

Fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières de la Bassée

Sophie Guillon^{1*}, David Eschbach², Alexis Groleau³, Fulvia Baratelli², Edith Parlanti⁴,
Mahaut Sourzac⁴, Josette Garnier², Benjamin Mercier², Romane Nespoulet², Anun
Martinez², Laurence Lestel²

¹ MINES ParisTech, Université PSL, Centre de Géosciences, Fontainebleau

² UMR METIS – Sorbonne Université, Paris

³ IGP, Université de Paris

⁴ EPOC, Université de Bordeaux

* sophie.guillon@mines-paristech.fr

Résumé

Les gravières représentent une superficie importante de la plaine alluviale de la Bassée, site atelier du PIREN Seine et siège de multiples enjeux, dont l'exploitation des granulats alluvionnaires. Une base de données des caractéristiques de 523 masses d'eau de la Bassée (chenaux abandonnés et gravières) a été réalisée à partir d'images aériennes actuelles et passées. Un ensemble de 9 gravières et de 3 chenaux abandonnés a été échantillonné à l'occasion de 5 campagnes entre 2017 et 2021, en conditions de hautes et basses eaux. La représentativité de cet ensemble par rapport à la totalité des plan d'eau est bonne, même si les gravières de petite surface ne sont pas représentées. Les analyses géochimiques obtenues lors de ces campagnes permettent de comprendre le fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des gravières et leurs relations avec les eaux souterraines. Le bilan hydrique des gravières est réalisé en combinant le suivi météorologique et les isotopes stables de l'eau. A l'échelle annuelle, la contribution des précipitations au volume des gravières est inférieure à celle des eaux souterraines. Surimposé à un écoulement régional qui traverse a priori les gravières, un flux net d'eaux souterraines alimente la gravière. Les gravières sont alors le lieu d'un dégazage important de CO₂, en partie lié à l'arrivée de ces eaux souterraines sursaturées. L'activité biologique dans les gravières est également importante, avec une photosynthèse entraînant la précipitation de calcite en période chaude. Plus largement, ce travail s'inscrit dans une approche générale de co-construction d'indicateurs dans une dynamique interdisciplinaire, en cherchant à renforcer le lien entre les différents compartiments de l'hydrosystème (lit mineur, lit majeur, nappe, annexes hydrauliques) pour une compréhension globale de son fonctionnement.

Points clefs

- ✓ La variabilité du fonctionnement hydro- bio- géochimique des gravières est mise en regard de l'âge, le rapport surface/volume et l'historique de réaménagement
- ✓ Alimentation des gravières par les eaux souterraines, et dégazage de CO₂
- ✓ Forte activité biologique dans les gravières, avec précipitation de calcite en période chaude

Abstract

Gravel pits occupy a large proportion of the La Bassée alluvial plain, a pilot site of the PIREN Seine program, and place of multiple issues, including gravel extraction. A database characterising 523 water bodies (abandoned channels and gravel pits) of the plain was constructed based on actual and past aerial images. A total of 9 gravel pits and 3 abandoned channels was sampled with 5 field campaigns between 2017 and 2021, in low and high-water level conditions. The representativity of this group, compared to the entire set of water bodies, is acceptable, even though gravel pits of small surface area are not represented. Geochemical analyses obtained during field sampling allow to better understand hydrogeological and biogeochemical functioning of the gravel pits, and their connections with groundwater. Water budget of the gravel pits was quantified using both meteorological and water stable isotope data. At the annual scale, precipitations contribute less than groundwater to the gravel pit water volume. In addition to regional flow that probably goes through the gravel pits, a net groundwater inflow is feeding them. CO₂ degassing occurs in the gravel pits, partly due to the inflow of oversaturated groundwater. Biological activity is important in the gravel pits. During warm periods, strong photosynthetic activity leads to calcite precipitation. More generally, this work takes part in a generic and interdisciplinary approach of co-construction of indicators, trying to reinforce the link between the various compartments of the hydrosystem (flood plain, riverbed, aquifer, banks) for a global understanding of its functioning.

Key points

- ✓ Variability of hydro bio geochemical functioning of the gravel pits, to be explained by age, area/volume ratio and redevelopment plans
- ✓ Net groundwater inflow into gravel pits, along with CO₂ degassing
- ✓ Strong biological activity in gravel pits, with calcite precipitation during

Introduction

La plaine alluviale de la Bassée est située entre la confluence de la Seine avec l'Aube et celle avec l'Yonne, à l'amont de Paris. Il s'agit d'une plaine étroite d'environ 6 km de large et 50 km de long, majoritairement agricole mais avec une urbanisation importante et croissante. La Bassée est une zone humide d'intérêt national et siège de nombreux enjeux économiques, dont l'exploitation des granulats alluvionnaires. La plaine de la Bassée est un site atelier du PIREN-Seine depuis la création du programme, avec un regain de travaux menés depuis les années 2010.

La plaine de la Bassée est remplie par des alluvions déposées par la Seine au cours du Quaternaire. L'épaisseur des alluvions varie entre 2 et 9 m selon la position dans la plaine. Ces alluvions, qui hébergent la nappe d'accompagnement de la Seine, reposent sur la formation de la Craie. L'exploitation des carrières de granulats alluvionnaires entraîne la mise à nu de la nappe alluviale et la formation d'étangs, de quelques mètres de profondeur (épaisseur locale des alluvions), appelés gravières. Ces gravières occupent aujourd'hui plus de 10 % de la surface de la plaine de la Bassée. L'extraction de granulats alluvionnaires dans la vallée de la Seine, et en particulier dans la plaine de la Bassée, a accompagné les besoins croissants liés à l'urbanisation et au développement de l'agglomération parisienne depuis le milieu du XX^{ème} siècle. En 2021, 50 % des granulats utilisés en Ile de France (30 millions de tonnes par an) sont extraits localement dans des carrières, dont 70 % sont issus de la zone de la Bassée.

Les emplacements des gravières sont d'abord basés sur une reconnaissance fine des terrains par sondages (Pasquet et Thibaut, 1997). Les industriels réalisent les demandes de permis d'exploitation avec les contraintes d'occupation cadastrale et les accords qu'ils peuvent obtenir des propriétaires / usagers. L'exploitation proprement dite commence par un décapage de la terre végétale superficielle, avant l'extraction des alluvions jusqu'au toit de la craie, qui se situe à une profondeur variable (entre 2 et 9 m selon les sites). A la fin de

l'exploitation, le réaménagement, aujourd'hui très encadré par la réglementation, consiste en un comblement partiel (de 20 à 50 % maximum de la surface du plan d'eau selon les quantités de terre végétale extraites) et un reprofilage des berges en pente douce, et un maintien de zones ouvertes sur les berges, prairies ou zones humides type roselières, pour leur intérêt écologique.

Les impacts des gravières sur les ressources en eau, que ce soit d'un point de vue quantitatif via un excès d'évaporation et une modification de l'écoulement de la nappe, ou d'un point de vue qualitatif, restent aujourd'hui encore mal compris. L'objectif général des travaux menés par le PIREN-Seine est ainsi de mieux comprendre le fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique des annexes hydrauliques de la plaine de la Bassée, que sont les gravières, mais aussi les anciens méandres de la Seine.

Plus spécifiquement, un suivi continu de la géochimie de la gravière de la Cocharde a été réalisé en 2017 et 2018 lors de la phase VII du PIREN-Seine (Guillon et al., 2019), et a permis de mettre en évidence les principaux processus qui contrôlent les flux d'eau et de carbone, ainsi que leur dynamique temporelle. Des méthodologies de quantifications des flux d'eau et de carbone (C) ont ainsi pu être proposées. Ces travaux ont soulevé la question de la représentativité du plan d'eau suivi, au regard de la multitude de plans d'eau sur la Bassée.

Dans le cadre de la phase 8, il s'agit donc d'échantillonner un nombre significatif de gravières pour mieux contraindre leur diversité de fonctionnement, en lien avec leur diversité de formes, de positions, mais aussi d'histoire, d'exploitation et de réaménagement.

À terme et de manière plus large, il s'agira de réfléchir à des indicateurs du fonctionnement et des trajectoires des masses d'eau, qui pourront servir d'outils de réflexion pour l'ensemble des acteurs du territoire. Cette approche interdisciplinaire s'attache autant que possible à intégrer les échelles spatiales et temporelles pour contribuer à améliorer la compréhension globale du fonctionnement de la Bassée.

Les questions concernent, dans un premier temps, la description quantitative de la diversité des caractéristiques géométriques des plans d'eau. Dans un second temps, on cherche à quantifier le bilan hydrique des gravières, en particulier les proportions d'eau de pluie et d'eaux souterraines, ainsi que le temps de résidence de l'eau. Dans un troisième temps, on cherche à quantifier les flux de carbone, d'une part pour contribuer à l'amélioration du bilan de C de la plaine alluviale dans son ensemble, et d'autre part comme élément de réflexion sur l'impact de la création d'une gravière par rapport à un champ ou une forêt initialement présente sur le flux de C (et des autres gaz à effet de serre). À terme, on s'intéressera aussi aux rôles possibles des gravières sur la composition chimique des eaux, en particulier en termes de nutriments.

1. Typologie des gravières de la Bassée

Une identification et une caractérisation géométrique des masses d'eau de la Bassée ont été réalisées, et mises sous forme de base de données géoréférencée, appelée CIME-B (Carte d'Identité des Masses d'Eau de la Bassée). L'analyse a été réalisée à l'aide d'un SIG (Système d'Information Géographique, ArcGIS et QGIS). L'utilisation de photos aériennes anciennes et actuelles a permis de reconstruire la dynamique spatiale et temporelle des masses d'eau de la Bassée depuis le milieu du XX^e siècle.

La base CIME-B a été réalisée dans le but d'analyser la distribution statistique des propriétés des masses d'eau (dimensions, distance à la Seine, âge) et pour faire émerger une typologie ou un continuum permettant de guider le choix des sites à échantillonner. Cette base est également un outil de compréhension et d'interprétation du fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique de la Bassée. Elle permet d'interroger la représentativité des plans d'eau retenus pour cette étude de manière à échantillonner toute la gamme existante (min-max) et de pondérer les différents comportements ou flux en fonction de la répartition statistique réelle.

1.1. Méthodologie

L'analyse SIG a consisté à digitaliser les contours de toutes les masses d'eau observées dans l'emprise de la plaine alluviale de la Bassée, à partir de photos aériennes pour 17 dates (1949, 1976, 1988, 1990, 1992, 1994, 1996, 1998, 2000, 2003, 2005, 2007, 2010, 2013, 2017, 2018, 2019). La couche de l'emprise des gravières et du lit mineur de 2018, provenant d'une étude réalisée en 2019 par Eschbach et al. (2021), a été

complétée et actualisée à l'aide du fonds WMS de ESRI 2019 et 2020. L'analyse rétrospective s'est appuyée sur la confrontation des images aériennes de 1949 de l'Institut Paris Région (<https://www.institutparisregion.fr/cartographie/lile-de-france-en-1949/>) et des résultats de l'étude temporelle menée à l'aide des images satellitaires et réalisée par Samuel Teillaud en 2018. Une analyse présence-absence par confrontation de la couche actualisée 2020 avec l'ensemble des fonds historiques a permis de construire la base de données. L'analyse est fondée sur l'observation des photos aériennes à date fixe, ce qui implique un manque de connaissance entre les dates observées et des biais importants dans les données d'âge. C'est notamment le cas entre 1949 et 1976, puis entre 1976 et 1988. Les images aériennes sont présentes à un intervalle régulier à partir de 1988, permettant un suivi temporel fin de l'évolution des gravières dans la Bassée.

