

De l'intérêt de coupler méthodes géophysiques et carottages sédimentaires pour l'étude des sédiments fluviaux

The benefits of a combined geophysical and coring approach when studying alluvial sediments

■ S. VAUCLIN¹*, B. MOURIER¹, T. WINIARSKI¹

¹ Université de Lyon – CNRS – UMR 5023 – Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés (Entpe) – Vaulx-en-Velin

Mots-clés :

Carotte sédimentaire
Géophysique
Radar géologique
Sédiments
Sondeur de sédiments

RÉSUMÉ

Cet article vise à démontrer l'intérêt scientifique et opérationnel de coupler de façon systématique carottages et méthodes géophysiques pour l'étude et la gestion de sédiments fluviaux. Deux techniques géophysiques sont présentées, car particulièrement adaptées au contexte fluvial : le radar géologique ou GPR (*ground penetrating radar*) est fondé sur l'émission d'ondes électromagnétiques et permet d'obtenir une image des structures sédimentaires superficielles à terre ou en eau peu profonde, tandis que le sondeur de sédiment (ou *sub bottom profiler*) est une méthode acoustique qui s'utilise en contexte aquatique uniquement, généralement dans des profondeurs d'eau plus importantes que le GPR. La mise en œuvre des méthodes géophysiques demande peu d'efforts logistiques et donne des informations sur la géométrie du sous-sol avec une très bonne résolution, mais ne permet pas une caractérisation des sédiments. Les carottes sédimentaires – prélevées à terre ou en eau – peuvent être échantillonnées et analysées, ce qui permet une caractérisation des sédiments (granulométrie, chimie, teneur en matière organique, datation, etc.) ponctuelle dans l'espace. Les deux approches sont donc complémentaires et leur couplage permet d'étendre la caractérisation des carottes à l'ensemble des structures identifiées par les sondages géophysiques. Pour illustrer ce propos, la démarche est appliquée à un ouvrage hydraulique, où une combinaison de cinq profils GPR et trois carottes sédimentaires suffit pour identifier et représenter en trois dimensions l'ensemble des structures sédimentaires, déterminer la chronologie de remplissage de l'aménagement et calculer et localiser les volumes de sédiments plus ou moins pollués en polychlorobiphényles indicateurs (PCBi).

Keywords:

Geophysics
Ground Penetrating
Radar
Sediments
Sediment core
Sub Bottom Profiler

ABSTRACT

The aim of this paper is to prove that combining sediment cores and geophysical surveys is an optimal methodology when studying or managing alluvial sediments. Two geophysical methods are presented as they are especially relevant in a fluvial context: the Ground Penetrating Radar (GPR) is based on the emission of electromagnetic waves and provides a picture of the underground structures on land or under shallow water, while the Sub Bottom Profiler (SBP) is an acoustic method that can only be used underwater, typically at depths more important than for the GPR. Using the geophysical methods requires little effort in terms of logistics and provides information on the underground geometry with a good resolution but lacks in sediment characterization. Sediment cores – sampled either on the ground or underwater – can be analyzed at a high resolution and therefore provide multiple characterizations of the studied sediments (grain-size, geochemistry, organic matter content, sediment age, etc.); however, the information is only retrieved at a few points. Both approaches are therefore complementary, and their combination allows to expand the characterization of the sediment cores to the structures identified on the geophysical surveys. This procedure is applied to a hydraulic infrastructure, where a combination of 5 GPR surveys and 3 sediment cores is enough to identify and draw in 3 dimensions all the sediment structures, to determine the filling chronology of the infrastructure and to quantify and localize the volumes of sediments associated with different indicator polychlorinated biphenyls concentrations.

Introduction

Les dépôts sédimentaires fluviaux et périfluviaux représentent un enjeu important dans la gestion des rivières et des milieux naturels et anthropisés associés. En effet,

la nature et la typologie des sédiments d'un fleuve sont caractéristiques des dynamiques hydrauliques et géomorphologiques de l'hydrosystème. Les couches de sédiments accumulées au cours du temps constituent potentiellement une archive du fonctionnement historique et contemporain du cours d'eau. Par ailleurs, l'évaluation des volumes de sédiments potentiellement accumulés sur les marges d'une rivière est essentielle,

* Auteur correspondant – Courriel : sophia.vauclin@entpe.fr

Étude présentée lors de la 3^e conférence internationale I.S.Rivers, organisée par la ZABR et le Graie à Lyon en juin 2018

tant pour la préservation ou la restauration des écosystèmes fluviaux que pour la prévention du risque inondation. Finalement, les stocks de sédiments fluviaux sont de potentiels pièges à polluants de par l'affinité forte des contaminants pour les particules fines [KARICKHOFF *et al.*, 1979; WEN *et al.*, 1998]; à ce titre, ils constituent également un enjeu environnemental et sanitaire.

La connaissance du volume, de la typologie et des caractéristiques chimiques des sédiments fluviaux est donc souvent nécessaire. Pour cela, une méthode possible est le prélèvement de carottes sédimentaires. Les carottes sont couramment utilisées en chimie environnementale en tant qu'archive de la pollution fluviale, pour reconstruire les tendances historiques de contamination [DESMET *et al.*, 2012; MOURIER *et al.*, 2014; DHIVERT *et al.*, 2016], évaluer les risques en cas de remobilisation des sédiments [BABOROWSKI *et al.*, 2012] ou l'efficacité des politiques publiques de limitation des émissions de polluants [LE CLOAREC *et al.*, 2011; LORGEUX *et al.*, 2016]. L'analyse de carottes sédimentaires fluviales peut également permettre de reconstruire les crues historiques d'un fleuve [JONES *et al.*, 2012; TOONEN *et al.*, 2015] ou d'étudier l'impact anthropique sur le milieu périfluvial à travers le microbiome [AMOS *et al.*, 2014; GIBBONS *et al.*, 2014].

Les méthodes géophysiques – dont le radar géologique, la résistivité électrique ou le sondeur de sédiment – sont également adaptées à l'investigation des sédiments fluviaux puisqu'elles permettent d'obtenir une représentation de la structure du sous-sol. Ces techniques ont été utilisées de façon croissante au cours des 40 dernières années en sédimentologie fluviale. Elles sont généralement mises en œuvre dans le but d'étudier la structure et/ou les dynamiques des formes sédimentaires fluviales [LECLERC et HICKIN, 1997; GOURRY *et al.*, 2003; SKELLY *et al.*, 2003; REY *et al.*, 2013]. HUGGENBERGER *et al.* [1994] soulignent par exemple l'intérêt d'utiliser le radar géologique (*ground penetrating radar* ou GPR) pour appréhender les structures sédimentaires et leurs nombreuses hétérogénéités, et ainsi mieux prévoir les transferts de contaminants dans les zones saturées et non saturées des aquifères. Les méthodes géophysiques permettent aussi de reconstruire le fonctionnement historique d'un fleuve par l'identification d'anciennes formes fluviales enfouies [VANDENBERGHE et VAN OVERMEEREN, 1999; FROESE *et al.*, 2005; SŁOWIK, 2011 et 2013]. Il existe également des applications géophysiques en hydrogéologie, notamment pour la détection de nappes souterraines [DOETSCH *et al.*, 2012; PUEYO ANCHUELA *et al.*, 2014]. Les techniques géophysiques

ont même été utilisées dans des thématiques écologiques, pour faire le lien entre les structures sédimentaires et les zones du sous-sol biologiquement actives [MERMILLOD-BLONDIN *et al.*, 2015] ou le contexte microbien [DE CARLOS *et al.*, 2017].

Quelques études font usage à la fois de méthodes géophysiques et de carottage. GU *et al.* [2019] utilisent des carottes sédimentaires en appui des résultats géophysiques, pour préciser la caractérisation lithologique des formations sédimentaires identifiées sur des profils GPR, tandis que BÁBEK *et al.* [2008] couplent les deux méthodes dans une perspective de reconstruction de la pollution historique, les carottes sédimentaires étant alors utilisées en tant qu'archive de la contamination du milieu. Cependant, l'utilisation conjointe de méthodes géophysiques et de carottages reste rare, alors que la complémentarité des deux méthodes permettrait de répondre à de nombreuses problématiques relatives à la gestion des cours d'eau. En effet, les méthodes géophysiques donnent un aperçu spatial complet et à moyenne échelle des structures sédimentaires, et les carottes permettent une caractérisation précise et multicritère (granulométrie, chimie, datation, etc.) des structures identifiées par la géophysique.

Cet article a pour but de mettre en avant les intérêts pratiques de coupler systématiquement méthodes géophysiques et carottages pour répondre à des problématiques de gestion des sédiments fluviaux, en particulier dans des approches de reconstructions de tendances temporelles [VAUCLIN *et al.*, 2018]. Après un état des lieux des méthodes géophysiques et de carottage adaptées à ces enjeux, un cas d'étude est présenté, où le couplage géophysique-carottage appliqué sur un aménagement hydraulique permet à la fois de retracer la complexité du fonctionnement du milieu investigué et de caractériser le risque de pollution lié aux sédiments étudiés, tout en optimisant – en matière de temps et de coût – la réalisation de l'étude [WINIARSKI *et al.*, 2015].

