

RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LA DETECTION DE LA PROFONDEUR D'ANCRAGE DES PIEUX BOIS PAR MÉTHODE GÉOPHYSIQUE

FEEDBACK OF A GEOPHYSICAL METHOD TO INVESTIGATE THE DEPTH OF EXISTING WOODEN PILE

Matthias FERREIRA¹, Guillaume SCHOUMACKER², Julien MOINARD³

¹Directeur grande région Normandie-Bretagne-Pays de Loire Hydrogéotechnique – Comité technique et scientifique Hydrogéotechnique – ZA le Polen – Secteur C1 – 76710 ESLETTES, France

²Ingénieur géotechnicien, Comité technique et scientifique Hydrogéotechnique – GOUSSAINVILLE, France

³Ingénieur géophysicien, IMG groupe Hydrogéotechnique, SAINT JEAN LE BLANC, France

RÉSUMÉ - Dans le cadre d'un projet de micro-tunnelier passant sous des quais danois au Havre, nous avons mené huit diagraphies en bord à quai consistant à détecter l'anomalie magnétique générée par le sabot métallique en base de pieux afin de s'assurer de la profondeur de ceux-ci. Ces mesures, associées à une analyse documentaire et une modélisation de l'anomalie métallique attendue, ont permis de déterminer la profondeur des pieux bois, confirmant les archives d'un côté du bassin, et apportant l'information importante pour le projet d'une sur-profondeur de l'autre côté.

ABSTRACT – As part of a micro-tunneling project under Danish wharves in Le Havre, we conducted 8 geophysical loggings to detect the magnetic anomaly generated by the metal part at the base of piles to ensure the depth of these. These measurements, combined with a documentary analysis and a modeling of the metallic anomaly, made it possible to determine the depth of the wooden piles, confirming the archives of one side of the basin, and bringing the important information for the project of a over-depth on the other side.

1. Introduction

La communauté d'agglomération du Havre (CODAH) nous a missionné dans le cadre de la création d'un siphon d'eaux usées passant à grande profondeur (25m par rapport au niveau des quais actuels) sous le bassin Vetillard au Havre (76). Les ouvrages portuaires concernés par ce projet sont sous la maîtrise d'ouvrage du Grand Port Maritime du Havre (GPMH). Les quais de Gironde et de Garonne sont de type quai danois, portés sur pieux bois (confère figure 1). Les archives du GPMH datent ces ouvrages entre 1897 et 1908.