La digitalisation sur l'image satellite de 2020 a concerné 523 entités, donc 30 chenaux abandonnés et 386 gravières (dont 325 de plus de 0,2 ha). Les contours de chaque entité ont été digitalisés sous forme d'un polygone. La table attributaire rassemble toutes les informations pour ces entités, sous forme de base de données, exportable au format texte ou xls. La Figure 1 montre les masses d'eau digitalisées pour 2020.

Le type de masse d'eau a été identifié : gravière en eau, gravière « hors eau » (emprise du site d'exploitation avec les zones terrassées), et chenal abandonné. La connectivité avec la Seine a également été identifiée : absence de connectivité, connectivité aval ou amont.

Les propriétés géométriques des entités ont ensuite été déterminées par des algorithmes de calcul sous ArcGIS : superficie (en m²), périmètre (en m), coordonnées X et Y (en Lambert 93) du barycentre spatial, distance la plus courte à la ligne médiane de la Seine, altitude du barycentre sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT, modèle IGN à résolution 5 m), et enfin épaisseur des alluvions estimée d'après le modèle de krigeage géostatistique du BRGM réalisé à partir de plusieurs centaines de sondages de reconnaissance (Pasquet et Thibault, 1997). Cette épaisseur d'alluvions a été calculée par différence entre l'altitude du sol donnée par le MNT et l'altitude de la base des alluvions fournie par le krigeage (utilisé pour le modèle CaWaQS de la plaine, Labarthe and Flipo, 2016). En l'absence de données de bathymétrie, et donc de profondeur des masses d'eau, et en particulier des gravières, cette épaisseur d'alluvions peut être considérée comme un proxy de la profondeur. Pour la gravière de la Cocharde, la base CIME-B donne une épaisseur d'alluvions de 7 m, alors que la profondeur moyenne mesurée sur le site lors d'une campagne de bathymétrie est de 5 à 6 m.

Il est à noter que, pour les masses d'eau de moins de 0.2 ha de superficie, les propriétés du barycentre et d'épaisseur d'alluvions n'ont pas été déterminées.

Les différentes images disponibles permettent d'appréhender l'évolution temporelle de l'existence et de la superficie des gravières. Pour chaque année, le choix a été fait de noter dans la base de données / table attributaire la présence ou l'absence de chaque masse d'eau, et dans le cas de sa présence, si la superficie a évolué par rapport à l'image précédente. Ce choix permet de conserver dans la base de données l'information de l'année d'apparition du plan d'eau (ouverture), ainsi que l'année de dernière modification connue, qui peut correspondre à la fin de l'exploitation et au réaménagement. Il est toutefois à noter que, dans le détail, chaque gravière a une histoire spécifique, avec des phases d'exploitation et une augmentation de la superficie qui ont pu s'étaler sur plusieurs années, voire plusieurs dizaines d'années. La base de données n'a pas vocation à pouvoir suivre de manière précise les phases d'exploitations des (grandes) gravières. Néanmoins, les discussions récentes avec les exploitants montrent que 20 à 50 % de la surface des gravières en eau est remblayée avec la terre végétale qui a été décapée avant le début de l'exploitation.

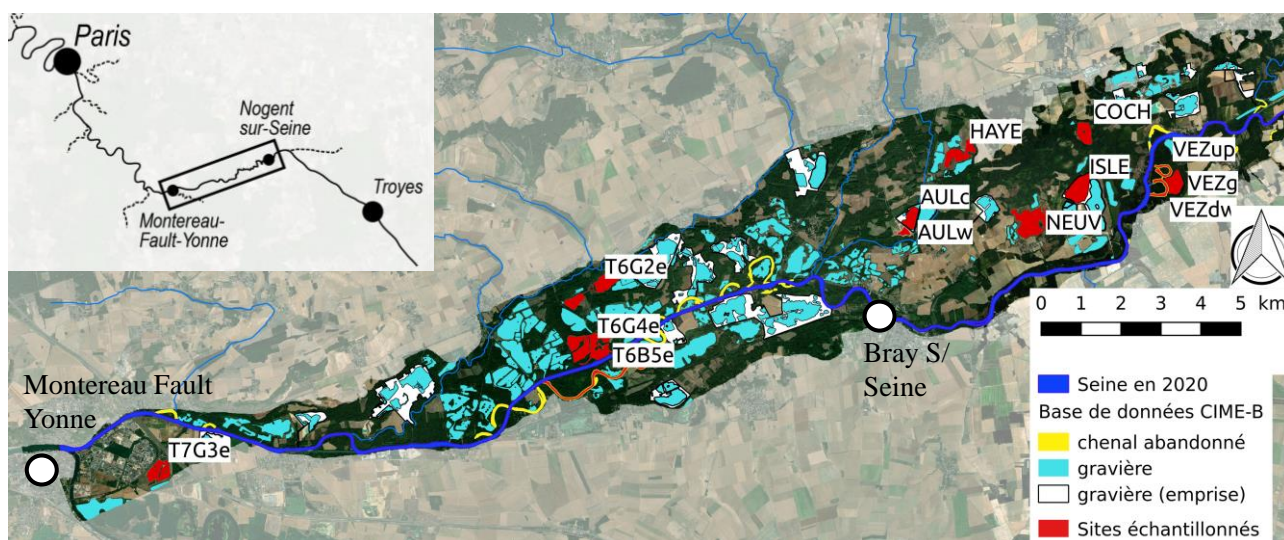


Figure 1. Localisation des plans d'eau identifiés dans la base de données CIME-B et des sites échantillonnés.

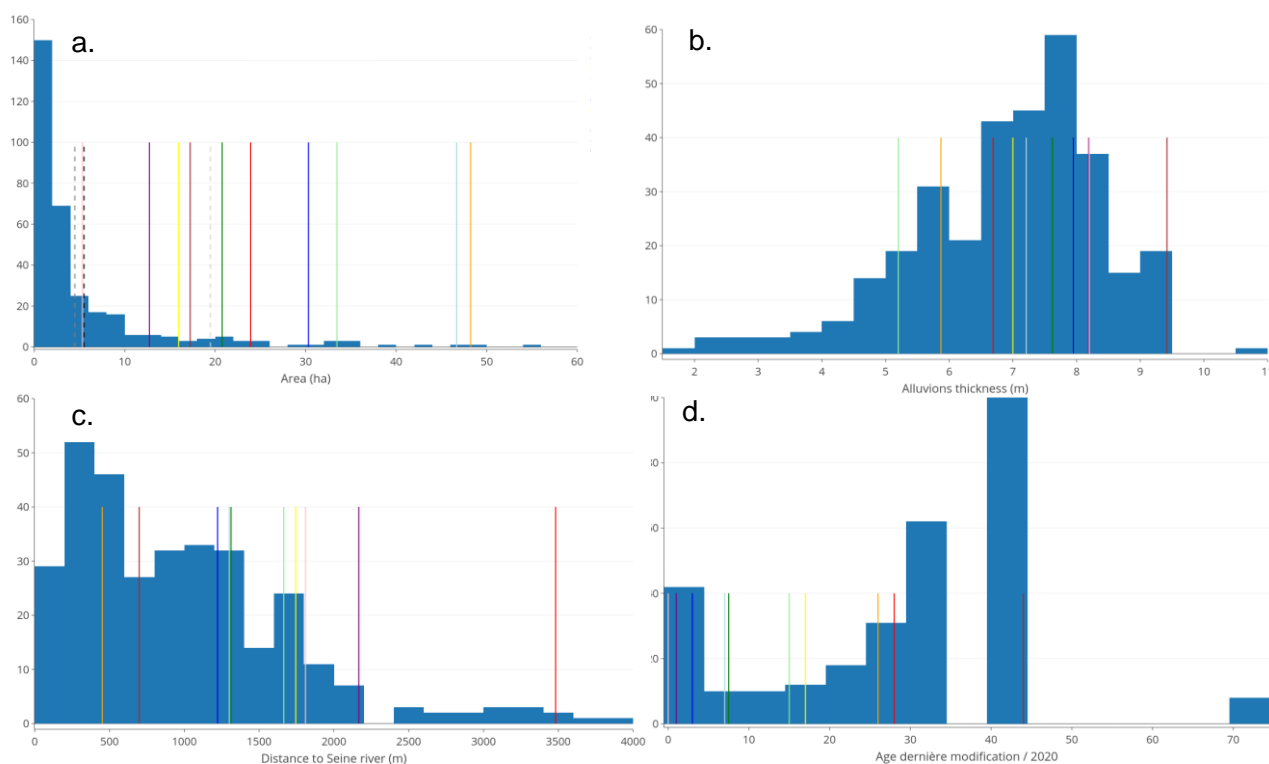


Figure 2. Histogrammes de la répartition de la superficie (a), l'épaisseur estimée des alluvions (b), la distance à la Seine (c) et le nombre d'année depuis la dernière modification observée (d) pour les gravières de la base de données CIME-B pour la Bassée. Les gravières échantillonnées sont indiquées par les traits verticaux, les chenaux abandonnés par les traits pointillés (code couleur du Tableau 1).

1.2. Sites échantillonnés

Trois gravières (T6G4e, T6G2e et T7G3e) et un chenal abandonné (T6B5e) ont été identifiés et instrumentés avec un suivi continu P et T (dispositif LOMOS, Mourhi et al., 2013, Jost et al., 2019) depuis la phase VII du PIREN-Seine, et avaient déjà fait l'objet de campagnes d'échantillonnage en 2017. La gravière de la Cocharde COCH a fait l'objet d'un suivi biogéochimique détaillé entre 2017 et 2018 (Guillon et al., 2019).

Dans le cadre de la phase VIII du PIREN-Seine, de nouveaux sites de gravières et de chenaux abandonnés ont été identifiés et intégrés aux campagnes d'échantillonnage communes sur la Bassée, qui intègrent de nombreux points de mesure le long de la Seine. Le choix des sites est ici essentiellement basé sur les opportunités et autorisations d'accès.

Au total, 10 gravières et 3 chenaux abandonnés ont été échantillonnés. Le Tableau 1 est un extrait de la base CIME-B pour ces masses d'eau.

1.3. Résultats et discussion

Les paramètres qui pourraient jouer un rôle sur la connectivité hydraulique entre les gravières et la nappe (des alluvions ou de la craie), mais aussi sur le fonctionnement biogéochimique, les teneurs en nutriments et en carbone organique, sont les suivants :

- âge, pouvant influencer les paramètres suivants :
 - o types de réaménagement (pente des berges, types de végétations...) ;
 - o épaisseur du colmatage des berges et du fond ;
 - o perméabilité des berges et du fond ;
- rapport surface / volume (déterminé par la profondeur), pouvant influencer les paramètres suivants :
 - o temps de résidence ;
 - o stocks et flux de nutriments ;
 - o stocks et flux de carbone ;
- distance à la Seine, pouvant influencer les paramètres suivants :
 - o intensité des échanges nappe-rivière ;
 - o fréquence des échanges nappe-rivière.

Le Tableau 1 indique, pour les sites retenus, la présence de piézomètres dans la nappe alluviale et/ou de la craie à proximité des masses d'eau. Cette information est essentielle, car elle permet d'obtenir la composition chimique de la nappe et de discriminer sa contribution à celle des gravières.