1. Matériels et méthodes

1.1. Démarche générale

La démarche générale préconisée pour l'étude de sédiments périfluviaux comporte cinq étapes (*figure 1*).

Une première étape consiste à effectuer une analyse diachronique du site d'étude. Il s'agit de rassembler et d'étudier de façon conjointe des données historiques de divers types : anciennes cartes et photographies aériennes, bande active du fleuve, chronique de débits,

occupation des sols, etc. Les sédiments périfluviaux constituent en effet une archive du fonctionnement du fleuve au cours du temps; leur interprétation sera donc facilitée par une connaissance la plus précise possible de l'évolution du site d'étude. Ces données peuvent également permettre d'identifier une ou plusieurs zones particulièrement pertinentes sur lesquelles le reste de la démarche sera appliqué.

Une deuxième étape consiste à effectuer des mesures géophysiques sur les zones d'intérêt. Une combinaison de profils longitudinaux (c'est-à-dire plus ou moins parallèles au lit du fleuve) et transversaux est recommandée, car elle permet éventuellement d'envisager la structure du sous-sol en trois dimensions. L'analyse des profils obtenus donne des informations sur l'épaisseur de sédiments, les principales interfaces, les anciennes formes fluviales, etc. En recoupant ces informations avec l'étude diachronique, il est possible d'identifier les sites les plus pertinents pour implanter des carottes sédimentaires. Il peut, par exemple, être intéressant de positionner une carotte sur une superposition de structures sédimentaires afin de maximiser la diversité

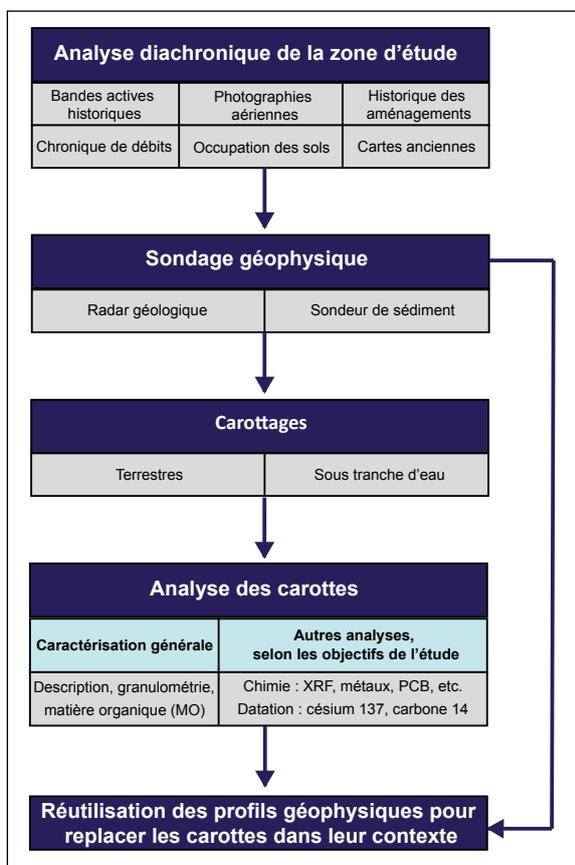
de l'information recueillie par la carotte, ou de choisir d'extraire une carotte par structure sédimentaire identifiée, afin d'avoir une représentation de la diversité des milieux et des processus sédimentaires du site d'étude.

Après la collecte des carottes sédimentaires, leur caractérisation à haute ou moyenne résolution donne une information sur la nature, la temporalité de dépôt et/ou la contamination des sédiments (granulométrie, teneur en matière organique, présence de polluants organiques ou métalliques, datation, etc.). Les informations ainsi obtenues sont précises et relativement continues dans le temps, mais ponctuelles d'un point de vue spatial. Une dernière étape consiste alors à réinterpréter les profils géophysiques pour replacer les carottes dans leur contexte sédimentaire, évaluer leur représentativité et potentiellement extrapoler les conclusions tirées de leur analyse à une échelle plus vaste.

D'un point de vue opérationnel, cette démarche se positionne en complément des recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés formulées par la direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (Dreal) Rhône-Alpes dans le cadre du schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) 2010-2015 [GOUISSET et al., 2013].

1.2. Le point sur les méthodes géophysiques pour l'étude des sédiments récents

Les techniques géophysiques proposées permettent de caractériser les couches sédimentaires du lit de la rivière et de ses marges avec un fort rendement et de façon non intrusive. Elles rendent possible l'investigation de profondeurs importantes sur de longues distances [SCHOLZ, 2001]. Ces techniques diffèrent tant par leur applicabilité que par les échelles spatiales et temporelles auxquelles elles s'appliquent [LIN et al., 2009]. Dans le cas de l'étude des sédiments fluviaux fins, les techniques électromagnétiques – par radar géologique terrestre (*ground penetrating radar* ou GPR) ou aquatique (*water ground penetrating radar* ou WGPR) – et acoustiques – par sondeur de sédiment (*sub bottom profiler* ou SBP) – semblent être les plus appropriées en matière de rendement, de faisabilité et de résolution. La technique de résistivité électrique (*electric resistivity tomography* ou ERT) ne sera pas présentée dans cet article, car elle est destinée à investiguer des profondeurs importantes (par exemple dans le but d'identifier le substratum), mais n'est pas appropriée pour l'étude de sédiments superficiels et leur



GPR : radar géologique (*ground penetrating radar*); PCB : polychlorobiphényles; XRF : spectrométrie de fluorescence des rayons X (*X-ray fluorescence*).

Figure 1. Démarche proposée pour l'étude des sédiments fluviaux par couplage de méthodes géophysiques et de carottages

architecture, notamment du fait de sa faible résolution verticale (de l'ordre du mètre). Un lecteur néanmoins désireux de s'informer sur cette technique pourra se reporter aux ouvrages suivants: TELFORD *et al.* [1990], LAGABRIELLE [1998], MILSOM et ERIKSEN [2011], REYNOLDS [2011].

1.2.1. Principe et intérêt du radar géologique

Parmi les méthodes géophysiques utilisées pour étudier les berges ou les plaines d'inondation, le radar géologique est une solution qui peut être utilisée lorsque les zones d'étude sont hors d'eau (*figure 2a*). Cette technique est particulièrement adéquate pour la caractérisation de sédiments peu conducteurs d'un point de vue électrique, composés de graviers, sables et silt, mais peu adaptée aux milieux très argileux [BRISTOW et JOL, 2003]. Plusieurs exemples d'études de dépôts alluvionnaires par radar géologique ont montré la capacité de la méthode à définir des modèles de structures et d'environnements de dépôts [HUGGENBERGER *et al.*, 1994; ASPRION et AIGNER, 1999; BERES *et al.*, 1999; LUNT *et al.*, 2004; KOSTIC *et al.*, 2005; HUGGENBERGER et REGLI, 2006].

Le GPR est une méthode géophysique non invasive permettant d'obtenir une image à haute résolution de la structure superficielle du sol. Le principe consiste à envoyer dans le sol des ondes électromagnétiques de haute fréquence (de quelques dizaines de mégahertz à quelques gigahertz). Les impulsions sont injectées dans le sous-sol via une antenne émettrice à une fréquence

centrale déterminée, et se propagent en s'atténuant dans les matériaux. À chaque interface entre des milieux différents, une partie de l'énergie des ondes est réfléchie vers la surface: les échos successifs sont enregistrés en fonction du temps par l'antenne réceptrice (*figure 3*). La juxtaposition des signaux temporels reçus lors du déplacement de l'antenne permet d'obtenir une coupe-temps – ou radargramme – qui donne des informations géométriques sur la structure auscultée. Les réflecteurs peuvent être de nature diverse: interfaces géologiques, changements brusques de granulométrie, nappe d'eau, etc. [LECLERC et HICKIN, 1997]. La vitesse de propagation des ondes dans le sous-sol dépend de nombreux paramètres, dont la porosité ou les teneurs en eau et en argile [GRANT *et al.*, 1998; SŁOWIK, 2011]. La profondeur d'investigation du radar géologique fluctue également en fonction de plusieurs paramètres: la conductivité électrique du matériau, le niveau de bruit diffractant, le choix de la fréquence d'émission, etc. Finalement, la résolution du profil obtenu varie entre une et plusieurs dizaines de centimètres, et dépend également de la fréquence d'émission: une fréquence haute résultera en une meilleure résolution, aux dépens de la profondeur maximale.

