

# Dynamique spatio-temporelle des phases ferrugineuses dans la matière en suspension en Seine

Catherine Kissel<sup>1\*</sup>, Christine Franke<sup>2\*</sup>, Isabelle Cojan<sup>2\*</sup>, Dariouche Kayvantash<sup>1,2</sup>,  
Aude Isambert<sup>3</sup>, Noëlia Carrillo<sup>2</sup>, Nelly Martineau<sup>2</sup>, Camille Wandres<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette

<sup>2</sup> Centre de Géosciences, Mines ParisTech, Centre des Géosciences, Fontainebleau

<sup>3</sup> Institut de Physique du Globe de Paris, Equipe Paléomagnétisme, Paris

\* [catherine.kissel@lsce.ipsl.fr](mailto:catherine.kissel@lsce.ipsl.fr), [christine.franke@mines-paristech.fr](mailto:christine.franke@mines-paristech.fr),

[isabelle.cojan@mines-paristech.fr](mailto:isabelle.cojan@mines-paristech.fr)

## 1 Introduction

Cette action au sein de la phase 6 du programme PIREN-Seine a pour but d'identifier la variabilité spatio-temporelle des propriétés physico-chimiques des oxydes et sulfures de fer contenus dans les matières en suspension (MES) du système fluvial de la Seine.

Il avait été montré par une étude exploratrice lors de la phase précédente du PIREN-Seine (Franke et al., 2009), que des tendances à l'augmentation en concentration d'oxydes de fer accompagnée d'une augmentation de la taille des particules étaient observées d'amont en aval pour la même période d'échantillonnage (échantillons issus du travail de la thèse de L. Tessier, 2003). Ces tendances reflétaient clairement l'enrichissement des MES en particules magnétiques grossières résultant des rejets industriels et urbains. De plus, il avait été montré que les sphérules d'oxydes de fer étaient porteuses d'éléments contaminants comme l'antimoine. Il s'agit donc d'une phase minéralogique importante dont la contribution au signal anthropique avait été jusque-là négligée. Il s'avérait ainsi nécessaire de mieux étudier le devenir du fer et ses transformations dans le milieu pour mieux comprendre et quantifier ses mécanismes de mobilisation, transport, altération.

L'approche analytique choisie a été, à la suite d'échantillonnages répétés dans le temps à de nombreux sites répartis d'amont en aval le long de la Seine et de la Marne, de mesurer en laboratoire les propriétés magnétiques de ces MES et de les identifier au microscope électronique à balayage. Les méthodes magnétiques ont l'avantage de pouvoir être appliquées sur sédiment total, sans besoin d'extraction, et de donner une réponse relativement rapide quant à la nature, la concentration et la taille moyenne des particules magnétiques. Les investigations au MEB, faites nécessairement sur extraction magnétique, donnent accès quant à elles à l'aspect physique des particules (sphérules anthropogéniques/particules détritiques irrégulières) et à leur composition élémentaire.

Comme cela a été décrit dans le rapport d'activité 2012 (Franke et al., 2013), 14 sites ont fait l'objet de prélèvements à raison de trappes immergées pendant une semaine à 10 jours chaque mois. Ces sites sont répartis le long de la Seine entre Saron (confluent Aube/Seine) et Poses/Amfreville en passant par les aval/amont des confluent de l'Yonne, du Loing, de l'Orge et de l'Oise. Huit autres sites sont distribués sur la Marne et le Grand Morin dont 4 sont très en amont. Ces sites ont été échantillonnés en partie grâce à une collaboration interne PIREN-Seine avec D. Gateuille (voir carte de la Figure 2 dans Franke et al., 2013, PIREN-Seine). Dans ce dernier cas, les trappes à sédiments ont été laissées sur place pendant un mois au lieu d'une semaine à 10 jours comme pour les autres sites. Cela représente donc un total de 22 sites de prélèvement.

Le travail d'échantillonnage a donc consisté dans le placement des trappes sur cette zone géographiquement étendue et leur relève 10 jours après et ceci chaque mois de Juillet 2011 à Novembre 2012. Cela a représenté une tâche d'autant plus conséquente qu'au retour de chaque campagne mensuelle, les échantillons, transportés à froid (~4°C), ont subi une décantation puis filtration de la fraction fluide, congélation, lyophilisation et pesée. Un peu plus de 220 échantillons ont été prélevés au total pendant la période concernée. Tous n'ont pu être étudiés en 2012 et une partie des mesures a été effectuée en 2013.