Concernant l'usage des berges, 5 sites anciens sont de type fermé (COCH, T7G3e, T6G2e, T6G4e, VEZG), et 5 sont de type ouvert (HAYE, NEUV, AULc, AULw, ISLE), dont 3 en exploitation et 2 ayant fait l'objet d'un réaménagement « écologique ».

Tableau 1. Liste des sites échantillonnés avec une sélection de leurs propriétés extraites de la base de données CIME-B. Les chenaux abandonnés sont indiqués en italique. L'accès à des piézomètres dans les alluvions et/ou la craie à quelques centaines de mètres des sites est indiqué, ainsi que la présence d'une ripisylve sur les berges des gravières.

Site		Surface (ha)	Dist. à la Seine (m)	Epaisseur alluvions (m)	Année ouverture	Année dernière modif	PZ alluvion	PZ craie	Ripi sylve
VEZG		17.2	698	9.4	1976	1976	X		X
HAYE		23.9	3482	6.7	1988	1992			
T6G4e		48.2	452	5.9	1949	1994	X		X
COCH		15.9	1745	7.0	1949	2003	X		X
T6G2e		33.4	1665	5.2	1994	2005	X	X	X
T7G3e		20.8	1313	7.6	1990	2013	X		X
NEUV		46.7	1301	7.2	2003	2013			
ISLE		30.3	1222	8.0	1994	2017			
AULc		12.7	2167	8.2	2017	2019			
AULw		5.34	1810	8.2	2020	2021			
<i>T6B5e</i>		19.5					X		
<i>VEZup</i>		4.5					X		
<i>VEZdw</i>		5.5					X		

1.3.1. Superficie et épaisseur des alluvions

Les superficies des gravières varient entre 0 et 60 ha (Figure 2a), avec la majorité des gravières ayant une superficie de moins de 10 ha et en moyenne de 4.6 ha. La superficie des gravières n'est pas contrôlée par des facteurs géographiques mais « politiques » via le parcellaire cadastral. Il n'y a pas d'évolution notable de la superficie des gravières selon les âges d'ouverture. Au-delà d'une multitude de petites gravières, il existe quelques grandes gravières, illustrant certainement la difficulté d'obtention des accords des propriétaires et exploitants agricoles, malgré les compensations financières.

Le morcellement des plans d'eau impacte de manière spécifique le paysage, et a nécessairement un impact sur les aspects hydro- bio- géochimiques et écologiques.

Les sites retenus ont tous des superficies supérieures à 10 ha, et les petites superficies ne sont donc pas bien représentées.

L'épaisseur des alluvions estimée pour les gravières varie entre 2 et 11 m, mais 50 % des valeurs sont entre 5.0 et 7.8 m (inter quartiles ; Figure 2b). Cette situation s'explique par la logique économique de l'exploitation des granulats. Les exploitants de granulats se basent sur les cartes de potentialité de gisements établies par le BRGM à partir des sondages, et visent donc *a priori* les zones de plus fortes épaisseurs. Toutefois, les contraintes de foncier et d'autorisations guident fortement les opportunités d'ouvertures dans des endroits où les épaisseurs ne sont pas forcément les plus importantes, tout en restant suffisantes pour assurer une certaine rentabilité (Pasquet et Thibaut, 1997, Carré et Chartier, 2002).

En termes de fonctionnement hydrogéologique, les gravières profondes (forte épaisseur d'alluvions) ont un rapport surface / volume plus petit, et une connexion *a priori* plus importante avec les eaux souterraines par les berges.

En termes de fonctionnement biogéochimique, une stratification thermique et chimique doit être présente quand les profondeurs sont supérieures à 5 m, au moins par intermittence, conduisant à une anoxie potentiellement plus importante dans le fond, et donc une possibilité de dénitrification, voire de méthanisation.

Les sites retenus sont plutôt représentatifs, avec des épaisseurs d'alluvions estimées entre 5 et 8 m, même s'il faut ici bien souligner la forte incertitude autour de cette estimation, avec des profondeurs d'eau réelles qui sont clairement différentes. La gravière NEUV a une faible profondeur avec de nombreux affleurements de craie en surface du plan d'eau, mais une valeur de 7,2 m d'alluvions est déduite des modélisations. L'écart a déjà été souligné plus haut pour la Cocharde. Les gravières AULw et AULc ont de fortes puissances de gisement (> 7 m, valeurs exactes de profondeur relevées par les exploitants), mais des épaisseurs d'alluvions estimées dans CIME-B moins extrêmes.

En termes de forme, les gravières, sont généralement de petits étangs de moins de 10 ha de superficie et de 5 m de profondeur, suffisamment étendus pour avoir un zonage entre littoral et limnique, mais souvent pas assez profonds pour présenter une stratification nette et stable dans le temps, et donc globalement mélangés sur la verticale.

1.3.2. Distance à la Seine

La distance entre les gravières et la Seine varie entre 0 et 4 km, avec 50 % des gravières situées à moins de 636 m (valeur médiane), et 75 % situées à moins de 1269 m (3ème quantile ; Figure 2c). L'échantillon de gravières retenues est plutôt représentatif, même si les faibles distances sont mal représentées, en l'absence de site situé à moins de 500 m de la Seine.

Les impacts attendus de la distance à la Seine sur le fonctionnement hydrogéologique et biogéochimique ne sont pas évidents. Le gradient hydraulique est *a priori* assez homogène sur la plaine. À proximité immédiate de la Seine, il pourrait y avoir des écoulements transitoires plus intenses à travers les alluvions. Le réseau de noues, petits cours d'eau de surface connectés à la Seine et à proximité de presque toutes les gravières, redistribuerait cependant cette situation à l'intérieur de la plaine.

1.3.3.Age

Les biais sur l'âge sont évidemment à rappeler ici, d'une part à cause du manque de données, mais aussi en lien avec la complexité de l'exploitation d'une carrière de granulats. Les évolutions et histoires sont en effet spécifiques à chaque gravière.

Pour les sites retenus pour l'échantillonnage, le Tableau 1 montre que les informations sur leur histoire sont variables. La gravière VEZG a été ouverte, exploitée en totalité entre 1949 et 1976, mais sans qu'on ne dispose pour le moment de plus de précisions.

La gravière de la Cocharde COCH a une histoire qui commence dès 1949, mais il s'agissait en fait alors d'un très petit plan d'eau. La gravière a en réalité été exploitée de manière industrielle (par la société du Port Montain) entre 1995 et 2003, pour aboutir à sa forme actuelle et avec un réaménagement. L'étude révèle le caractère singulier de cette gravière en raison de son ancienneté (une des premières gravières en exploitation dans la Bassée), mais aussi par la durée de son exploitation (59 ans).

La gravière ISLE est exploitée par A2C Granulats depuis 1994, et la dernière modification de superficie date de 2017, avec une durée d'exploitation qui est donc longue (renouvellement du permis d'exploitation). Cependant, cette gravière n'a pas été complètement réaménagée et est donc toujours assez directement connectée aux eaux souterraines. Il reste en effet à A2C une tranche à exploiter, mais sur une zone qui doit faire l'objet d'une fouille archéologique.

Les gravières AULc et AULw, également exploitées par A2C, ont une histoire beaucoup plus simple et courte, avec une exploitation initiée et complétée jusqu'au réaménagement en environ 2 ans.

L'impact de l'âge sur le fonctionnement des gravières est en particulier attendu pour la connectivité hydraulique au niveau des berges et du fond, qui tendent à se colmater au cours du temps par le dépôt de matière organique et d'autres matériaux fins. Les méthodes de réaménagement ont également varié au cours du temps. Ainsi, avant les années 1960-1970, les actions de réaménagement étaient quasiment absentes. Dans les années 1980-2000, les réaménagements comportaient un étalement de terre végétale sur les berges, les rendant globalement imperméables, mais avec des pentes fortes, et les milieux étaient laissés à l'abandon, entraînant une reconquête par la forêt alluviale et une fermeture des berges par une ripisylve. Depuis les années 2000, les réaménagements dits écologiques consistent à reprofiler les berges avec des pentes plus douces, et à maintenir un milieu ouvert avec des zones humides ou des roselières. L'âge des gravières depuis leur déconnexion aux eaux souterraines pourrait également impacter le fonctionnement biogéochimique via l'intensité des apports en nutriments hérités ou actuels, et des trajectoires pouvant aller vers une eutrophisation. On s'intéresse donc non pas à la date d'ouverture mais à la date de réaménagement des gravières, qui doit correspondre à la date de dernière modification observée dans CIME-B (sauf pour la gravière Ferme d'Isle).

L'échantillon des gravières est relativement représentatif de la distribution d'âges de « fermeture », avec la plus ancienne gravière (VEZG) qui a environ 45 ans, deux gravières (T6G4 et HAYE) d'environ 30 ans, la gravière de la Cocharde réaménagée il y a une vingtaine d'années (de même que T6G2 mais cette gravière a été abandonnée), et T7G3 et les quatre gravières exploitées par A2C (ISLE, NEUV, AULc, AULw) qui ont moins de 10 ans (voire ne sont pas encore réaménagées pour ISLE et AULw).

1.3.4.Autres points (économie, histoire, géographie...)

Dans les années 1950, les exploitations étaient de petite taille, le plus souvent exploitées par des particuliers. Aujourd'hui, avec des dossiers administratifs lourds et longs à monter, seules quelques grandes sociétés exploitent les carrières. Les carrières sont parfois de plus grande taille avec des exploitations par tranches successives sur plusieurs années voire dizaines d'années, sans que cela ne constitue la règle générale. Les autorisations d'exploitations s'étendent généralement sur 12 ans.

Une logique spatiale de l'ouverture des gravières depuis l'aval de la plaine vers l'amont au fur et à mesure de l'épuisement de la place disponible peut être identifiée, mais il existe encore des gravières en exploitation et des ouvertures à l'aval de la plaine.

2. Caractérisation biogéochimique

2.1. Campagnes d'échantillonnage

Entre 2017 et 2021, cinq campagnes d'échantillonnage ponctuel des gravières et chenaux abandonnés ont été réalisées (Figure 3). Deux campagnes ont été réalisées dans des conditions de hautes eaux (ou juste avant un pic de crue pour mars 2017), et trois en conditions de basses eaux, même si les niveaux d'eau n'étaient que juste sous la valeur médiane du débit de la Seine à Bazoches-les-Bray (44,1 m³/s). Le nombre de sites échantillonnés a augmenté d'une campagne à l'autre, et les 4 gravières les plus récentes ont été échantillonnées seulement une seule fois en septembre 2021 (Figure 3).

L'échantillonnage des gravières et des chenaux abandonnés a été réalisé depuis la berge à l'aide d'un seau jeté au bout d'une corde. L'aliquotage des échantillons pour les différentes analyses a été réalisé à partir de cette eau échantillonnée, dite eau brute. Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés directement dans le seau (température T, conductivité électrique, pH, concentration en oxygène dissous O₂).

Lorsqu'ils étaient disponibles (cf. Tableau 1), des piézomètres dans les alluvions ou dans la craie ont été échantillonnés à proximité immédiate des gravières. Les piézomètres ont été purgés à l'aide de cannes d'échantillonnages, puis les échantillons d'eau brute prélevés, et les mêmes paramètres physico-chimiques mesurés directement dans les piézomètres.

