



HAL
open science

Caractérisation des particules ferrugineuses dans la Seine avec le magnétisme environnemental

Dariouche Kayvantash

► **To cite this version:**

Dariouche Kayvantash. Caractérisation des particules ferrugineuses dans la Seine avec le magnétisme environnemental. Ingénierie de l'environnement. Université Paris sciences et lettres, 2016. Français. NNT : 2016PSLEM056 . tel-01699335

HAL Id: tel-01699335

<https://pastel.hal.science/tel-01699335v1>

Submitted on 2 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT

de l'Université de recherche Paris Sciences et Lettres
PSL Research University

Préparée à MINES ParisTech

Characterization of ferruginous particles in the Seine River using
environmental magnetism

**Caractérisation des particules ferrugineuses dans la Seine
avec le magnétisme environnemental**

Ecole doctorale n°398

Géologie, Ressources Naturelles et Environnement

Spécialité Géosciences et géoingénierie

Dariouche KAYVANTASH

Soutenue le 28 novembre 2016

Dirigée par **Isabelle COJAN**
Catherine KISSEL

COMPOSITION DU JURY :

M. Jean-Marie MOUCHEL
Université Pierre et Marie Curie, Président du jury

Mme. France LAGROIX
Institut de Physique du Globe de Paris,
Rapporteur

M. Eduard PETROVSKÝ
Institute of Geophysics of the CAS, v. v. i.,
Rapporteur

M. Sébastien SALVADOR-BLANES
Laboratoire GéoHydrosystèmes Continentaux,
Membre du jury

Mme. Chantal DE FOUQUET
MINES ParisTech, Membre du jury

Mme. Catherine KISSEL
Laboratoire des Sciences du Climat et de
l'Environnement, Membre du jury

Mme. Isabelle COJAN
MINES ParisTech, Membre du jury

Mme. Christine FRANKE
MINES ParisTech, Membre du jury



Sommaire

Sommaire	1
Table des illustrations	4
Glossaire	8
Remerciements	10
Introduction	12
Chapitre I. Magnétisme environnemental dans le contexte du système Seine	15
I.1. Le fer et le magnétisme environnemental	16
I.1.1. Le fer : généralités	16
I.1.2. Le magnétisme environnemental	22
I.2. Le système « Seine »	27
I.2.1. Environnement du bassin de la Seine	28
I.2.2. Occupation des sols	31
I.2.3. Les ETM dans la Seine et son bassin versant	35
I.2.4. Connaissances sur le fer dans la Seine	41
Résumé et discussion	48
Chapitre II. Stratégie d'échantillonnage d'un système méandriforme anthropisé	49
II.1. Fonctionnement des systèmes fluviaux méandriformes	50
II.1.1. La charge sédimentaire dans les systèmes méandriformes	50
II.1.2. Les systèmes méandriformes	53
II.2. Stratégie d'échantillonnage	58
II.2.1. Protocole d'échantillonnage général	59
II.2.2. Echantillonnage dans une section de la Seine	59
II.2.3. Echantillonnage spatial	61
II.2.4. Echantillonnage dans différents contextes hydrologiques	64
II.3. Préparation des échantillons	67
II.3.1. Séchage des MES	67
II.3.2. Préparation aux mesures magnétiques	67
Résumé et discussion	69
Chapitre III. Caractérisation de la fraction magnétique des matières en suspension de la Seine	70
III.1. Minéralogie magnétique	71
III.1.1. Spectres de coercivité : courbes d'acquisition de l'IRM et S-ratio	72
III.1.2. Séparation des différentes familles de coercivité : analyse des composantes de l'IRM	74
III.1.3. Caractérisation minéralogique : courbes thermomagnétiques de l'IRM	77
III.2. Taille des magnétites	83
III.2.1. Domaines magnétiques et taille des particules	83
III.2.2. Taille moyenne des magnétites : paramètres d'hystérésis magnétique et diagramme de Day	84

III.2.3. Distribution des tailles de magnétites : Diagrammes de FORC.....	86
III.2.4. Contribution des magnétites superparamagnétiques (SP) : dépendance en fréquence.....	91
Résumé et discussion	93
Chapitre IV. Signature magnétique de la charge sédimentaire dans une section de méandre de la Seine.....	94
Magnetic fingerprint of the sediment load in a meander bend section of the Seine River (France)	95
Abstract	95
Highlights:	95
Keywords:	95
1. Introduction.....	96
2. Context.....	97
3. Sampling and methods	99
4. Results.....	102
4.1. Section morphology.....	102
4.2. Velocity distribution	102
4.3. SPM material	104
4.4. Mineralogical composition of the sediment load.....	104
4.5. Low-water SPM.....	106
4.6. High-water SPM.....	107
4.7. River bed sediment (RBS) samples	110
5. Discussion.....	113
5.1. Main carriers of magnetite particles	113
5.2. Effect of the turbulence during the high-water stage.....	114
6. Summary and Conclusions.....	118
Acknowledgments.....	119
Résumé et discussion	119
Chapitre V. Traçage spatio-temporel des particules ferrugineuses dans la Seine avec les méthodes magnétiques	120
V.1. Représentativité des échantillons et des outils magnétiques	121
V.1.1. Relation entre paramètres hydrologiques et MES récupérées.....	121
V.1.2. Paramètres et méthodes magnétiques interprétables.....	125
V.1.3. Etude des paramètres d’hystérésis magnétiques interprétables.....	128
V.1.4. Résumé de la qualité d’échantillonnage et des outils magnétiques interprétables.....	130
V.2. Variabilité de la fraction magnétique à l’échelle du bassin versant	131
V.2.1. Influence des paramètres physico-chimiques de l’eau sur les particules magnétiques	132
V.2.2. Evolution des minéraux de haute coercivité dans les MES le long de la Seine	134
V.2.3. Evolution de la taille des magnétites le long de la Seine	136
V.2.4. Evolution de la concentration des magnétites le long de la Seine	140
V.2.5. Evolution de la proportion de minéraux paramagnétiques le long de la Seine	148
V.2.6. Résumé de l’évolution des particules magnétiques dans le bassin de la Seine	150
V.3. Impact des stations d’épuration sur la fraction magnétique de la Seine.....	152
V.3.1. Propriétés des échantillons de stations d’épuration	153

V.3.2. Impact des rejets de la station Seine Aval : formule théorique	157
V.4. Contexte hydrologique et fraction magnétique	158
V.4.1. Périodes d'étiage.....	160
V.4.2. Périodes de crues	164
V.4.3. Résumé et de l'impact saisonnier sur les magnétites de la Seine.....	167
Résumé et discussion	170
Conclusions et perspectives	172
Apports du magnétisme environnemental.....	172
Difficultés rencontrées dans notre étude	174
Conclusion	174
Perspectives.....	175
Bibliographie.....	178
Annexes	192
Annexe A : Estimation des paramètres spatiaux aux points d'échantillonnage	193
Annexe B : Estimation des débits aux différents points et périodes d'échantillonnage	211
Annexe C : Liste des échantillons de MES récupérés dans la Seine et mesures magnétiques effectuées.....	226
Annexe D : Représentativité des mesures magnétiques de base	229
Annexe E : Données des MES de la Seine	236

Table des illustrations

<i>Figure I.1 : Diagramme de Pourbaix (Eh vs pH) du fer (à 25°C). D'après McNeil & Little (1992), Beverskog & Puigdomenech (1996) et Chivot (2004).....</i>	<i>17</i>
<i>Figure I.2: Mécanismes d'enrichissements et de pertes de métaux dans les sols et horizons. Source : http://www.afes.fr/afes/docs/POITIERS_Chap1_Generalites.pdf.....</i>	<i>20</i>
<i>Figure I.3: Evolution de la concentration de magnétites (en pourcent) en fonction de la classe granulométrique de sables d'une plage canadienne issus de formations géologiques homogènes. Données issues de Hatfield et al. (2010).....</i>	<i>25</i>
<i>Figure I.4 : Relation entre aimantation rémanente à saturation (SIRM) et métaux d'origine principalement naturelle, métaux d'origine principalement anthropique et de l'indice de pollution anthropique (PLI). Figures issue de Zhang et al (2011).....</i>	<i>27</i>
<i>Figure I.5 : Carte lithologique simplifiée du bassin versant de la Seine (source : Corine Land Cover d'après la carte au 1 / 1 000 000 du BRGM).....</i>	<i>29</i>
<i>Figure I.6 : Relation (en hystérésis) entre concentration en matières en suspensions (MES) et débit lors des crues. Source : Estèbe (1996)......</i>	<i>30</i>
<i>Figure I.7 : Densité de population dans le bassin versant de la Seine. (INSEE, 2011).....</i>	<i>32</i>
<i>Figure I.8 : Carte de l'occupation des sols (source : Corine Land Cover), du réseau des Voie Navigables de France (VNF) et localisation des lacs-réservoirs.</i>	<i>32</i>
<i>Figure I.9 : Utilisation du cours d'eau de la Seine. Source : Carré et al., (2011)......</i>	<i>34</i>
<i>Figure I.10 : Estimation des principales sources d'apports métalliques du bassin de la Seine à Poses. Source : Thévenot et al., (2009)......</i>	<i>35</i>
<i>Figure I.11 : Evolution du facteur d'enrichissement du Cd, Cu, Hg, Pb et Zn dans les matières en suspension de la Seine en fonction de l'occupation du bassin versant. D'après Thévenot et al. (2009).</i>	<i>36</i>
<i>Figure I.12 : Effet des traitements des stations d'épuration sur les concentrations de métaux des eaux usées. Source : Thévenot et al., (2009)......</i>	<i>37</i>
<i>Figure I.13 : Exemples d'évolution des éléments chimiques dans les MES de la Seine. Valeurs issues des publications de Tessier, (2003), Meybeck et al., (2004), Chen et al., (2009) et Le Pape et al., (2012).</i>	<i>40</i>
<i>Figure I.14 : Variations temporelles de l'indice de pollution métallique (MPI) selon le contexte hydrologique dans les MES de la Seine. Source : Meybeck et al., (2004)......</i>	<i>41</i>
<i>Figure I.15 : Distribution du fer dans les MES de Marnay-sur-Seine, Bougival, Triel et Poses. D'après Boust et al. (1999) et Priadi et al., (2011).</i>	<i>43</i>
<i>Figure I.16 : Evolution spatiale du fer dans les MES de la Seine et ses affluents. Valeurs issues des travaux de Chen et al. (2014b).</i>	<i>44</i>
<i>Figure I.17 : Exemples de particules magnétiques observées dans la Seine; (Franke et al., 2013)......</i>	<i>46</i>
<i>Figure II.1 : Evolution de la charge de ruissellement en fonction de la capacité de transport du cours d'eau et de la disponibilité en sédiments. Source : Van Campenhout et al. (2013).....</i>	<i>51</i>
<i>Figure II.2 : Profils verticaux schématiques des concentrations en charge en suspension et de la granulométrie. D'après Hickin, (1995).</i>	<i>52</i>

<i>Figure II.3 : Effet d'hystérésis de l'évolution de la charge en suspension en fonction du débit. D'après Williams (1989) et références citées.</i>	52
<i>Figure II.4: Classification morphologique des principaux cours d'eau, figure issue de Church, (1996) et de Paccaud & Roulier, (2010).</i>	54
<i>Figure II.5 : Classification des systèmes fluviaux selon le transport d'après Schumm (1981)</i>	54
<i>Figure II.6 : Effet de la migration des méandres sur le paysage. Source : Cojan & Renard (1997) et Dieras (2013).</i>	55
<i>Figure II.7 : Représentation schématique des écoulements principaux et des cellules de recirculation. Source : Nezu & Nakagawa (1993).</i>	56
<i>Figure II.8 : Distribution des écoulements secondaires dans un méandre situé à Méry-sur-Seine (Seine Supérieure). Figure issue de Dzana & Gaillard (1996).</i>	57
<i>Figure II.9 : Schéma du dispositif d'échantillonnage de MES,</i>	60
<i>Figure II.10 : Localisation des différents sites d'échantillonnage de MES.</i>	62
<i>Figure II.11 : Campagnes d'échantillonnage replacées dans leur contexte hydrologique.</i>	66
<i>Figure III.1: Courbes d'acquisition théoriques de l'IRM.</i>	72
<i>Figure III.2: Exemples de courbes d'IRM sur des échantillons de MES de la Seine.</i>	74
<i>Figure III.3 : Exemples de courbes LAP et GAP obtenues par décomposition de l'IRM.</i>	76
<i>Figure III.4 : Exemple de courbe de désaimantation thermique de l'IRM.</i>	78
<i>Figure III.5 : Schéma d'une préparation de MES aimantée dans trois directions.</i>	79
<i>Figure III.6 : Courbes thermomagnétiques de l'IRM sur 3 axes.</i>	80
<i>Figure III.7 : Désaimantation thermique de l'IRM des MES de Saron lors des première et deuxième chauffes.</i>	82
<i>Figure III.8 : Domaines magnétiques de la particule de magnétite (Source : Butler, 1992).</i>	83
<i>Figure III.9 : Mesures des paramètres d'hystérésis magnétique.</i>	85
<i>Figure III.10 : Diagrammes de Day avec les courbes théoriques de mélange (Dunlop, 2002; Dunlop & Carter-Stiglitz, 2006).</i>	86
<i>Figure III.11 : Illustration de la construction d'un diagramme de FORC (figures issues de Roberts et al., 2000).</i>	87
<i>Figure III.12 : Exemples de diagrammes de FORC caractéristiques de différentes populations de magnétites. Figures issues de Muxworthy & Roberts, (2007).</i>	87
<i>Figure III.13 : Exemples de diagrammes de FORC obtenus sur trois échantillons de MES.</i>	89
<i>Figure III.14 : Diagramme de FORC obtenu à partir d'une acquisition et de cinq acquisitions de FORCs avec le logiciel VARIFORC.</i>	90
<i>Figure 1 : Simplified lithological map of the Seine basin (from the 1 / 1 000 000 geological map, BRGM) and scheme of the river at the sampling site.</i>	99
<i>Figure 2 : Sketch of the device used for SPM sampling.</i>	100
<i>Figure 3 : River section and sample distribution at low- and high-water stages at the study site of Marnay-sur-Seine.</i>	103
<i>Figure 4 : Total dried SPM mass trapped at each sampling site.</i>	104
<i>Figure 5 : Thermal demagnetization curve of IRM 1T of a representative SPM sample of Marnay-sur-Seine in 2011.</i>	106
<i>Figure 6 : Cumulative laser grain size distribution curves of SPM samples.</i>	108

<i>Figure 7 : Saturation remanent magnetization of SPM and RBS samples.</i>	<i>111</i>
<i>Figure 8 : Day plots of magnetite with theoretical mixing curves of SP, SD, PSD and MD end-members (Dunlop & Carter-Stiglitz, 2006): Low-water & high-water SPM samples and RBS samples.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 9 : Comparison between measured and calculated M_{rs} with the RBS+WL model.....</i>	<i>117</i>
<i>Figure V.1: Relation entre débit (spécifique) et quantité de MES piégée dans 4 sites d'échantillonnage de la Seine.</i>	<i>124</i>
<i>Figure V.2: Relation entre paramètres physico-chimiques et paramètres magnétiques dans les MES de la Seine.....</i>	<i>133</i>
<i>Figure V.3: Variations de la coercivité de la fraction magnétique dans les MES de la Seine.</i>	<i>135</i>
<i>Figure V.4 (page suivante): Evolution de la taille des magnétites des MES de la Seine..</i>	<i>138</i>
<i>Figure V.5: Evolution générale d'amont en aval du M_{rs} dans les MES de la Seine.....</i>	<i>142</i>
<i>Figure V.6: Evolution générale d'amont en aval du M_s dans les MES de la Seine.</i>	<i>143</i>
<i>Figure V.7: Evolution générale d'amont en aval de la contribution de minéraux paramagnétiques (estimée à partir de la S.C.) dans les MES de la Seine.</i>	<i>149</i>
<i>Figure V.8: Relation entre proportion de minéraux paramagnétiques et concentration de magnétites.....</i>	<i>149</i>
<i>Figure V.9: Relation entre taille des magnétites et concentration des magnétites des MES de la Seine.</i>	<i>152</i>
<i>Figure V.10: Comparaison des propriétés physico-chimiques des eaux rejetées des stations d'épuration et des propriétés de la Seine en amont et en aval de ces rejets.....</i>	<i>154</i>
<i>Figure V.11: Evolution de l'aimantation rémanente à saturation dans les MES des eaux du SIAAP lors des différentes étapes de traitement.</i>	<i>156</i>
<i>Figure V.12: Evolution d'amont en aval de la concentration de magnétite moyenne dans les MES de la Seine prélevés en période d'étiage.</i>	<i>161</i>
<i>Figure V.13: Evolution d'amont en aval (de droite à gauche) de la concentration de magnétite moyenne dans les MES de la Seine prélevés en période de crues.</i>	<i>165</i>

<i>Tableau I.1: Proportion de fer total mesuré dans les rejets atmosphériques dus à la combustion. D'après Luo et al., (2008)</i>	<i>19</i>
<i>Tableau I.2: Surface drainée, débit spécifique et charge sédimentaire de la Seine comparée aux autres grands cours d'eau de France</i>	<i>29</i>
<i>Tableau I.3: Composition minéralogique moyenne des sédiments fluviaux de la Seine. D'après Haurine (2015).</i>	<i>30</i>
<i>Tableau I.4: Caractéristiques des lacs-réservoirs du bassin de la Seine. Source : Viennot et al. (2009) et ETPB Grands Lacs</i>	<i>34</i>
<i>Tableau II.1: Liste des échantillons du SIAAP.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau III.1: Quelques propriétés des minéraux magnétiques les plus communs.....</i>	<i>71</i>
<i>Tableau III.2: Exemple de calculs de S-ratio sur trois échantillons de MES de la Sein.....</i>	<i>74</i>
<i>Tableau III.3: Résultat des valeurs de susceptibilités χ moyennes à haute et basse fréquence et calculs de la dépendance en fréquence $\chi f d$.....</i>	<i>91</i>
<i>Table 1: Mineralogical composition of bulk RBS and SPM samples of Marnay-sur-Seine obtained with semi-quantitative XRD analyses.....</i>	<i>105</i>
<i>Table 2: Grain size distribution of SPM samples.....</i>	<i>109</i>
<i>Table 3: Measured and calculated magnetic concentrations M_{rs} for high-water SPM samples using the RBS model.....</i>	<i>116</i>
<i>Tableau V.1: Relation entre débit et MES sur les sites de prélèvement de la Seine</i>	<i>125</i>
<i>Tableau V.2: Récapitulatif des méthodes et paramètres magnétiques utilisés dans l'étude, des informations apportées et des interprétations possibles.</i>	<i>126</i>
<i>Tableau V.3: Comparaison des variabilités spatiales et temporelles des paramètres d'hystérésis magnétiques mesurés dans les MES de la Seine.....</i>	<i>129</i>
<i>Tableau V.4: Classification des périodes d'étiages et de crue selon les débits moyens et extrêmes à la station d'Austerlitz.....</i>	<i>160</i>
<i>Tableau V.5: Estimation du M_{rs} d'Andrézy/Denouval en périodes d'étiages à partir des débits, concentration de MES et M_{rs} de l'Oise, la station SAV et la Seine avant l'Oise et SAV.....</i>	<i>163</i>
<i>Tableau V.6: Estimation du M_{rs} d'Andrézy/Denouval en périodes de crues à partir des débits, concentration de MES et M_{rs} de l'Oise, la station SAV et la Seine avant l'Oise et SAV.....</i>	<i>167</i>

Glossaire

Abréviation	Unité	Signification
Axe $>_{0,3}$	A/m ou %	Composante de désaimantation thermique de l'IRM sur 3 axes qui regroupe les minéraux de coercivité entre 0,3 et 1 T.
$B_{1/2}$	T	Coercivité médiane d'une composante IRM de Kruiver
B_c	T	Champ coercitif
B_{cr}	T	Champ coercitif rémanent
BV	km ²	Surface du bassin versant
C_1, C_2 et C_3	A/m ou %	Composantes de l'aimantation rémanente isotherme
DO	ppm ou mg/l	Oxygène dissous dans l'eau
DP		Paramètre de dispersion d'une composante IRM
DRX		Diffraction à rayons X
EF	Sans unité	Facteur d'enrichissement
ETM		Élément en trace métallique
FORC		First-Order Reversal Curves
IRM	Am ² /kg ou A /m	Aimantation rémanente isotherme
MD		Particule magnétique multi-domaine
MES		Matières en suspension
MPI	Sans unité	Indice de pollution métallique
M_{rs}	Am ² /kg	Aimantation rémanente à saturation
M_s	Am ² /kg	Aimantation à saturation
ORP	mV	Potentiel d'oxydo-réduction
PIREN-Seine		Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine
pK	km	Point kilométrique : abscisse curviligne depuis la source
PSD		Pseudosingle-domain (pseudomono-domaine)

Q	m^3/s	Débit
Q_{sp}	$l/s/km^2$	Débit spécifique
RBS		River bed sediment : sédiment de fond
SAV		Station d'épuration Seine Aval
SEC		Station d'épuration Seine Centre
SEG		Station d'épuration Seine Grésillons
SIAAP		Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne
S.C.	$Am^2/kg T$	Slope correction (correction de pente) / susceptibilité à champ fort
SIRM	Am^2/kg ou A /m	Aimantation rémanente isotherme à saturation
SD		Single-domain (particule magnétique mono-domaine)
SF		Smoothing factor : paramètre de lissage des FORCs
S-ratio	Sans unité	Rapport entre $-IRM_{-0,3T}$ et IRM_{1T}
SP		Particule superparamagnétique
SPM		Suspended particulate matter (matières en suspension)
T_{Curie}	$^{\circ}C$	Température de Curie d'un minéral au-dessus de laquelle l'IRM est totalement retirée
$u_t(x)$		Incertitude de mesure totale (erreur aléatoire + variabilité dans l'échantillon) d'un paramètre x
XRD		X-ray Diffraction (diffraction à rayons X)
$\sigma_{spatial}(x)$		Ecart-type d'un paramètre x à l'échelle spatiale (dans une campagne donnée)
$\sigma_{temp}(x)$		Ecart-type d'un paramètre x à l'échelle temporelle (dans un site donné)
X	m^3/kg	Susceptibilité magnétique
χ_{fd}	%	Dépendance en fréquence : différence entre χ de haute et χ de basse fréquence

Remerciements

Je remercie tout d'abord ma maître de thèse et mes deux directrices, pour m'avoir encadré et donné l'opportunité de m'essayer au fameux jeu de la thèse. Je remercie également les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer le présent manuscrit et d'avoir permis son amélioration.

Merci également aux personnes ayant permis d'effectuer les campagnes, mesures et interprétations nécessaires à cette thèse. Au sein de Mines ParisTech, je pense notamment à N. Carillo, N. Martineau, Y. Habaoui et à l'ensemble du personnel de la halle. Merci également à B. Tessier pour m'avoir enseigné comment enseigner, ainsi qu'aux chercheurs avec qui j'aurai pu discuter au cours de la thèse (N. Flipo, M. Poulin, O. Stab...). Je remercie également D. Vassiliadis et V. Lachasse pour avoir su répondre avec le sourire à mes nombreuses questions administratives. Au LSCE, merci à C. Wandres, A Van Tauer et à V. Metrot. Je remercie également l'ensemble des chercheurs du PIREN-Seine dont les discussions et les travaux m'auront beaucoup apporté.

En dehors des Mines et du LSCE, je remercie C. Carvallo de l'UPMC pour avoir évalué mes travaux de première année et pour les mesures et les interprétations des diagrammes de FORCs. Je remercie C. Colin et O. Dufaure de GEOPS pour m'avoir permis d'effectuer les analyses de granulométrie. Je remercie également V. Rocher, P. Mèche et R. Mailler du SIAAP pour avoir fourni les échantillons de rejets de station d'épuration.

Je tiens également à remercier les habitants de péniches et le personnel de la Piscine Baker pour avoir généreusement qui ont acceptés qu'un homme inconnu et d'origine « frisée » puisse placer des trappes en plastique sur leur propriété le temps des campagnes. Merci également aux personnels de l'Université de Tours et de la société AACT pour m'avoir permis de mener à bien les campagnes de Marnay-sur-Seine.

Il m'est bien entendu impossible de considérer la thèse comme une simple expérience professionnelle, aussi je tiens à remercier l'ensemble des personnes, collègues ou non, qui ont apportées leur touche de « bonnambiancitude » durant ces trois années. Les moments passés avec toutes ces personnes ont été sources de nombreux souvenirs inoubliables. Comme quoi, les dessins animés de mon enfance ne m'ont pas menti quand ils disaient qu'il faut toujours croire au pouvoir de l'Amitié ! Bien que la tâche soit complexe et pas forcément représentative de la contribution de chacun (qui, admettons-le, est difficilement quantifiable de toutes manières) je vais faire de mon mieux pour organiser la chose.

Dans le LSCE, je remercie notamment l'ensemble des thésards du grenier du bâtiment : Naoufel, Marion, Jens, Cindy, Hugo, Laurine, Claire, Lise. Je remercie bien entendu Alison et Marion, mes deux camarades de bureau, pour leur humour et leur gentillesse ainsi que leur capacité à mesurer ma susceptibilité avec une précision dépassant celle des meilleurs appareils magnétiques. Je pense bien sûr aussi à Priscilla (qui n'était pas dans le bâtiment mais que j'ai pu rencontrer à Viennes), dont je suis très heureux d'avoir pu faire la rencontre et que je remercie également.

Parmi les permanents, post-doctorants et doctorants actuels et anciens de l'école des Mines, je remercie tout d'abord l'ensemble de mes frères d'arme thésards de l'équipe Géologie, à savoir Frédéric, mon ancien camarade de bureau, Benoît, Maxime, Thomas, Benjamin, Arezki et Martin. Je remercie également les permanents et anciens permanents Sylvie, Philippe et Pierre pour leur gentillesse et leur écoute. Merci également aux autres thésards de Fontainebleau : Pierre Guillou, Nelson, Jean-Baptiste, Angélique, Asma, Pierre Grisard, Jihane, Emmanuel, Aurélien, Lien... Mention spéciale à Sébastien qui aura su reprendre avec brio le flambeau de DoPaMINES Fontainebleau, ainsi qu'à Vaia pour sa gentillesse et son réconfort lors des moments les plus durs, aussi bien professionnels que personnels.

Je remercie également l'ensemble des élèves des Mines qui m'ont permis de m'essayer à l'enseignement, et d'y découvrir une nouvelle passion que j'espère pouvoir continuer d'explorer.

Merci également à tous mes amis extérieurs, rencontrés avant ou pendant la thèse. Je pense notamment aux amis cosplayers tels que Clémence, Marine et Cyrielle. Je pense également à Marjorie, qui aura réussi à être la seule personne de la fac d'Orsay que j'ai pu voir régulièrement durant toute ma vie d'étudiant, de la L1 jusqu'à la fin de la thèse. Je pense bien entendu à plein d'autres amis de la fac que j'ai pu croiser pendant cette thèse : Simon, Etienne, Aurélia, Romain, Jessica, Tiphaine, Ronan...

Enfin, merci à ma famille pour m'avoir soutenu durant toute la thèse et surtout sur la fin, avec mention spéciale pour ma mère. Merci également à mes petits axolotls qui font maintenant partie de la famille et qui m'ont soutenu à leur manière en me fixant avec leur petite tête souriante.

Bien que ce soit légèrement hors sujet, je finirai ces remerciements par une petite maxime construite par mes soins à partir de deux bien connues et que je pense être tout à fait adaptée à ma personnalité :

« Le ridicule ne tue pas, et ce qui ne nous tue pas nous rend plus fort. »

Introduction

L'exploitation et l'utilisation des métaux existent depuis la Préhistoire et les traces de leur utilisation illustrent l'évolution de l'Homme au cours du temps. Aujourd'hui, ils sont encore largement exploités et présents dans notre société. Ils sont utilisés sous forme naturelle ou en alliages pour de nombreuses applications telles que la construction, l'industrie automobile ou la plomberie. Ils sont présents dans les engrais, les pigments, les appareils électroniques et ménagers et dans de nombreux combustibles industriels, domestiques et automobiles. L'accroissement de la population, de l'urbanisation et des activités industrielles exerce une grande pression environnementale sur la contamination métallique des milieux récepteurs, notamment les milieux aquatiques.

Le fer est un métal présent dans les roches, les sols, l'eau, l'atmosphère ou les organismes vivants. Il est également l'un des métaux les plus utilisés et rejeté dans l'environnement par l'Homme. Pourtant, parmi les nombreuses études effectuées sur la problématique de la contamination métallique, le fer est relativement peu étudié par rapport aux autres métaux tels que le cadmium, le mercure ou le plomb. Une des raisons est que le fer est un contaminant moins problématique pour l'environnement et la santé humaine que la plupart des autres métaux rejetés par l'Homme qui reçoivent une attention prioritaire. Une autre raison est que le fer est présent dans de nombreux systèmes naturels et émis par de nombreux types d'activités, contrairement à certains métaux qui ont des domaines d'application plus réduits, ce qui nécessite de développer des outils de traçages suffisamment précis pour identifier la signature des différentes sources de particules ferrugineuses et quantifier l'impact de ces sources dans le milieu récepteur.

Le fer et ses composés présentent cependant plusieurs propriétés qui leur permettent d'être utilisés comme traceurs environnementaux. Les différentes phases du fer se forment dans des environnements et conditions physico-chimiques spécifiques et sont de ce fait d'excellents indicateurs de conditions environnementales. Les phases ferrugineuses, notamment les oxydes et les sulfures, sont également porteurs d'éléments en traces métalliques plus problématiques pour l'environnement (Priadi, 2010). De plus, certains oxydes et sulfures de fer possèdent également des propriétés magnétiques. Ces propriétés dépendent de nombreux facteurs tels que la minéralogie des particules, leur taille, leur forme et la présence d'éléments de substitution.

Les outils d'analyses magnétiques se révèlent particulièrement adaptés pour l'étude de plusieurs minéraux ferrugineux communs car extrêmement sensibles à leur présence, même en quantités très faibles. Ils permettent non seulement de caractériser la nature des minéraux magnétiques, mais aussi de déterminer la contribution de différentes sources dans le cas de systèmes naturels complexes, le signal magnétique enregistré pouvant être déconvolué selon la contribution de chaque type de particule. De nombreuses études ont montré le potentiel des outils magnétiques à retracer l'origine des particules ferrugineuses dans des roches, sols, milieux aquatiques et dans l'air, ainsi que les éventuels processus d'érosion ou altération de ces particules dus à des changements de conditions environnementales. Le magnétisme

environnemental, qui consiste à étudier les propriétés des minéraux magnétiques, permet d'aborder l'ensemble de ces domaines d'études, ainsi que le traçage des activités anthropiques et leur impact sur l'environnement.

Le bassin versant de la Seine est un bon exemple d'environnement anthropisé. Une grande partie du bassin a été déboisée et est aujourd'hui dédiée à l'agriculture. Le bassin accueille également Paris et son agglomération ainsi qu'une activité industrielle conséquente qui exercent une forte pression environnementale (Billen *et al.*, 2009). Une grande partie des méandres de la Seine est également aménagée pour différentes activités, ce qui affecte à la fois la qualité et les mécanismes de transport sédimentaire du réseau hydrographique.

C'est dans le cadre de cette problématique de préservation de l'environnement du bassin de la Seine, couplée à celle de la gestion des activités exercées sur le territoire, qu'a été mis en place, en 1989, le Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine (PIREN-Seine). Ce groupement de recherche s'articule autour de plusieurs thématiques liées à l'étude du fonctionnement du système, la qualité de l'eau, la restauration des ressources et de l'écosystème de la Seine et son bassin (Billen *et al.*, 2009). La problématique de la contamination, notamment la contamination métallique est une des thématiques de recherches du PIREN-Seine (Thévenot *et al.*, 2009).

Cette thèse a été lancée suite à plusieurs études effectuées dans le cadre d'une collaboration entre l'équipe Géologie du Centre de Géosciences de MINES ParisTech et l'équipe CliMag du Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE). Cette collaboration a pour objectif de combiner les connaissances géologiques, hydrologiques, environnementales et magnétiques des équipes afin d'évaluer le potentiel des outils du magnétisme environnemental à permettre tracer l'évolution spatio-temporelle de la contamination métallique dans la Seine. Elle a débuté dans la phase VI du PIREN-Seine, dans la thématique « Contaminations vues à grande échelle de temps » et est à présent intégrée dans la phase VII du PIREN-Seine au sein de l'axe « Fonctionnement des corridors hydro-écologiques du bassin de la Seine pour l'évaluation des aménagements et restaurations ».

Cette thèse a pour objectif d'approfondir nos connaissances sur le potentiel du magnétisme environnemental à tracer les origines et le devenir des particules ferrugineuses ainsi que l'impact de l'Homme dans le système Seine dans l'espace et dans le temps. En raison du temps limité par la thèse, cette étude s'est essentiellement concentrée sur l'étude des propriétés physico-chimiques acquises à partir de certaines méthodes du magnétisme environnemental. Ces propriétés seront mises en relation avec les facteurs environnementaux (débit, milieu drainé...).

Ce mémoire est constitué de cinq chapitres :

- Le Chapitre I présente le contexte de l'étude. La première partie de ce chapitre est dédiée à l'étude de la place du fer dans la nature et dans notre société, ainsi qu'à la description des notions de base de magnétisme environnemental. La deuxième partie est consacrée à une présentation de la Seine et de son bassin versant et sur l'état des connaissances sur la contamination métallique et le fer dans l'ensemble du réseau hydrographique.

- Le Chapitre II est consacré à la stratégie d'échantillonnage et de préparation des échantillons et données. Après une description du fonctionnement général des systèmes méandriformes permettant de cibler les phénomènes clés à prendre en compte pour notre étude, le chapitre présente les dispositifs de collecte d'échantillons mis en place, le choix des sites et périodes d'échantillonnage et toute la préparation nécessaire avant l'application des méthodes du magnétisme environnemental.
- Le Chapitre III décrit l'ensemble des mesures et méthodes du magnétisme environnemental appliquées à cette étude. Ce chapitre présente les informations apportées par ces méthodes et permet une caractérisation générale de la fraction magnétique des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine.
- Le Chapitre IV a pour objectif de décrire les variabilités spatio-temporelles de la fraction ferrugineuse en relation avec les mécanismes naturels de transport sédimentaire. Il se porte sur l'étude des propriétés magnétiques au sein des matières en suspension et sédiments de fond d'une section d'apex de méandre non aménagé et migrant librement situé en amont de la Seine dans la partie rurale. Ce chapitre a également pour objectif d'évaluer l'efficacité des protocoles d'échantillonnage mis en place, et de caractériser la charge sédimentaire d'un système fluvial essentiellement alimenté par des formations carbonatées avec le magnétisme environnemental en comparant les résultats obtenus avec les outils magnétiques à ceux obtenus avec des mesures courantométriques et granulométriques. Ce chapitre est écrit en anglais sous forme d'article soumis dans le journal *Geomorphology*.
- Le Chapitre V se porte sur le traçage de l'origine des particules ferrugineuses magnétiques dans les matières en suspension de la Seine et sur l'impact des changements de conditions hydrologiques sur le transport de ces particules. Les méthodes, résultats et discussions présentées dans les chapitres précédents serviront d'appui aux interprétations des résultats obtenus dans ce dernier chapitre.

Chapitre I. Magnétisme environnemental dans le contexte du système Seine

Notre étude s'intéresse au traçage des sources et processus naturels et anthropiques dans les matières en suspension (MES) d'un réseau fluvial (celui du bassin versant de la Seine) à partir de l'analyse du fer et de ses composés. Nous nous sommes focalisés plus particulièrement sur les composés du fer présentant des propriétés magnétiques qui permettent d'en déterminer facilement les caractéristiques physico-chimiques à partir de méthodes de magnétisme environnemental qui sont, dans leur majorité, non destructives.

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique organisée selon les thématiques intéressantes pour notre étude. Il se divise ainsi en deux parties :

- La première partie décrit l'état des connaissances sur le fer, ses origines, son comportement dans l'environnement et son utilisation par l'Homme. Les principes de base de l'étude des composés ferrugineux avec le magnétisme environnemental sont décrits avec quelques exemples d'application à l'appui. Les détails des propriétés et méthodes d'analyses magnétiques que nous avons utilisées seront présentés dans le Chapitre III.
- La deuxième partie s'intéresse au milieu étudié qu'est le réseau de la Seine et aux caractéristiques de son bassin versant qui couvre une grande partie du Bassin Parisien. Le régime hydrologique du cours d'eau, la nature des terrains traversés et l'occupation des sols sont autant d'éléments qui influent sur les apports, et le transport des particules ferrugineuses présentes dans les matières en suspension des cours d'eau du réseau de la Seine. Dans cette partie, nous présentons également un état des connaissances sur la contamination des cours d'eau en éléments en trace métalliques (ou ETM) ainsi qu'aux relations entre le fer et ces éléments considérés comme contaminants.

La notion d'ETM est mal définie et ce terme recouvre les métaux et métalloïdes considérés comme toxiques et dont la teneur moyenne dans les sols est inférieure à 1g/kg. Dans le cadre de ce travail, nous considérons sous le terme ETM les éléments comme le cuivre (Cu), le zinc (Zn), le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le nickel (Ni), l'arsenic (As), l'antimoine (Sb) et le mercure (Hg).

I.1. Le fer et le magnétisme environnemental

Les mécanismes d'accumulation (sédiments, bioaccumulation...) et/ou libération (érosion, libération...) d'éléments métalliques ou métalloïdes dans l'environnement sont largement influencés par la forme chimique sous laquelle ils sont présents dans le milieu. Ainsi quel que soit le milieu concerné (air, eau, sol), ces éléments peuvent avoir des comportements complexes.

Bien que le fer n'ait pas une toxicité comparable à celle d'autres métaux ou métalloïdes constituant les ETM, il présente l'avantage d'être un des éléments métalliques les plus communs, que ce soit dans les roches sédimentaires ou dans les produits de l'activité anthropique (alliages, aciers...).

La sensibilité du fer aux variations des paramètres physico-chimiques du milieu (pH, Eh, interface solide/liquide) en fait un bon marqueur environnemental, en particulier dans les systèmes fluviaux dans lesquels les sédiments s'accumulent et sont remobilisés au gré du rythme des crues, avec des possibilités de re-dissolution de certaines phases porteuses de contaminants lors de modification des conditions physico-chimiques à la faveur de la remise en suspension des sédiments.

I.1.1. Le fer : généralités

I.1.1.a. Le fer à la surface de la Terre

Le fer est avant tout un élément naturel et abondant (le quatrième) dans la croûte terrestre. Dans les conditions qui règnent à la surface de la Terre (températures peu élevées et faible pression), le fer est présent sous différentes formes et états (Figure I.1) :

- En fonction du potentiel d'oxydo-réduction (Figure I.1a), le fer se présente sous forme métallique dans les milieux les moins oxydés, puis sous forme d'oxydes de fer ferreux (Fe^{2+}) et enfin de fer ferrique (Fe^{3+}).
- En fonction du pH, milieu aqueux, le fer peut se présenter sous forme ionique (Figure I.1a) ou solide. Le domaine de stabilité du fer ferreux est assez large ($\text{pH} \leq 10$ et Eh compris entre $\pm 0,5$ V), alors que le domaine de stabilité du fer ferrique est beaucoup plus restreint ($\text{pH} < 2$ et Eh élevé $> 0,8$ V). Les ions en solution précipitent en présence de certains éléments tels l'ion soufre, donnant dans ce cas des sulfures de fer (Figure I.1b).
- En surface et à température ambiante, le fer ferrique précipite lorsque le pH dépasse 2 et est donc essentiellement présent dans la nature sous forme solide. Le fer métallique n'est stable que dans des conditions très réductrices ($\text{Eh} < -0,8$ V) et est de ce fait très rare à l'état naturel : il n'existe principalement que dans les météorites et les roches lunaires. En surface le fer métallique s'oxyde ou se transforme en sulfures selon les conditions environnementales (Westphal, 1986). L'hématite (Fe_2O_3) et la goéthite (FeOOH) constituent les exemples d'oxydes ferriques les plus courants. Les oxydes

ferreux purs (FeO) sont rares dans la nature, le fer ferreux précipitant généralement sous forme de sulfures (Figure I.1b) comme la pyrite (FeS₂) qui est un des sulfures de fer le plus stable en conditions naturelles.

Que ce soit en surface ou en milieu aqueux, les phases ferreuses et ferriques peuvent coexister et former des minéraux comme la magnétite (Fe₃O₄ ou Fe²⁺OFe³⁺₂O₃) ou la greigite (Fe₃S₄ ou Fe²⁺SFe³⁺₂S₃).

L'état du fer dépend de plusieurs autres paramètres. La présence d'acides organiques favorise par exemple la réduction et la dissolution du fer (Lefèvre-Drouet *et al.*, 1993). La température du milieu de formation a également un effet sur la stabilité des phases ferrugineuses : son augmentation élargit par exemple les domaines de stabilité de la magnétite et de l'hématite (Lefèvre-Drouet *et al.*, 1993).

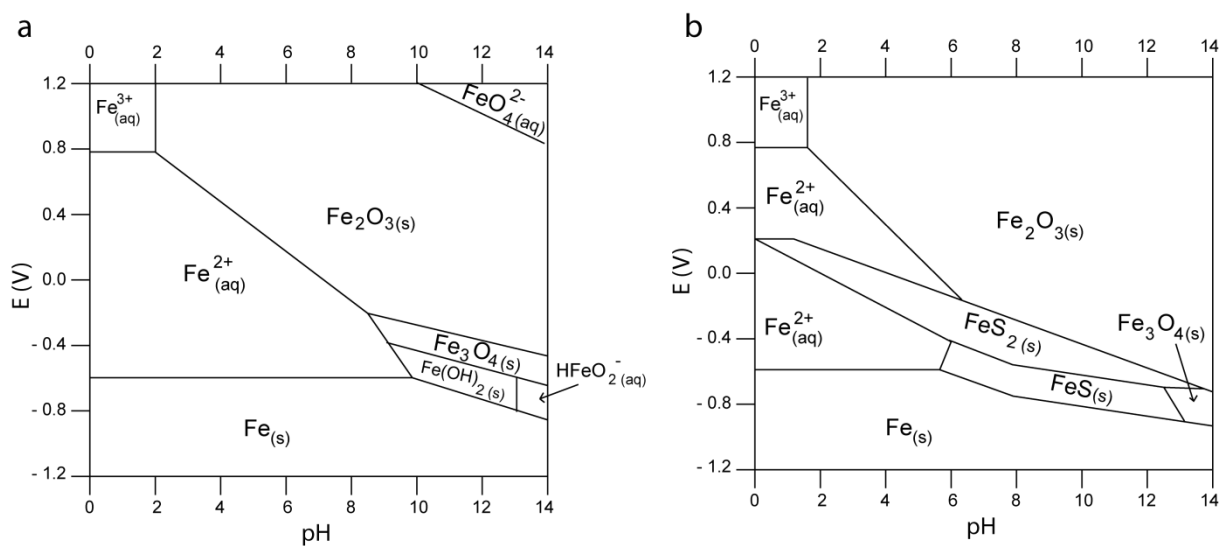


Figure I.1 : Diagramme de Pourbaix (Eh vs pH) du fer (à 25°C). (a) diagramme avec une solution de fer à 10⁻⁶ mol/l, (b) diagramme avec une solution de fer à 10⁻⁶ mol/l et une solution de soufre à 10⁻² mol/L. D'après McNeil & Little (1992), Beverskog & Puigdomenech (1996) et Chivot (2004). Les deux diagrammes montrent qu'à concentration de fer, température et pH égaux, la spéciation du fer dépend fortement des conditions environnementales (ici la quantité de soufre).

Le fer est présent dans presque tous les types de roche et de sédiments. Sous forme d'oxydes, il est généralement parmi les minéraux mineurs (de l'ordre de quelques pourcents). Sous forme de sulfures, notamment la pyrite et la greigite, il s'observe principalement en traces dans certaines roches sédimentaires comme les marnes et calcaires (Westphal, 1986), dans les sédiments marins hémipélagiques et les roches ignées (Demoisson, 2006).

Dans le régolithe (surface d'altération), les minéraux ferrugineux sont issus de l'altération du substrat par des mécanismes qui se succèdent dans le temps (hydrolyse, oxydation, réduction, dissolution), conduisant au lessivage de certains cations et à la formation de minéraux argileux contenant du fer et d'(oxyhydr)oxydes de fer. Le fer peut également être présent avec d'autres éléments dans la solution interstitielle du sol sous forme d'ion ferreux (Fe²⁺) selon les

conditions physico-chimiques existantes (voir Figure I.1a) et même être exporté du profil et reprécipité lorsque les conditions physico-chimiques évoluent.

Dans les systèmes fluviaux, le fer est majoritairement (98 à 99 %) transporté sous forme particulaire (Salomons & Förstner, 1984) dans les minéraux argileux ou sous forme d'(oxyhydr)oxydes, de sulfures ou complexé dans la matière organique (Boust *et al.*, 1999; Ingri *et al.*, 2000, 2006; Allard *et al.*, 2004; Demoisson, 2006; Priadi, 2010; Sakan *et al.*, 2016) selon les conditions environnementales.

1.1.1.b. Le fer et l'Homme

Le minerai de fer est exploité depuis des milliers d'années par l'Homme. Les premières traces de production de fer ou d'acier, remontent à environ 1400 ans avant J.C., en Anatolie (Cowen, 1999).

En 2015, environ 3,2 milliards de tonnes de minerais de fer (contenant 30 à 70 % de fer en masse) ont été produites. Ces minerais sont essentiellement composés de magnétite et d'hématite. Aujourd'hui, environ 98 % du fer exploité est utilisé pour la sidérurgie (production d'aciers), les 2 % restants se répartissent entre l'industrie des pigments, les cimenteries, l'agriculture ou la production de produits chimiques spécifiques (source : http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_ore). Cette production industrielle génère plusieurs millions de tonnes de déchets par an, issus soit de l'exploitation du gisement (appelés alors « stériles »), soit du processus de traitement du minerai (appelé « résidus »).

Il est difficile d'estimer la quantité de composés ferrugineux rejetés par l'activité minière, car des minéraux ferrugineux sont également présents dans de nombreux gisements exploités pour d'autres métaux (comme le manganèse) ou substances minérales (comme le charbon). La pyrite par exemple est peu exploitée pour le fer en raison des faibles teneurs des gisements et des difficultés d'exploitation. Autrefois exploitée pour la production de soufre ou d'acide sulfurique, aujourd'hui l'exploitation de pyrite l'est en association avec celle d'un gisement aurifère (Source : Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, gestion des résidus et stériles des activités minières, 2009).

Outre les exploitations minières, les activités humaines sont sources de particules ferrugineuses. Au-dessus des océans, une estimation de l'origine des particules ferrugineuses présentes dans l'atmosphère considère qu'environ 5 % de ce fer est issu de la combustion. Ces particules atmosphériques sont généralement inférieures à 1 µm (Luo *et al.*, 2008; Mahowald *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2012). Des particules plus grossières sont également rejetées et se déposent à proximité des sources. Leur taille varie de 1 à 250 µm mais sont pour la plupart inférieures à 50 µm (Strzyszczyk *et al.*, 1996; Jordanova *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2012).

Les particules issues de combustion industrielle sont les plus enrichies en fer (Tableau I.1). Ainsi, bien que les émissions de particules ferrugineuses liées à l'activité industrielle soient en théorie contenues par l'utilisation de filtres à air, ces émissions enrichissent localement le fer total présent dans les poussières atmosphériques. Par exemple, une étude à Shenzhen (sud-est

de la Chine) a permis de montrer que les rejets industriels provoquent un enrichissement du fer atmosphérique d'un facteur 5 à 10 (Dewan *et al.*, 2016).

La nature des particules atmosphériques d'origine anthropique est différente des particules d'origine naturelle qui proviennent principalement des poussières des zones désertiques (Mahowald *et al.*, 2009). Les particules naturelles sont principalement constituées d'oxydes ferriques alors que celles d'origine industrielle comprennent également des oxydes ferreux (Strzyszc *et al.*, 1996). Les combustibles sont généralement enrichis en pyrite, marcassite ou sidérite, et subissent plusieurs étapes de transformation lors de la combustion/émission dans l'atmosphère avant de donner des oxyhydroxydes de fer tels que la magnétite, la goéthite ou l'hématite (Lecoanet *et al.*, 2001; Jordanova *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2012).

Tableau I.1 : Proportion de fer total (en % de masse) mesuré dans les rejets atmosphériques dus à la combustion. Le tiret indique que la proportion de fer n'a pas été indiquée. D'après Luo *et al.*, (2008) et références citées.

Source de particules atmosphériques	Fer total (%)
Combustion de charbon (industriels)	4,5 à 9,4
Combustion de charbon (domestique)	0,1
Chaudière à fuel	1,6 à 3,0
Combustibles d'automobile	-
Hauts fourneaux industriels	16
Combustion de déchets agricoles	0,2
Combustion de bois	0,2
Incinérateurs	0,2 à 1,7
Feux de forêts	< 3,4

La fraction ferrugineuse des sols peut être affectée par l'Homme de différentes manières (Figure I.2). Les sols à proximité des milieux urbains et industriels reçoivent les retombées atmosphériques et sont généralement enrichis en minéraux ferrugineux (Lecoanet *et al.*, 2001). Les activités agricoles affectent également la fraction ferrugineuse des sols. Il est présent dans certains engrais sous forme de sels ou de chélates (Schulte, 1992).

De plus, les processus naturels d'érosion des sols, de lessivage et de ruissellement peuvent être significativement affectés par les activités comme le labour ou l'irrigation. Les effets de ces pratiques sont variables : l'irrigation contribue à l'appauvrissement de la teneur en fer dans les sols (Vizier, 1978), mais l'utilisation d'eaux usées fortement concentrées en ETM et en fer provoque au contraire un enrichissement dans les sols (Zhang *et al.*, 2012).

Les systèmes fluviaux intègrent les rejets directs et indirects dus aux activités anthropiques. Les activités domestiques, agricoles, minières et industrielles provoquent de ce fait généralement une augmentation conséquente de la concentration en fer total dans de nombreux systèmes fluviaux (Vuori, 1995; Chakarvorty *et al.*, 2015). De plus, l'impact de l'Homme sur l'environnement peut fortement modifier les propriétés physico-chimiques de l'eau, ce qui peut avoir un impact sur la spéciation du fer. A l'inverse, le fer et ses composés issus des activités anthropiques peut affecter de manière significative les propriétés des systèmes fluviaux.

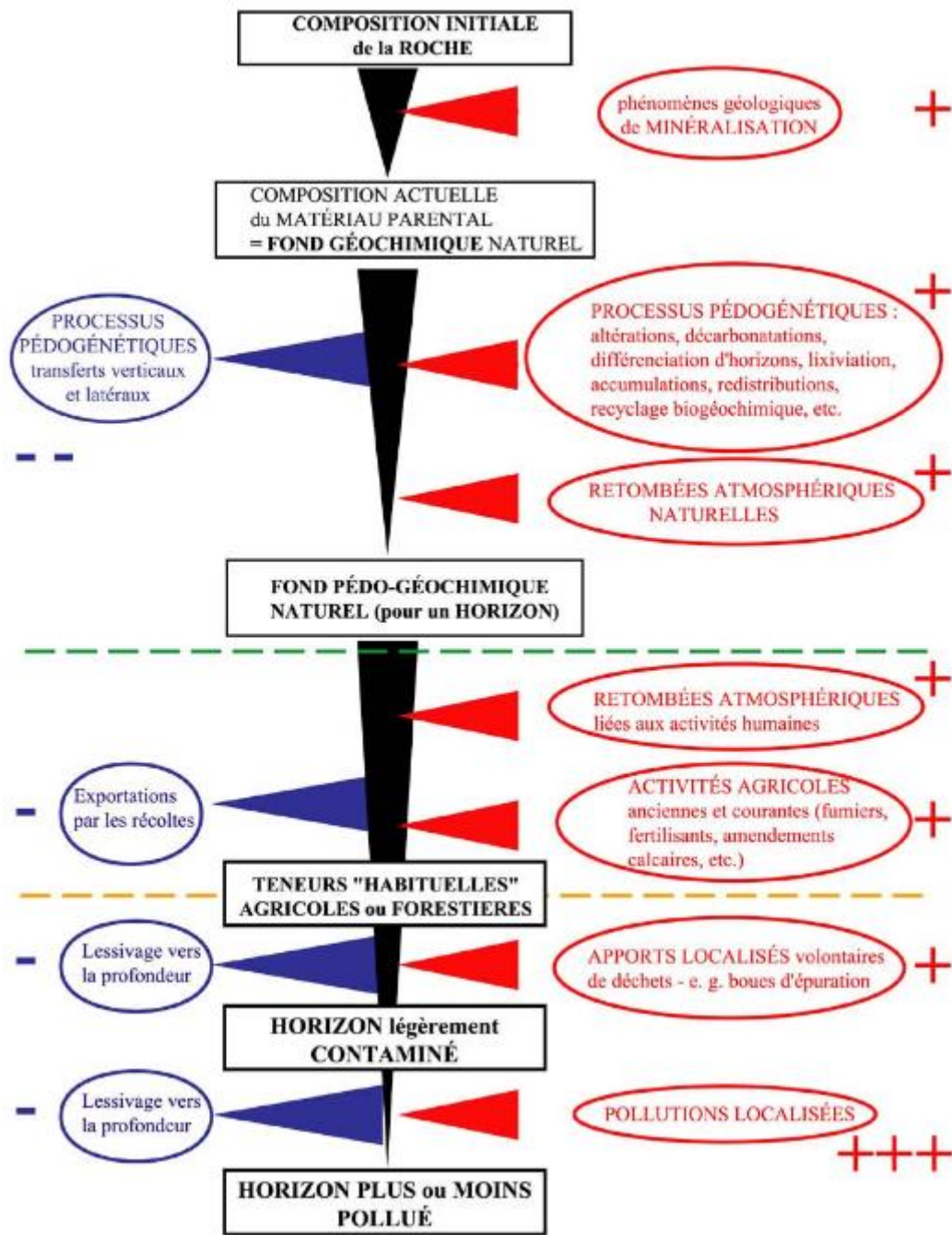


Figure I.2: Mécanismes d'enrichissements et de pertes de métaux dans les sols et horizons. Source : http://www.afes.fr/afes/docs/POITIERS_Chap1_Generalites.pdf.

1.1.1.c. Le fer : traceur environnemental

Le fer, élément très répandu dans les roches, sols, milieux aquatiques, est également utilisé par de nombreux organismes vivants dont l'Homme. Sa présence sous de nombreuses formes et dans différents milieux rend son étude à la fois intéressante et complexe. Cette complexité, couplée à la faible toxicité du fer comparée à celles d'autres métaux comme le cadmium, le mercure ou le plomb ne place pas le fer parmi les métaux les plus étudiés comme

outil de traçage de pollution. Le fer et ses composés présentent toutefois plusieurs propriétés intéressantes dans les études de traçage environnemental :

- Des études montrent que les composés ferrugineux, notamment les oxydes et sulfures, sont régulièrement porteurs d'ETM (Waychunas *et al.*, 2005; Burnol *et al.*, 2006; Le Pape, 2012; Vu *et al.*, 2013; Sakan *et al.*, 2016). Cette association peut se faire de plusieurs manières : par adsorption, substitution, ou inclusion lors de cristallisation ou recristallisation des oxydes (Backes *et al.*, 1994; Waychunas *et al.*, 2005; Burnol *et al.*, 2006; Vu *et al.*, 2013; Sakan *et al.*, 2016). La fraction ferrugineuse peut donc être un indicateur de la contamination métallique (Meena *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012; Dong *et al.*, 2014a).
- Chaque source, qu'elle soit naturelle ou anthropique possède sa propre « signature ferrugineuse », caractérisée par différents minéraux en concentrations variables. La taille, la forme, la cristallinité et les éléments associés aux particules ferrugineuses sont également des indicateurs de leur origine. Dans un système alimenté par plusieurs sources, une étude comparative de la signature du système avec celles des sources potentielles permet de remonter à ces dernières et d'estimer leurs impacts respectifs (Chen *et al.*, 2014b; Dong *et al.*, 2014a; b).
- Le fer est particulièrement sensible aux différents paramètres physico-chimiques (pH, température, teneur en matière organique, oxygène dissous et potentiel redox). Ainsi, dans des milieux comme l'eau et les sols, les variations de concentration et de spéciation du fer peuvent indiquer des variations de conditions environnementales (Vizier, 1978; Beverskog & Puigdomenech, 1996).

Lorsque les différents minéraux ferrugineux peuvent être associés à des sources et/ou processus spécifiques (naturels ou anthropiques), ceux-ci peuvent être utilisés comme traceurs environnementaux.

L'impact des activités anthropiques sur les concentrations et distribution des minéraux ferrugineux peut être estimé comme pour d'autres métaux à partir du rapport entre la concentration en fer et celle d'un élément normalisant dont les apports sont considérés exclusivement naturels comme par exemple l'aluminium (Fe/Al) ou le calcium (Fe/Ca). Il est également possible d'utiliser le facteur d'enrichissement (EF) qui permet d'exprimer le ratio de la teneur en fer et du facteur normalisant (Al par exemple) par rapport à celui de référence (bruit de fond naturel par exemple) (Sinex & Wright, 1988; Chen *et al.*, 2014b; Dong *et al.*, 2014a). Ainsi, plus l'EF est grand, (supérieur à 1), plus les apports anthropiques sont importants.

Les variations de concentrations en isotopes du fer ($\delta^{56}\text{Fe}$) sont également utilisées pour tracer l'impact des différentes sources (Ingri *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2014b) dès lors que l'on connaît leur signature spécifique.

L'étude des propriétés magnétiques des minéraux ferrugineux, constitue une approche qui permet également de différencier les sources et d'identifier les processus. Elle présente l'avantage de pouvoir être appliquée sur des sédiments et d'être non destructive dans la

majorité des mesures. C'est la méthode que nous avons retenue pour cette étude et nous allons la détailler dans la partie suivante.

I.1.2. Le magnétisme environnemental

I.1.2.a. Principes de base et exemples d'applications

Les méthodes du magnétisme environnemental sont utilisées pour caractériser de nombreux environnements et processus à partir des minéraux magnétiques (Thompson & Oldfield, 1986; Dunlop & Özdemir, 1997; Evans & Heller, 2003). Les propriétés magnétiques dépendant de la minéralogie, de la taille et de la concentration des particules magnétiques, elles reflètent les conditions (paléo)environnementales dans lesquelles le sédiment s'est déposé et/ou a évolué.

Les (oxyhydr)oxydes de fer tels que la magnétite, l'hématite et la goethite ainsi que certains sulfures de fer comme la greigite sont des minéraux dits « ferromagnétiques au sens large ». Si tous les éléments, minéraux et matériaux peuvent acquérir une faible aimantation dite "induite" sous champ magnétique (cette aimantation disparaît lorsque le champ est annulé), les minéraux ferromagnétiques acquièrent une aimantation dite « rémanente » lors de leur formation. L'aimantation rémanente d'un échantillon varie en fonction de la taille, minéralogie et concentration des minéraux ferromagnétiques (*s.l*) qui la composent :

- Elle augmente avec la concentration ;
- Elle diminue lorsque la taille des particules augmente ;
- Elle peut significativement varier en fonction de la minéralogie. Par exemple, la magnétite a une aimantation 200 fois plus élevée que celle de l'hématite (Dunlop & Özdemir, 1997), ce qui signifie que dans un échantillon où les proportions de ces deux minéraux sont égales, plus de 99 % de l'aimantation rémanente que l'on mesure est portée par la magnétite.

Les méthodes utilisées s'appliquent donc à décrire au mieux la composition minéralogique magnétique des sédiments étudiés. Les proportions relatives, ou du moins, les contributions relatives au signal magnétique total des différentes familles minérales peuvent ainsi être quantifiées. Pour certaines de ces grandes familles d'oxydes et de sulfures de fer, l'accès à la taille des particules est possible. Les méthodes utilisées dans ce travail sont décrites dans le Chapitre III et consistent à progressivement déstabiliser l'aimantation des sédiments, soit en appliquant des champs continus ou alternatifs, soit par chauffe. Les différents minéraux réagissant différemment à ces forçages, c'est la combinaison des paramètres obtenus qui permet finalement de déchiffrer le message magnétique porté par les sédiments, qu'il ait une origine naturelle primaire (source géologique) ou secondaire (diagénèse, pédogénèse) ou bien d'origine anthropique.

Les domaines d'applications du magnétisme environnemental sont très variés et concernent aussi bien les domaines marins que continentaux, tels que :

- La reconstitution des paléoclimats. Dans plusieurs sites d'études (Chine, Russie, Etats-Unis), les propriétés magnétiques des oxydes de fer des séquences de sols quaternaires montrent de fortes corrélations avec les estimations de précipitation et de température de l'époque et peuvent servir d'indicateurs pour reconstituer les paléo-précipitations et températures (Maxbauer *et al.*, 2016).
- Le traçage des circulations océaniques. Ballini *et al.* (2006) ont ainsi montré que les variations de d'aimantation et de susceptibilité magnétique de sédiments marins sont associées à des fluctuations de concentration de magnétites et permettent de reconstituer les cellules de circulations Nord Atlantique lors de la dernière période glaciaire.
- L'étude des formations superficielles. Taylor *et al.* (2014) ont par exemple étudié les propriétés magnétiques de paléosols lœssiques, détectant des variations de minéralogie, taille et concentration de particules magnétiques associées aux changements de conditions climatiques. Les outils magnétiques ont également permis de montrer des transformations in situ de la fraction magnétique due à des engorgements d'eau.
- L'étude des processus de diagénèse. Le fer et ses oxydes et sulfures étant sensibles aux facteurs environnementaux, ces minéraux peuvent être tracés et quantifiés avec les outils magnétiques et mis en relation avec les différents mécanismes physico-chimiques qui opèrent lors de la diagénèse (Roberts, 2015).
- L'étude de la (paléo)biosphère. Certains organismes comme les bactéries magnétotactiques synthétisent des minéraux magnétiques (Blakemore, 1975; Farina *et al.*, 1990; Bazylinski & Frankel, 2004). Les bactéries magnétotactiques nécessitant des conditions environnementales spécifiques pour se développer, les magnétofossiles (restes des minéraux magnétiques) peuvent être utilisés pour étudier les variations paléoenvironnementales comme les cycles glaciaires/interglaciaires (Kopp & Kirschvink, 2008).