## 2 Résultats magnétiques

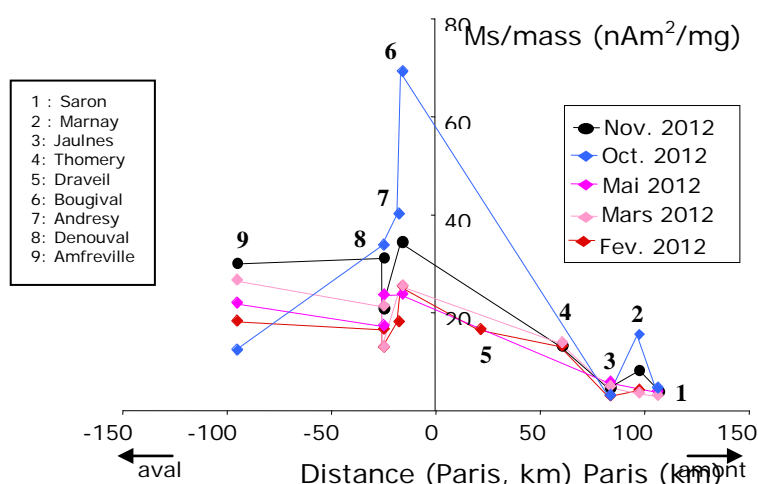
En 2013, nous avons procédé en plusieurs étapes, complétant d'abord les analyses sur les échantillons prélevés au préalable, investiguant avec d'autres méthodes et modèles la signification des points moyens obtenus pour ces échantillons. Nous avons également procédé à la mise en place de la logistique nécessaire à l'étape d'étude de la représentativité des échantillonnages effectués en fonction de la position horizontale et verticale dans la rivière et en fonction du temps d'intégration (Cf point 3).

### 2.1 Complément de mesures d'hystérésis magnétique

La première étape a consisté à finir toutes les mesures d'hystérésis magnétiques des échantillons prélevés et ceci a été fait en mesurant les échantillons prélevés fin 2012 et également en complétant les premières mesures soit avec des échantillons initialement mis de côté, soit en refaisant des mesures dont les premiers résultats n'étaient pas satisfaisants (en particulier rapport signal sur bruit trop faible). Ces mesures, comme celles reportées en 2013, ont été faites au laboratoire de Magnétisme Environnemental du LSCE à l'aide d'un magnétomètre à gradient vibrant (AGM 2900 ; cf. Annexe 1).

Les paramètres d'aimantation caractéristiques  $M_s$  et  $M_{rs}$ , normalisés par le poids de l'échantillon reflètent directement la quantité de minéraux magnétiques présents dans l'échantillon si une espèce minérale domine mais sont plus complexes à interpréter si différentes espèces minéralogiques sont présentes dans l'échantillon (certains oxydes de fer sont moins aimantés que d'autres à concentration égale). Les champs coercitifs ( $H_{cr}$  et  $H_c$  ; Cf. Annexe 1) peuvent justement représenter ces différences minéralogiques et aider à l'interprétation des données. Enfin, quand le porteur principal des aimantations rémanentes est identifié comme étant la magnétite, sa taille peut être déterminée par la comparaison entre les rapports d'aimantations et les rapports de champs coercitifs.

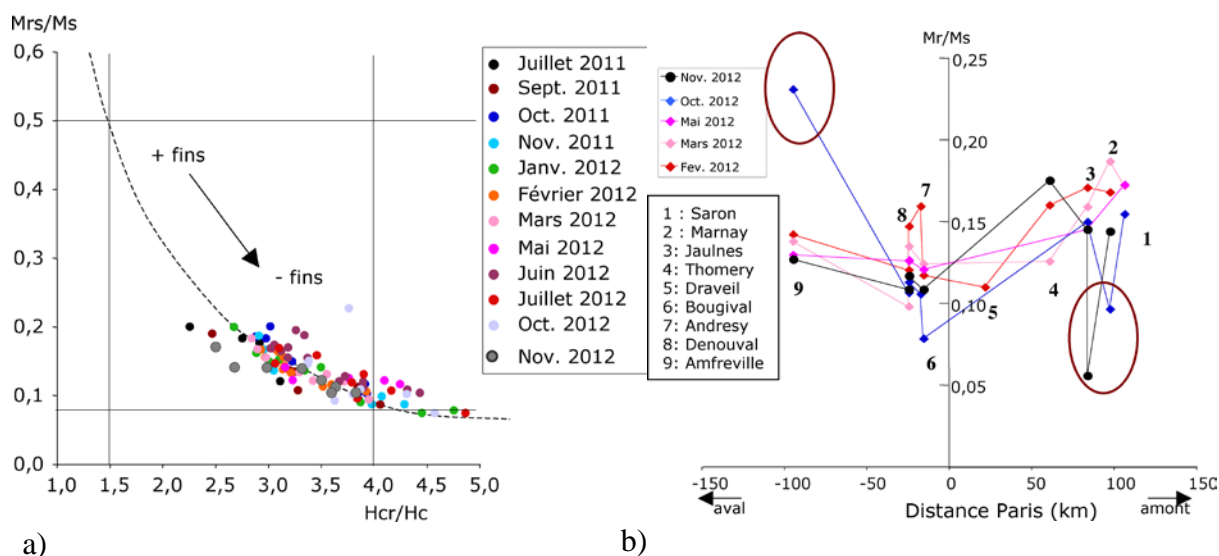
Ces analyses avaient montré en 2012 une augmentation en concentration dans la rivière Seine depuis l'amont (Saron) vers Bougival et l'amont du confluent avec l'Oise puis une diminution vers l'aval (Amfreville). En plus, si la concentration « de base » en amont était la même quelque soit la période considérée (figure 4, Franke et al., PIREN-Seine, 2013), l'amplitude de l'augmentation de la concentration entre Jaulnes et Bougival et/ou Andresy était variable et pas toujours suivant une logique saisonnière. Les nouvelles mesures faites en 2013 sur l'échantillonnage de fin 2012 confirment la tendance à l'augmentation d'amont en aval mais montrent une amplitude de changement bien moindre en novembre qu'en Octobre. Les concentrations de Novembre se rapprochent plus des mois de Février à Mai 2012, surtout au site de Bougival VNF (Figure 1).