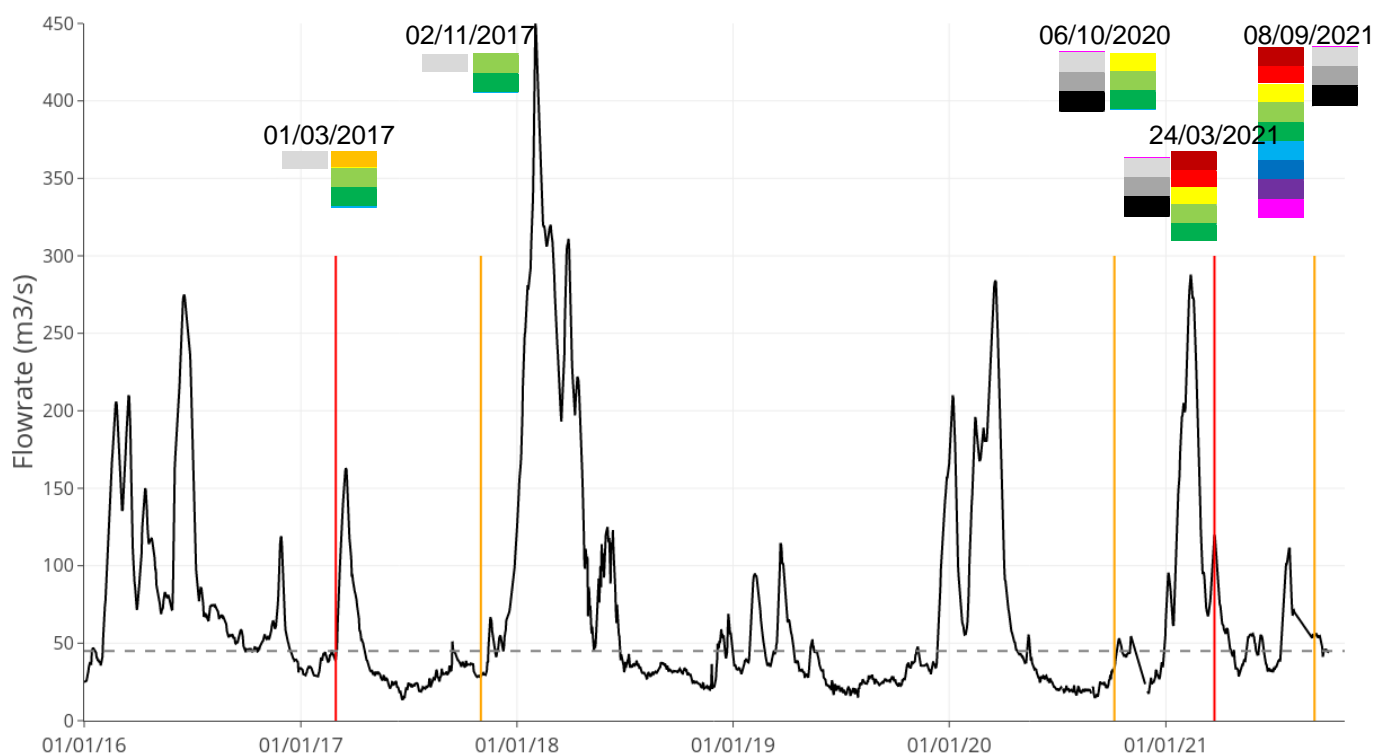


Figure 3. Chronique du débit de la Seine mesuré à Bazoches-les-Bray (source = Banque Hydro www.hydro.eaufrance.fr). Les campagnes sont indiquées par les lignes verticales (rouge pour hautes eaux, orange pour basses eaux), avec la représentation des sites échantillonnés (chenaux abandonnés et gravières, voir le code couleur dans le Tableau 1). Le débit médian est indiqué par la ligne pointillée grise.

Des échantillons pour l'analyse des concentrations en anions et cations, en nutriments et en alcalinité ont été filtrés (0,7 µm de porosité, GF/F, filtration sous vide). Les échantillons pour le Carbone Organique Dissous (COD) et pour la caractérisation par fluorescence de la matière organique dissoute (MOD) ont été filtrés juste après le prélèvement à 0,70 µm sur des filtres Whatman GF/F pyrolysés à 450°C. Les échantillons pour la caractérisation de la MOD ont été stockés à l'abri de la lumière et à 4°C avant les analyses.

Les échantillons pour les isotopes stables de l'eau n'ont pas été filtrés, et ceux pour les isotopes stables du carbone du carbone inorganique dissous (DIC) ont été filtrés à 0.7 µm.

Les échantillons d'eau brute pour les gaz à effet de serre (CH₄, N₂O) ont été prélevés sans bulle dans des flacons en verre avec un septum, et conservés avec du chlorure mercurique (HgCl₂).

Une filtration a été réalisée pour la mesure de la chlorophylle a (seulement à partir de septembre 2021). A partir de septembre 2020, des mesures de pression partielle en CO₂ ont été réalisées par équilibration directe en seringue et mesure par absorption infrarouge directement sur le terrain (Koschorreck et al 2021).

Les analyses ont été réalisées à l'UMR METIS de Sorbonne Université (Paris) par chromatographie ionique pour les anions, ICP-MS pour les cations, et spectroscopie optique pour les nutriments, le COD et la chlorophylle a. Les analyses des GES (CO₂, CH₄, N₂O) ont également été réalisées à l'UMR METIS. La titration pour l'alcalinité a été réalisée dans les 48 h suivant le prélèvement. Les analyses par spectroscopie optique (fluorescence 3D et absorbance UV-Visible) de la MOD ont été réalisées au laboratoire EPOC (Bordeaux). Les analyses d'isotopes stables δ¹⁸O, δ²H et δ¹³C-DIC sont réalisées au GEOTOP-UQAM (Montréal, Canada)

Le suivi de la variation du niveau d'eau est un paramètre clé pour comprendre les flux d'eau au sein des gravières, mais également les flux d'échange avec les alluvions. Depuis 2019, des mesures de l'altitude de la surface des gravières ont été réalisées à chaque campagne par GPS différentiel (Leica). La correction des mesures est réalisée en post-traitement à partir de stations fixes (données RGF) et d'un *plug-in* dans ArcGIS. Les mesures dupliquées pour un même point diffèrent parfois de plus de 50 cm, et la méthodologie doit donc encore être précisée.

Les hauteurs d'eau dans les piézomètres, les gravières T7G3e, T6G2e et le chenal abandonné T6B5e sont mesurées en continu par les sondes des systèmes LOMOS (*Local Monitoring System*). Lors de chaque mission, des mesures directes des niveaux d'eau des gravières T7G3 et T6G2 ont été réalisées par sondes limnimétriques. Pour le bras mort T6B5e, les mesures directes ont été faites par nivellement (théodolite) à partir de 2021. Ces mesures peuvent ensuite être corrigées en altitudes absolues grâce au nivellement des têtes de puits.

2.2. Bilan hydrique et flux d'eau

Un bilan hydrique avait été réalisé pour la gravière de la Cocharde COCH pour l'année 2017-2018 à partir des mesures météorologiques réalisées *in situ* (Guillon et al 2019). Les précipitations annuelles mesurées par la station météo déployée sur la gravière étaient de 702 mm/an. Une évaporation de 1122 mm/an avait été calculée par la formule de Penman pour l'eau libre. Ces valeurs seront à réinterpréter par rapport à la pluviométrie moyenne fournie par la réanalyse SAFRAN (Météo France) sur une maille de 8 km de côté. Il existe une forte incertitude sur l'intensité de l'évaporation au niveau des gravières, mais celle-ci est probablement supérieure à la pluie.

Les gravières ne présentent ni apports de surface (le ruissellement est négligeable), ni exutoire. Leur bilan hydrique se résume donc aux entrées GWin et sorties GWout d'eaux souterraines, aux précipitations P et à l'évaporation E :

$$dV/dt = P + GWin - E - GWout \quad (1)$$

Pour la gravière de la Cocharde, mais plus généralement pour toutes les gravières, en bilan annuel net, le volume d'eau dans les gravières est stable ($dV/dt = 0$). Il existe donc *a priori* un déficit d'apport en eau de 420 mm/an, qui est complété par un apport équivalent d'eau. Cet apport net d'eau souterraine est ainsi estimé pour la Cocharde en 2017-2018 à $59,7 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{an}$, soit environ 10% du volume de la gravière. Cette approche ne permet cependant pas de quantifier séparément les intensités des flux entrants et sortants d'eau souterraine.

Ce bilan net cache par ailleurs des flux nets mensuels qui peuvent être plus intenses, ou de sens inverses. En 2018, le marnage annuel observé est d'un mètre pour la gravière de la Cocharde et pour les deux gravières suivies en continu par les dispositifs LOMOS, valeur supérieure à la moyenne de 0.65 m observée hors crue de la Seine (A. Jost, com. pers.). Pour mieux contraindre la dynamique des flux d'eau, il est nécessaire de

disposer d'un suivi de la variation de volume dans les plans d'eau. Si la bathymétrie est connue (ce qui est le cas pour la Cocharde et pour les gravières exploitées par la société A2C), un suivi de la variation de la hauteur d'eau sera suffisant. Ces informations de hauteur d'eau sont malheureusement mal renseignées lors des campagnes d'échantillonnage. En effet, des mesures au DGPS ont été réalisées, mais avec des précisions en altitude qui s'avèrent médiocres, même après correction.

Les isotopes stables de l'eau sont une autre méthode directe pour quantifier la contribution de l'eau souterraine au bilan hydrique (Arnoux et al. 2017, Gibson et al. 2016). La Figure 4 présente les compositions en isotopes stables de l'eau, pour les gravières ainsi que la nappe alluviale et la craie. Les compositions isotopiques de la craie et des alluvions sont regroupées sur la droite des eaux météoriques mondiale (GMWL), ce qui correspond aux attentes et indique une origine météorique des eaux de nappe, par infiltration depuis la surface. La composition moyenne de ces nappes doit par ailleurs correspondre à la moyenne pondérée des compositions des précipitations locales, ce qui sera à vérifier.

Les points de composition isotopique de l'eau pour les gravières s'alignent sur une droite de pente 4.7, sous la droite des eaux météoriques mondiales (Figure 4), et qui correspond à une droite d'évaporation locale (LEL). L'évaporation entraîne en effet un enrichissement en isotopes lourds dans le plan d'eau, et une augmentation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et de $\delta^2\text{H}$. La valeur de la pente de cette droite d'évaporation locale traduit les conditions d'humidité locale (Arnoux et al., 2017, Gibson et al., 2016).

L'approche isotopique permet une quantification indépendante du rapport E/I, entre le flux d'évaporation E et le flux entrant I, égal à la somme de l'apport d'eau souterraine GWin et aux précipitations. P. Gibson et al. (2016) montrent que la relation suivante s'applique :

$$\frac{E}{GWin+P} = \frac{\delta I - \delta L}{\delta E - \delta L} \quad (2)$$

Où :

- δL correspond à la composition isotopique (O ou H) dans la gravière ;
- δE à la composition isotopique de la composante évaporée pouvant être calculée à partir des paramètres météorologiques (humidité moyenne de l'air, température moyenne de l'air) ;
- δI à la composition des apports, déterminée par la composition moyenne des nappes et de la pluie, et correspond à l'intersection avec la droite météorique, soit -6.2 ‰ ici pour le $\delta^{18}\text{O}$.

Une valeur de -15,2 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ avait été calculée pour la Cocharde (Jézéquel et al., 2017), ce qui avait amené à une valeur E/I de 0,45 pour la gravière de la Cocharde.