Dans le cadre de notre étude, nous nous intéresserons principalement à deux thématiques du magnétisme environnemental : le traçage des processus hydrodynamiques en milieu fluvial et les activités anthropiques actuelles.

1.1.2.b. Traçage des processus hydrodynamiques dans les milieux fluviaux et côtiers

Le magnétisme environnemental est un outil performant dans l'étude du fonctionnement des systèmes fluviaux que ce soit dans les études sur les sources de sédiment, la charge sédimentaire ou l'hydrodynamisme.

Plusieurs études magnétiques se sont portées sur l'origine et les mécanismes de transport de la charge sédimentaire des cours d'eau (Thompson & Oldfield, 1986). Des travaux sur l'érosion des sols en climat tempéré Walling *et al.* (1979) dans le sud-est de l'Angleterre ont

notamment montré que les MES possèdent une minéralogie magnétique et des concentrations beaucoup plus proches de celles des sols cultivés que des sols naturels, montrant l'impact de l'agriculture sur la fragilisation des sols qui s'érodent plus facilement qu'en milieu naturel. Cette même étude a permis de comparer les relations entre débits, flux de MES et concentration de magnétite : des pics d'aimantation sont observés lorsque les pics de crue et de charge en suspension sont suffisamment intenses pour mobiliser les sédiments des berges.

De plus en plus d'études montrent le potentiel du magnétisme environnemental à tracer les processus hydrodynamiques. Liu *et al.* (2012) et Dong *et al.* (2014b) ont notamment reconstitué les variations hydrodynamiques au sein de l'estuaire du Yangtze (en Chine) en comparant les propriétés magnétiques et granulométriques des MES à celles des sédiments de fond en différents points. Les particules magnétiques des sédiments, majoritairement des magnétites, proviennent de deux grandes sources, l'une granitique fournissant un grand nombre des magnétites grossières et l'autre carbonatée donnant peu de magnétites plus fines. Ainsi, les zones où l'hydrodynamisme est suffisamment élevé pour transporter les sédiments d'origine granitique voient une augmentation de concentration et de taille des magnétites alors que dans les zones plus calmes, on retrouve les sédiments d'origine carbonatée, moins concentrés en magnétites plus fines.

Dans une plage canadienne, Hatfield *et al.* (2010) a également reconstitué les variations hydrodynamiques à partir des variations spatiales des concentrations en magnétites dans les sables composés de quartz, calcite et oxydes de fer. Dans cette étude, les zones sujettes à érosion voient de plus grandes concentrations en magnétites dues à des pertes de quartz et de calcites qui, moins denses (densité de 2,6 à 2,8), se transportent plus facilement que la magnétite (densité 5,2). La relation entre granulométrie totale et concentration en particules magnétiques est toutefois différente de celle de l'estuaire de Chine : le matériel transporté par le fleuve étant issu de formations homogènes, les résultats granulométriques et magnétiques montrent une augmentation de la concentration des magnétites dans les sédiments les plus fins (limons et sables fins), les magnétites ayant des tailles de l'ordre des limons ($< 63 \mu\text{m}$; Figure I.3).

1.1.2.c. Traçage des activités anthropiques

L'étude de l'impact de l'Homme sur l'environnement constitue une des thématiques du magnétisme environnemental.

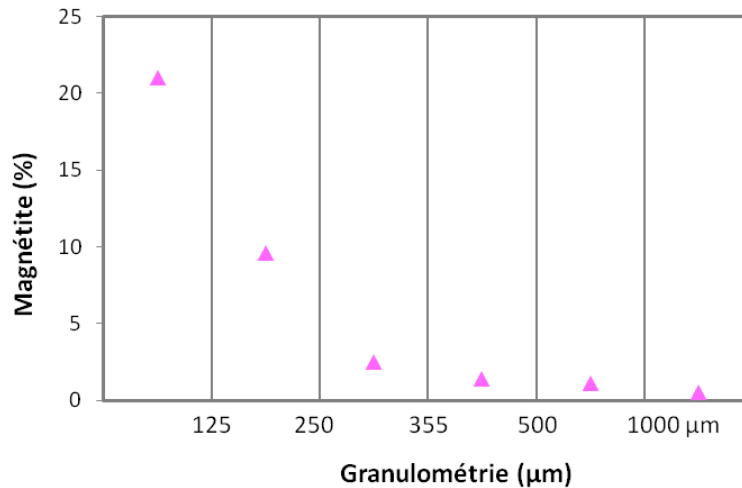


Figure I.3: Evolution de la concentration de magnétites (en pourcent) en fonction de la classe granulométrique de sables d'une plage canadienne issus de formations géologiques homogènes. Données issues de Hatfield *et al.* (2010). Le pourcentage de magnétites a été estimé par les auteurs à partir des valeurs de susceptibilité magnétique et d'aimantation rémanente à saturation (voir Chapitre III pour les définitions des paramètres magnétiques).

L'impact de l'Homme sur la distribution du fer à la surface du globe se manifeste de différentes manières selon le type d'activité (agricole, domestique, industrielle...) et selon le milieu étudié. Il en est de même pour les propriétés magnétiques. Quelques généralités peuvent néanmoins s'observer :

- L'enrichissement en oxydes de fer dû aux rejets industriels se manifeste généralement par des valeurs d'aimantation plus élevées dans les échantillons de poussières atmosphériques, sols et sédiments fluviaux (Chaddha & Seehra, 1983; Strzyszcz *et al.*, 1996; Lecoanet *et al.*, 2001; Jordanova *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2011; Franciskovic-Bilinski *et al.*, 2014). Les particules magnétiques d'origine industrielle peuvent avoir des tailles et formes significativement différentes des particules naturelles (Lecoanet *et al.*, 2001) et il est alors possible de tracer la proportion de particules anthropiques et naturelles grâce aux outils magnétiques. Ce phénomène n'est toutefois pas systématique comme le montre une étude sur les sédiments de rivière du Danube (Bulgarie) où la taille des particules d'origine anthropique est très variable et n'est donc pas un indicateur environnemental fiable (Jordanova *et al.*, 2004).
- Les milieux fortement urbanisés sont sources de particules magnétiques (Thompson & Oldfield, 1986). L'enrichissement de particules dans les milieux récepteurs s'observe par des augmentations d'aimantation. L'impact des rejets urbains dans les eaux et sols est similaire à celui des activités industrielles (Jordanova *et al.*, 2004; Meena *et al.*, 2011).
- Les matières en suspension des eaux usées produites par les différentes activités humaines sont généralement plus aimantées que les eaux non contaminées en raison de l'enrichissement en particules magnétiques (Chakarvorty *et al.*, 2015).

- L'impact des pratiques agricoles s'observe également avec les outils magnétiques : les sols sujets à la culture intensive et à l'irrigation montrent des aimantations plus faibles que les sols voisins non cultivés. Cette diminution de l'aimantation est associée à une perte des oxydes et non à des variations minéralogiques (Bian *et al.*, 2014). Lorsque les eaux utilisées pour l'irrigation sont contaminées, les sols agricoles sont au contraire enrichis en magnétites. C'est notamment le cas dans les sols agricoles d'Hunan Province (Chine) où l'utilisation d'eaux contaminées par une fonderie multiplie par dix la concentration de magnétites (Zhang *et al.*, 2013).

Bien que le fer ne soit pas considéré comme un polluant, plusieurs études montrent qu'il existe une bonne corrélation entre les propriétés magnétiques et concentration en différents ETM (Brilhante *et al.*, 1989; Strzyszcz *et al.*, 1996; Dong *et al.*, 2014a; Chakarvorty *et al.*, 2015). Zhang *et al.* (2011) ont ainsi montré des relations entre concentration en éléments métalliques et aimantation rémanente dans des sédiments de rivières à proximité d'une fonderie (Figure I.4) pour les éléments tels que le plomb, le cuivre et le zinc d'origine anthropique ($R^2 > 0.74$) (Figure I.4c, d, e et f) de même que pour l'aimantation et l'indice de pollution (métallique) d'origine anthropique (Figure I.4g). Par contre, cette aimantation rémanente est peu corrélée ($R^2 < 0.10$) avec la concentration en éléments métalliques d'origine naturelle comme le baryum et le néodyme (Figure I.4a et b). Des analyses au microscope électronique à balayage permettent de confirmer l'origine anthropique des particules magnétiques à partir de leur morphologie (sphérules, scories) (Meena *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2011) et confirmer le potentiel des outils magnétiques à tracer la pollution métallique.

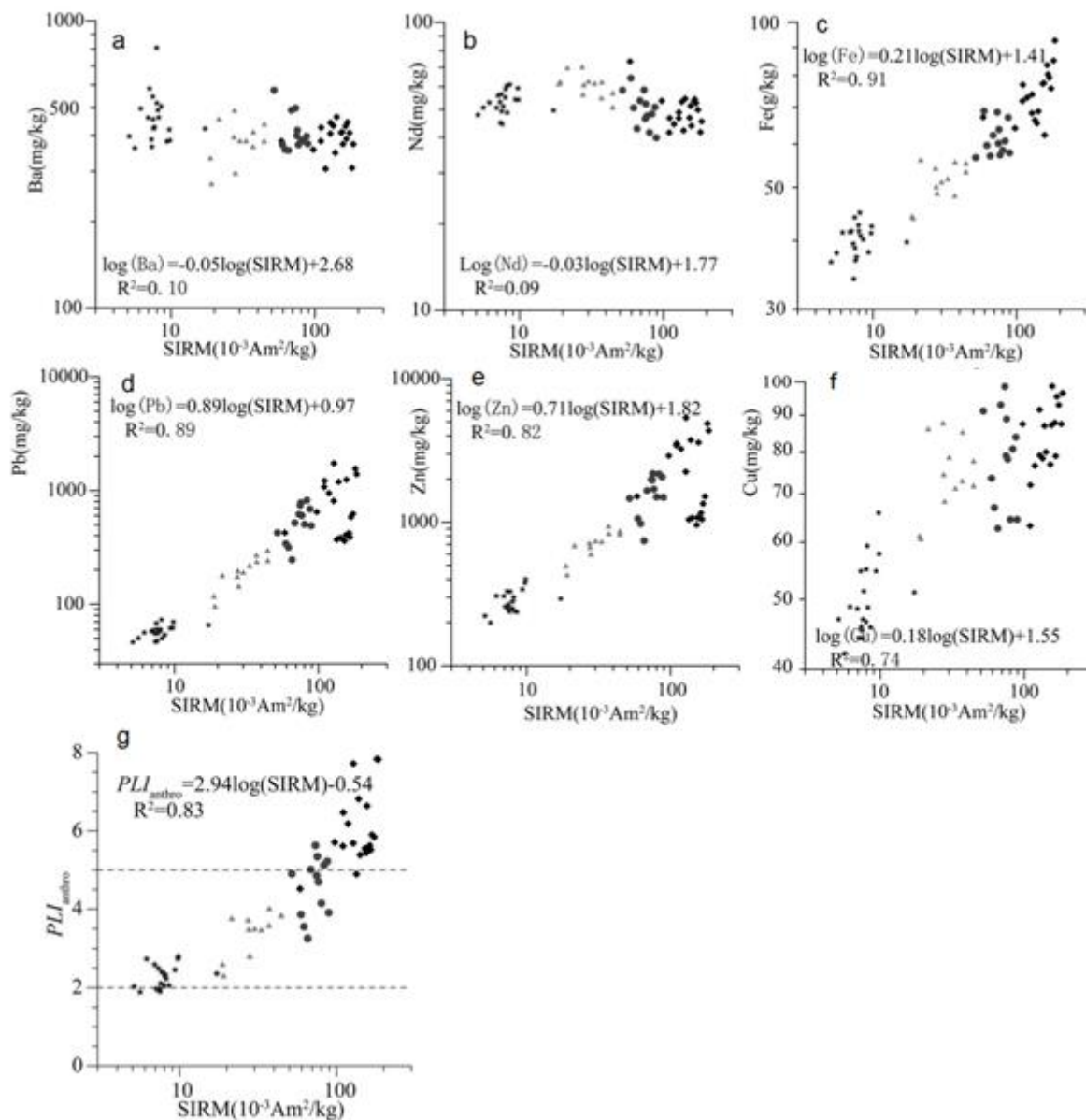


Figure I.4 : Relation entre aimantation rémanente à saturation (SIRM) et (a et b) métaux d'origine principalement naturelle, (c, d, e, f) métaux d'origine principalement anthropique et (g) de l'indice de pollution anthropique (PLI). Plus la contamination est importante, plus le PLI est élevé. Figures issue de Zhang *et al* (2011). L'aimantation rémanente à saturation est définie dans le Chapitre III. Elle est ici fonction de la concentration en magnétite.

I.2. Le système « Seine »

Cette partie décrit de manière synthétique les principales caractéristiques de la Seine et de son bassin versant que sont les contextes hydrologique et géologique, l'occupation des sols et l'aménagement du réseau hydrographique. Un accent particulier est porté aux questions relatives à la problématique des ETM et aux études effectuées sur le fer.

I.2.1. Environnement du bassin de la Seine

I.2.1.a. Hydrologie

Le bassin versant de la Seine recouvre une surface d'environ 78 600 km². Le régime de la Seine est de type pluvial océanique (Guerrini *et al.*, 1998). Les précipitations sont relativement homogènes sur le bassin, variant de 550 à 850 mm/an. Elles sont toutefois plus importantes (entre 800 et 1300 mm/an) sur les régions côtières du nord-ouest et le sud-est du bassin (Viennot *et al.*, 2009). En raison du faible relief, (en général en dessous de 300 m et rarement supérieur à 500 m), les cours d'eau présentent des pentes très faibles (inférieures à 0,03 %).

Les périodes de crues ont lieu généralement entre décembre et février ; le débit de la Seine à Poses (limite entre la zone fluviale et estuarienne, Figure I.5) qui est en moyenne annuelle autour de 435 m³/s, dépasse alors régulièrement 1 000 m³/s. Les étiages ont généralement lieu entre juillet et octobre et le débit à Poses peut être inférieur à 200 m³/s durant ces périodes (source : <http://www.hydro.eaufrance.fr/>). Le débit spécifique moyen de la Seine est d'environ 6,4 l/s/km² (Guerrini *et al.*, 1998) et peut atteindre 40 l/s/km² lors des grandes crues, ce qui est moins élevé que les maxima de la Loire et du Rhône (50 l/s/km²) ou encore du Rhin (70 l/s/km²) (Viennot *et al.*, 2009). La nappe alimente la rivière dans l'essentiel du réseau hydrographique, mais des inversions peuvent avoir lieu lors des crues (Viennot *et al.*, 2009).

Les quatre affluents majeurs de la Seine sont, d'amont en aval, l'Aube, l'Yonne, la Marne et l'Oise. Pour des raisons historiques, l'affluent « Seine » a donné son nom au fleuve bien qu'à sa confluence avec l'Yonne, le débit de cette dernière est supérieur. On considèrera tout de même par souci de convention dans notre étude que la Seine est le cours d'eau principal.

I.2.1.b. Contexte géologique et charge sédimentaire

Le bassin versant de la Seine est principalement constitué d'un empilement de couches sédimentaires carbonatées. Les formations cristallines du Morvan affleurent sur la bordure sud et occupent environ 3 % de la superficie du bassin (Figure I.5). Elles sont drainées par le réseau de l'Yonne et apportent des sédiments de nature silico-clastique.

La Seine (à l'amont de la confluence avec l'Yonne), l'Aube, la Marne et l'Oise traversent des paysages et des formations géologiques très semblables. Ces cours d'eau prennent leur source dans les formations calcaires du Jurassique qui dessinent les côtes du bassin parisien, puis traversent les formations argilo-sableuse du Crétacé inférieur qui forment une vaste étendue en légère dépression, suivies des formations crayeuses du Crétacé supérieur (aux très faibles reliefs). Une faible partie du bassin est recouverte par des formations superficielles (loëss, dépôts fluviaux) du Quaternaire (Roy *et al.*, 1999; Viennot *et al.*, 2009).

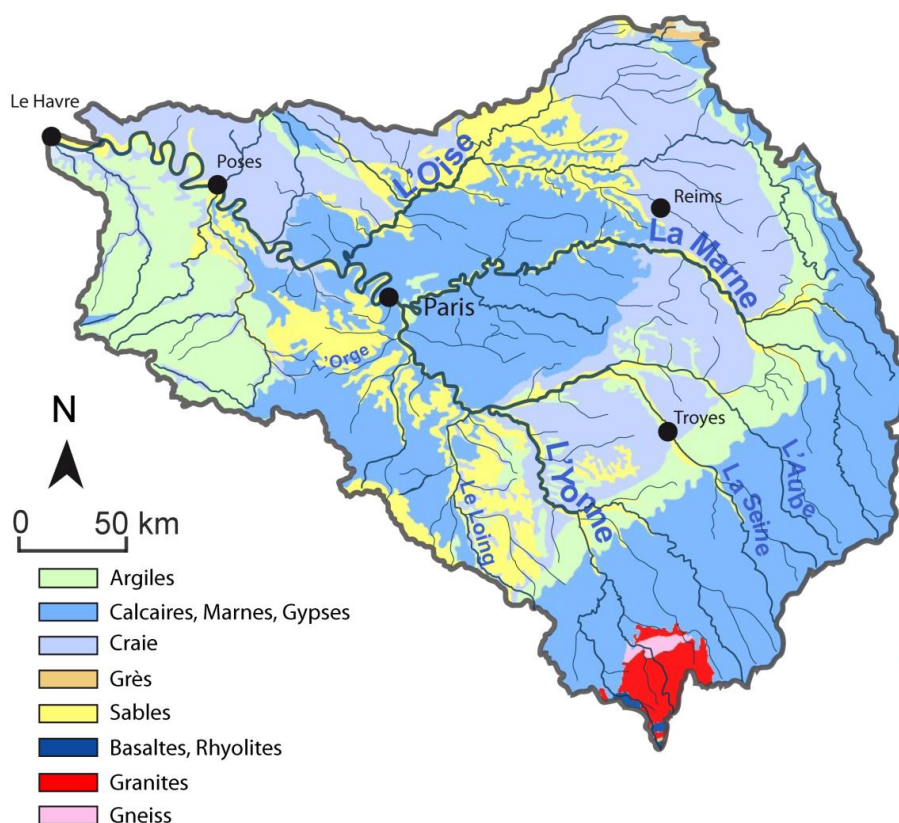


Figure I.5 : Carte lithologique simplifiée du bassin versant de la Seine (source : Corine Land Cover d'après la carte au 1 / 1 000 000 du BRGM).

La charge sédimentaire de la Seine est d'environ 10 à 18 t/km²/an (Milliman & Syvitski, 1992; Thévenot *et al.*, 2007; Delmas *et al.*, 2012), ce qui est très faible par rapport aux données des autres rivières françaises (Tableau I.2).

A l'amont, la composition minéralogique des sédiments fluviaux reflète le contexte géologique avec, pour les cours de la Seine, l'Aube et la Marne, des assemblages minéralogiques en moyenne dominés par le quartz (46 %) puis les minéraux argileux (27 %) et la calcite (18 %, Tableau I.3). La distribution minéralogique des sédiments l'Yonne diffère sensiblement de celle des autres affluents en raison des formations du Morvan, mais n'affecte pas sensiblement les sédiments de l'estuaire au Havre (Haurine, 2015).

Tableau I.2 : Surface drainée, débit spécifique et charge sédimentaire de la Seine comparée aux autres grands cours d'eau de France. Données issues ou calculées d'après les données de : (1) Milliman & Syvitski (1992) ; (2) : Thévenot *et al.*, (2007) ; (3) : Tockner *et al.*, (2009) ; (4) : Viennot *et al.*, (2009) ; (5) : Delmas *et al.*, (2012) ; (6) : Gay *et al.*, (2014).

Rivière	Surface de bassin versant (km ²)	Charge sédimentaire (t/km ² /an)
Seine	78 600 ⁴	10-18 ^{1,2,5}
Loire	110 250 ^{5,6}	3-35 ^{5,6}
Rhône	83 600 ⁵	120-340 ^{1,5}
Garonne	71 300 ⁵	20-45 ^{1,3,5}

Tableau I.3 : Composition minéralogique moyenne des sédiments fluviaux de la Seine en amont (Seine, Marne et Aube), dans l'Yonne et dans l'estuaire au Havre. D'après Haurine (2015).

Minéraux	Seine (amont)	(Yonne amont)	Seine (estuaire)
Quartz	46	27	23
Minéraux argileux	27	31	18
Albite	-	16	3
Orthose	-	15	-
Microcline	5	-	-
Chlorite	-	6	-
Muscovite	2	3	-
Calcite	18	-	37
Aragonite	-	-	7
Halite	-	-	9
Total	98	98	97

A Paris, la concentration en MES est la plupart du temps comprise entre 10 et 20 mg/l, mais varie significativement selon le contexte hydrologique. En général la relation entre MES et débit de la Seine est en hystérésis (Estèbe, 1996) : à débit égal, la concentration en MES est plus élevée lors de la montée de crue que lors de la décrue (Figure I.6). Lors des crues, la concentration peut augmenter d'un facteur 10 (jusqu'à 200 mg/l à l'aval de Paris), toutefois, toutes les montées de crues n'entraînent pas systématiquement une augmentation de la concentration en MES pour deux raisons :

- La première est que le débit nécessaire à la remobilisation des sédiments de fond doit atteindre un certain seuil (à Paris le seuil est à environ 400 m³/s) et qu'en dessous de ce seuil, la charge sédimentaire dans la colonne d'eau n'augmente pas significativement.
- La deuxième est que, lors de successions de crues, l'essentiel du matériel de fond mobilisable est remis en suspension lors de la première crue, ce qui réduit la quantité de matériel mobilisable pour les crues suivantes (Estèbe, 1996).

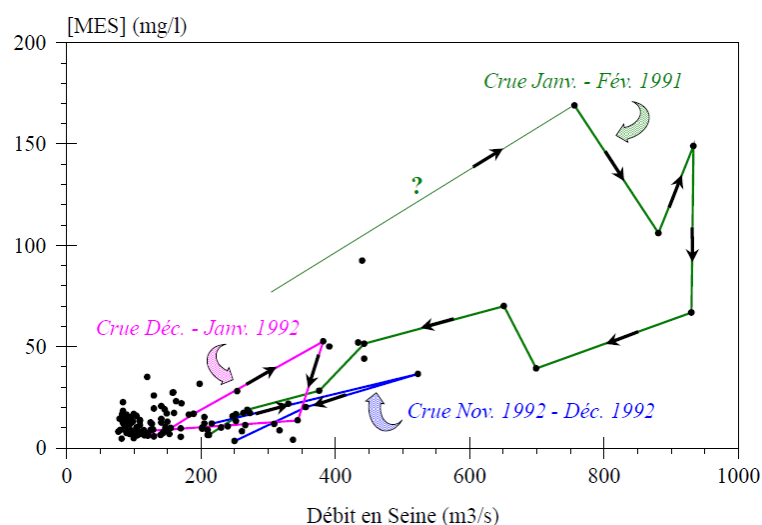


Figure I.6 : Relation (en hystérésis) entre concentration en matières en suspensions (MES) et débit lors des crues de janvier-février 1991, décembre 1991-janvier 1992 et novembre-décembre 1992. Source : Estèbe (1996).

I.2.2. Occupation des sols

L'Homme occupe le bassin versant de la Seine depuis la préhistoire, mais c'est depuis l'Antiquité que l'on considère qu'il a modifié significativement l'environnement qui porte aujourd'hui les traces d'une occupation plurimillénaire croissante (Rouillard *et al.*, 2011).

I.2.2.a. Aménagements et occupation du bassin versant

L'agriculture se développe dans le bassin de la Seine dès le Néolithique au détriment des milieux forestiers qui sont également réduits pour les besoins des demandes de bois (chauffage, construction, industrie...). Parmi les activités industrielles, on peut citer la métallurgie avec l'exploitation du minerai de fer et la sidérurgie sur les bordures du bassin parisien dès l'Antiquité jusqu'à la fin du XIX^e siècle. L'industrie du textile et du cuir, ainsi que la verrerie et la céramique se développe progressivement à partir du Moyen Âge central (XI^e siècle). Ces industries sont alors principalement installées dans les villes rurales (Rouillard *et al.*, 2011).

Aujourd'hui, le bassin de la Seine est occupé par 16 millions d'habitants, dont environ les deux tiers (~10 millions) vivent en région parisienne (Figure I.7) (Billen & Garnier, 2009; Viennot *et al.*, 2009). En dehors de l'auréole urbaine de l'agglomération parisienne, la population se concentre le long des grands affluents avec des villes comme Reims, Troyes, et de son embouchure avec Poses/Rouen et Le Havre, (Figure I.7).

On peut évaluer la part du bassin versant occupé par les zones artificialisées à 7 % de la superficie totale du bassin versant de la Seine, à 67 % celle utilisée par l'agriculture et à 26 % pour les forêts et milieux semi naturels (GIP-Seine-Aval, 2013). L'agriculture est principalement dédiée à la production céréalière (Billen *et al.*, 2009; Schott *et al.*, 2009) avec des territoires agricoles répartis sur l'ensemble du bassin. (Figure I.8). Si les activités minières ont cessé à la fin du XIX^{ème} siècle, l'activité industrielle a explosé depuis la révolution industrielle et est concentrée dans ces zones densément peuplées et urbanisées (Horowitz *et al.*, 1999; Thévenot *et al.*, 2009).

Les bassins versants de la Seine supérieure et de ses affluents majeurs sont principalement occupés par des territoires agricoles, forêts et milieux semi-naturels (Figure I.8). L'occupation humaine et les activités industrielles sont concentrées le long des corridors fluviaux et augmentent à l'approche des confluences avec la Seine, autour de Sens et Troyes sur l'Yonne, de Meaux sur la Marne et de Creil sur l'Oise.

En plus des affluents majeurs, la Seine comprend de nombreux tributaires dont la contribution hydrologique est faible, mais qui sont très sensibles à l'occupation humaine en raison de leur plus faible capacité à diluer les différents polluants. Parmi ceux-ci, on peut citer les petites rivières urbaines, généralement définies comme des rivières de petite taille dont une grande partie du bassin est urbanisée (Carré *et al.*, 2011). Ces rivières comprennent notamment l'Orge, la Bièvre, le Grand Morin et l'Essonne.

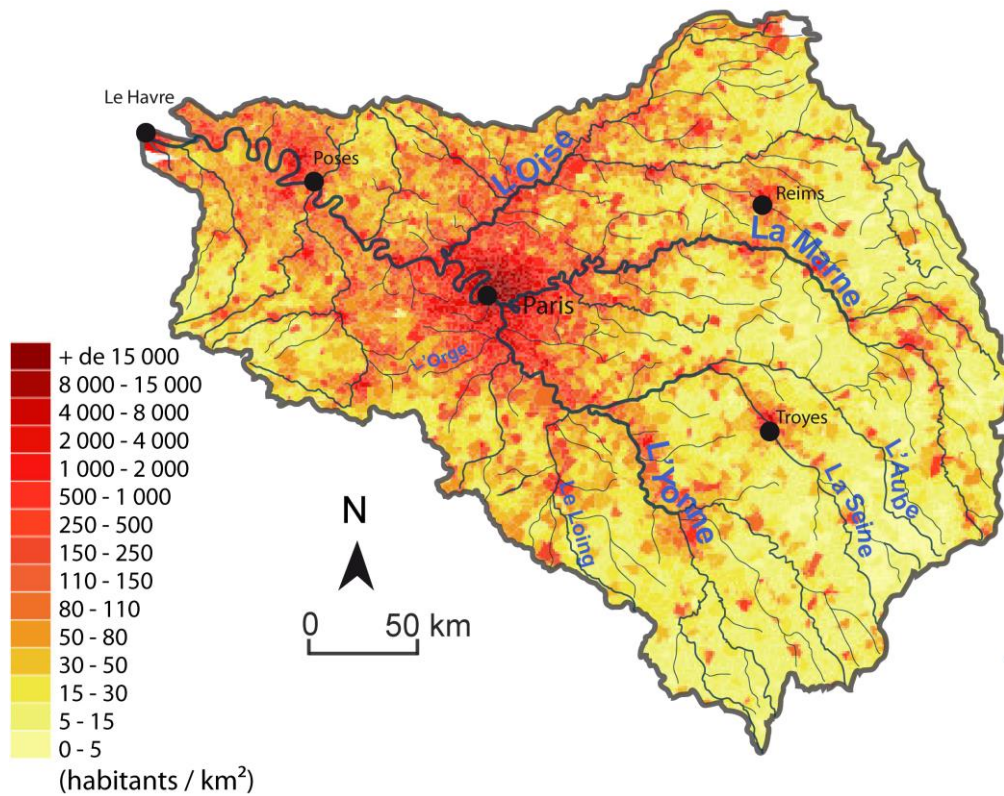


Figure I.7 : Densité de population dans le bassin versant de la Seine. (Source : INSEE, 2011)

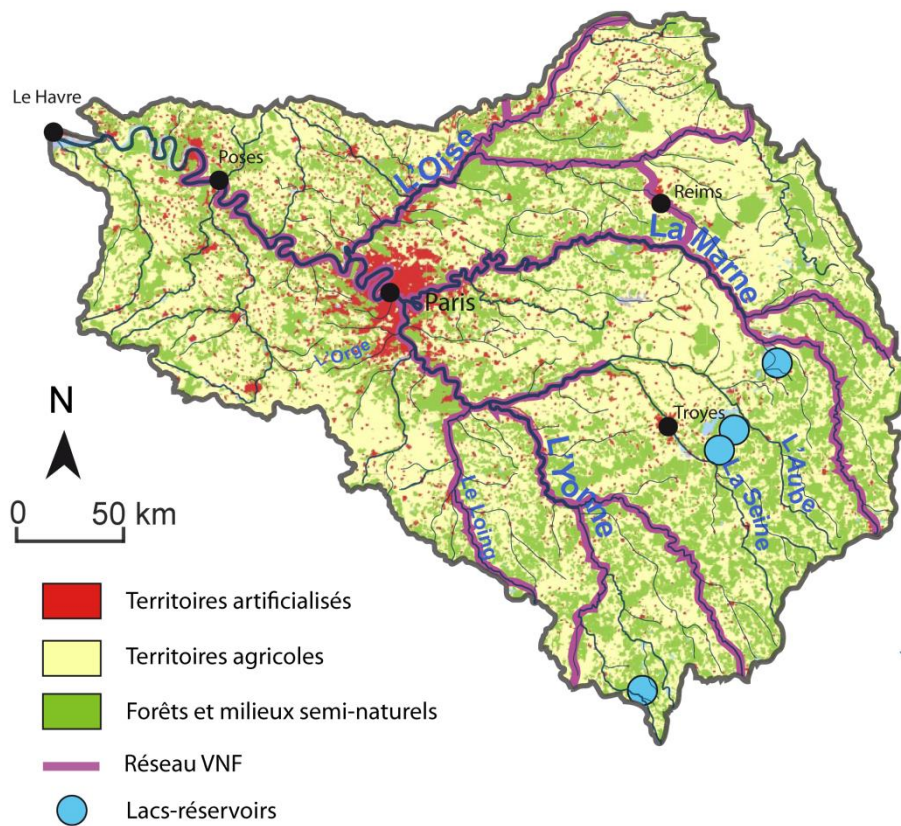


Figure I.8 : Carte simplifiée de l'occupation des sols (source : Corine Land Cover), du réseau des Voie Navigables de France (VNF) et localisation des lacs-réservoirs.

I.2.2.b. Aménagements et occupation du réseau hydrographique

Bien avant le Moyen Âge, plusieurs moulins hydrauliques ont été installés pour répondre aux besoins agricoles et domestiques (Rouillard *et al.*, 2011). Les premiers aménagements des berges apparaissent au Moyen Âge et débutent par des retraits d'obstacles pour la navigation et le transport de bois flotté de l'amont de la Seine jusqu'à Paris. Les premiers canaux de dérivations sont creusés à partir de la fin du XVII^e siècle entre Troyes et Montereau-Fault-Yonne. Les rectifications du lit mineur naturel s'intensifient à partir de la moitié du XIX^e siècle : le fond du lit est creusé pour faciliter la navigation lors des étiages. De plus, les berges sensibles à l'érosion sont renforcées grâce à un système d'enrochements (Boyer, 2000). La navigation, précédemment intermittente (160 jours par an) et gérée par un système d'écluses, est améliorée grâce à l'augmentation du nombre de ces dernières et l'installation de plusieurs barrages. Le mouillage minimum est alors d'1,60 m ce qui permet de maintenir une navigation continue (Boyer, 2000). La morphologie d'une grande partie des chenaux a été profondément modifiée pour permettre le passage des barges de grande taille en toute saison alors que dans la partie amont du cours de la Seine, les méandres sont toujours naturels et actifs (Dzana & Gaillard, 1996; Dzana, 2000). Les levées bathymétriques du lit de la Seine à Paris montrent des sections rectangulaires (Chauvet, 2014) qui peuvent significativement modifier les mécanismes d'écoulement et de transport sédimentaire.

Aujourd'hui, la Seine accueille à elle seule la moitié du trafic fluvial national (A.E.S.N., 1978). La Seine supérieure (en amont de la confluence de l'Aube) et l'Aube sont relativement peu aménagées en comparaison du reste du réseau hydrographique. La navigation commence sur la Seine à partir de la Bassée (partie de la Seine entre les confluences de l'Aube et l'Yonne). Elle s'effectue d'abord principalement sur des canaux en dérivation et la navigation sur la Seine elle-même devient importante à partir de Villiers-sur-Seine. L'Yonne, la Marne, l'Oise sont presque entièrement aménagées pour la navigation. Une partie de la navigation s'effectue également sur le canal du Loing, affluent mineur qui se jette dans la Seine quelques kilomètres en aval de la confluence de l'Yonne.

Entre 1950 et 1990, quatre grands lacs-réservoirs sont mis en place sur le réseau amont de la Seine dans le but de soutenir les débits d'étiage et d'écrêter les crues (voir Figure I.8) : Le lac de Pannecière sur l'Yonne, le Lac d'Orient sur la Seine, le lac du Der-Chantecoq sur la Marne et le lac du Temple et Amance sur l'Aube (Tableau I.4). Les débits d'étiages sont ainsi régulièrement soutenus afin d'obtenir un débit supérieur à 100 m³/s à Paris (Billen & Garnier, 2009; Viennot *et al.*, 2009) les pics de crue à Paris sont en moyenne diminués de 10 % (Deleplancque, 2016).

Outre la navigation, le réseau hydrographique est utilisé pour différentes activités, réparties inégalement sur le réseau selon le type d'activité (Figure I.9). Les parties de la Seine en amont et en aval de la région Île-de-France (région parisienne) sont utilisées pour la production d'énergie, la pêche et l'extraction de granulats. La Seine en région parisienne est principalement utilisée pour les loisirs nautiques, les industries et le logement des bateaux.

Tableau I.4 : Caractéristiques des lacs-réservoirs du bassin de la Seine. Source : Viennot *et al.* (2009) et ETPB Grands Lacs.

Lac-réservoir	Cours d'eau	Capacité de rétention	Débit de restitution d'été
Pannecière	Yonne	80 millions de m ³	6 m ³ /s
Orient	Seine	200 millions de m ³	18 m ³ /s
Der-Chantecoq	Marne	350 millions de m ³	30 m ³ /s
Temple et Amance	Aube	170 millions de m ³	14 m ³ /s

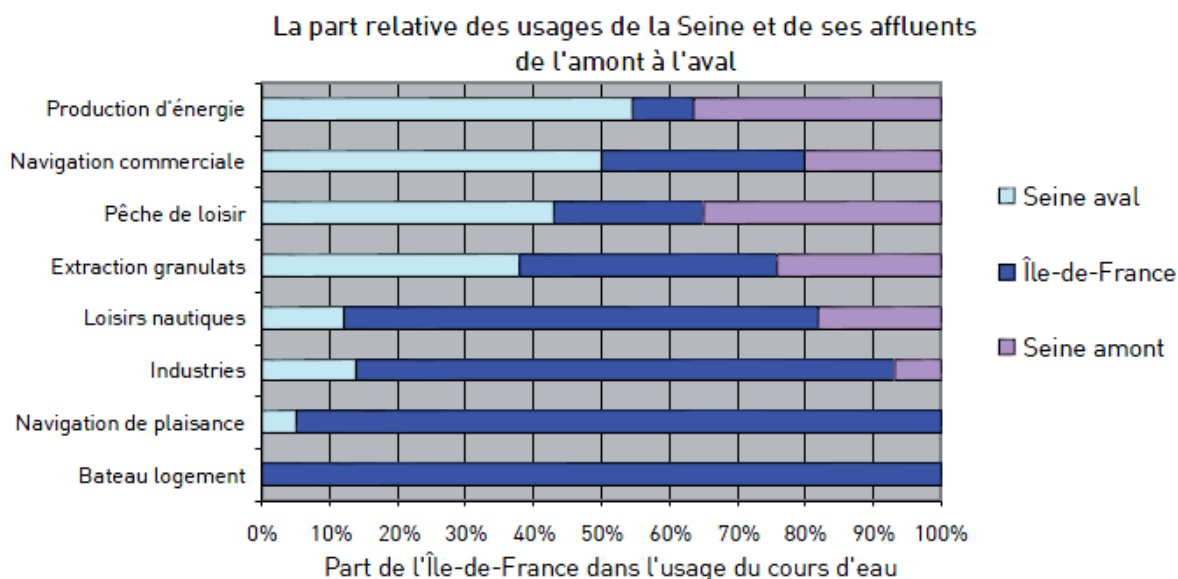


Figure I.9 : Utilisation du cours d'eau de la Seine et de ses affluents. Source : Carré *et al.*, (2011).

Le fonctionnement naturel de la Seine est ainsi fortement affecté par les différents aménagements et activités présentés ci-dessous. Les pratiques agricoles favorisent la diminution de la résistance des sols à l'érosion lors de la migration du cours d'eau. La navigation entraîne une remobilisation des sédiments de fond qui n'aurait naturellement pas lieu lorsque les débits sont en dessous du seuil de remobilisation hydraulique (Vilmin, 2014).

De plus, la qualité de l'eau de la Seine est affectée par les différents aménagements de l'Homme. En réponse à cette pression anthropique, un important réseau d'assainissement a été mis en place. Dans la majeure partie du bassin, l'assainissement est collectif et effectué localement, tandis que dans l'agglomération parisienne, l'assainissement des eaux est assuré par le Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne (SIAAP). Les usines du SIAAP comprennent les stations Marne Aval (située à Noisy-le-Grand), Seine Amont (Valenton), Seine Morée (Blanc-Mesnil) Seine Centre (Colombes), Seine Aval (Achères) et Seine Grésillons (Triel-sur-Seine). La station d'épuration Seine Aval, située 80 km en aval de Paris témoigne de la quantité de traitement nécessaire en se classant première usine de traitement européenne et deuxième mondiale. Cette station traite à elle

seule 70 % des eaux usées de l'agglomération parisienne à raison de 1,7 millions de m³ par jour (source : <http://www.siaap.fr>).

I.2.3. Les ETM dans la Seine et son bassin versant

La forte densité de population et l'activité industrielle dans l'agglomération parisienne ainsi que les pratiques agricoles sur de larges surfaces, couplées à la faible capacité de dilution de la Seine et de ses affluents rendent l'ensemble de son réseau hydrographique très sensible à la pollution dont les sources peuvent être nombreuses (déchets organiques, hydrocarbures, métaux, etc.).

Si dans le bassin de la Seine, l'utilisation du fer remonte à l'Antiquité, l'utilisation des métaux comme le zinc, le cadmium, le cuivre ou le plomb s'est fortement intensifiée dans le bassin de la Seine lors de la révolution industrielle entre les XVIII^e et XIX^e siècles. L'étude de l'impact de la contamination métallique dans la Seine s'est développée depuis les années 1970 (Thévenot *et al.*, 2009).

Actuellement de nombreuses préoccupations sont liées aux ETM. Dans les eaux et les sols, les principales sources de ces ETM peuvent varier selon les éléments, et bien que les activités agricoles, industrielles et domestiques soient autant de sources d'émission d'ETM dans l'environnement, il est encore difficile de quantifier l'importance de ces sources pour les différents éléments et les différents flux sont probablement sous-estimés (Figure I.10). Les flux industriels sont probablement moins bien estimés que les autres en raison de la difficulté d'accès aux données (Thévenot *et al.*, 2009). Les données actuelles semblent toutefois montrer que les rejets d'origines domestiques contribueraient à plus de la moitié des ETM particuliers et dissous (au moins pour le cadmium, le cuivre, le mercure, le plomb et le zinc) de la Seine à Poses.

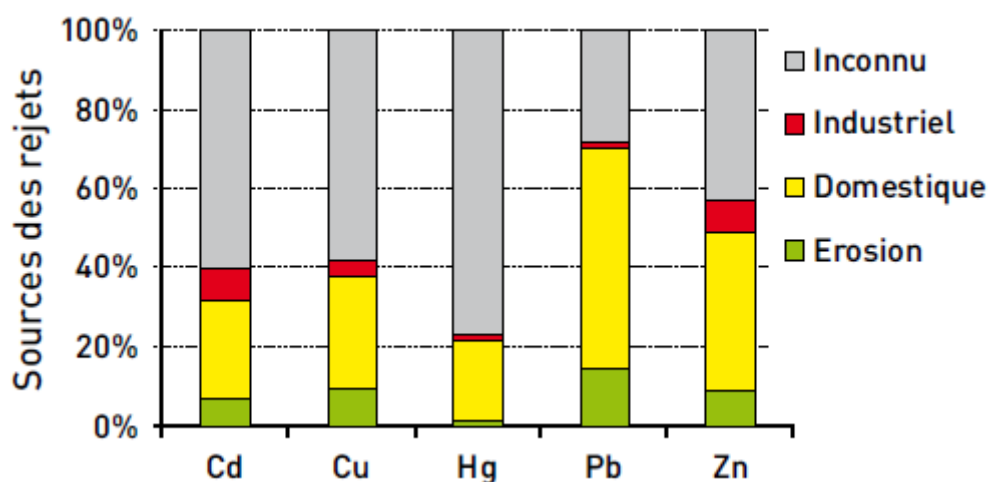


Figure I.10 : Estimation des principales sources d'apports métalliques (particulière et dissous) du bassin de la Seine à Poses. Source : Thévenot *et al.*, (2009).

Bien que les activités agricoles puissent être des sources potentielles d'ETM, (Thévenot *et al.*, 2009), l'enrichissement en ETM dans les MES de la Seine n'augmente pas significativement lors de passage de milieux forestiers à ruraux (Figure I.11). En revanche, l'enrichissement en ETM augmente significativement dans les MES lorsque la Seine traverse les zones d'agglomérations.

De manière générale, les principales sources d'ETM se situent dans les zones de forte agglomération (Figure I.11). Dans les zones urbaines, de nombreux métaux sont libérés dans l'atmosphère par les activités industrielles et automobiles lors de combustions d'ordures ménagères, d'essence et de charbons (Thévenot *et al.*, 2009; Ayrault *et al.*, 2010; AIRPARIF, 2014). Les particules les plus grosses se déposent à proximité alors que les plus fines peuvent être disséminées sur de larges surfaces et seront collectées dans le réseau des eaux usées par le ruissèlement lors des pluies. Une autre fraction provient du ruissèlement sur les toitures (notamment le zinc) ou de la circulation des eaux dans les tuyauteries en cuivre.

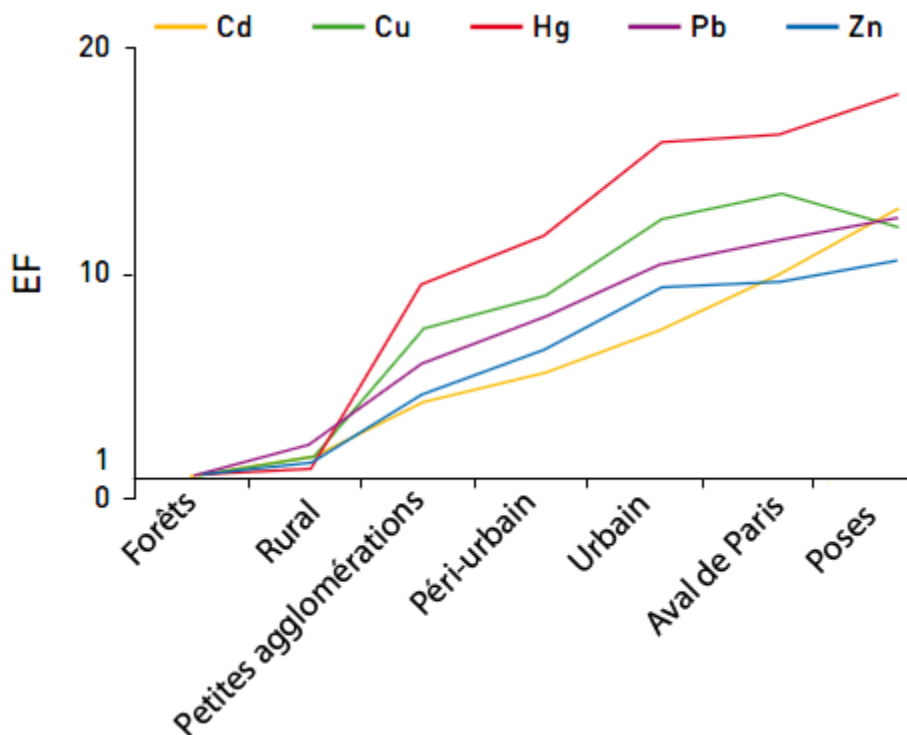


Figure I.11 : Evolution du facteur d'enrichissement (EF) du cadmium, du cuivre, du mercure, du plomb et du zinc dans les matières en suspension de la Seine en fonction de l'occupation du bassin versant. D'après Thévenot *et al.* (2009).

Les rejets de stations d'épuration reflètent, malgré les traitements, l'impact de l'urbanisation des sols, de l'agglomération et de l'industrie sur l'enrichissement des ETM dans la Seine (Thévenot *et al.*, 2009). Ceci est dû en partie au fait que ces stations reçoivent des eaux fortement contaminées et que le rendement d'épuration n'est pas suffisant pour permettre un retour à des concentrations naturelles. De plus, les étapes d'épuration ne sont généralement pas conçues pour éliminer la totalité des métaux, ou ne peuvent tout simplement pas traiter la

totalité des eaux usées. Par exemple, les eaux du réseau d'assainissement de la ville de Paris proviennent du réseau unitaire qui collecte le ruissèlement des toitures et des chaussées, les eaux usées et les dépôts du réseau remis en suspension lors d'évènements pluvieux. Ces eaux sont généralement traitées en station d'épuration, mais en cas d'évènement pluvieux exceptionnel, elles sont rejetées directement dans les eaux de la Seine.

Dans le cas de la station Seine Aval, le rendement total d'épuration sur les métaux est en moyenne de 75 % (Thévenot *et al.*, 2009) et le traitement concerne essentiellement la fraction particulaire (Figure I.12). Les fractions dissoutes et labiles sont moins retenues. Par ailleurs, certaines étapes de traitement des eaux usées consistent à ajouter des réactifs qui peuvent être une source potentielle de métaux. C'est le cas notamment de l'étape de clarifloculation, qui consiste à ajouter du chlorure ferrique (FeCl_3) pour provoquer une floculation des déchets et une élimination des phosphates (Figure I.12a). Dans le cas du nickel, la concentration totale des eaux rejetées dans la Seine est identique à celle d'entrée en station (Figure I.12b), car l'ajout de chlorure ferrique compense l'efficacité de traitement (Thévenot *et al.*, 2009).

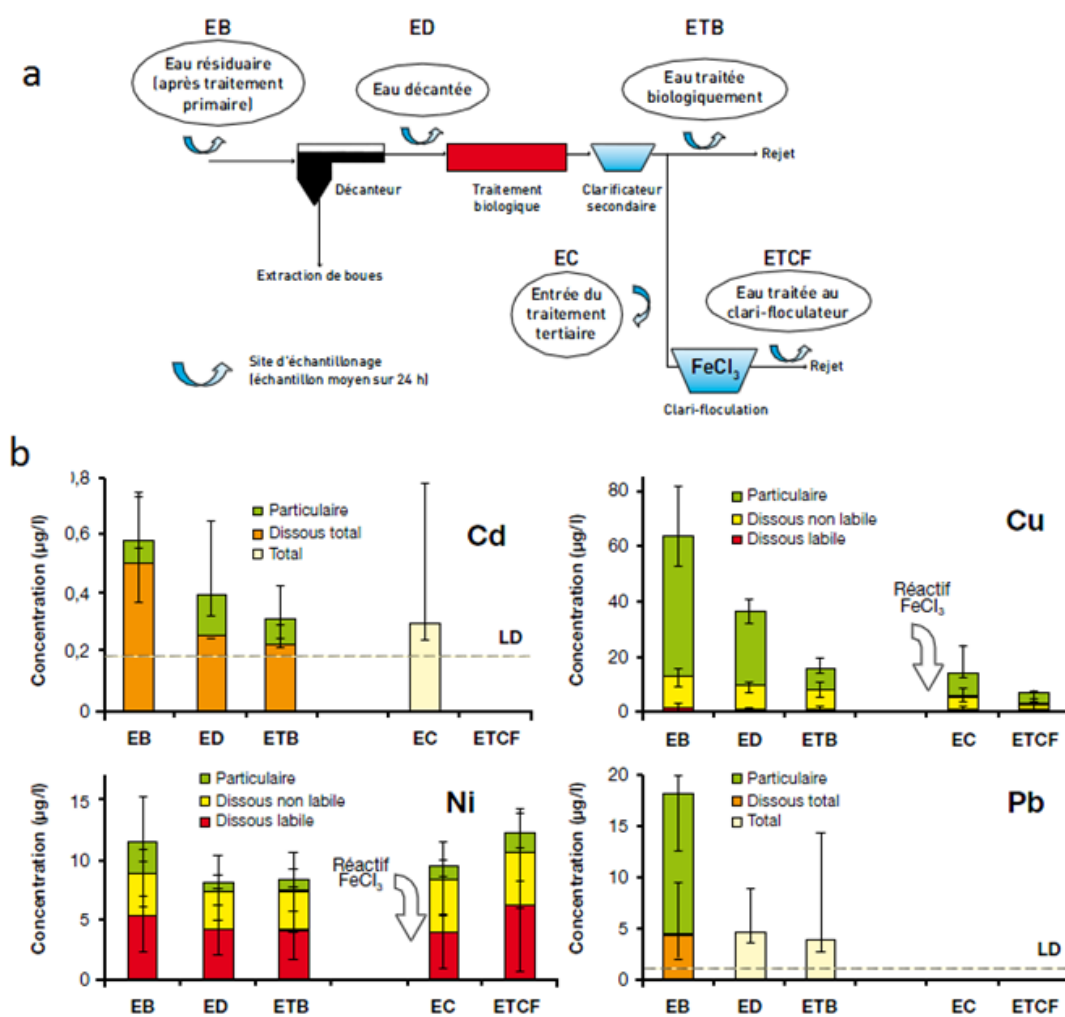


Figure I.12 : Effet des traitements des stations d'épuration sur les concentrations de métaux particulaires et dissous des eaux usées (Exemple de la station Seine Aval). (a) : schéma des différentes étapes de traitement. (b) concentration de cadmium, cuivre, nickel et plomb des eaux usées entre les différentes étapes de traitement avant d'être rejetées dans la Seine. Source : Thévenot *et al.*, (2009).

Dans les petites rivières urbaines de la Seine, la forte pression anthropique, couplée au très faible débit des rivières entraîne des concentrations importantes en contaminants. De ce fait, plusieurs études se portent sur les concentrations en ETM dans ces rivières, notamment l'Orge (Mouchel *et al.*, 2008; Carré *et al.*, 2010; Le Pape *et al.*, 2012, 2013; Ayrault *et al.*, 2014). Dans les MES de l'Orge, les facteurs d'enrichissements des ETM sont supérieurs à ceux de la Seine à Poses (Thévenot *et al.*, 2009).

Selon les différentes études, la caractérisation des ETM dans la Seine peut être générale (Tessier, 2003; Meybeck *et al.*, 2004; Thévenot *et al.*, 2009; Ayrault *et al.*, 2010) ou spécifique à un ou plusieurs métaux, notamment le zinc (Chen *et al.*, 2009; Morin *et al.*, 2012; Bonnot, 2015), le plomb (Ayrault *et al.*, 2014), ou le cadmium (Chiffolleau *et al.*, 2001).

Meybeck *et al.* (2004) ont également proposé un paramètre permettant d'évaluer l'impact de la pollution métallique à partir du Metal Pollution Index (MPI). Ce paramètre additionne l'enrichissement (par rapport au bruit de fond) de 5 polluants métalliques communément étudiés dans les environnements aquatiques (cadmium, cuivre, mercure, plomb et zinc).

La Figure I.13 regroupe quatre exemples issus de la littérature d'évolution spatiale des éléments chimiques dans les MES de la Seine : le calcium, le zinc, l'antimoine et le MPI. Un MPI inférieur à 10 indique une faible contamination, tandis qu'un MPI supérieur à 50 indique une forte contamination.

La teneur en calcium dans les MES de la Seine mesurées par Tessier (2003) peut être utilisée comme indice de la signature naturelle. Elle tend à diminuer d'amont en aval (Figure I.13a), ce qui est cohérent avec l'installation progressive des aménagements et de l'urbanisation qui contribuent à la dilution de la fraction naturelle. Plus précisément, la teneur en calcium dans l'Aube et la Seine en amont de la confluence de l'Yonne autour de 20 % diminue en aval de cette dernière reste stable entre 12 et 15 jusqu'à Poses. Les teneurs de la Marne et de l'Yonne sont semblables à celles de la Seine en aval des confluences, contrairement à l'Orge dont la teneur en calcium est significativement plus faible (environ 2,5 %).

Les concentrations en certains ETM considérés comme polluants, comme le zinc (Figure I.13b), l'arsenic (Figure I.13c), ainsi que le MPI (Figure I.13d), tendent au contraire du calcium à augmenter d'amont en aval. Dans ces trois autres exemples, l'augmentation d'amont en aval n'est pas linéaire :

- Pour le zinc et l'antimoine, la confluence de l'Yonne marque un premier changement sur le cours de la Seine : la teneur en zinc double après la confluence (80 à 130 ppm en amont et 220 ppm en aval) tandis que celle de l'antimoine triple (de 0,5 à 1,5 ppm). En amont, la Seine traverse essentiellement des milieux naturels et agricoles. En aval, ces milieux diminuent progressivement au profit des milieux urbanisés et la navigation s'intensifie de même que les aménagements du cours d'eau. Ce changement d'environnement et le début d'urbanisation expliquent probablement l'enrichissement en ETM.
- Les valeurs des échantillons de MES de l'Orge (petite rivière urbaine) se démarquent de celles de la Seine en amont et en aval de la confluence avec de plus fortes teneurs de zinc (330 à 800 ppm) que celles de la Seine (inférieures à 280 ppm). Il en est de

même pour l'antimoine dont les teneurs sont en moyenne à 3 ppm dans l'Orge et entre 1,5 et 2 ppm dans la Seine. Le MPI de l'Orge est également beaucoup plus élevé (52) que dans la Seine en amont et en aval de la confluence (de 10 à 17).

- Un autre changement s'observe dans la Seine à partir de l'agglomération parisienne. Les échantillons prélevés dans la Seine au sein et en aval de l'agglomération montrent des teneurs en zinc et antimoine plus élevées que ceux prélevés en amont (à l'exception de l'Orge). Il en va de même pour le MPI qui monte à 23 à Paris jusqu'à 28 à Poses. On peut tout de même noter une diminution significative de la teneur d'antimoine à Poses (2,5 ppm) par rapport à celle de la sortie de l'agglomération (4,5 ppm) qui peut s'expliquer par une dilution due aux apports de l'Oise, une diminution de l'urbanisation ou une contamination des eaux saumâtres.

Le facteur « temps » est aussi étudié sur la question de l'évolution des ETM dans le bassin de la Seine. En effet, les conditions hydrologiques affectent directement le transport sédimentaire et peuvent fortement influencer sur la concentration et la composition des MES, et plusieurs études tendent à démontrer que la concentration des métaux dans la Seine varie dans le temps.

Sur le long terme, la concentration des contaminants métalliques tend à diminuer depuis le début des années 1980 (Meybeck *et al.*, 2004; Thévenot *et al.*, 2009; Ayrault *et al.*, 2014). Cette diminution est due d'une part à la réduction de l'utilisation des métaux toxiques et d'autre part à l'amélioration croissante des processus d'épuration des métaux lourds (Meybeck *et al.*, 2004).

A l'échelle saisonnière, la plupart des métaux issus des activités anthropiques voient leur concentration diminuer dans les MES de la Seine en période de crue par effet de dilution (Estèbe, 1996; Meybeck *et al.*, 2004; Thévenot *et al.*, 2009; Ayrault *et al.*, 2014). A Paris, Chen *et al.*, (2009) démontrent que le facteur d'enrichissement EF du zinc anthropique est, de même, inversement proportionnel au débit. En période de crue, il est compris entre 1,5 et 3 et entre 3 et 5,5 en étiage.

La Figure I.14 représente l'évolution du MPI de Meybeck *et al.*, (2004) dans le temps et selon le contexte hydrologique dans les MES de différents sites de la Seine. Si tous les sites montrent des valeurs de MPI plus élevées en étiage, les variations sont beaucoup plus prononcées ($\Delta\text{MPI} > 25$) dans deux sites : la Seine à Chatou (agglomération parisienne) et la Seine à Poses (estuaire). Ces deux sites sont les plus affectés par la contamination métallique (MPI entre 20 et 75).

Les trois autres sites se trouvent dans des zones moins urbanisées et moins impactés (MPI entre 5 et 25). Une légère augmentation du MPI s'observe en étiage mais les variations dues au changement de régime sont beaucoup plus faibles ($\Delta\text{MPI} < 10$) qu'à Chatou et à Poses.

Bien que les variations temporelles de la contamination métallique dues au régime hydrologique soient plus ou moins prononcées selon la pression anthropique exercée, la Seine joue un rôle majeur sur l'accumulation et la dilution des ETM.

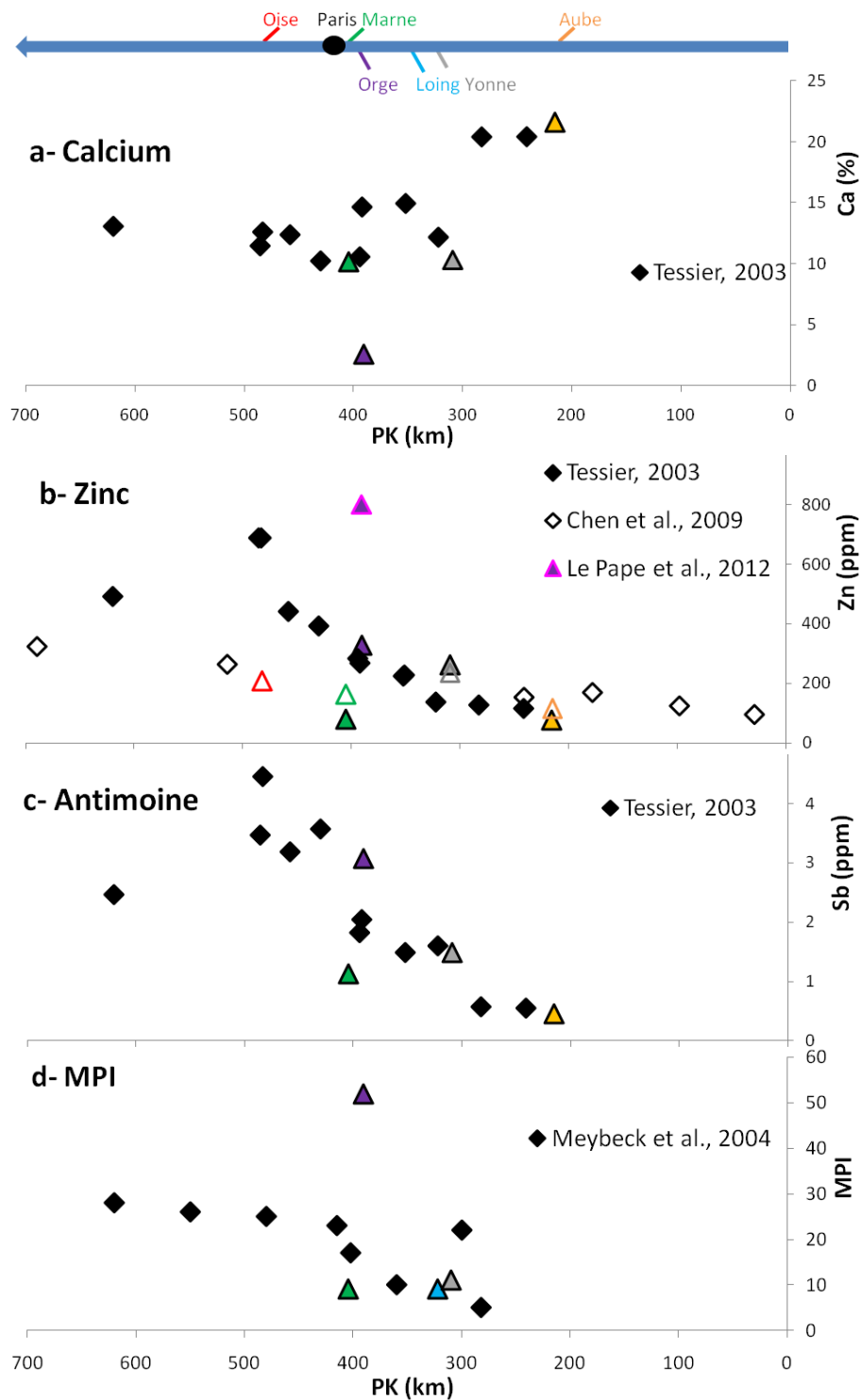


Figure I.13 : Exemples d'évolution des éléments chimiques dans les MES de la Seine et ses affluents. L'axe horizontal représente l'abscisse curviligne des sites d'échantillonnage par rapport à la source de la Seine (représentée par la flèche bleue). Les valeurs mesurées sur les affluents (représentés par des triangles colorés) correspondent à des sites localisés quelques kilomètres avant la confluence de la Seine. (a) Evolution du calcium. (b) Evolution du zinc. (c) Evolution de l'antimoine. (d) Evolution de l'index de pollution métallique (MPI). Valeurs issues des publications de Tessier, (2003), Meybeck *et al.*, (2004), Chen *et al.*, (2009) et Le Pape *et al.*, (2012). Les valeurs issues de Tessier sont obtenues en moyennant les mesures faites sur des MES prélevées à plusieurs périodes. Celles issues des autres publications correspondent à un échantillon de MES par site.