**Figure 1 : Distribution spatio-temporelle de la concentration magnétique. Les nouvelles mesures sont comparées aux profils obtenus précédemment obtenus pour d'autres mois en 2012.**

Les différences d'amplitude suivant les mois de prélèvements peuvent, comme mentionné plus haut, trouver leur origine dans (i) des changements de contributions relatives d'oxydes de fer ayant des aimantations caractéristiques différentes, (ii) des débits différents et des charges sédimentaires différentes selon les sites, (iii) de « vrais » changements de concentration. Les actions prévues en 2014 (voir ci-dessous) permettront de répondre à ces questions.

En supposant que l'oxyde de fer magnétite est le minéral magnétique principal dans les MES étudiées, les rapports  $M_{rs}/M_s$  et  $H_{cr}/H_c$  peuvent être utilisés comme indicateurs de l'état des domaines magnétiques c'est à dire de la taille moyenne des particules. Dans le rapport Franke et al., 2013, nous faisons état d'une diversité significative de taille des particules magnétiques, effectivement réparties sur le diagramme dit de Day (Day et al., 1977) le long de l'hyperbole correspondant à la magnétite.



**Figure 2 :** (a) Taille moyenne des grains de magnétites dans les échantillons de Novembre 2012 dans les MES de la Seine (points gris) comparés aux tailles moyennes observées pendant les autres périodes échantillonnées. (b) : Distribution de ces tailles moyennes en fonction de leur localisation. Les mois reportés sont les mêmes que sur la figure 1. Les points entourés seront ceux sur lesquels se porteront plus particulièrement les analyses de FORC en 2014 (voir point 4).

## 2.2 Minéralogie magnétique et « état de liberté » dans les MES

A la lumière de ces résultats et afin d'aller plus avant dans la compréhension de la fraction magnétique transportée, des analyses à haute résolution ont été faites, notamment sur des échantillons pris à Thomery donc reflétant les apports de la Seine, de l'Yonne et du Loing et à Mouy sur Seine, en amont de ces deux confluences. Plusieurs expériences ont été menées en 2013 (Kayvantash, 2013) et vont être prolongées dans notre action 2014. Les premiers résultats sont présentés ci-dessous.

Les points de Novembre 2012 n'échappent pas à cette règle et la distribution en fonction de la distance à Paris est la même qu'aux autres périodes étudiées à savoir une augmentation progressive de la taille des particules des magnétites jusqu'à Bougival. Le confluent avec l'Oise apporte ensuite (Dénouval) des particules plus fines, un pic « fin » étant observé dans l'Oise avant le confluent (point Andrésy) (Figure

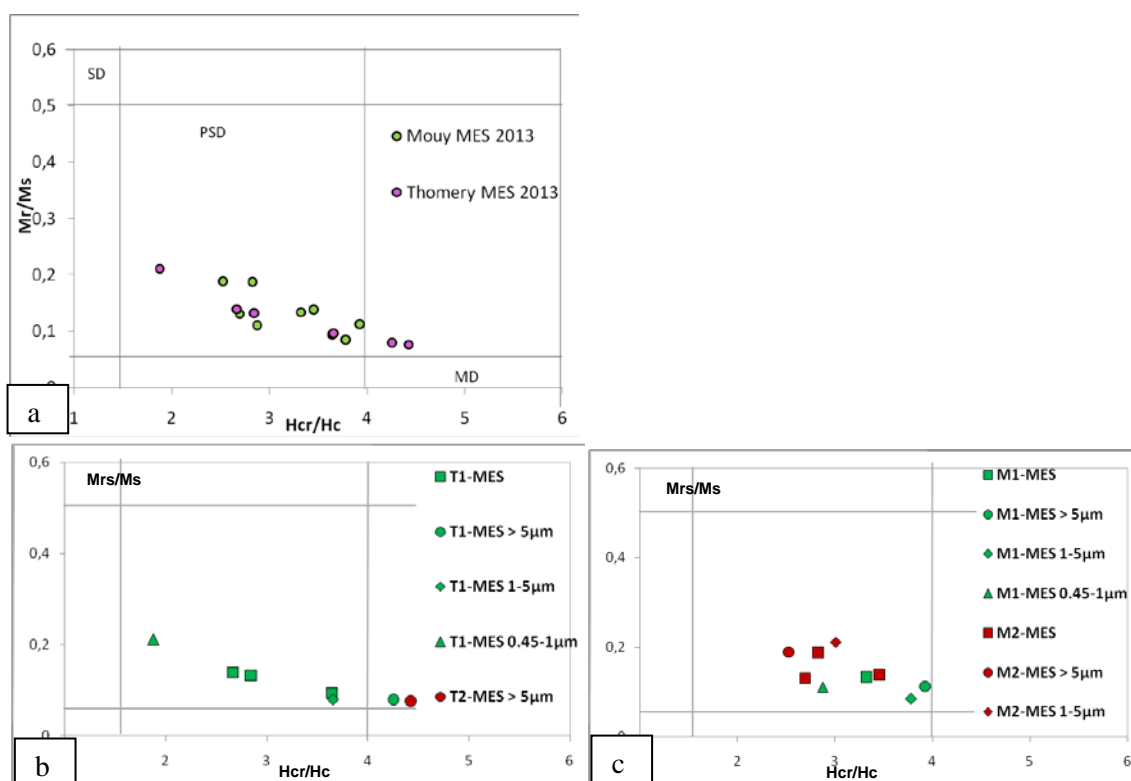
### ***2.2.1 État de liberté des particules magnétiques dans les MES***