Les valeurs moyennes pour l'évaporation ($E = 1122 \text{ mm/an}$) et les précipitations ($P = 702 \text{ mm/an}$) sont supposées connues (cf ci-dessus), les apports à la gravière sont définis par $I = P + GWin$. Connaissant E/I, on détermine alors le flux entrant d'eau souterraine $GWin = 1791 \text{ mm/an}$, et ensuite le flux sortant, $GWout = GWin - 420 = 1371 \text{ mm/an}$.

Ces quantifications de flux seront à valider à partir des valeurs consolidées pour l'évaporation et les précipitations annuelles. Les estimations de flux d'eau souterraine et de temps de résidence de l'eau devront alors être déterminées pour chaque gravière échantillonnée et comparées aux caractéristiques géométriques (surface / volume) et aux âges des gravières, pour chercher une éventuelle évolution des échanges gravière – eaux souterraines au cours du vieillissement.

La variabilité saisonnière du signal isotopique devra également être analysée plus finement pour tenter d'identifier les périodes d'apport net en eau souterraine des effets du remplissage par la pluie ou de l'évaporation.

Enfin, la conductivité électrique est une variable qui peut être mesurée en continu et qui permet de préciser les termes du bilan hydrique, avec une méthodologie proposée pour la Cocharde (Guillon et al 2019). En l'absence de réactions (bio)chimiques, la conductivité doit en effet tracer le mélange entre la pluie (très peu conductrice) et les eaux souterraines (très conductrices), et l'effet de concentration des ions lié à l'évaporation. Un tel bilan pourrait également être testé sur des ions non réactifs tels que Na^+ ou Cl^- .

Les réactions biochimiques peuvent altérer ce bilan. Les ions Ca, cations majoritaires dans les eaux des alluvions et des gravières, sont impliqués dans la précipitation / dissolution de la calcite. En été, la baisse de conductivité observée (dans la Cocharde en 2018, mais aussi dans les autres gravières), ne peut pas être expliquée par les apports d'eau souterraine ni par l'évaporation (qui domine sur les précipitations en été). Elle signe donc la précipitation de calcite.

Les trois méthodes utilisées de manière complémentaire pour la quantification des flux d'eau donnent des visions tout à fait cohérentes, avec une eau de gravière qui est issue d'une petite proportion de pluie, corrigée de l'évaporation, et d'une forte contribution de la nappe (de la nappe alluviale ainsi que de la craie par drainance ascendante, la proportion entre les deux étant à préciser).

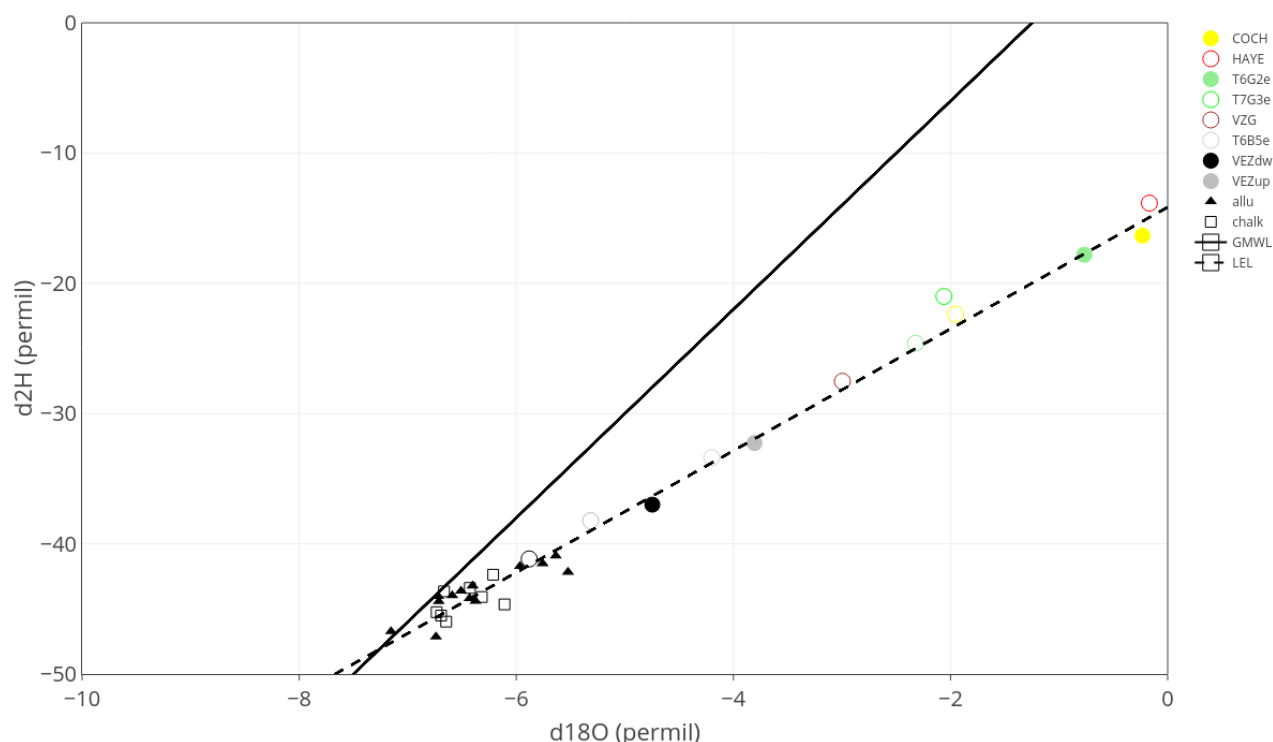


Figure 4. Composition des isotopes stables de l'eau mesurée dans les gravières, la nappe alluviale et la craie. Les ronds pleins correspondent aux campagnes de basses eaux, les ronds vides aux hautes eaux. La droite des eaux météoriques mondiales ($GMWL \delta^{18}O = 8 \delta^2H + 10$) et la droite d'évaporation locale ($LEL \delta^{18}O = 4.7 \delta^2H - 13.6$) sont indiquées.

2.3. Fonctionnement biogéochimique

On s'intéresse ici à la géochimie des ions majeurs et des nutriments, avec un intérêt particulier porté aux flux de C, en lien avec les processus biogéochimiques qui peuvent avoir lieu dans les gravières (dégazage, précipitation ou dissolution de calcite, respiration, dénitrification, photosynthèse).

A partir des données ponctuelles dans les compartiments, gravières, chenaux abandonnés, craie et alluvions, on a tenté d'identifier les principaux processus à l'œuvre et de proposer des quantifications de flux. La dynamique temporelle et la quantification fine des flux requièrent un suivi plus régulier, comme cela a pu être effectué sur la Cocharde.

Le Tableau 2 donne les compositions moyennes pour les 4 compartiments échantillonnés. Il est à noter que les valeurs pour la craie correspondent dans ce Tableau 2 à un unique point de mesure (T6G2c). D'autres piézomètres dans la craie ont été échantillonnés en bordure de la Seine, qui donnent des compositions très similaires.

Tableau 2. Compositions chimiques moyennes mesurées dans les gravières, les alluvions et la craie. Le nombre d'analyses disponibles (sites x campagnes) est indiqué entre parenthèses.

	σ_{25} ($\mu\text{S/cm}$)	pH	Alcalinité (mmol/L)	Ca^{2+} (mmol/L)	NO_3^- (mmol/L)	Cl^- (mmol/L)
Gravières (N=22)	317	8.3	2.3	1.4	0.14	0.60
Alluvions (N=21)	725	7.2	5.1	3.1	0.45	0.96
Craie (N=5)	705	7.1	4.8	3.3	0.73	0.77
Chenal abandonné (N=11)	362	7.9	3.1	1.6	0.15	0.39

Les ions majoritaires sont le Ca^{2+} et les bicarbonates HCO_3^- . Comme attendu, la conductivité moyenne est plus élevée dans les eaux souterraines que dans les eaux de surface, avec une conductivité dans les gravières proche de celle dans la Seine. Ceci traduit une minéralisation plus élevée dans les eaux souterraines (où des interactions eau-roche ont lieu), et une dilution par les précipitations dans les eaux de surface.

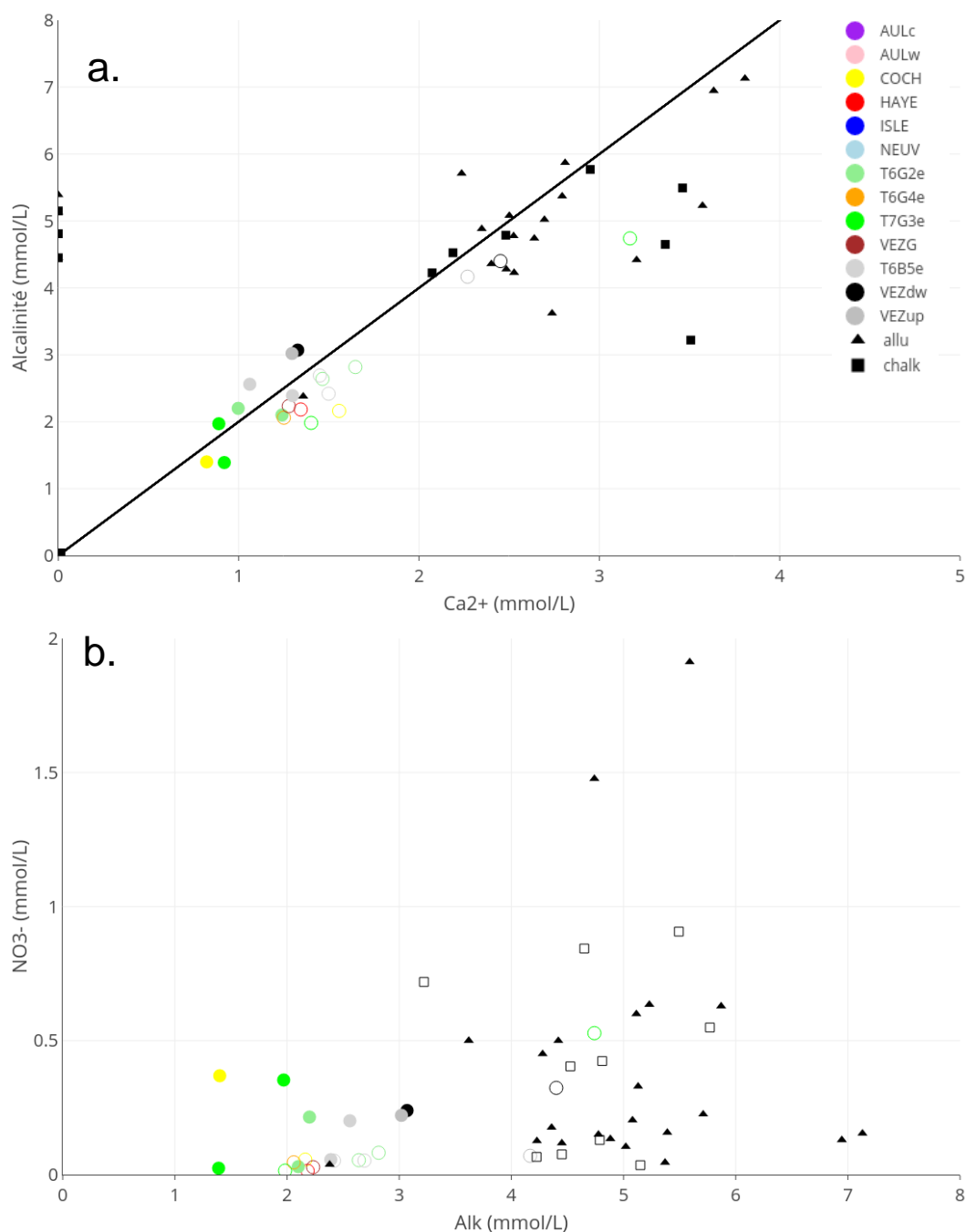


Figure 5. Relations entre l'alcalinité et la concentration en Ca^{2+} (a), entre les concentrations en nitrate et en alcalinité (b) dans les gravières, la nappe alluviale et la nappe de la craie. Les ronds pleins correspondent aux campagnes de basses eaux, les ronds vides aux hautes eaux.