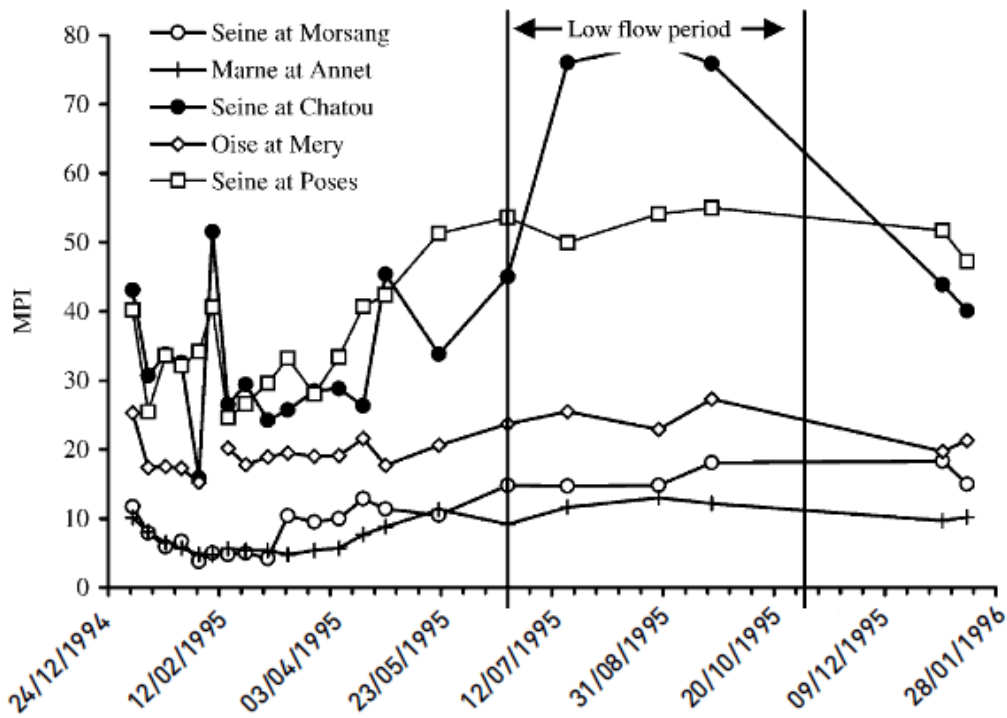


Figure I.14 : Variations temporelles de l'indice de pollution métallique (MPI) selon le contexte hydrologique dans les MES de la Seine à Morsang-sur-Seine (avant l'agglomération parisienne), à Chatou (partie aval de l'agglomération parisienne) et à Poses (estuaire) ainsi que dans la Marne et l'Oise. Source : Meybeck *et al.*, (2004).

I.2.4. Connaissances sur le fer dans la Seine

Plusieurs travaux ont été menés sur les variations de concentration en fer total ainsi que sur la caractérisation et la quantification des différentes phases ferrugineuses en Seine. Ces travaux permettent de commencer notre étude avec quelques informations importantes qui sont donc décrites dans cette partie en distinguant les informations obtenues avec les méthodes non magnétiques (ou ne s'intéressant pas aux propriétés magnétiques des particules) de celles obtenues avec les méthodes magnétiques.

I.2.4.a. Le fer dans la Seine d'après les outils chimiques et isotopiques

Contrairement aux ETM, la teneur du fer dans les MES est généralement de l'ordre du pourcent (ou de la dizaine de grammes par kilogrammes) (Boust *et al.*, 1999; Tessier, 2003; Priadi *et al.*, 2011). L'essentiel (99 %) du fer est transporté dans la Seine sous forme particulaire (Chen *et al.*, 2014a).

Selon des extractions séquentielles effectuées sur des MES de la Seine dans deux études distinctes (Boust *et al.*, 1999; Priadi *et al.*, 2011), le fer associé à la fraction échangeable (cations et carbonates) ne représenterait qu'au maximum 1 % du fer total. 5 à 15 % est associé à la fraction oxydable (matière organique et sulfures) et 19 à 43 % à la fraction réductible

(oxyhydroxydes comme la magnétite, hématite et goethite). Les 46 à 75 % restants correspondent à une fraction résiduelle ayant résisté aux extractions et étant constituée essentiellement de minéraux argileux (Figure I.15).

Bien que ces études semblent confirmer que le fer des MES est essentiellement présent dans les oxydes et les minéraux argileux, la Figure I.15 montre que la répartition du fer entre ces deux pôles diffère le long de la Seine. En amont de la Seine à Marnay (Figure I.15a) et en aval dans la limite estuarienne à Poses (Figure I.15d), les proportions de fer présent dans les oxydes sont respectivement de 15 à 19 % et de 70 à 75 % dans la fraction résiduelle. Dans l'agglomération parisienne, les MES de la Seine à Bougival (Figure I.15b) et Triel (Figure I.15c), situés respectivement en amont et en aval des rejets de la station Seine Aval et de la confluence de l'Oise, la proportion de fer présent dans les oxydes augmente (42 à 43 %) et celle du fer de la fraction résiduelle diminue (46 à 50 %).

De plus, la teneur en fer particulaire total tend à augmenter dans les sites de l'agglomération parisienne : elle passe de 2,1 % à Marnay à 3,4 % à Bougival et Triel puis redescend légèrement (à 2,8 %) à Poses. Ces résultats semblent indiquer que les variations de teneur en fer particulaires sont contrôlées par des enrichissements ou pertes d'oxydes de fer.

D'après ces deux études, la concentration et la distribution du fer dans les MES est sensiblement affectée par l'agglomération parisienne et semble retrouver à Poses des valeurs intermédiaires entre la signature amont/rurale de la Seine et la signature de l'agglomération parisienne. Ceci peut être dû à un effet de dilution de la pression anthropique à la sortie de l'agglomération, dû au fait que la Seine traverse ensuite essentiellement des territoires agricoles et/ou à la contribution des eaux saumâtres lors des montées de marée.

D'après les résultats de Priadi *et al.*, (2011) les apports de l'Oise et les rejets de la station d'épuration ne semblent affecter significativement ni la concentration, ni la distribution du fer des MES de la Seine.

Une méthode d'estimation de l'impact du fer d'origine anthropique dans la concentration en fer particulaire a été proposée par Boust *et al.* (1999) en comparant la concentration des MES à Poses dans des sédiments datant d'avant l'ère industrielle et des dépôts actuels. Selon cette estimation, environ 36 % du fer dans les MES de Poses serait d'origine anthropique.

La Figure I.16a regroupe les teneurs en fer (en %) mesurées dans les MES le long de la Seine par Chen *et al.* (2014b). Les MES ont été prélevées en février 2006 (période de début de crue hivernale). Au premier ordre, la teneur en fer est faible à l'amont avec des valeurs autour de 1,8 % à Buncey (proche de la source de la Seine) puis elle atteint rapidement des valeurs autour de 3,5-4, % avant la confluence de l'Aube. Dans l'ensemble, les teneurs de fer mesurées par Chen *et al.* sont plus élevées que les teneurs mesurées par Priadi *et al.* (2011), même en tenant compte pour ces derniers des écart-types. La comparaison n'est toutefois pas directement possible car les données de Priadi *et al.* intègrent plusieurs échantillons pour chaque site, prélevés lors de différentes campagnes alors que celles de Chen correspondent à un prélèvement en montée de crue, là où la concentration de MES est maximum (Estèbe, 1996).

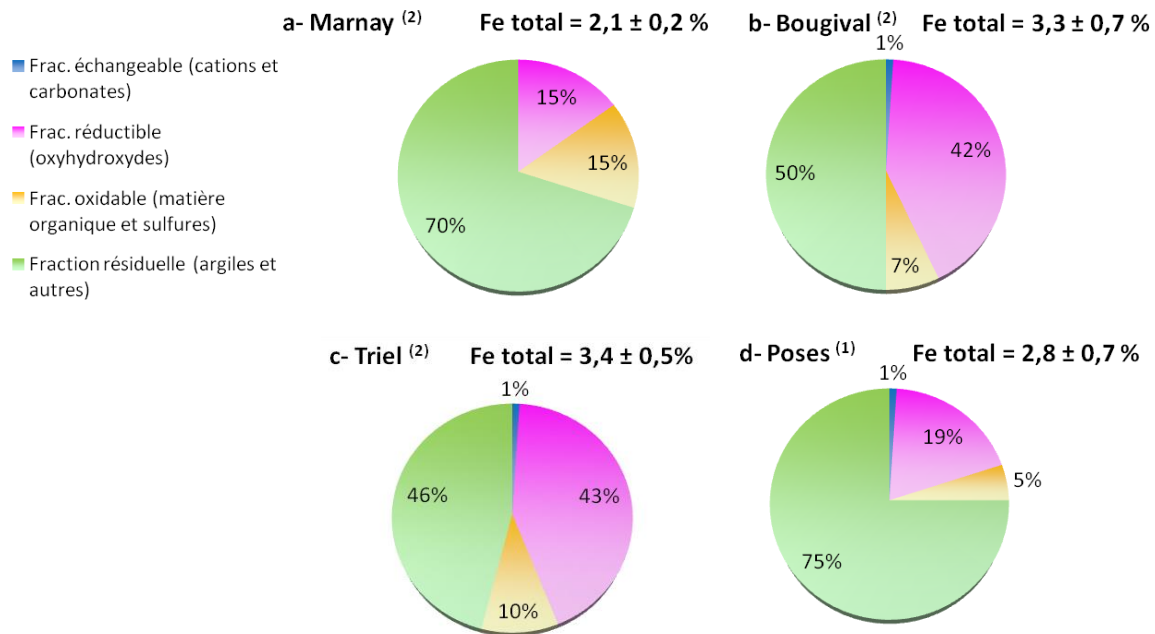


Figure I.15 : Distribution du fer dans les MES de Marnay-sur-Seine (partie amont et rurale de la Seine), Bougival (fin de l'agglomération parisienne avant Seine-Aval), Triel (après la station Seine aval et la confluence de l'Oise) et Poses (entrée en milieu estuarien). Résultats d'extraction séquentielle du fer d'après les données de 1 : Boust *et al.* (1999) et 2 : Priadi *et al.*, (2011).

La Figure I.16b présente l'évolution du facteur d'enrichissement (EF) du fer par rapport à l'aluminium dans ces MES. Dans l'étude de Chen *et al.* (2014b), les auteurs associent l'enrichissement en fer à la pollution anthropique qui contribuerait à un enrichissement de + 24 à 69 % (pour une moyenne de + 39 %). L'interprétation proposée par les auteurs est qu'une différence d'EF s'observe entre l'amont (plus faible) et l'aval de Paris (plus élevé), en excluant les points à l'amont pour lesquels les teneurs en Al sont deux fois plus faibles (0,7 %) que dans le reste du bassin (entre 1,2 et 1,6 %).

D'autres données existent sur l'évolution spatiale de la concentration en fer (Estèbe, 1996; Tessier, 2003), mais le nombre de points d'échantillonnage prélevés à la même période n'est généralement pas assez élevé, et un regroupement des différentes mesures de la littérature ne tient pas compte des possibles variations temporelles liées aux différences de régime hydraulique comme le montre la différence entre les données de Chen *et al.* (2014b) et Priadi *et al.* (2011).

Les quelques études sur la composition isotopique du fer dans les MES ne semblent pas montrer de signature distincte entre la fraction anthropique et la fraction naturelle. Des variations significatives dans la fraction dissoute permettent de faire un traçage environnemental mais celle-ci représente toutefois moins de 1 % du fer total (Chen *et al.*, 2014b).

Les études de variations temporelles du fer dans la Seine sont relativement peu nombreuses. A Paris, le flux de fer transporté est proportionnel à celui des MES. De ce fait, les concentrations de fer dans les MES sont relativement similaires quels que soient le régime hydrologique et la concentration de MES (Estèbe, 1996). Chen *et al.*, (2014b) observent en revanche, toujours à

Paris, que l'EF du fer est significativement plus élevé dans les MES de basses eaux (enrichissement de + 36-68 %) qu'en hautes eaux (enrichissement de + 24-40 %). Si l'on considère toujours que l'EF est un indicateur de la proportion de fer anthropique, on peut interpréter les observations d'Estèbe (1996) et de Chen *et al* (2014b) par le fait que si la concentration de fer total est relativement constante dans le temps, en période d'étiage, la concentration en fer anthropique est proportionnellement plus importante qu'en période de crue car, durant cette dernière période, le flux de fer naturel est plus important et dilue le flux de fer anthropique.

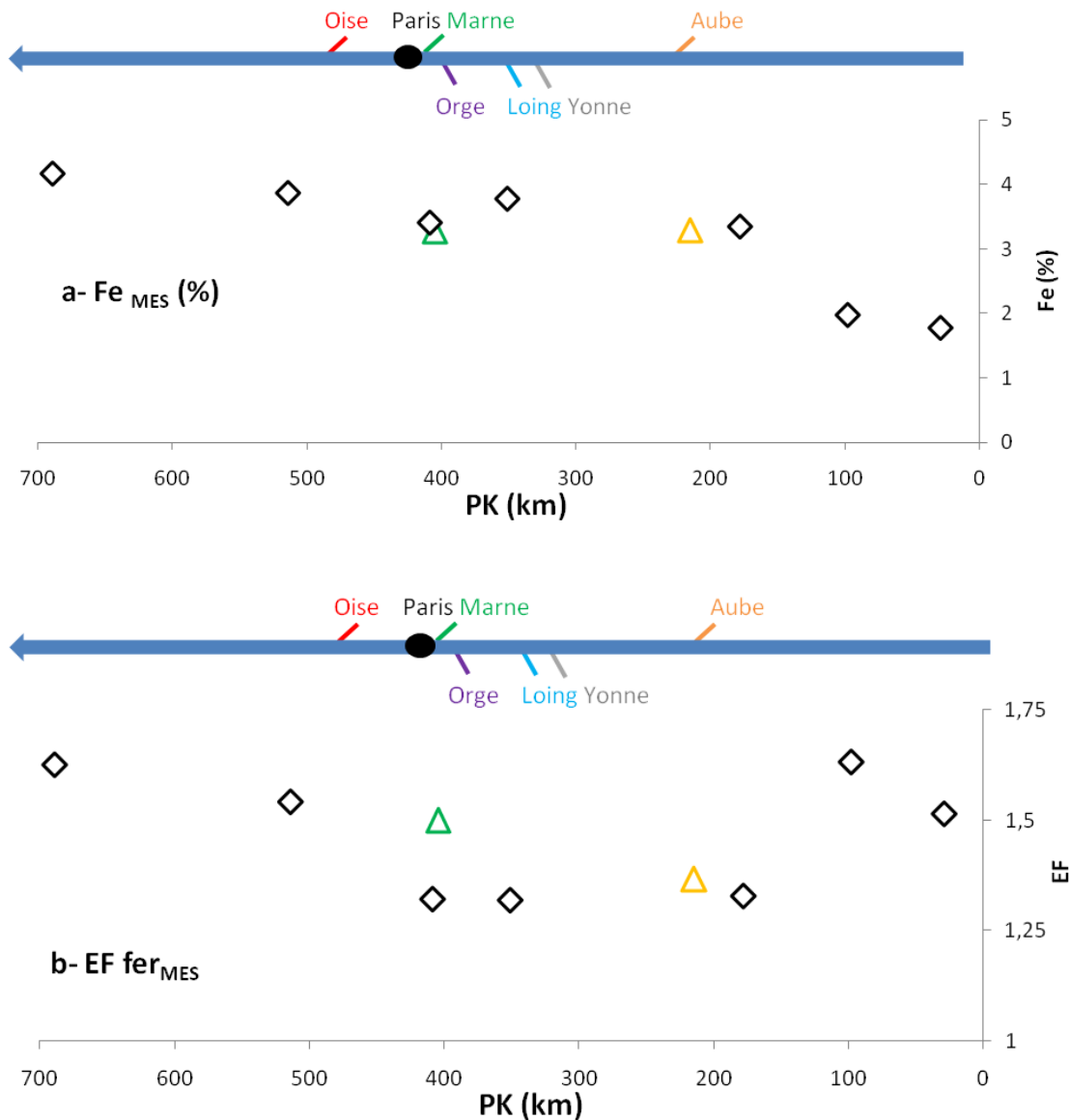


Figure I.16 : Evolution spatiale du fer dans les MES de la Seine et ses affluents. Valeurs issues des travaux de Chen *et al.* (2014b). Les abscisses représentent la distance curviligne des sites d'échantillonnage par rapport à la source de la Seine (PK = 0). Les valeurs mesurées sur les affluents (représentés par des triangles colorés) sont obtenues environ 20 km avant la confluence avec la Seine. (a) Teneurs en fer (en %) et (b) facteur d'enrichissement du fer par rapport à l'aluminium. Les MES ont été échantillonnées en février 2006 lors du début de crue hivernale.

1.2.4.b. Le fer dans la Seine d'après les études magnétiques

La large distribution du fer particulaire dans les eaux et sédiments du réseau de la Seine a suscité des études sur les particules ferromagnétiques présentes dans ce système.

Des travaux menés par Brillhante *et al.* (1989) ont évalué le potentiel de certains paramètres magnétiques à caractériser de possibles contaminations métalliques dans les MES. L'étude a porté sur des échantillons de sédiments, de dépôts de bords et de chaussée, d'eaux usées, de sols cultivés et de MES du bassin de la Bonde, situé dans le département de l'Eure. La susceptibilité magnétique et l'aimantation rémanente à saturation (à 1,5 T), des MES, interprétées comme indices de concentration de minéraux magnétiques (notamment la magnétite et la maghémite), ont été comparées aux concentrations en métaux lourds traçant la pollution et obtenues par absorption atomique sur les mêmes échantillons.

L'augmentation conjointe des deux fractions dans et au-delà des milieux urbanisés marquent les apports liés à la pollution (atmosphérique, lessivage des routes etc...). Une grande affinité entre les (hydr)oxydes de fer et les métaux tels que le zinc, le plomb et le cuivre a été de plus confirmé par ces auteurs qui ont montré que 80% des métaux sont inclus dans la fraction magnétique. Cette étude pionnière a donc permis de montrer que certains paramètres magnétiques constituent de bons traceurs de la pollution métallique en étant, en plus, relativement simples et rapides à obtenir en comparaison avec bien d'autres méthodes géochimiques. Cette étude, prometteuse était toutefois réalisée dans un contexte simple avec une seule rivière dans un petit bassin versant homogène d'un point de vue géologique.

Plus récemment, l'étude magnétique effectuée par Franke *et al.* (2009) sur des échantillons de MES prélevées dans le cadre de la thèse de Tessier (2003) a été plus exhaustive dans le bassin de la Seine. Dans cette étude, les propriétés magnétiques des MES de la Seine et de ses affluents ont été mesurées pour caractériser à l'échelle spatiale les variations minéralogiques, granulométriques et morphologiques des particules ferrugineuses. Les analyses magnétiques ont été couplées avec des observations au microscope électronique à balayage. Les résultats clés de cette étude sont :

- Une augmentation générale d'amont en aval de la concentration en particules magnétiques.
- Une augmentation dans le même sens de la taille de ces particules.
- Une distinction minéralogique entre la partie amont et la partie aval de la Seine. Si la magnétite est présente dans tous les échantillons de la Seine, les sites en amont de la Seine montrent une plus grande proportion de goethite, d'hématite et de titanomagnétites, considérées comme issues de l'érosion et altération des roches et sols. Il y a toutefois quelques exceptions, notamment un pic « hématitique » observé en aval des canaux de rejets de la station d'épuration Seine Aval qui soulève la question d'un possible impact des rejets ponctuels de stations d'épuration sur les particules ferrugineuses.

- Une variation spatiale de la proportion entre plusieurs classes d'oxydes magnétiques identifiées par microscope électronique à balayage. Les classes « naturelles » (Figure I.17b), notamment les oxydes de fer avec traces de titane voient leur proportion diminuer d'amont en aval au profit de celle des classes « anthropiques » (Figure I.17c) contenant notamment des oxydes de fer avec traces d'antimoine. Par ailleurs, les analyses au microscope électronique à balayage ont permis d'observer la présence de sulfures de fer non-magnétiques à température ambiante (pyrite).
- Parmi les affluents étudiés, l'Orge se distingue par ses propriétés comparables à celles des MES de la partie aval de la Seine.

Ces résultats ont permis de proposer une relation entre les propriétés magnétiques des MES et la pollution métallique. Les activités anthropiques contribuent notamment à l'augmentation de la concentration en minéraux magnétiques dans les MES, à une augmentation de leur taille et à une variation de la distribution minéralogique. Ces travaux utilisant les méthodes du magnétisme environnemental offrent des perspectives sur l'étude de la relation entre les phases ferrugineuses et les pollutions en ETM.

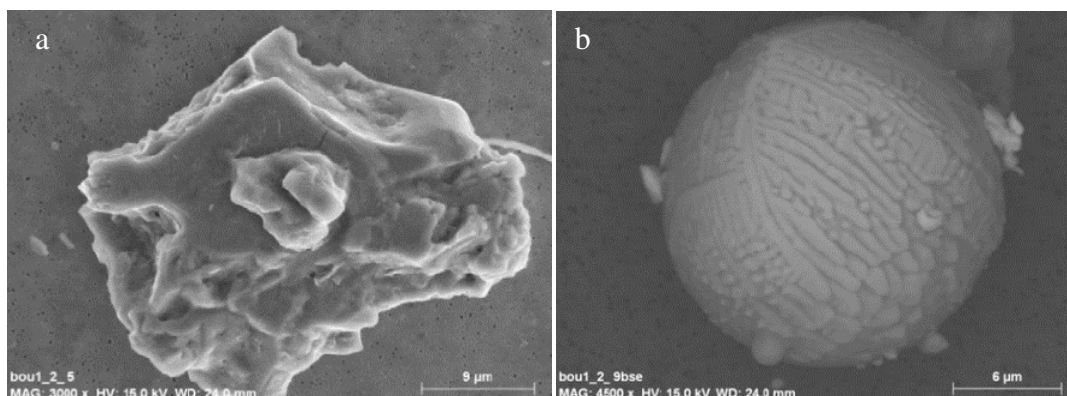


Figure I.17 : Exemples de particules magnétiques observées dans la Seine: (a) particule magnétique d'origine détritique et (c) sphérule anthropique d'oxyde magnétique (Franke *et al.*, 2013).

I.2.4.c. Discussions

Qu'il soit d'origine biogénique, détritique ou anthropique, le fer est présent sous forme d'oxydes magnétiques dans les MES de la Seine. L'étude de Franke *et al.* (2009), si elle apporte des réponses encourageantes quant à l'utilisation de ces techniques magnétiques dans les MES de la Seine soulève aussi de nombreuses questions :

- Les résultats obtenus ne nous renseignent que sur l'évolution spatiale. Toutes les mesures ont été effectuées sur des échantillons prélevés majoritairement au cours de l'été 2000 (avec quelques échantillons des étés 1999 et 2001) qui correspond d'après les données de la Banque Hydro à une période d'étiage (source : <http://www.hydro.eaufrance.fr/>). Cependant, les analyses minéralogiques et

géochimiques issues de la littérature montrant que les concentrations en nombreux métaux répondent aux variations hydrologiques du système, la question de l'impact de la saisonnalité sur la variabilité des particules magnétiques présentes dans les MES se pose. En raison de leurs origines multiples, les minéraux ferrugineux constituent un ensemble complexe dont l'évolution temporelle est intéressante à investiguer en utilisant les mêmes méthodes du magnétisme environnemental afin d'évaluer s'il existe des liens entre les différences de dynamiques de transport selon le régime hydrologique et les concentrations et types de minéraux ferrugineux.

- En revenant à l'échelle spatiale, les échantillons étudiés en 2009 ne représentent généralement qu'une seule mesure, effectuée sur un échantillon par site. Cette analyse pionnière demande à être approfondie, en particulier sur la question de la représentativité de ces échantillons.
- De plus, l'augmentation d'amont en aval de la concentration en minéraux ferrugineux a été décrite comme s'accompagnant d'une augmentation de leur taille. Ceci est observé au premier ordre mais l'examen du comportement général des métaux dans la Seine (voir Figure I.13), montre des fluctuations par paliers, en relation avec les confluences qui jouent probablement un rôle de dilution ou d'accumulation selon les teneurs en minéraux magnétiques et leur contribution hydrologique.

Plusieurs travaux ont été menés suite à ces résultats et nouvelles problématiques (Franke *et al.* 2013; Kissel *et al.*, 2014). La question de la variabilité saisonnière a notamment été abordée par Baati (2010) qui a étudié les propriétés magnétiques des MES de la Seine prélevées le long de la Seine dans deux périodes d'hiver (2000 et 2001) et une d'été (2001) et observé les minéraux magnétiques au MEB. Si un effet d'enrichissement de la fraction métallique anthropique en période estivale a pu être observé, l'auteur a souligné la nécessité d'un échantillonnage temporel plus conséquent. Cet échantillonnage multiple a de ce fait été effectué entre 2011 et 2012 par Konecny (2012) et constitue l'essentiel du support d'étude de cette thèse. La couverture spatiale et temporelle de cet échantillonnage sera décrit dans le Chapitre II.

Ces points font partie des questions qui sont abordées dans cette étude et auxquelles il est important de répondre afin de mieux comprendre les évolutions spatiotemporelles de la distribution des minéraux ferrugineux au cours du temps dans le bassin de la Seine.

Résumé et discussion

Parmi les différentes méthodes d'étude des minéraux ferrugineux existantes, le magnétisme environnemental s'applique dans de nombreux milieux et s'est montré adapté à l'étude des dynamiques dans les systèmes fluviaux ainsi qu'au traçage de l'impact de l'Homme.

Les rejets atmosphériques dus aux activités industrielles sont les plus enrichies en fer. Les particules ferrugineuses les plus grossières (généralement de 1 à 50 μm) émises par ces activités sont celles qui sont susceptibles d'être présentes dans les MES de la Seine. Toutefois, même si les rejets d'origine domestiques sont moins concentrés en fer, leur quantité considérable dans les zones de forte agglomération en font probablement la principale source d'ETM dans la Seine à Poses.

Les précédentes études montrent que l'urbanisation provoque un enrichissement de la fraction ferrugineuse dans les MES par ajout d'oxydes de fer (probablement issus de la combustion). Même si les activités agricoles ont probablement un impact sur la concentration de fer et d'ETM dans les MES, il semble que, dans le bassin de la Seine, cet impact soit négligeable par rapport aux rejets urbains et industriels.

Les études sur la contamination métallique dans le réseau de la Seine montrent deux points importants : l'existence de zones auxquelles sont associées des changements de conditions environnementales et un lien complexe entre les capacités de transport et la mise en suspension des sédiments de fond et donc des particules métalliques (ETM).

A partir de ces éléments, nous présentons dans le chapitre suivant le fonctionnement naturel des systèmes méandriformes puis la méthodologie que nous avons adoptée pour répondre aux questions de variabilité spatio-temporelle à partir de ces informations.

Chapitre II. Stratégie d'échantillonnage d'un système méandriforme anthropisé

Nous avons vu dans le précédent chapitre que la Seine et son bassin forment un système complexe. L'occupation des sols, la population et les aménagements autour et au sein de la rivière varient fortement. Le régime hydrologique et les dynamiques fluviales sont elles-mêmes fortement impactées par l'Homme. Par ailleurs, la Seine reçoit la contribution de différents affluents majeurs et mineurs, qui témoignent chacun d'un environnement spécifique.

La compréhension du fonctionnement général des systèmes méandriformes est nécessaire à notre étude, ceux-ci étant en effet très mobiles dans le temps, remaniant sans cesse les dépôts antérieurs et donc susceptibles de remettre en suspension des éléments piégés dans les dépôts de boucle de méandres ou dans ceux de la plaine d'inondation.

Après avoir compris le fonctionnement et les phénomènes clés dans ces systèmes, le choix des différents sites d'échantillonnage doit être logique et représentatif de l'évolution de la qualité de la Seine à l'échelle du bassin versant. L'eau étant le vecteur de transport des matières en suspension, les variations temporelles étudiées ne peuvent se résumer à un simple effet saisonnier, surtout dans un système où la nature n'a pas les pleins pouvoirs sur le fonctionnement du cours d'eau. Chaque échantillon prélevé à une période donnée doit donc être replacé dans son contexte hydrologique spécifique.

Toutes ces problématiques nécessitent une méthode d'échantillonnage adaptée à la quantité d'échantillons nécessaires et la forte occupation de la rivière. Les matières en suspension doivent ensuite être préparées pour les différentes analyses.

Ce chapitre présente toute la préparation nécessaire à notre étude avant d'appliquer toute mesure magnétique et se divise en trois parties. :

- La première partie est dédiée à une présentation de la dynamique des systèmes méandriformes auxquels appartiennent la Seine et ses affluents.
- La deuxième partie décrit la logistique mise en place d'après les informations de la première partie et du Chapitre I pour obtenir des échantillons et données répondant aux différentes problématiques de l'étude.
- La troisième partie traite des différentes méthodes de préparation des échantillons nécessaires avant l'application des différentes mesures magnétiques. Elle traite également des méthodes d'analyse non-magnétiques donnant des informations complémentaires et essentielles dans l'étude.

II.1. Fonctionnement des systèmes fluviaux méandriformes

La compréhension du fonctionnement de la Seine est complexe, car une grande partie du réseau hydrographique est aménagée. Les différents aménagements ont un impact sur l'hydrologie, avec l'écrêtement des crues et les soutiens d'étiage, sur la géométrie des cours d'eau, section des chenaux, stabilisation des berges qui vont avoir un effet sur l'évolution temporelle des méandres. L'évaluation de l'impact de ces aménagements sur le fonctionnement de la Seine, passe par une analyse de systèmes analogues (méandriformes) s'écoulant dans des milieux naturels non perturbés par les aménagements.

Les caractéristiques et mécanismes de base des systèmes méandriformes et de la charge sédimentaire ont fait l'objet de nombreuses études (Leopold & Wolman, 1960; Knighton, 1998; Bridge, 2003). Par souci de synthèse, nous nous limiterons dans cette partie à décrire les bases ainsi que quelques notions clés importantes dans le contexte de notre étude. Ces notions concernent notamment le transport sédimentaire dans les systèmes méandriformes et le fonctionnement de ces systèmes.

II.1.1. La charge sédimentaire dans les systèmes méandriformes

L'étude du transport sédimentaire est essentielle pour comprendre le fonctionnement d'un cours d'eau. Dans des conditions naturelles, la quantité de sédiment transporté jusqu'à l'estuaire dépend essentiellement de la surface drainée, de la géologie, du climat et du relief du bassin (Allen, 1965; Milliman & Syvitski, 1992; Delmas *et al.*, 2012). Au sein du cours d'eau, la charge sédimentaire reflète les mécanismes d'érosion, transport et dépôt.

Les mécanismes hydrodynamiques dépendent de la morphologie du système fluvial et influent donc sur la distribution de la charge sédimentaire dans le cours d'eau. Celle-ci varie sensiblement selon les types de cours d'eau et il est essentiel de définir les principes de base de la charge sédimentaire dans l'ensemble des systèmes fluviaux avant de se focaliser sur le cas des systèmes méandriformes.

La charge sédimentaire est communément séparée en différentes catégories selon plusieurs critères, dont notamment le mécanisme de transport. Dans la mesure où les fractions de la charge sédimentaire peuvent interagir entre elles, la définition des différentes charges sédimentaires évolue et varie selon les auteurs (Einstein, 1950; Hickin, 1995).

Les minéraux ferrugineux étant essentiellement transportés sous forme particulaire, nous ne parlerons pas de la charge dissoute qui par ailleurs n'affecte pas significativement la morphologie des systèmes fluviaux (Hickin, 1995).

II.1.1.a. La charge de ruissellement

La charge de ruissellement ou « wash load » est communément définie comme la charge sédimentaire particulaire en suspension qui est indépendante des variations

hydrologiques et hydrodynamiques, elle ne contribue pas à l'équilibre du lit du cours d'eau (Hickin, 1995; Knighton, 1998). Elle correspond à la charge en suspension dont la granulométrie est suffisamment fine pour être continuellement maintenue en suspension dans toute la colonne d'eau, quel que soit le débit. On considère que la taille des particules est généralement inférieure à 63 μm (Einstein, 1950; Sadeghi & Zakeri, 2015) soit essentiellement des argiles et des limons. La proportion de charge de ruissellement dans la colonne d'eau témoigne de la capacité de transport ainsi que de la disponibilité en sédiments mobilisables (Figure II.1).

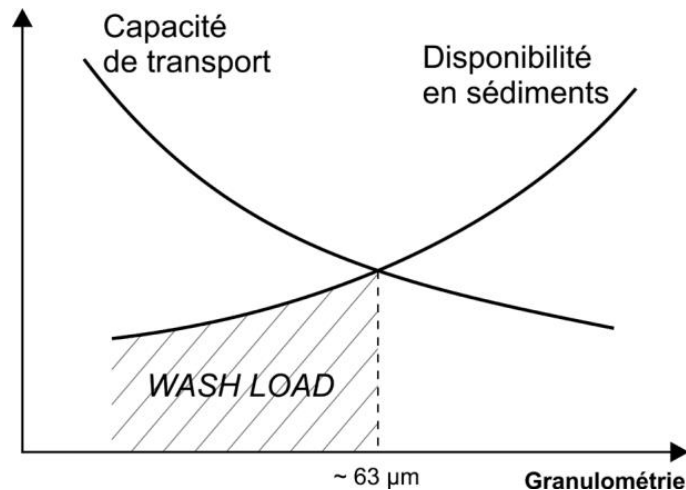


Figure II.1 : Evolution schématique de la charge de ruissellement (wash load) en fonction de la capacité de transport du cours d'eau et de la disponibilité en sédiments. Source : Van Campenhout *et al.* (2013), et références citées.

II.1.1.b. La charge en suspension

La charge en suspension (« suspended load ») correspond à la fraction de la charge sédimentaire qui est maintenue en suspension par les turbulences de l'écoulement, la vitesse de chute des particules correspondantes est alors trop faible pour qu'elles puissent se déposer sur le fond (Hickin, 1995). La taille des particules ainsi que la concentration de la charge en suspension tendent à diminuer de manière logarithmique du lit à la surface du cours d'eau (Figure II.2) La pente de la courbe est d'autant plus marquée que la granulométrie moyenne est grande.

Les particules transportées par saltation constituent un cas particulier entre la charge en suspension pure et la charge de fond (voir partie II.1.1.c). Elles se déplacent par bonds, et appartiennent alternativement à la colonne d'eau et au lit du cours d'eau. Elles appartiendront donc à l'une ou l'autre fraction de la charge sédimentaire selon le moment du prélèvement (Hickin, 1995). De manière générale, la charge en suspension augmente avec le débit, mais la relation n'est généralement pas linéaire (Williams, 1989; Hickin, 1995; Knighton, 1998). Les variations de concentrations de la charge en suspension sont généralement décalées : il en résulte alors un effet d'hystérésis (Figure II.3) comme observé dans la Seine (Estèbe, 1996).

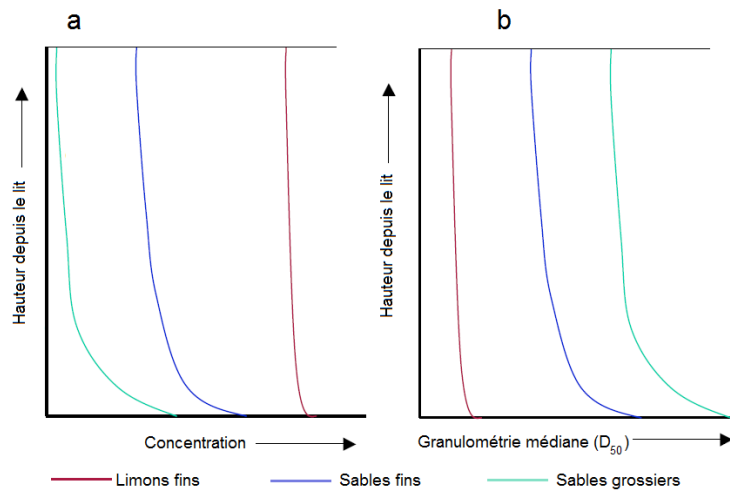


Figure II.2 : Profils verticaux schématiques (a) des concentrations en charge en suspension et (b) de la granulométrie médiane des différentes classes granulométriques. D'après Hickin, (1995).

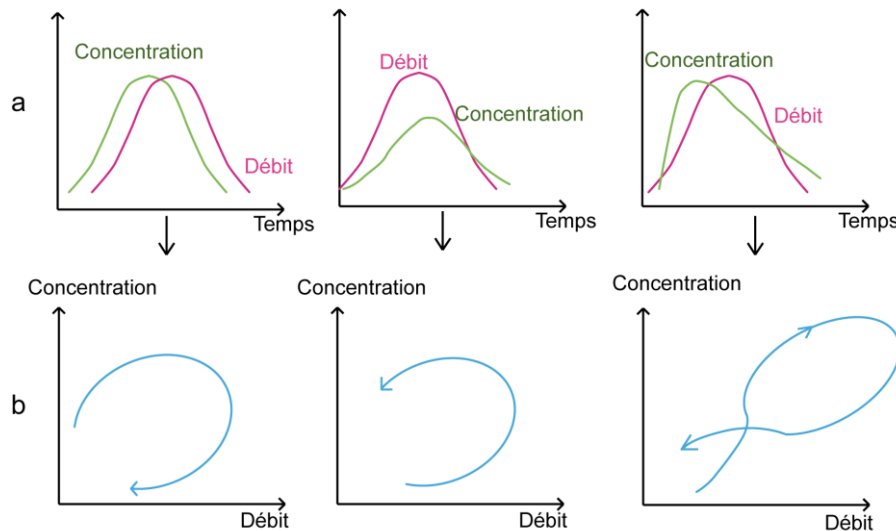


Figure II.3 : Effet d'hystérésis de l'évolution de la charge en suspension en fonction du débit. (a) courbes théoriques d'évolutions décalées de concentration en charge sédimentaire et de débit dans le temps et (b) courbes théoriques d'évolution de la charge sédimentaire en fonction du débit. Figures retracées d'après Williams (1989) et références citées. Note : la relation entre charge et suspension et débit de la Seine décrite par Estèbe (1996) correspond au cas de gauche.

II.1.1.c. La charge de fond

La charge de fond ou « bed load » regroupe l'ensemble des particules trop lourdes pour être mises en suspension et qui se déplacent au contact du lit de la rivière, par traction ou par roulement (Bridge, 1977; Hickin, 1995; Knighton, 1998). Comme indiqué ci-dessus, les particules se déplaçant par saltation appartiennent, selon le moment du prélèvement soit à la charge en suspension, soit à celle de fond.

II.1.2. Les systèmes méandriformes

II.1.2.a. Principales caractéristiques

Les systèmes fluviaux méandriformes sont les plus communs dans la nature avec les systèmes en tresses (Leopold & Wolman, 1957; Allen, 1965; Bridge, 2003). Ils se caractérisent par un chenal unique et une sinuosité prononcée (supérieure à 1,5, Figure II.4a). Les systèmes méandriformes se classent en position intermédiaire par rapport aux systèmes rectilignes et en tresses, en termes de stabilité, de taille et de quantité de sédiments transportés (Figure II.4a). Les cours d'eau méandriformes se forment généralement sur des pentes faibles à modérées (inférieures à 2 % et généralement autour de 1 ‰). Plus le débit est important, plus la pente nécessaire à la formation des méandres est faible (Figure II.4b) (Leopold & Wolman, 1957; Rosgen, 1994; Church, 1996; Paccaud & Roulier, 2010).

La quantité, la distribution de taille des particules sédimentaires et le mode de transport influent également sur la morphologie des cours d'eau. Dans les systèmes méandriformes, la charge sédimentaire est essentiellement composée de limons et de sables fins (Figure II.4a) soient des sédiments dont la taille des grains est comprise entre 4 et 250 μm (Wentworth, 1922).

La proportion de charge de fond, si elle peut être importante, n'est pas dominante et représente en général moins de 35 % de la charge sédimentaire totale. On distingue cependant deux modes de transport sédimentaire dans les systèmes méandriformes selon la proportion de la charge de fond (Schumm, 1963) :

- Le mode de transport « suspended load » où la charge de fond représente 0 à 15 % de la charge totale. Ce mode de transport concerne généralement les cours méandriformes aux chenaux étroits (rapport largeur/profondeur du chenal inférieur à 7) et fortement sinueux (sinuosité supérieure à 2,1).
- Le mode de transport « mixed load » où la charge de fond représente entre 15 et 35 % de la charge totale. Ce mode de transport est généralement présent dans les cours méandriformes aux chenaux plus larges et moins sinueux que pour le mode « suspended load » (Figure II.5).

Les méandres se développent au cours du temps. La berge de la rive externe est érodée et le matériel est transporté en aval où il sera en partie déposé dans les rives internes où les turbulences sont plus faibles en formant des barres sédimentaires de convexité (Figure II.6a). Lors du processus de migration des méandres, leur amplitude croît jusqu'à ce que les branches se recoupent par tangence, donnant alors naissance à un bras mort (boucle de méandre abandonné) (Figure II.6b). Lorsque la migration est libre, le chenal va balayer la plaine alluviale à la faveur de ces recouvrements de boucles de méandres (bande active), et des avulsions (vallée active) qui lors des crues permettent au cours d'eau d'emprunter un nouveau tracé suite à une rupture de levée et au développement d'un lobe de crevasse. De ce fait, dans un environnement sans contrainte comme une plaine alluviale, le tracé des méandres évolue progressivement : on parle de migration des méandres.

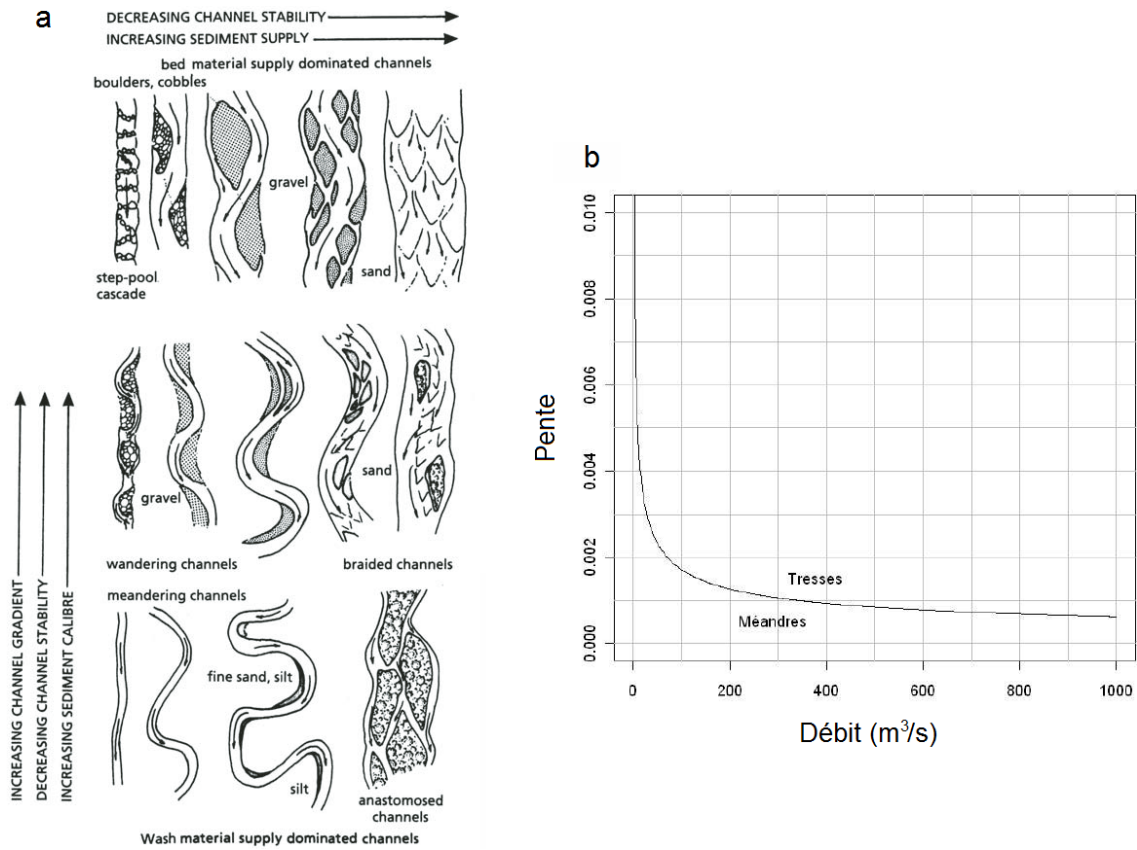


Figure II.4: (a) Classification morphologique des principaux cours d'eau, figure issue de Church, (1996). (b) Classification en fonction de la pente et du débit, figure issue de Paccaud & Roulier, (2010).

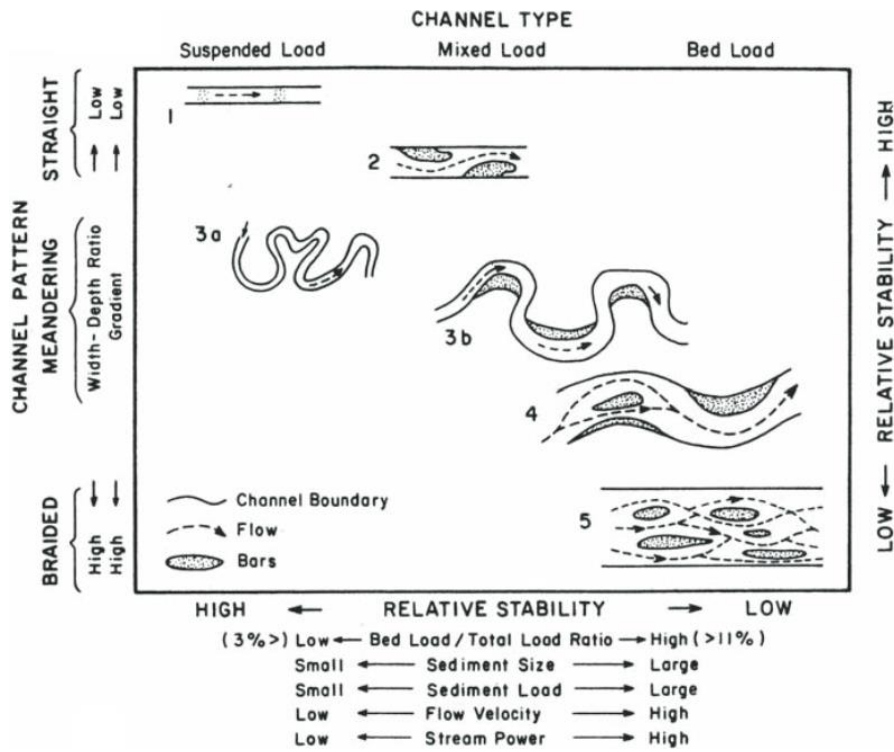


Figure II.5 : Classification des systèmes fluviaux selon le mode de transport, d'après Schumm (1981).

Le phénomène de migration des méandres, plus ou moins rapide selon les conditions, a fait et fait encore aujourd'hui l'objet de nombreuses études (ref. in Bridge, 2003). En effet, la migration des méandres induit des destructions d'aménagements et les dispositifs mis en place par l'Homme pour lutter contre ce phénomène affectent significativement le fonctionnement des écoulements. Le système cherchant perpétuellement l'équilibre, des aménagements locaux peuvent avoir des répercussions non-désirées sur le reste du cours d'eau et la plaine alluviale (Dzana, 2000). Les chenaux actifs ou abandonnés contrôlent également divers écosystèmes, certaines espèces ne vivant que dans ou autour de ces systèmes (Paccaud & Roulier, 2010).

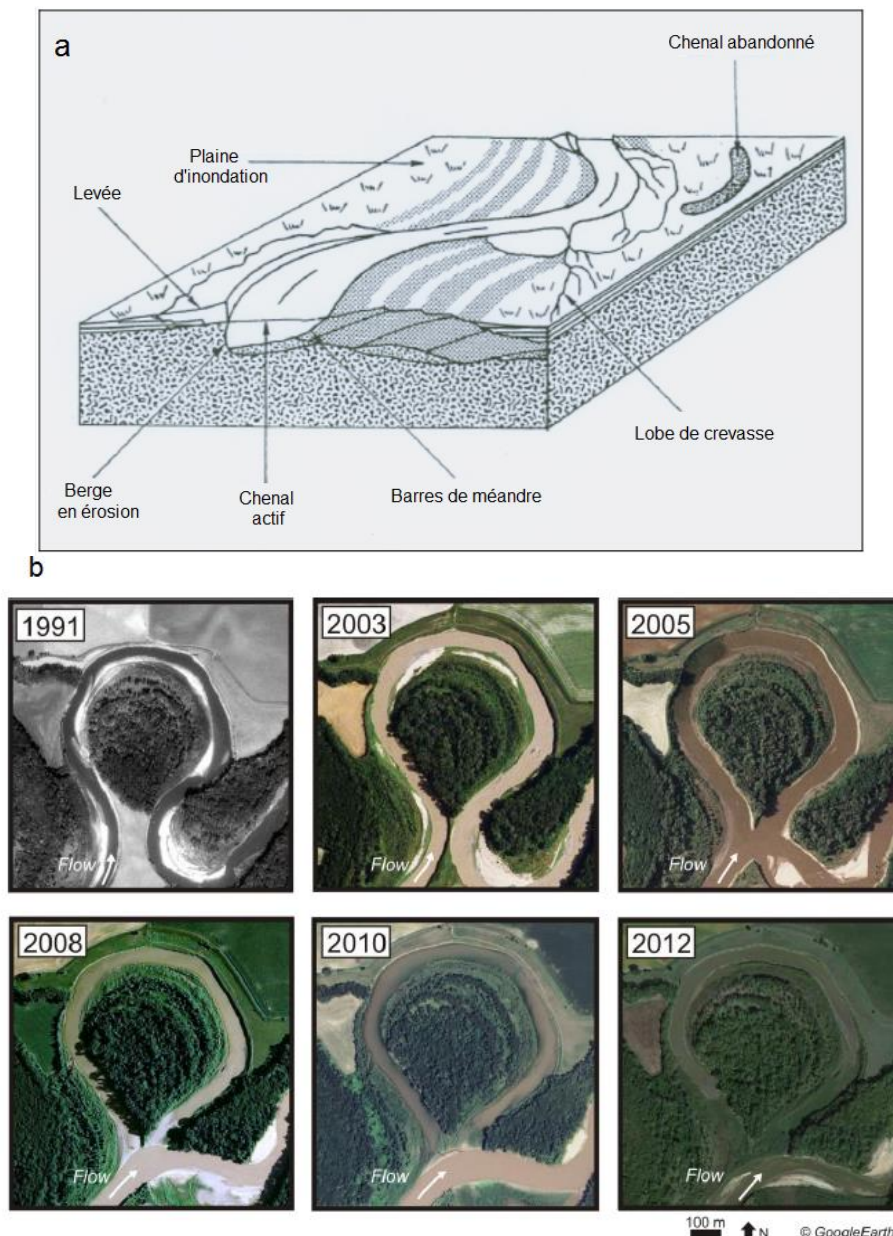


Figure II.6 : Effet de la migration des méandres sur le paysage. (a) Représentation 3D des systèmes méandriques et des différents mécanismes de dépôt et d'érosion. Source : Cojan & Renard (1997). (b) Exemple de migration de méandre jusqu'à recoupement et formation de chenal abandonné. Photographies aériennes prises sur Google Earth, utilisées dans la thèse de Dieras (2013).

II.1.2.b. Écoulements dans les systèmes méandriformes

Dans les systèmes fluviaux et particulièrement les systèmes méandriformes, les écoulements sont affectés par l'ensemble des forces gravitationnelles, de frottement et centrifuges produites par la morphologie du cours d'eau. Il en résulte d'une part une répartition inégale de l'écoulement principal et d'autre part la formation d'écoulements secondaires (perpendiculaires à l'écoulement principal). Ces écoulements secondaires forment des cellules de recirculation (Figure II.7).

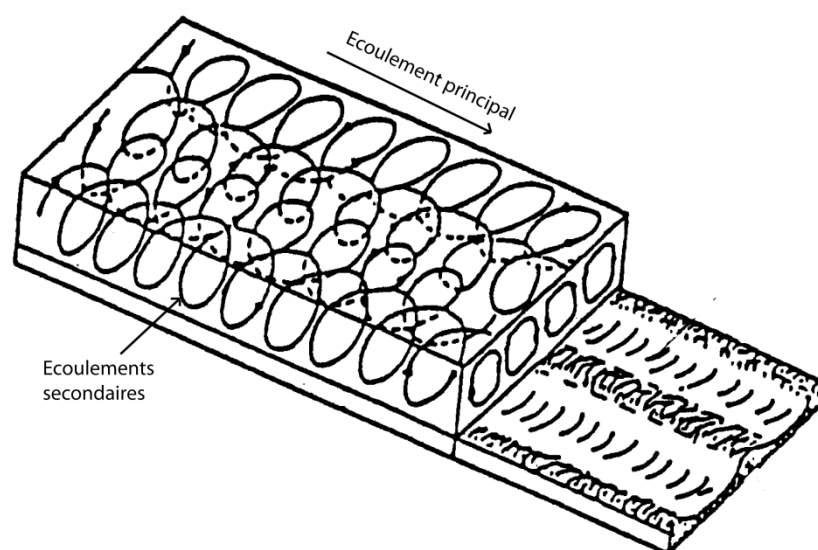


Figure II.7 : Représentation schématique des écoulements principaux et des cellules de recirculation (écoulements secondaires). La morphologie du lit du cours d'eau dépend de l'intensité de ces cellules. Source : Nezu & Nakagawa (1993).

La distribution et l'intensité des écoulements dépendent de la courbure des méandres, de la profondeur et de la morphologie du lit (Tilston & Biron, 2006; Abad & Garcia, 2009; Sukhodolov, 2012).

- Dans une section de cours d'eau au niveau du point d'inflexion (entre deux boucles de méandre), l'écoulement principal est généralement maximal en surface et au milieu du cours d'eau. Le niveau de turbulence est relativement faible (Figure II.8).
- En revanche, au niveau des apex (au milieu d'une boucle), les forces centrifuges couplées à la forte asymétrie du lit produisent une déviation des lignes de courant et de ce fait une augmentation significative de la turbulence. De manière générale pour l'écoulement principal, le maximum est situé plus profondément qu'au niveau des points d'inflexion, et se rapproche davantage de la rive en érosion. Les écoulements

secondaires sont significatifs ce qui entraîne une forte turbulence (Figure II.8). La migration des méandres est ainsi généralement maximisée au niveau des apex.

Cette distribution inégale des vitesses d'écoulement produit ainsi des zones où la vitesse et la turbulence sont suffisamment élevées pour déplacer les particules du lit du cours d'eau et les transporter vers l'aval par traction, saltation, voir suspension en fonction de leur taille. De ce fait, les écoulements secondaires sont une composante essentielle, jouant un rôle majeur dans l'érosion des berges et de mise en suspension des sédiments (Dzana & Gaillard, 1996; Tilston & Biron, 2006; Chauvet *et al.*, 2014).

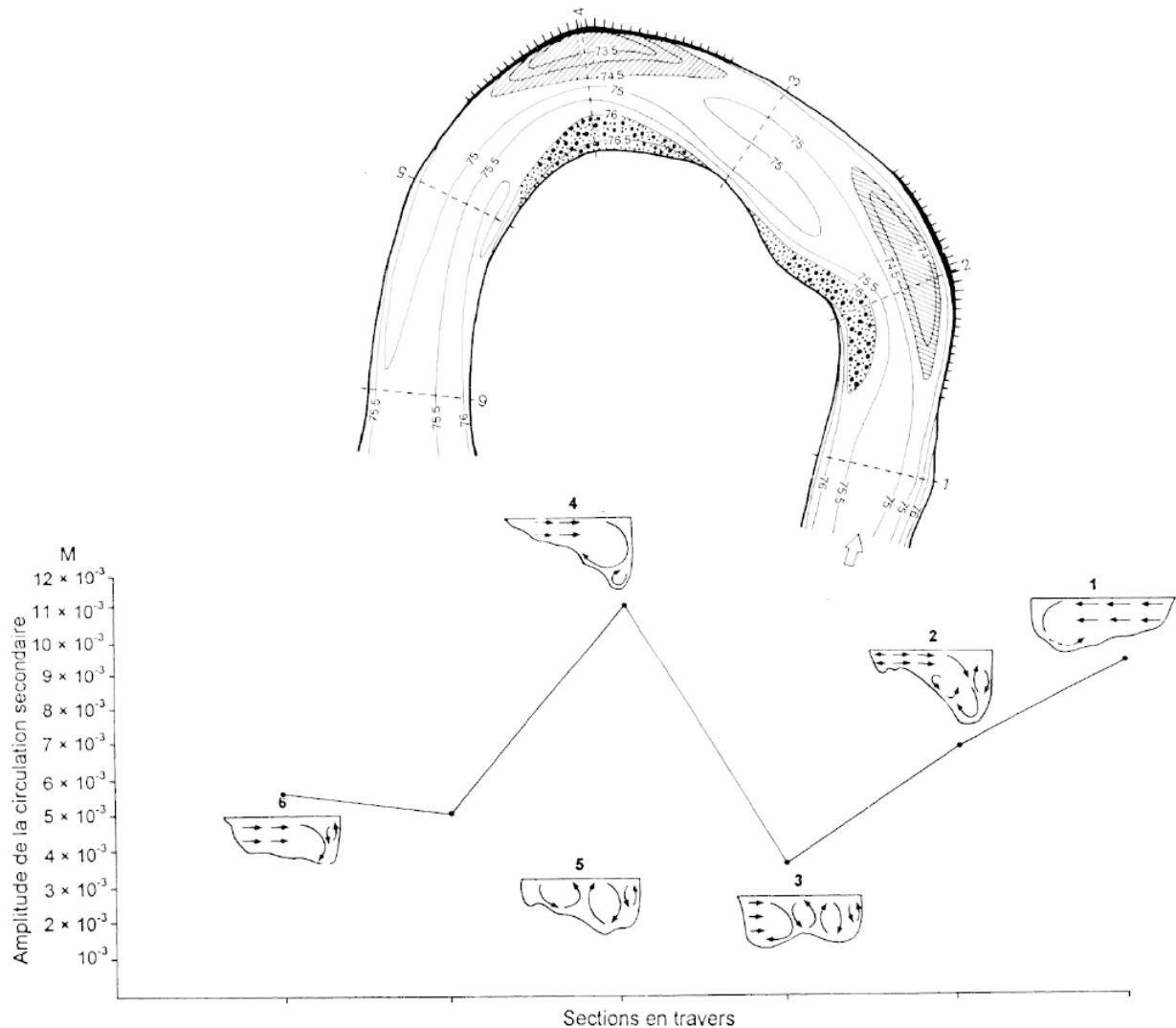


Figure II.8 : Distribution schématique des écoulements secondaires dans un méandre situé à Méry-sur-Seine (Seine Supérieure). Figure issue de Dzana & Gaillard (1996). L'amplitude de circulation secondaire M est calculée avec le rapport écoulement secondaire/primaire selon la méthode de Hickin (1978). L'amplitude M est ainsi significativement plus élevée au niveau des apex (profils 1, 2 et 4) qu'au niveau des points d'inflexion (profils 3 et 5).

La vitesse de migration des méandres dépend de leur état de développement, de l'environnement, mais également du régime hydrologique. La migration est effective lorsque

le débit atteint une certaine valeur, souvent rapportée au débit à pleins bords (débit maximal dans le chenal avant le débordement de l'écoulement sur la plaine alluviale) (Dzana & Gaillard, 1996; Smith, 1998). A ce débit est associée une charge sédimentaire dite de plein bord et c'est cette dernière qui est considérée comme contribuant physiquement à l'évolution du tracé du chenal. Cette notion de débit morphogène est en fait plus complexe car il faut également prendre en compte la durée de l'évènement ainsi que l'évolution de la charge sédimentaire au cours de la crue. C'est donc la relation interactive entre morphologie et dynamique hydraulique, ainsi que l'influence de l'hydrologie sur la charge sédimentaire qui contribue à la formation et la migration des méandres.