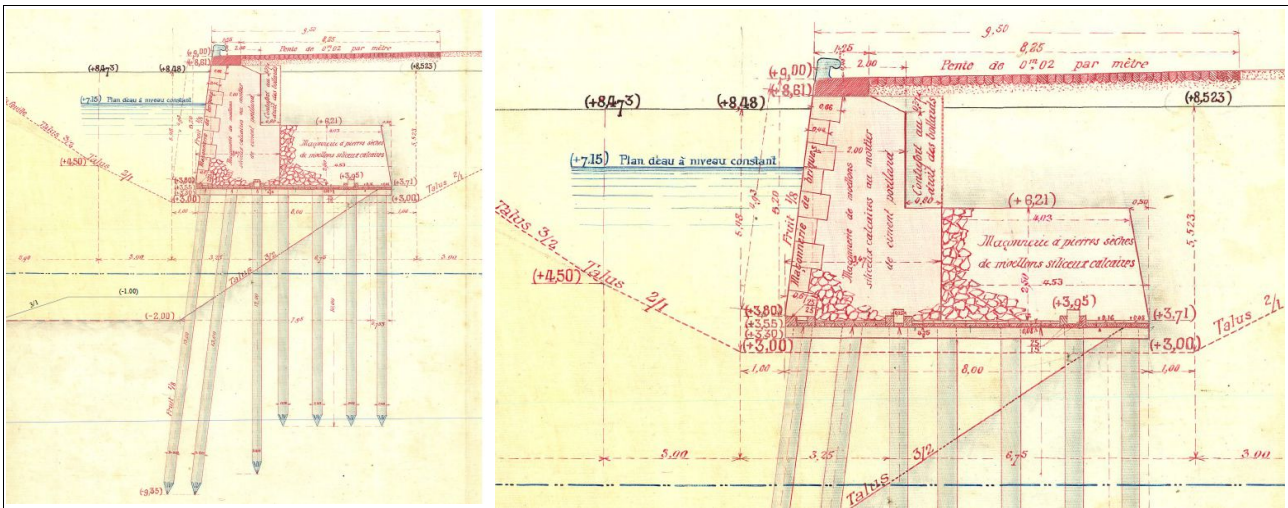


Figure 1 : Extrait des plans d'archive transmis par le grand port maritime du Havre (GPMH)

Ces plans de niveau projet, ne sont pas des plans de récolement de niveau exécution. La question de la véracité des cotes restait donc entière. La CODAH nous a donc missionné afin de s'assurer que le projet de tir de micro-tunnelier n'impacterait pas les ouvrages existants. Il fallait donc vérifier en premier point le profondeur d'ancrage des pieux bois. Nous avons proposé à l'équipe projet une campagne spécifique consistant en premier lieu à installer des tubes PVC en bord à quai à 35m de profondeur, puis à réaliser une campagne de mesures de type diagraphie magnétique. L'objectif était de déceler une éventuelle anomalie magnétique en lien avec le sabot métallique à la base des pieux.

2. Étude historique sur la conception des pieux bois

Le projet national pieux bois (Christin et al., 2013) propose une synthèse historique des différentes méthodologies employées dans le cadre du battage des pieux bois. Cela nous a permis d'identifier les éléments suivants essentiels à notre diagnostic :

- l'utilisation de sabots métalliques étaient très répandue pour le battage des pieux bois pour éviter les ruptures de pointe des pieux (confère illustrations figures 2 et 3),

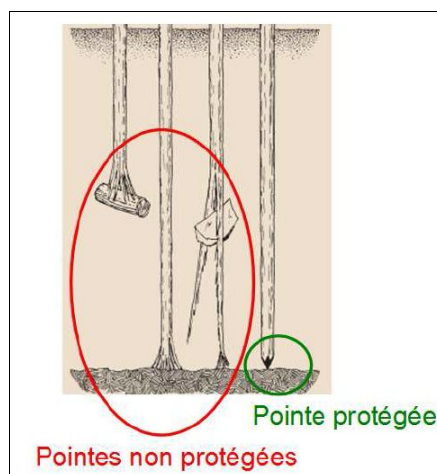


Figure 2 : illustration issue du Projet National pieux bois - exemple de mode de rupture de pointe

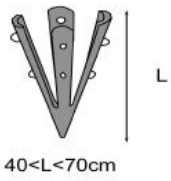
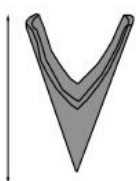
Nature du sabot	Types de sabots				
	Sabot à quatre languettes	Sabot à quatre languettes « soudées »	Sabot à trois languettes	Cône divisé	Cône à deux languettes
Illustration					
Date d'existence avérée	Epoque romaine	1840	1 ^{er} siècle ap. JC	Epoque romaine (Trèves) Epoque indéterminée (Chalon)	Epoque indéterminée
Ponts	Trèves, Mayence, Genève, Avignon, Chalon-sur-Saône,	Argenteuil	Trèves	Trèves (24<L<30cm) Chalon (L=42cm)	Chalon-sur-Saône

Figure 3 : Illustration issue du Projet National pieux bois – type de sabots en pointe de pieux

- un pieu bois pouvait être constitué de plusieurs éléments qui étaient « raboutés » par des éclisses ou des entures, qui sont également des éléments métalliques,
- la tête de pieu pouvait être protégée jusqu'au début du XX^{ème} siècle par une frette métallique (anneau de fer enserrant la tête de pieu).

Cette étude bibliographique, confrontée aux illustrations issues des archives du GPMH (confère figure 1) dessinant des pointes de pieux protégées, nous a amené à proposer une méthode de détection de la pointe des pieux par diagraphie magnétique.