Étant donné les larges bandes fréquentielles de réception de ses antennes, le radar géologique est très sensible aux interférences provenant d'autres sources d'ondes électromagnétiques, comme les émetteurs radio et de télévision, les téléphones portables et leurs



Figure 2. Exemple d'utilisation du radar géologique a) en milieu terrestre; b) en milieu aquatique. Pour les deux essais, le système d'acquisition utilisé est un SIR 3000 connecté à une antenne de 200 MHz, développé par la société GSSI

4 DOMAINES



HygéO
www.hygeo.fr
accueil@hygeo.fr
05 49 30 05 88
43 bis, rue des Davitaires
86550 Mignaloux-Beauvoir

HydroGéologues Conseil
10 rue de l'Église
37260 Monts
02 47 52 33 79
http://www.hydrogeol.com

NOS PRESTATIONS

- ▶ Recherche et exploitation des ressources en eau souterraine
- ▶ Diagnostic de forage
- ▶ Diagnostic de pollution, suivis du niveau et de la qualité des eaux de nappe
- ▶ Maîtrise d'œuvre, assistance technique ou suivi de travaux, pour la réalisation d'ouvrage d'eau souterraine ou leur réhabilitation
- ▶ Études réglementaires relatives aux forages, aux plans d'eau, aux rejets des eaux dans le milieu naturel, études PPC, AAC...
- ▶ Études hydrogéologiques relatives à la gestion des eaux pluviales, au rabattement de nappe et suivis associés

LES QUALIFICATIONS D'HYDROGÉOLOGUES CONSEIL



LES QUALIFICATIONS D'HYGÉO



LACROIX Sofrel la télégestion 4.0

Solutions connectées pour la gestion et l'autosurveillance des réseaux d'eaux



SOFREL S4W Télégestion et cybersécurité

- Alerte 24h/24
- Automatismes et calculs
- Optimisation des pompages
- Archivages et bilans



SOFREL LT Data loggers IoT



- Autosurveillance
- Détection surverses
- Pilotage échantillonneur
- Diagnostic permanent
- Détection eaux parasites



www.lacroix-sofrel.fr

EMO

ENVIRONMENT BY TECHNOLOGY

Solutions globales pour le traitement de vos effluents et de vos boues.

Etudes laboratoire



Unités Mobiles
Prestations sur site

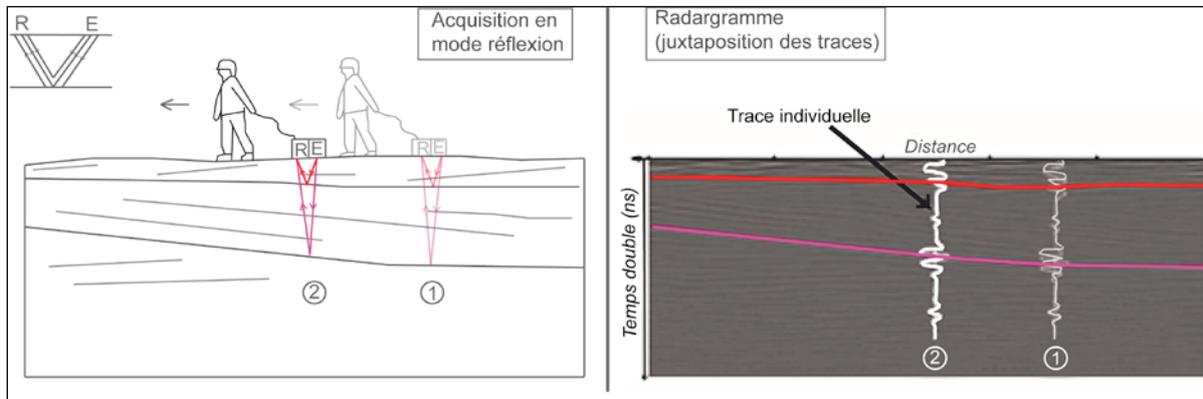


Installation
sur site



Service
Après-Vente





E : émetteur, R : récepteur.

Figure 3. Principe d'acquisition du radar géologique

- ▶ antennes-relais ou encore les talkies-walkies [NEAL, 2004]. Si le bruit environnant ne peut être évité, des filtres fréquentiels peuvent être appliqués sur les données afin de supprimer les composantes dont l'origine n'est pas l'antenne d'émission.

L'acquisition au radar géologique produit des profils radar dont l'échelle verticale est une échelle de temps double, correspondant au temps d'aller-retour d'une onde entre l'antenne en surface et les interfaces entre milieux de propriétés électromagnétiques différentes. L'obtention d'un profil radar avec une échelle verticale en profondeur métrique ne se fait qu'en connaissance d'un profil de vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans les milieux investigués. Il est donc généralement nécessaire de mesurer un tel profil au niveau de la zone d'étude, via une procédure CMP (*common mid-point*) [HUGGENBERGER *et al.*, 1994].

Les levées WGPR (*water ground penetrating radar*) utilisent les propriétés diélectriques de l'eau et des sédiments. De par leur taille compacte, il est possible de remorquer les antennes émettrice et réceptrice du radar géologique dans ou derrière un bateau (*figure 2b*) [DAVIS et ANNAN, 1989; MELLETT, 1995]. Le WGPR peut être utilisé dans une variété de lieux de faibles profondeurs (petits barrages, lacs, réservoirs, rivières) où les techniques de réflexion sismique ne sont pas applicables, car les multiples réflexions entre le fond et la surface de l'eau perturbent l'enregistrement. À titre indicatif, la littérature suggère une gamme d'antennes entre 100 et 500 MHz pour une profondeur d'eau comprise entre 1 et 2 m [GOURRY *et al.*, 2003]. Le WGPR permet de faire des mesures sur de grandes distances sans effort logistique important; l'interprétation exige en revanche de bonnes connaissances en géophysique et géologie. La principale limitation du WGPR est son incapacité à être utilisé en milieux salins:

la conductivité électrique de l'eau induit alors une forte atténuation des ondes électromagnétiques qui, par conséquent, pénètrent peu dans le sédiment. D'une manière générale, la conductivité électrique de l'eau est à considérer avant toute application du WGPR.

Quel que soit le mode d'acquisition en milieu terrestre ou aquatique, les profils (W)GPR obtenus nécessitent un traitement. L'objectif est d'atténuer les limites inhérentes à une acquisition par radar géologique [NEAL, 2004]. Le traitement utilisé dépend de plusieurs facteurs, dont l'objectif de l'étude, les caractéristiques du site étudié, le système radar ainsi que les logiciels de traitements utilisés. Le lecteur désireux de s'informer plus précisément sur les différentes méthodes de traitement pourra se référer aux ouvrages de REYNOLDS [1997], BRISTOW et JOL [2003], BAKER et JOL [2007], JOL [2009].

1.2.3. Principe et intérêt du sondeur de sédiment (*sub bottom profiler* ou SBP)

Les techniques géophysiques embarquées ont déjà fait leurs preuves en milieu océanique, mais sont encore très peu utilisées en milieu fluvial, bien que la miniaturisation des appareils, la diminution de leurs prix ainsi que l'amélioration de leurs performances sous faible tranche d'eau permettent actuellement d'envisager leur utilisation. Fondées sur les propriétés acoustiques des sédiments, ces méthodes sont couramment utilisées dans les milieux aquatiques pour la bathymétrie et l'étude des sédiments sous-jacents: balayage sonar, sondeur de sédiments [GARCÍA-GARCÍA *et al.*, 2004; NITSCHKE *et al.*, 2004; SCHROTTKE *et al.*, 2006].

Le sondeur de sédiments (SBP) fait partie des systèmes de réflexion sismique à très haute résolution (bande de 2-20 kHz, la fréquence la plus utilisée étant 3,5 kHz) [LENOBLE, 2001]. Son principe repose sur la capacité

des ondes acoustiques basses fréquences à pénétrer les couches sédimentaires. Parmi les différentes méthodes d'émission d'onde acoustique, on privilégiera un signal de type CHIRP (signal utilisant une modulation de fréquence et une modulation d'amplitude afin que le signal acoustique émis et les ondes réfléchies mesurées présentent une forte corrélation), car il permet un filtrage des signaux parasites, un excellent rapport signal/bruit et une bonne résolution [LENOBLE, 2001]. Le signal CHIRP émis est généré par des transducteurs électroacoustiques. L'onde acoustique se propage dans la couche d'eau, puis dans le sédiment (figure 4). La succession de tirs permet de reconstituer les horizons sédimentaires et l'on obtient ainsi une coupe verticale du sous-sol, l'abscisse représentant l'avancée du bateau et l'ordonnée la profondeur de pénétration. Il est à noter que cette profondeur est exprimée en secondes, car les propriétés géoacoustiques du sédiment (densité et célérité) sont – à ce moment – encore inconnues. Néanmoins, afin d'avoir une idée de cette

profondeur, on approche généralement la célérité du son à 1 600 m/s dans les sédiments [LENOBLE, 2001 ; MISSIAEN *et al.*, 2008 ; LIN *et al.*, 2009 ; FANGET *et al.*, 2014]. Traditionnellement, la même antenne fait office d'émetteur et de récepteur. Cette configuration d'acquisition présente deux avantages majeurs par rapport à la réflexion sismique : la facilité de mise en œuvre et l'offset (réflexion en incidence normale) nul.