II.2. Stratégie d'échantillonnage

Dans les systèmes méandriformes, l'essentiel de la charge sédimentaire est transporté en suspension et dans la Seine, l'essentiel du fer est transporté sous forme particulaire. Nous concentrerons donc l'essentiel de notre échantillonnage sur les matières en suspensions (MES). Le régime hydrologique contrôlant significativement cette charge en suspension, notre échantillonnage doit également permettre de répondre à la problématique du lien entre régime hydrologique et particules ferrugineuses.

Dans l'optique de répondre aux problématiques de l'étude, la stratégie mise en place remplit plusieurs conditions :

- Afin de comprendre le comportement naturel du système « Seine » vis-à-vis des particules ferrugineuses étudiées, un site d'étude accessible et représentatif des mécanismes hydrologiques naturels au sein d'une section du cours de la Seine a été sélectionné.
- Sur l'ensemble du système, le nombre de sites d'échantillonnage doit être suffisant et tenir compte des différents facteurs locaux pouvant affecter les propriétés de la rivière en incluant notamment les affluents, les zones de confluence, les zones urbaines, rurales et les transitions. Par ailleurs, ces sites doivent également être accessibles pour pouvoir mettre en place les différents dispositifs d'échantillonnage, et sécurisés pour être maintenus pendant la durée de l'échantillonnage.
- Afin de caractériser l'évolution temporelle de la nature des MES dans les différents sites de la Seine, l'échantillonnage a été répété en nombre suffisant, au minimum sur une année avec un rythme quasi mensuel en essayant d'inclure des périodes d'étiage et de crue (montées et descentes). De ce fait, chaque échantillon récupéré doit être replacé dans son contexte hydrologique. La connaissance des variations hydrologiques sur le bassin versant de la Seine est donc primordiale.

La majorité des échantillons de MES a été collectée en 2011 et en 2012. Des échantillons complémentaires ont été récupérés en 2014 et 2015. La liste des échantillons et les dates des campagnes sont présentées dans l'Annexe C. Le protocole utilisé pour l'échantillonnage, ainsi que la stratégie de répartition spatiale et temporelle des sites d'échantillonnage est décrit dans ce qui suit.

II.2.1. Protocole d'échantillonnage général

Le dispositif d'échantillonnage de base reprend le principe d'un des modèles (appelé « modèle C ») de trappes à sédiments de Tessier (2003). Le modèle en question se révèle être adapté lorsque la hauteur d'eau est suffisante (au moins 40 cm) et ne varie pas significativement pendant la période d'échantillonnage. Le dispositif est constitué d'une bouteille en PVC de 2 litres dont le sommet est lesté, permettant à la bouteille d'être maintenue à la verticale une fois mise dans l'eau. Deux trous ronds de 3 cm de diamètre sont percés dans le même axe à quelques centimètres au-dessus du fond de la bouteille. Lors de l'immersion, ceux-ci vont s'orienter naturellement de façon à être parallèles à l'écoulement principal et à laisser entrer et se déposer les MES. Des flotteurs constitués de bouteilles en plastique remplies de mousse sont attachés à une corde elle-même fixée à l'extrémité non lestée de la trappe, permettant ainsi de garder une profondeur constante par rapport à la surface de l'écoulement. Le tout est maintenu à l'aide de cordes et de poutres en bois fixées sur une des berges, optimisant ainsi la position verticale du dispositif durant l'échantillonnage (Figure II.9). Les trappes sont placées à environ trois à quatre mètres des berges et entre 0,5 et 2 m selon la profondeur du cours d'eau. Comparées aux dispositifs d'échantillonnages conventionnels, ces trappes ont l'avantage d'être relativement simples, peu encombrantes, peu coûteuses et rapides à fabriquer en nombre. Elles peuvent être installées et récupérées rapidement. Elles ont cependant l'inconvénient d'être moins robustes et de piéger moins de MES. Les points d'échantillonnage sont généralement localisés dans des zones peu visitées de manière à éviter le vandalisme. Les dispositifs ont ainsi été laissés entre une semaine et un mois selon les campagnes.

Le fer et ses composés étant sensibles aux conditions physico-chimiques, des mesures in situ de paramètres physico-chimiques ont été réalisés le jour de la récupération des trappes. Ces mesures ont été faites à l'aide d'une sonde portable multi-paramètres HANNA Instruments 9829. Les paramètres mesurés sont la conductivité (en $\mu\text{S}/\text{cm}$), le pH, l'oxygène dissous (en mg/L et % de saturation) et le potentiel d'oxydo-réduction (ORP, en mV).

II.2.2. Echantillonnage dans une section de la Seine

Pour chaque campagne d'échantillonnage, chaque site est représenté par un seul échantillon prélevé selon l'accessibilité à quelques mètres de la berge gauche ou droite et à environ un mètre de profondeur, considérant la Seine comme un système bidimensionnel. Or dans une section de cours d'eau les dynamiques peuvent s'avérer significativement différentes selon l'emplacement dans la section. De plus les différents aménagements et activités de l'homme peuvent affecter les dynamiques hydrauliques (Chauvet, 2014).

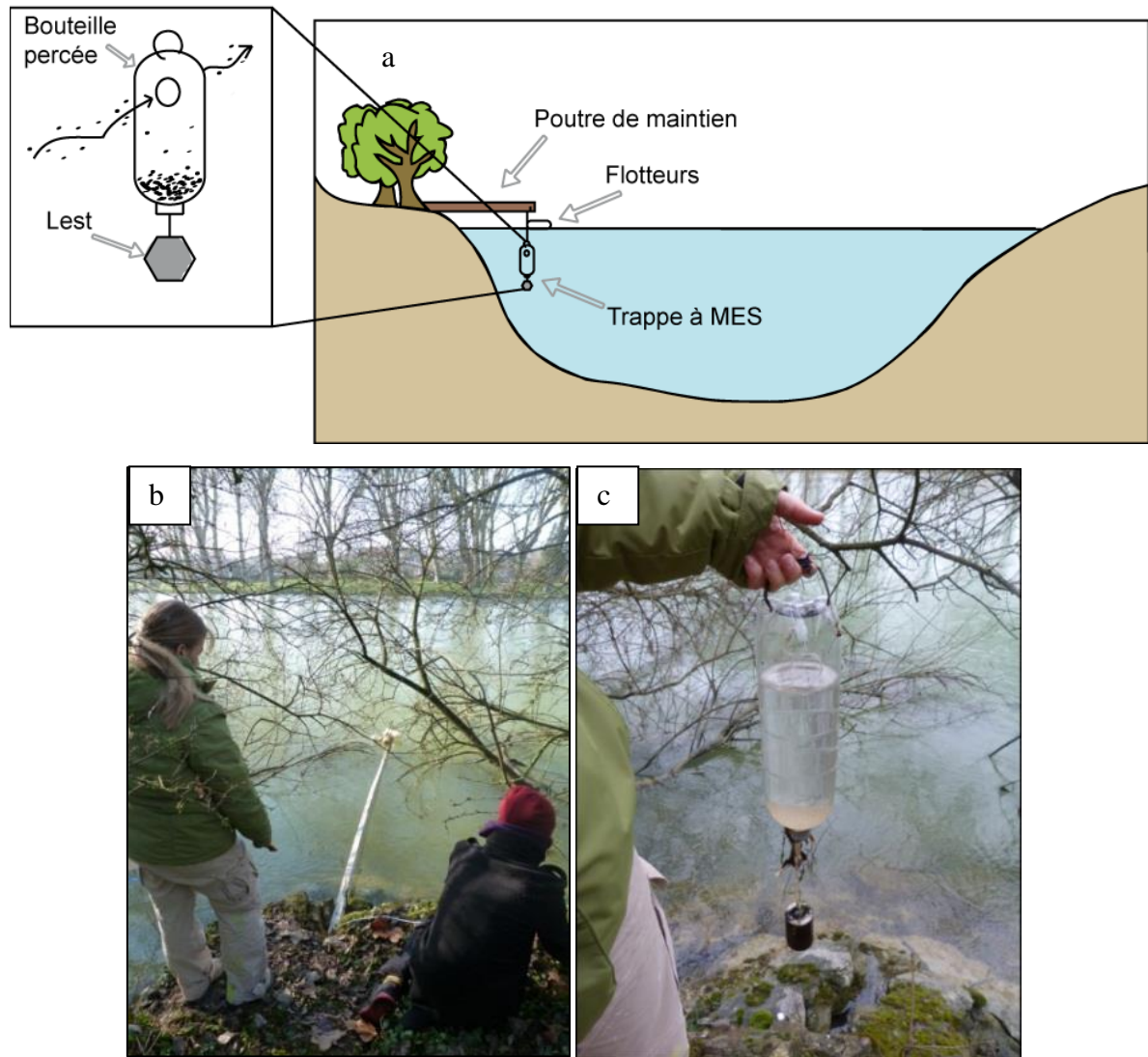


Figure II.9 (a) Schéma du dispositif d'échantillonnage de MES, inspiré du protocole de Tessier (2003). (b) Mise en place d'un dispositif. (c) récupération d'une trappe avec MES.

Cette question de représentativité a fait l'objet d'une étude particulière sur un des sites de la Seine et sera discutée et présentée dans le Chapitre IV sous forme d'article soumis. Le site d'étude, le protocole d'échantillonnage la préparation et les mesures effectuées seront décrits dans le chapitre. Nous nous intéressons dans cette étude uniquement aux mécanismes naturels afin de comprendre comment un système méandrique naturel intègre les particules ferrugineuses dans sa charge sédimentaire. L'objectif est de caractériser la fraction magnétique des différentes parties de la charge sédimentaire (charge de fond, charge en suspension et charge de ruissellement), dépendantes de la dynamique fluviale (qui varie dans le temps).

II.2.3. Echantillonnage spatial

II.2.3.a. MES de la Seine

Afin de représenter l'évolution du signal magnétique d'amont en aval, la Seine a été échantillonnée en 14 points, et dans 6 de ses affluents.

La première campagne « test » a été effectuée en février 2011. Les campagnes ont ensuite été menées dans le cadre du travail de Konecny (2012), environ chaque mois, de juillet 2011 à novembre 2012, pour un total de 12 campagnes.

L'ensemble des sites d'échantillonnage est présenté dans la Figure II.10.

Le premier site de la Seine se trouve sur l'apex de méandre secondaire sélectionné pour l'étude des variations au sein d'une section de méandre (sujet d'étude du Chapitre IV). Il est situé en amont de Marnay-sur-Seine (site n°2) en aval de la confluence de l'Aube, en rive gauche en érosion. La Bassée, qui est la section de la Seine entre les confluences avec l'Aube et l'Yonne est également représentée par un deuxième site à Jaulnes (3), quelques kilomètres avant la confluence de l'Yonne. Dès ce site, situé en aval de Nogent-sur-Seine, l'impact de l'Homme sur la morphologie de la rivière se manifeste davantage. Le lit mineur a été creusé, élargi et aménagé pour permettre la navigation tout au long de l'année. Le passage régulier de péniches provoque des remous jusqu'aux berges.

Le site suivant se trouve après les confluences de l'Yonne et du Loing, quelques 300 m en amont de l'écluse de Thomery (6). Les aménagements de la rivière sont de plus en plus présents de même que la navigation jusqu'au site d'échantillonnage suivant à Draveil (7), en amont de la confluence de l'Orge.

A partir de Draveil, la Seine devient fortement urbanisée. Les cinq sites suivants représentent la Seine dans l'agglomération parisienne. En raison de l'occupation importante des berges et de la forte population, l'échantillonnage est plus délicat à mettre en place. Ces sites (n°9, 10, 12, 13 et 14) ont donc été échantillonnés une seule fois durant mars 2015 en gardant le même protocole que pour les échantillons de 2011-2012. Le premier de ces sites complémentaires se trouve à Villeneuve-le-Roi (9) entre les confluences de l'Orge et de l'Yerres. Le suivant, Alfortville (10), est situé quelques kilomètres avant la confluence de la Marne. Après la confluence de la Marne, la Seine est encore plus aménagée et dès l'entrée de Paris, il est difficile de trouver un site sécurisé et représentatif. La trappe à MES a donc été installée quelques centaines de mètres en aval de l'entrée de la Seine dans Paris vers la Bibliothèque François Mitterrand (12) sur la piscine/péniche Joséphine Baker, située sur la Seine côté rive gauche, à environ 100 m en amont du Pont de Bercy. Un site a également été sélectionné en aval de la sortie de Paris à Issy-les Moulineaux (13). A ce niveau la Seine se sépare en deux bras, formant un îlot et le site se trouve sur la rive droite de la Seine. La Seine continue de former plusieurs îlots, notamment L'Île-Saint-Denis (14) où se trouve le dernier site échantillonné en 2015.

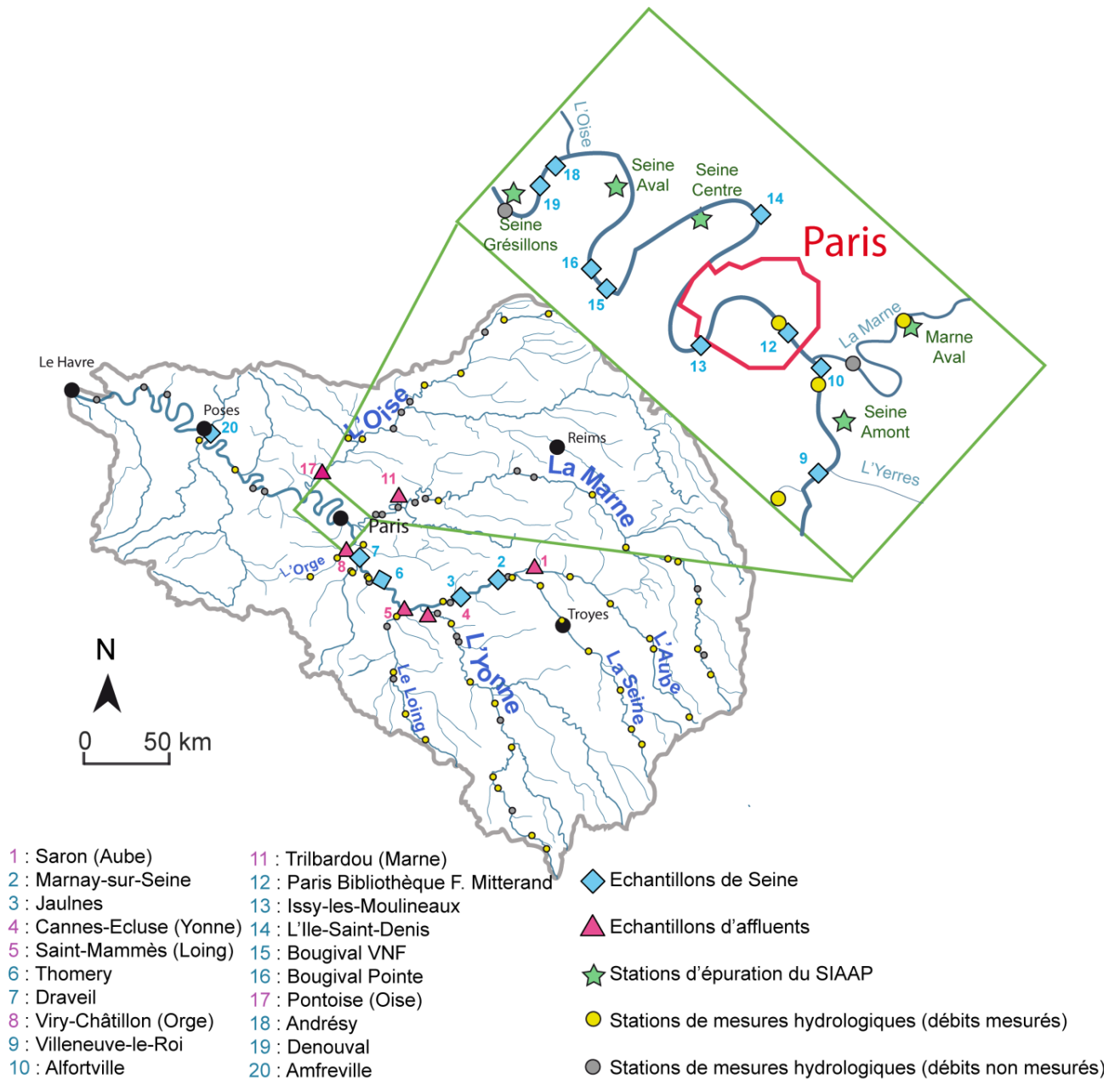


Figure II.10 : Localisation des différents sites d'échantillonnage de MES (bleu pour ceux situés dans la Seine et mauves pour ceux situés dans les affluents), stations d'épuration du SIAAP et stations de mesures hydrologiques.

Les deux sites suivants se trouvent à Bougival. L'urbanisation est toujours importante et la Seine forme un nouvel îlot. Des trappes ont été posées sur la Seine au niveau de la station de VNF à la pointe amont de l'îlot (15), site fréquemment échantillonné dans les études associées au programme PIREN-Seine, et l'autre, sur la pointe aval de l'îlot (16).

Les sites suivants sont en aval de la confluence de l'Oise. La Seine est séparée par des îlots et les trappes sont placées sur deux bras de la Seine. Le site d'Andrésy (18) se trouve dans le bras gauche et le site de Denouval (19) dans le bras droit. Avant la confluence de l'Oise la Seine récupère également les rejets d'eau épurée de la station Seine Aval. Les sites d'Andrésy intègrent donc potentiellement les apports de l'Oise et les rejets de la station d'épuration. Si

ces apports ne sont pas homogénéisés dans la Seine avant la séparation du cours d'eau, les deux sites intégreront potentiellement ces apports différemment.

Le dernier site de la Seine, Amfreville (20) est situé quelques kilomètres en amont de Poses. La Seine sort de l'agglomération parisienne et traverse à nouveau des terres agricoles et semi-naturelles.

Les 6 échantillons d'affluents ont été prélevés sur les quatre affluents majeurs de la Seine quelques km avant de se déverser dans cette dernière : l'Aube à Saron (1), l'Yonne à Cannes-Ecluse (4), la Marne à Trilbardou (11) et l'Oise à Pontoise (17). Le cinquième site représente le Loing à Saint-Mammès (5) et le sixième l'Orge à Viry-Châtillon (8), permettant d'avoir dans l'ordre un échantillon d'une petite rivière rurale et d'une petite rivière urbaine.

II.2.3.b. Echantillons de stations d'épuration

Comme nous l'avons vu dans le Chapitre I, les eaux épurées rejetées par les stations d'épurations, notamment la station Seine Aval ont un impact sur la qualité de l'eau de la Seine. Concernant le fer et les particules magnétiques cet impact est méconnu, mais au cours de l'étude plusieurs indices ont laissé supposer qu'il est potentiellement présent. Les différents traitements physico-chimiques, notamment l'étape de clarifloculation qui consiste à éliminer les phosphates par l'ajout de chlorure ferrique peut potentiellement ajouter du fer dans les eaux rejetées. Cet ajout peut toutefois être négligeable suite à l'élimination finale des déchets porteurs d'éléments métalliques. D'autre part, si ces traitements éliminent les particules ferrugineuses il est alors probable de les trouver en plus grande concentration dans les boues d'épuration.

Si cet impact existe, il est alors intéressant de l'estimer. Afin de répondre à la problématique de l'impact des rejets de stations d'épuration sur les particules magnétiques de la Seine, le SIAAP a fourni des échantillons d'eaux et de boues issus de station Seine Aval ainsi que des stations Seine Centre (située à Colombes) et Grésillons (Triel) situées respectivement en amont et en aval de Seine Aval (voir Figure II.10). En plus des échantillons d'eaux rejetées, des échantillons d'eau brute, décantée et avant et après clarifloculation ont été fournis afin de suivre l'évolution des particules par étape (Tableau II.1) de traitement. Les échantillons ont été récupérés à trois reprises, en février, mars et avril 2015. Les eaux ont été prélevées dans des bouteilles de 2 L et conservées au frais avant d'être traitées comme le reste des échantillons de la Seine (voir la partie II.3). Les échantillons de boue ont été prélevés dans des bocal en verre de 1 L.

Afin d'estimer la différence de qualité entre les eaux rejetées et la Seine, un nouvel échantillonnage a été effectué en septembre 2015. Les paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, oxygène dissous, potentiel redox) ont été mesurés avec la sonde HANNA dans des échantillons d'eaux rejetées, ainsi que dans la Seine juste en amont et en aval des rejets des trois stations. Les eaux des rejets des trois stations ont été collectées le matin de la mesure, transportés au frais à Colombes et mesurés sur place en début d'après-midi. La sonde multi-paramètres Hanna 9829 effectuant une correction automatique de la température à

(fixée à 25°C), les mesures restent comparables entre elles dans l’hypothèse que des transformations chimiques n’ont pas eu lieu durant le temps de confinement.

Tableau II.1 : Liste des échantillons du SIAAP. *Les eaux rejetées ont été récupérées une fois de plus en septembre 2015 et complétées par des mesures physico-chimiques.

Station	Type d'échantillon
Seine Centre	Eau brute
	Eau décantée
	Eau rejetée*
	Boue centrifugée
Seine Aval	Eau brute
	Eau avant clarifloculation
	Eau après clarifloculation
	Eau rejetée
	Boue séchée
Seine Grésillons	Eau brute
	Eau rejetée

II.2.4. Echantillonnage dans différents contextes hydrologiques

Les 12 campagnes d’échantillonnage effectuées entre juillet 2011 et novembre 2012 ont permis d’obtenir plusieurs échantillons dans différents contextes hydrologiques. Le nombre d’échantillons par site n’est toutefois pas égal car certains ont été rajoutés en cours d’étude. De plus, certaines trappes n’ont pas tenu en place ou ont été retirées par des personnes extérieures à l’étude (voir Annexe C pour les dates des campagnes pour chaque site).

L’étude de l’impact hydrologique sur le devenir des particules ferrugineuses, que ce soit en termes de contribution des affluents ou variations spatiales et saisonnières nécessite la connaissance ou au mieux une estimation fiable du débit de la Seine dans toutes les dimensions. Si plusieurs stations répertoriées dans la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) fournissent publiquement des données de débits journaliers, elles sont peu nombreuses et ne donnent pas le débit exact à chaque point d’échantillonnage. Afin d’obtenir des données fiables de débits et de débits spécifiques, un modèle de calcul des paramètres hydrologiques à tout point étudié dans la Seine a été développé en se basant sur les données publiques disponibles.

Hormis le temps qui est connu, trois paramètres sont nécessaires pour replacer les échantillons dans leur contexte hydrologique : la position, la surface drainée et le débit à un temps t.

La position (ou pK pour point kilométrique) a été calculée avec précision à partir d’un programme SciLab développé par O. Stab (Centre de Géosciences, Mines ParisTech). Ce programme nécessite de connaître les coordonnées XY des sites, stations et confluences pour les convertir en abscisses curvilignes. La surface drainée, c’est-à-dire le bassin versant (BV) de la Seine (ou de l’affluent) à un site donné a été estimé à partir des pKs des stations de mesure et les surfaces drainées répertoriés dans ces stations. Les différentes stations de

mesures montrent que dans un segment de rivière délimité entre deux points de confluences, la surface drainée augmente linéairement avec la distance. Les modèles de calcul se sont donc basés sur une équation de type :

$$BV = a * pK + b,$$

Où a et b sont deux constantes propres à chaque segment.

Le débit Q à un point donné montre une relation en puissance avec la surface de bassin versant BV (Tricart & Hirsch, 1960; Burgers *et al.*, 2014) de type :

$$Q = c * BV^d,$$

Où c et d sont deux coefficients et changent selon le segment et la période étudiée. Ces coefficients sont généralement associés à des facteurs climatiques (Tricart & Hirsch, 1960). Nous avons toutefois considéré dans notre étude ces coefficients comme des valeurs théoriques d'ajustement estimées à partir de la méthode des moindres carrés en comparant les valeurs mesurées dans les stations de références à celles calculées avec la formule en puissance.

Comme toutes les stations ne mesurent pas les débits dans les périodes qui nous intéressent (années 2011-2012), le nombre de stations exploitables est beaucoup plus faible que pour les bassins versants ce qui complique la construction des modèles (voir Figure 2.2). D'autres méthodes d'estimations de débits sont appliquées lorsque le nombre de stations n'est pas suffisant pour caractériser le débit d'un segment de cours d'eau.

La construction des différents modèles de pK, bassins versants et débits est expliquée plus en détails dans les Annexes A et B.

La construction de ces modèles a permis de retracer les débits Q et débits spécifiques Q_{sp} correspondant à la Seine en chaque point et période d'échantillonnage. Ces modèles permettent également de retracer l'évolution temporelle du débit des affluents étudiés et de la Seine en amont et en aval de chaque confluence (Figure II.11). Chaque campagne peut ainsi être replacée dans le contexte hydrologique global du bassin et les variations locales peuvent être mises en évidence.

La campagne d'essai (campagne n°0), effectuée en février 2011 uniquement à Thomery, correspond à la fin de la crue hivernale.

Les campagnes n°1, 2 3 et 4 (juillet, septembre, octobre et novembre 2011) correspondent à la période d'étiage de l'été 2011. La plupart des cours d'eau ont un débit spécifique compris entre 1,5 et 4 l/s/km². Le débit spécifique du Loing est en moyenne plus faible que celui de la Seine et des autres affluents étudiés (Q_{sp} entre 0,5 et 2 l/s/km²) et celui de l'Orge est beaucoup plus affecté par les pluies estivales, probablement en raison de sa faible surface drainée (BV = 950 km², donnée du SANDRE). Le débit spécifique de la Seine en amont de l'Aube augmente significativement ($Q_{sp} \approx 10$ l/s/km²) entre septembre et novembre 2011. Cette augmentation semble être due à la vidange du lac réservoir d'Orient en prévision de la crue hivernale. De ce fait les échantillons de MES prélevés durant cette période, particulièrement ceux de Marnay-sur-Seine (2) et de Jaulnes (3) ne sont potentiellement pas représentatifs d'une période d'étiage.

Les campagnes n°5 et 6 (janvier et février 2012) correspondent à la période de crue hivernale de 2012. Plus précisément, la campagne n°5 correspond à la montée de crue et la n°6 à la fin de la crue. Durant cette période, le débit spécifique de la Seine et ses affluents varie entre 3 et 40 l/s/km². L'Yonne montre des valeurs plus élevées que le reste de la Seine durant cette période.

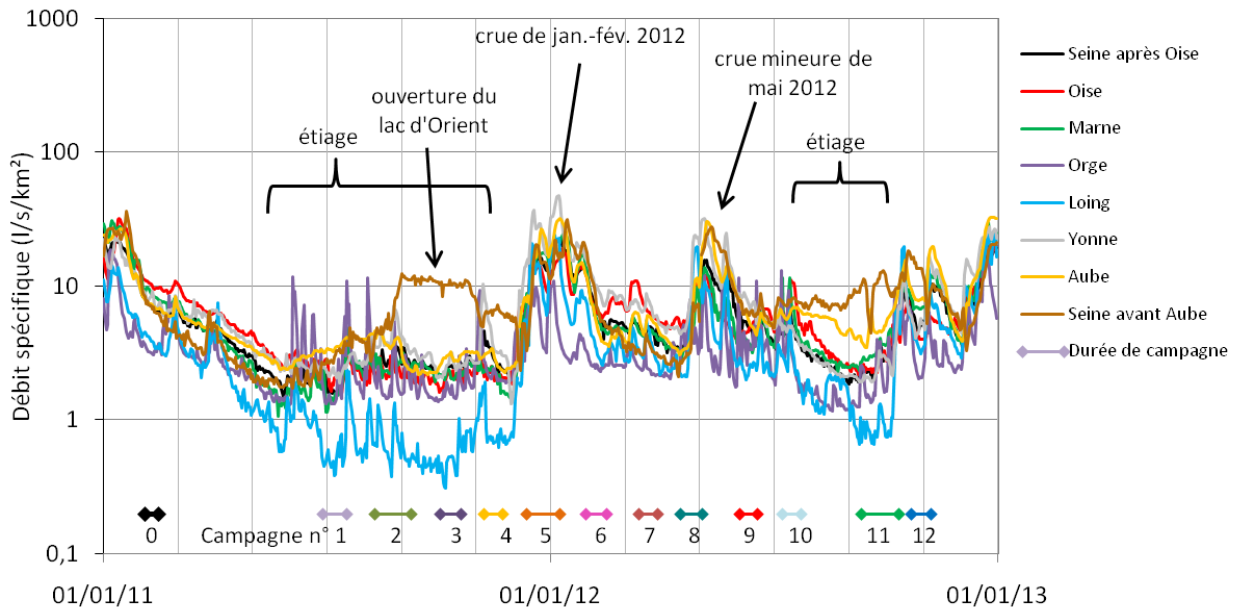


Figure II.11 : Campagnes d'échantillonnage replacées dans leur contexte hydrologique. L'axe des ordonnées représente le débit spécifique de la Seine avant l'aube (courbe marron) et après l'Oise (noire) ainsi que des 6 affluents échantillonnés : l'Aube (jaune), l'Yonne (grise), le Loing (bleue), l'Orge (violette), la Marne (verte) et l'Oise (rouge) avant la confluence avec la Seine. Les traits horizontaux colorés représentent l'emplacement dans le temps et la durée moyenne des différentes campagnes d'échantillonnage.

La campagne n°7 (mars 2012) correspond à une période intermédiaire (Q_{sp} entre 2,5 et 9 l/s/km²). La campagne n°8 (mai 2012) correspond à la fin de cette période intermédiaire qui se termine par une montée de crue mineure où le débit spécifique des cours d'eau peut atteindre 30 l/s/km². La campagne n°9 (juin 2012) correspond à la descente de la crue mineure de mai 2012 et le début de l'étiage d'été 2012.

Les campagnes n° 10 et 11 (juillet et octobre 2012) correspondent à cette période d'étiage d'été 2012 (Q_{sp} entre 0,5 et 5 l/s/km²). La Seine en amont de l'Aube, et l'Aube elle-même, ont des valeurs plus élevées qui peuvent correspondre à des variations climatiques locales ou encore une fois à des ouvertures des lacs réservoirs du Temple et Amance (Aube) et d'Orient (Seine). La campagne n°12 (novembre 2012) marque la fin de l'étiage et la montée des débits à l'approche de l'hiver 2013 (Q_{sp} entre 3 et 15 l/s/km²).

De manière générale, la Seine amont (hors période d'étiage) et ses principaux affluents ont une hydrologie spécifique similaire au cours des années 2011-2012 ce qui est cohérent avec le comportement général lors des autres années (Viennot *et al.*, 2009; Vilmin, 2014). Les

différentes campagnes d'échantillonnage ont donc permis de récupérer des MES en différents points de la Seine et dans différents contextes hydrologiques. Il sera alors possible de regarder l'évolution des particules ferrugineuses dans la Seine en hautes eaux, basses eaux et en périodes intermédiaires.

II.3. Préparation des échantillons

Les mesures magnétiques réalisées/effectuées dans cette étude se font sur des échantillons secs, or la totalité des échantillons de MES de Seine, sédiments de fond et échantillons de stations d'épuration (sauf les boues séchées) sont humides ou récupérés dans deux litres d'eau. Une première étape a donc consisté à éliminer l'eau des échantillons pour limiter l'altération des minéraux.

Cette partie décrit le protocole de préparation des échantillons pour la plupart des mesures magnétiques. Les méthodes de mesures non-magnétiques sont également présentées.

II.3.1. Séchage des MES

Afin de limiter toute altération potentielle des échantillons, ceux-ci ont été immédiatement mis au frais et traités dans les jours suivants leur collecte au Centre des Géosciences de Fontainebleau. Les échantillons ont dans un premier temps été filtrés successivement avec des filtres en cellulose de 5, 1, 0,45 et 0,2 μm d'ouverture. En effet, bien que la limite entre charge particulaire et charge dissoute est classiquement fixée à 0,45 μm , des particules ferrugineuses de taille nanométriques peuvent être présentes sans être dissoutes (par exemple les magnétiques issues des magnétosomes). Les filtres et les MES récupérés ont ensuite été lyophilisés. Les filtres, pesés avant utilisation ont alors été repesés pour obtenir par différence la masse de MES et les filtrats d'un même échantillon ont ensuite été mélangés et placés dans des flacons en plastique. Comme le temps de mise en place des dispositifs varie selon les campagnes, les masses totales de sédiments secs sont normalisés par rapport à la durée (en jours) des campagnes et sera ainsi présentée en milligrammes par jour dans les chapitres suivants.

II.3.2. Préparation aux mesures magnétiques

La plupart des mesures et méthodes magnétiques utilisées dans cette étude nécessitent quelques milligrammes d'échantillon. Pour chaque échantillon de MES, 3 à 30 mg de sédiments ont été prélevés. Les MES n'ont pas été broyées afin de ne pas altérer les particules magnétiques. Lorsque le sédiment était friable, la préparation a été consolidée avec de la colle en aérosol. Une fois la préparation consolidée, elle a été pesée afin de normaliser si nécessaire car certains paramètres magnétiques se normalisent à la masse mesurée.

Pour certains sites d'échantillonnage, plusieurs préparations ont été effectuées. Elles ont été utilisées pour vérifier dans certains cas, la validité des premiers résultats lorsque ceux-ci sont douteux. La principale raison de ces préparations multiples est d'évaluer la représentativité des mesures magnétiques effectuées sur 3 à 30 mg préparés à partir de plusieurs grammes de MES. Cette étude est décrite en Annexe D.

Résumé et discussion

La forte sensibilité de la dynamique sédimentaire des cours d'eau méandriiformes (système fluvial auquel appartient la Seine et la majorité de ses affluents) au régime hydraulique rend l'étude de ces systèmes complexe et nécessite des campagnes d'échantillonnages spécifiques pour répondre aux questions de la représentation spatiale des mesures sur une section et de la représentation temporelle en fonction des débits critiques au-delà desquels les sédiments de fond sont remis en suspension.

Les 20 sites d'échantillonnage de la Seine, situés dans ses méandres naturels, à l'approche, l'intérieur et la sortie de l'agglomération parisienne, à l'approche de l'estuaire ainsi que dans les affluents devraient permettre une bonne représentation de l'évolution des particules ferrugineuses. Ceci permettra d'évaluer la capacité des particules ferrugineuses à enregistrer le ou les impacts anthropiques sur la Seine. Les échantillons de stations d'épuration pourront potentiellement permettre de décrire l'efficacité des traitements vis-à-vis des particules ferrugineuses et les effets directs de leurs rejets sur celles présentes dans la Seine.

Les modèles de calculs de débits de la Seine montrent que, malgré un climat et une géologie relativement homogènes dans l'ensemble du bassin, des variations locales, probablement d'origines anthropiques existent et complexifient l'étude. Les différentes campagnes d'échantillonnages ont toutefois permis d'obtenir pour la plupart des sites des échantillons représentatifs de crues, étiages et états intermédiaires.

Les échantillons récupérés ont été séchés et préparés pour les mesures magnétiques. Le chapitre suivant décrit ces différentes mesures, les méthodes de traitement applicables à partir de ces mesures, et permet une première caractérisation générale des particules magnétiques dans les MES de la Seine avant d'étudier dans les chapitres suivants les variations à différentes échelles.

Chapitre III. Caractérisation de la fraction magnétique des matières en suspension de la Seine

Les chapitres précédents ont présenté le contexte de l'étude et la méthodologie générale. Afin de répondre à la problématique de traçage environnemental multi-échelles, ce chapitre introduit les différentes méthodes d'étude de la fraction magnétique et offre une première caractérisation générale des particules magnétiques transportées par la Seine.

Les méthodes magnétiques permettent d'obtenir plusieurs informations sur ces particules, notamment :

- leur minéralogie et la proportion des différents minéraux ;
- leur taille moyenne et leur distribution granulométrique ;
- leur concentration dans les matières en suspension.

La minéralogie des oxydes et sulfures de fer peut être un indicateur de sources et également des conditions physico-chimiques dans la rivière. La connaissance de la minéralogie et de la granulométrie magnétiques est la première étape essentielle pour ensuite évaluer l'évolution de la concentration en particules magnétiques aussi bien à l'échelle spatiale qu'à l'échelle temporelle. La fraction magnétique étant généralement mineure en volume et en masse dans les sédiments, les méthodes de caractérisation sont indirectes et jouent sur deux propriétés physiques caractéristiques des différents minéraux magnétiques : leur comportement sous champ, et leur comportement sous chauffe.

Les méthodes appliquées et les informations obtenues dans ce chapitre sont donc présentées ici dans leur ordre d'interprétation et décrivent de manière synthétique la fraction magnétique dans les MES de la Seine, sans interprétations des potentielles variations spatiales et temporelles qui seront décrites dans les chapitres suivants. Chaque méthode décrite dans ce chapitre est illustrée par des exemples représentatifs parmi l'ensemble des échantillons de MES où les mesures ont été faites. La plupart des mesures présentées dans ce chapitre ont été effectuées sur un échantillon par site. Le choix des échantillons « représentatifs » ainsi que la liste de ces derniers sont présentés dans l'Annexe C.

Ce chapitre se divise donc en deux parties : la première est focalisée sur la caractérisation minéralogique des particules magnétiques dans la Seine et la seconde sur leur granulométrie magnétique. L'étude de concentration des minéraux magnétiques à partir des méthodes magnétiques est présentée dans les chapitres suivants.

III.1. Minéralogie magnétique

Les différents minéraux magnétiques naturels possèdent des propriétés magnétiques différentes qui sont résumées pour les principales familles ferromagnétiques (au sens large) dans le Tableau III.1:

- L'aimantation à saturation M_s (en Am^2/kg), l'aimantation maximale que peut avoir un minéral sous champ.
- Le champ coercitif (en T), le champ qu'il faut appliquer pour annuler l'aimantation à saturation.
- La température de Curie (en °C) qui est la température au-delà de laquelle le minéral en question ne porte plus d'aimantation rémanente.

Bien qu'étant sensiblement dépendante de la minéralogie, l'aimantation n'est pas un paramètre discriminant car elle intègre de nombreux paramètres comme la taille des particules et leur concentration dans l'échantillon. La température de Curie est en revanche une caractéristique spécifique des minéraux, mais certains minéraux comme les titanomagnétites ($\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$) ont des T_{Curie} variables en fonction de la proportion de titane.

Tableau III.1 : Quelques propriétés des minéraux magnétiques les plus communs. Les données proviennent de : (1) : Heider *et al.*, (1996); (2) : Dunlop & Özdemir, (1997) et références citées ; (3) : Kruiver *et al.*, (2001); (4) : Evans & Heller, (2003) et références citées ; (5) : Roberts *et al.*, (2006) ; 6 : Gubbins & Herrero-Bervera (2007) ; 7 : Dillon & Franke, (2009) ; 8 : Roberts *et al.*, (2011). (*) Pour la titanomagnétite, la température de Curie diminue quand x augmente.

Minéral	Formule	Aimantation à saturation M_s (Am^2/kg)	Champ coercitif (mT)	T_{Curie} (°C)
Magnétite	Fe_3O_4	92 ⁽⁶⁾	5-80 ^(1,3)	580 ^(2,4)
Titanomagnétite*	$\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$		5-200 ^(2,7)	150-580 ^(4*)
Hématite	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	~ 0,1-0,4 ⁽⁶⁾	100-500 ⁽⁵⁾	675 ^(2,4)
Maghémite	$\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$	65-74 ⁽⁶⁾	5-80 ⁽⁶⁾	590-675 ^(2,4)
Goethite	$\alpha\text{-FeOOH}$	0,01-1 ⁽⁶⁾	>300 ^(3,5)	120 ^(2,4)
Pyrrhotite	Fe_7S_8	18 ⁽⁶⁾	30-100 ⁽⁵⁾	320 ^(2,4)
Greigite	Fe_3S_4	~30 ⁽⁶⁾	20-100 ⁽⁵⁾	> 330 ^(2,4,8)

Comme l'illustre le Tableau III.1, la minéralogie magnétique d'un échantillon contenant potentiellement plusieurs minéraux magnétiques peut difficilement être obtenue en se limitant à un seul paramètre. L'exemple le plus frappant est le cas de la goethite et de l'hématite : les deux minéraux ont des gammes d'aimantation similaires et ont toutes les deux des hautes coercivités par rapport aux champs appliqués classiquement dans les laboratoires, et se distinguent principalement par leur température de Curie.

En conséquence, nous avons appliqué plusieurs méthodes pour obtenir le plus d'informations possible dans les limites expérimentales disponibles sur la minéralogie des minéraux ferromagnétiques dans les MES. Elles vont être décrites ci-après et illustrées avec quelques exemples représentatifs, l'ensemble des données étant traité dans le Chapitre V.

III.1.1. Spectres de coercivité : courbes d'acquisition de l'IRM et S-ratio

Les minéraux de type hématite et goethite à fort champ coercitif (dites de « haute coercivité ») sont moins sensibles à l'application de champs externes et nécessitent des champs supérieurs à 2,5 T pour être totalement saturés (Verosub & Roberts, 1995). Leur aimantation rémanente isotherme (IRM pour Isothermal Remanent Magnetization, aimantation rémanente qu'acquiert le minéral à température ambiante et à un champ donné), augmente peu à l'application de champs atteignant 1 T classiquement utilisés en laboratoire et en aucun cas n'atteint la saturation. En revanche, l'IRM des minéraux tels que la magnétite et les sulfures de fer ferromagnétiques augmente vite et atteint un état de saturation à des champs relativement faibles. Des mélanges de fractions minéralogiques de hautes et basses coercivités dans un échantillon se traduisent par des courbes d'acquisition mixtes, de concavité plus ou moins prononcées (Figure III.1).

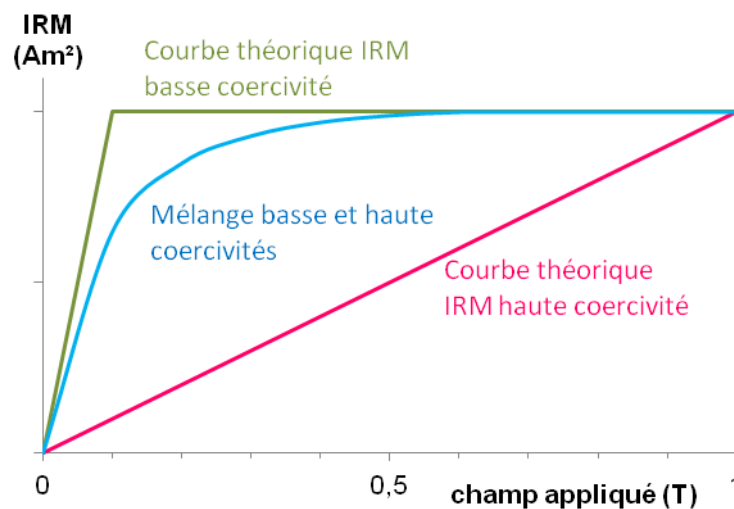


Figure III.1: Courbes d'acquisition théoriques de l'IRM pour des minéraux de basse coercivité (vert), haute coercivité (rouge) et mélange (bleu).

Pour quantifier cette concavité, le paramètre « S-ratio » a été proposé par King & Channell (1991). Le S-ratio est le rapport entre l'IRM acquise après application d'un champ inverse à -0,3 T sur une IRM acquise au préalable à 1 T.

$$S - ratio = \frac{-IRM_{-0,3 T}}{IRM_{1 T}}$$

Il peut également être calculé avec la formule suivante (Bloemendal *et al.*, 1992) :

$$S - ratio = \frac{\left[\frac{(-IRM_{-0,3T})}{IRM_{1T}} + 1 \right]}{2}$$

Nous avons utilisé la première formule, qui nous permet d'obtenir des valeurs comprises entre -1 et 1. Si le S-ratio est égal à 1, cela signifie que la fraction magnétique est uniquement composée de minéraux de basses coercivités puisque l'ensemble des moments magnétiques saturés à 1 T ont été remobilisés en sens opposés à -0.3 T. En cas de mélange, le S-ratio sera inférieur à 1 et plus la proportion de minéraux de hautes coercivités est grande, plus il diminuera.

Les courbes d'IRM et de rémanence en champ inverse, ont été acquises sur les MES de la Seine avec le Micromag AGM2900 du LSCE. La mesure consiste à désaimanter l'échantillon, puis à le ré-aimanter en appliquant un champ progressivement croissant jusqu'à +1 T pour obtenir l'IRM à 1 T. La différence avec la courbe d'hystérésis (présentée dans la partie III.2.2) est que la mesure se fait à chaque étape (classiquement tous les 2 mT) après annulation du champ. Une fois la courbe de rémanence acquise, un champ inverse est progressivement appliqué de 0 à -1 T. L'IRM diminue progressivement depuis sa valeur acquise à +1T jusqu'à atteindre IRM_{-1T} qui doit être égale à $-IRM_{1T}$ (on parle de « backfield » de l'IRM ou de mesure en champ inverse).

Les courbes d'IRM ont ainsi été obtenues sur un échantillon représentatif par site. Trois exemples de courbes sont présentés dans la Figure III.2. Les courbes d'acquisition (à droite) et de backfield (à gauche) correspondent à celles d'un mélange de minéraux de hautes et basses coercivités (voir Figure III.1).

Les S-ratios des trois échantillons de la Figure III.2 sont donnés dans le Tableau III.2. Dans ces exemples, le S-ratio de l'échantillon de Saron est le plus faible (0,89), suivi par celui de Thomery (0,91) puis celui de Bougival VNF (0,94). L'échantillon de Saron contient donc une plus grande proportion de minéraux de haute coercivité. En raison de la faible aimantation de l'hématite et de la goethite par rapport à celle de la magnétite (voir Tableau III.1), cette proportion est importante car elle peut atteindre 80% en poids de la fraction magnétique pour un S-ratio de 0.8. Le pourcentage exact est difficile à quantifier car la taille des minéraux joue également sur le S-ratio (Bloemendal *et al.*, 1992; Frank & Nowaczyk, 2008; Heslop, 2009). Des différences de S-ratio le long de la Seine peuvent donc potentiellement être dues à une variation de taille des particules magnétiques. Cependant, dans les trois cas présentés dans le Tableau III.2, même si parfois, les minéraux de haute coercivité sont présents, l'IRM est principalement portée par des minéraux de basse coercivité, comme la magnétite, maghémite et/ou greigite.

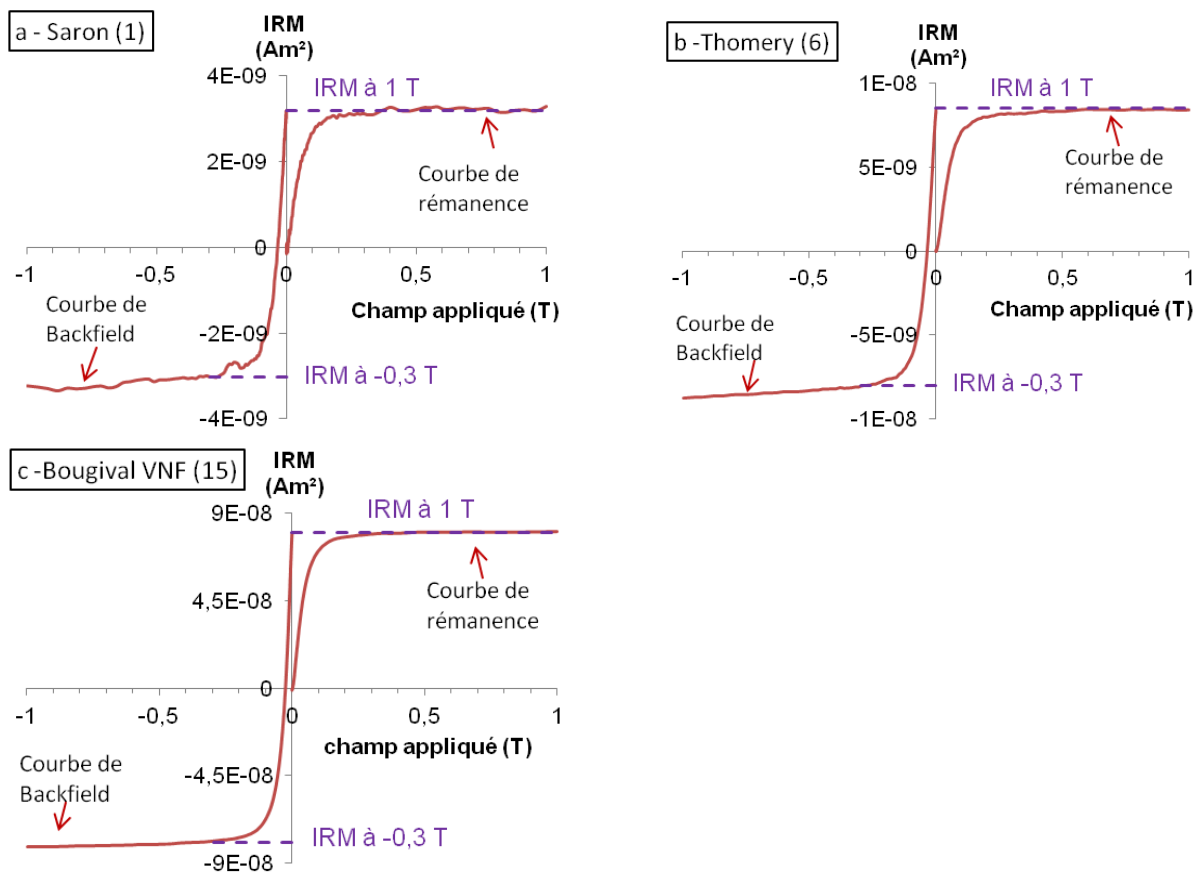


Figure III.2: Exemples de courbes d'IRM sur des échantillons de MES de la Seine. (a) Echantillon de Saron, (b) Echantillon de Thomery et (c) Echantillon de Bougival VNF.

Tableau III.2 : Exemple de calculs de S-ratio sur trois échantillons de MES de la Seine.

Site (numéro)	IRM _{-0,3T} (Am ²)	IRM _{1T} (Am ²)	S-ratio
Saron (1)	-5,0*10 ⁻⁹	5,6*10 ⁻⁹	0,89
Thomery (6)	-8,3*10 ⁻⁹	9,1*10 ⁻⁹	0,91
Bougival VNF (15)	-7,4*10 ⁻⁷	7,8*10 ⁻⁷	0,94

Le S-ratio ne permet de séparer la fraction magnétique qu'en deux populations (haute et basse coercivité). Même si cette fraction peut potentiellement être plus complexe, ce paramètre permet néanmoins de mettre en évidence des mélanges de coercivités et d'utiliser d'autres méthodes de caractérisation des minéraux.

III.1.2. Séparation des différentes familles de coercivité : analyse des composantes de l'IRM

Plusieurs études se sont portées sur la déconvolution des courbes d'acquisition de l'IRM, notamment pour la caractérisation minéralogique. Ces études montrent que l'IRM peut être décomposée en gaussiennes à partir du logarithme des mesures ou « cumulative log-

Gaussian » (Robertson & France, 1994; Kruiver *et al.*, 2001; Egli, 2004c; Heslop *et al.*, 2004). Chaque gaussienne (C_x) représente une composante ou un ensemble de composantes magnétiques et est définie par trois paramètres :

- La SIRM (IRM à saturation), déterminée graphiquement grâce à une courbe d'acquisition linéaire de l'IRM (Linear Acquisition Plot ou LAP, Figure III.3a).
- Le $B_{1/2}$, la coercivité médiane de la composante (en T), soit le champ nécessaire pour acquérir la moitié de l'IRM à saturation et qui est déterminée à partir du Gradient Acquisition Plot (GAP, Figure III.3b), qui est la dérivée du LAP.
- Le DP, le paramètre de dispersion qui représente la déviation standard, (Kruiver *et al.*, 2001; Heslop *et al.*, 2002). Plus il est élevé, plus la dispersion est importante et moins la coercivité est définie.

La $SIRM_x$ donne la contribution de la composante x par rapport à la SIRM totale et est rapportée en pourcentage. Les paramètres $B_{1/2x}$ et DP_x dépendent de la nature de la composante. Plus une composante a un DP élevé, plus sa fraction magnétique est hétérogène.

En plus de discriminer les différentes fractions magnétiques en fonction de leur coercivité, cette méthode permet de détecter différentes populations de même minéralogie. Elle est notamment appliquée pour estimer la contribution de magnétite d'origines biogéniques, détritiques et anthropiques (Egli, 2004a; b; c; Roberts *et al.*, 2012).

Les courbes de backfield d'IRM ont été utilisées plutôt que les courbes de rémanence (voir Figure III.2) car ces dernières sont plus bruitées et il est difficile de juger si la désaimantation effectuée avec l'AGM 2900 avant l'acquisition de la courbe de rémanence est complète. Dans la majorité des cas, les données ont été lissées sur 3 à 5 points. Chaque enregistrement a été traité à partir du modèle d'analyse de composantes de Kruiver (2001) disponible en fichier Excel sur <http://www.geo.uu.nl/~forth/> à raison de trois à quatre composantes selon les échantillons. La fiabilité des modèles est estimée graphiquement dans un premier temps puis vérifiée avec la somme des moindres carrés (χ^2) des courbes LAP et GAP.

La Figure III.3 est un exemple de déconvolution de l'IRM sur les échantillons de MES de Saron, Thomery et Bougival. Dans ces exemples, l'IRM est portée entre 22 et 28 % par deux composantes de très faible coercivité ($B_{1/2}$ inférieurs à 15 mT) que l'on regroupera en une seule (composante C_1) en raison de leurs propriétés similaires. 63 et 69 % de l'IRM est portée par une composante C_2 de plus haute coercivité ($B_{1/2}$ entre 30 et 41 mT) et entre 3 et 10 % par une composante C_3 de très haute coercivité ($B_{1/2}$ entre 100 et 316 mT).

Les composantes C_1 apparaissent dans presque tous les échantillons naturels et peuvent être des composantes d'ajustement sans signification physique (Heslop *et al.*, 2004; Vasiliev *et al.*, 2007) et qui représentent le bruit de départ de la courbe d'acquisition. Il peut également s'agir de particules d'origine naturelle détritique (Egli, 2004a; Roberts *et al.*, 2012).

La composante C_2 représente la majeure partie de l'IRM. Les valeurs de $H_{1/2}$ sont plus élevées que celle des composantes C_1 mais restent dans la gamme des « faibles coercivités ». Les valeurs de coercivité sont similaires à celles de la magnétite (Kruiver *et al.*, 2001; Roberts *et al.*, 2012), mais aussi à celles de la greigite (Vasiliev *et al.*, 2007; Roberts *et al.*, 2011) ou de

la maghémite (Robertson & France, 1994; Hu *et al.*, 2013). La composante C_2 peut représenter une ou plusieurs de ces composantes.

La composante C_3 représente les minéraux de haute coercivité de type hématite (Robertson & France, 1994; Egli, 2004a; Roberts *et al.*, 2012). Les composantes de goéthite présentent généralement des $B_{1/2}$ de l'ordre de 10^3 mT (Kruiver *et al.*, 2001). Dans ces exemples, la composante C_3 de l'échantillon de Bougival (Figure III.3c) a une plus faible contribution (3 %) et est plus proche des basses coercivités (100 mT) que pour les deux autres échantillons (9 et 10 %, et $B_{1/2}$ entre 250 et 316 mT). Ceci est cohérent avec le S-ratio plus élevé à Bougival (0,94) qu'à Thomery et Saron (0,91 et 0,89).

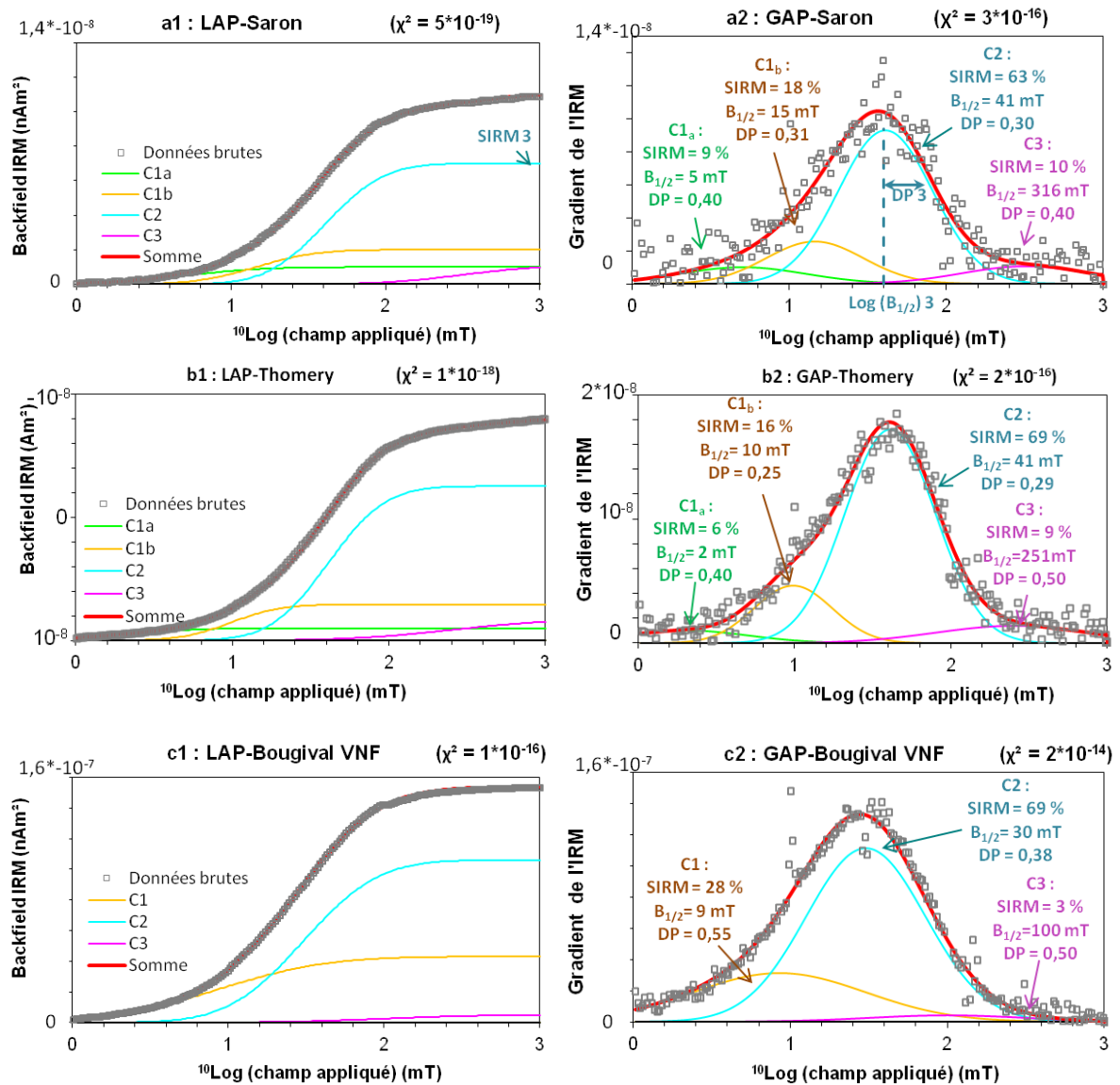


Figure III.3 : Exemples de courbes LAP (1) et GAP (2) obtenues par décomposition du signal de l'IRM en différentes composantes gaussiennes. (a) échantillon de MES de Saron. (b) Thomery. (c) Bougival VNF. Les moindres carrés (χ^2) et les paramètres SIRM, $B_{1/2}$ et DP de la composante C_2 (courbe bleue) sont indiqués sur la figure.

En résumé, les décompositions de l'IRM permettent de différencier plusieurs « populations coercitives » et de quantifier leur contribution respective à l'IRM totale. Ces décompositions confirment notamment des mélanges de minéraux de haute et de faible coercivité en proportions variables. Les minéraux de faible coercivité semblent se séparer en plusieurs « sous-populations », mais les composantes de très faible coercivité (C_1) sont à interpréter avec prudence (Heslop *et al.*, 2004).

Ces traitements de l'IRM permettent, connaissant les différentes « familles » de coercivité, de poursuivre avec des analyses spécifiques précisant la composition minéralogique à l'origine de ces coercivités.

III.1.3. Caractérisation minéralogique : courbes thermomagnétiques de l'IRM

La caractérisation minéralogique par courbes thermomagnétiques offre un bon complément aux analyses à température ambiante car elle permet de discriminer plusieurs minéraux magnétiques par leur température de Curie ou par leur température de transformation pour les minéraux métastables comme les sulfures. Cette méthode se base sur le fait que les minéraux magnétiques perdent progressivement leur aimantation avec l'augmentation de la température. Des cycles de chauffe et refroidissement peuvent ainsi être menés sous champ avec une balance de Curie, la différence entre les deux courbes illustrant les transformations minéralogiques ayant eu lieu pendant la chauffe. En raison de la faible concentration de particules magnétiques dans les MES et de la trop faible quantité de MES collectée à chaque site, cette méthode nécessitant une extraction magnétique dans les échantillons peu aimantés n'a pas pu être appliquée dans cette étude.

La méthode choisie a donc consisté à désaimanter par chauffe les échantillons préalablement aimantés par l'application d'un champ magnétique continu à 1 Tesla. L'IRM_{IT} ainsi acquise est mesurée à température ambiante puis désaimantée thermiquement par étapes : l'échantillon est chauffé à une température T_1 , refroidit en champ nul et l'IRM restante est mesurée. Le protocole est répété à des températures croissantes jusqu'à la désaimantation complète de l'échantillon, permettant ainsi d'obtenir une courbe de désaimantation de l'IRM en fonction de la température. Les différents segments des courbes obtenues peuvent ainsi illustrer des minéralogies différentes (températures de Curie ou température de transformation) ou des tailles de grains variées (températures de déblocage, Figure III.4).