Nous développons ci-après un premier paragraphe de rappel sur la méthodologie employée en diagraphie magnétique et dans un second temps, les résultats obtenus sur cette campagne.

3. Diagraphie magnétique et modélisation de l'anomalie provoquée par un objet métallique donné

La magnétométrie en forage consiste à mesurer la valeur du champ magnétique et de suivre son évolution en profondeur le long du forage. En mesurant le champ induit le long d'un profil ou sur un plan, il est possible de mettre en évidence des anomalies magnétiques liées à des changements de susceptibilité magnétique dans l'environnement sondé. Ces changements peuvent être dus à des variations magnétiques dans la lithologie ou à la présence de corps ferromagnétiques ou ferrimagnétiques.

Outre ces considérations locales, le champ magnétique évolue continuellement dans le temps sur des échelles de temps très différentes (seconde, heure, jour, année). Il est important de prendre connaissance des variations du champ magnétique terrestre sur la journée de mesures, afin de s'affranchir de toute perturbation externe au site.

Les données fournies par l'Observatoire Magnétique National mettent en évidence que les variations du champ magnétique n'excèdent pas 0.03 µT (micro-Tesla) sur les journées de mesure, soit des variations négligeables vis à vis des variations recherchées qui sont de l'ordre de 0,5 à 15 µT comme détaillé plus bas.

Afin de définir au mieux le protocole de réalisation des mesures, nous avons réalisé au préalable une modélisation de l'anomalie magnétique recherchée au moyen du logiciel

Potent de Geoss. Plusieurs paramètres rentrent en compte dans la quantification de l'anomalie magnétique résultante :

- ✓ la forme et dimensions de l'objet,
- ✓ la distance de l'objet au forage,
- ✓ la susceptibilité magnétique de l'objet.

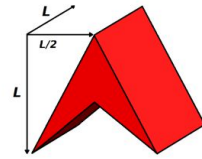


Figure 4 : Sabot métallique modélisé sous Potent

Le sabot métallique est modélisé par une pointe de flèche de 40cm de hauteur (confère figure 4).

Le *Projet Pieu Bois* (Christin et al., 2013) mentionne que les sabots métalliques étaient généralement composés de fonte, qui possède une susceptibilité ferromagnétique moins forte que l'acier, elle même de l'ordre de 5 000. Une étude de variabilité de cette susceptibilité a permis de vérifier que l'anomalie magnétique provoquée par un sabot distant de 50cm restait mesurable pour une susceptibilité de 1 000 (confère figure 5).