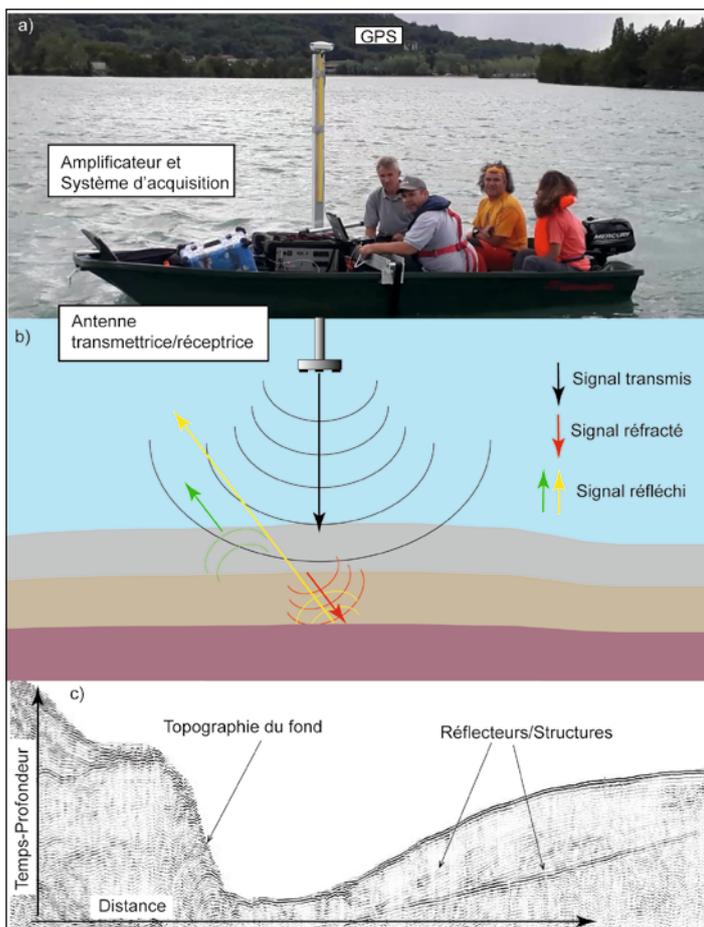
Le sondeur de sédiments fournit une coupe du terrain situé à la verticale de la route de l'embarcation, sur laquelle se marquent les différents réflecteurs. Cette coupe permet d'analyser la structure de plusieurs dizaines de mètres du sous-sol subaquatique. En procédant à des relevés systématiques suivant un réseau de profils, il est possible de tracer des cartes en courbes d'égale profondeur (isobathes) des différents réflecteurs ou des cartes en courbes d'égale épaisseur (isopaches) des formations comprises entre deux réflecteurs donnés.

Deux méthodes de géophysique aquatique – le WGPR et le SBP – ont été présentées ; le choix entre l'une et l'autre se fera en fonction des objectifs du sondage et du contexte de la zone d'étude. Les résolutions du SBP et du WGPR sont comparables : de l'ordre de quelques centimètres au maximum, selon la fréquence d'excitation ou la vitesse de l'onde électromagnétique dans chaque matériau. En revanche, les signaux du SBP peinent à pénétrer à travers les sédiments grossiers (sable et gravier) en raison de la consommation d'énergie qui engendre une atténuation du signal [MORANG *et al.*, 1997]. De la même façon, l'intensité du signal électromagnétique dans les essais GPR est rapidement atténuée dans des matériaux de haute conductivité ; par exemple, le signal ne pénètre que de quelques centimètres dans l'eau de mer [ANNAN, 2005], les sédiments argileux et les sédiments riches en gaz (du fait de la dégradation de la matière organique). En raison des avantages et des inconvénients offerts par chacune des deux techniques géophysiques, les méthodes GPR et SBP peuvent aussi être utilisées de façon conjointe pour fournir une image complète et complémentaire des sédiments subaquatiques [McCANN et FORSTER, 1990].

1.3. Échantillonnage par carottage sédimentaire

1.3.1. Prélèvement

Dans un contexte aquatique, deux méthodes traditionnelles peuvent être mises en œuvre à partir d'une embarcation : des sondages à la benne Eckman, qui renseignent seulement sur les sédiments de surface,



et des carottages associés à des coordonnées GPS [PRZEDWOJSKI, 1995 ; KALFF, 2002]. Les carottes ont l'avantage de permettre le prélèvement d'échantillons à différentes profondeurs, de valider les techniques géophysiques et autres relevés non intrusifs et d'obtenir une archive sédimentaire datable, permettant ainsi d'évaluer l'impact potentiel des aménagements et des contaminations. Toutefois, le nombre de points de prélèvement est habituellement limité en raison des efforts logistiques importants.

Dans un contexte terrestre, on se référera à la norme XP P94-202 qui définit un carottier comme un « outil de prélèvement cylindrique à section circulaire destiné à obtenir un échantillon ou carotte, et mis en œuvre par un forage réalisé à cet effet, soit par percussion (fonçage, battage ou vibro-percussion), soit par rotation ». Afin de préserver au maximum les structures des sédiments fins, le sondage par percussion ou battage – où le carottier est enfoncé à l'aide d'un dispositif dont l'énergie permet de vaincre la résistance des sédiments – est préférable [REIFFSTECK *et al.*, 2012].

1.3.2. Caractérisation des carottes sédimentaires

Réalisée dès l'ouverture des carottes, la description des archives sédimentaires permet d'identifier les différents lithofaciés en présence, de renseigner grossièrement la répartition granulométrique (granoclassement positif ou négatif), de préciser les phénomènes physico-chimiques (par exemple oxydoréduction) et la nature des dépôts (présence de matière organique, passées sableuses, etc.). Des photos sont réalisées de manière systématique sur chaque archive.

De par leur faible solubilité dans l'eau et leur affinité forte pour les particules fines, les contaminants métalliques et organiques sont retenus essentiellement sur les sédiments les plus fins (limons, argile, matière organique). Une caractérisation granulométrique des échantillons est donc indispensable à toute étude de la pollution associée aux sédiments. Elle peut être effectuée à l'aide d'un granulomètre laser, qui présente un bon rendement et permet des pas d'échantillonnage faibles (de l'ordre du centimètre). Les analyses granulométriques permettent également de normaliser les données en vue d'une éventuelle comparaison interdite, de mettre en évidence l'impact des processus hydrosédimentaires et de caractériser les différents modes de dépôt (taille des particules, asymétrie de la courbe de répartition granulométrique, mode, moyenne, etc.). De plus, l'évolution de la granulométrie renseigne sur l'enregistrement par un site des événements hydrosédimentaires particuliers: une augmentation de la taille

des grains indique souvent un épisode de crue, tandis qu'une diminution de la taille des grains est généralement corrélée avec une baisse des débits du fleuve.

À cette étape, il est généralement intéressant d'effectuer une analyse chimique non destructive et semi-quantitative au core scanner par spectrométrie de fluorescence des rayons X (ou XRF : X-ray fluorescence) qui permet d'obtenir les profils de plus d'une vingtaine d'éléments chimiques à un pas de l'ordre du millimètre sur l'ensemble de la carotte. En l'absence d'information temporelle, l'étude de la radioactivité permet une datation absolue des couches successives d'une carotte par l'étude des isotopes naturels (^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb) et artificiels (^{137}Cs , ^7Be , ^{60}Co) – ces derniers provenant des essais nucléaires aériens et des accidents nucléaires (par exemple Tchernobyl en 1986 pour l'Europe). Les substances à analyser, les méthodes d'extraction et de mesure ainsi que les pas d'échantillonnage peuvent être alors choisis selon les objectifs de l'étude en cours.

2. Cas d'étude : quantification de l'étendue d'une pollution dans un milieu sédimentaire

Ce cas d'étude a pour but d'illustrer l'intérêt opérationnel du couplage entre géophysique et carottes sédimentaires. L'exemple présente une combinaison entre des profils GPR et un nombre optimisé de carottes. Cette étude a permis de répondre de façon rapide et efficace à la problématique posée : quantifier l'étendue de la pollution en polychlorobiphényles (PCB) dans une zone d'étude en marge du Rhône [WINIARSKI *et al.*, 2015].

L'objectif de l'étude est de caractériser le remplissage et la contamination des sédiments d'un casier Girardon sur les marges du Rhône (*figure 5a*). Les casiers Girardon sont des infrastructures mises en place sur le Rhône entre 1860 et 1900 afin de contraindre son lit et d'en faciliter la navigation. Il s'agit d'un assemblage d'épis transversaux et de digues longitudinales, formant effectivement des casiers qui tendent à fonctionner comme des pièges à sédiments. Aujourd'hui, dans une problématique de restauration des milieux périfluviaux, le démantèlement de certains casiers est souvent envisagé, mais il est nécessaire au préalable de quantifier les volumes de sédiments stockés et de s'assurer qu'ils ne contiennent pas de concentrations importantes de contaminants, qui seraient alors libérées dans le milieu.