S'il est logique de penser que les particules magnétiques d'origine anthropique sont transportées dans la colonne d'eau de la rivière comme des particules « libres », il convient de se demander s'il en est de même pour les particules les plus fines provenant de l'érosion ou de l'altération du bassin versant (« wash load », charge en suspension peu sensible aux variations de débit du fait de la très faible taille des particules). En effet, les particules magnétiques sont de l'ordre de quelques microns et dans la colonne d'eau, elles peuvent être indépendantes, incluses dans des agrégats ou encore en inclusion dans d'autres minéraux. Les agrégats ou les minéraux les contenant en inclusions étant en général « transparents » d'un point de vue magnétique, leur contribution respective aux MES peut éventuellement biaiser les résultats en terme de taille de grains magnétiques.

Des tests ont été faits dans le cadre du Master 2 de D. Kayvantash sur trois échantillons de MES: l'un provenant de Thomery et deux de Mouy. Les trappes ont été déposées le 19 Février 2013 et récupérées le 27 Février 2013 soit environ une semaine plus tard. Le surnageant des échantillons de MES a été filtré à l'aide de trois filtres dont les mailles s'échelonnent entre 5, 1 et 0,45  $\mu\text{m}$  et l'eau filtrée a été jetée. En fonction de la charge de particules, la filtration a été réalisée avec plusieurs jeux de filtres de taille identique. Les sédiments restants, initialement décantés dans les bouteilles, ont été transférés dans des flacons en plastique d'environ 50 ml, et l'ensemble des sédiments en flacon et des résidus de filtre ont été lyophilisés afin de retirer l'eau sans provoquer d'altération (réduction) des particules magnétiques. Des pesées ont été faites sur les sédiments lyophilisés. La masse de sédiment varie de 0,5 mg sur les filtres les plus fins (en prenant en compte la masse initiale des filtres) à plus de 50 g pour ceux récupérés en flacons.

La mesure des paramètres d'hystérésis a été faite à l'aide du « Vibrating Sampling Magnetometer » (VSM) de l'IMPMC et en collaboration avec l'IPGP. La mesure sur VSM est identique à celle décrite en Annexe 1 pour le magnétomètre à gradient alternatif (AGM) sauf qu'elle est effectuée sur des poudres d'échantillon de masse plus importante. Ces poudres sont mises dans des gélules qui servent de porte échantillon.

Les résultats obtenus montrent une relation assez directe entre la taille moyenne des grains magnétiques et la maille des filtres utilisés. Cette relation est un peu plus claire d'ailleurs à Thomery où la variabilité en taille est également plus grande qu'à Mouy (Figure 3). En effet, les filtres les plus grossiers (> 5 $\mu\text{m}$ ) retiennent principalement les particules magnétiques les plus grosses et inversement pour les filtres les plus fins (Figure 3).



**Figure 3 : Diagramme de Day: (a) MES de Mouy (points verts) et de Thomery (points roses), (b) et (c) différentes fractions piégées sur chacun des trois filtres et du sédiment entier non-filtré (symboles carrés) à Thomery (b) et Mouy (c).**

Cela paraît *a priori* logique mais l'information est importante car elle montre que les particules magnétiques ne sont intégrées ni dans des agrégats ni en inclusion dans les minéraux plus gros (cas classique du quartz et on aurait alors des particules magnétiques fines dans les filtres grossiers). L'hypothèse que les paramètres d'hystérésis illustrent bien la concentration et la taille moyenne des magnétites « indépendantes » est donc en général vérifiée.

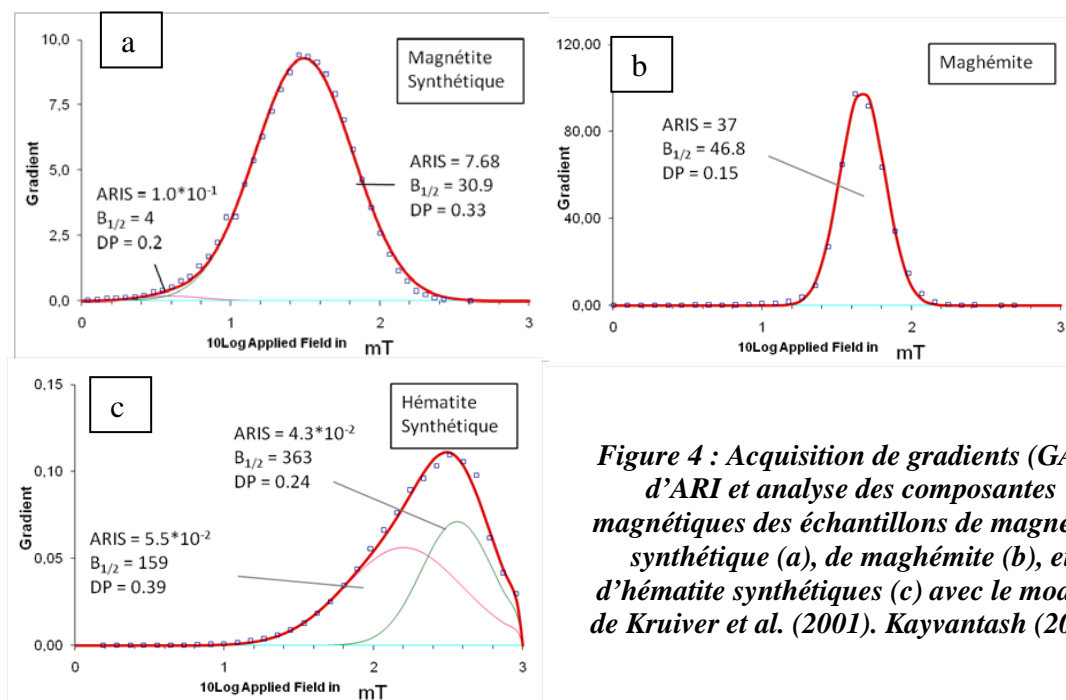
### 2.2.1 Déconvolution de minéralogies magnétiques complexes.