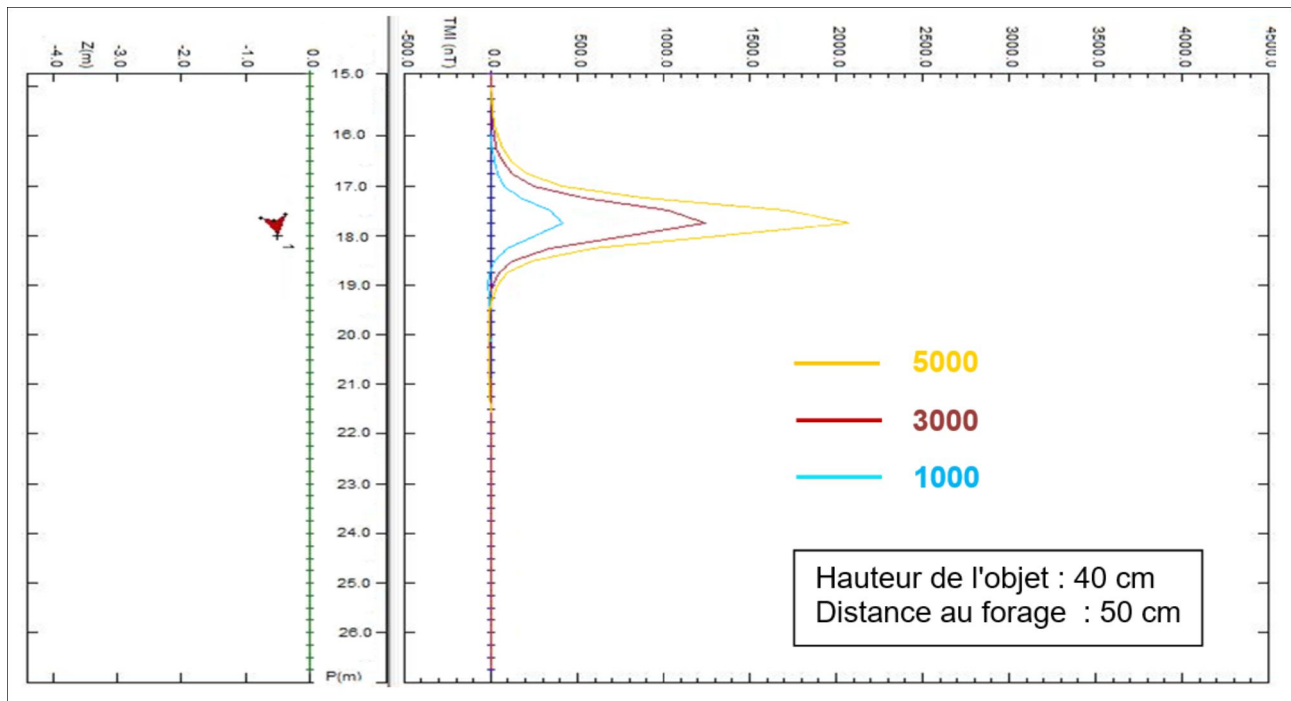


Figure 5 : Modélisation de l'anomalie magnétique en faisant varier la susceptibilité magnétique

Une étude de la distance du sabot a permis de mettre en évidence la nécessité de réaliser les mesures à une distance de moins d'un mètre (confère figure 6) :