La concentration en ions Ca^{2+} est plus élevée dans les alluvions et la craie (3,1 et 3,3 mmol/L respectivement) que dans les gravières (1,4 mmol/L) (Tableau 2 et Figure 5a). Ceci peut être dû à la dilution ou à la précipitation de calcite CaCO_3 dans les eaux de surface. Les données pour les différents compartiments mesurés s'alignent sur la droite de pente 2, ce qui traduit un contrôle des concentrations par l'équilibre de dissolution / précipitation de la calcite CaCO_3 . Les points pour la craie sont en dessous de la droite (Figure 5a).

L'alcalinité est également plus élevée dans les alluvions et la craie (5,1 et 4,8 mmol/L respectivement) que dans les gravières (2,3 mmol/L) (Tableau 2 et Figure 5a). Ceci peut là encore être relié à la dilution ou à la précipitation de calcite.

Le pH est autour de 7 dans les eaux souterraines, mais affiche des valeurs plus basiques (autour de 8,5) dans les gravières, en lien avec un possible dégazage de CO_2 et/ou une activité de photosynthèse qui consomme le CO_2 .

Les concentrations en ion Cl^- , qui peut être considéré comme un ion non réactif et traceur des processus de mélange, sont faibles et globalement homogènes entre les compartiments.

Les concentrations en nitrates sont les plus élevées dans la nappe de la craie (0,73 mmol/L), probablement en lien avec les pratiques agricoles sur la plaine. Les teneurs diminuent dans les alluvions et surtout dans les eaux de surface (voir aussi la Figure 5b). La dilution peut là encore contribuer, mais des processus de dénitrification peuvent avoir lieu dans les zones moins oxygénées des berges et des sédiments de fond de gravière, ainsi qu'à l'interface eau de surface / eau souterraine.

2.4. Comportement du carbone

2.4.1. Flux de carbone

Les pressions partielles en CO_2 peuvent être calculées à partir du pH et de l'alcalinité. Les teneurs moyennes sont de 2 % dans les eaux souterraines, alluvions et craie, et de 2000 ppm (0,02%) dans les gravières, mais avec une variabilité spatiale et temporelle importante, surtout dans les gravières (Figure 6a).

Les teneurs élevées en CO_2 dans les eaux souterraines sont issues de la minéralisation de la matière organique du sol, avec un pH proche de 7 associé au tampon carbonate. Lorsque les eaux souterraines alimentent les eaux de surface, le CO_2 en excès dégaze, entraînant une augmentation de pH, ce qui est bien identifiable sur la Figure 6a. Ce flux de dégazage de CO_2 est à combiner à celui causé par la respiration (production de CO_2) et la photosynthèse (consommation de CO_2), pour déterminer le flux net de CO_2 des gravières. Les valeurs de $p\text{CO}_2$ mesurées dans les gravières VEZG, HAYE, T7G3e sont entre 300 et 500 ppm, soit autour de l'équilibre avec l'atmosphère : ces gravières pompent ou émettent le CO_2 selon les périodes, et la quantification précise demandera une étude plus détaillée dans le temps. Les teneurs en CO_2 mesurées dans la gravière T6G2e sont toujours supérieures à 1000 ppm, indiquant une gravière où la respiration est supérieure à la photosynthèse et qui libère toujours du CO_2 . Les mesures pour COCH montrent une sursaturation avec des teneurs entre 500 et 600 ppm, mais le suivi en continu avait mis en évidence des sous saturations transitoires au printemps, probablement associées à des blooms phytoplanctoniques.

Les récentes mesures dans les gravières les plus récentes et en cours d'exploitation, réalisées en septembre 2021 et non présentées dans ce rapport, donnent des teneurs très faibles en CO_2 (en lien avec des pH supérieurs à 9, de fortes sur-saturations en oxygène (> 140 %), traduisant une activité photosynthétique importante.

2.4.2. Composition isotopique du carbone

Les isotopes stables du carbone (Figure 6b) permettent de tracer les sources et les processus. Dans les eaux souterraines, la composition isotopique $\delta^{13}\text{C}$ -DIC est comprise entre -12 et -16 ‰. La composition isotopique pour la matière organique des plantes en C3 est $\delta^{13}\text{C} \sim -25$ ‰ et est identique pour le CO_2 qui en est issu (Deines et al., 1974). Il existe en revanche un fractionnement isotopique à l'équilibre de 10 ‰ entre CO_2 et HCO_3^- , l'espèce majoritaire à pH 7 dans les aquifères (Mook et al., 1974). La composition isotopique $\delta^{13}\text{C}$ -DIC observée dans les eaux souterraines est donc tout à fait en accord avec une origine par minéralisation de la matière organique du sol.

Dans les eaux de surface (gravières et chenaux abandonnés), le dégazage du CO_2 est associé à un fractionnement isotopique cinétique, avec un dégazage plus rapide des isotopes légers ^{12}C , et un enrichissement en isotopes lourds dans le CO_2 résiduel, soit une augmentation du $\delta^{13}\text{C}$. C'est ce qui est observé dans les gravières (Figure 6b), où un dégazage de CO_2 a lieu, probablement depuis les eaux souterraines riches en CO_2 . L'équilibre isotopique entre le CO_2 des gravières et le CO_2 atmosphérique ($\delta^{13}\text{C} = -8 \text{ ‰}$) donnerait une valeur de $\delta^{13}\text{C}$ -DIC autour de 0 ‰ dans les gravières, ce qui est différent des mesures. L'équilibre isotopique n'est pas atteint malgré une pression partielle proche de la saturation, et d'autres processus biologiques viennent altérer la composition isotopique.

Les valeurs des indices de saturation vis-à-vis de la calcite sont variables selon les gravières et dans l'espace. Pour la campagne d'avril 2021, toutes les gravières étaient sur-saturées vis-à-vis de la calcite, qui y précipitait donc. En 2017, les résultats indiquaient à l'inverse une sous-saturation pour des gravières relativement riches en CO_2 .

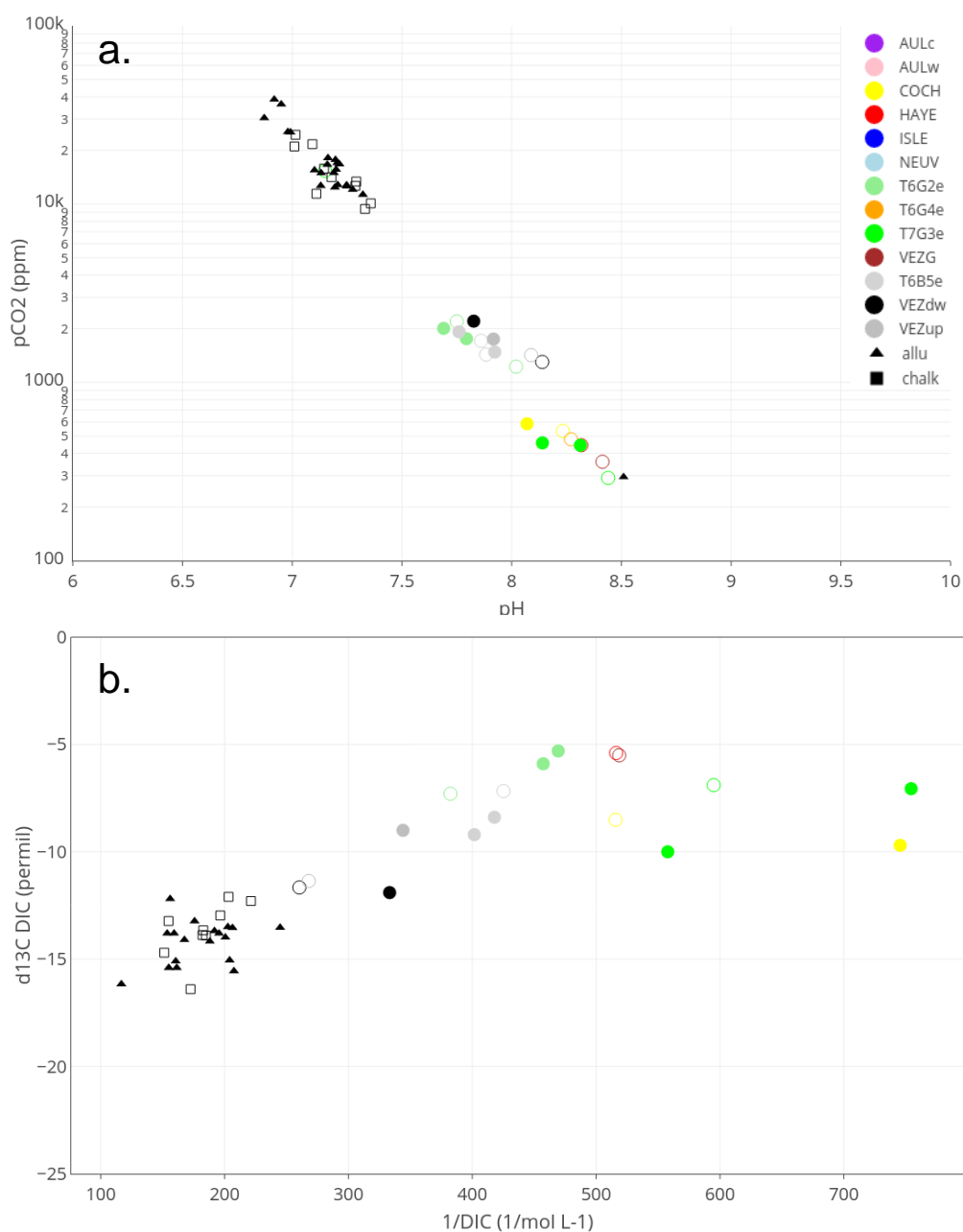


Figure 6. Relations entre la pression partielle en CO_2 et le pH (a), entre la composition isotopique du carbone du DIC et la teneur en DIC (b) dans les gravières, la nappe alluviale et la nappe de la craie. Les ronds pleins correspondent aux campagnes de basses eaux, les ronds vides aux hautes eaux.