L'analyse diachronique du casier (figure 5b) révèle des dynamiques de remplissage complexes, avec un atterrissement croissant mais hétérogène d'un point de vue spatial : le remplissage commence sur la partie distale du casier (à l'est), continue sur une bande centrale, puis sur la partie entre ces deux zones, pour finir par le côté du casier adjacent au fleuve (côté ouest).

Des acquisitions au GPR (antenne de 200 MHz) ont été effectuées selon un quadrillage du casier comprenant deux profils longitudinaux et trois profils transversaux, d'environ 100 m chacun (figure 5a). Parmi les cinq profils effectués, seul le profil transversal T2 est présenté dans le cadre de cette démonstration (figure 5c). On

observe de nombreux réflecteurs parallèles entre eux et qui suivent les variations topographiques de la surface. Le profil présente également des réflecteurs obliques qui permettent de délimiter huit couches de sédiments plus ou moins superposées, représentées par différentes couleurs sur la figure 5d. On peut supposer que chacune de ces couches s'est déposée avec une temporalité différente, ce qui correspond bien au remplissage progressif et spatialement hétérogène identifié sur la diachronie.

La même interprétation a été conduite sur les quatre autres profils, et un modèle pseudo-3D a été réalisé à partir des cinq profils à l'aide du logiciel RockWare Inc., ►

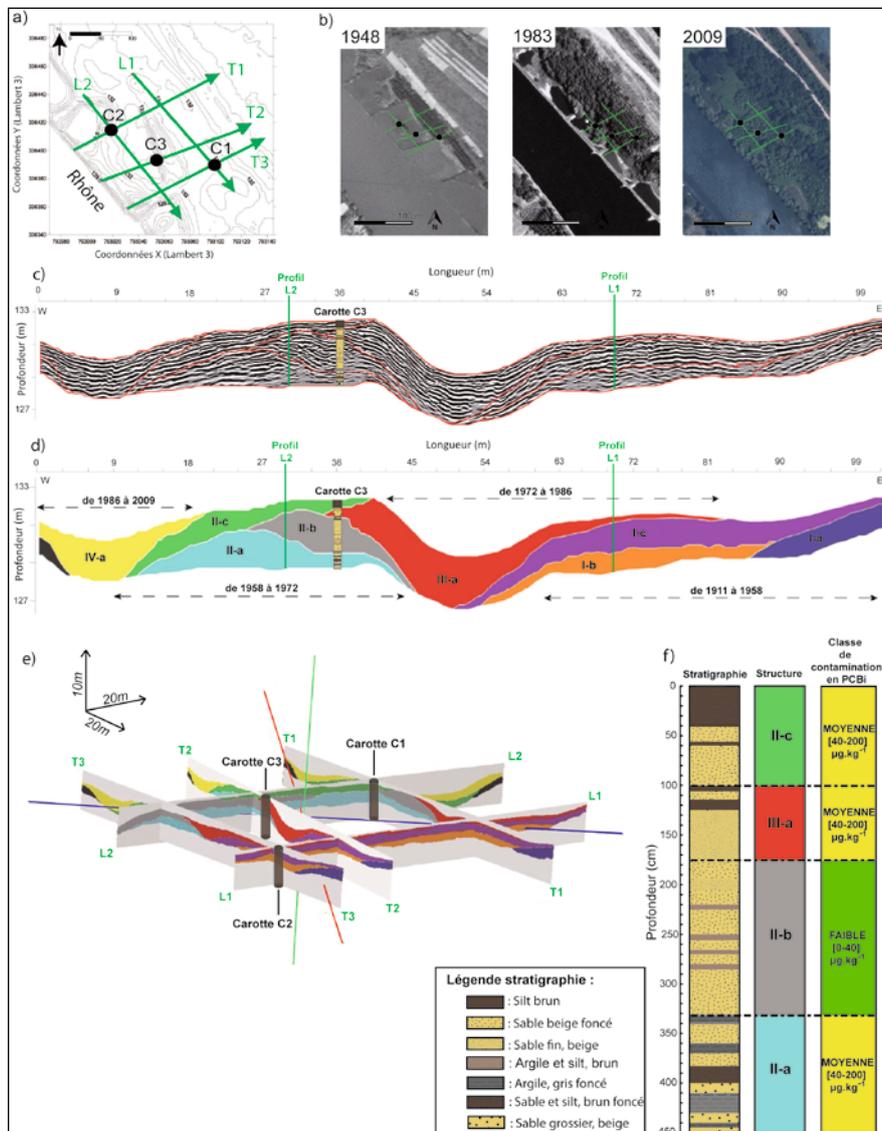


Figure 5. Cas d'étude : a) positionnement des profils GPR (ground penetrating radar) et des carottes sédimentaires sur le casier Girardon étudié ; b) diachronie du casier étudié à partir de photographies aériennes historiques ; c) profil GPR T2 interprété ; d) profil GPR T2 avec les différentes structures sédimentaires identifiées ; e) modèle pseudo-3D du casier étudié réalisé à partir des cinq profils GPR ; f) stratigraphie, structures sédimentaires et niveaux de contamination en polychlorobiphényles indicateurs (PCBi) de la carotte C3. Figure adaptée de WINIARSKI *et al.* [2015]

Nouvelle génération d'Unités Mobiles de Déshydratation des Boues Presses à vis

Disponibles à la location dans toute la France



Faible consommation
d'énergie



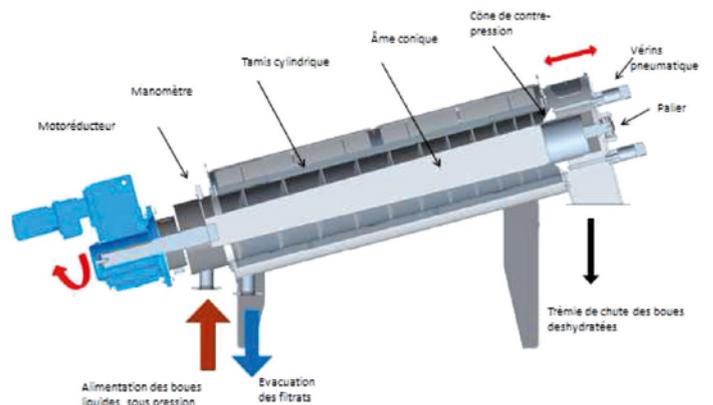
Rapidité de mise en
œuvre



Haute performance de
déshydratation



Formation du
personnel



MPO™
ENVIRONNEMENT

Quartier des Entrepreneurs
Aire de la Thur
68840 PULVERSHEIM, France

Tel: +33(0)3.89.50.60.49

Mobile : +33(0)6.89.08.15.51
+33(0)6.40.78.78.27

e-mail : contact@mpo-environnement.com
Web: www.mpo-environnement.com

Densiline

dans l'industrie

comme dans les collectivités

www.densiline.com

*remontées de boues
en clarificateurs?
entraînements de MES?*

MES
DCO
Phosphates
en excès?

*économique,
écologique, rentable,
sans entretien, sans énergie*



La solution:

Speed--clar



S'installe en 24 h , possibilité d'installation en eau sur demande

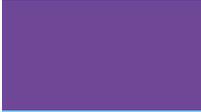
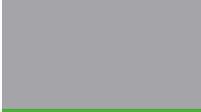


► États-Unis (figure 5e). Ce modèle montre une bonne correspondance entre les structures identifiées sur les différents profils, prouvant la qualité de l'approche. Le modèle a permis le calcul du volume de chacune des structures par interpolation sur l'ensemble du casier (tableau I). La masse de sédiment contenue dans chaque couche a également été estimée à partir de ces volumes, en utilisant une valeur de masse volumique mesurée à 1 250 kg/m³.

À partir de l'analyse géophysique, il a été estimé que trois carottes sédimentaires suffiraient pour caractériser l'intégralité des couches sédimentaires identifiées. Afin de maximiser leur représentativité, leurs emplacements ont été choisis de façon à ce que chacune traverse le plus de structures possible et/ou soit positionnée à l'intersection entre deux profils (figure 5e). Par ailleurs,

les carottes ont été placées dans des parties du casier s'étant remplies à des périodes distinctes. Ainsi, la carotte C1 est à l'intersection entre les profils T3 et L1, dans une zone au remplissage ancien, la carotte C2 est située sur les profils T1 et L2, dans la partie dont le remplissage est le plus récent et la carotte C3 se trouve dans la partie médiane du casier sur le profil T2.