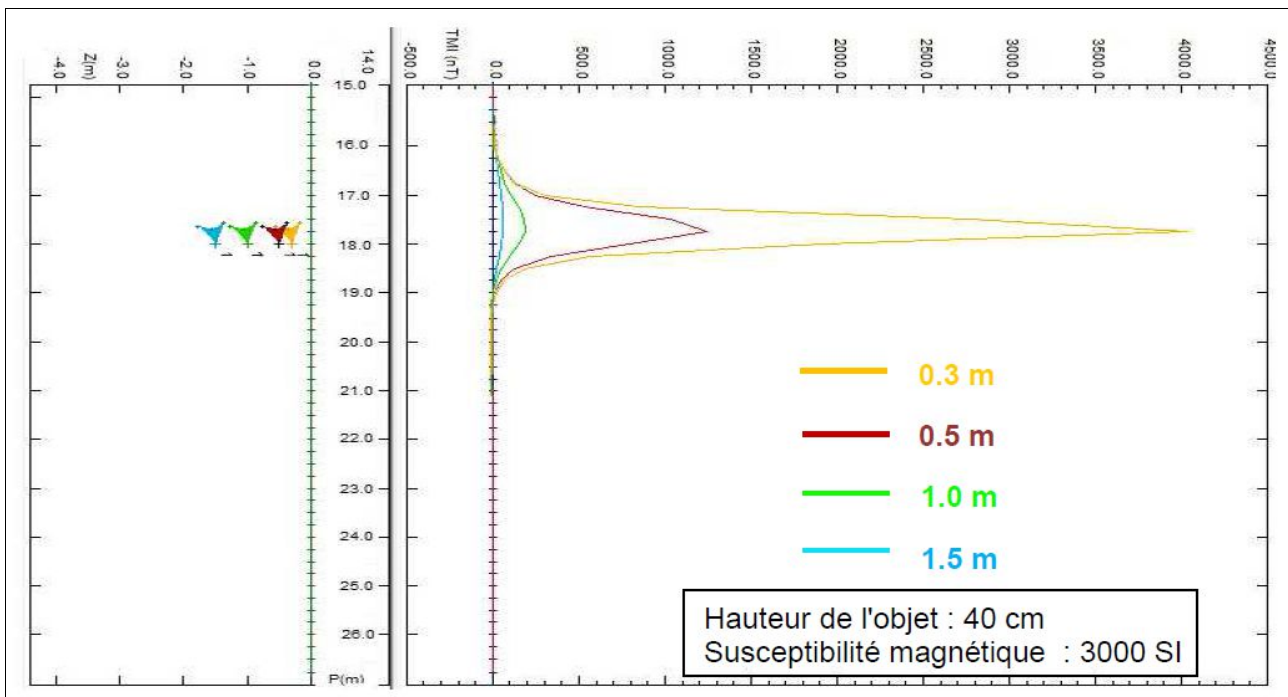


Figure 6 : Modélisation de l'anomalie magnétique en faisant varier la distance de l'objet

Ces modélisations ont également permis de retenir comme caractéristiques d'une anomalie due aux sabots métalliques recherchés les deux éléments suivants :

- ✓ Amplitude de l'anomalie supérieure à $0.3 \mu\text{T}$
- ✓ Anomalie visible sur au moins 1.5 m de profondeur.

La déviation des forages a été mesurée à l'aide d'une sonde QL40-DEV munie d'un capteur magnétomètre tri directionnel et du système Logger Matrix (figures 7 et 8).