Si, comme le montrent les diagrammes de Day reportés ci-dessus, l'hypothèse d'une dominance relative de la magnétite par rapport à d'autres oxyde/hydroxydes/sulfures de fer est vérifiée, il est intéressant, pour mieux comprendre la variabilité de la fraction magnétique transportée, de déconvoluer le signal. En effet, l'hématite par exemple, un autre oxyde de fer, est à concentration égale, deux ordres de grandeur moins aimantée que la magnétite. Dans l'examen de signaux bruts, sa présence même en abondance peut donc être difficile à identifier.

Pour résoudre ce problème, des méthodes de déconvolution des courbes d'aimantation rémanente isotherme ont été appliquées et ont montré leur potentiel (dans le cadre du stage de Master 2 de D. Kayvantash). La courbe d'aimantation rémanente isotherme est aussi celle utilisée pour déterminer le  $H_{cr}$  (voir Annexe 1) mais cette fois-ci, elle est menée jusqu'à la saturation totale : l'échantillon est soumis à un champ qui est annulé au moment de la mesure. Les champs croissants permettent d'examiner en détail comment l'aimantation rémanente est acquise. Le modèle de déconvolution utilisé est celui proposé par Kruiver et al. (2001). Cette technique traite la dérivée de la courbe d'acquisition de l'ARI en fonction du champ appliqué comme un ensemble de gaussiennes logarithmiques où chaque gaussienne représente une composante ou un ensemble de composantes

magnétiques (cf. Annexe 2). Cette méthode ne peut s'appliquer qu'aux spectres d'acquisition d'ARI obtenus à très haute résolution c'est-à-dire avec des étapes successives de champ extrêmement fines. Le temps analytique n'est donc pas négligeable et n'ont été étudiés de cette façon pour l'instant que les échantillons de Thomery et de Mouy. Un échantillon correspondant à des MES prélevées en 2012 à Bougival où la pollution est présente, a également été étudié avec cette même méthode pour avoir une référence d'un site pollué.

Afin de modéliser les courbes obtenues sur le MES à partir de minéralogie connue, des échantillons témoins de magnétite, d'hématite synthétique, et de maghémite ont été mesurés afin de créer une base de données de référence (Figure 4).



**Figure 4 : Acquisition de gradients (GAP) d'ARI et analyse des composantes magnétiques des échantillons de magnétite synthétique (a), de maghémite (b), et d'hématite synthétiques (c) avec le modèle de Kruiver et al. (2001). Kayvantash (2013)**

La composante principale (99,99 %) de la magnétite synthétique (Figure 4a) a une coercivité moyenne  $B_{1/2}$  de 30,9 mT et une déviation standard (DP) de 0,33, reflétant une forte hétérogénéité dans la taille des particules (confirmé au MEB, Kayvantash, 2013). La maghémite synthétique (Figure 4b) quant à elle, a été modélisée avec une composante de coercivité légèrement plus forte ( $B_{1/2} = 46,8$  mT) que la magnétite et un DP de 0,15 qui reflète une assez bonne homogénéité en taille des particules. L'hématite synthétique (Figure 4c) est représentée par deux composantes (probablement en raison en partie de l'hétérogénéité granulométrique) de plus forte coercivité : la première avec un  $B_{1/2}$  de 159 mT et un DP de 0,39 et la seconde avec un  $B_{1/2}$  de 363 mT et un DP de 0,24. Chaque courbe d'acquisition pour les échantillons témoins est ainsi, à l'exception de l'hématite synthétique, modélisée avec une seule composante, si l'on ne tient pas compte de la composante d'ajustement de la magnétite synthétique.

**Tableau 1 : Paramètres clés des composantes magnétiques résultants de la déconvolution du signal GAP d'ARI.**

minéral magn.	$B_{1/2}$ (mT)	DP
magnétite	30,9	0,33
maghémite	46,8	0,15
hématite	159	0,39
	363	0,24

Les résultats de ces tests montrent que ces trois minéraux, les principaux que l'on peut rencontrer dans nos échantillons se distinguent aisément à partir des deux paramètres ( $B_{1/2}$  et DP ; Tableau 1), ce qui devrait faciliter leur identification. Si ces résultats sont prometteurs, ils devront être complétés par d'autres afin d'avoir un ensemble de référence plus complet (échantillons naturels de goéthite (hydroxyde de fer), de greigite (sulfure de fer), magnétites de tailles différentes, ...).