Afin d'illustrer le propos, la carotte C3 a été choisie puisqu'elle est située sur le profil GPR T2 présenté. Elle mesure 450 cm et a été prélevée en cinq sections. Elle traverse quatre structures sédimentaires identifiées sur le profil T2. L'analyse granulométrique permet de retrouver ces mêmes couches (figure 5f) : entre 0 et 100 cm, on trouve une alternance de couches silteuses et sableuses (couche II-c); entre 100 et 174 cm, les sédiments sont majoritairement sableux (couche III-a);

Structure sédimentaire	Couleur associée sur le profil GPR	Volume de sédiment estimé (m ³)	Masse de sédiment estimée (tonnes)	% du volume/ de la masse totale du casier	Classe de concentration en PCBi
I-a		1 401	1 751,25	6%	–
I-b		2 467	3 083,75	10%	Faible [0-40] µg/kg
I-c		5 510	6 887,50	23%	Faible [0-40] µg/kg
II-a		3 537	4 421,25	15%	Moyenne [40-200] µg/kg
II-b		1 945	2 431,25	8%	Faible [0-40] µg/kg
II-c		2 023	2 528,75	8%	Moyenne [40-200] µg/kg
III-a		4 650	5 812,50	19%	Moyenne [40-200] µg/kg
IV-a		2 670	3 337,50	11%	–
TOTAL		24 203	30 253,75	100%	–

GPR: radar géologique (ground penetrating radar); PCBi: polychlorobiphényles indicateurs.

Tableau I. Caractérisation des différentes structures sédimentaires identifiées

entre 174 et 330 cm, on retrouve une alternance de silt et de sables (couche II-b); entre 330 et 450 cm, on identifie une alternance de couches sableuses et silto-argileuses (couche II-a).

Du fait de leurs propriétés hydrophobes et persistantes, les sept polychlorobiphényles indicateurs (PCBi) ont été choisis comme substance indicatrice de la contamination des sédiments dans le casier. Les échantillonnages ont été optimisés en fonction des résultats de l'analyse géophysique : pour chaque carotte, un échantillon a été prélevé dans chacune des structures sédimentaires qu'elle traverse, ce qui constitue un total de neuf échantillons représentant sept couches sédimentaires distinctes (trois échantillons dans la carotte C1, deux dans la C2 et quatre dans la C3). Seules les couches I-a et IV-a n'ont pas été échantillonnées (faute de carottes positionnées dessus), mais s'agissant de la couche la plus ancienne et la plus récente respectivement, il est moins probable qu'elles contiennent des teneurs importantes de PCBi.

Les concentrations de PCBi détectées dans le casier sont globalement peu importantes. Les couches sédimentaires présentent différents niveaux de contamination, que l'on peut corréliser avec leur période de mise en place. Les couches de type I sont les plus anciennes (1911-1958) et contiennent des concentrations en PCB minimales – entre 0,63 µg/kg et 0,91 µg/kg – qui s'expliquent par le fait que la production de PCB en France n'a commencé qu'après 1945. Les couches de type II, déposées entre 1958 et 1972, présentent des concentrations plus significatives, mais non alarmantes liées à la production et à l'utilisation croissantes de ces substances : entre 61 µg/kg et 106,3 µg/kg. Finalement, la couche III-a, mise en place entre 1972 et 1986, c'est-à-dire pendant le pic de production de PCB en France, contient les concentrations les plus importantes du casier, comprises entre 75,2 µg/kg et 131,6 µg/kg [WINIARSKI *et al.*, 2015]. Bien que non négligeables, ces concentrations sont inférieures à d'autres valeurs maximales mesurées dans des sédiments fluviaux du Rhône : 282 µg/kg à Crépieux-la-Pape (Rhône) [DESMET *et al.*, 2012] et 417 µg/kg à Bourg-Saint-Andéol (Ardèche) [MOURIER *et al.*, 2014]. À titre de comparaison, les concentrations maximales en PCB (Σ PCBi) suivantes ont été mesurées dans des carottes sédimentaires fluviales : 1,8 mg/kg sur la Seine à Bouaffle [LORGEUX *et al.*, 2016], 322 µg/kg sur l'Elbe (Allemagne) [GÖTZ *et al.*, 2007], 27,4 µg/kg sur la Tamise (Royaume-Uni) [LU *et al.*, 2017], 5,5 µg/kg sur la rivière Sava (affluent du Danube) [HEATH *et al.*, 2010].

Grâce au modèle pseudo-3D établi précédemment, il est possible de localiser et quantifier les volumes de sédiments d'un niveau de contamination donné (*figure 5e* et *tableau I*). Ainsi, il a pu être estimé que le casier investigué dans cette étude de cas contenait environ 1,3 kg de PCBi [WINIARSKI *et al.*, 2015]. Plus généralement, dans le cadre d'une opération de démantèlement de casier, il est possible de prévoir quels sédiments pourraient être remobilisés dans le Rhône et/ou réutilisés comme matériau, et quels sédiments devraient être gérés avec davantage de précautions.

La combinaison GPR-carotte sédimentaire a donc permis de caractériser précisément la structure et la chronologie des dépôts sédimentaires d'un casier, ainsi que de quantifier et de localiser les différents niveaux de contamination de ces sédiments. Il convient de souligner que la méthode est rapide à appliquer et peu coûteuse de par son optimisation du nombre de profils, de carottes sédimentaires et d'analyses, et remplit néanmoins les objectifs fixés.

Conclusion

L'utilisation conjointe de sondages géophysiques et de carottages sédimentaires est une méthodologie optimale pour l'investigation de sédiments fluviaux. En effet, les deux techniques sont complémentaires en tout point : la géophysique donne une image étendue des structures sédimentaires superficielles, mais avec une caractérisation limitée desdites structures, tandis que le carottage permet d'effectuer des analyses diverses (granulométrie, chimie, datation, biologie, etc.) et à haute-résolution des sédiments prélevés, mais ne fournit ces informations que de façon ponctuelle. Associé à une bonne connaissance de la zone d'étude, le couplage permet également d'optimiser le nombre de sondages géophysiques, de carottes et – lorsque cela est pertinent – d'échantillons à prélever sur les carottes, ce qui a pour avantage de réduire considérablement le temps et le coût de l'étude. Bien que cet article ait principalement mis en avant l'intérêt de la méthodologie dans un contexte sédimentaire fluvial, l'application à d'autres contextes souterrains – sols pollués, bassins d'infiltration, etc. – est une perspective envisageable.

Remerciements

Nous tenons à remercier Gwenaëlle Roux pour son aide lors de la collecte de données de terrain du cas d'étude, ainsi que la CNR (Compagnie nationale du Rhône) pour l'accès au site d'étude.

