE  ✓ Le cadre vert doit correspondre au mieux à la taille de l'écran	LUMINOSITÉ  ✓ Luminosité constante ✓ De jour ✓ A l'extérieur	TEMPS  ✓ 60 s après le trempage	POSITION DE LA BANDELETTE  ✓ Sur la bande noire ✓ En face de la couleur la plus proche sur la légende	NOMBRE DE BANDELETTE  ✓ Répétition de la mesure avec 3 bandelettes

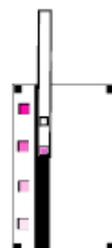
Erreurs à éviter



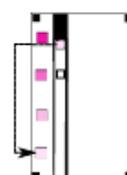
A Bandelette en travers



B Bandelette hors de la bande noire



C Bandelette à l'envers



C La pastille "nitrates" n'est pas placée en face de la bonne couleur sur la légende

Contrôle des résultats

- ✓ Vérifier que votre photo soit nette, sans zone d'ombre ni de reflets
- ✓ Vérifier que la pastille de la bandelette correspondant aux nitrites n'aie pas changé de couleur



Si elle est colorée, cela indique la présence de nitrites. Si des nitrites sont présents dans l'eau, la concentration en nitrates sera surestimée, et l'incertitude sur cette valeur augmente

- ✓ Répéter la mesure avec 3 bandelettes pour diminuer les incertitudes sur le résultat

4 Accéder aux résultats

- Si vous êtes connecté à internet, les données sont envoyées automatiquement vers le serveur de l'application. Si vous êtes hors connexion, elles seront sauvegardées jusqu'à la prochaine connexion du smartphone.
- En vous connectant avec votre compte sur le site : <https://nitrate-app.deltares.nl/>, vous avez la possibilité de visualiser vos données sous forme de carte interactive, ou de les télécharger en format CSV.