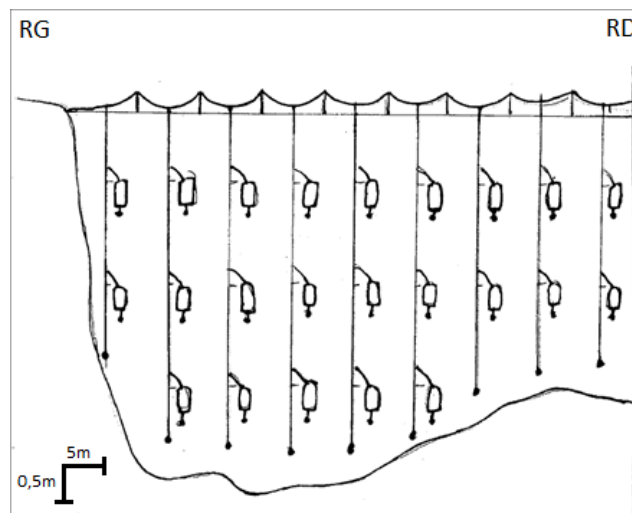
### 3 Représentativité des échantillons précédents

Les échantillonnages précédents ont été réalisés, comme décrit dans Franke et al. (2013) à environ 4 m du bord de la rivière et selon les sites, le point d'ancrage des trappes à sédiments se trouvait soit en rive gauche, soit en rive droite suivant l'accessibilité au site. Pour mieux quantifier la représentativité d'un tel échantillonnage sur les MES transportées par la rivière dans tout son cours, nous avons mis en place une logistique d'échantillonnage le long d'une section transversale au cours de la Seine avec des prélèvements régulièrement répartis en profondeur sur le site de Thomery/l'écluse de Champagne-sur-Seine.

Cette démarche a donc nécessité d'établir un plan de prévention avec la subdivision VNF de Melun pour pouvoir intervenir dans la partie du barrage du site de Thomery. Pour cette campagne de prélèvements, les trappes à sédiment seront ancrées sur neuf points équidistants attachés au câble du barrage. Sur une verticale, les prélèvements seront effectués tous les 1,5 m à partir de la surface libre de la Seine, leur nombre sera adapté par rapport à la profondeur maximale du profil de la Seine (Figure 5). Un jeu de trappes à sédiments spécifique a été préparé pour cet échantillonnage.

Deux membres de l'équipe ont suivi une formation de conduite de bateau à moteur et ont passé avec succès le permis de navigation en rivière/eaux intérieures.

La logistique est donc opérationnelle mais elle n'a pu être mise en œuvre encore à ce jour en raison de restrictions sécuritaires des VNF. Dès que l'autorisation sera donnée, nous irons placer les trappes préparées, probablement au cours du printemps 2014.



*Figure 5 : Schéma d'échantillonnage sur un transect transversale de la Seine, dans le barrage de l'écluse de Champagne-sur-Seine. Les trappes à sédiment seront ancrées sur neuf points équidistants le câble du barrage.*



## 4 Perspectives - Plan d'action 2014

Le travail se répartira en trois domaines d'action principaux en 2014.

La répartition des paramètres Ms/mass suivant les localités et les périodes d'échantillonnage dépend au premier ordre de l'état de la rivière au moment de leur prélèvement. Ainsi, l'étape à laquelle nous allons maintenant procéder dans le cadre de la thèse de doctorat de D. Kayvantash (début Octobre 2013) va être d'examiner les résultats obtenus à la lumière de la dynamique de la rivière. Pour cela, des données des débits journaliers des différentes rivières, prises aux stations de mesure proches des sites d'échantillonnage, sur au moins la période d'échantillonnage à savoir 2011-2012 vont être compilées et comparées entre elles (en amplitude et en phase). Les résultats obtenus de concentration magnétique normalisée par la masse des MES prélevées vont pouvoir ensuite être comparés à ces variations de débit, afin de comprendre la relation entre le débit et la masse de MES prélevés (charge supplémentaire en suspension lors des périodes de fort débit appartenant dans les périodes de faible débit à la charge de fond). La masse des MES prélevées sera alors normalisée par le débit de la (des) rivière(s) afin de calculer des flux de ces différentes classes de particules. En combinant ces résultats avec les données météorologiques et si possible celles de la gestion des bassins réservoirs de la zone amont de la Seine, il sera alors possible d'examiner si la non-réurrence des résultats obtenus suivant les mois d'échantillonnage sont directement liés au régime naturel de la rivière (degré de pluviosité) ou à sa gestion anthropique (chasses des bassins réservoirs d'écêtement des crues ou de soutient des étiages). En effet, l'année 2012, marquée par une forte pluviosité pendant les premiers 6 mois, n'a pas été une année standard.