Bibliographie

- AMOS G.C.A., ZHANG L., HAWKEY P.M., GAZE W.H., WELLINGTON E.M. (2014): « Functional metagenomic analysis reveals rivers are a reservoir for diverse antibiotic resistance genes ». *Veterinary Microbiology*; 171(3-4): 441-7.
- ANNAN A.P. (2005): « 11. Ground-Penetrating Radar ». In: Butler D.K., ed. *Near-surface geophysics, investigations in geophysics*. Society of Exploration Geophysicists, p. 357-438.
- ASPRION U., AIGNER T. (1999): « Towards realistic aquifer models: three-dimensional georadar surveys of Quaternary gravel deltas (Singen Basin, SW Germany) ». *Sedimentary Geology*; 129(3-4): 281-97.
- BÁBEK O., HILSCHEROVÁ K., NEHYBA S., ZEMAN J., FARMERA M., FRANCU J., HOLOUBEK I., MACHÁT J., KLÁNOVÁ J. (2008): « Contamination history of suspended river sediments accumulated in oxbow lakes over the last 25 years: Morava River (Danube catchment area), Czech Republic ». *Journal of Soils and Sediments*; 8(3): 165-76.
- BABOROWSKI M., BÜTTNER O., MORGENSTERN P., JANCKE T., WESTRICH B. (2012): « Spatial variability of metal pollution in groyne fields of the Middle Elbe – Implications for sediment monitoring ». *Environmental Pollution*; 167: 115-23.
- BAKER G.S., JOL H.M. (2007): *Stratigraphic analyses using GPR*. Boulder (Colorado): Geological Society of America, Spécial Paper. 184 p.
- BERES M., HUGGENBERGER P., GREEN A.G., HORSTMAYER H. (1999): « Using two- and three-dimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture ». *Sedimentary Geology*; 129(1-2): 1-24.
- BRISTOW C.S., JOL H.M. (2003): *Ground penetrating radar in sediments*. Geological Society of London, 330 p.
- DAVIS J.L., ANNAN A.P. (1989): « Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy ». *Geophysical Prospecting*; 37(5): 531-51.
- DE CARLOS A., MARTÍNEZ-CARREÑO N., BARROS-GARCÍA D., LUIS J.R., GARCÍA-GIL S. (2017): « Geochemical and microbial context of the gassy sediments in the Ría de Vigo (NW of Spain) ». *Marine Geology*; 385: 1-12.
- DESMET M., MOURIER B., MAHLER B.J., VAN METRE P.C., ROUX G., PERSAT H., LEFÈVRE I., PERETTI A., CHAPRON E., SIMONNEAU A., MIÈGE C., BABUT M. (2012): « Spatial and temporal trends in PCBs in sediment along the lower Rhône River, France ». *Science of the Total Environment*; 433: 189-97.
- DHIVERT E., GROSBOIS C., COURTIN-NOMADE A., BOURRAIN X., DESMET M. (2016): « Dynamics of metallic contaminants at a basin scale — Spatial and temporal reconstruction from four sediment cores (Loire fluvial system, France) ». *Science of the Total Environment*; 541: 1504-15.
- DOETSCH J., LINDE N., PESSOGNELLI M., GREEN A.G., GÜNTHER T. (2012): « Constraining 3-D electrical resistance tomography with GPR reflection data for improved aquifer characterization ». *Journal of Applied Geophysics*; 78: 68-76.
- FANGET A.-S., BERNÉ S., JOUET G., BASSETTI M.-A., DENNIELOU B., MAILLET G.M., TONDUT M. (2014): « Impact of relative sea level and rapid climate changes on the architecture and lithofacies of the Holocene Rhone subaqueous delta (Western Mediterranean Sea) ». *Sedimentary Geology*; 305: 35-53.
- FROESE D.G., SMITH D.G., CLEMENT D.T. (2005): « Characterizing large river history with shallow geophysics: Middle Yukon River, Yukon Territory and Alaska ». *Geomorphology*; 67(3-4): 391-406.
- GARCÍA-GARCÍA G.A., GARCÍA-GIL S., VILAS F. (2004): « Echo characters and recent sedimentary processes as indicated by high-resolution sub-bottom profiling in Ría de Vigo, NW Spain ». *Geo Marine Letters*; 24(1): 32-45.
- GIBBONS S.M., JONES E., BEARQUIVER A., BLACKWOLF F., ROUNDSTONE W., SCOTT N., HOOKER J., MADSEN R., COLEMAN M.L., GILBERT J.A. (2014): « Human and environmental impacts on river sediment microbial communities ». *PLoS ONE*; 9(5): e97435.
- GÖTZ R., BAUER O.-H., FRIESEL P., HERRMANN T., JANTZEN E., KUTZKE M., LAUER R., PAEPKE O., ROCH K., ROHWEDER U., SCHWARTZ R., SIEVERS S., STACHEL B., (2007): « Vertical profile of PCDD/Fs, dioxin-like PCBs, other PCBs, PAHs, chlorobenzenes, DDX, HCHs, organotin compounds and chlorinated ethers in dated sediment/soil cores from flood-plains of the river Elbe, Germany ». *Chemosphere*; 67(3): 592-603.
- GOUISSET Y., DENOT A., CANTEGRIT L. (2013): *Recommandations relatives aux travaux et opérations impliquant des sédiments aquatiques potentiellement contaminés*. Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement Rhône-Alpes, 184 p. Disponible en ligne: http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/PCB/sediments/Recommandations-sediments-V2-0d_sept2013.pdf
- GOURRY J.-C., VERMEERSCH F., GARCIN M., GIOT D. (2003): « Contribution of geophysics to the study of alluvial deposits: a case study in the Val d'Avaray area of the River Loire, France ». *Journal of Applied Geophysics*; 54(1-2): 35-49.
- GRANT J.A., BROOKS M.J., TAYLOR B.E. (1998): « New constraints on the evolution of Carolina Bays from ground-penetrating radar ». *Geomorphology*; 22(3-4): 325-45.
- GU Z., SHI C., YANG H., YAO H. (2019): « Analysis of dynamic sedimentary environments in alluvial fans of some tributaries of the upper Yellow River of China based on ground penetrating radar (GPR) and sediment cores ». *Quaternary International*; 509: 30-40.
- HEATH E., ŠČANČAR J., ZULIANI T., MILAČIČ R. (2010): « A complex investigation of the extent of pollution in sediments of the Sava River: part 2: persistent organic pollutants ». *Environmental Monitoring and Assessment*; 163(1-4): 277-93.
- HUGGENBERGER P., MEIER E., PUGIN A. (1994): « Ground-probing radar as a tool for heterogeneity estimation in gravel deposits: advances in data-processing and facies analysis ». *Journal of Applied Geophysics*; 31(1-4): 171-84.
- HUGGENBERGER P., REGLI C. (2006): « A Sedimentological Model to Characterize Braided River Deposits for Hydrogeological Applications ». In: Gregory H. Sambrook Smith, James L. Best, Charlie S. Bristow, Geoff E. Petts, eds. *Braided Rivers*. John Wiley & Sons, Ltd, p. 51-74.

- JOL H.M. (2009) : *Ground penetrating radar: theory and applications*. Elsevier edition, 544 p.
- JONES A.F., MACKLIN M.G., BREWER P.A. (2012) : « A geochemical record of flooding on the upper River Severn, UK, during the last 3750 years ». *Geomorphology*; 179: 89-105.
- KALFF J. (2002) : *Limnology: inland water ecosystems*. Upper Saddle River (N.J.): Prentice Hall.
- KARICKHOFF S.W., BROWN D.S., SCOTT T.A. (1979) : « Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments ». *Water Research*; 13(3): 241-8.
- KOSTIC B., BECHT A., AIGNER T. (2005) : « 3-D sedimentary architecture of a Quaternary gravel delta (SW-Germany): Implications for hydrostratigraphy ». *Sedimentary Geology*; 181(3-4): 147-71.
- LAGABRIELLE R. (1998) : « Géophysique appliquée au génie civil ». *Techniques de l'ingénieur – Mécaniques des sols et géotechnique*; Réf. C-224 ; 19 p.
- LE CLOAREC M.-F., BONTE P.H., LESTEL L., LEFÈVRE I., AYRAULT S. (2011) : « Sedimentary record of metal contamination in the Seine River during the last century ». *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*; 36(12): 515-29.
- LECLERC R.F., HICKIN E.J. (1997) : « The internal structure of scrolled floodplain deposits based on ground-penetrating radar, North Thompson River, British Columbia ». *Geomorphology*; 21(1): 17-38.
- LENOBLE J.-P. (2001) : « Mesures géophysiques en mer ». *Techniques de l'ingénieur*; Réf. R2345 V1 ; 29 p.
- LIN Y.-T., SCHUETTPELZ C.C., WU C.H., FRATTA D. (2009) : « A combined acoustic and electromagnetic wave-based techniques for bathymetry and subbottom profiling in shallow waters ». *Journal of Applied Geophysics*; 68(2): 203-18.
- LORGEUX C., MOILLERON R., GASPERI J., AYRAULT S., BONTÉ P., LEFÈVRE I., TASSIN B. (2016) : « Temporal trends of persistent organic pollutants in dated sediment cores: Chemical fingerprinting of the anthropogenic impacts in the Seine River basin, Paris ». *Science of the Total Environment*; 541: 1355-63.
- LU Q., JÜRGENS M.D., JOHNSON A.C., GRAF C., SWEETMAN A.J., CROSSE J.D., WHITEHEAD P. (2017) : « Persistent organic pollutants in sediment and fish in the River Thames catchment (UK) ». *Science of the Total Environment*; 576: 78-84.
- LUNT I.A., BRIDGE J.S., TYE R.S. (2004) : « A quantitative, three-dimensional depositional model of gravelly braided rivers ». *Sedimentology*; 51(3): 377-414.
- McCANN D.M., FORSTER A. (1990) : « Reconnaissance geophysical methods in landslide investigations ». *Engineering Geology*; 29(1): 59-78.
- MELLETT J.S. (1995) : « Profiling of ponds and bogs using ground-penetrating radar ». *Journal of Paleolimnology*; 14(3): 233-40.
- MERMILLOD-BLONDIN F., WINIARSKI T., FOULQUIER A., PERRISSIN A., MARMONIER P. (2015) : « Links between sediment structures and ecological processes in the hyporheic zone: ground-penetrating radar as a non-invasive tool to detect subsurface biologically active zones ». *Ecohydrology*; 8(4): 626-41.
- MILSOM J., ERIKSEN A. (2011) : « Resistivity Methods ». In: *Field Geophysics*. John Wiley & Sons, Ltd, p. 109-36.
- MISSIAEN T., SLOB E., DONSELAAR M.E. (2008) : « Comparing different shallow geophysical methods in a tidal estuary, Verdrongen Land van Saeftinge, Western Scheldt, the Netherlands ». *Netherlands Journals of Geosciences*; 87(2): 151-64.
- MORANG A., LARSON R., GORMAN L. (1997) : « Monitoring the Coastal Environment Part III: Geophysical and research methods ». *Journal of Coastal Research*; 13(4): 1067-85.
- MOURIER B., DESMET M., VAN METRE P.C., MAHLER B.J., PERRODIN Y., ROUX G., BEDELL J.-P., LEFÈVRE I., BABUT M. (2014) : « Historical records, sources, and spatial trends of PCBs along the Rhône River (France) ». *Science of the Total Environment*; 476-477: 568-76.
- NEAL A. (2004) : « Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress ». *Earth-Science Reviews*; 66(3): 261-330.
- NITSCHKE F.O., BELL R., CARBOTTE S.M., RYAN W.B.F., FLOOD R. (2004) : « Process-related classification of acoustic data from the Hudson River Estuary ». *Marine Geology*; 209(1-4): 131-45.
- PRZEDWOJSKI B. (1995) : « Bed topography and local scour in rivers with banks protected by groynes ». *Journal of Hydraulic Research*; 33(2): 257-73.
- PUEYO ANCHUELA Ó., IPAS-LLORENS J.F., GIL GARBÍ H., CASAS-SAINZ A.M., POCOVÍ JUAN A., GARIJO M.L., FERNÁNDEZ-MARTOS J.G., FERNÁNDEZ-CASCÁN J. (2014) : « 3D alluvial aquifer reconstruction in polluted areas by means of GPR (Sabiñánigo, N Spain) ». *Environmental Earth Sciences*; 72(11): 4291-302.
- REIFFSTECK P., LOSSY D., BENOIT J. (2012) : *Forages, sondages et essais in situ géotechniques – Les outils pour la reconnaissance des sols et des roches*. Paris: Presse des Ponts, 802 p.
- REY J., MARTÍNEZ J., HIDALGO M.C. (2013) : « Investigating fluvial features with electrical resistivity imaging and ground-penetrating radar: The Guadalquivir River terrace (Jaen, Southern Spain) ». *Sedimentary Geology*; 295: 27-37.
- REYNOLDS, J.M. (1997) : *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley and Sons, 800 p.
- REYNOLDS, J.M. (2011) : « Electrical resistivity methods ». In: *An introduction to applied and environmental geophysics*, 2nd edition. Hoboken (New Jersey): Wiley, p. 289-348.
- SCHOLZ C.A. (2001) : « Application of seismic sequence stratigraphy in lacustrine basins ». In: Last W.M., Smol J.P., eds. *Tracking environmental change using lake sediments. Vol. 1. Basin analysis, coring, and chronological techniques*. Dordrecht (The Netherlands): Kluwer Academic Publishers, p. 7-22.
- SCHROTTKE K., BECKER M., BARTHOLOMÄ A., FLEMMING B.W., HEBBELN D. (2006) : « Fluid mud dynamics in the Weser estuary turbidity zone tracked by high-resolution side-scan sonar and parametric sub-bottom profiler ». *Geo-Marine Letters*; 26(3): 185-98.