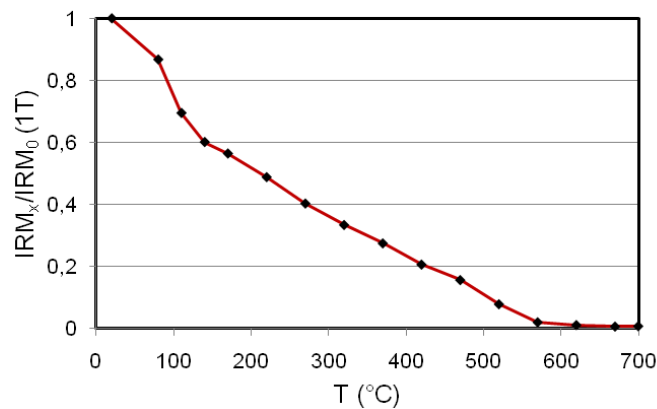


Figure III.4 : Exemple de courbe de désaimantation thermique de l'IRM à 1 T mesurée jusqu'à 700°C.

Les propriétés de coercivité étant parfois similaires pour des minéraux très différents (comme goethites/hématites ou magnétites/maghémities), il est possible de perfectionner les interprétations minéralogiques en analysant le spectre thermique de chaque famille coercitive : il s'agit de la désaimantation thermique de l'IRM sur trois axes perpendiculaires (Lowrie, 1990). Trois champs de valeurs différentes sont appliqués successivement le long des trois axes perpendiculaires de l'échantillon. Le premier champ (H_1) est le plus élevé et oriente le maximum de moments magnétiques de l'échantillon dans sa direction. Le deuxième, plus faible ($H_2 < H_1$), est appliqué dans une direction perpendiculaire à la précédente afin de réorienter les moments magnétiques des minéraux de coercivité inférieure à H_2 . Ainsi les moments magnétiques de coercivité comprise entre H_1 et H_2 restent alignés suivant le premier axe. Le dernier champ appliqué est le plus faible ($H_3 < H_2$), et est appliqué dans la direction perpendiculaire aux deux autres. Ainsi, les moments magnétiques de coercivité comprise entre H_2 et H_3 sont alignés selon le deuxième axe et ceux dont la coercivité est inférieure à H_3 sont alignés selon le troisième axe (Figure III.5). Le protocole est ensuite le même que pour la désaimantation thermique classique. A chaque étape, l'intensité restante sur chacun des axes est mesurée.

Cette mesure est destructive et nécessite plus d'une centaine de milligrammes. Pour cette raison, seuls quelques échantillons représentatifs ont été sélectionnés. Il s'agit d'une partie d'un échantillon de MES par site de 2011-2012. Chaque échantillon a été consolidé avec une pâte composée d'un mélange de kaolin en poudre et de silicate de sodium en solution pure (non magnétique) et modelé en cube. Ces préparations ont ensuite été placées dans des cubes en plastique et aimantées dans les trois directions distinctes avec le Pulse Magnetometer 2G660 du LSCE. Les champs appliqués sont dans l'ordre : 1 (H_1), 0,3 (H_2) puis 0,1 T (H_3) (Figure III.5). Les mesures de l'IRM ont été faites avec le magnétomètre cryogénique 2G-755R du LSCE et les échantillons ont été chauffés environ tous les 50°C jusqu'à 700°C avec un four PYROX à champ nul, le tout placé dans la chambre amagnétique du LSCE.

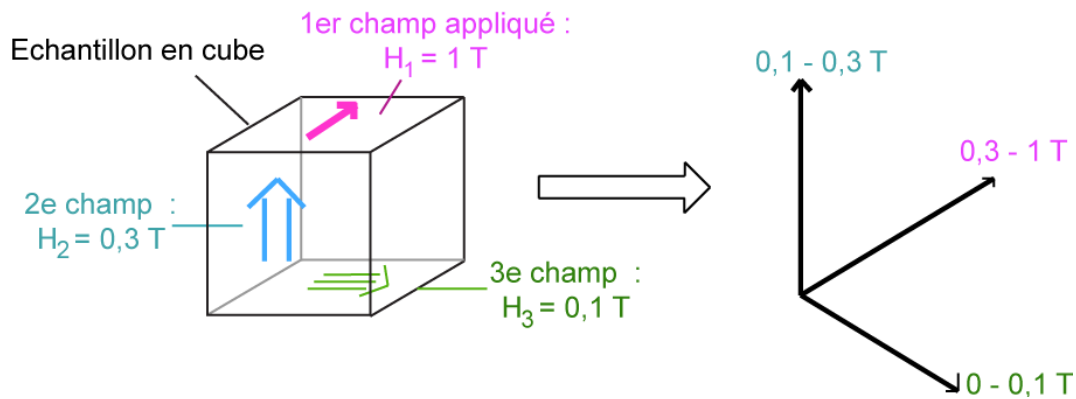


Figure III.5 : Schéma d'une préparation de MES aimantée dans trois directions.

Les courbes thermiques d'IRM sur trois axes représentées sur la Figure III.6 sont obtenues sur les MES de Saron, Thomery et Bougival. Dans ces trois exemples, la composante des minéraux de basses coercivités (0 à 0,1 T) représente 60 à 68 % de l'IRM totale. La composante de coercivités moyennes (0,1 à 0,3 T) représente 23 à 30 % de l'IRM totale et celle des hautes coercivités (0,3 à 1 T), 9 à 12 %.

Les courbes de Saron et de Thomery (Figure III.6a et b) montrent une première inflexion vers 140 et 170°C pouvant correspondre à la déstabilisation de l'aimantation de titanomagnétites très riches en titane (Dunlop & Özdemir, 1997) ou à des grains relativement grossiers qui ont ce type de températures de déblocage. Ces ruptures sont toutefois peu marquées et n'apparaissent d'ailleurs ni dans l'échantillon de Bougival (Figure III.6c), ni dans plusieurs autres échantillons de MES (voir Annexe E). Elles ne sont donc peut-être pas significatives partout. L'IRM de tous les échantillons est presque totalement désaimantée au-delà de la température de Curie de la magnétite (580°C), confirmant ainsi la présence de ce minéral dans la fraction magnétique.

Les courbes des moyennes (0,1 à 0,3 T) et hautes coercivités (0,3 à 1 T) sont plus bruitées en raison de leur faible intensité initiale, ce qui rend plus difficile la reconnaissance d'éventuels changements de pente. Sur les courbes des hautes coercivités, les IRM semblent diminuer entre 80-110°C, ce qui est proche à la température de Curie de la goethite (120°C) mais l'augmentation de l'IRM observée à 140°C à Thomery et Bougival suggèrent que ces variations sont plutôt dues à du bruit (une augmentation de l'IRM avec la température n'est physiquement pas possible quand l'échantillon est refroidi en champ nul). Seul l'échantillon de Saron présente une rupture « propre » au niveau de la température de Curie de la goethite (Figure III.6a).

Toujours pour l'échantillon de Saron, l'IRM totale restante au-delà de 620°C représente environ 1,5 % de l'IRM initiale (contre moins de 0,5 % pour Thomery et Bougival). Ceci pourrait indiquer une plus grande contribution de l'hématite dans l'IRM dont la température de Curie est à 695°C. La goethite et l'hématite étant des minéraux de « haute coercivité » cette observation est cohérente avec les S-ratios et les analyses de composantes de l'IRM qui montrent une plus grande proportion de minéraux de hautes coercivités dans les MES de Saron.

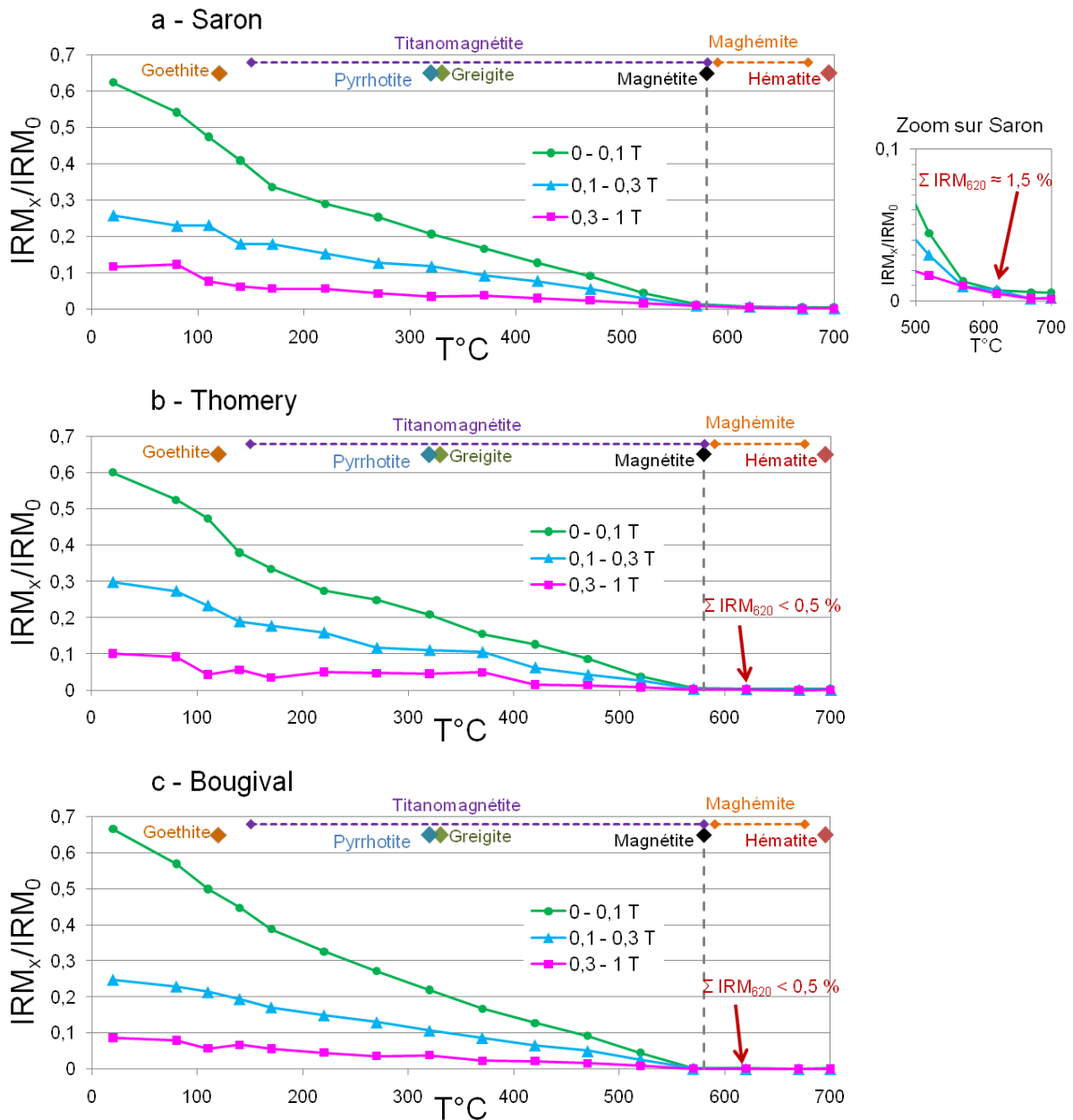


Figure III.6 : Courbes thermomagnétiques de l'IRM sur 3 axes obtenues sur les échantillons de Saron (a), Thomery (b) et Bougival VNF (c). En vert : désaimantation des minéraux de faibles coercivités (0 à 0,1 T). En bleu : désaimantation des minéraux de coercivités intermédiaires (0,1 à 0,3 T). En mauve : désaimantation des minéraux de hautes coercivités (0,3 à 1 T). Les températures de Curie des minéraux magnétiques les plus communs sont indiqués en haut de chaque diagramme.

Dans l'ensemble, les courbes thermomagnétiques montrent que les minéraux de basse coercivité sont principalement des magnétites, accompagnées en proportions variables par des titanomagnétites. Les minéraux de haute coercivité (comprenant au moins la goethite et l'hématite) ne sont pas systématiquement détectés.

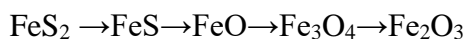
Si des transformations minéralogiques ont eu lieu lors de la chauffe, elles ne peuvent être observées lors de cette expérience car le refroidissement est réalisé en champ nul. Afin de déterminer si elles ont eu lieu, le protocole d'aimantation et de mesure avec les trois axes a été

répété sur la moitié des échantillons après cette première chauffe. Une augmentation significative de l'IRM est alors observée sur les trois axes, allant d'un facteur 6 à plus de 60 selon l'échantillon. Cela signifie que la minéralogie magnétique s'est modifiée pendant la première chauffe, passant de minéraux faiblement ou non-aimantés en minéraux de plus forte aimantation.

La Figure III.7 regroupe les courbes d'IRM de Saron mesurées lors des première et seconde acquisitions et chauffes. Elles sont représentatives de l'ensemble des échantillons traités bien qu'ayant le plus faible facteur d'augmentation d'IRM (entre 5 et 11 selon la composante), ce qui permet de visualiser les deux courbes de désaimantation pour chaque composante sur le même diagramme. De manière générale, la désaimantation de la deuxième acquisition sur l'axe des basses coercivités (Figure III.7a) est plus linéaire que celle de la première acquisition : la rupture de désaimantation vers 140-150°C n'apparaît plus. La seule rupture nette apparaît au niveau du point de Curie de la magnétite, au-delà de laquelle il n'y a plus d'aimantation. Malgré une IRM de départ beaucoup plus élevée, les courbes des axes de moyennes (Figure III.7b) et hautes coercivités (Figure III.7c) sont à peu près aussi irrégulières lors de la seconde chauffe que lors de la première. Ces irrégularités ne montrent toutefois pas de températures de déblocage caractéristiques. La courbe de plus forte coercivité montre très clairement une décroissance d'intensité se poursuivant jusqu'à 700°C.

La transformation la plus classique quand une chauffe est menée à l'air est l'oxydation de la magnétite en hématite. Si cette transformation était la seule, l'aimantation aurait dû décroître puisque l'hématite a une aimantation significativement plus faible que la magnétite. L'oxydation a certainement eu lieu, mais sa contribution est négligeable dans nos échantillons par rapport aux autres transformations.

Les sulfures de fer tendent à s'oxyder en chauffant. Le processus de désulfuration dépend autant de la température que du taux d'oxygène et du temps de chauffe. Il commence néanmoins généralement à partir de 600°C (Mitchell, 2002). La transformation se fait en plusieurs stades d'oxydation de la manière suivante :



Il est donc possible que la pyrite ou d'autres sulfures de fer non magnétiques à température ambiante soient présents dans les MES prélevées dans la Seine et qu'ils aient été oxydés en magnétites lors de la première chauffe. Ceci expliquerait l'augmentation de l'IRM d'un facteur 6 à 60. Il est également possible que l'augmentation de l'IRM soit due à une oxy-exsolution de titanomagnétites en magnétites (Dunlop & Özdemir, 1997; Bowles *et al.*, 2012).

La méthode de désaimantation thermique de l'IRM sur trois axes confirme que l'essentiel de l'IRM à température ambiante est porté par des magnétites. La contribution de l'hématite et de la goéthite, bien que plus ou moins importante selon l'échantillon peut être considérée comme négligeable par rapport à celle la magnétite même si ces minéraux peuvent être en concentration relativement importante. Une deuxième série de mesures effectuée sur les échantillons préalablement chauffés à 700°C semble également montrer la présence de sulfures de fer et/ou de titanomagnétites.

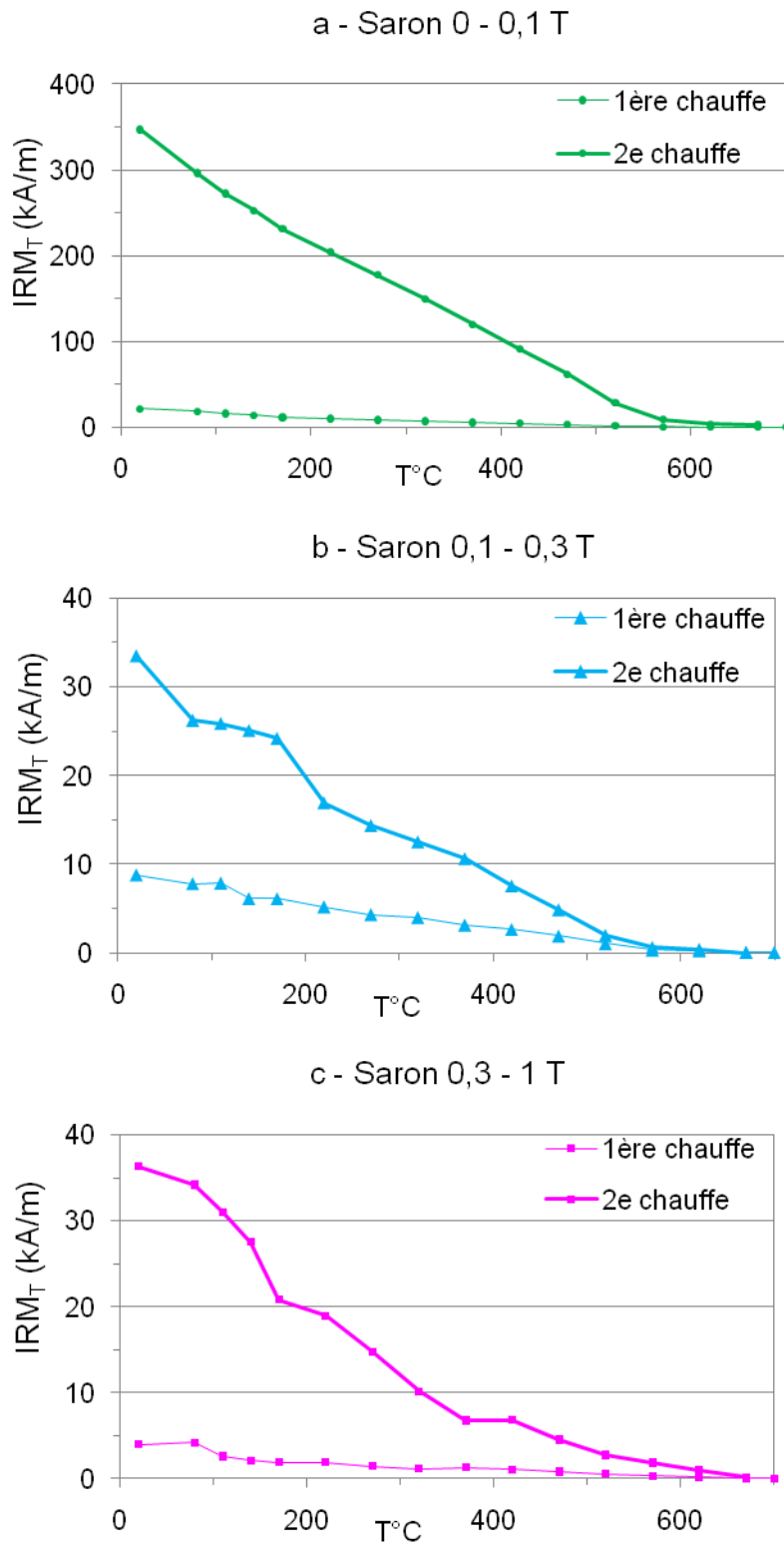


Figure III.7 : Désaimantation thermique de l'IRM des MES de Saron lors des première et deuxième chauffes. (a) axe de basse coercivité. (b) axe de moyennes coercivités. (c) axes de hautes coercivités.

III.2. Taille des magnétites

Cette partie décrit les méthodes de caractérisation de la taille des particules magnétiques dans les MES de la Seine. La partie précédente a montré que l'aimantation rémanente des MES de la Seine est principalement portée par la magnétite. La fraction magnétique restante est ainsi considérée comme négligeable en termes de « contribution magnétique ». La potentielle présence de titanomagnétites n'est pas gênante, car les propriétés magnétiques de ces minéraux sont relativement similaires à celles de la magnétite (Day *et al.*, 1977) et peuvent donc être étudiées avec les mêmes méthodes.

III.2.1. Domaines magnétiques et taille des particules

En raison des lois d'énergie magnétostatique, en augmentant sa taille, une particule magnétique forme des « domaines » au sein desquels les moments magnétiques sont uniformément orientés. Une particule possédant un seul domaine magnétique est appelée mono-domaine ou SD (pour « single-domain ») et une particule possédant plusieurs domaines est multi-domaine ou MD. Entre les particules SD et MD existe un état de transition pour les particules possédant quelques domaines (PSD pour « pseudo-single-domain »). Les différents états de domaines varient selon les structures cristallines des minéraux ferromagnétiques. Les limites dépendent donc également de la forme et du rapport entre la longueur et la largeur (Figure III.8) Le consensus scientifique n'est pas acquis au sujet de la limite granulométrique exacte des limites SD/PSD et PSD/MD et les limites proposées varient selon les auteurs. Les particules superparamagnétiques (SP) sont plus petites que les SD et ne possèdent pas d'aimantation stable à l'échelle de la mesure.

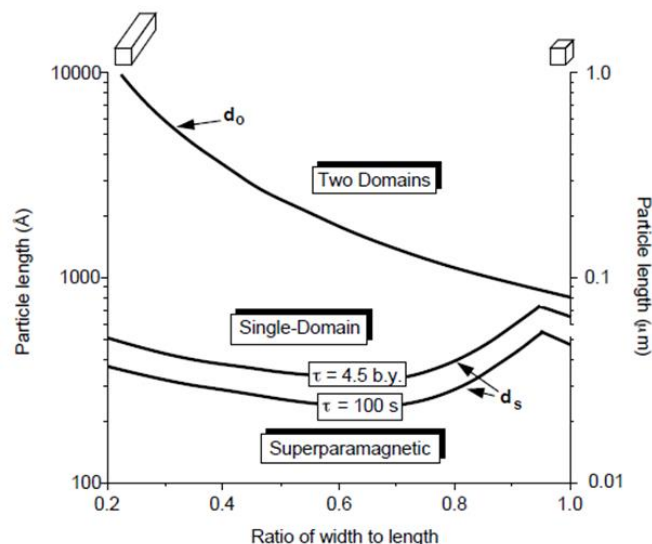


Figure III.8 : Domaines magnétiques selon le rapport longueur/largeur de la particule de magnétite (Source : Butler, 1992).

A titre d'exemple, les magnétosomes, de tailles nanométriques (Blakemore, 1975) en raison de leur structure monocristalline sont mono-domaines (Moskowitz *et al.*, 1988). S'il est généralement admis que les particules d'origine anthropiques et détritiques ont des tailles très variables, elles sont généralement plus grossières que les magnétosomes (PSD fin à MD) (Strzyszcz *et al.*, 1996; Jordanova *et al.*, 2004; Meena *et al.*, 2011).

III.2.2. Taille moyenne des magnétites : paramètres d'hystérésis magnétique et diagramme de Day

Le phénomène d'hystérésis magnétique est propre aux minéraux ferromagnétiques. Le principe de la mesure est le même que pour l'acquisition de l'IRM mais dans le cas présent, la mesure se fait sous champ. Lors de la mesure de l'aimantation sous champ, les composantes dia-, para- et ferromagnétiques contribuent à l'acquisition du signal. Si l'échantillon comporte des minéraux ferromagnétiques, l'aimantation persiste à champ nul et la courbe forme une boucle (Figure III.9a).

Les cycles d'hystérésis magnétique permettent d'obtenir les paramètres suivants :

- Le M_s , aimantation à saturation : aimantation maximale spécifique que peut atteindre un échantillon sous champ (en considérant que la saturation est atteinte à 1 T).
- Le B_c , champ coercitif : le champ nécessaire pour annuler M_s .
- Le M_{rs} , aimantation rémanente à saturation, équivalente de l'IRM à saturation.

Les courbes d'hystérésis ont été obtenues sur le Micromag AGM 2900 du LSCE. Le champ appliqué est compris entre -1 T et +1 T. Les courbes obtenues (Figure III.9a) sont corrigées de la pente à champ fort pour éliminer la contribution des fractions non ferromagnétiques (diamagnétiques et paramagnétiques) et avoir accès aux paramètres caractérisant la fraction ferromagnétique. (Figure III.9b).

Les minéraux paramagnétiques, notamment ceux contenant du fer (comme la pyrite et les argiles) acquièrent une aimantation induite (sous champ) positive, proportionnelle au champ appliqué alors que les minéraux diamagnétiques (comme le quartz, la calcite, etc) acquièrent une aimantation très faible et négative. Lorsque la boucle ferromagnétique *s.l.* est fermée dans le cycle d'hystérésis, la pente à fort champ représente donc la contribution de ces minéraux à l'aimantation totale induite. La valeur de cette pente (paramètre S.C. = « slope correction ») est soustraite de l'ensemble du cycle pour obtenir le signal purement ferromagnétique *s.l.* et peut être utilisée pour appréhender la contribution des minéraux dia- et paramagnétiques. Plus la S.C. est négative (susceptibilité en champ fort forte), plus la proportion des minéraux paramagnétiques est élevée. Si S.C. est positive, la fraction paramagnétique est absente et c'est le signal diamagnétique (en particulier celui de la sonde en quartz) qui est observé. Dans les échantillons de la Seine, les valeurs de S.C. sont négatives ce qui indique la présence de minéraux paramagnétiques. Les résultats des interprétations du paramètre S.C. seront présentés dans le Chapitre V.

Le quatrième paramètre, B_{cr} (champ coercitif rémanent), est obtenu en appliquant des champs inverses à une aimantation préalablement obtenue à 1 T (M_{rs}). La mesure se fait hors champ et le H_{cr} est le champ nécessaire pour annuler le M_{rs} . Ces courbes de rémanence en champ inverse ont été obtenues avec un pas de champ de 2 à 5 mT. Lorsque la droite des abscisses est croisée par la courbe, l'expérience est stoppée et le B_{cr} est obtenu par interpolation linéaire entre les deux points encadrant le passage à $M_{rs} = 0$ (Figure III.9c).

Ces mesures sont relativement rapides et nécessitent peu de matériel (3-30 mg). Elles ont donc été appliquées sur la totalité des échantillons de MES (et sédiment du fond) collectés.

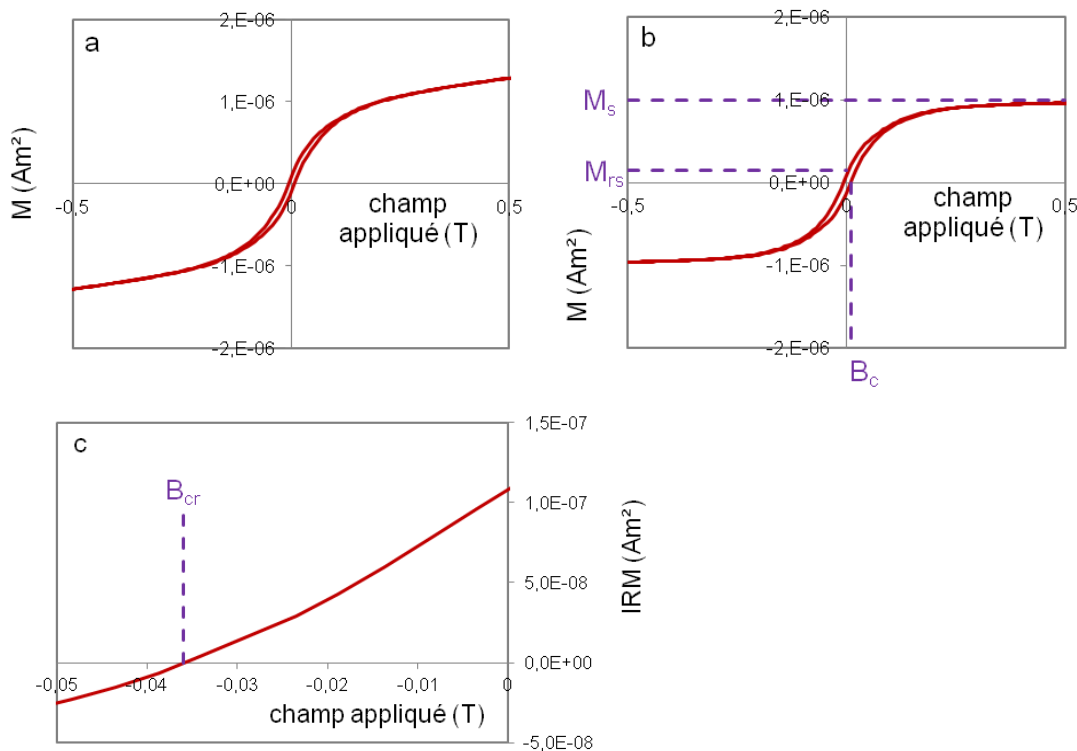


Figure III.9 : Mesures des paramètres d’hystérésis magnétique. (a) Exemple de courbe d’hystérésis magnétique entre -0,5 et 0,5 T sur un échantillon de Bougival avec la contribution de minéraux dia-/paramagnétiques. (b) même courbe d’hystérésis avec correction de pente (la contribution des dia-/paramagnétiques est retirée). (c) Courbe de rémanence en champ inverse sur le même échantillon. Les paramètres d’hystérésis magnétiques sont projetés sur les figures correspondantes.

Il est possible d’avoir accès à la taille des magnétites présentes dans un échantillon en utilisant ces paramètres d’hystérésis. Cette méthode est calibrée pour la magnétite et les titanomagnétites (Day *et al.*, 1977) ainsi que pour les sulfures (Roberts *et al.*, 2011). Pour ces minéraux, les rapports d’aimantations (M_{rs}/M_s) sont reportés en fonction des rapports de champs coercitifs (B_{cr}/B_c). Sur ce diagramme la distribution des points est hyperbolique. Plus le nombre de domaines (et donc la taille) des magnétites est important, plus B_{cr}/B_c est élevé et plus M_{rs}/M_s est faible (Figure III.10a).

Bien qu'ayant l'avantage de facilement permettre la comparaison des variations de taille moyenne de magnétites, le diagramme de Day ne permet pas de déterminer si les points obtenus sont le résultat d'un mélange entre différentes populations de magnétites grossières et fines, ou si elles sont toutes de taille homogène. Dunlop (2002) a proposé une quantification de la contribution des différentes populations de magnétite, selon l'emplacement des points obtenus par rapport à des courbes de mélange calculées théoriquement. Ces courbes peuvent sensiblement varier selon l'origine des échantillons témoins utilisés dans les modèles théoriques (Dunlop & Carter-Stiglitz, 2006).

La Figure III.10b montre la position de l'ensemble des échantillons de MES de la Seine sur le diagramme de Day. Les courbes théoriques de mélange SD-SP, SD-PSD et SD-MD de Dunlop et Carter-Stiglitz (2006) sont incluses dans le diagramme. La taille moyenne des magnétites des MES est très variable selon l'échantillon concerné. Tous les échantillons de MES prélevés ont des tailles moyennes de magnétites qui les placent au-delà de la limite PSD ($B_{cr}/B_c > 2$ et $M_{rs}/M_s < 0,25$). Certains échantillons ont des tailles moyennes de magnétite plus grossières, dépassant la limite MD ($B_{cr}/B_c > 4$ et $M_{rs}/M_s < 0,05$).

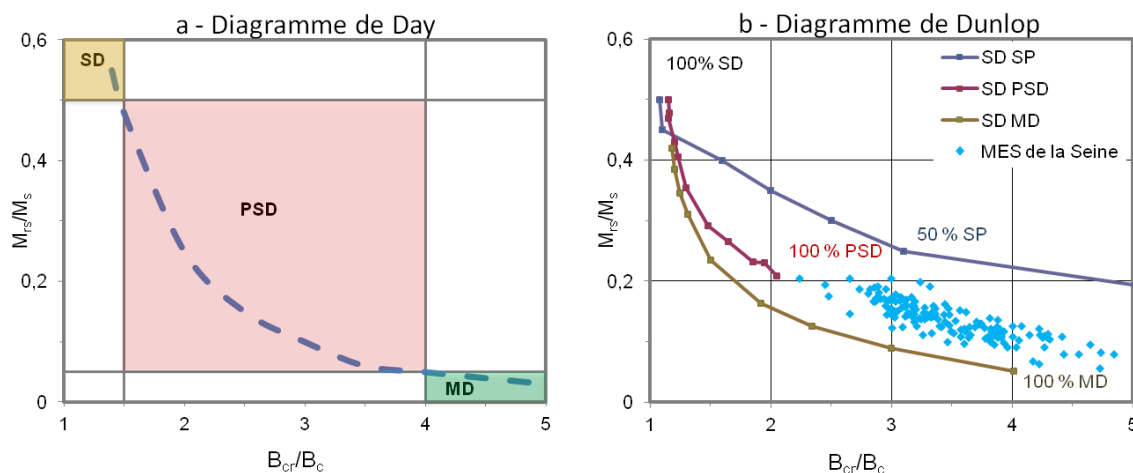


Figure III.10 : Diagrammes de Day. (a) Diagramme avec l'hyperbole théorique des (titano)magnétites de Day (1977). (b) Diagramme avec les courbes théoriques de mélange SD-SP, SD-PSD et SD-MD (Dunlop, 2002; Dunlop & Carter-Stiglitz, 2006). Tous les échantillons de MES prélevés dans la Seine sont reportés (symboles bleus) dans le diagramme (b).

III.2.3. Distribution des tailles de magnétites : Diagrammes de FORC

La méthode des « First-Order Reversal Curve Diagrams » ou diagrammes de FORC (Roberts *et al.*, 2000) permet d'identifier qualitativement pour chaque échantillon la contribution des particules SD, PSD ou MD à la taille moyenne identifiée sur le diagramme de Day.

Ces diagrammes sont formés de plusieurs courbes d'hystérésis partielles dites « First-Order Reversal Curves » (Mayergoyz, 1986). Après avoir saturé l'échantillon avec un champ positif élevé, on applique un champ inverse appelé H_a et le FORC est alors défini à partir de la

courbe d'aimantation obtenue entre H_a et le retour à la saturation. A partir de ce champ, H_b ($\geq H_a$) est mesuré à chaque point M de coordonnées (H_a, H_b) , (Figure III.11a). Le processus est ainsi répété avec des valeurs de H_a différentes pour obtenir plusieurs FORCs (Figure III.11b). Le diagramme est ensuite obtenu à partir des dérivées secondes de ces FORCs. Par convention une conversion est nécessaire : on passe d'un diagramme (H_a, H_b) à un diagramme (H_u, H_c) où $H_u = (H_a + H_b)/2$ et $H_c = (H_b - H_a)/2$ (Figure III.11c ; Roberts *et al.*, 2000).

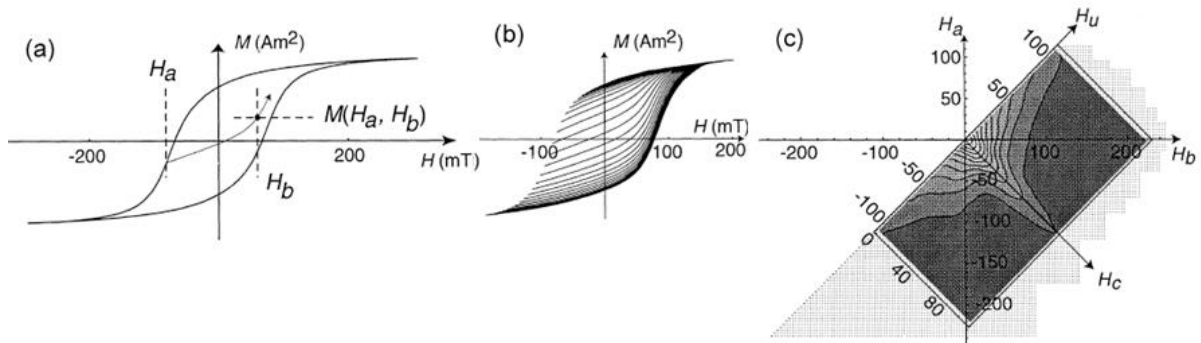


Figure III.11 : Illustration de la construction d'un diagramme de FORC (figures issues de Roberts *et al.*, 2000). (a) Courbe d'hystérésis et représentation des paramètres H_a , H_b et M permettant d'obtenir les diagrammes de FORC. (b) Ensemble de 33 FORCs. (c) Diagramme $(H_a ; H_b)$ avec les axes $(H_u ; H_c)$.

Si des particules magnétiques d'une taille donnée sont présentes en quantité et en proportion suffisantes, elles seront représentées par des courbes caractéristiques de leur nombre de domaines. Des exemples sont présentés dans la Figure III.12. Les particules MD sont représentées par un spectre fortement étiré sur la verticale et les lignes de contour divergent dès l'origine et donnent l'impression d'un spectre non refermé à l'origine (Figure III.12a). Un spectre plus étiré sur la verticale et toujours refermé sur les basses coercivités est caractéristique des PSD (Figure III.12b). Les particules SP sont caractérisées par un spectre vertical secondaire et asymétrique (Figure III.12c). Un spectre étiré sur l'horizontale, peu étiré sur la verticale et atteignant de hautes coercivités est caractéristique des particules SD sans interaction (Figure III.12d).

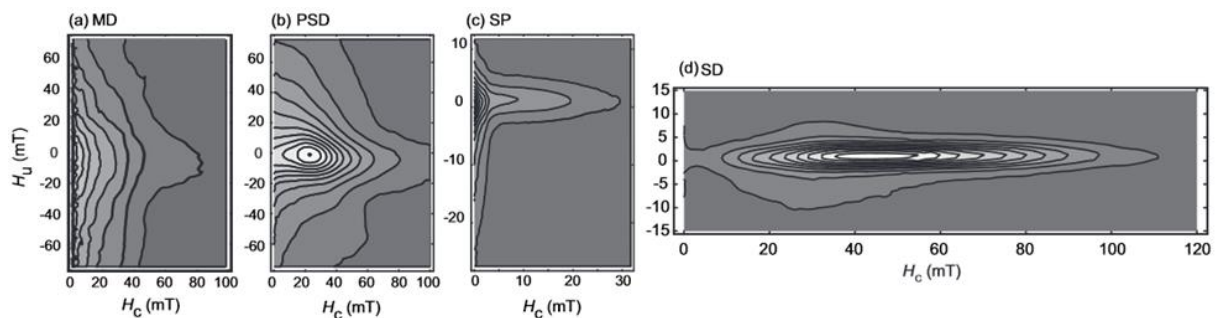


Figure III.12 : Exemples de diagrammes de FORC caractéristiques de différentes populations de magnétites. (a) particules MD ; (b) particules PSD ; (c) particules SP ; (d) particules SD. Figures issues de Muxworthy & Roberts, (2007).

La clarté visuelle d'un FORC dépend des paramètres appliqués lors du traitement du signal.

Le SF (pour « smoothing factor ») est un paramètre de lissage qui permet de retirer le bruit du signal des FORCs. C'est un nombre entier et plus il est élevé, plus le signal est lissé. Il doit donc être adapté au rapport signal/bruit pour effacer le plus de bruit possible sans affecter le signal. Lors du traçage du diagramme, le programme de traitement moyenne les données sur un nombre de points compris dans une grille dont les dimensions dépendront du SF.

Le nombre de points pris dans la grille est égal à :

$$(2 * SF + 1)^2 \text{ (Roberts } et al., 2000)$$

Soit une grille de 3*3 points pour un SF de 1 et de 15*15 points pour un SF de 7.

Les FORCs ont été mesurés avec le Micromag AGM2900 du LSCE et les diagrammes ont été tracés avec le programme FORCINEL (Harrison & Feinberg, 2008). Afin de pouvoir comparer les différents FORCs, tous ont été paramétrés de la même manière. Un total de 140 courbes a été mesuré pour chaque échantillon sélectionné (un par site de 2011-2012), avec un SF de 4 (9*9 points). On notera que certains échantillons ont nécessité plusieurs préparations avant d'obtenir un FORC interprétable. Les MES prélevées en mars 2015 n'ont pas assez de matériel pour permettre plusieurs préparations et les seuls FORCs obtenus sur cette campagne de ne sont généralement pas interprétables.

La Figure III.13 présente trois exemples caractéristiques de diagrammes de FORC obtenus pour les échantillons de MES de la Seine (sites de Saron, Draveil, Bougival). Bien que certains diagrammes soient bruités en raison de la faible concentration de magnétites, ils restent interprétables avec un SF de 4. Dans la Figure III.13a, le diagramme de FORC de l'échantillon de Saron qui, sur le diagramme de Day, se situe à égale distance entre les pôles théoriques PSD et MD, est très bruité. Un groupement apparaît cependant, fortement fermé sur la verticale, comme pour les SD (voir Figure III.12d). Il est toutefois beaucoup moins étiré sur l'horizontale que les diagrammes SD : l'essentiel du signal est porté par des H_c entre 0 et 20 mT ce qui se rapproche plus du diagramme PSD. Le diagramme de l'échantillon de Draveil (Figure III.13b) qui approche de la limite MD sur le diagramme de Day est plus net et s'étire plus sur l'axe vertical. Il semble donc correspondre à une population de magnétites PSD légèrement plus grossières que dans l'échantillon de Saron. Le diagramme de FORC de Bougival (Figure III.13c) qui atteint la limite MD sur le diagramme de Day, présente un maximum en boucle fermée, rapproché de l'origine sur l'horizontale par rapport aux deux autres échantillons. Il est aussi sensiblement plus étiré sur la verticale. Ce diagramme semble illustrer des grains PSD assez grossiers, à la limite MD (voir Figure III.12b).

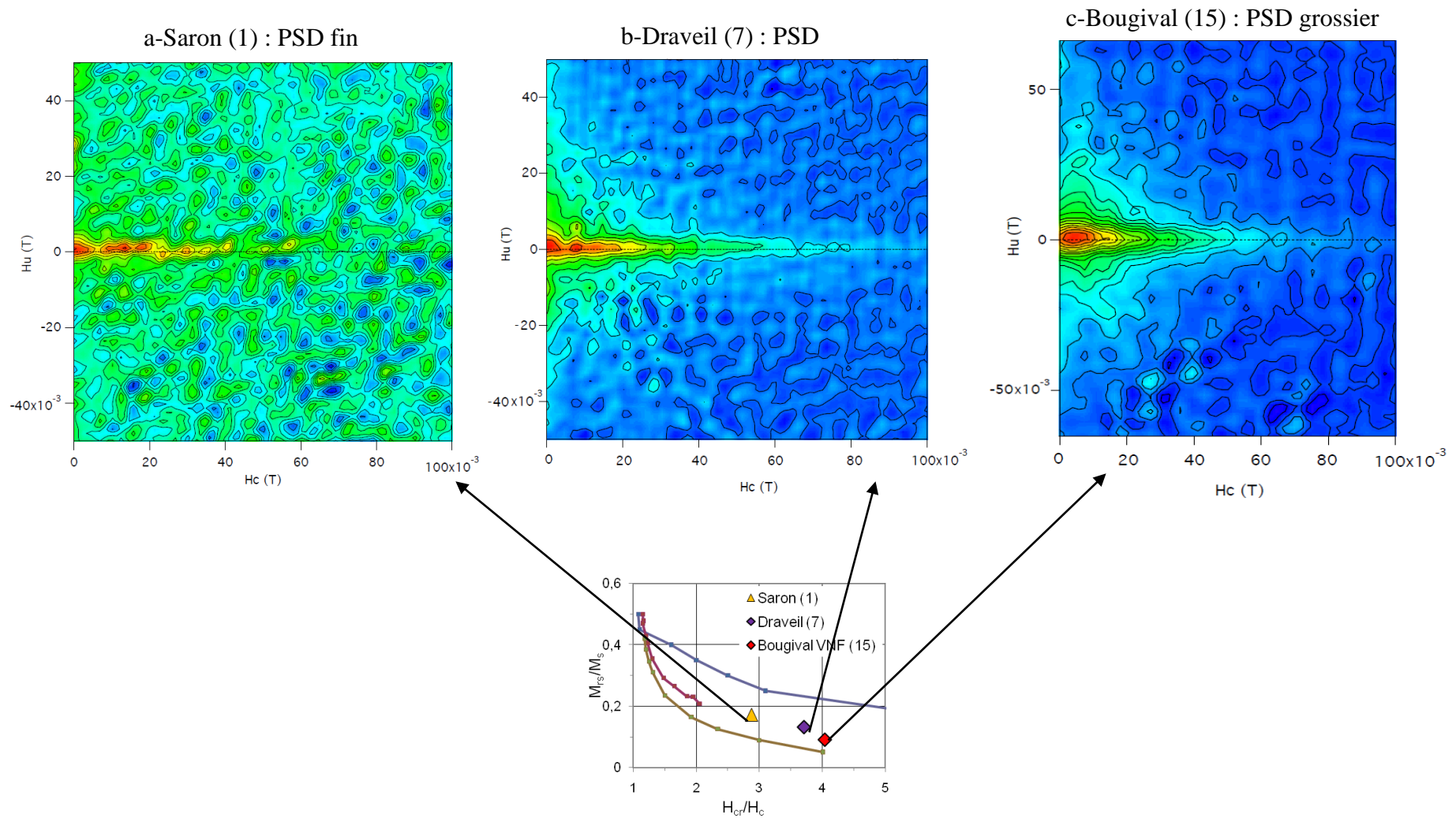


Figure III.13 : Exemples de diagrammes de FORC obtenus sur trois échantillons de MES. (a) échantillon de Saron-X (signal majoritairement porté par des PSD fins), (b) échantillon de Draveil-X (PSD moyen) et (c) échantillon de Bougival-X VNF (PSD grossier à MD). Tous les diagrammes sont lissés avec un SF de 4.

Dans l'ensemble, les diagrammes de FORC des MES de la Seine ne montrent pas une forte hétérogénéité granulométrique des magnétites au sein d'un même échantillon. Les PSD sont plus ou moins grossiers mais aucun échantillon ne semble être significativement constitué de mélange SD-MD ou PSD-MD. Une étude complémentaire, effectuée à l'UMPC-IMPMC par C. Carvalho de l'équipe Minéralogie magnétique de basse dimensionnalité (MIMABADI) avec le logiciel VARIFORC a permis de comparer un diagramme obtenu à partir d'une seule acquisition (Figure III.14a) à un diagramme obtenu en moyennant 5 acquisitions (Figure III.14b). L'essai a été fait sur un échantillon du site d'Amfreville. Le bruit est sensiblement réduit lorsque 5 courbes sont moyennées mais le diagramme est finalement le même et confirme la prédominance de magnétites PSD sur les particules SD, MD et SP.

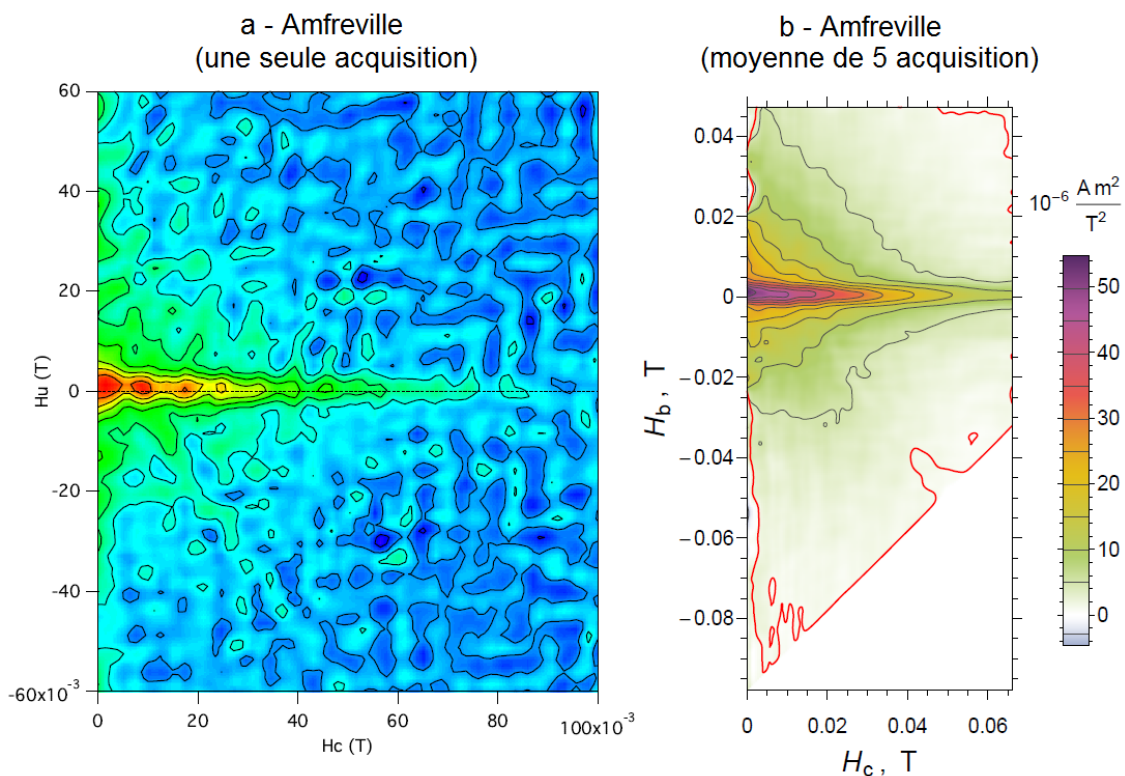


Figure III.14 : Diagramme de FORC obtenu à partir d'une acquisition (a) et de cinq acquisitions de FORCs (b) sur un même échantillon d'Amfreville (20). Le diagramme (b) a été obtenu avec l'aide de C. Carvalho (UMPC) avec le logiciel VARIFORC.

Pour chaque site où plusieurs campagnes ont été effectuées, l'échantillon sélectionné pour les FORCs est celui dont la taille moyenne des magnétites est proche de la taille moyennée sur l'ensemble des échantillons (voir Annexe C). Si l'on considère que les diagrammes de FORC sont représentatifs de l'ensemble des échantillons de la Seine, les magnétites, bien que plus ou moins grossières selon le site d'échantillonnage, ont une taille relativement homogène au sein du même échantillon. On considère donc par la suite que l'on peut s'affranchir de la problématique de mélanges granulométriques de la fraction magnétique pouvant nuire à l'interprétation des diagrammes de Day.

III.2.4. Contribution des magnétites superparamagnétiques (SP) : dépendance en fréquence

Le diagramme de FORC moyenné (voir Figure III.14) semble confirmer l'absence de magnétites superparamagnétiques dans les MES. Une méthode alternative fréquemment utilisée pour estimer la proportion de particules SP consiste à mesurer la susceptibilité à deux fréquences différentes et d'en déduire la « dépendance en fréquence » $\chi_{fd\%}$ selon la formule suivante (Dearing *et al.*, 1996) :

$$\chi_{fd\%} = \frac{\chi_{\text{basse fréquence}} - \chi_{\text{haute fréquence}}}{\chi_{\text{basse fréquence}}} * 100$$

Ainsi, plus la $\chi_{fd\%}$ est élevée, plus la différence de susceptibilité varie entre haute et basse fréquence. Cette variation est due à la présence de particules SP, et leur proportion augmente avec la $\chi_{fd\%}$.

La $\chi_{fd\%}$ a été calculée sur un échantillon par site récupéré en 2011-2012. Les MES séchés ont été placés dans des cubes de 8 cm³ et pesés. La susceptibilité magnétique a été mesurée cinq fois à basse fréquence (0,465 kHz) et cinq fois à haute fréquence (4,65 kHz) pendant 10 secondes par mesure avec le MS2B Bartington sensor. La $\chi_{fd\%}$ a été obtenue à partir de la moyenne des cinq mesures de basses et cinq mesures de haute fréquence (Tableau III.3).

Tableau III.3 : Résultat des valeurs de susceptibilités $\chi\%$ moyennes à haute et basse fréquence et calculs de la dépendance en fréquence $\chi_{fd\%}$. Les cases marquées par un tiret indiquent que les valeurs ne sont pas significatives si l'on tient compte des écarts-types.

Site	$\bar{\chi}$ basse fréquence (*10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Ecart type σ	$\bar{\chi}$ haute fréquence (*10 ⁻⁸ m ³ /kg)	Ecart type σ	$\chi_{fd\%}$
Saron (1)	0,48	± 0,07 (14%)	0,42	± 0,07 (17%)	-
Marnay (2)	0,57	± 0,03 (5%)	0,52	± 0,04 (8%)	-
Jaulnes (3)	1,07	± 0,03 (3%)	0,98	± 0,05 (5%)	-
Cannes-Ecluse (4)	1,22	± 0,04 (3%)	1,07	± 0,08 (7%)	12
Saint-Mammès (5)	1,07	± 0,07 (7%)	1,03	± 0,07 (7%)	-
Thomery (6)	1,13	± 0,02 (2%)	1,13	± 0,02 (2%)	-
Draveil (7)	1,81	± 0,09 (5%)	1,79	± 0,09 (5%)	-
Viry-Châtillon (8)	5,08	± 0,04 (1%)	4,73	± 0,14 (3%)	7
Trilbardou (11)	1,48	± 0,08 (5%)	1,42	± 0,10 (7%)	-
Bougival VNF (15)	5,18	± 0,03 (6%)	4,91	± 0,12 (2%)	5
Bougival Pointe (16)	3,85	± 0,05 (1%)	3,57	± 0,11 (3%)	7
Pontoise (17)	1,75	± 0,06 (3%)	1,63	± 0,10 (6%)	-
Andresy (18)	3,54	± 0,10 (3%)	3,50	± 0,19 (5%)	-
Denouval (19)	1,55	± 0,19 (12%)	1,55	± 0,65 (42%)	-
Amfreville (20)	2,65	± 0,16 (6%)	2,42	± 0,20 (8%)	-

Dans la plupart des cas, les moyennes des cinq mesures à basse et haute fréquence ne sont pas statistiquement différentes d'après les écarts-types. Le MS2B Bartington sensor mesure en effet la susceptibilité en 10^{-5} SI et ceci est limite pour les faibles valeurs de susceptibilité de nos échantillons (10^{-9} à 10^{-8} m³/kg une fois normalisés à la masse et au volume). Quand l'écart-type calculé à partir des 5 mesures en haute ou basse fréquence est supérieur à la différence entre les deux valeurs moyennes, le calcul de $\chi_{fd\%}$ n'est pas significatif. D'après plusieurs auteurs, la contribution de magnétites SP est significative au-dessus de 5-6 % (Dearing *et al.*, 1996; Dearing, 1999; Eyre, 1997; Worm, 1998; Lecoanet *et al.*, 2001; Chlupacova *et al.*, 2012; Necula *et al.*, 2015).). Sur les 4 échantillons (Cannes-Ecluse, Viry-Chatillon et les deux sites de Bougival) présentant des valeurs significatives, seul celui de Cannes-Ecluse dépasse ce seuil. Peu de conclusions peuvent donc être tirées à partir de ce seul site. L'acquisition de FORCs moyennés ainsi que l'utilisation d'appareil de mesure plus précis que le MS2B Bartington sensor pourrait nous apporter des renseignements supplémentaires sur la présence ou non de ces particules SP dans ces MES.

Résumé et discussion

Les méthodes magnétiques présentées dans ce chapitre permettent d'obtenir des informations sur deux des trois paramètres clés de la fraction magnétique, le premier étant la minéralogie :

- Les S-ratios obtenus sur les courbes d'acquisition de l'IRM montrent que l'essentiel de l'aimantation est porté par des minéraux de basse coercivité.
- Les analyses de composantes de ces courbes d'IRM confirment que les minéraux de basse coercivité portent l'essentiel du signal. Ces minéraux sont représentés par une composante majeure de coercivité médiane d'environ 30-40 mT. Une autre composante de très basse coercivité est nécessaire pour ajuster les modèles, mais sa contribution est mineure et sa signification réelle est incertaine.
- Les mesures de désaimantation thermique sur 3 axes montrent que la composante majeure de l'IRM correspond à de la magnétite qui est le seul minéral significativement détecté dans tous les échantillons. L'hématite et la goéthite sont probablement présentes et une deuxième acquisition après une chauffe à 700°C montre une possible présence de pyrite, et de titanomagnétites, mais leur contribution à l'aimantation est négligeable par rapport à celle de la magnétite.

Les méthodes suivantes ont permis d'étudier la granulométrie de ces magnétites :

- Les paramètres d'hystérésis magnétique mesurés sur la totalité des échantillons montrent que les magnétites des MES de la Seine sont essentiellement pseudomonodomaines voire multi-domaines.
- Les diagrammes de Dunlop montrent que si la taille des magnétites varie d'un échantillon à l'autre, les quelques diagrammes de FORCs suggèrent que la granulométrie reste assez homogène au sein d'un même échantillon.
- Les mesures de susceptibilité à différentes fréquences sont, de manière générale, peu significatives. Pour cette raison, ces mesures ne seront pas prises en compte.

Nous avons ici exposé les méthodes appliquées dans cette étude pour déchiffrer le signal magnétique des MES prélevées. Nous avons vu que les mesures d'hystérésis et dérivées (S-ratio, composantes IRM, états des domaines) couplées à des désaimantations thermiques sur trois axes permettent une caractérisation représentative de la fraction magnétique malgré sa faible quantité dans les MES.

Ces résultats nous permettent à présent de nous intéresser à la troisième information qu'apportent les outils magnétiques : la concentration en magnétites.

Dans le chapitre suivant, nous allons aborder la représentativité de la signature magnétique à l'échelle d'un site d'échantillonnage en tenant exclusivement compte des processus naturels pouvant affecter les mécanismes de transport, accumulation ou dilution des particules de magnétite avant d'examiner dans le Chapitre V l'évolution spatio-temporelle de ces paramètres magnétiques à l'échelle de la Seine.

Chapitre IV. Signature magnétique de la charge sédimentaire dans une section de méandre de la Seine

Avant d'utiliser les propriétés des particules magnétiques comme traceur de variations environnementales temporelles et spatiales, il est important de comprendre comment le fer et ses composés magnétiques sont intégrés dans la charge sédimentaire et réagissent *vis à vis* des différents mécanismes hydrodynamiques naturels. Les méandres de la partie amont de la Seine, peu aménagée, offrent un bon terrain d'étude pour cette compréhension.

Ce chapitre se porte sur l'étude de la charge sédimentaire (charge en suspension et de ruissellement) et des sédiments de fond avec les outils magnétiques. Une discussion est également portée sur l'efficacité des dispositifs de prélèvement.

Le contenu de ce chapitre est écrit sous forme d'article adaptée à partir de la version soumise en juillet 2016 au journal *Geomorphology*.

Magnetic fingerprint of the sediment load in a meander bend section of the Seine River (France)

Author list: D. Kayvantash^(1,2), I. Cojan⁽¹⁾, C. Kissel⁽²⁾, C. Franke⁽¹⁾

1 : MINES ParisTech, PSL Research University, GEOSCIENCES - Centre for geosciences and geoengineering, 35 rue St Honoré, F-77305 Fontainebleau, France.

2 : Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris-Saclay, Avenue de la Terrasse, F-91198 Gif-sur-Yvette CEDEX, France.

Abstract

This study aims to evaluate the potential of magnetic tools to describe the sediment load in a cross-section of an upstream, non-managed meander of the Seine River (upstream to the village of Marnay-sur-Seine). Suspended particulate matter (SPM) was collected at seven points along a cross-section of the river, at two different depth levels, during a low-water stage (May 2014) and a high-water stage (February 2015). River bed sediments (RBS) were collected during the low-water stage. After characterizing the main magnetic carrier as magnetite, magnetic analyses consist in measuring the hysteresis parameters, giving access to the concentration and the grain sizes of these magnetite particles. Analyses were conducted on dry bulk SPM and sieved RBS and compared with the three-dimensional velocity profile of the river flow and particle size spectra. In the RBS, the concentration of magnetite is inversely proportional to the mean grain size of the total sediment. During the low-water stage, the wash load seems to be the main component of the SPM samples characterized by fine and uniform grain size distributions ($D_{50} \sim 20 \mu\text{m}$, $D_{75} \sim 50 \mu\text{m}$) and similar concentration of magnetites than in the fine RBS fraction. SPM samples collected during the high-water stage correspond to mixtures of the wash load and re-suspended sediment from the bed load and show heterogeneous distributions across the section, coarser sediments ($D_{50} = 30$ to $2\,000 \mu\text{m}$, $D_{75} = 70$ to $2\,500 \mu\text{m}$) and more heterogeneous concentrations of magnetite than in the low-water stage SPM.

Magnetite concentration in the high-water SPM can be modeled based on a mixing of the magnetite concentrations of the different grain-size fractions; thus quantifying the impact of re-suspension in the cross-section for samples located in the maximum level of turbulence.

Highlights:

- The sediment load of a meander bend is described with environmental magnetism
- Magnetic properties of wash load and bed sediment are measured
- Re-suspension of bed sediment is modeled with magnetic measurements

Keywords:

Meander bend section; Seine River; environmental magnetism; sediment load.

1. Introduction

Ferromagnetic iron oxides such as magnetite (Fe_3O_4), hematite (Fe_2O_3) and (oxy)hydroxides such as goethite (FeOOH) are common minerals in continental sediments. Their properties which can be assessed using environmental magnetism techniques (Thompson & Oldfield, 1986; Evans & Heller, 2003) allow to trace natural and anthropogenic processes in soils (Strzyszczyk *et al.*, 1996; Meena *et al.*, 2011; Bian *et al.*, 2014), rivers (Jordanova *et al.*, 2004; Franke *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2011; Franciskovic-Bilinski *et al.*, 2014; Razik *et al.*, 2014), deltas and estuaries (Dong *et al.*, 2014b). In the fluvial realm, iron oxides are present in river bed sediments (RBS), in river bank sediments, and in the suspended particulate matter (SPM). Variations in both magnetic concentration and in magnetic grain size are used as environmental tracers.

Within the different fluvial systems, meandering rivers are of special interest for environmental issues because of their high erosion potential due to their continuous migration (Bridge, 2003). Meandering alluvial rivers flow on gently sloping floodplains and migrate mostly during bankfull stages (Leopold & Wolman, 1957; Smith, 1998; Paccaud & Roulier, 2010). During the migration process, the outer bank of the channel is eroded, removing floodplain sediment that contributes to the river suspended load and is transported downward or temporally stored on the floodplain (Lauer & Parker, 2008).