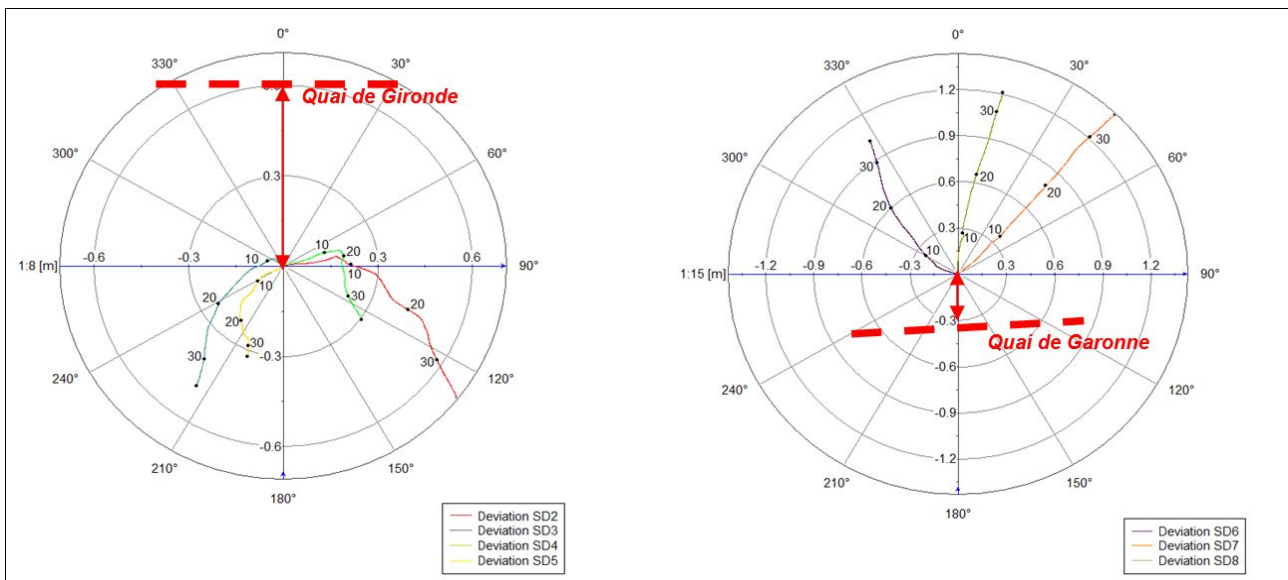


Figure 7 : Vues en plan de la déviation des forages

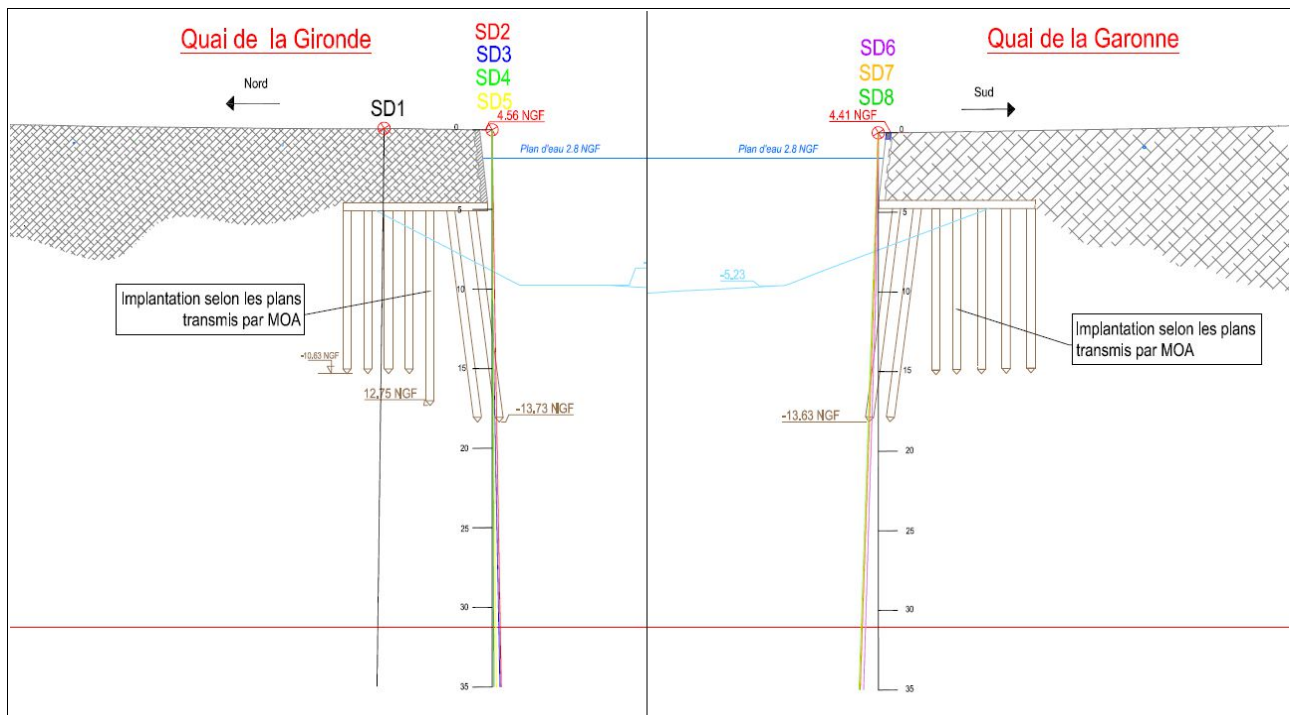


Figure 8 : Vues en coupe Nord-Sud de la déviation des forages

Ces mesures montrent qu'en deçà de 20m de profondeur les déviations sont limitées à 40cm au quai de la Gironde et 75cm au quai de la Garonne. Ces déviations sont orientées vers l'extérieur des quais, soit dans la même direction que l'inclinaison des pieux en bord de quai. La superposition des plans d'archives et du tracé des forages met en évidence un passage des forages très proche des pieux.

4. Résultats de la campagne de mesure

Huit diagraphies ont été réalisées en bord à quai. Les champs magnétiques totaux (comprenant les anomalies magnétiques) sont rapportées sur la figure 9. Les anomalies résiduelles sont analysées suivant les caractéristiques déterminées par les modélisations (anomalie supérieure à $0,3\mu\text{T}$ et visible sur au moins 1,5m de hauteur). Les anomalies résiduelles sont reprises dans le tableau 1 ci-après.