A la lumière des résultats de « flux » obtenus, nous choisirons des échantillons stratégiquement placés dans le temps et dans l'espace parmi ceux déjà prélevés pour mener à bien les déconvolutions des courbes d'ARI afin de mieux comprendre les contributions relatives d'éventuels minéraux présents autres que la magnétite. De la même façon, sur ces échantillons sélectionnés, nous mènerons des expériences des analyses de « First Order Reversal Curves » (FORC ; voir Annexe 1) pour déterminer si la taille moyenne des grains magnétiques tels que nous les avons reportés sur les diagrammes de Day représente réellement la taille de tous les grains présents ou si elle est un mélange de deux « end-members ».

Enfin, nous procéderons pour mieux saisir la représentativité des échantillons prélevés jusqu'à présent près du bord, à un échantillonnage selon un profil en largeur, en profondeur dans la rivière (Cf point 3). Les résultats de cette campagne d'échantillonnage feront l'objet d'une analyse géostatistique en collaboration avec l'équipe Géostat du centre de Géosciences (Mine-ParisTech).

Cela nous permettra de rationaliser l'échantillonnage spatio-temporel des mesures en vue de la caractérisation du milieu et de leur exploitation par des modèles.

### References

Day R., Fuller M. et Schmidt V.A., *Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 13 (1977), 260-267.

Franke C., Kissel C., Robin E., Bonté P. et Lagroix F., *Magnetic particle characterization in the Seine river system : Implications for the determination of natural versus anthropogenic input*. Geochemistry. Geophysics. Geosystems. Vol 10, N°8 (2009), 20p.

Franke C., Kissel C., Cojan I., Konecny L., Carrillo N. et Martineau N., *Caractérisation des dynamiques des cycles oxydo-réducteurs du fer en Seine par le développement des traceurs physico-chimiques*. Rapport PIREN Seine 2012 (2013), 11p.

Kayvantash D., *Caractérisation magnétique et microscopique des (nano)particules métalliques dans la Seine*. Rapport de Stage No S250613DKAY, Centre de Géosciences, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France (2013), 49p.

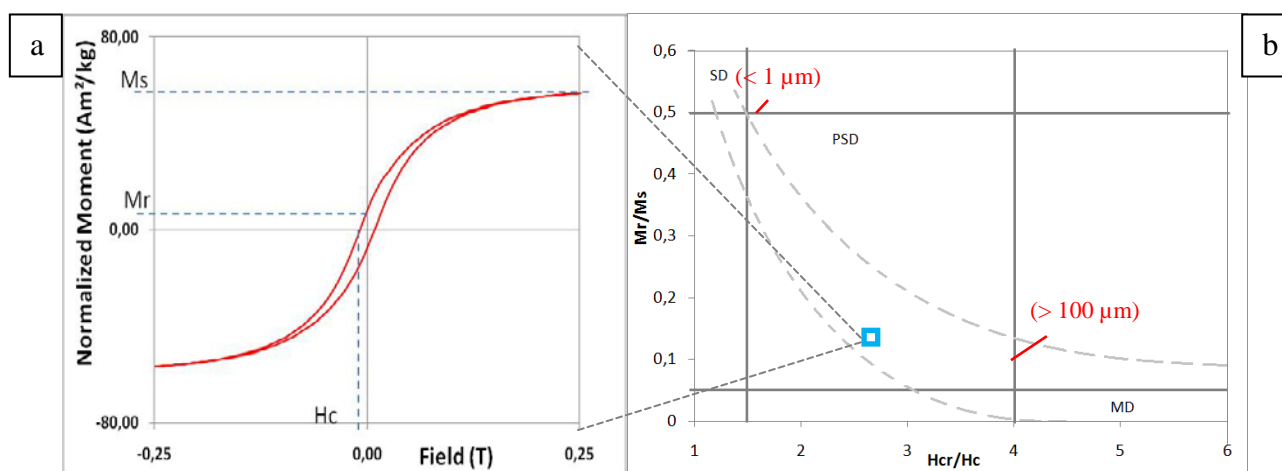


Kruiver P.P., Dekkers M.J., Heslop D., *Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation*. Earth and Planetary Science Letters 189 (2001), 269-276.

Tessier, L. *Transport et caractérisation des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine : Identification des signatures naturelles et anthropiques*. Thèse doctorale, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris (2003), 344p.

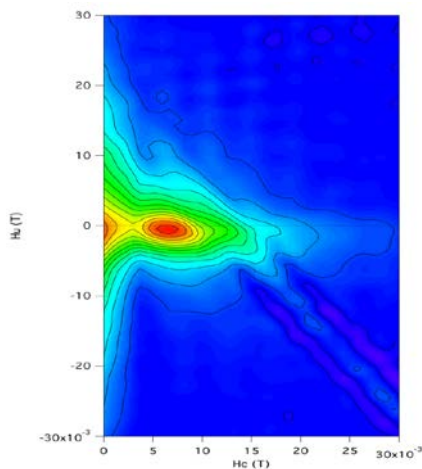
## Annexe 1 : Mesures d'hystérésis magnétiques

Les mesures d'hystérésis magnétiques consistent à placer quelques milligrammes de sédiment entre les pièces polaires d'un aimant. La recherche de la fréquence de résonance de la sonde et de l'échantillon est effectuée à +1T comme préalable à toute mesure ce qui donne une sensibilité assez unique à la mesure. Lors de la mesure proprement dite, le champ diminue régulièrement de +1 T à -1T et l'aimantation induite est progressivement mesurée. Cette dernière décrit une boucle non réversible (symétrique par rapport à l'origine) reflétant le comportement des minéraux ferromagnétiques *s.l.* et une partie réversible à haut champ illustrant la fraction dite paramagnétique à température ambiante. Pour avoir accès aux minéraux magnétiques ayant une aimantation rémanente tels que les oxydes de fer, la pente réversible est soustraite en chaque point de mesure et les paramètres caractéristiques sont notés. Il s'agit de l'aimantation à saturation ( $M_s$ ), l'aimantation rémanente à saturation ( $M_{rs}$ ), le champ coercitif ( $H_c$ ). Le champ coercitif rémanent ( $H_{cr}$ ) est déterminé avec une deuxième expérience complémentaire qui consiste à effectuer la mesure après annulation du champ qui l'a créée.