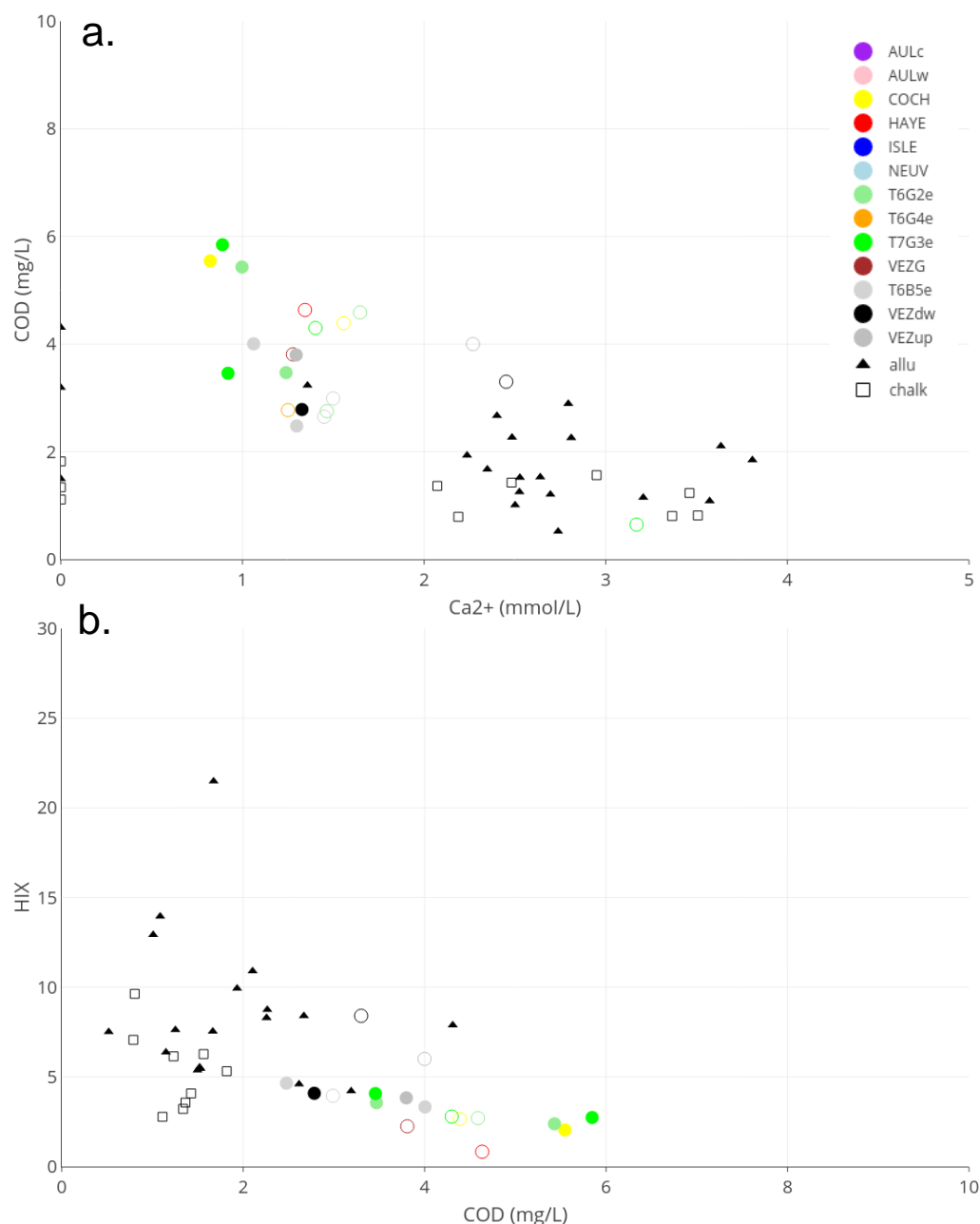


Figure 7. Relations entre la teneur en carbone organique dissous et la concentration en Ca^{2+} (a), ou l'indice HIX (indice d'humification, voir le texte pour plus de détails) (b) dans les gravières, la nappe alluviale et la nappe de la craie. Les ronds pleins correspondent aux campagnes de basses eaux, les ronds vides aux hautes eaux.

2.4.3. Dynamique de la matière organique

Les teneurs en COD moyennes sont de 1.1, 1.8 et 4.0 mg/L dans la craie, les alluvions et les gravières, respectivement (Tableau 2 et Figure 7a), avec des teneurs significativement plus élevées dans les eaux de surface par rapport aux eaux souterraines. Les eaux de surface peuvent en effet être alimentées en matière organique allochtone (par exemple les feuilles des arbres de la ripisylve) mais aussi autochtone, avec une activité biologique importante (respiration et photosynthèse).

On observe que la teneur en COD augmente quand la teneur en Ca^{2+} diminue, depuis la craie et les alluvions vers les gravières (Figure 7a). Comme expliqué plus haut, les faibles concentrations en Ca^{2+} dans les gravières sont expliquées par la précipitation de calcite en lien avec une photosynthèse intense, ce qui est cohérent avec les teneurs élevées mesurées en COD.

Les indices d'humification HIX (lié à l'aromaticité/maturité de la MOD) et de production autochtone récente BIX (lié à l'activité biologique dans le milieu) renseignent sur les sources et les propriétés du carbone organique dissous, et en particulier sa biodisponibilité (Parlanti et al., 2019). Les valeurs moyennes de HIX (7.3, 9.8, 2.6 dans la craie, les alluvions et les gravières, respectivement) restent modérées (inférieures à 10), ce qui caractérise une MOD constituée de molécules peu aromatiques et relativement biodisponibles. La signature des gravières se démarque avec une MOD de plus petite taille (valeurs les plus élevées de l'indice S_R , non présenté ici) et d'origine biologique autochtone majoritaire, renforçant l'interprétation issue des teneurs élevées en COD, d'une activité métabolique soutenue et un réservoir de carbone organique labile et rapidement renouvelé. L'abondance de COD récent et biodisponible dans les gravières doit aussi soutenir une activité de respiration, qui tendrait quant à elle à s'opposer à l'augmentation de pH et à la précipitation de calcite, ce qui participerait à la variabilité saisonnière.

Les valeurs moyennes de l'indice BIX sont entre 0,85 et 0,95 dans tous les compartiments (données non montrées). Ces valeurs supérieures à 0,8 traduisent la présence de matière organique récente et d'origine autochtone, et indiquent donc une forte activité biologique présente à la fois dans les nappes souterraines et les eaux de surface des gravières et chenaux abandonnés.

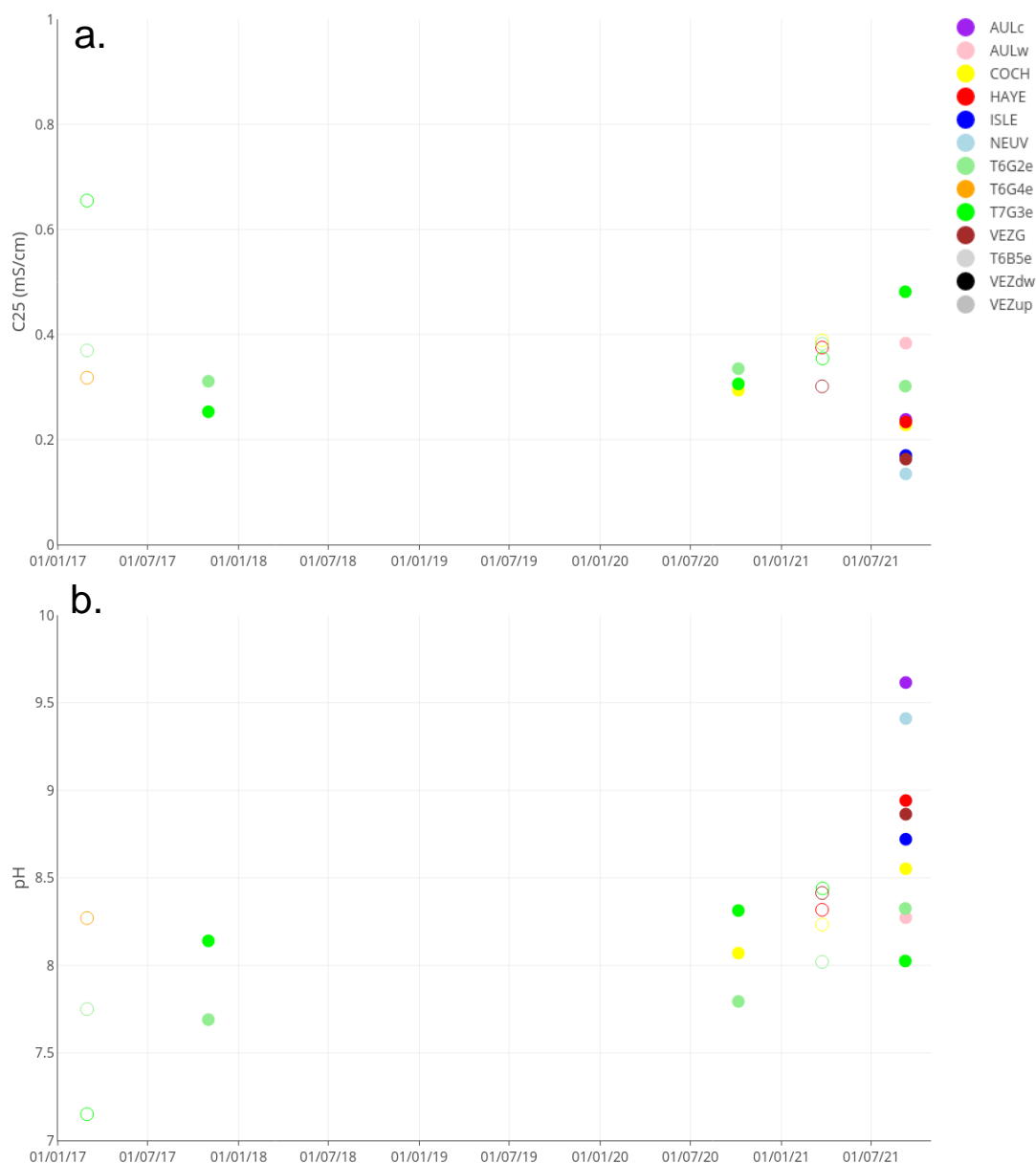


Figure 8. Evolution temporelle de la conductivité spécifique (a) et du pH (b) mesurés dans les gravières. Les ronds pleins correspondent aux campagnes de basses eaux, les ronds vides aux hautes eaux.

2.5. Evolution temporelle de la biogéochimie des gravières

Le suivi sur la gravière de la Cocharde COCH réalisé en 2017-2018 avait montré une augmentation de la conductivité en hiver / hautes eaux, traduisant un apport net d'eaux souterraines, supérieur à la dilution par la pluie (Guillon et al., 2019). En période chaude / basses eaux, la baisse de conductivité allait dans le sens opposé à la concentration attendue pour une évaporation nette, traduisant la précipitation de calcite (Guillon et al., 2019). La conductivité (et le calcium) sont des traceurs réactifs, qui intègrent les effets de mélanges / flux d'eau, mais aussi des processus biogéochimiques, et permettent d'identifier les variations saisonnières du fonctionnement biogéochimique.

La Figure 8 présente l'évolution temporelle de la conductivité spécifique et du pH mesurés dans les gravières. Le nombre de campagnes reste limité : les gravières T7G3e et T6G2e ont fait l'objet de la totalité des 5 campagnes, COCH de trois campagnes, VEZG et HAYE de deux campagnes, et les cinq dernières d'une seule campagne. Ceci limite en partie la portée de l'interprétation des résultats.

La dernière campagne réalisée en septembre 2021 sur neuf gravières met en évidence une dispersion des mesures de pH et de conductivité plus importante que lors des campagnes précédentes, qui n'échantillaient qu'au maximum cinq gravières (Figure 8). Il apparaît donc crucial d'avoir un échantillonnage de plusieurs gravières. Le nombre actuel de neuf reste faible mais peut être considéré comme acceptable.