Because of their high erosion potential, in particular in agricultural areas, meandering systems are extensively surveyed (Knighton, 1998). In these systems, the flow is affected by gravitational, frictional, and centrifugal forces. The intensity and distribution of primary and secondary flows in meandering systems depend on the channel curvature, bed morphology, and depth (Tilston & Biron, 2006; Abad & Garcia, 2009; Sukhodolov, 2012). Hence, secondary helical flow is a significant component in the tri-dimensional structure of the flow and it can play a key role on the bank erosion and the re-suspension of the sediment (Dzana & Gaillard, 1996; Tilston & Biron, 2006; Chauvet *et al.*, 2014). In the bend inflection point, the maximal primary velocities are located along the channel centerline near the water surface, where the turbulence level is relatively low. Around these bends, the maximal primary velocities are located deeper in the flow close to the outer erosive bank and secondary flows can generate several helical cells, involving a high level of turbulence. These processes contribute to the fluvial sediment load by erosion of the meander outer bank and re-suspension of the river bed sediment.

The sediment load composition and concentration are controlled by many factors such as water discharge, physical weathering, and mineralogical composition of the catchment area, as well as human occupation. In natural areas, the sediment load is generally composed of silicates, carbonates, organic matter, and oxides (Bibby & Webster-Brown, 2005). The sediment load is composed of the bed load, the suspended load, and the wash load. The bed load refers to all particles transported by rolling or sliding (Einstein, 1950; Hickin, 1995; Mouri, 2015; Sadeghi & Zakeri, 2015). Suspended load is kept in suspension with turbulence (Hickin, 1995; Knighton, 1998). Contrary to the first two components which constantly interact, the wash load is entirely transported by suspension within the whole water column. It

is composed of very fine particles, mostly silt and clay. The boundary between wash load and suspended load is debated. The generally accepted grain sizes boundary are around 63 μm (Knighton, 1998; Mouri, 2015; Sadeghi & Zakeri, 2015). In practice, it is hardly possible to separate suspended and wash loads during sampling (Hickin, 1995).

In this paper we test the potential of environmental magnetism to decipher the different components of the sediment load at the scale of a meander bend cross-section, by studying its magnetic properties. Magnetic analyses are combined with sedimentary and hydrodynamic data to deconvolute the different processes that can potentially affect both the sediment load and its magnetic fraction.

2. Context

The Seine River, the major stream of the Paris Basin, rises from the Langres Plateau in northeastern France and runs through the city of Paris and flows into the English Channel. The drainage basin of this 777 km long river covers an area of about 78 600 km² (Viennot *et al.*, 2009) (Figure 1). Four main tributaries contribute to the Seine discharge. They are from upstream to downstream: the Aube, Yonne, Marne and Oise Rivers.

The sediment load of the Seine River and of its tributaries, except for the Yonne River that rises from the Morvan igneous massif, originates from sedimentary sequences that are dominantly composed of limestones (Jurassic and Tertiary) and chalk (Upper Cretaceous), and in minor proportions of siliciclastic fine-grained sedimentary formations (Middle Cretaceous and Tertiary) (Roy *et al.*, 1999; Viennot *et al.*, 2009).

The Seine River shows numerous meanders all along its course due to the low valley slope (1 : 15 000 in Paris). The extension of the present floodplain of the Seine River reaches its maximum between Nogent-sur-Seine and Romilly-sur-Seine with a width of 6 km.

The natural discharge of the Seine River is typical of an oceanic-related climatic regime with pluvial influence. The hydraulic regime has been largely modified by water management that started in the mid-1960s with alterations of the river course for navigational purposes, monitoring of the river discharge by storage lakes to prevent flooding of the Paris region, and to sustain low-water flows.

The Seine basin is occupied by 16 million inhabitants, 12.3 million of which living in the Paris conurbation (Billen *et al.*, 2009). Two-thirds of the Paris Basin is cultivated, mainly in large cereal farming, whereas industrial activities are concentrated around the Parisian conurbation and along the downstream part of the Seine River (Paris-Rouen-Le Havre) (Billen *et al.*, 2009; Schott *et al.*, 2009).

The mineralogical composition of the Seine River SPM is controlled by the weathering of the substrate, mainly contributing with carbonate and silicate particles, and by the input of anthropogenic particles (Roy *et al.*, 1999; Meybeck *et al.*, 2004). The Seine sediment load flux highly depends on the seasonal discharge and sediment re-suspension due to human activities (navigation, dam releases, etc.). A suspended load between 5-20 mg l⁻¹ is observed

in Paris during the low-water stages when the flow is $\sim 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Although it can reach up to 200 mg l^{-1} during high-water stages, the relation between suspended load and discharge is not linear. In Paris, the suspended load significantly increases when the discharge exceeds $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and decreases with an hysteretic response (Estèbe, 1996). The annual specific sediment load of $10 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (Meybeck *et al.*, 1999; Thévenot *et al.*, 2007; Delmas *et al.*, 2012) is quite low compared to other French rivers: $12 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ for the Loire (Gay *et al.*, 2014), $35 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ for the Garonne (Tockner *et al.*, 2009), and $340 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ for the Rhône (Milliman & Syvitski, 1992).

Regarding the total iron content in the sediment load of the Seine River, Chen *et al.* (2014b) showed that it is mainly present in the particulate fraction (99 %) as a mixture between natural and anthropogenic inputs. Previous magnetic and microscopic studies of the suspended particulate matter identified detrital, biogenic, and anthropogenic ferromagnetic particles (Isambert *et al.*, 2007; Franke *et al.*, 2009). Significant increases in the magnetic concentration and in the magnetic grain size were correlated to anthropogenic inputs approaching the Parisian conurbation.

Because this study focuses on natural processes, the selected site is located in the upper and less-managed part of the Seine River, upstream of Nogent-sur-Seine. Downstream of Nogent, the river course has been highly modified to facilitate navigation including meander rescindment, channelized stretches, and deepening of the river section. The free migrating meanders in this upstream rural part of the Seine River show typical bed morphology in relation to the spatial variation in channel morphology with curvature, mostly symmetric at the inflection points and strongly asymmetric in the bend apex (Dzana & Gaillard, 1996).

The studied cross-section is located $\sim 5 \text{ km}$ upstream from Nogent-sur-Seine (Figure 1), in a meander bend at the village of Marnay-sur-Seine. In this area the river mostly drains agricultural and forest soils, covering Cretaceous chalk. The meander loop at the study site is composed of a major bend (sinuosity index = 2) and a minor and more accessible one (SI = 1.1) that has been sampled. The outer bank of this minor bend has been sampled in previous studies (Tessier, 2003; Franke *et al.*, 2009). Boat traffic is very limited at the site as large boats utilize the derivation canal that links Conflans-sur-Seine to Nogent-sur-Seine. The riverbanks are not managed and the water level still undergoes high seasonal contrasts with frequent winter flood events despite the flow control by the storage lakes. High-water stages commonly take place between January and March, with typical monthly discharges between 100 and $120 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (hydrological gauging station of Pont-sur-Seine, code: H1700010, calculated between 1979 and 2015; <http://www.hydro.eaufrance.fr/>). Low-water stages commonly take place between June and September but may start earlier during dry years, with monthly discharges around $45\text{-}60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

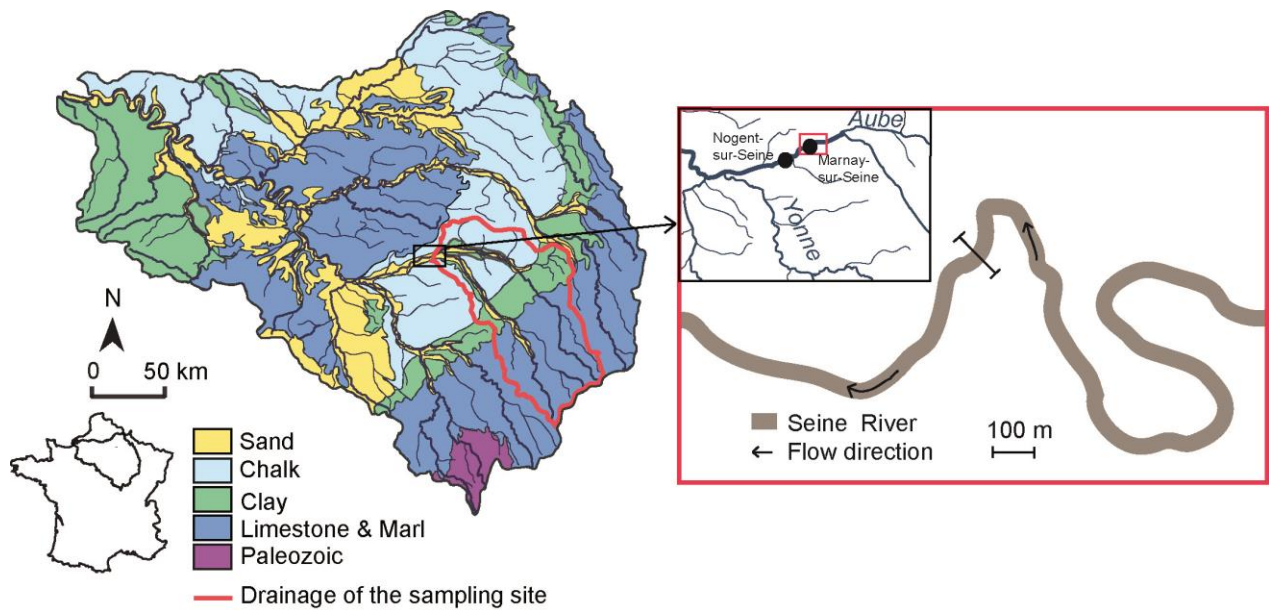


Figure 1: Simplified lithological map of the Seine basin (from the 1 / 1 000 000 geological map, BRGM) and scheme of the river at the sampling site.

3. Sampling and methods

In order to collect the three main components of the sediment load (wash, suspended and bed load), fieldwork was conducted during two contrasting hydrological stages. The first sampling campaign was conducted in May 2014. The mean water discharge was $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, twice as low as the mean monthly flow ($\sim 80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). This will be referred hereafter as the low-water stage (LW). The second sampling campaign took place in February 2015, corresponding to a high-water stage (HW). The mean water discharge was $140 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. During this sampling, the neighboring fields were flooded.

During the high-water campaign, three-dimensional velocities were recorded using the acoustic Doppler current profiler (ADCP) River Surveyor M9 SunTek of the University François Rabelais (Tours, France). The profiler was housed on a small kayak and operated with a computer mounted on a motorized boat, Neveu Secu 12. The bathymetric profile was measured with the DGPS Proflex 500 RTK using the Orpheon differential system (precision of 3 cm). Bathymetry was measured using a single-beam Tritech PA500 KHz probe. The inner and outer parts of the meander bend could not be measured over more than 10 m due to the riparian vegetation. Instrument limitations result in an unmeasured area below the water surface down to 0.2 m, due to the draft of the instrument deployment and in a 0.1 to 0.5 m water column above the river bed due to high sediment concentration or parasitic energy. Velocities and bathymetry were profiled 6 times from left to right bank with a precision of 0.05 m. Raw velocities, direction, and bathymetry were then projected and treated at the University of Tours using the Rozovskii method (1957) to obtain primary and secondary current velocity profiles. During the low-water stage the bathymetry was measured with a graduated sinker weighted with a lead at $5 \pm 0.2 \text{ m}$ intervals.

Specific devices were built for SPM sampling, inspired by the sediment traps of Tessier (2003). Like the “C model” of Tessier, these devices can be used only if the water depth exceeds 0.40 m and is relatively stable during the sampling which was the case for us. A device is composed of rope with a concrete anchor attached at the bottom and a float fixed at the other end (Figure 2). Knots were installed every 0.5 m along the rope (starting from the anchor) to fix the sampling traps at different depths. The traps are conceived of plastic bottles (0.5 m large and diameter = 0.1 m) with diametric opposite drilled holes following the Tessier’s model, with additional aluminum karabiners to fix and remove the traps rapidly. These traps are comparable to conventional SPM samplers although they collect less SPM and they are less robust. They present the advantages of being relatively small (< 0.5 m), made of conventional recycling plastic bottles, easy to construct in series and straightforward to install and to recover.

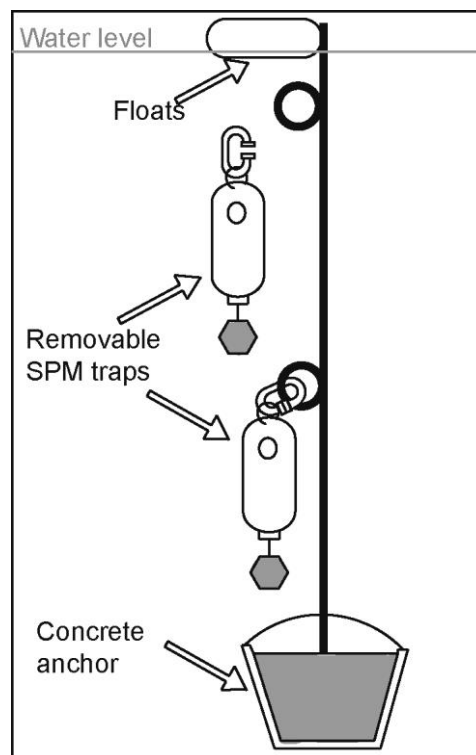


Figure 2: Sketch of the device used for SPM sampling. Removable SPM traps were built using the “C model” of Tessier (2003).

Seven devices separated by 5 ± 0.2 m intervals were placed along the section. The same points were used for both campaigns. The devices were placed by fixing the upper end of the stretched ropes and the floats at fixed intervals along a horizontal graduated rope. The verticality of the devices was optimized by positioning several floats on stretched ropes. The horizontal rope was then removed in order not to disturb the boat traffic and to avoid unwanted attention. One or two traps were fixed at each sampling device in order to get sampling at different depths. The vertical position of the shallow and deep SPM traps was adapted to the water level so that the vertical space between the SPM traps is proportional to

the water level (1 m depth interval during the low-water and 2-2.5 m during-high-water). All traps remained immersed for a week. The traps are labeled depending on their depth relative to the water surface: “A” for shallow water depth SPM samples (depth of 0.5 m for low- and 1.2 m for high-water samples), “B” for deep-water depth samples (depth of 1.5 for low- and 2.5-3 m for high-water samples). Low- (high-) water samples are labeled with -LW (-HW) suffixes.

RBS samples were collected at different points along the channel section (water depth between 0.5 and 2 m) during low-water stage when the interaction between the different loads is theoretically minimal. Sampling was made using a plastic jar attached to a 2 m perch.

A total of 10 SPM and 6 RBS samples were collected during the low-water stage and 14 SPM samples were collected during the high-water stage (Figure 3). Samples are numbered from #1 to #9 (including RBS) with respect to their location from the outer to the inner bank. During the high-water stage sampling, the device #3 was transported 100 m downstream towards the inner bank. As the representativeness of these two samples (3A-HW and 3B-HW) is therefore questionable, these samples are not considered in the interpretation of the results.

All SPM samples were filtrated stepwise on millipore nitrate cellulose filters of 5, 1, 0.45 and 0.2 μm pore size before being freeze-dried at the GEOSCIENCES department of MINES ParisTech. The corresponding filtrates from a same sample were weighted to obtain the total SPM mass and were subsequently homogenized. All RBS samples were sieved at 2 and 0.5 mm, 160 and 63 μm . For the smaller grain size range, material was only obtained for sample 9C. When the amount of collected material allowed further analyses, grain-size distribution was measured with the Mastersizer 2000 Hydro 2000G laser size analyzer at Geosciences Paris-Sud (GEOPS). As this analyzer is not suitable for grain sizes > 1 mm, SPM samples with coarser granules were sieved at 1 mm prior to laser grain-size analysis. The amount of material of samples 3B-LW, 4B-LW and 4A-HW was too low to perform grain size measurements.

The mineralogical analyses were performed at the GEOSCIENCES department of MINES ParisTech using a PANalytical X-ray diffractometer equipped with a Cu K-alpha radiation anode. Bulk rock powder diffraction measurements were performed on non-oriented mounts when the amount of material was sufficient (5 RBS, 3 LW SPM and 3 HW SPM samples). Peak identification and respective semi-quantification was performed using the EVA 14.0.0.0 software from Bruker-AXS.

In order to preserve the material collected during the two campaigns, the magnetic mineralogy has been identified using a representative SPM sample collected in 2011 at the Marnay site that corresponds to the location of sample 1A-LW. The 2011 sample, after being consolidated with a mixture of kaolin powder and a solution of Na silicate, was magnetized at 1 T, with a 2G660 Applied Physics Pulse Magnetizer. This isothermal remanent magnetization ($\text{IRM}_{1\text{T}}$) was stepwise thermally demagnetized from room temperature to 700°C in 50°C steps using a zero field PYROX furnace. Measurements were made with the 2G-755R cryogenic magnetometer equipped with high-homogeneity pick-up coils that is located, together with the furnace in the μ metal shielded room of the Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE).

Magnetic properties of the samples collected during both campaigns were investigated using hysteresis parameters measured with the alternating gradient force magnetometer AGM 2900 at the LSCE. Hysteresis loops were obtained at room-temperature between -1 and +1 T on 3 to 30 mg of sediment. After correction of the high field slope (removing diamagnetic and paramagnetic contribution), the saturation isothermal remanent magnetization (M_{rs}), the saturation magnetization (M_s), and the coercitive force (B_c) were obtained. Subsequently, the remanence curve which consists in applying stepwise increasing backfield to the 1 T M_{rs} allowed to determine the remanent coercitive force (B_{cr}). The M_{rs} and M_s values were normalized to the dry bulk sample mass. M_{rs}/M_s and B_{cr}/B_c ratios were used as magnetic grain size indicators (Day *et al.*, 1977). Depending on the amount of material, the measurements were repeated on two to four samples per SPM trap, and on two to seven samples per bed sediment grain size population. Note that all SPM measurements were made on the grain size fraction $< 1000 \mu\text{m}$.

4. Results

4.1. Section morphology

Despite the minor sinuosity of the selected cross-section, profiles a, b and c in Figure 3 clearly show a non-symmetrical morphology of the bed, with a higher slope on the outer bank than in the inner bank. During the low-water stage, the river was 2.5 m deep, with a wetted surface of 70 m² (derived by graphical calculation). During the high-water stage, the river was 4.3 m deep, with a wetted surface of 180 m². The selected cross-section is hence representative of a typical meander bend and present contrasted hydrological conditions between low- and high-water stages.

4.2. Velocity distribution

Figure 3b and 3c show the primary and secondary flow profiles during the high-water stage. Both profiles are incomplete close to the river banks because of the riparian vegetation. They show asymmetric distributions of the flow pattern, with higher gradients on the left side. The projected primary current profile shows a maximum velocity of 1.75 m s⁻¹ located around the 5B-HW trap (Figure 3b). Along the section, the primary velocity decreases and reaches 0.5 m s⁻¹ about twenty meters before the inner bank. On the outer bank, the gradient is higher due to the asymmetric profile of the river and the velocity is still about 1 m s⁻¹ about 20 m before reaching the bank. The secondary flow profile (Figure 3c) shows the presence of helical cells indicated by a reversal of the flow. These cells are more active on the outer side: absolute high velocities of 0.1 m s⁻¹ are high compared to 0.01 m s⁻¹ on the inner bank.

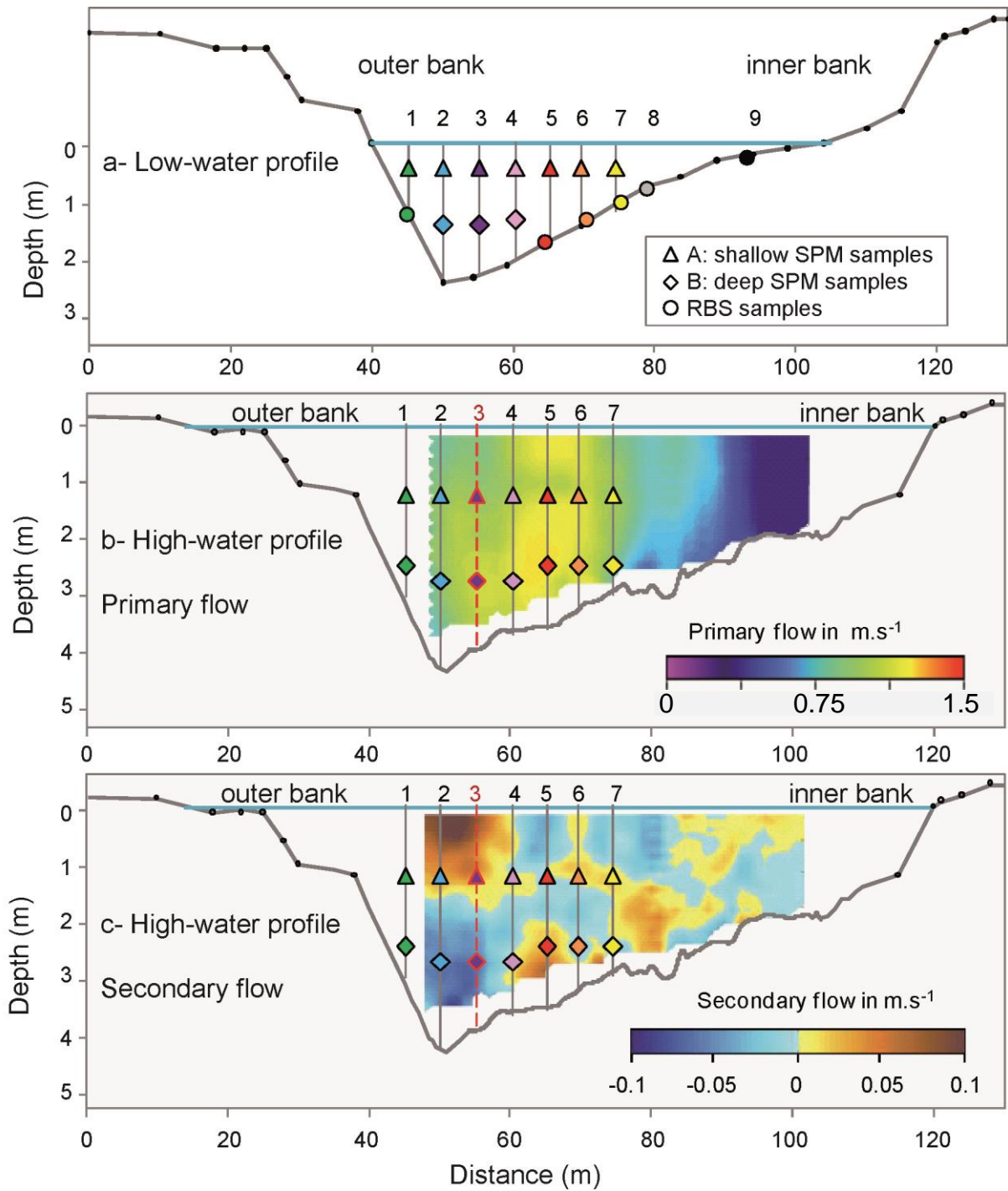


Figure 3: River section and sample distribution at low- and high-water stages at the study site of Marnay-sur-Seine. During the high-water stage sampling, primary flow (b) and secondary flow (c; positive values = clockwise orientation) distribution is indicated on the river section. (Vertical solid lines: location of the sample devices, dotted line: displaced device #3 during the sampling period, triangle: shallow water depth traps “A”, and diamond: deep water depth “B” traps. Circles: bed sediment samples).

4.3. SPM material

A large range of variations is observed in the total mass of the dried SPM samples collected during the high- and low-water stages, with a minimum value of 0.01 grams per day (g d^{-1}) for sample 3B-LW and a maximum of 110 g d^{-1} for sample 2B-HW (Figure 4). The middle section traps 3A, 3B (only -LW), 4A, and 4B (-LW and -HW) collected significantly less SPM than the inner and outer bank traps. High-/low-water SPM ratios are highly variable depending on the specific location of the traps across the river section and on their depth with respect to the water surface. Most of the shallow water traps collected less SPM during the high-water stage than during the low-water stage. For the deep water traps, comparison between low-water and high-water stages is limited because only three of them could be placed during the low-water stage (2B, 3B, and 4B) due to insufficient water depth. In addition, one of them (3B) drifted away during the high-water stage. Data from the remaining two points (samples 2B and 4A) show that these two traps collected much less SPM during the low-water than during the high-water stage.

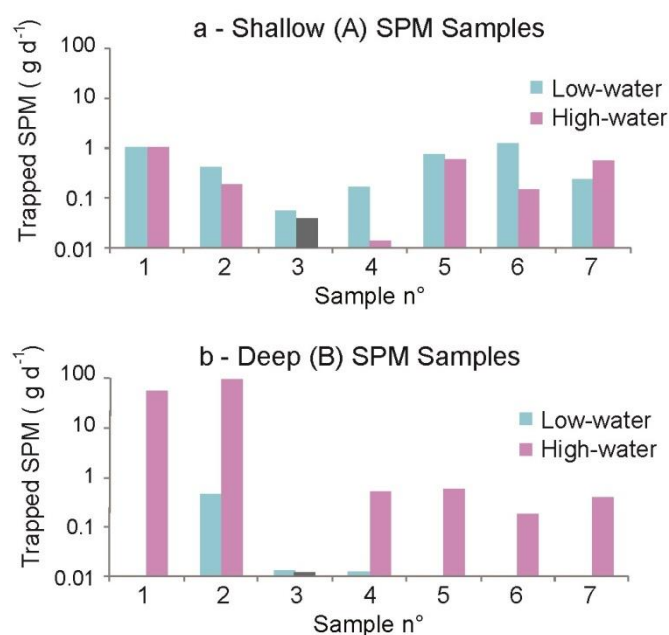


Figure 4: Total dried SPM mass trapped at each sampling site: (a) shallow water depth samples and (b) deep water depth samples during the low- and high- water stages (black corresponds to displaced SPM samples during the high-water stage). See Figure 3 for detailed sample locations.

4.4. Mineralogical composition of the sediment load

Results from XRD measurements are shown in Table 1. The mineralogical distribution varies with the sample locations and the river hydraulic regime. The mineralogy of the five analyzed RBS samples is dominated by calcite (mean value 92 %), with a minor contribution of quartz (mean value 6 %) and clay minerals (< 5 %). The three low-water SPM samples show the same mineralogical components as the RBS ones but with different distributions:

higher proportion of quartz (13 %) and clays (18 %) and lower calcite content (69 %). The mineralogy of three high-water SPM samples is composed of calcite (90 %), quartz (10 %), and no clay minerals. In the analyzed SPM and RBS samples, the magnetic fraction (iron oxides minerals) is below the detection limit (<1 %).

Table 1: Mineralogical composition of bulk RBS and SPM samples of Marnay-sur-Seine obtained with semi-quantitative XRD analyses. The uncertainty of measurement is ± 5 %.

	Calcite (%)	Quartz (%)	Clay minerals (%)
Low-water RBS			
Mean (N=5)	92	6	2
Standard dev.	7	5	4
Low-water SPM			
Mean (N=3)	69	13	18
Standard dev.	0	0	0
High-water SPM			
Mean (N=3)	90	10	0
Standard dev.	7	7	0

The nature of the magnetic minerals composing this magnetic fraction has been investigated using stepwise thermal demagnetization of IRM_{1T} . The normalized decay curves show two slopes (Figure 5). The first one corresponds to a small and rather rapid decay between room temperature and about 140°C. It may correspond to titanomagnetite ($Fe_{3-x}Ti_xO_4$) with a relatively high Ti content, to goethite or to other magnetic minerals destabilized at this temperature, such as large grained sulfides (Dunlop & Özdemir, 1997; Evans & Heller, 2003; Roberts *et al.*, 2011). The second and main part of the decay curve concerns 60 to 80% of the magnetization and corresponds to a progressive loss of the magnetization until about 580°C, the Curie point of magnetite (Figure 5). The dominance of magnetite in the total signal confirms the previous microscopic observations and magnetic measurements conducted on a SPM sample collected at Marnay in 2001 (Franke *et al.*, 2009). This indicates that the magnetic mineralogy is relatively constant in time at this site. With the information that magnetite is the dominant mineral, the M_{rs} parameter obtained from the hysteresis loops will be used as a magnetic concentration proxy and the ratio M_{rs}/M_s as a proxy for magnetic grain sizes. The variations in these two parameters will be now examined together with the results of sedimentary grain size analyses.

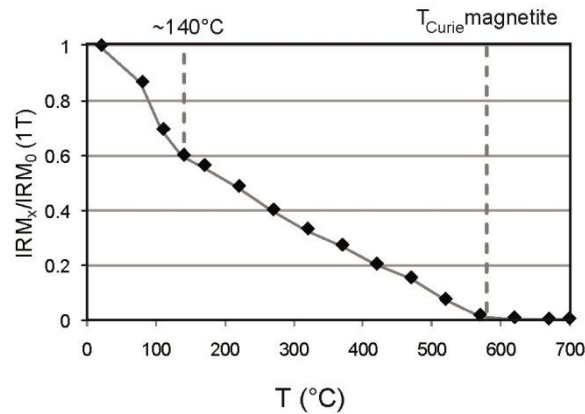


Figure 5: Thermal demagnetization curve of IRM_{IT} of a representative SPM sample collected at Marnay-sur-Seine in 2011 at the same location as sample 1A-LW (2014). Dotted lines represent the projection on the temperature axis of the main inflection points of the IRM curve.

4.5. Low-water SPM

Cumulative grain size results of the low-water SPM are given in Figure 6a and Table 2. The grain size distributions are very similar irrespective of the sampling location along the section and the water depth ($D_{50} = 20\text{-}25\ \mu\text{m}$, $D_{75} = 40\text{-}56\ \mu\text{m}$ and $D_{90} = 71\text{-}126\ \mu\text{m}$). The contribution of clay particles is very limited (5-8 % < 4 μm). Most of the sediment (74-83 %) is composed of silt (between 4 and 63 μm). The remaining fraction is composed of very fine sand (9-11 % between 63 and 125 μm), fine sand (2-6 % between 125 and 250 μm) and medium sand (1-4 % between 250 and 500 μm).

Magnetic concentrations (M_{rs}) during low-water stage SPM are shown in Figure 7a. In shallow SPM samples, M_{rs} values vary between 0.42 and $0.73 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$. They are not statistically different from the average value at $0.66 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$. Two of the three deep water depth SPM samples (2B and 4B) have M_{rs} values similar to those of their shallow counterpart. Sample 3B has a higher M_{rs} ($1.47 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$) than its shallow counterpart. However, the measurement was conducted on only one preparation due to the low amount of SPM collected at this site and it might therefore not be entirely representative.

The magnetization ratio (M_{rs}/M_s) of each sample is plotted together versus the coercitive ratio (B_{cr}/B_c) on the Day plot (Day *et al.*, 1977) in Figure 8a with the three mixing curves for magnetite proposed by Dunlop & Carter-Stiglitz (2006). Most of the low-water samples are clustered between pseudo-single domain (PSD) and multi-domain (MD) end-members ($2.8 < B_{cr}/B_c < 3.7$ and $0.11 < M_{rs}/M_s < 0.17$). The middle-river samples 3B and 4B fall within the MD range with B_{cr}/B_c values between 6.5 and 7 and M_{rs}/M_s ratios between 0.03 and 0.04, indicating that coarser magnetite particles (> ~ 40 μm) were collected in these traps.

In summary, low-water SPM grain size distribution is uniform across the section. The sizes of the magnetic minerals, including the relatively coarser magnetite particles in the deep part of the channel section, are within the SPM size range (< 63 μm).

4.6. High-water SPM

The cumulative grain-size distribution curves of the high-water SPM samples (Figure 6b and 6c) show distinct distributions depending on the water depth and sample location within the meander section. The clay content is very limited ($< 7\%$) and comparable to the low-water SPM samples. HW-samples collected at shallow water depth (Figure 6b and Table 2) can be separated in two groups. Samples of the middle/inner bank (5A-, 6A-, and 7A-HW) are mostly composed of silt (52-67 %) with slightly larger proportions of very fine sand (15-21 %) and fine sand (7-15 %). They contain coarser grains than during low-water stage ($D_{50} = 32-50 \mu\text{m}$, $D_{75} = 71-112 \mu\text{m}$ and $D_{90} = 159-224 \mu\text{m}$). This offset is more pronounced for the samples from the outer bank (1A- and 2A-HW) ($D_{50} = 71-224 \mu\text{m}$, $D_{75} = 224-399 \mu\text{m}$ and $D_{90} = 399-564 \mu\text{m}$) where the proportion of silt decreases (22-43 %) while the proportion of fine sand significantly increases (17-22 %). The proportion of medium sand is also slightly higher (18-35 %) than in the middle/inner bank and the low-water SPM samples and contrary to the latter, they contain coarse sand and gravels (4-11 %).

The grain-size distribution is more heterogeneous in high-water samples collected at deep water depth (Figure 6c and Table 2). Samples 4B, 5B, 6B, and 7B mostly contain silt (38-68 %) and sand. The amount of sand, in particular of medium size is higher (5-23 %) than in the shallow counterparts of these samples ($D_{50} = 28-106 \mu\text{m}$, $D_{75} = 63-356 \mu\text{m}$ and $D_{90} = 159-564 \mu\text{m}$). Samples of the outer bank (1B- and 2B-HW) are mainly composed of coarse sand and gravel particles (80-94 % $> 500 \mu\text{m}$, $D_{50} = 1\ 600-2\ 000 \mu\text{m}$, $D_{75} = 2\ 000-2\ 500 \mu\text{m}$ and $D_{90} = 2\ 600-3\ 500 \mu\text{m}$). The grain-size distribution of the SPM samples collected at shallow and deep water during the high-water stage are significantly contrasted, with coarser grain-sizes in the deep samples and close to the outer bank.

The magnetic concentration M_{rs} varies between 0.15 and $0.50 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$ in shallow SPM samples, and between 0.25 and $0.74 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$ in deep SPM samples. In general, the magnetic concentration is therefore lower in shallow ($\bar{M}_{rs \text{ A-HW}} = 0.30$) than deep SPM samples ($\bar{M}_{rs \text{ B-HW}} = 0.56 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$). Actually, the mean magnetic concentration of deep high-water SPM samples is closer to that of the shallow low-water concentration ($\bar{M}_{rs \text{ A-LW}} = 0.66 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$).

As far as the magnetic grain size is concerned, all high-water magnetite particles (Figure 8b) range between the PSD and MD poles ($2.9 < B_{cr}/B_c < 3.4$ and $0.10 < M_{rs}/M_s < 0.15$). Contrary to the low-water SPM samples, they are all uniform without any specific trend related to their spatial or depth distribution.

In summary, during the high-water stage, the sediment load is generally coarser, and more heterogeneous along the section than during the low-water stage, but the magnetite grain size is uniform. The sediment load of the outer bank is significantly coarser than in the rest of the section. In the samples collected in shallow water, the mean magnetite concentration is lower during the high-water than during the low-water stage.

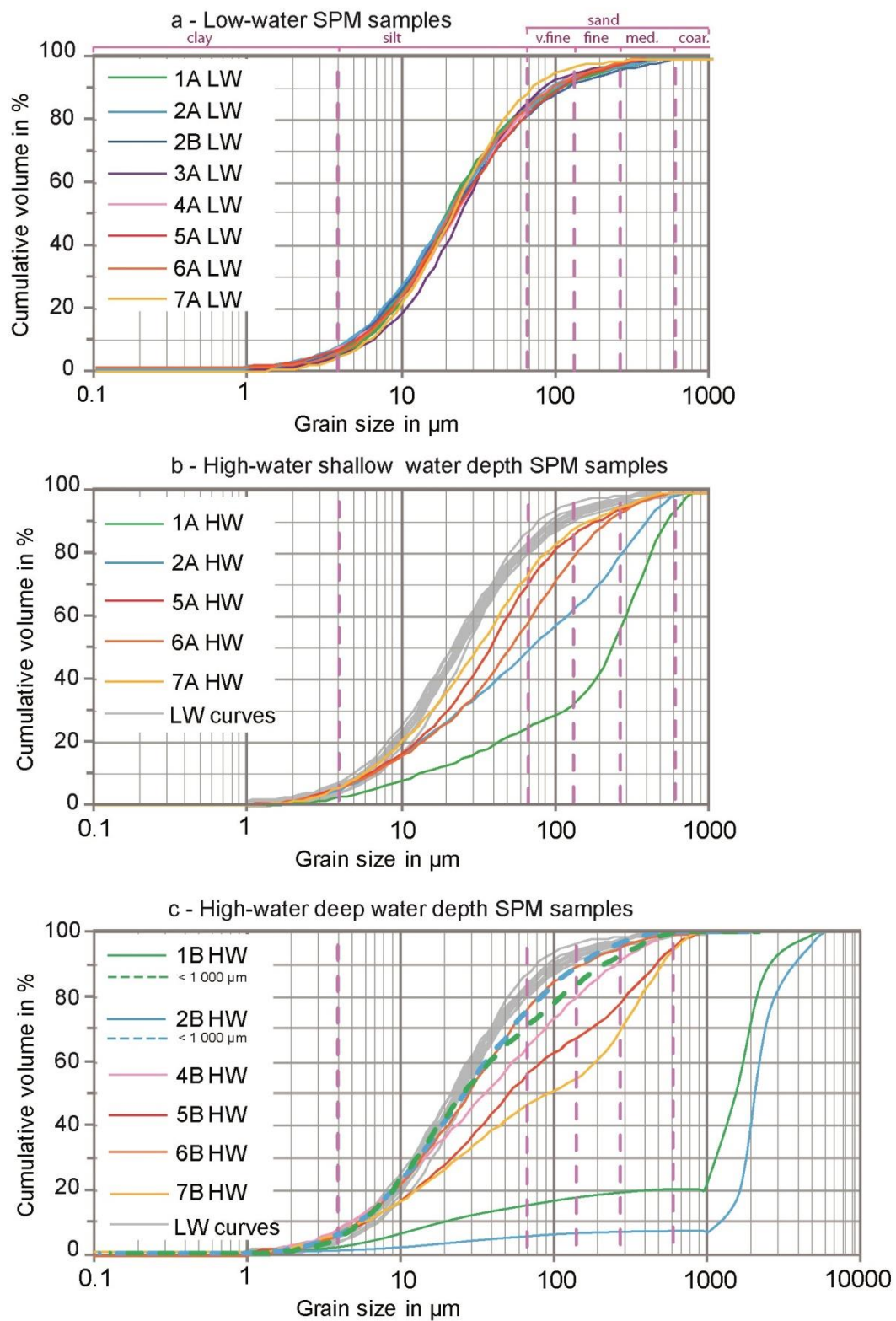


Figure 6: Cumulative laser grain size distribution curves of SPM samples. (a) SPM collected during the low-water stage (LW), (b) shallow (“A”) and (c) deep (“B”) water depth samples collected during the high-water stage (HW) (low-water curves are reported in grey). See Figure 3 for detailed sample locations.

Table 2: Grain size distribution (in volume %) of SPM samples. See Figure 3 for detailed sample locations.

	Wentworth (1922) size classes						Particle size distribution		
	Clay < 4 μm	Silt 4-63 μm	Very fine sand 63-125 μm	Fine sand 125-250 μm	Medium sand 250-500 μm	Coarse sand & gravels > 500 μm	D ₅₀ (μm)	D ₇₅ (μm)	D ₉₀ (μm)
SPM low-water samples									
1A-LW	5	78	9	4	4	0	20	45	112
2A-LW	7	76	10	4	3	0	20	45	100
2B-LW	8	74	10	4	3	1	20	50	112
3A-LW	5	80	10	3	2	0	24	50	112
4A-LW	6	76	11	4	3	0	25	50	112
5A-LW	6	74	11	6	3	0	24	56	126
6A-LW	5	77	10	4	4	0	25	50	112
7A-LW	5	83	9	2	1	0	21	40	71
SPM high-water samples									
1A-HW	3	22	7	22	35	11	224	399	564
2A-HW	5	43	13	17	18	4	71	224	399
5A-HW	6	64	16	8	6	0	36	80	178
6A-HW	6	52	21	15	6	0	50	112	224
7A-HW	6	67	15	7	5	0	32	71	159
1B-HW*	2	13	2	2	1	80	1600	2000	2600
2B-HW*	0	4	2	0	0	94	2000	2500	3500
4B-HW	7	55	15	12	8	3	40	126	283
5B-HW	5	49	11	10	16	9	56	252	502
6B-HW	7	68	13	7	5	0	28	63	159
7B-HW	6	38	8	13	23	12	106	356	564

4.7. River bed sediment (RBS) samples

The concentration of magnetite was estimated for four grain size fractions of sieved RBS samples (Figure 7c). The highest M_{rs} values ($0.58-1.36 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$) are observed for grain size fraction $< 63 \mu\text{m}$ and between $63-160 \mu\text{m}$. Lower values ($M_{rs} = 0.46-0.55 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$) are observed for the grain size fraction between 160 and $500 \mu\text{m}$. M_{rs} is even lower for the grain size fraction between $500 \mu\text{m}$ and $2\,000 \mu\text{m}$ ($0.03-0.16 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$). Finally, samples coarser than $> 2\,000 \mu\text{m}$ have the lowest M_{rs} value ($0.01-0.03 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$), most of them being even not measurable because of a too low magnetization level. The finer is the grain size fraction in the RBS, the larger is the magnetic concentration, with a threshold value around $160 \mu\text{m}$ below which the magnetic concentration is rather stable.

No clear trend is observed between magnetic grain size and sediment grain size (Figure 8c). This cannot be firmly established given the very weak magnetization of the samples $> 500 \mu\text{m}$ that may alter the precision of the measured parameters (see hysteresis curves of Figure 7).

In other words, magnetite in the RBS samples is more abundant in the fine grained sediment without being necessarily finer or coarser itself.

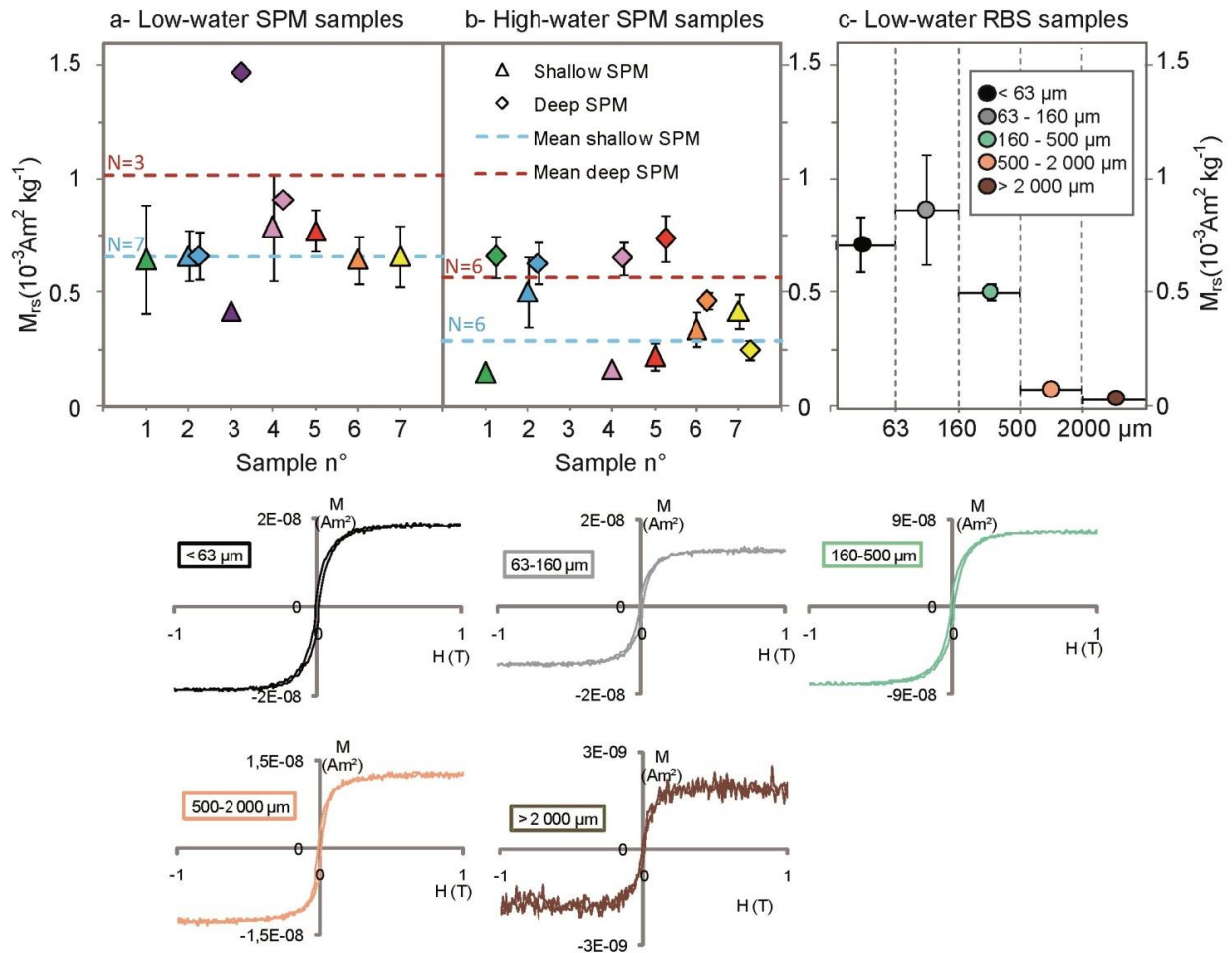


Figure 7: Saturation remanent magnetization M_{rs} of SPM and RBS samples (mean value and standard deviation), (a) low-water SPM, (b) high-water SPM ($< 1\,000\ \mu\text{m}$). For each water stage, horizontal dotted lines represent the mean M_{rs} of shallow and deep SPM samples. (c) Mean M_{rs} of sieved low-water RBS with one representative hysteresis loop per grain size population (after correction for dia- paramagnetic contribution). $N = 2$ to 4 for SPM samples and $N = 7$ for RBS samples. Because of the low amount of material, samples 3A-LW, 3B-LW, 4B-LW, and 4A-HW are only represented by one measurement. See Figure 3 for detailed sample locations.

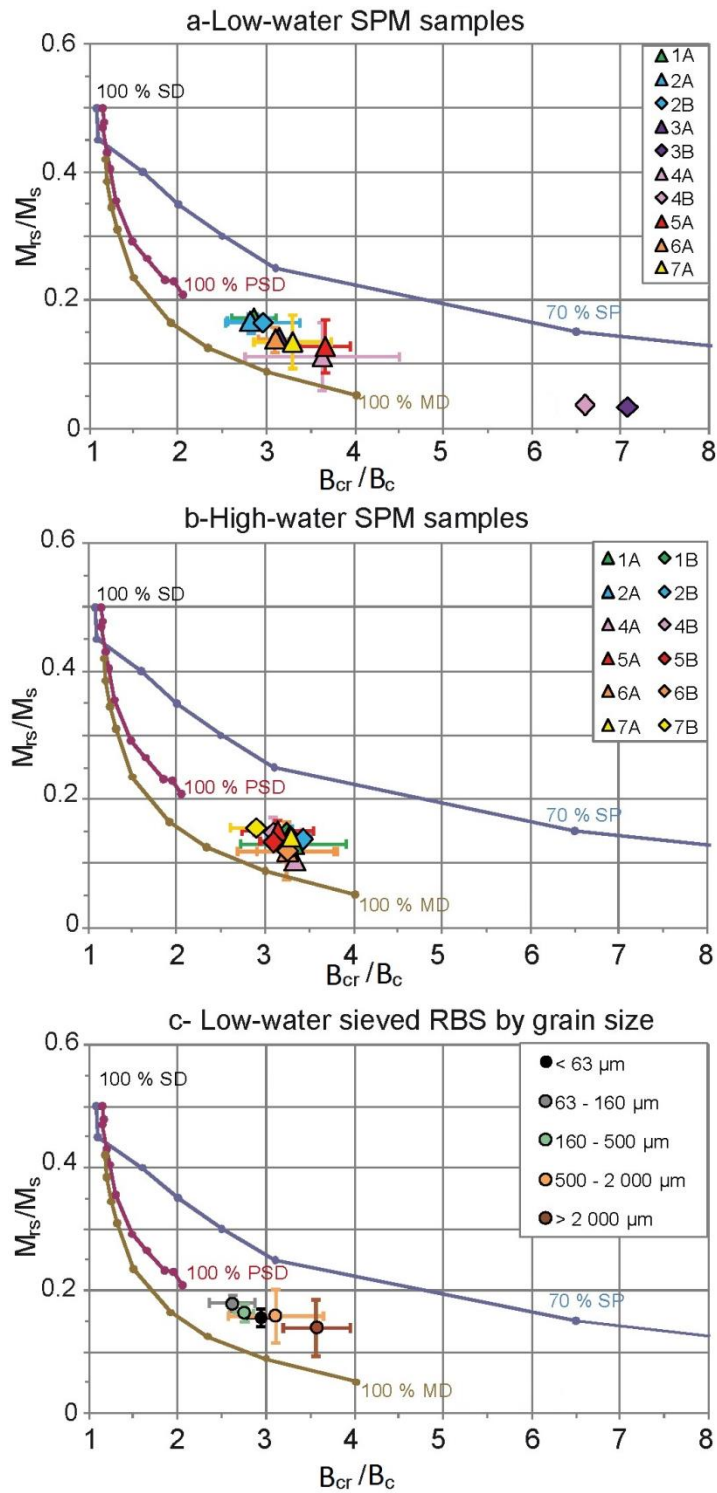


Figure 8: Day plots of magnetite with theoretical mixing curves of superparamagnetic (SP), single-domain (SD), pseudo-single-domain (PSD), and multi-domain (MD) end-members (Dunlop & Carter-Stiglitz, 2006). (a) Low-water SPM samples, (b) high-water SPM samples (mean value and range of values of samples < 1000 μm), (c) sieved RBS samples. Because of the low amount of material, samples 3A-LW, 3B-LW, 4B-LW, and 4A-HW are only represented by one measurement. See Figures 3 for detailed sample locations.

5. Discussion

The RBS samples collected during the low-water stage represent a mixture of the bed load and the suspended load. The homogeneous mineralogical and grain size distributions and low values of D_{50} ($\sim 20 \mu\text{m}$) and D_{75} ($40\text{-}56 \mu\text{m}$) of the SPM collected during the low-water stage (see Figure 6a and Table 2) indicate that this SPM material can be considered as part of the wash load which classically presents these characteristics. The grain size distribution of the SPM collected during the high-water stage, coarser than in the low-water SPM, and very heterogeneous across the river section (D_{50} between 28 and $2\,000 \mu\text{m}$ and D_{75} between 63 and $2\,500 \mu\text{m}$; see Figure 6b, 6c and Table 2) is typical of the suspended load. However, the proportion of the fine-grained particles in the high-water SPM is still significant as indicated by the low value of the D_{50} . The SPM collected during the high-water stage are interpreted as a mixture of the wash load and the suspended load originating from the river bed. We can also note that, contrary to the wash load, clay minerals are not detected in the high-water SPM and are present in very small (and probably not significant) amount in the RBS samples (see Table 1).

For most of the samples, M_{rs} is lower than $1.0 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$, therefore significantly lower than the M_{rs} measured in the downstream sites along the Seine River in the previous study (between 1 and $5 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$; Franke *et al.*, 2009). Despite the relatively low magnetization of the samples of Marnay-sur-Seine several observations based of the currentometric, bulk grain size, and magnetic data can be made and the discussion will therefore be focused on the link between magnetite properties (concentration and grain size), sediment load, and hydraulic processes.

5.1. Main carriers of magnetite particles

The sizes of PSD-MD magnetite particles present in most of the RBS and SPM samples range from a few μm to $10\text{-}20 \mu\text{m}$, no matter the grain size distribution and the location in the cross-section. The relatively coarse magnetites observed in two low-water SPM samples from the middle of the section illustrate the sensitivity of the environmental magnetism methods to detect even subtle variations in magnetic grain size. Indeed, these relatively coarse magnetite grains are still $< 63 \mu\text{m}$. The fact that magnetite particles are significantly smaller than that of other minerals present in the SPM may be linked to different densities. Indeed, the Stokes's law indicates that the velocity needed to transport a calcite particle of $120 \mu\text{m}$ (which is the maximum D_{90} value of low-water samples) with a density (ρ) between 2.6 and 2.8 cannot transport magnetite particles ($\rho = 5.2$) coarser than $\sim 60 \mu\text{m}$. This is consistent with the magnetic measurements.

The enrichment of magnetite particles in the fine fraction of the RBS ($< 160 \mu\text{m}$, see Figure 7c) may result from the increase of the adsorption surface with the decrease of the grain size (Dzombak & Morel, 1990). It can also be explained by the size of the magnetites. The fact that magnetites are $< 63 \mu\text{m}$ and present in minor content in the granulometric fraction $> 160 \mu\text{m}$ also indicates that in the RBS, magnetites included in coarse sediment

particles are not dominant and that most of the magnetites are independent or trapped in aggregates < 160 μm .

The number of deep low-water samples (three) and limited repetitions of magnetic measurements per samples (due to the low amount of material) make the results statistically too uncertain to reliably conclude. Discussions are hence focused on the shallow low-water (wash load) samples. Although the mineralogy is different between the wash load and the RBS samples, the mean magnetic concentration of the shallow low-water samples ($\bar{M}_{\text{rs}} = 0.66 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$) is statistically similar to that of the fine-grained RBS samples ($\bar{M}_{\text{rs}} = 0.79 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$, see Figure 8a and 8c). These values probably illustrate the mean concentration of magnetite in natural silt and fine sand particles in the sediment load of the Seine. It is however not excluded that contrary to the RBS, a significant part of the magnetite particles in the wash load (low-water SPM) is aggregated with clay minerals.

Knowing the properties of the bed sediment and the wash load, and assuming that the level of turbulence is high enough to suspend the bed sediment into the water column, the magnetic concentration of the high-water SPM is expected to correspond to the mixing of the input of both, wash load and RBS.

5.2. Effect of the turbulence during the high-water stage

The general level of turbulence during the high-water stage can be estimated using data from the ADCP measurements (see Figure 3b and c), based on the Reynold number Re :

$$Re = \frac{L \cdot V}{\nu} \quad (1)$$

Where V is the mean velocity of the flow in the channel cross-section ($\sim 1.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), L is the characteristic length ($= 4 \cdot \text{wetted surface} / \text{wetted perimeter} \approx 2 \text{ m}$) and ν the kinematic viscosity ($= 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ for water).

The resulting $Re \approx 9 \cdot 10^6$ indicates a high level of turbulence, as for previous ADCP measurements in the Seine River ($6 - 7 \cdot 10^6$, after Chauvet, 2014).

The intensity of the turbulence can also be estimated with the dimensionless mean cross-velocity M of Hickin (1978):

$$M = \sum_{i=1}^n \left(\frac{V_s n}{V_p n/n} \right) \quad (2)$$

Where n is the number of equally spaced measured points of primary flow (V_p) and secondary flow (V_s). The resulting $M \approx 20 \cdot 10^{-3}$ is two times higher to other M values obtained by Dzana & Gaillard (1996) in the meander apexes of the upstream part of the Seine River ($10-12 \cdot 10^{-3}$ against $2-3 \cdot 10^{-3}$ in the inflection points). Based on these hydraulic parameters, the flow in the selected cross-section is considered as representative of a free migrating meander with a high level of turbulence in a suspended-load dominated river.

ADCP measurements giving us access to the spatial variations of the turbulence across the section, show that the helical cells are more intense in the outer than in the inner bank (see

Figure 3c). In the studied section, the secondary flow can reach 0.1 m s^{-1} at the outer bank, which is ten times higher than at the inner bank, and represents one twelfth of the local value of the primary flow ($\sim 1.25 \text{ m s}^{-1}$, Figure 3b). The configuration of the secondary flow suggests that the maximum level of turbulence is close to the sampling column #2 (Figure 3c), as classically observed in bend apex cross-sections, where the maximum turbulence and shear stress are close to the outer erosive bank (Dzana & Gaillard, 1996). This observation is consistent with the presence of large grain size particles (up to gravel size in samples 1B- and 2B-HW) on the outer bank, and not in the middle part and the inner bank of the bend where the turbulence decreases (see Figure 6b and 6c and Table 2).

Considering that the level of turbulence is high enough to suspend the bed sediment, the sieved RBS samples can be used as references for magnetic concentration M_{rs} in the high-water SPM. A model is proposed to calculate the M_{rs} that should be expected for each SPM sample knowing its grain size distribution.

Regarding the magnetic properties, the RBS can be separated in three main fractions: (1) the fraction $< 160 \mu\text{m}$ ($\sim 0.79 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$), (2) the fraction between 160 and $500 \mu\text{m}$ ($\sim 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$), and (3) the fraction $> 500 \mu\text{m}$ ($\sim 0.06 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$). However, in the high-water SPM, the M_{rs} of the fraction $< 160 \mu\text{m}$ is a combination of magnetites from the wash load (WL) and the suspended load. As the proportions of the wash load cannot be estimated and the M_{rs} values of the wash load and the fine RBS fraction are similar, we consider that the mean M_{rs} of the fraction $< 160 \mu\text{m}$ is the mean \pm standard deviation σ of all WL and RBS₍₁₎ (giving $M_{rs} = 0.74 \pm 0.19 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$). Hence the model considers that the M_{rs} of each high-water SPM can be written as.

$$M_{rs} = \frac{[F_{(\%)} \cdot \bar{M}_{rs}]_{(WL+RBS < 160 \mu\text{m})} + [F_{(\%)} \cdot \bar{M}_{rs}]_{(RBS_{160-500 \mu\text{m}})} + [F_{(\%)} \cdot \bar{M}_{rs}]_{(RBS > 500 \mu\text{m})}}{100} \quad (3)$$

Where $F_{(\%)}$ is the volumetric fraction (in %) of the corresponding sediment grain sizes and \bar{M}_{rs} is the corresponding mean remanent magnetization measured on each sediment grain size fraction. As the M_{rs} values of the fraction $< 160 \mu\text{m}$ are significantly variable and the proportions of WL and RBS $< 160 \mu\text{m}$ on the fine fraction cannot be estimated, two additional “extreme” models derived from the equation (3) are proposed. Using the standard deviation σ of the $\bar{M}_{rs(WL+RBS < 160 \mu\text{m})}$ the two extreme models replace the $\bar{M}_{rs(WL+RBS < 160 \mu\text{m})}$ by the minimum ($0.74 - 0.19 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$) and maximum ($0.74 + 0.19 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$) theoretical values. As the values of the RBS_{160-500 μm} and RBS_{> 500 μm} fractions are more steady ($\sigma < 0.05 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^2 \text{ kg}^{-1}$), their parameters are not changed in the extreme models.

Comparisons of the calculated M_{rs} using the model equation (3) to the measured M_{rs} are shown in Table 3 and Figure 9 respectively. Most of the estimations on the deep high-water SPM samples (4 / 6) are close to the measured results/values. Conversely, most of the calculated M_{rs} corresponding to the shallow high-water SPM samples (4 / 5) is significantly overestimated.

Table 3: Measured and calculated magnetic concentrations M_{rs} for high-water SPM samples using the RBS model. σ is the standard deviation.

	< 160 μm (%)	160 – 500 μm (%)	>500 μm (%)	Measured M_{rs} ($10^{-3} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$)	Calculated M_{rs} ($10^{-3} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$)
Shallow HW SPM samples					
1A-HW	37	52	11	0.15 ± 0.01	0.54 ± 0.09
2A-HW	66	30	4	0.50 ± 0.15	0.65 ± 0.12
5A-HW	89	11	0	0.22 ± 0.07	0.71 ± 0.16
6A-HW	84	15	1	0.34 ± 0.07	0.70 ± 0.16
7A-HW	90	10	0	0.42 ± 0.07	0.72 ± 0.17
Deep HW SPM samples					
1B-HW (< 1 000 μm)	89	11	0	0.66 ± 0.09	0.71 ± 0.16
2B-HW (< 1 000 μm)	92	8	0	0.63 ± 0.02	0.72 ± 0.17
4B-HW	81	16	3	0.65 ± 0.25	0.69 ± 0.15
5B -HW	68	23	9	0.74 ± 0.10	0.63 ± 0.13
6B-HW	91	9	0	0.46 ± 0.04	0.72 ± 0.17
7B-HW	55	33	12	0.25 ± 0.04	0.58 ± 0.10
Model parameters	$\bar{M}_{rs} (< 160\mu\text{m})^*$ ($10^{-3} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$)	$\bar{M}_{rs} (160-500\mu\text{m})$ ($10^{-3} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$)	$\bar{M}_{rs} (> 500\mu\text{m})$ ($10^{-3} \text{ Am}^2\text{kg}^{-1}$)		
Mean	0.74	0.50	0.06		
$\pm \sigma$	0.19	~ 0	~ 0		

* mean values are calculated from M_{rs} of shallow low-water SPM (WL) samples (N = 8) and fraction <160 μm of RBS samples (N = 14).