Cette analyse a permis de mettre en évidence 3 profondeurs d'anomalie :

- ✓ Les anomalies notées C semblent correspondre à la base des pieux. Il s'agit des anomalies significatives les plus profondes. Les profondeurs varient entre 17.5 et 19 m côté quai de Gironde. Ces profondeurs sont conformes au plan d'archive, annonçant une profondeur de l'ordre de 18,2m. Côté quai de Garonne, les archives rapportent une profondeur de 15,5m. Les anomalies notées C sont comprises entre 17.5 et 18 m de profondeur, *soit 2,0 à 2,5m au delà de la profondeur annoncée.*
- ✓ Les anomalies notées B sont situées entre 9 et 10 mètres de profondeur. Elles pourraient être assimilées à un élément d'assemblage (pieux raboutés à l'avancement) ou au fond de bassin potentiellement pollué de métaux.
- ✓ Les anomalies notées A sont situées entre 4 et 5 mètres de profondeur. Elles pourraient être assimilées à la frette présente en tête des pieux.

L'éloignement relatif du sabot métallique par rapport au forage n'a pas pour effet de réduire l'extension de l'anomalie mais plutôt son amplitude, comme mis en évidence par les modélisations.

Forage	N° Anomalie	Profondeur de l'anomalie	Extension de l'anomalie	Intensité max de l'anomalie
SD2	SD2_A	4.70 m	0.8 m	3.4 uT
	SD2_B	9.2 m	1.6 m	15.1 uT
	SD2_C			
SD3	SD3_A	5.05 m	1.5 m	0.5 uT
	SD3_B	10.20 m	2.8 m	1.7 uT
	SD3_C	18.4 m	2.8 m	1.7 uT
SD4	SD4_A	5.80 m	1.4 m	0.5 uT
	SD4_B	9.50 m	2.0 m	6.2 uT
	SD4_C	18.90 m	1.6 m	0.6 uT
SD5	SD5_A	5.25 m	2.5 m	2.5 uT
	SD5_B	9.40 m	1.4 m	1.1 uT
	SD5_C	19.0 m	1.9 m	2.0 uT
SD6	SD6_A			
	SD6_B	9.05 m	2.6 m	6.4 uT
	SD6_C	17.50 m	2.2 m	2 uT
SD7	SD7_A	4.10 m	1.0 m	0.5 uT
	SD7_B	9.40 m	5.3 m	11.6 uT
	SD7_C	17.80 m	2.5 m	1.9 uT
SD8	SD8_A	4.80 m	1.2 m	0.7 uT
	SD8_B	9.25 m	3.7 m	13 uT
	SD8_C	17.95 m	2.5 m	3.6 uT
SD1 plot d'essai	SD1_A	5.55 m	1.1 m	0.8 uT
	SD1_B	9.32 m	0.4 m	0.5 uT
	SD1_C	15.50 m	1.9 m	0.7 uT
Anomalies significatives relevées (variation du champ magnétique supérieure à 0.3 uT)				

Tableau 1 : Synthèse des anomalies relevées lors des mesures magnétométriques en forage

Conclusions et ouvertures :

Les diagraphies magnétométriques en forage associées à une analyse documentaire et à une modélisation des anomalies attendues ont permis de mettre en évidence la profondeur de fiche des pieux bois grâce à leur sabot métallique. Cette étude confirme les archives disponibles coté quai de Gironde et mettent en évidence une sur-profondeur des pieux de 2,0 à 2,50m coté quai de Garonne, participant ainsi à la sécurisation du passage en sous œuvre par micro-tunnelier.

Les mesures permettent également de distinguer d'autres plans horizontaux d'anomalies, supposés correspondre au raboutage des pieux bois et au frettage en tête. Cette méthodologie sera donc utile pour les maîtres d'ouvrage et bureaux d'études qui ont à vérifier des ouvrages fondés sur pieux bois comportant des inclusions métalliques.

Cette nouvelle approche, associée aux paramètres de dimensionnement du projet pieu bois (Christin et al., 2013), permettent un meilleur diagnostic des existants. Des travaux complémentaires visant à déterminer le moment fléchissant maximum du pieu et la résistance au cisaillement maximum pourraient permettre d'atteindre une modélisation complète des ouvrages.

Références bibliographiques et sources :

Christin J et al. (2013) - Projet Pieux Bois - Généralités sur les pieux en bois et état de l'art des méthodes de construction des fondations.