**Figure 6 : Exemple de courbe d'hystérésis magnétique obtenue sur un échantillon de magnétite synthétique de type « pseudo-single domain » (a) et représentation schématique du diagramme de Day (b).**

Une fois la courbe d'hystérésis obtenue et donc tous ces paramètres déterminés quantitativement, il est possible par l'obtention de courbes d'hystérésis partielles, de construire un diagramme FORC (« First Order Reversal Curves »). Cette expérience est longue et nécessite une certaine quantité de matériel magnétique dans le sédiment.



**Figure 7 : Exemple de diagramme FORC sur magnétites montrant un mélange de multidomaines (couleurs rouges-oranges proches de l'origine, faibles coercivités  $H_c$ ) et de mono-domaines (boucle fermée à coercivité plus forte).**

Elle n'est donc possible que pour certains échantillons que l'on sélectionnera. La construction du diagramme FORC permet de parcourir le spectre des coercivités incluses dans l'échantillon. On peut ainsi comprendre si la taille moyenne des particules magnétiques au sein d'un sédiment, obtenue par les paramètres d'hystérésis est représentative d'une seule taille présente ou bien résulte d'un mélange de end-members (un fin et un grossier par exemple). Les grains monodomaines, pseudo monodomaines, multidomaines ont en effet des signatures très différentes sur les diagrammes FORC. Un exemple « d'école » obtenu au LSCE est donné ci-dessous.

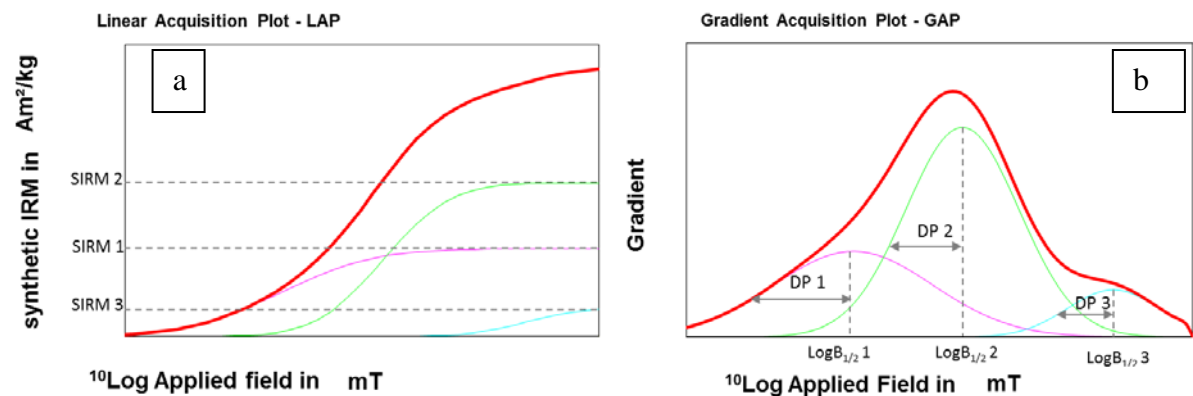
## **Annexe 2 : Méthode de déconvolution des courbes d'aimantation rémanente isotherme (ARI)**

Le modèle d'analyse de composantes de Kruiver et al. (2001) est disponible en fichier Excel sur <http://www.geo.uu.nl/~forth/>. Chaque composante  $c_i$  est définie par trois paramètres :

- Son ARI à saturation ou  $M_{rs}$  (en  $\text{Am}^2/\text{kg}$ ), déterminée graphiquement grâce à une courbe d'acquisition linéaire du signal (LAP « Linear Acquisition Plot » ; Figure 8a).
- $B_{1/2}$ , la coercivité moyenne de la composante  $c_i$  (en mT), soit le champ nécessaire pour atteindre la moitié de l'ARI à saturation et qui est déterminée à partir du GAP (Gradient Acquisition Plot ; Figure 8b), dérivée du LAP,
- DP, le paramètre de dispersion qui représente la déviation standard (Figure 8b).

$M_{rs}$  donne la contribution de la composante par rapport au signal total et peut être rapportée en pourcentage.  $B_{1/2}$  et DP dépendent de la nature de la composante.

Un modèle à trois composantes a été utilisé pour chaque échantillon de la Seine. Les résultats sont ici présentés sous forme de GAP pour mieux distinguer graphiquement les composantes.



*Figure 8 : Exemple de modèle de courbes d'acquisition linéaire (LAP, a) et du gradient (GAP, b) à trois composantes obtenues sur un échantillon de Thomery.*