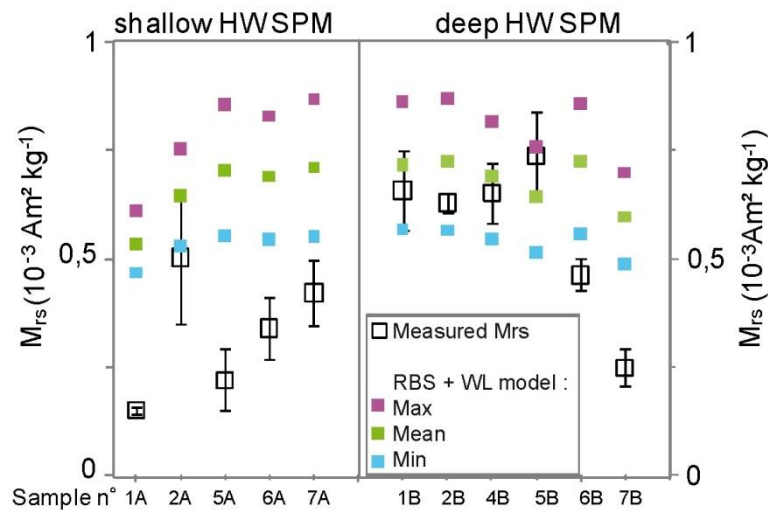


Figure 9: Comparison between measured M_{rs} and calculated M_{rs} with the RBS+WL model. The sets of modeled values are calculated with the mean, maximum and minimum M_{rs} values for the fraction $<160\mu\text{m}$ (see text and Table 3). Note: samples 1B- and 2B-HW analyses were conducted on the fraction $> 1\ 000\ \mu\text{m}$ (see Table 2 for grain size distribution).

For the samples showing the closest estimations (1B-, 2A- 2B-, 4B-, and 5B-HW), most of them were collected in the deeper water depth, where the secondary flows show the highest gradients (see Figure 3c). On the contrary, in the other shallow high-water SPM samples and in the two deep samples located at sides where the secondary flow (and hence the re-suspension) is low, the model overestimates the M_{rs} values. In practice, the measured M_{rs} values are significantly lower (see Figures 7 and 9) in shallow than in deep high-water SPM, although the proportions of sediment $< 160\ \mu\text{m}$ and between 160 and $500\ \mu\text{m}$ are not always significantly different (see Table 3). The model can only estimate the M_{rs} values for the samples taken at locations where the level of turbulence is high enough to suspend the bed sediments, either in deep flow (up to 3 m above the river bed) or in shallow water close to the outer bank.

Two solutions are proposed to explain the dilution of magnetites in the less turbulent part of the section:

The low M_{rs} values of the shallow HW samples that cannot be explained by the re-suspension model may indicate that the relation between the sediment grain size and the magnetite concentration is more complex in shallow SPM than in RBS samples. The high density of magnetites might prevent their re-suspension when the turbulence level is below the needed threshold, resulting in decreasing concentration of magnetite despite an increase in bulk sediment grain size. Hence, even if a natural dilution may exist, it cannot be quantified with our measurements and model.

Another explanation may be a possible sampling bias. This solution seems to be more likely for two reasons: 1) most of the shallow traps collected less SPM during high-water than during low-water stage (see Figure 4), although the suspended load should be significantly higher during the high-water stage. 2) clay minerals which are present in the wash load were

not detected in the high-water SPM. As their size, densities, and settling velocities are lower than that of calcite and quartz particles, it is not excluded that when the main flow increases, these clay particles flow through the traps without any deposition. If magnetite is present in aggregates with clay minerals, it may explain the decrease of their concentration in the collected traps. Following the same argument, a significant part of the wash load could have flowed through the traps. In the deep traps, the loss of fine material seems to be compensated by the re-suspension process.

Discrimination between these two explanations needs an additional approach. When the main flow increases and the turbulence is insignificant, the devices should be replaced by conventional SPM samplers (Hickin, 1995) in order to collect the fine sediment fraction transported in shallow water depth and to quantify the magnetic parameters.

Our sampling devices appear to be well adapted for low-water conditions, (wash load, grain size $< 63 \mu\text{m}$) or during high-water stage when the turbulence level is significantly high (suspended load close to the meander outer bank or in the lower part of the flow).

6. Summary and Conclusions

Bathymetry and velocity ADCP profiles show that the Seine River meander chosen for our case study presents a typical meander bend velocity distribution with, during the high-water stage, higher primary and secondary flow gradients in the outer left bank than in the inner bank.

In the entire sediment load the transported magnetite particles are $< 63 \mu\text{m}$. In the river bed sediment, their concentration is inversely related to the sediment grain size, leading to the conclusion that most of the magnetite particles are free. In the wash load, the concentration of magnetites is relatively constant, as well as the grain size distribution of the suspended sediments across the river section. The magnetic concentration is comparable to that of the fine grain size of the river bed sediment. These observations are used to explain the results of the heterogeneous SPM samples collected during the high-water stage using a mixing model based on the RBS magnetite concentration and grain size. A good prediction is obtained in places where the turbulence is high (outer bank and samples close to the river bed), probably because of the re-suspension of fine magnetite-rich sediments. In the less turbulent parts of the section, the model overestimates the magnetic concentration probably because of an existing sampling bias in the collection of the fine-grained fraction that is usually richer in magnetite grains.

Despite the low amount of magnetic material in the SPM ($M_{rs} < 1 \cdot 10^{-3} \text{Am}^2 \text{kg}^{-1}$), the magnetic concentration was mostly sufficient to define a relationship between magnetite properties (concentration and grain size) and bulk sediment grain size distribution in the wash load and re-suspended material in zones of high turbulence level. This study establishes the potential of environmental magnetism to describe the sediment load at the scale of a meandering river cross-section with the relatively low amount of available material (3-30 mg) and weak magnetic concentration.

Acknowledgments

We wish to thank Prof. C. Colin and O. Dufaure from GEOPS (U. Orsay) for their technical assistance with grain size measurements and discussions. We also thank the technical staff from the GEOSCIENCES department (MINES ParisTech) and from the Climag team (LSCE) for field assistance and laboratory work. The study was partly funded by the Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine (PIREN-Seine). This study is part of the first author's Ph.D. thesis. This is LSCE contribution XXXX.

Résumé et discussion

Cette étude a permis de récupérer dans un site amont de la Seine différents échantillons de la charge sédimentaire transportée dans des méandres considérés comme naturels. L'échantillonnage est complété par des mesures bathymétriques, courantométriques 3D, et granulométriques, permettant de comparer en chaque point dans la section et au cours de deux périodes hydrologiquement contrastées l'empreinte magnétique, les dynamiques locales et la charge sédimentaire récupérée.

Cette étude a montré que, si la taille des magnétites est relativement homogène au sein de la section et dans le temps, la concentration de ces minéraux est, elle, dépendante de la nature de la charge sédimentaire, du régime hydrologique et du niveau de turbulence. Un échantillonnage plus adapté aux périodes de crues est cependant nécessaire pour améliorer nos modèles de calculs de la charge en suspension. Notre premier modèle n'intégrant que la contribution de la charge de ruissellement et les sédiments de fond, celui-ci doit être complétés par les propriétés d'échantillons de sédiments de berges ainsi que de sols de la surface de bassin versant drainée.

Une autre cause potentielle de l'inexactitude du modèle peut être le fait que les mesures granulométriques ne sont pas tout à fait représentatives de la charge sédimentaire. En effet, les MES ont été traités avec un agent défloculant afin de séparer les particules des agrégats. Une quantification de la proportion de ces agrégats dans la charge sédimentaire ainsi qu'une comparaison de leurs propriétés magnétiques par rapport à celles des particules libres apporterait potentiellement de nouvelles réponses.

Chapitre V. Traçage spatio-temporel des particules ferrugineuses dans la Seine avec les méthodes magnétiques

Les deux premiers chapitres ont permis de définir la stratégie de l'échantillonnage et de l'étude des MES le long du cours de la Seine en différents points et affluents lors de différents contextes hydrologiques. Les Chapitres III et IV ont permis de caractériser la fraction magnétique des MES et d'apporter notamment les informations suivantes :

- L'aimantation est majoritairement portée par des magnétites, principalement pseudo-mono-domaines, voire multi-domaines. Leur taille est relativement homogène dans chaque échantillon comme le suggèrent les diagrammes de FORC. Elle peut en revanche varier significativement selon l'échantillon mesuré, au moins à l'échelle spatiale.
- Dans la partie amont de la Seine, la taille des magnétites transportées dans les MES ne dépend pas du régime hydrologique.
- Le régime hydrologique et les mécanismes hydrodynamiques associés ont en revanche un impact significatif sur la concentration et la dilution des particules de magnétite dans la charge sédimentaire. Que ce soit dû à un biais d'échantillonnage et/ou à des mécanismes naturels, les valeurs d'aimantation rémanente à saturation de la partie amont et naturelle de la Seine diffèrent selon que les trappes d'échantillonnages aient été placées en période de crue, d'étiage, dans des zones calmes ou turbulentes.

En intégrant ces premières informations, nous allons dans ce dernier chapitre, évaluer le potentiel des méthodes magnétiques présentées précédemment à détecter les différentes occupations du sol et activités humaines (agriculture, navigation, industrie...) susceptibles d'affecter la fraction métallique en suspension dans la Seine. Nous allons également étudier la sensibilité de ces méthodes face aux mécanismes de dilution ou d'accumulation des particules lors des confluences ou selon le contexte hydrologique. Cette étude multidimensionnelle se divise en quatre parties :

- La première partie du chapitre est consacrée à une discussion au sujet de la qualité de l'échantillonnage réalisé sur le système Seine et de la représentativité des différents paramètres mesurés afin de faire un premier tri des résultats et paramètres pouvant apporter des réponses à la problématique de cette étude.
- La deuxième partie propose une description de l'évolution des MES à l'échelle du bassin versant de la Seine à partir des outils magnétiques en négligeant dans un premier temps l'impact saisonnier.
- La troisième partie traite de la problématique de l'impact des rejets de stations d'épuration sur les MES et le potentiel des outils magnétiques à évaluer cet impact en proposant un modèle de calcul à partir des paramètres hydrologiques et magnétiques.

- La dernière partie évalue l'impact du régime hydrologique sur la fraction magnétique en étudiant séparément les échantillons de la Seine prélevés lors des campagnes de crues et d'étiages.

V.1. Représentativité des échantillons et des outils magnétiques

Le Chapitre IV a permis de montrer que, au moins à Marnay, les dispositifs d'échantillonnage inspirés du modèle C de Tessier (2003), étaient bien adaptés pour échantillonner la charge de ruissellement en période d'étiage et le sont moins pour la charge en suspension en période de crue, mais que l'efficacité de piégeage est également dépendante de la position des trappes dans la section (par rapport à la profondeur, le niveau de turbulence...). De ce fait, nos trappes de 2011-2012 posées en période de crue sont susceptibles de ne pas avoir correctement échantillonné les MES et de présenter des résultats biaisés. Une discussion sur la qualité des échantillonnages est de ce fait nécessaire avant toute interprétation.

Après avoir étudié la représentativité de l'échantillonnage, un rapide récapitulatif des résultats magnétiques obtenus à partir des mesures présentées dans le Chapitre III permettra de classer ces différents outils selon ceux qui sont statistiquement interprétables dans les échelles spatiales et temporelles.

V.1.1. Relation entre paramètres hydrologiques et MES récupérées

La quantité de matériel transporté en suspension est en partie contrôlée par le débit (Williams, 1989; Hickin, 1995; Knighton, 1998). Dans la Seine, cela se traduit par de brefs pics de concentration de MES observés lors des montées de crues lorsque celles-ci dépassent un certain seuil (Estèbe, 1996; Vilmin, 2014).

Une manière de vérifier la qualité des échantillonnages effectués pour cette étude est de voir si la quantité de MES piégées dans la Seine est en accord avec le régime hydrologique associé lorsqu'il dépasse ce seuil.

Pour vérifier l'efficacité des trappes à collecter les MES, les masses (normalisées au nombre de jours où la trappe a été mise à l'eau) de chaque échantillon prélevé à un même site ont été comparées entre elles et avec les courbes de débit et débits spécifiques calculées pour chaque site grâce aux méthodes de calcul décrites dans les Annexes A et B). Si, à un site donné, les trappes piègent plus de MES lorsque le débit dépasse un certain seuil, on considère que les conditions du site (présence de turbulences) compensent l'éventuel biais d'échantillonnage posé par les dispositifs.

Des exemples de profils de débits spécifiques et quantité de MES prélevées sont montrés dans la Figure V.1 : Marnay-sur-Seine (site 2), Thomery (site 6), Trilbardou (site 11, sur la Marne) et Denouval (site 19). Les profils d'échantillonnage MES vs débits des autres sites de 2011-2012 sont regroupés dans l'Annexe E. Différentes tendances sont observées :

- Le site de Marnay (Figure V.1a) présente des masses de MES comprises entre 500 et 3000 mg/jour sans aucune relation apparente avec le débit. Dans cette situation, le point d'échantillonnage dans la section et le dispositif n'ont pas permis d'enregistrer les changements de régime.
- Le site de Thomery (Figure V.1b) montre des masses de MES comprises entre 150 et 1000 mg/jour, sauf pour un échantillon prélevé lors de la montée de crue de janvier 2012 où la trappe a piégé 4500 mg/jour. Un pic de crue mineure est observé en novembre (débit spécifique maximum d'environ 12 l/s/km²), mais ne semble pas être suffisant pour observer un pic de MES. Il semble donc que le seuil nécessaire pour augmenter le flux de MES est au minimum de 12 l/s/km² (en dessous de ce débit, aucun pic de MES n'est observé), ce qui correspond à un débit de 200 m³/s à Thomery.
- La plupart des trappes posées dans le site de Trilbardou (Figure V.1c) ont piégé entre 70 et 700 mg de MES par jour. Trois trappes posées lors de périodes de crues ont piégé entre 3 000 et 14000 mg de MES par jour. Le pic de crue le plus faible atteint environ 10 l/s/km². Tous les autres échantillons ont été prélevés durant des périodes correspondant à des débits spécifiques maximum plus faibles. Il semble donc que le seuil nécessaire à l'apparition d'un pic de MES soit autour de 10 l/s/km², soit 120 m³/s.
- Le site de Denouval (Figure V.1d) présente des masses de MES entre 90 et 1000 mg/jour sans aucune relation apparente avec le débit. Comme dans l'exemple de Marnay, nous ne pouvons ni déterminer de débit seuil, ni confirmer la qualité de l'échantillonnage en périodes de crues.

Le Tableau V.1 regroupe l'étude des relations entre débit et MES pour chaque site. La morphologie de la section de la Seine et des affluents ainsi que la position de la trappe sont indiquées.

Sur les 15 sites où l'échantillonnage a été effectué entre 2011 et 2012, 8 montrent une relation nette entre la quantité de MES piégée et le débit. Il semble que dans ces 8 sites, le débit seuil minimal (Q_{seuil}) estimé pour produire un pic de MES soit variable : entre 10 et 370 m³/s (en divisant les débits calculés lorsque la Seine se sépare en plusieurs bras). Lorsqu'on rapporte ces débits à la surface de bassin versant, le $Q_{\text{sp seuil}}$ est relativement identique quel que soit la position du site dans le bassin versant : entre 10 et 13 l/s/km² (sauf dans le Loing à Saint-Mammès où il est à 8 l/s/km²). Le débit seuil de mise en suspension de sédiment semble être fonction de la surface drainée par le cours d'eau.

De manière générale, la plupart des sites où l'échantillonnage n'est pas biaisé (pic de MES observé en crue) se situent dans des portions rectilignes du cours de la Seine, là où les influences des turbulences sont plus limitées. Les trappes posées au niveau des écluses du côté

de la navigation (sites 3 et 4) ainsi que certaines trappes placées dans des séparations de cours d'eau (sites 15, 18, 19 et 20) n'ont pas probablement pas correctement échantillonnés les MES de crue à cause des fortes turbulences.

Dans les sites d'échantillonnage situés en zones navigables, la navigation peut sensiblement affecter les phénomènes de mise en suspension et de transport sédimentaire (Vilmin *et al.*, 2014). Sur l'ensemble des sites, les trappes peuvent avoir été partiellement bouchées ou déviées par l'arrivée de branches, algues, etc. Bien que ces phénomènes puissent expliquer en partie les résultats de la Figure V.1 et du Tableau V.1, il semble que les boucles de méandre et les zones de forte navigation, une stratégie d'échantillonnage plus adaptées aux fortes turbulences doive être adaptée.

D'après ces résultats, les MES d'environ un site sur deux semblent avoir été correctement échantillonnées par le système que nous avons utilisé lors des périodes de crue ce qui conduit à se questionner sur la fiabilité des analyses magnétiques et des interprétations effectuées à partir de MES échantillonnés dans l'autre moitié des sites. Les échantillons prélevés lors des périodes de crue devront donc être interprétés avec prudence.

Cependant, d'après Estèbe (1996), le flux de fer total transporté est proportionnel à celui des MES total et le biais d'échantillonnage ne devrait donc pas affecter la concentration en minéraux magnétiques. D'après notre étude de la section de Marnay, cela est vrai pour les magnétites à partir du moment où l'échantillonnage est représentatif de la distribution minéralogique et granulométrique des particules transportées dans la colonne d'eau. A défaut d'information sur la minéralogie et la granulométrie des MES, nous nous baserons sur les résultats d'Estèbe (1996) pour l'interprétation des échantillons de crue, en gardant néanmoins la problématique du biais d'échantillonnage en tête lorsque les résultats entre les MES correctement et mal échantillonnés diffèrent significativement.

Il faut toutefois noter que dans l'objectif d'améliorer notre compréhension des relations pouvant exister entre magnétites et charge sédimentaire, un échantillonnage adapté est indispensable pour améliorer les modèles de calculs en cours de développement et présentés dans le Chapitre IV. En effet, ces modèles se basent sur la distribution granulométrique des MES et la collecte de ces dernières doit donc être représentative des particules qui se déplacent réellement au point d'échantillonnage choisi.

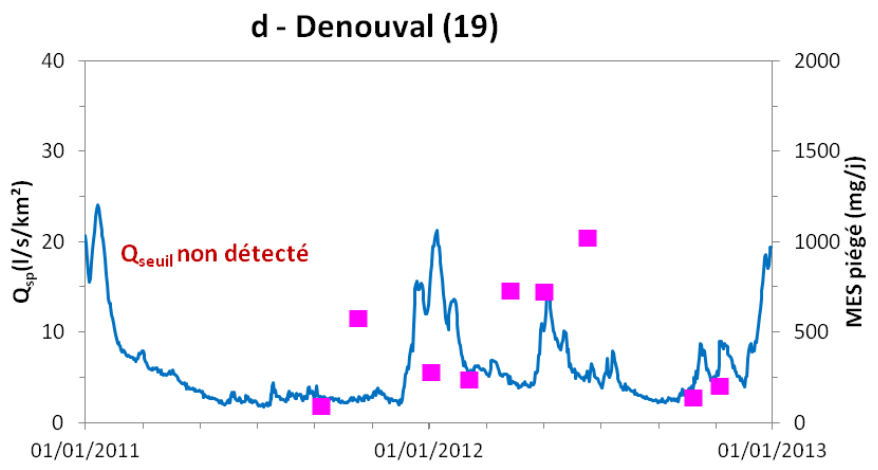
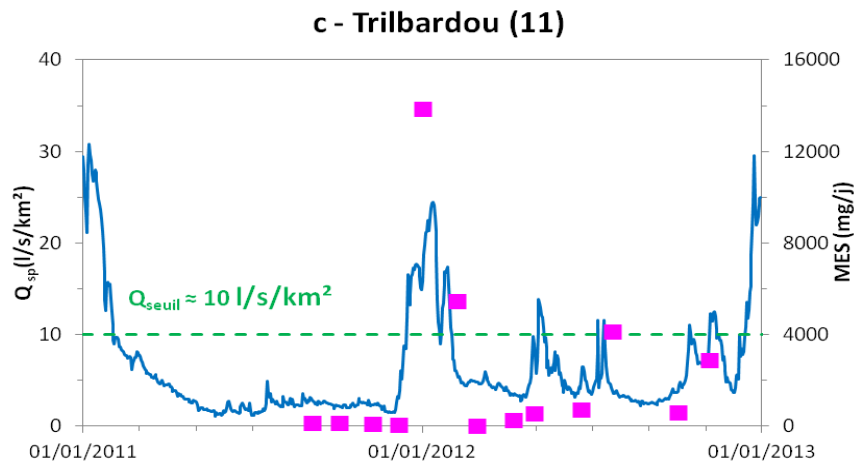
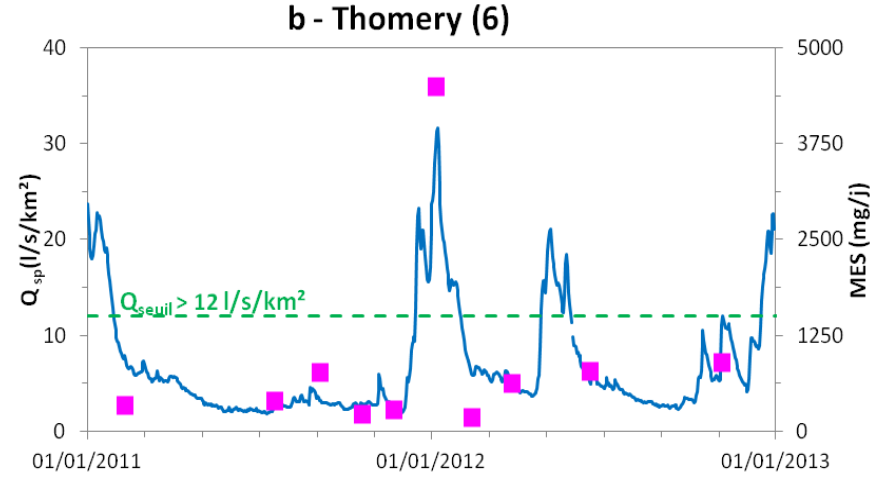
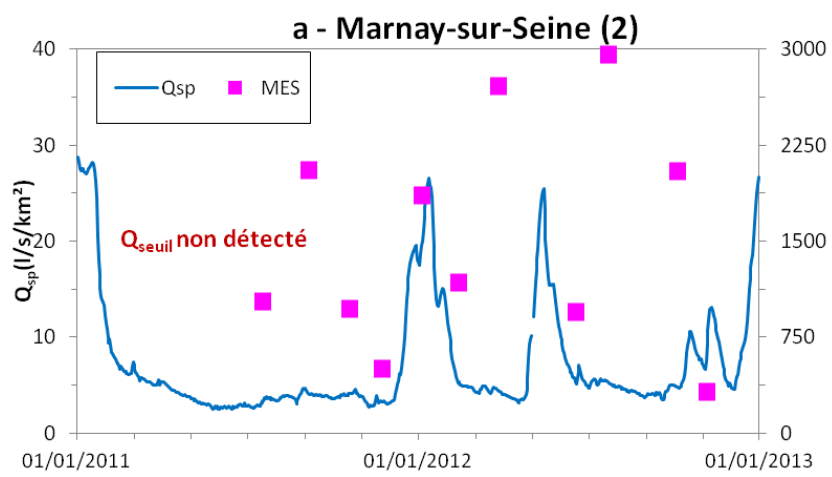


Figure V.1: Relation entre débit (spécifique) et quantité de MES piégée (en mg/jour) dans 4 sites d'échantillonnage de la Seine. (a) exemple du site de Marnay-sur-Seine (2) ; (b) exemple de Thomery (6) ; (c) exemple de Trilbardou (11) ; (d) exemple de Denouval (19). Lorsque les trappes semblent enregistrer des pics de MES dues à l'augmentation du débit, le débit « seuil » minimum est estimé graphiquement lorsque l'on observe une relation entre la masse de MES collectée et le débit de la Seine. Voir texte pour l'explication de l'estimation graphique des débits seuils.

Tableau V.1: Relation entre débit et MES sur les sites de prélèvement de la Seine. Lorsqu'une relation semble exister, les débits et débits spécifiques seuils sont estimés et les sites sont marqués en gras. Les débits marqués d'un (*) ont été fractionnés pour les sites localisés sur une des branches de cours d'eau en fonction de la largeur du chenal concerné. Pour chaque site, la morphologie du segment de la Seine ainsi que la localisation des trappes (identique lors de chaque campagne) est indiquée. () Pour le site d'Amfreville, la tendance est incertaine. Voir les Annexes A et B pour les calculs de débits et Annexe E pour les profils de MES vs Q_{sp} et l'estimation des débits seuils.**

Site	Cours d'eau	N éch.	Tendance entre MES & Q_{sp}	Q seuil (m ³ /s)	Q_{sp} seuil (l/km ² /s)	Morphologie du segment	Localisation
Saron (1)	Aube	12	Oui	≈ 60	≈ 13	Point d'inflexion	Rive droite
Marnay (2)	Seine	11	Non	-	-	Apex	Rive gauche/externe
Jaulnes (3)	Seine	10	Non	-	-	Point d'inflexion, séparation (écluse)	Ecluse côté navigation
Cannes-Ecluse (4)	Yonne	7	Non	-	-	Rectiligne, séparation (écluse)	Ecluse côté navigation
St-Mammès (5)	Loing	11	Oui	> 30	> 8	Rectiligne	Rive gauche
Thomery (6)	Seine	10	Oui	> 200*	> 12	Rectiligne, séparation (écluse)	Rive gauche (côté barrage)
Draveil (7)	Seine	6	Oui	> 370	> 13	Rectiligne	Rive droite
Viry-Châtillon (8)	Orge	10	Oui	> 10	> 11	Rectiligne	Rive gauche
Trilbardou (11)	Marne	13	Oui	≈ 120	≈ 10	Rectiligne	Rive gauche
Bouival VNF (15)	Seine	11	Non	-	-	Rectiligne, séparation (îlot)	Bras gauche sur îlot
Bouival Pointe (16)	Seine	6	Oui	> 280*	> 13	Rectiligne	Pointe d'îlot
Pontoise (17)	Oise	11	Oui	> 140*	> 12	Rectiligne, séparation (îlot)	Bras droit sur îlot
Andrésey (18)	Seine	11	Non	-	-	Rectiligne, plusieurs séparations	Bras gauche
Denouval (19)	Seine	9	Non	-	-	Rectiligne, plusieurs séparations	Bras droit
Amfreville (20)	Seine	7	Incertaine**	> 330* ?	> 10 ?	Rectiligne, séparation (îlot)	Bras gauche, rive droite

V.1.2. Paramètres et méthodes magnétiques interprétables

Les méthodes et les paramètres magnétiques présentés et illustrés dans le Chapitre III sont listés dans le Tableau V.2.

Tableau V.2: Récapitulatif des méthodes et paramètres magnétiques utilisés dans l'étude, des informations apportées et des interprétations possibles. Les croix indiquent que la méthode peut potentiellement servir aux interprétations spatiale et/ou temporelle).

Propriété étudiée	Paramètre magnétique ou méthode utilisée	Echantillons mesurés	Interprétation spatiale	Interprétation temporelle
Minéralogie magnétique / Familles de coercivités	S-ratio	1 par site	X	
	Composantes gaussiennes du Log de l'IRM	1 par site	X	
	Désaimantation thermique de l'IRM-3 axes	1 par site de 2011-2012 (sauf Bougival Pointe)	X	
Taille des magnétites	M_{rs}/M_s , B_{cr}/B_c	Tous	X	X
	Diagrammes de FORC	1 par site de 2011-2012	X	
Concentration des MES en magnétites	M_{rs} , M_s	Tous	X	X
Proportion de minéraux paramagnétiques	Susceptibilité à champ fort (S.C.)	Tous	X	X

Les mesures des paramètres d'hystérésis ont été effectuées sur tous les échantillons de MES de la Seine. Ces paramètres peuvent donc potentiellement être utilisés pour étudier les variations des particules magnétiques à l'échelle spatiale et à l'échelle temporelle.

Les méthodes et mesures appliquées sur un échantillon par site (S-ratio, FORCs, désaimantation thermique trois axes et déconvolution de l'IRM) ne permettent en revanche qu'une interprétation à l'échelle spatiale en considérant que la variabilité temporelle des propriétés magnétiques est négligeable par rapport à la variabilité spatiale.

L'étude de la minéralogie magnétique devrait idéalement se faire avec des mesures de désaimantation thermique, mais ces mesures sont destructives et nécessitent quelques dizaines de grammes de sédiment. Elles n'ont donc pu être effectuées sur tous les échantillons. Bien que les analyses de minéralogie magnétique effectuées sur un échantillon par site semblent montrer que l'essentiel de l'aimantation est porté par de la magnétite, une faible proportion est portée par des minéraux de haute coercivité comme l'hématite ou la goethite. La proportion de ces minéraux au sein de la fraction magnétique peut potentiellement permettre de faire des interprétations environnementales. Elle peut être estimée à partir :

- Du S-ratio obtenu sur les courbes d'IRM, donnant le rapport entre minéraux magnétiques de basses et hautes coercivités.

- De la proportion de la composante d'IRM de haute coercivité (composante C_3) extraite de ces mêmes courbes d'IRM par décomposition du signal en gaussiennes.
- De la proportion d'IRM qui est restée aimantée dans la direction du premier champ appliqué (axe H_1) lors de l'aimantation sur 3 axes et qui concerne les minéraux de coercivité comprise entre 0,3 et 1 T. Cette composante de l'IRM sera nommée par la suite « Axe $>_{0,3}$ ».

Les rapports d'aimantation (M_{rs}/M_s) et de champ coercitif (B_{cf}/B_c) sont utilisés pour caractériser la taille moyenne des magnétites. Ils peuvent être appliqués sur l'ensemble des échantillons. Les diagrammes de FORCs offrent une caractérisation plus précise mais n'ayant été obtenus que pour un échantillon par site, ils ne peuvent être utilisés que pour une interprétation spatiale générale.

En considérant que la contribution magnétique de l'hématite et de la goéthite est négligeable par rapport à celle de la magnétite (ce qui est lié à leur aimantation caractéristique très faible), l'aimantation rémanente à saturation M_{rs} , normalisée à la masse de l'échantillon mesuré, peut être utilisée pour examiner les changements de concentration en magnétites d'un site à l'autre ou d'une période à l'autre. Dans les échantillons de Marnay-sur-Seine présentés dans le Chapitre IV ainsi que dans ceux du reste de la Seine, le M_{rs} est de l'ordre de 0,1 à 1 nAm²/mg (équivalent à 0,1 à $1 \cdot 10^{-3}$ Am² kg⁻¹).

Il est toutefois important de noter que l'utilisation de la rémanence comme indice de concentration est discutable car le M_{rs} est également dépendant de la taille des particules : à concentration égale, le M_{rs} des magnétites mono-domaines est plus élevé que celui des multi-domaines (Thompson & Oldfield, 1986). De ce fait, une diminution de taille de magnétites associée à une augmentation du M_{rs} peut être due à (ou accentué par) la relation taille/rémanence. Nous avons tout de même choisi d'utiliser ce paramètre comme indice de concentration de magnétite dans les MES pour les raisons suivantes :

- Si l'on considère que la saturation est atteinte à 1 T, le M_{rs} équivaut au SIRM (Evans & Heller, 2003) qui est régulièrement utilisé comme indice de concentration en minéraux magnétiques lorsque la minéralogie (ou la distribution minéralogique) magnétique est homogène (Meena *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 2011; Bian *et al.*, 2014; Dong *et al.*, 2014a; Sherriff, 2014).
- Les précédentes études dans les MES de la Seine (Franke *et al.*, 2009; 2013) ont montré que l'augmentation d'aimantation est associée à un enrichissement de magnétites grossières qui devraient donner un signal plus faible, à concentration égale. La relation inverse entre taille et aimantation rémanente, laisse supposer que l'effet de taille sur la rémanence n'affecte pas ou peu les interprétations de manière significative. Les amplitudes seraient différentes si le M_s était considéré dans le cas de tailles de grains différentes mais elles ne seraient pas remises en cause (nous le montrerons plus loin).

Enfin, la susceptibilité à champ fort (S.C.) est obtenue avec la correction de pente effectuée sur les courbes d'hystérésis magnétiques pour retirer la contribution des éléments non ferromagnétiques (dia/paramagnétiques) à l'ensemble du cycle. Ce paramètre a été obtenu sur

l'ensemble des échantillons de la Seine. Comme l'aimantation, il est normalisé à la masse de l'échantillon mesuré et sera donc indiqué en nAm²/mg T. La présence de la pyrite et d'autres minéraux ferrugineux (argiles) paramagnétiques étant fortement probable, la mesure de susceptibilité à champ fort permet d'avoir accès à la concentration relative de ces minéraux.

V.1.3. Etude des paramètres d'hystérésis magnétiques interprétables

Les paramètres d'hystérésis sont les seuls qui ont été mesurés sur tous les échantillons et qui peuvent potentiellement permettre d'étudier les variations de taille et de concentration de magnétite aux échelles spatiales et temporelles. Toutefois, quelle que soit l'échelle étudiée, il est nécessaire de déterminer si les variations observées sont statistiquement significatives et si les différences entre les valeurs mesurées résultent de facteurs environnementaux ou d'incertitudes associées aux mesures.

Les tests de représentativités décrits en Annexe D ont permis d'estimer l'incertitude totale (u_t) des paramètres magnétiques d'hystérésis dans chaque site (en considérant que l'incertitude d'un paramètre donné est constante dans chaque site). Les variabilités spatiales et temporelles des paramètres ont été définies de la manière suivante :

- La variabilité spatiale (σ_{spatial}) a été calculée pour chaque campagne d'échantillonnage. Les échantillons ont été regroupés par campagne et σ_{spatial} est l'écart-type des valeurs obtenues des N échantillons prélevés dans une campagne donnée.
- La variabilité temporelle (σ_{temp}) a été calculée pour chaque site d'échantillonnage. On procède à l'inverse et on regroupe, pour chaque site, les N échantillons récupérés. σ_{temp} est l'écart-type des valeurs obtenues pour chaque paramètre.

Le Tableau V.3 présente la variabilité de différents paramètres d'hystérésis magnétique. Les résultats d'interprétation du tableau sont les suivants :

- De manière générale, la variabilité spatiale σ_{spatial} des paramètres d'hystérésis est supérieure à la variabilité temporelle σ_{temp} (voir moyennes de σ_{spatial} et σ_{temp}). Les minéraux ferro- et paramagnétiques semblent donc à première vue plus affectés par la position du point de prélèvement sur le long du cours de la Seine que par les changements de régime hydrologique.
- A l'échelle temporelle, les interprétations sont plus compliquées. Mis à part le paramètre S.C., les autres paramètres mesurés possèdent dans la plupart des sites des σ_{temp} inférieures ou égales à u_t . Ceci peut s'expliquer soit par un manque de précision de l'appareil, soit par le fait qu'à un site donné, la fraction magnétique ne varie pas significativement dans le temps/avec le débit. Il est toutefois intéressant de noter que le paramètre M_{rs} semble avoir une σ_{temp} supérieure à l'incertitude u_t pour 8 des 15 sites d'échantillonnage. On peut également noter que la variabilité temporelle devient significative dans la Seine à partir de Draveil (site 7) et qu'elle le reste jusqu'à Amfreville (20). Il semble donc y avoir un contraste entre la partie amont de la Seine jusqu'à Thomery (site 6) et la Seine de l'entrée à la sortie de l'agglomération parisienne : la concentration de magnétites varie significativement plus dans le temps

dans la partie aval que dans la partie amont de la Seine. Pour les affluents, seuls l'Orge présente une variabilité temporelle d'aimantation significative. Nous considérerons donc que seules les variations de M_{rs} (pour certains sites) et de S.C. sont potentiellement significatives dans le temps.

Tableau V.3: Comparaison des variabilités spatiales ($\sigma_{spatial}$) et temporelles (σ_{temp}) des paramètres d'hystérésis magnétiques mesurés dans les MES de la Seine. Dans le deuxième tableau, les variabilités temporelles de chaque paramètre dans chaque site (à gauche) sont comparées aux incertitudes u_t (à droite et entre parenthèses) calculées dans l'Annexe D : les valeurs en gras représentent les écart-types σ supérieurs l'incertitude u_t du paramètre.* L'incertitude n'a pas été estimée pour les échantillons de Bougival Pointe et Denouval, on considère donc que les incertitudes de ces sites sont respectivement égales à celles de Bougival VNF et d'Andrésey. Les lignes surlignées en rouge représentent les campagnes ou sites où le nombre d'échantillon est inférieur à 7, ce qui remet en question la fiabilité des écarts-types.

Variabilité spatiale par campagne	Régime hydrologique	N éch.	M_{rs}	S.C.	B_{cr}/B_c	M_{rs}/M_s
			(nAm ² /mg) $\sigma_{spatial}$	(nAm ² /mg T) $\sigma_{spatial}$	$\sigma_{spatial}$	$\sigma_{spatial}$
Camp. 1 : 07/11	Etiage	5	1,70	15	0,5	0,04
Camp. 2 : 09/11	Etiage	11	1,90	17	0,6	0,04
Camp. 3 : 10/11	Etiage	11	1,57	12	0,5	0,04
Camp. 4 : 11/11	Etiage	10	2,38	11	0,5	0,03
Camp. 5 : 01/12	↗ crue	12	1,47	13	0,7	0,04
Camp. 6 : 02/12	↘ crue	15	0,98	12	0,4	0,02
Camp. 7 : 03/12	Intermédiaire	13	1,42	15	0,4	0,03
Camp. 8 : 05/12	↗ crue mineure	11	1,21	19	0,6	0,03
Camp. 9 : 06/12	↘ crue mineure	14	1,07	18	0,4	0,03
Camp. 10 : 07/12	Intermédiaire	13	1,91	16	0,5	0,03
Camp. 11 : 10/12	Etiage	13	1,66	16	0,4	0,04
Camp. 12 : 11/12	↗ crue	13	1,08	12	0,4	0,02
Moyenne			1,53	15	0,5	0,03

Variabilité temporelle par site	Milieu	N éch.	M_{rs}	S.C.	B_{cr}/B_c	M_{rs}/M_s
			(nAm ² /mg) $\sigma_{temp} (u_t)$	(nAm ² /mg T) $\sigma_{temp} (u_t)$	$\sigma_{temp} (u_t)$	$\sigma_{temp} (u_t)$
Saron (1)	rural (Aube)	12	0,12 (0,32)	7 (2)	0,3 (0,8)	0,02 (0,04)
Marnay (2)	Rural	11	0,35 (0,35)	13 (3)	0,2 (0,7)	0,03 (0,05)
Jaulnes (3)	Rural	10	0,22 (0,49)	9 (2)	0,5 (0,4)	0,04 (0,01)
Cannes-Ecluse (4)	transition (Yonne)	7	0,27 (0,75)	13 (10)	0,2 (0,4)	0,02 (0,04)
Saint-Mammès (5)	transition (Loing)	11	0,24 (0,27)	11 (9)	0,4 (0,2)	0,02 (0,02)
Thomery (6)	Transition	10	0,41 (0,62)	10 (15)	0,2 (0,2)	0,01 (0,02)
Draveil (7)	Transition	6	0,75 (0,30)	7 (5)	0,4 (0,4)	0,02 (0,02)
Viry-Châtillon (8)	riv. urbaine (Orge)	10	1,17 (0,28)	12 (8)	0,5 (0,4)	0,01 (0,02)
Trilbardou (11)	transition (Marne)	13	0,33 (0,40)	8 (8)	0,2 (0,4)	0,01 (0,03)
Boug. VNF (15)	agglo. parisienne	11	1,17 (0,81)	10 (5)	0,4 (0,9)	0,02 (0,03)
Boug. Pointe (16)*	agglo. parisienne	6	1,65 (0,81)	7 (5)	0,5 (0,9)	0,03 (0,03)
Pontoise (17)	sortie agglo. (Oise)	11	0,53 (0,75)	23 (11)	0,4 (0,5)	0,03 (0,01)
Andrésey (18)	sortie agglo.	11	1,18 (0,27)	18 (4)	0,3 (0,6)	0,02 (0,02)
Denouval (19)*	sortie agglo.	9	0,72 (0,27)	16 (4)	0,3 (0,6)	0,01 (0,02)
Amfreville (20)	Estuaire	7	0,48 (0,35)	9 (12)	0,3 (0,2)	0,04 (0,01)
Moyenne			0,63	12	0,3	0,02

Il est important de noter que ce tableau et son interprétation proviennent des tests statistiques effectués sur les MES prélevées en 2011-2012. Ce test s'appuie sur 5 mesures effectuées sur 13 échantillons de la Seine (voir Annexe D), le fait de ne pas observer de différence significative de M_{rs} pendant une période ou à un site donné ne signifie pas forcément que la variabilité spatiale ou temporelle n'existe pas mais que le test effectué ne permet pas de dire si cette variabilité est significative.

En effet, dans le cas de Marnay, les tests de représentativités montrent qu'à l'échelle temporelle, le M_{rs} ne varie pas significativement au cours des campagnes de 2012 ($\sigma_{temp} M_{rs} = 0,35 \text{ nAm}^2/\text{mg}$) par rapport à la partie aval de la Seine, mais lorsqu'on regarde en différents points de la section de la Seine amont, non aménagée et en contexte rural (voir Chapitre IV), les variations spatiales et temporelles qui sont du même ordre de grandeur semblent résulter de différents phénomènes (mise en suspension, perte des particules...) et non d'une erreur statistique. Toutefois, ces variations sont probablement dues à des phénomènes naturels et à un biais d'échantillonnage, et si l'étude de la section de Marnay nous a permis de comprendre comment le régime hydrologique de la Seine influence la concentration et la taille des magnétites, les magnétites des MES sont essentiellement issues des sols et formations naturelles. Les variations temporelles de la Seine à Marnay seront donc considérées comme négligeables par rapport à d'autres sites, plus impactés par les activités humaines.

On notera également que cette étude de représentativité est biaisée par un nombre inégal d'échantillon par campagne ou par site (selon l'échelle étudiée), qui varie de 5 à 15 selon les campagnes, et de 6 à 13 selon le site.

V.1.4. Résumé de la qualité d'échantillonnage et des outils magnétiques interprétables

La stratégie d'échantillonnage a dû tenir compte de la nécessité de préparer des dispositifs peu coûteux, discrets et fabriqués en nombre suffisant pour échantillonner les MES en plusieurs points et au cours de plusieurs périodes sans risquer de gêner la navigation en limitant l'impact financier dû au vandalisme. Toutefois, cette simplicité de fabrication et de mise en place des trappes est de fait associée à une capacité de piégeage plus faible que celle des autres dispositifs mis au point par Tessier (2003) ou des dispositifs d'échantillonnages plus conventionnels (Hickin, 1995). En période de montée de crue, lorsque le débit spécifique dépasse environ 11 l/s/km^2 , nos trappes à MES ne sont plus adaptées pour piéger les particules fines. Ainsi, la fiabilité des résultats des échantillons de crue dépendra des différences observées entre les échantillons correctement échantillonnés et les autres : si une diminution excessive de la concentration de magnétite s'observe dans les échantillons présentant des problèmes de collecte, on considère que cette diminution est due à un piégeage peu fiable de la charge en suspension où est concentrée l'essentiel de la magnétite.

Notre première étude de représentativité des variations spatiales et temporelles montre plusieurs résultats mais reste à améliorer afin de s'assurer de leur fiabilité. Dans l'ensemble, il semble que les particules magnétiques sont plus affectées par la position des sites le long du cours d'eau que par les variations saisonnières. Non seulement la variabilité des paramètres magnétiques est plus élevée dans l'espace que dans le temps, mais de nombreux paramètres ne semblent pas montrer de variations significatives dans le temps. Nous allons donc commencer par étudier la variation des paramètres magnétiques dans l'espace de manière générale avant de nous intéresser à des cas de contextes hydrologiques précis.

V.2. Variabilité de la fraction magnétique à l'échelle du bassin versant

Bien que le fonctionnement de la Seine varie significativement selon le contexte hydrologique, il est important d'appréhender dans un premier temps le système à l'échelle spatiale pour comprendre quelles sont les principales causes de variation de la fraction magnétique des MES. Nous allons donc dans un premier temps négliger les variations temporelles et considérer que pour chaque site, la valeur de chaque paramètre utilisé correspond à la moyenne obtenue sur les échantillons prélevés lors des différentes campagnes.

Cette approximation est probablement fautive pour certains paramètres (notamment pour le M_{rs} dans certains sites où les variations semblent significatives) et le nombre d'échantillons prélevés dans chaque site étant inégal, la précision des valeurs moyennes varie d'un site à l'autre. Une autre solution aurait été d'étudier l'évolution des paramètres lors de la seule campagne où tous les sites ont été échantillonnés, mais cette campagne (campagne n°6) correspond à une période hydrologique particulière (fin de crue en février 2012) et pourrait fausser nos interprétations sur l'évolution spatiale à l'échelle annuelle. Il en va de même pour les campagnes d'étiage qui représentent les périodes où le débit de la Seine est minime.

Les échantillons sélectionnés pour les FORCs, déconvolution de l'IRM et désaimantation thermique serviront également d'appui pour les interprétations de taille des grains et de minéralogie.

L'étude du traçage environnemental à l'échelle spatiale commence par une étude des relations entre les paramètres physico-chimiques (mesurés dans la Seine) et magnétiques afin de vérifier si les changements de conditions physico-chimiques de la Seine ont un effet sur les particules magnétiques. Les paramètres et méthodes d'analyse magnétique sont ensuite classés et étudiés selon les informations qu'elles apportent (minéralogie, granulométrie, concentration...) en mettant en relation les variations de ces paramètres avec les changements de milieux (zones urbaines, rurales, confluences) et les observations des précédentes études.

V.2.1. Influence des paramètres physico-chimiques de l'eau sur les particules magnétiques

Les paramètres physico-chimiques de l'eau (pH, conductivité, oxygène dissous et potentiel oxydo-réducteur) ont été mesurés afin de voir si les particules magnétiques sont affectées par les variations physico-chimiques. La mesure des paramètres n'a toutefois pas été systématique ce qui réduit le nombre de données pour les interprétations.

La Figure V.2 compare les propriétés magnétiques des échantillons de MES (B_{cr} , M_{rs} , S.C. et M_{rs}/M_s) aux paramètres physico-chimiques de l'eau lors des prélèvements (conductivité électrique, potentiel oxydo-réducteur, oxygène dissous, pH). Les valeurs de conductivité électrique sont comprises entre 300 et 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le pH est généralement neutre à faiblement basique (entre 6,5 et 9). Le taux d'oxygène dissous est proche de la saturation (autour de $91 \pm 22\%$ pour la majorité des échantillons mesurés). Le potentiel oxydo-réducteur est généralement proche de zéro ou positif (de -70 à $+530$ mV pour une moyenne autour de $+80$ mV) ce qui indique des conditions faiblement oxydantes dans la Seine.

Toutefois, quel que soit le paramètre physico-chimique mesuré, aucune relation ne s'observe entre les variations de ces paramètres et celles des paramètres magnétiques (R^2 compris entre 0 et 0,20). Les diagrammes de la Figure V.2 semblent donc montrer que les minéraux magnétiques (et paramagnétiques) des MES de la Seine n'illustrent pas les modifications physico-chimiques de la Seine. En effet, soit celles-ci ne sont pas suffisamment significatives pour affecter les particules magnétiques, soit elles l'affectent mais l'effet de transformation des particules est négligeable par rapport à d'autres phénomènes.

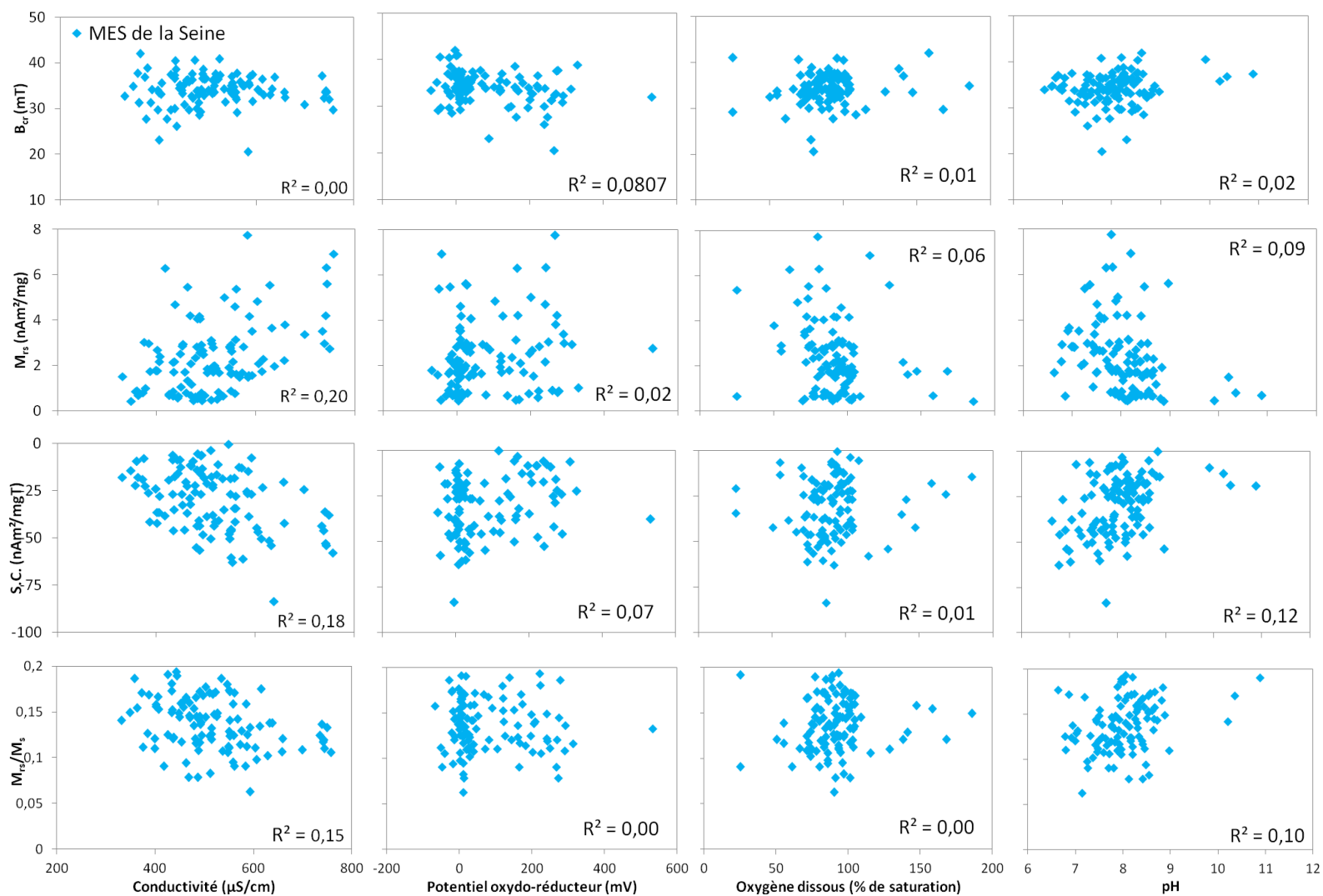


Figure V.2: Relation entre paramètres physico-chimiques (conductivité, potentiel oxydo-réducteur, saturation en oxygène dissous et pH) et paramètres magnétiques (B_{cr} , M_{rs} , S.C. et M_{rs}/M_s) dans les MES de la Seine. $N = 100$ à 115 selon les paramètres physico-chimiques (les mesures in situ ont été effectuées avec une compensation de température à 25°C).

V.2.2. Evolution des minéraux de haute coercivité dans les MES le long de la Seine

Les Figure V.3a, b, et c représentent respectivement l'évolution du S-ratio, des composantes C_3 et $Axe_{>0,3}$ dans la Seine d'amont en aval. Sur chaque profil, chaque point représente une mesure par site. Lorsqu'on sépare la Seine en trois segments et que la valeur moyenne de chaque paramètre est considérée pour chacun de ces segments de la rivière, une tendance s'observe, bien que la variabilité de ces valeurs moyennes basées sur une mesure unique par site soit relativement grande. Le premier segment (ligne pointillée verte) correspond aux échantillons de la Seine de Marnay (site 2) jusqu'à l'entrée de Paris (12), soit la Seine avant l'agglomération parisienne. Le deuxième segment (ligne rose) correspond aux échantillons prélevés de la sortie de Paris jusqu'à Bougival (sites 13 à 16), soit jusqu'à avant la confluence de l'Oise. Le dernier segment (ligne bleue) représente la Seine après la confluence de l'Oise, soient les sites d'Andrésy, Denouval et Amfreville (sites 18, 19 et 20). Les valeurs des affluents (triangles sur la Figure V.3) ne sont pas prises en compte pour l'instant car certains comme l'Orge ou l'Oise sont susceptibles de ne pas être représentatifs de l'évolution d'amont en aval de l'occupation de la Seine.

Le S-ratio (Figure V.3a) du premier segment (avant Paris) est en moyenne de 0,92. Le deuxième (de Paris à l'Oise) a un S-ratio moyen légèrement plus élevé (0,96). Le troisième (après l'Oise) a un S-ratio moyen similaire à celui du premier segment (0,92). Les S-ratios des affluents Aube, Yonne, Loing, Marne et Oise se rapprochent de la moyenne des parties de la Seine hors agglomération parisienne : de 0,89 à 0,93. Le site de l'Orge à Viry-Châtillon (site 8) a le S-ratio le plus élevé : 1,00. Le S-ratio ne détecte donc pas de fraction magnétique de coercivité supérieure à 0,3 T dans l'Orge.

La proportion de la composante C_3 (Figure V.3b), est en moyenne plus élevée dans le premier segment (11 %) que dans le 2^e segment de la Seine (7 %). A la différence du S-ratio, la proportion moyenne de la composante C_3 dans la Seine à la sortie de l'agglomération (7 %) correspond à celle du deuxième segment et non du premier, mais les valeurs des 4 points étant très variables (entre 3 et 15 %), la représentativité de la moyenne n'est probablement pas fiable. Les échantillons des affluents Aube, Yonne, Loing, Marne et Oise présentent une composante C_3 de proportion similaire à celle de la Seine avant Paris : de 8 à 13 %. La proportion de celle de l'Orge est faible (5 %), plus proche de celle de la Seine au sein de l'agglomération parisienne.

La valeur moyenne de la composante $Axe_{>0,3}$ (Figure V.3c) du deuxième segment ne peut être estimée car il n'est représenté que par l'échantillon de Bougival VNF (site 15) pour lequel cette composante participe pour 8,6 % à l'IRM totale. Les moyennes des premier et troisième segments sont proches (respectivement 9,0 et 8,6 %) mais la variabilité intra-segment (1 à 3 % selon le segment) telle qu'elle ne permet pas d'interpréter de si petites différences. Concernant les affluents, les valeurs sont similaires à la moyenne de la Seine avant l'agglomération. La proportion de la composante $Axe_{>0,3}$ est la plus élevée dans l'échantillon de l'Aube à Saron (12 %) et la plus faible dans l'Orge (8 %).

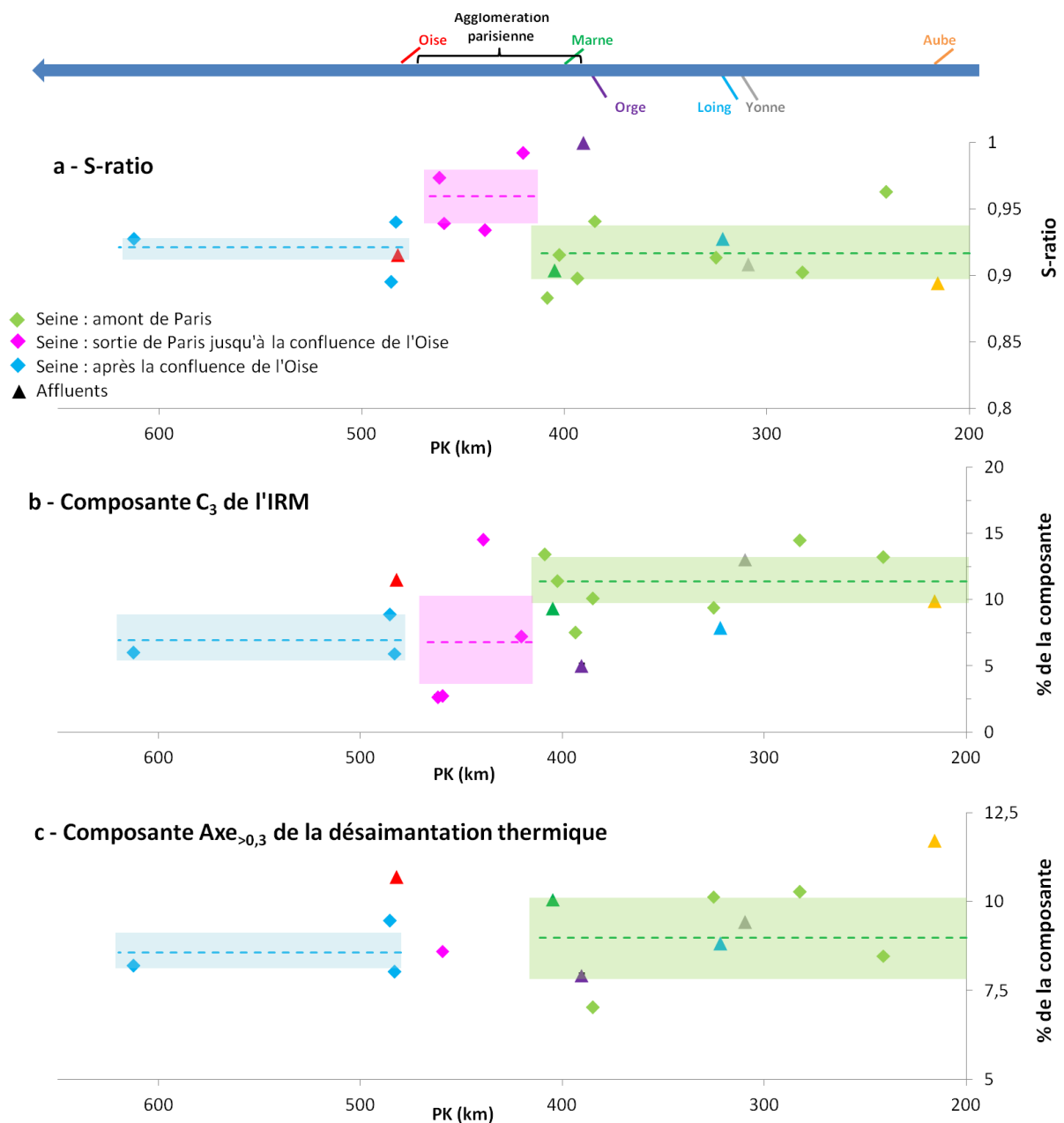


Figure V.3: Variations de la coercivité au sein de la fraction magnétique dans les MES de la Seine (mesures effectuées sur les échantillons sélectionnés). Les paramètres sont reportés pour chaque site en fonction de la distance de celui-ci à la source (a) : S-ratio. (b) : composante C_3 de l'IRM. (c) : composante $Axe_{>0,3}$ de la désaimantation thermique 3-axes. La flèche horizontale bleue en haut des figures représente la Seine dans son sens d'écoulement d'amont (droite) en aval (gauche), les affluents et l'agglomération parisienne. Les triangles correspondent aux échantillons des affluents. Les losanges verts représentent les échantillons de la Seine jusqu'à l'entrée de Paris (sites 2 à 12), les losanges roses, ceux de la Seine de la sortie de Paris à l'amont de la confluence de l'Oise et les bleus, la Seine après la confluence de l'Oise. Les droites en pointillé représentent la valeur moyenne de chaque segment de la Seine et le fond transparent, l'écart-type. Les échantillons de 2015 et de Bougival Pointe ne sont pas inclus dans la figure (c) car la désaimantation thermique n'a pas été effectuée sur ces échantillons. Les points représentent des mesures uniques pour chaque site.

La variabilité spatiale de la fraction minérale de haute coercivité ne semble donc, dans l'ensemble, pas suffisante pour permettre des interprétations fiables. Les S-ratios et les composantes C_3 de l'IRM semblent toutefois montrer une distinction entre 1) les échantillons de la Seine et des affluents à l'entrée de Paris et 2) ceux de la rivière urbaine de l'Orge et de la sortie de Paris jusqu'à l'Oise. Ces derniers ont en général une proportion de minéraux de basse coercivité (magnétite) plus élevée. En d'autres termes, les MES de la Seine et de l'Orge qui traversent les milieux qui sont susceptibles d'être les plus affectés par l'urbanisation et l'industrie (Thévenot *et al.*, 2009; Le Pape, 2012) possèdent une minéralogie magnétique plus homogène dans laquelle les minéraux de basse coercivité dominent. A la sortie de l'agglomération (après l'Oise) : les paramètres minéralogiques ne permettent pas de déterminer si la pression de l'agglomération diminue et si la proportion de magnétite dans la fraction magnétique diminue également.

En général, la magnétite est le minéral obtenu et émis par l'industrie lors de la combustion (Chaddha & Seehra, 1983; Jordanova *et al.*, 2004) et la fraction magnétique des milieux impactés par l'émission de combustibles industriels est souvent enrichie en magnétite (Strzyszczyk *et al.*, 1996; Dong *et al.*, 2014a). Il est donc possible que ce soit également le cas des MES de la Seine, dont la fraction magnétique naturelle, (qui comporte alors la magnétite et probablement l'hématite et la goethite) est masquée par les apports industriels (qui sont enrichis en magnétite) lorsqu'elle traverse les milieux fortement urbanisés.

Dans l'ensemble, les outils de caractérisation minéralogique permettent d'observer des tendances associées aux pressions urbaines et industrielles, mais ces tendances sont bruitées. De plus, les trois segments ne correspondent pas aux limites de l'agglomération parisienne qui, en amont, commence avant la confluence de la Marne (Bastie, 1959) : les 3 derniers points du premier segment (sites de Villeneuve, Alfortville et Paris) font partie de l'agglomération parisienne (Figure V.3) et montrent une signature généralement plus proche de celle de la Seine en amont de l'agglomération. De ce fait, la qualité des résultats portés sur la caractérisation des variations de minéralogie magnétiques dans le bassin de la Seine reste difficile.