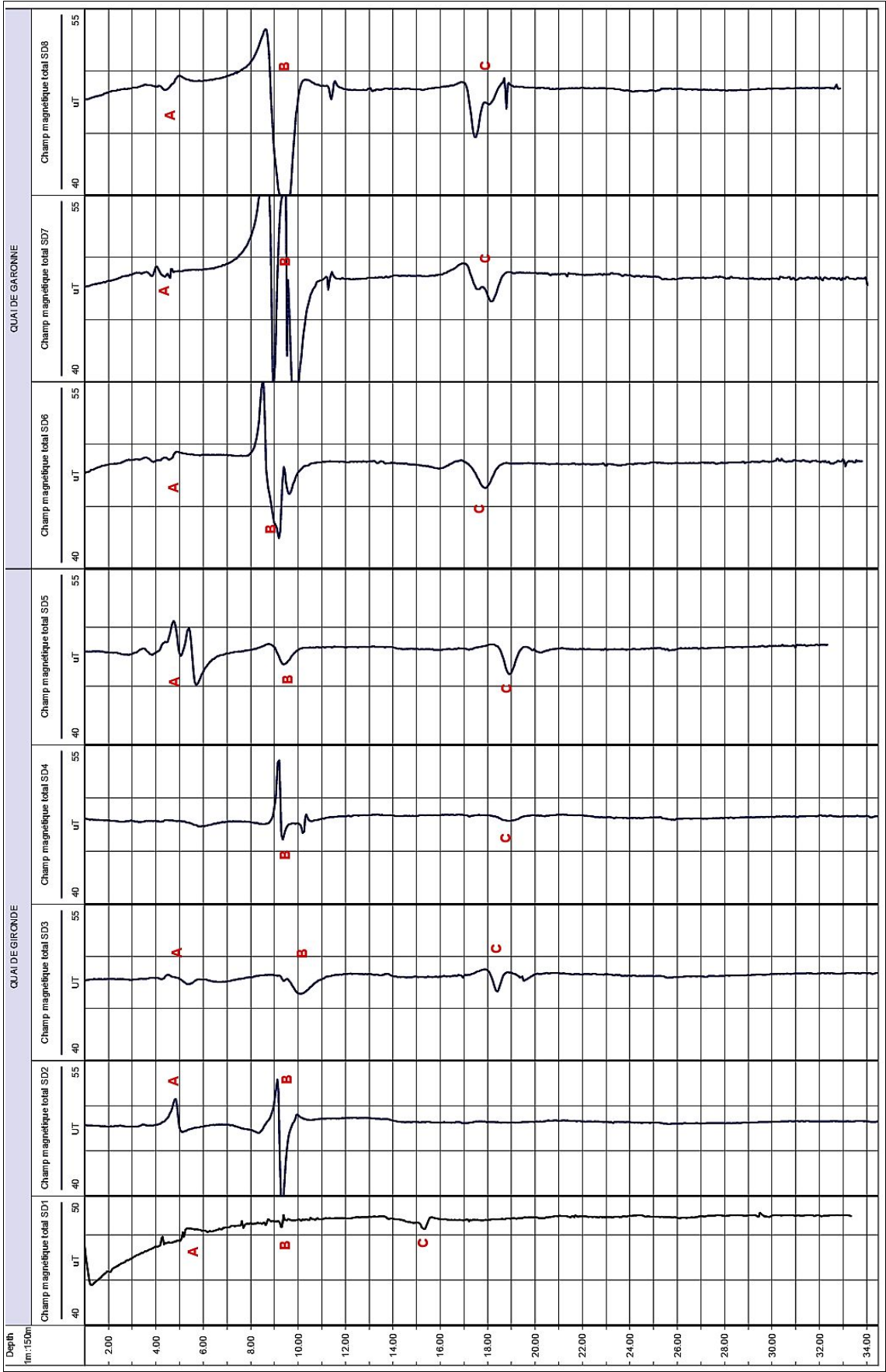


Figure 9 : Diagrammes de forage avec mesure du champ magnétique total