SKELLY R.L., BRISTOW C.S., ETHRIDGE F.G. (2003): « Architecture of channel-belt deposits in an aggrading shallow sandbed braided river: the lower Niobrara River, northeast Nebraska ». *Sedimentary Geology*; 158(3): 249-70.

SŁOWIK M. (2011): « Changes of river bed pattern and traces of anthropogenic intervention: The example of using GPR method (the Odra River, western Poland) ». *Applied Geography*; 31(2): 784-99.

SŁOWIK M. (2013): « GPR and aerial imageries to identify the recent historical course of the Odra River and spatial extent of Obrzanskie Lake, altered by hydro-technical works ». *Environmental Earth Sciences*; 70(3): 1277-95.

TELFORD W., GELDART L., SHERIFF R. (1990). « Resistivity Methods ». In: *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press, p. 522-77.

TOONEN W.H.J., WINKELS T.G., COHEN K.M., PRINS M.A., MIDDELKOOP H. (2015): « Lower Rhine historical flood magnitudes of the last 450 years reproduced from grain-size

measurements of flood deposits using End Member Modeling ». *Catena*; 130, 69-81.

VANDENBERGHE J., VAN OVERMEEREN R.A. (1999): « Ground penetrating radar images of selected fluvial deposits in the Netherlands ». *Sedimentary Geology*; 128: 245-70.

VAUCLIN S., WINIARSKI T., MOURIER B., ROUX G., SEIGNEMARTIN G., TENA A., PIEGAY H. (2018): *Investigating the legacy sediments in the Péage-de-Roussillon bypass (Rhône River, France) by a combined geophysical and coring approach*. 3^e Conférence internationale I.S. Rivers, Lyon (France), 4-8 juin 2018.

WINIARSKI T., ROUX G., MOIROUD C. (2015): *Sediment characterization and estimation of PCB volume and mass in a Girardon type spur dike field (Rhône): optimization by coupling core and GPR profile analyses*. 2^e Conférence Internationale I.S. Rivers, Lyon (France), 22-26 juin 2015.

WEN X., DU Q., TANG H. (1998): « Surface complexation model for the heavy metal adsorption on natural sediment ». *Environmental Science and Technology*; 32(7): 870-5.

Accédez à Bac+3 et Bac+5 par l'ALTERNANCE

 **Université de Limoges**
Filière-eau

Bac+3
Licences pro DARE & TE
Diagnostic Aménagement des Ressources en Eau Traitement des Eaux

Bac+5
Master Chimie, IGEE
Ingénierie Gestion de l'Eau et de l'Environnement

www.unilim.fr/grese/formations
filiere-eau@unilim.fr 05 55 45 73 67
Diplômes nationaux certifiés OPCA

Ayez le réflexe leptospirose...

EXPOSITION
À DES
MAMMIFÈRES
SAUVAGES



EXPOSITION
À DES
MAMMIFÈRES
D'ÉLEVAGE OU
DOMESTIQUES

EXPOSITION
À UNE
EAU SOUILLÉE

La leptospirose

Une maladie infectieuse en recrudescence, reconnue comme une maladie professionnelle potentiellement grave.

Avec aujourd'hui plus d'un cas par jour, le nombre de cas de leptospirose a doublé depuis 2014 en France métropolitaine⁽¹⁾.

La leptospirose ressemble à une grippe. Cependant, en l'absence de traitement elle peut s'aggraver et entraîner une hospitalisation notamment dans la forme la plus grave « ictéro-hémorragique »⁽²⁾.

Quelles voies de contamination ?

Les leptospires présents dans l'urine des mammifères peuvent pénétrer par les plaies cutanées, les muqueuses (nez, bouche, yeux), ou à travers une peau saine macérée.

Quels facteurs de risque ?

- Présence d'eau douce ou d'humidité
- Présence d'animaux sauvages, dont les rongeurs
- Présence d'animaux d'élevage : bovins, ovins, caprins...

Quelles activités exposées ?

Les activités professionnelles répertoriées dans les tableaux 19A du Régime Général et 5 du Régime Agricole : égouts, travaux publics, d'assainissement, d'entretien des cours d'eau, pisciculture et pêche, plongeurs professionnels...

Quelle responsabilité pour l'employeur ?

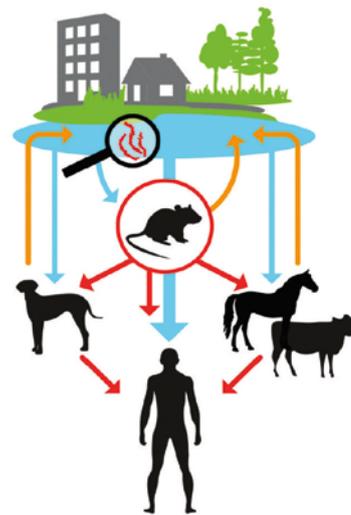
L'employeur a une obligation de moyens renforcés vis-à-vis de la sécurité et la santé des travailleurs à risque⁽³⁾.

Par des mesures de prévention collective :

- Lutte contre les réservoirs : limiter la prolifération des rongeurs
- Gestion des déchets...

Par des mesures de protection individuelle⁽⁴⁾ :

- Port des équipements de protection individuelle
- Nettoyage et désinfection des plaies
- Protection avec un pansement imperméable
- Sensibilisation du personnel à risque afin d'informer le médecin traitant en cas de signes évocateurs
- La vaccination est recommandée sur avis du médecin du travail, associée aux autres moyens de protection, pour des sujets particulièrement exposés



Contamination:

- indirecte (contact avec l'eau)
- directe (contact avec les urines)
- de l'environnement par les urines

Pour plus d'informations :
leptospirose@imaxio.com
04 37 65 55 00

www.leptospirose-prevention.fr /   

imaxio

semacrea.com puis imaxio - 05/2019 - Crédits photographiques : Fotolia / Semacrea / Imaxio Institut Pasteur - 20190513-05
Sources : (1) Rapport annuel 2018 pour l'année d'exercice 2017 du Centre National de Référence de la Leptospirose, Institut Pasteur Paris
(2) JM. Estavoyer, « Leptospirose en Franche-Comté : données cliniques, biologiques et thérapeutiques. Médecine et maladies infectieuses »,
Septembre 2013 ; pages 379-385 - (3) Soc. 25.11.2015 n°14-24.444 - (4) Avis du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France, Relatif
aux recommandations pour la prévention de la leptospirose en cas d'activité professionnelle à risque, séance du 18 mars 2005