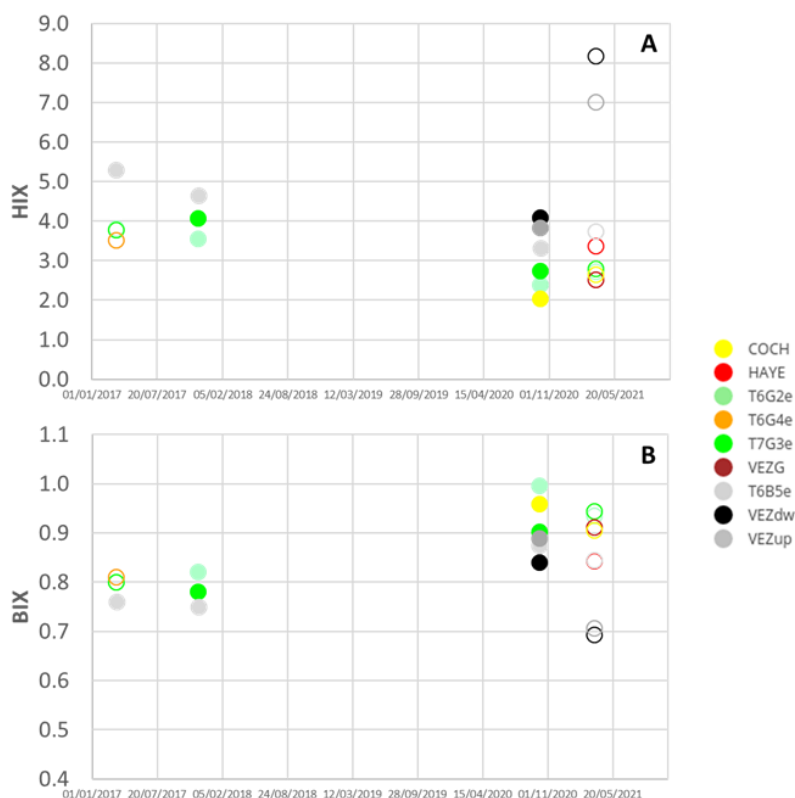


Figure 9. Evolution temporelle des indices de caractérisation de la MOD dans les gravières et bras morts : (A) HIX, humification/aromaticité et (B) BIX, production autochtone récente/activité biologique. Les ronds pleins correspondent aux campagnes de basses eaux (novembre 2017 et octobre 2020), les ronds vides aux hautes eaux (mars 2017 et 2021).

La Figure 9 met également en évidence la variabilité temporelle des indices de fluorescence de caractérisation de la MOD, HIX et BIX, calculés pour les eaux de surface des gravières et chenaux abandonnés échantillonnées de mars 2017 à mars 2021. Les propriétés de la MOD restent cependant similaires pour toutes les dates, avec une très forte signature liée à l'activité biologique quelle que soit la date, bien que plus prononcée en octobre 2020 et mars 2021. Par comparaison aux résultats obtenus pour les eaux de rivière

échantillonnées en mars et novembre 2017, nous avons montré que les caractéristiques de la MOD des eaux des gravières étaient peu impactées par les conditions hydrologiques (Parlanti et al., 2019). Nous n'avons cependant jamais pu échantillonner en réelles conditions de crue ni d'étiage, ce qui permettrait de mieux appréhender la variabilité spatiotemporelle des propriétés de la MOD.

L'évolution temporelle des paramètres biogéochimiques mesurés dans les gravières en hautes eaux et en basses eaux entre 2017 et 2021 met en évidence une variabilité saisonnière, mais également interannuelle (Figures 8 et 9). Cette variabilité pourrait permettre, pour chaque gravière, de quantifier des processus et des flux, comme cela avait été proposé pour la gravière de la Cocharde (Guillon et al 2018), et de mettre ensuite ces indicateurs en regard de la diversité des gravières (telle que définie dans CIME-B). Par exemple, pour chaque gravière, l'intensité de la variation saisonnière de la conductivité électrique permet de quantifier la précipitation estivale de calcite, voire de quantifier l'intensité de l'apport d'eau souterraines.

Concernant le pH, il n'y a pas de variabilité saisonnière claire. Une augmentation du pH est observée lors des 3 dernières campagnes, qui pourrait être à relier aux températures extérieures plus élevées.

Conclusion et perspectives

Une base de données des caractéristiques de géométrie et d'histoire d'exploitation a été réalisée à partir d'images aériennes actuelles et passées. Elle concerne 523 masses d'eau, chenaux abandonnés et gravières dans la plaine de la Bassée. Cette base de données évolue chaque année avec la poursuite de l'exploitation et l'ouverture de nouvelles gravières. La diversité des caractéristiques des plans d'eau a été décrite. Neuf gravières ont été échantillonnées à l'occasion de 5 campagnes entre 2017 et 2021, en conditions de hautes et basses eaux. La représentativité de cet ensemble par rapport à la totalité des plans d'eau est bonne, même si les gravières de petite surface ne sont pas représentées.

Le bilan hydrique des gravières peut être réalisé par plusieurs méthodes, un simple bilan entre les précipitations et l'évaporation, le suivi de la composition isotopique $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ de l'eau, ainsi que le suivi de la conductivité électrique. Le bilan hydrique a été réalisé pour la gravière de la Cocharde lors de son suivi continu en 2017-2018. A l'échelle annuelle, la contribution des précipitations est inférieure à celle des eaux souterraines. Surimposé à un écoulement régional qui traverse *a priori* la gravière, il existe ainsi un flux net d'eaux souterraines qui alimente la gravière et comble le déficit entre les précipitation et l'évaporation.

De premières interprétations ont été déduites des analyses de composition chimiques dans les gravières. Les gravières sont ainsi le lieu d'un dégazage important de CO_2 , en partie lié à l'arrivée d'eaux souterraines très riches en CO_2 . L'activité biologique dans les gravières est importante, avec en particulier une photosynthèse active en période chaude, qui entraîne la précipitation de calcite. Une activité de dénitrification apparaît également liée aux gravières.

Ces résultats qualitatifs et quantitatifs seront complétés avec les données de la campagne de septembre 2021, qui a concerné le plus grand nombre de gravières, dont 3 très récentes. Des données complémentaires de chlorophylle, de cinétique de dégradation de la matière organique et de gaz à effet de serre viendront compléter la vision du cycle du C. Une dernière campagne d'échantillonnage en hautes eaux en 2022 doit encore compléter le jeu de données. Ce travail s'inscrit dans une approche générale de co-construction d'indicateurs dans une dynamique interdisciplinaire, en cherchant à renforcer le lien entre les différents compartiments de l'hydrosystème (lit mineur, lit majeur, nappe, annexes hydrauliques) pour une compréhension globale de son fonctionnement.

Ce rapport fournit ainsi de premiers éléments de réflexion qui seront à renforcer pour améliorer la compréhension du fonctionnement biogéochimique des gravières en fonction de la variabilité spatiale (distance à la Seine, répartition longitudinale) et temporelle (âge, date d'ouverture, d'abandon ou types de réaménagement) des masses d'eau de la Bassée. Des indicateurs de trajectoires de fonctionnement des gravières ont pu être identifiés dans ce rapport, qui concernent la variation saisonnière de conductivité électrique, mais aussi, de façon plus intégrée, le flux moyen d'apport d'eaux souterraines, le flux de CO_2 dégazé ou encore le flux de calcite précipitée. Ces indicateurs pourront être analysés au regard de la diversité des caractéristiques des masses d'eau. D'autres indicateurs seraient probablement complémentaires et

pertinents pour les acteurs opérationnels du territoire, tels que le phytoplancton (abondance, diversité), les poissons, ou encore la biodiversité des berges. Ils demanderont d'élargir encore le champ d'interdisciplinarité actuel. Au-delà de l'analyse du fonctionnement des gravières, il pourra enfin s'agir de réfléchir à leurs impacts sur le bilan hydrique et le fonctionnement hydro et biogéochimique de la plaine, en comparaison par rapport à une situation de référence avant la perturbation anthropique.

Bibliographie

Arnoux, M.; Gibert-Brunet, E.; Barbecot, F.; Guillon, S.; Gibson, J. and Noret, A. (2017) Interactions between groundwater and seasonally ice-covered lakes: Using water stable isotopes and radon-222 multilayer mass balance models. *Hydrological Processes*, 31, 2566-2581

Carré, C. and Chartier, M., (2002). La gestion d'une ressource non renouvelable : entre gestion durable et aménagement des nuisances, le cas des granulats alluvionnaires en Île-de-France. *Annales de géographie*. 111(626), pp. 406–418. doi:10.3406/geo.2002.1985

Deines, P., Langmuir, D. and Harmon, R. S., (1974), Stable carbon isotope ratios and existence of a gas-phase in evolution of carbonate ground waters, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38(7), p. 1147-1164.

Eschbach, D., Lestel, L., and Steinmann, R., (2021). Dynamique hydro-morphologique historique de la Seine dans le secteur de la Bassée aval. *Actes du colloque géohistoire des zones humides d'ici et d'ailleurs, Tulcéa, Roumanie*. 14 p.

Gibson, J. J.; Birks, S. J. and Yi, Y. (2016) Stable isotope mass balance of lakes: A contemporary perspective *Quaternary Science Reviews*, 131, 316-328

Guillon, S.; Jézéquel, D. and Groleau, A. (2019), Dynamiques spatiales et temporelles des flux de carbone et du métabolisme des gravières de la Bassée, dans Sources et dynamique de la matière organique dans le bassin de la Seine, *Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine*, Volume 5.

Jézéquel, D. and Guillon, S. Projet DEGASE: (2017) Variabilité temporelle et spatiale des flux de CO₂ et CH₄ et du métabolisme dans deux gravières de la Bassée. *Rapport d'avancement du PIREN-Seine phase VII*.

Jost A. et al. (2019), Les gravières, fenêtres ouvertes sur la plaine de la Bassée, dans Influence des interactions rivière-nappe sur la ressource en eau, *Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine*, Vol 4..

Koschorreck, M., Prairie, Y. T., Kim, J. and Marce, R., (2021) Technical note: CO₂ is not like CH₄ -- limits of and corrections to the headspace method to analyse pCO₂ in fresh water, *Biogeosciences*, 18(5), p1619—1627.

Labarthe B., and Flipo, N. (2016), Dynamique des échanges hydriques entre un réseau hydrographique, une plaine alluviale, et leur aquifère régional. *Rapport d'avancement du PIREN-Seine phase VII*

Mollema, P. N. and Antonellini, M. (2016) Water and (bio)chemical cycling in gravel pit lakes: A review and outlook *Earth-Science Reviews*, 159, 247-270

Mook, W. G., Bommersoo, J. and Staverma, W. (1974) Carbon isotope fractionation between dissolved bicarbonate and gaseous carbon-dioxide, *Earth and Planetary Science Letters*, 22(2) p169-176.

Mouhri A., Flipo N., Reijiba F., De Fouquet C., Bodet L., Kurtulus B., Tallec G., Durand V., Jost A., Ansart P. and Goblet P., (2013), Designing a multi-scale sampling system of stream-aquifer interfaces in a sedimentary basin, *Journal of Hydrology*, 504, p 194-206.

Pasquet J.F. and Thibaut P.M., (1997) Estimation des ressources en granulats alluvionnaires du département de la Seine-et-Marne. *Rapport BRGM R39896*, 49 p.

Parlanti E., Sourzac M., Baratelli F., Varrault G., Flipo N. (2019). Propriétés optiques de la matière organique dissoute (MOD) : traçage de ses sources et dynamique dans la plaine de la Bassée dans *Sources et dynamique spatiotemporelle de la matière organique dans le bassin de la Seine*, *Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine*, Volume 5, 2019.

Teillaud, S., 2018. Suivi temporel de l'état de la végétation de la zone humide de la Bassée (bassin de la Seine) par télédétection spatiale, *Mémoire de Master 1, Sorbonne Université, UMR METIS*, 31 p.