V.2.3. Evolution de la taille des magnétites le long de la Seine

Les paramètres d'hystérésis mesurés sur la totalité des échantillons de 2011-2012 et sur les échantillons complémentaires prélevés en 2015 sont projetés sur les diagrammes de Day/Dunlop (Figure V.4a, b et c). Comme expliqué dans le Chapitre III, les magnétites de la Seine se situent entre les pôles pseudo-mono-domaines (PSD) et légèrement au-delà de la limite théorique des multi-domaines (MD). La Figure V.4d présente plusieurs diagrammes de FORC obtenus sur les échantillons de MES sélectionnés. Ces échantillons ont été choisis à partir de leurs paramètres d'hystérésis : ce sont ainsi les échantillons dont l'emplacement sur les diagrammes de Day sont les plus proches de la taille moyenne des magnétites des MES de chaque site (Figure V.4c). Les FORCs ayant été traités avec le même "smoothing factor" ($SF = 4$), la netteté des diagrammes est ainsi fonction de la concentration en magnétites, qui sera étudiée dans la sous-partie suivante.

Bien que pour un échantillon de MES donné, la taille moyenne des magnétites varie dans le temps, nous avons vu dans la partie V.1.3 que ces variations ne sont pas significatives par rapport aux incertitudes de mesure. Les diagrammes de Day des moyennes de chaque site (Figure V.4c) et les FORCs (Figure V.4d) permettent de séparer les échantillons de la Seine et ses affluents dans les différentes catégories décrites dans le Chapitre III :

- Les magnétites des MES prélevées dans l'Aube à Saron (site 1), l'Yonne à Cannes-Ecluse (4), le Loing à Saint-Mammès (5), la Marne à Trilbardou (11) et la Seine à Marnay (2), Jaulnes (3) et Thomery (6), correspondent à la classe « PSD fin ». Elles correspondent à des particules (de taille homogène) pseudo-mono-domaines significativement plus fines que dans le reste de la Seine.
- Les magnétites des MES de la Seine à Draveil (site 7), Andrésy (18), Denouval (19) et Amfreville (20) et dans l'Oise à Pontoise (17) correspondent à la classe « PSD ».
- Les magnétites des MES de l'Orge à Viry-Châtillon (site 8) et de la Seine à Bougival (15 et 16) font partie de la classe PSD « grossier ». Leur position dans le diagramme théorique de Day les situe autour de la limite PSD/MD selon les échantillons mais les diagrammes de FORCs montrent qu'en moyenne, les magnétites de ces trois sites sont encore PSD, bien que plus grossières que les magnétites présentes dans les autres sites. Les échantillons de 2015 (sites 9, 10, 12, 13 et 14) n'ayant été prélevés que lors d'une campagne et n'ayant pas donné de FORCs interprétables, ils ne peuvent pas être classés avec autant de précision que les échantillons de 2011-2012, mais la position de ces échantillons sur le diagramme de Day (cercles rouges sur la Figure V.4c) suggère qu'ils font également partie de la classe des PSD grossiers.

Un contraste granulométrique s'observe donc entre les magnétites des MES de la partie amont de la Seine (de Marnay à Thomery inclus), celles des MES prélevées à l'approche et à la sortie de l'agglomération parisienne, et celles prélevées dans l'agglomération. La partie amont de la Seine, ainsi que l'Aube, l'Yonne, le Loing et la Marne, ont comme point commun de drainer des milieux majoritairement ruraux et semi-naturels (voir Chapitre I). Les FORCs de ces milieux ne montrant pas d'hétérogénéité granulométrique significative, nous pouvons considérer que les activités agricoles ne sont pas sources de magnétites ou qu'elles n'apportent pas des magnétites différentes des magnétites d'origine naturelle.

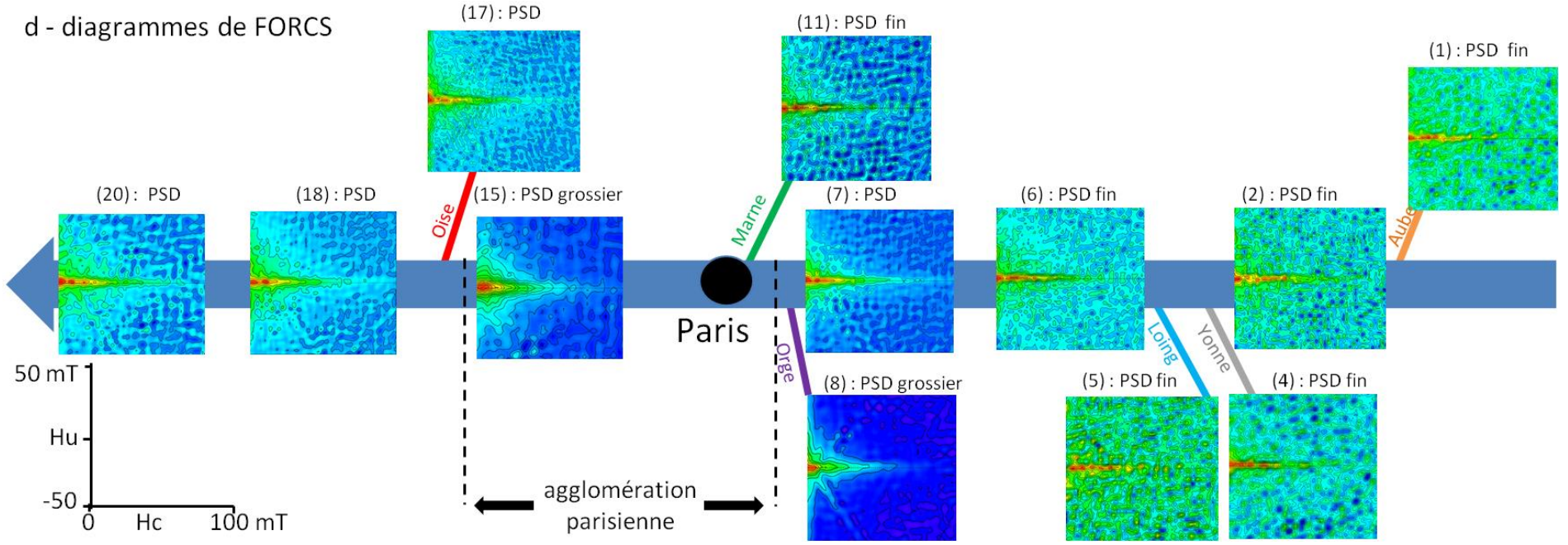
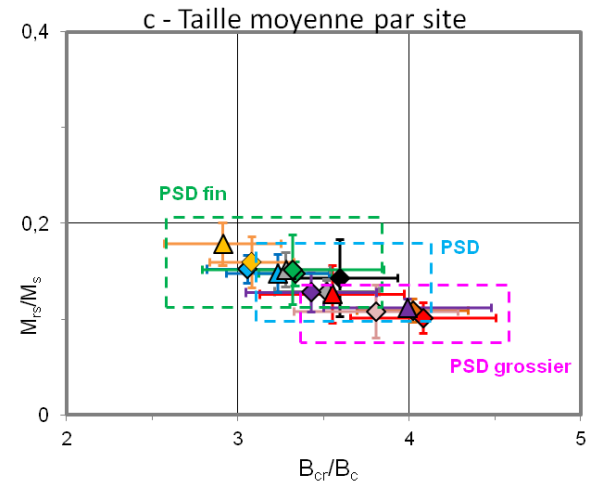
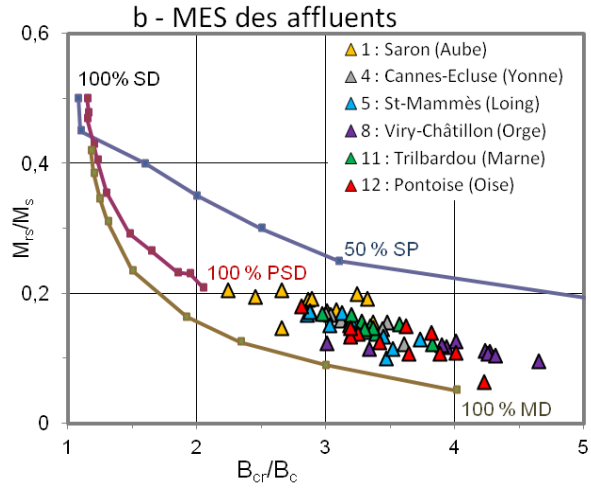
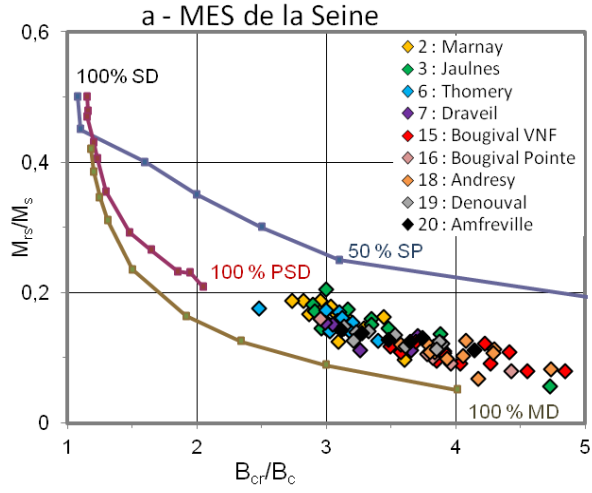
Nous pouvons noter que, parmi ces sites de la Seine amont et sur les affluents, la navigation et les aménagements du cours d'eau sont significativement moins importants sur l'Aube, le Loing (où elle se fait essentiellement via le canal) et la Seine à Marnay que dans les autres sites. Ce contraste entre zones navigables/aménagées et zones naturelles ne se retrouve pas dans les variations de taille des magnétites. Cela signifie probablement que la navigation et les aménagements sur la Seine ne sont pas des sources de magnétites différentes (du moins en termes de taille) de celles que transporte la Seine dans des conditions naturelles. Cela peut s'expliquer par le fait que si ces différentes activités affectent significativement les mécanismes hydrodynamiques du cours d'eau, le matériel transporté (et donc les particules magnétiques) ne diffère pas en termes de taille.

Au sein de l'agglomération parisienne dans la partie aval de la confluence avec la petite rivière très urbanisée de l'Orge, les magnétites transportées sont de taille significativement plus élevée que dans la partie amont. Plusieurs études ayant montré que les rivières urbaines, dont l'Orge, ainsi que l'agglomération parisienne présentent des enrichissements en contaminants métalliques, dont le fer (notamment Thévenot *et al.*, 2009; Carré *et al.*, 2011; Le Pape, 2012; Chen *et al.*, 2014), il est possible que cette augmentation de taille des magnétites dans les milieux fortement urbanisés et industrialisés témoigne de nouveaux apports de magnétites. Celles-ci sont plus grossières en milieu urbain et masquent la contribution des magnétites rurales et naturelles plus fines, soit parce que les particules d'origine urbaine sont proportionnellement beaucoup plus importantes, soit parce que les magnétites d'origine rurale et naturelle ont été bloquées par les ouvrages avant l'arrivée dans l'agglomération parisienne ce qui semble difficile car du fait de leur faible taille, ce sont des particules qui sont transportées quel que soit le débit.

A l'amont et à l'aval de l'agglomération parisienne (à l'entrée à Draveil et à la sortie d'Andrésy à Amfreville) les magnétites montrent des tailles intermédiaires entre les magnétites naturelles/rurales et les magnétites urbaines. Si l'hypothèse de l'origine des magnétites de tailles grossières est correcte, les milieux de transition devraient intégrer un mélange des deux sources. Or les FORCs ne montrent pas de mélanges. Ceci peut être dû au fait que les FORCs ne permettent pas de distinguer les mélanges de PSD fins et PSD grossiers, les spectres étant trop proches (en comparaison des spectres SD et MD) pour être distingués dans un même diagramme.

Une autre explication serait que les magnétites d'origine anthropique qui arrivent dans la Seine sont trop grosses donc trop lourdes pour être maintenues en suspension à 0,5-2 m de profondeur (notamment en régime de basses eaux) et se déposent rapidement lorsqu'elles arrivent dans le cours de la Seine et que chaque site intègre des sources plus ou moins locales et non un mélange. Cette dernière hypothèse est cohérente avec la perte de contribution de magnétites grossières en aval de l'Oise. Pour la transition entre l'amont de la Seine et l'agglomération parisienne, les interprétations sont plus compliquées en raison du biais d'échantillonnage de la charge de ruissellement. A Marnay, la taille des magnétites de la charge de ruissellement ne varie pas significativement par rapport à celle de la charge en suspension, ce qui n'affecte donc en théorie pas la distribution granulométrique des magnétites échantillonnées mais les conditions hydrodynamiques et les vitesses de transport sont peut-être différentes dans les autres sites.

Figure V.4 (page suivante): Evolution de la taille des magnétites des MES de la Seine. Projection sur le diagramme de Day des échantillons de 2011-2012 de (a) : la Seine, (b) : les affluents et (c) : moyenne par site (échelle zoomée). Les courbes théoriques de mélanges SD, PSD et MD de Dunlop & Carter-Stiglitz (2006). Les échantillons complémentaires prélevés sont représentés avec les ronds en 2015 sur la Figure (c). (d) Evolution d'amont (droite) en aval (gauche) de la distribution granulométrique des magnétiques d'après les diagrammes de FORCs effectués sur les échantillons sélectionnés (traités avec un « smoothing factor » de 4). La flèche bleue représente la Seine dans le sens d'écoulement. L'ensemble des diagrammes de Day et FORCs des échantillons de MES sont présentés dans l'Annexe E.



Pour résumer, le changement de taille des magnétites le long de la Seine n'est pas progressif : il se fait par « étapes » d'amont en aval. Les MES prélevées en zones rurales contiennent des magnétites PSD fines, celles prélevées dans des milieux partiellement urbanisés montrent des magnétites un peu plus grossières et celles des milieux fortement urbanisés et industrialisés présentent les plus grosses magnétites. Les zones de transition sont encore incompréhensibles : elles semblent marquer une contribution progressive à l'entrée et régressive à la sortie de l'agglomération parisienne mais ne semblent pas correspondre à des mélanges rural/urbain.

Concernant la taille exacte des magnétites, les diagrammes de Day ne permettent pas une caractérisation granulométrique précise, car l'état des domaines magnétique est contrôlé par plusieurs paramètres comme la forme et le rapport longueur/largeur des particules (voir Chapitre III). Toutefois, dans l'ensemble, les magnétites les plus grossières observées dépassent rarement la limite multi-domaines. Les magnétites issues des activités industrielles et des rejets urbains qui se déposent à proximité des sources qui ont généralement des tailles comprises entre 1 et $50\mu\text{m}$ sont souvent en moyenne plus grossières que les particules d'origine naturelle (Strzyszcz *et al.*, 1996; Lecoanet *et al.*, 2001; Meena *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012). Les paramètres d'hystérésis et les FORCs des échantillons de la Seine semblent illustrer l'impact local de l'agglomération parisienne sur le bassin de la Seine.

V.2.4. Evolution de la concentration des magnétites le long de la Seine

Les diagrammes de Day et les diagrammes de FORCs ont permis de différencier les magnétites présentes dans les différents milieux que traverse la Seine. Nous allons maintenant nous intéresser à l'évolution générale de la concentration de ces magnétites dans les MES (à partir du paramètre M_{rs}) le long de la Seine.

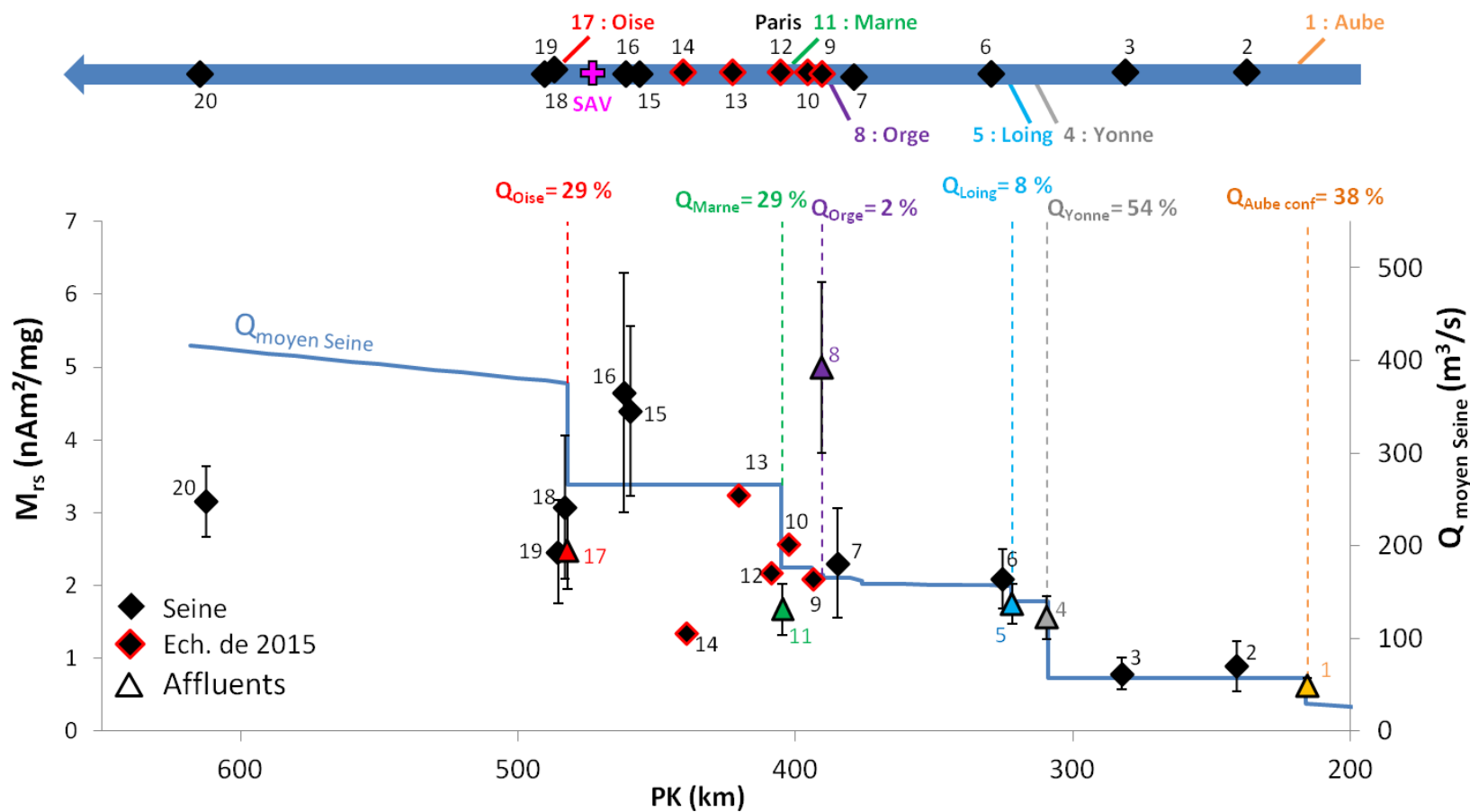
Les Figure V.5 et V.6 représentent les valeurs moyennes de M_{rs} et M_s mesurées dans la Seine d'amont (droite) en aval (gauche) et de ses affluents. Les incertitudes analytiques du M_{rs} et du M_s de chaque site ne sont pas prises en compte (voir Tableau V.3) et les barres verticales de la figure correspondent aux σ_{temp} du M_{rs} et du M_s de chaque site (voir Tableau V.3). Afin de comprendre comment la Seine intègre les différentes sources de magnétites, le profil de débit moyen annuel (obtenu grâce aux modèles décrits dans les Annexes A et B) est également projeté sur chaque figure. Les deux profils d'aimantation montrent des tendances très similaires, ce qui nous permet de considérer que l'effet de taille des particules n'affecte pas significativement le M_{rs} et d'utiliser celui-ci comme indice de concentration.

La contribution moyenne annuelle (en débit) de chaque affluent étudié nous permet également de comparer les M_{rs} des sources amont (Seine et affluent avant la confluence) au M_{rs} en aval de la confluence afin d'estimer si la concentration de magnétite en aval est en accord avec les concentrations et les débits des affluents en amont. On considère dans un premier temps que la concentration en MES est similaire dans le temps dans la Seine et ses affluents majeurs (Estèbe, 1996; Vilmin, 2014). On a ainsi deux cas possibles :

- M_{rs} en aval d'une confluence est cohérent avec les M_{rs} et la contribution hydrologique relative des différentes sources : on observe un effet de mélange (Aube+Seine, Yonne+Loing+Seine...).
- M_{rs} en aval ne s'obtient pas en intégrant les M_{rs} et les débits de la Seine et de l'affluent : un autre phénomène affecte probablement le M_{rs} en aval. Ayant exclu l'hypothèse des variations de conditions physico-chimiques de la Seine, pouvant entraîner une transformation minéralogique et faire varier le M_{rs} , l'hypothèse la plus probable dans cette situation est qu'une autre source contribue physiquement au M_{rs} aval.

La Figure V.5 montre, de même que le Tableau V.3, que la variabilité temporelle (σ_{temp}) des échantillons est fortement contrastée entre la partie amont et la partie aval. Les sites de la Seine jusqu'à Thomery (6) ainsi que l'Aube, l'Yonne, présentent des concentrations plus stables dans le temps que les échantillons de l'Orge, de l'Oise et de tous les échantillons de la Seine de Draveil (7) à Amfreville (20) qui ont été prélevés pendant plusieurs périodes. Dans la mesure où les échantillons présentant une plus grande variabilité représentent les sites susceptibles d'être significativement affectés par l'urbanisation, cette figure offre une première réponse à la question de l'impact de la contribution anthropique à l'échelle temporelle. La Figure V.5 ne permet toutefois pas de dire si les variations vont dans le même sens dans l'ensemble de ces sites et si elles correspondent à des contextes hydrologiques particuliers. Cette différence de variabilité temporelle le long de la Seine est discutée dans la partie V.4 de ce chapitre.

Au premier ordre, la Figure V.5 laisse penser à une augmentation par paliers d'amont en aval de la concentration de magnétites dans les MES jusqu'à la sortie de l'agglomération parisienne où la concentration diminue. Cette tendance a déjà été décrite dans le Chapitre I au sujet de l'évolution spatiale des ETM (antimoine, zinc et indice de pollution métallique) et du calcium (la tendance est inversée pour ce dernier) dans les MES de la Seine. Les exemples présentés dans le Chapitre I et dans la Figure V.5 illustrent de manière similaire l'impact de l'Homme sur les MES de la Seine. Afin de comprendre les origines des variations de concentration de magnétite dans les MES, les résultats et interprétations de la Figure V.5 sont décrits plus en détail, d'amont en aval, par sections et transitions caractéristiques dans les sous-parties suivantes.



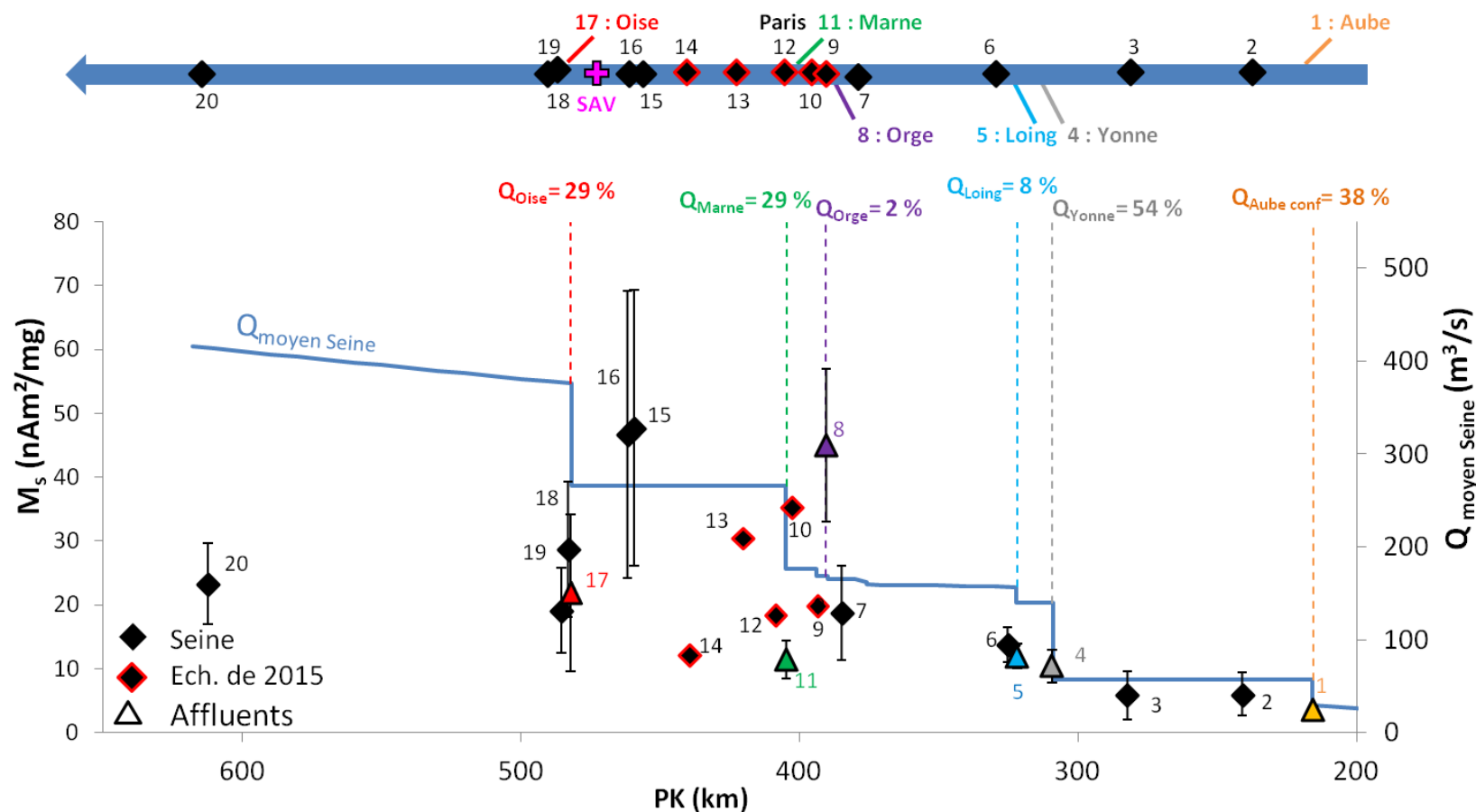


Figure V.6: Evolution générale d'amont en aval (de droite à gauche) l'aimantation à saturation (M_s) dans les MES de la Seine (losanges noirs) et les affluents étudiés (triangles colorés). Les barres verticales représentent l'écart-type σ_{temps} de chaque site. Le débit moyen de la Seine d'amont en aval sur les années 2011 et 2012 est représenté par la courbe bleue. La contribution moyenne annuelle des affluents aux confluences est indiquée en %. La flèche horizontale représente la Seine dans son sens d'écoulement, les affluents et les différents sites d'échantillonnage. La position de la station Seine Aval (SAV) est représentée par une croix rose.

V.2.4.a. L'Aube et la Seine dans la Bassée (sites 1 à 3) : milieu rural et réseau hydrographique peu aménagé

D'amont en aval (de droite à gauche), les premières valeurs de M_{rs} représentent les MES de l'Aube à Saron (site 1) et de la Seine à Marnay et à Jaulnes (sites 2 et 3). Les M_{rs} sont respectivement de $0,62 \pm 0,12$ (1), $0,89 \pm 0,35$ (2) et $0,79 \pm 0,22$ nAm²/mg (3). Même en négligeant l'incertitude de mesure u_t (voir Tableau V.3), nous ne pouvons pas confirmer que les variations de concentrations entre les trois sites soient significatives.

Dans cette partie de la Seine (de la confluence de l'Aube et celle de l'Yonne), le cours d'eau est relativement peu aménagé et draine essentiellement des formations carbonatées et des sols naturels et agricoles. La seule ville de plus de 50 000 habitants, Troyes, est située dans le bassin versant de la Seine en amont de la confluence de l'Aube (Meybeck, 1998). Les MES de cette partie amont de la Seine sont donc caractérisées par des M_{rs} compris entre 0,50 et 1,3 nAm²/mg (ce qui est du même ordre de grandeur que les valeurs de la section de Marnay, Chapitre IV), illustrant des magnétites provenant essentiellement des formations géologiques et des sols naturels et agricoles.

V.2.4.b. La Seine après les confluences de l'Yonne et du Loing (sites 4 à 6) : sortie de milieu rural et augmentation des aménagements et navigation du réseau hydrographique

Les MES de l'Yonne à Cannes-Ecluse (4) et du Loing à Saint-Mammès (5) possèdent des valeurs de M_{rs} similaires (respectivement $1,6 \pm 0,3$ et $1,7 \pm 0,3$ nAm²/mg) et plus élevées que les MES de l'amont de la Seine. Les bassins versants de l'Yonne et du Loing ne comportent pas d'agglomération comparable à celle de Troyes dans la partie amont de la Seine et sont principalement occupés par des sols agricoles et naturels. Les M_{rs} de l'Yonne étant similaires à ceux du Loing, les formations cristallines du Morvan drainées dans la partie amont de l'Yonne, les nombreux aménagements du cours d'eau, la navigation et la différence de charge sédimentaire ne semblent pas, au final, contribuer à une différenciation significative de la concentration de magnétites de l'Yonne de celle du Loing.

Le M_{rs} de la Seine à Thomery (6), en aval des deux confluences est en moyenne égal, voir supérieur à ceux des deux affluents ($2,1 \pm 0,4$ nAm²/mg). L'Yonne et le Loing qui ont des signatures magnétiques égales contribuent en moyenne à 62 % du débit de la Seine à la confluence. Quelle que soit la différence de charge particulière entre la Seine et les affluents, si les magnétites des MES de la Seine au point 6 résultent d'un simple mélange entre celles de la Seine et de ses affluents, son M_{rs} moyen devrait se situer entre les valeurs de M_{rs} des points 3, 4 et 5. Or le M_{rs} aval semble au mieux égal mais en moyenne plus élevé que ceux des sources amont ce qui traduit un enrichissement en magnétites dans les MES de la Seine dans le site 6 par rapport au site 3.

Entre la Seine à Jaulnes (3) et la confluence de l'Yonne se trouve la zone industrielle de Montereau-Fault-Yonne. La zone industrielle contient notamment une aciérie électrique

responsable d'émission de métaux dans l'air, comme l'arsenic, le nickel et le plomb (source : rapport AIRPARIF, 2008). L'émission de particules ferrugineuses par cette industrie est donc probable et pourrait expliquer l'enrichissement en magnétites des MES de Thomery et potentiellement dans les MES de l'Yonne et du Loing à l'approche des confluences. Cette hypothèse s'appuie également sur le fait que les trois sites possèdent des concentrations de magnétites statistiquement identiques malgré des différences de charge sédimentaire et d'aménagements.

Nous pouvons noter dans cette partie de la Seine une différence de tendances entre la concentration et la taille des magnétites (voir partie V.2.3). Les diagrammes de Day et les FORCs n'ont pas montré de variations granulométriques significatives entre les sites 1 à 6, tandis que le M_{rs} permet de différencier plusieurs environnements.

Dans la Seine au niveau des confluences de l'Yonne et du Loing, une seule source, d'origine industrielle, expliquerait l'augmentation de concentration dans les MES. On peut donc supposer que dans cette partie majoritairement rurale de la Seine, les quelques activités industrielles suffisent à enrichir les MES en magnétites de la Seine, mais ces magnétites ne sont pas significativement plus grossières ou du moins pas assez pour se "distinguer" dans le mélange.

La transition entre la Seine en amont et en aval de l'Yonne et du Loing nécessitera donc une étude plus ciblée entre Jaulnes et Thomery, et dans la partie amont de l'Yonne et du Loing pour être correctement comprise.

V.2.4.c. La Seine de l'entrée à la sortie de l'agglomération parisienne (sites 7 à 16)

De Thomery à Draveil (site 7), la Seine traverse une zone de forte agglomération (autour de Melun) et reçoit les apports de la rivière urbaine de l'Essonne qui contribue à environ 5 % du débit à la confluence. La concentration des magnétites augmente légèrement en moyenne dans les MES de la Seine à Draveil ($M_{rs} = 2,3 \pm 0,8$ nAm²/mg selon la période d'échantillonnage) par rapport à Thomery. C'est notamment à partir de Draveil que la variabilité temporelle augmente significativement (d'un facteur 2 par rapport au site 6).

Le M_{rs} des MES de l'affluent de l'Orge à Viry-Châtillon (8) est en moyenne deux fois plus élevé qu'à Draveil ($M_{rs} = 5,0 \pm 1,2$ nAm²/mg dans l'Orge). Cependant, les fortes concentrations de l'Orge ne se retrouvent pas dans les sites en aval de la confluence (sites 9 et 10), dont les M_{rs} sont respectivement 2,1 et 2,6 nAm²/mg). Les MES de ces sites échantillonnés en 2015 n'ont pas des M_{rs} significativement différents par rapport aux valeurs des MES de la Seine à Draveil (avant l'Orge). Ceci signifie que la source de magnétites enrichissant les MES de l'Orge n'affecte pas directement les MES de la Seine car l'Orge ne contribue qu'à 2 % du débit de la Seine à la confluence. Son signal se trouve ainsi dilué dans celui de la Seine.

Le M_{rs} moyen de la Marne à Trilbardou (11) est comparable à ceux de l'Yonne et du Loing ($M_{rs} = 1,7 \pm 0,4$ nAm²/mg dans la Marne). Ceci est probablement lié au fait que l'occupation

du bassin versant de la Marne est relativement similaire à celles des bassins versants des deux affluents : les berges de la Marne sont aménagées pour la navigation et le cours d'eau traverse essentiellement des milieux agricoles et naturels. Les quelques agglomérations en amont de Trilbardou (notamment celles de Reims et de Meaux) ne semblent pas significativement affecter la concentration de magnétites.

Les sites 12, 13 et 14 de la Seine correspondent aux MES prélevés en mars 2015 à l'entrée de Paris, à Issy-les-Moulineaux et à L'Île-Saint-Denis. L'incertitude des M_{rs} de ces sites n'a pas été calculée en raison de la faible quantité de matériel et la variabilité temporelle n'est donc pas connue en raison de l'échantillonnage unique. Le M_{rs} à l'entrée de Paris (au niveau de la Bibliothèque François Mitterrand) est d'environ 2,2 nAm²/mg, ce qui est comparable aux M_{rs} des MES de la Seine avant les confluences de l'Orge et de la Marne (2,1 à 2,6 nAm²/mg). La Marne, qui apporte des MES moins concentrées en magnétites, contribue à moins d'un tiers du débit de la Seine à la confluence (29 %). En tenant compte de la variabilité temporelle des échantillons de la Marne, le M_{rs} des MES de Paris est en accord avec ceux de la Seine et de la Marne et peut tout à fait correspondre au mélange des deux sources.

A la sortie de Paris (13), la concentration en magnétites des MES semble augmenter ($M_{rs} = 3,2$ nAm²/mg) bien qu'encore une fois l'unicité de la mesure ne permette pas d'établir le degré de signification du chiffre obtenu. Le M_{rs} de la Seine diminue dans le site 14 (1,3 nAm²/mg). La raison de cette diminution n'est pas comprise, l'échantillonnage unique ne permettant pas de confirmer si ces concentrations et le site sont représentatifs. De plus, les MES de la Seine à Bougival (sites 15 et 16), échantillonnés durant plusieurs campagnes montrent des concentrations plus élevées ($M_{rs} = 4,4 \pm 1,2$ pour le site 15, et $4,7 \pm 1,7$ nAm²/mg pour le site 16). En excluant le site 14, les échantillons prélevés de l'entrée de Paris à Bougival montrent une augmentation progressive de la concentration de magnétites dans les MES de la Seine au cours de la traversée de Paris.

De l'entrée à la sortie de Paris, les indices de concentration et de taille des magnétites montrent généralement des résultats similaires : les sites présentant les magnétites les plus grossières sont également ceux où elles sont les plus concentrées. Ces sites correspondent l'Orge avant sa confluence avec la Seine et la Seine à la sortie de l'agglomération et l'industrie parisiennes, soient des milieux connus comme étant sources de plusieurs éléments métalliques (Tessier, 2003; Priadi, 2010; Le Pape, 2012; Ayrault *et al.*, 2014). L'augmentation de la teneur en fer total et d'oxydes de fer a déjà été observée dans les MES de Bougival (Tessier, 2003) et la proportion de fer total présent dans les oxydes passe d'environ 15 % à Marnay-sur-Seine à 42 % à Bougival (Priadi *et al.*, 2011). Cette augmentation d'oxydes de fer dans les MES est associée d'après les auteurs à la pression anthropique. Ceci expliquerait l'augmentation du M_{rs} à Bougival. Les valeurs de M_{rs} sont de ce fait en accord avec l'état des connaissances acquises sur la concentration en fer et ETM dans la Seine.

V.2.4.d. La Seine de la sortie de l'agglomération parisienne jusqu'à la limite estuarienne (sites 17 à 20)

Les MES de l'Oise à Pontoise (site 17) ont une concentration moyenne en magnétites ($2,5 \pm 0,6 \text{ nAm}^2/\text{mg}$) plus élevée que celles de l'Aube, l'Yonne, le Loing et la Marne (inférieure à $2,0 \text{ nAm}^2/\text{mg}$ pour chacun). Une différence était également observée dans la taille moyenne de magnétites, plus grossières dans l'Oise que dans les autres affluents majeurs de la partie amont de la Seine. Si l'on attribue l'augmentation de concentration et de taille des magnétites aux contributions urbaines, les deux résultats s'accordent pour montrer un impact anthropique plus important dans les MES de Pontoise, la ville étant encore à proximité de l'agglomération parisienne et en aval de l'agglomération de Creil.

Les MES de la Seine après la confluence de l'Oise ont été échantillonnées sur les deux bras de la Seine à Andrésy (site 18), côté Seine et le quartier de Denouval (19), côté Oise. Les M_{rs} sont respectivement de $3,1 \pm 1,0$ et $2,5 \pm 0,7 \text{ nAm}^2/\text{mg}$. Les concentrations moyennes de magnétites des deux sites semblent donc similaires dans les deux bras de la Seine, et sont par ailleurs similaires à celles des MES de Pontoise. Elles sont en moyenne en revanche significativement plus faibles que dans les MES de Bougival.

L'Oise représente moins d'un tiers du débit de la Seine à la confluence (29 %), a une concentration en MES comparable à celle de la Seine (Estèbe, 1996; Roy *et al.*, 1999; Vilmin, 2014) et une aimantation moyenne presque deux fois plus faible que celles des MES de Bougival. En théorie, un simple effet de mélange donnerait à Andrésy et Denouval des M_{rs} moyens de :

$$Q_{\text{Oise}} \% * M_{rs} \text{ Pontoise} + Q_{\text{Seine}} \% * M_{rs} \text{ Bougival} \approx 29 \% * 2,47 + 71 \% * 4,50 \approx 3,91 \text{ nAm}^2/\text{mg}$$

Les concentrations de magnétites des MES d'Andrésy et Denouval sont, en moyenne dans le temps, significativement plus faibles que ce que donnerait ce calcul de mélange Seine + Oise. La concentration moyenne des magnétites des MES d'Andrésy et Denouval ne semble donc pas correspondre à un simple effet de mélange entre les MES de la Seine et de l'Oise et il est probable qu'un autre phénomène contribue à la dilution des magnétites.

Une source potentielle est la station d'épuration Seine Aval (SAV). Si son impact sur la fraction métallique dans la Seine a déjà été observé (Thévenot *et al.*, 2009), il semble diminuer en raison de l'amélioration des méthodes d'assainissement (Priadi, 2010). Concernant le fer dans les MES de Bougival et de Triel (quelques kilomètres en aval d'Andrésy), des analyses chimiques par spectroscope ICP-QMS n'ont pas montré de variations significatives de concentrations en fer total entre les deux sites (entre 2,4 et 3,1% dans les deux sites), et les extractions séquentielles n'ont pas montré de variations significatives de fer présent dans les oxydes (Priadi, 2010). La Figure V.5 correspond à un schéma différent indiquant, que la station SAV rejette potentiellement une eau significativement moins concentrée en magnétite que l'eau de la Seine.

Le dernier site de la Seine (site 20), Amfreville, situé quelques kilomètres en amont de l'agglomération de Poses, présente un M_{rs} moyen de $3,2 \pm 0,5 \text{ nAm}^2/\text{mg}$. La moyenne a légèrement augmenté par rapport aux sites 18 et 19 ($3,1$ et $2,5 \text{ nAm}^2/\text{mg}$). Plus de 120 km

séparent Amfreville des deux autres sites avec entre les deux, la traversée d'une nouvelle zone urbanisée et industrialisée autour de Mantes/Limay et le drainage dans le Nord du Bassin d'une autre zone d'agglomération autour de Beauvais. Ces deux nouvelles agglomérations peuvent expliquer le maintien et la légère augmentation de la concentration de magnétites dans les MES malgré une capacité de dilution de la rivière plus élevée qu'à Andrésy.

V.2.5. Evolution de la proportion de minéraux paramagnétiques le long de la Seine

Les valeurs moyennes de susceptibilités en champ fort (ou -S.C.) mesurées dans la Seine et dans ses affluents sont reportées sur la Figure V.7, d'amont (à droite) en aval (à gauche). Dans un premier temps et sans tenir compte de la variabilité temporelle, la valeur absolue de la S.C. des MES de la Seine tend à augmenter par paliers d'amont en aval ce qui semble indiquer une augmentation progressive dans ce sens de la proportion de minéraux paramagnétiques dans les MES de la Seine.

Les valeurs sont toutefois fortement variables dans le temps pour chaque site ($\sigma_{S.C.}$ entre ± 7 et ± 24 nAm²/mg T pour des moyennes allant de 15 à 50 nAm²/mg T) et la variabilité n'est pas proportionnelle à l'aimantation (voir Annexe D), ce qui pose la question de la signification des valeurs moyennes.

Dans l'ensemble, en ne prenant en compte que les valeurs moyennes, la -S.C. et le M_{rs} montrent des tendances similaires dans les MES de la Seine (voir Figure V.5) : une augmentation de concentration en magnétites et minéraux paramagnétiques (potentiellement des argiles contenant du fer ou certains sulfures de fer comme la pyrite) à partir de la confluence de l'Yonne, des concentrations stables et une augmentation à la sortie de l'agglomération parisienne et dans l'Orge.

Une différence s'observe cependant au niveau des échantillons de 2015 où les mesures uniques montrent des valeurs de -S.C. très faibles (inférieures à 20 nAm²/mg T). Etant donné la forte variabilité temporelle des valeurs de -S.C., la représentativité des échantillons de 2015 est encore plus à remettre en question que pour le M_{rs} .

Une autre différence s'observe au niveau des sites d'Andrésy et de Denouval : les deux sites ne présentent pas de S.C. moyennes significativement différentes par rapport aux valeurs de la Seine à Bougival, de l'Oise et de leur contribution respective à la confluence.

De manière générale, il est difficile de dire si la proportion de minéraux paramagnétiques augmente réellement d'amont en aval et si cette augmentation est progressive ou se fait par étapes en raison de la forte variabilité temporelle.

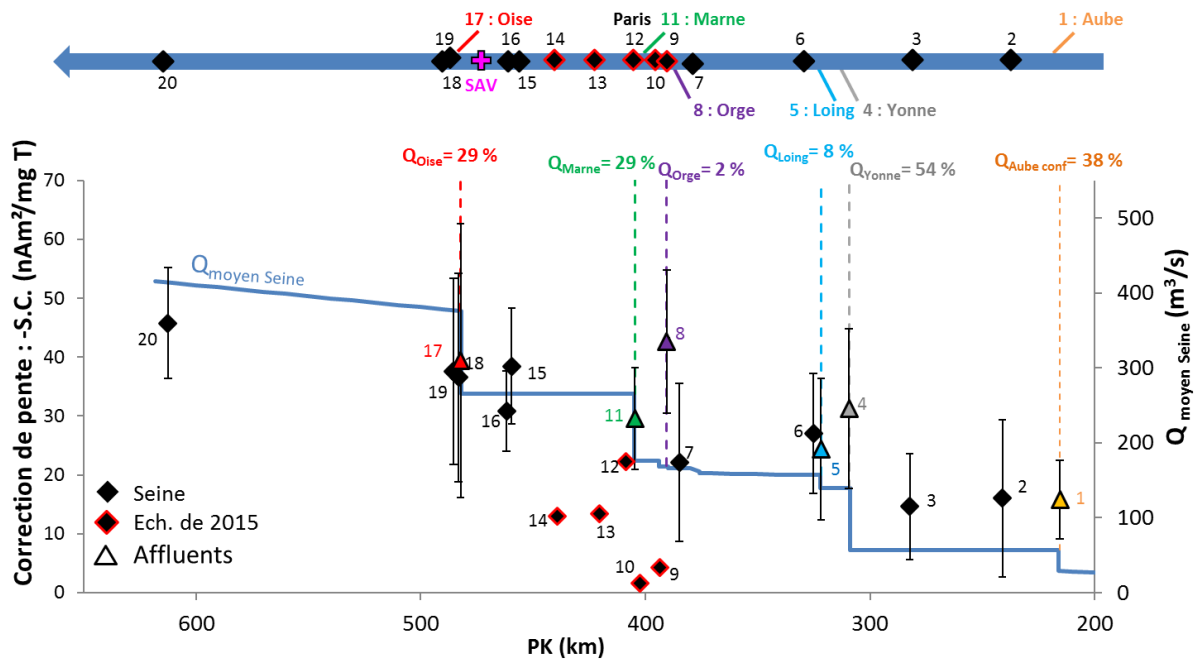


Figure V.7: Evolution générale d'amont en aval (de droite à gauche) de la contribution de minéraux paramagnétiques (estimée à partir de la S.C.) dans les MES de la Seine (losanges noirs) et les affluents étudiés (triangles colorés). Plus (-)S.C. est élevée, plus la proportion de minéraux paramagnétiques est importante. Les barres verticales représentent l'écart-type des valeurs des différents échantillons de chaque site. Le débit moyen de la Seine d'amont en aval sur les années 2011 et 2012 est représenté par la courbe bleue. La contribution moyenne annuelle des affluents aux confluences est indiquée en %. La flèche horizontale représente la Seine dans son sens d'écoulement, les affluents et les différents sites d'échantillonnage. La position de la station Seine Aval (SAV) est représentée par une croix rose.

La Figure V.8 compare l'évolution de la concentration de minéraux paramagnétiques des MES (S.C.) en fonction de celle des magnétites (M_{rs}). En prenant l'ensemble des échantillons, (Figure V.8a) la relation entre les fractions ferrugineuses para- et ferromagnétiques ne sont pas évidentes à observer : les deux paramètres semblent avoir une faible relation ($R^2 = 0,32$). La relation est significativement plus nette ($R^2 = 0,74$) en ne prenant que les S.C. et M_{rs} moyens de chaque site dans le temps (Figure V.8b).

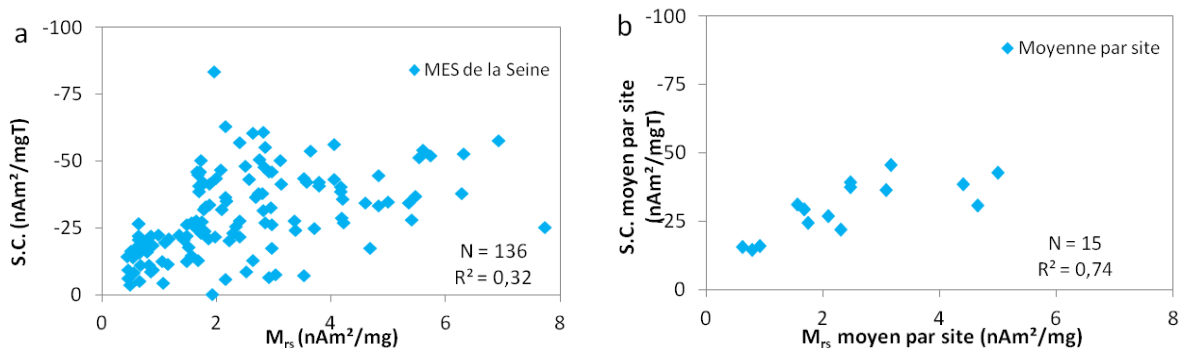


Figure V.8: Relation entre proportion de minéraux paramagnétiques (S.C.) et concentration de magnétites (M_{rs}). (a) : ensemble des échantillons de MES et (b) : moyennes par site. Les sites n'ayant été échantillonnés qu'une seule fois (mars 2015) ne sont pas inclus.

Cette potentielle corrélation entre proportion de minéraux paramagnétiques et ferromagnétiques n'est pas toujours observée. Par exemple, Meena *et al.* (2011) observent dans des sols indiens naturels affectés par la pollution une diminution de la proportion des minéraux paramagnétiques lorsque celle de la magnétite augmente. Ceci est dû au fait que les minéraux paramagnétiques de ces sols sont essentiellement des minéraux argileux d'origine naturelle. Parmi les minéraux argileux identifiés par Haurine (2015) dans les sédiments de l'amont de la Seine, l'Yonne, la Marne et l'Aube et l'estuaire de la Seine (zone du marais Vernier et du Havre), la smectite et l'illite (d'origine naturelle) sont susceptibles d'être paramagnétiques si elles contiennent des atomes de fer (Walden *et al.*, 1999). D'après ces résultats, ces minéraux représentent environ 5 % des sédiments dans les affluents (6,5 % en moyenne dans l'Yonne qui draine des formations différentes). Dans l'estuaire au Havre, la proportion de ces minéraux reste la même (Haurine, 2015). Si l'on considère à partir de ces analyses que la proportion d'argiles paramagnétiques est constante dans le temps, la S.C. devrait être également plus ou moins constante dans l'espace si la fraction paramagnétique est constituée d'illite ou de smectite, or elle tend à augmenter d'amont en aval. En ce qui concerne les sulfures et notamment la pyrite, ces minéraux n'ont pas été détectés dans les analyses faites par Haurine dans les sédiments de la Seine (amont et estuaire). Les milieux urbains sont toutefois des sources potentielles de sulfures (Priadi, 2010) et le fait d'observer une augmentation de la proportion des minéraux paramagnétiques dans les MES dans les zones urbaines suggère que ce sont des sulfures d'origine anthropique qui sont responsables de cette augmentation et non les minéraux argileux. Cette hypothèse est également soutenue par la présence de pyrite déjà observée dans des MES de la Seine (Franke *et al.*, 2009) et soupçonnée dans nos MES grâce aux résultats des mesures de l'IRM après la première chauffe (voir Chapitre III).

Les interprétations du paramètre S.C. à l'échelle du bassin versant restent tout de même limitées en raison de 1) le manque d'information sur la composition exacte des minéraux paramagnétiques, et 2) la forte variabilité temporelle. La signification du paramètre S.C. est donc moins bien comprise et interprétable que le M_{rs} .

V.2.6. Résumé de l'évolution des particules magnétiques dans le bassin de la Seine

Les propriétés physico-chimiques de la Seine ne semblent pas affecter significativement les propriétés magnétiques des MES. En revanche, la fraction magnétique des MES varie sensiblement de l'amont vers l'aval du bassin de la Seine.

Les résultats obtenus à partir des différents outils magnétiques ont permis une caractérisation générale des différentes sources de particules. Selon les propriétés étudiées, les interprétations associées aux variations de ces propriétés ont des degrés de précision différents :

- Les analyses de la minéralogie magnétique ont permis de faire une première distinction entre les sites fortement affectés par l'urbanisation et l'industrie et les sites moins affectés. La proportion de minéraux de basse coercivité (magnétite) au sein de

la fraction magnétique est généralement plus élevée dans les zones urbaines et industrielles.

- La susceptibilité à champ fort (S.C.) est utilisée pour estimer la proportion de minéraux paramagnétiques, essentiellement ferrugineux, sans toutefois indiquer s'il s'agit de sulfures, minéraux argileux ou autres. Le fait que (-)S.C. augmente dans l'agglomération parisienne semble indiquer que celle-ci contribue aussi à l'enrichissement de ces minéraux dans les MES.
- Les tailles de magnétites dans les MES sont classées dans la catégorie des PSD. Ces outils permettent toutefois de différencier trois fractions granulométriques de PSD. On peut les différencier en trois fractions. Les particules les plus fines sont observées dans la partie amont et rurale de la Seine. Les particules de taille intermédiaire apparaissent à l'approche et à la sortie de l'agglomération parisienne et les plus grossières sont observées dans cette agglomération et dans la rivière urbaine de l'Orge. La perte de magnétites grossières après l'Oise semble montrer que les magnétites issues de l'agglomération parisienne se déposent assez rapidement. L'absence de magnétites fines à partir de l'entrée de l'agglomération peut s'expliquer par un biais d'échantillonnage de la charge de ruissellement.
- Le paramètre magnétique montrant les variations les plus prononcées est le M_{rs} . La concentration en magnétites des MES augmente dans les zones urbaines et industrielles (agglomération parisienne et Orge), mais elle augmente déjà significativement dans les zones agricoles lorsque la navigation, les aménagements du cours d'eau et l'urbanisation s'intensifient. De plus, la concentration en magnétites des MES diminue sensiblement après la confluence de l'Oise, pour des raisons qui ne peuvent être expliquées en tenant compte des seuls apports de l'Oise et de la Seine. Ceci peut être dû à une dilution naturelle après la sortie de l'agglomération ou à la contribution d'une nouvelle source. Cette observation nous conduit à étudier la signature magnétique des rejets de la station d'épuration Seine Aval afin de voir s'ils ont un impact (voir partie V.3).

Les tendances d'évolution de tailles et de concentration de magnétites sont relativement identiques : quand la concentration augmente, la taille moyenne des magnétites augmente également (Figure V.9). De manière générale, les outils magnétiques montrent dans cette étude des résultats identiques à ceux de l'étude pionnière de Franke *et al.*, (2009) : à l'échelle spatiale, les zones urbaines et industrielles affectent sensiblement les MES de la Seine en rejetant des magnétites, généralement plus grossières que les magnétites naturelles. Ces résultats sont également en accord avec les études précédemment menées sur le traçage de la pollution industrielle avec le magnétisme environnemental dans d'autres environnements (Strzyszczyk *et al.*, 1996; Jordanova *et al.*, 2004; Dong *et al.*, 2014b; Franciskovic-Bilinski *et al.*, 2014; Chakarvorty *et al.*, 2015). En revenant dans la Seine, les tendances d'augmentation de concentration et de taille de magnétite dans l'Orge et l'agglomération parisienne sont en accord avec les tendances observées pour plusieurs ETM avec les outils chimiques et isotopiques (Tessier, 2003; Chen *et al.*, 2009, 2014b; Thévenot *et al.*, 2009; Priadi, 2010; Le Pape, 2012; Ayrault *et al.*, 2014).

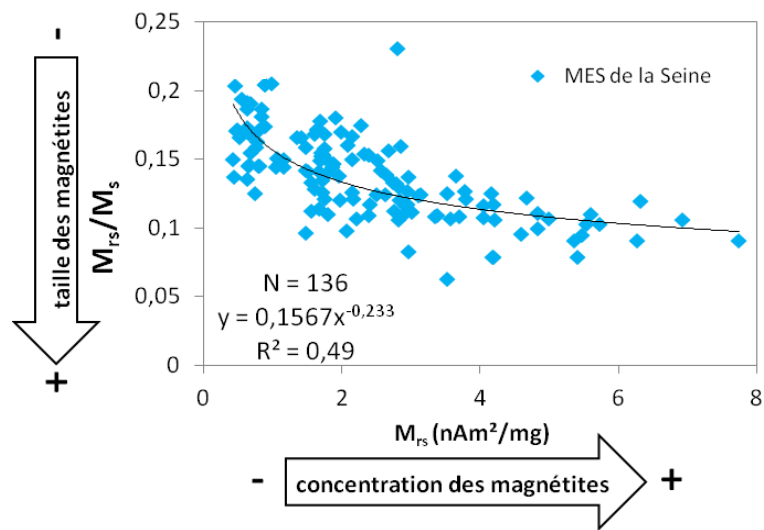


Figure V.9: Relation entre taille des magnétites (M_{rs}/M_s) et concentration des magnétites des MES de la Seine (M_r). Les R^2 sont calculés selon une relation en puissance.

Afin de centrer l'analyse sur les paramètres de minéralogie magnétique, le facteur temps/hydrologie a été négligé dans cette partie bien que celui-ci ait un rôle majeur dans l'évolution des métaux dans la Seine. En s'intéressant à des périodes hydrologiques particulières, il est en effet possible que les résultats varient significativement. Cependant, cette étude de l'évolution spatiale des paramètres magnétiques a soulevé plusieurs questions telles que la signature magnétique exacte des différents apports industriels et urbains, ainsi que l'impact des rejets de la station Seine Aval sur la fraction ferrugineuse.

Ce dernier point ayant été étudié, avant de s'intéresser aux variations temporelles, il est préférable, de même que pour les échantillons de la Seine, de définir les propriétés magnétiques des rejets de station afin d'intégrer l'impact de ces rejets dans la problématique des variations temporelles des magnétites dans la Seine.

V.3. Impact des stations d'épuration sur la fraction magnétique de la Seine

Les échantillons fournis par le SIAAP ont été étudiés avec les outils magnétiques afin d'évaluer leur impact sur la fraction magnétique des MES dans la Seine. Cet impact, déjà observé pour différents contaminants métalliques (Thévenot *et al.*, 2009) est susceptible d'expliquer la chute d'aimantation entre Bougival (sites 15 et 16) et Andrésy/Denouval (sites 18 et 19). La station qui serait responsable de cette diminution est la station SAV, située à Achères et la plus grande station d'épuration d'Europe. En plus de la station Seine Aval, les eaux et boues d'épuration des stations Seine Centre (SEC) et Seine Grésillons (SEG) situées respectivement en amont et en aval de SAV ont également fait l'objet de cette étude.

Après avoir étudié la signature magnétique des stations d'épuration de manière générale, la signature des rejets de SAV serviront à quantifier son impact sur la fraction magnétique de la Seine à Andrésy.

V.3.1. Propriétés des échantillons de stations d'épuration

V.3.1.a. Propriétés physico-chimiques des rejets du SIAAP

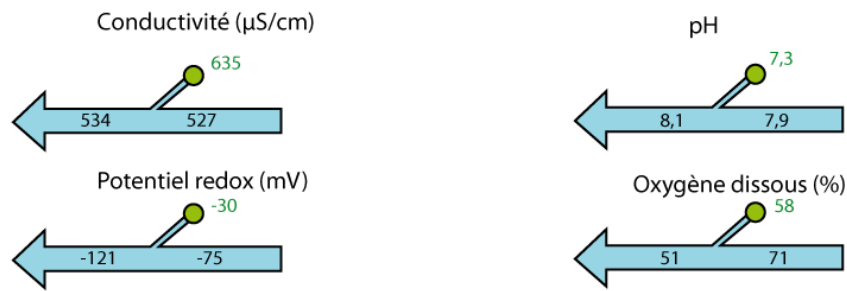
Les précédents résultats obtenus sur les MES de la Seine semblent montrer que les propriétés de la fraction magnétique sont principalement fonction des sources et peu sensibles aux variations de conditions physico-chimiques. Il peut toutefois en être autrement dans les eaux des stations qui subissent différentes étapes de traitement. C'est la raison pour laquelle les propriétés physico-chimiques des eaux de stations ont été mesurées et comparées à celles de la Seine.

La Figure V.10 représente les paramètres mesurés in situ dans les eaux de la Seine en amont et en aval des rejets de la station SEC (Figure V.10a), SAV (Figure V.10b) et SEG (Figure V.10c). De manière générale, la Figure V.10 montre que les propriétés physico-chimiques des eaux de SAV sont comprises dans les gammes de valeurs mesurées dans la Seine (voir Figure V.2), lesquelles ne semblent pas affecter les propriétés magnétiques des MES. De plus, les rejets du SIAAP ne semblent généralement pas affecter de manière significative les propriétés physico-chimiques de la Seine. Nous pouvons donc considérer que les propriétés physico-chimiques des eaux rejetées dans les trois stations ne devraient sensiblement affecter ni les éventuelles particules magnétiques présentes dans les eaux rejetées, ni les magnétites de la Seine.

V.3.1.b. Propriétés magnétiques des MES du SIAAP

Les paramètres d'hystérésis ont été mesurés sur les échantillons des eaux de stations d'épuration entre différentes étapes de traitement jusqu'aux rejets. Presque tous les échantillons ont présenté de très faibles aimantations (M_{rs} généralement entre 0 et 1 nAm²/mg), ce qui, associé à la faible quantité de matériel récupérable et mesurable pour certains échantillons (parfois inférieure à 1 mg) altère la précision des paramètres étudiés. Les méthodes magnétiques d'analyses minéralogiques n'ont pu être effectuées sur ces échantillons pour les mêmes raisons. Nous n'interpréterons donc que le paramètre M_{rs} pour les échantillons du SIAAP en le considérant comme une signature magnétique et non un indicateur de concentration de magnétites.

a - Seine Centre (SEC)



b - Seine Aval (SAV)



c - Seine Grésillons (SEG)



Figure V.10: Comparaison des propriétés physico-chimiques des eaux rejetées des stations d'épuration (en vert) et des propriétés de la Seine en amont et en aval de ces rejets. (a) : station Seine Centre, (b) Seine Aval et (c) : Seine Grésillons. Les flèches représentent le sens d'écoulement de la Seine.

Les résultats des mesures de M_{rs} des échantillons du SIAAP sont représentés sur la Figure V.11 pour chaque station. Les résultats des mesures de chaque type d'échantillons récoltés par le SIAAP sont replacés dans la chaîne de traitement. Les valeurs présentées correspondent à une moyenne sur trois mesures pour les boues et les MES des eaux rejetées et de deux mesures pour les eaux avant et après clarifloculation et après décantation. Les MES des eaux brutes (sortant des égouts) ne sont représentées que par une mesure par station.

Les échantillons de la station Seine Centre (Figure V.11a) représentent les eaux sortant des égouts avant les premiers traitements de la station, les eaux ayant subi les prétraitements et

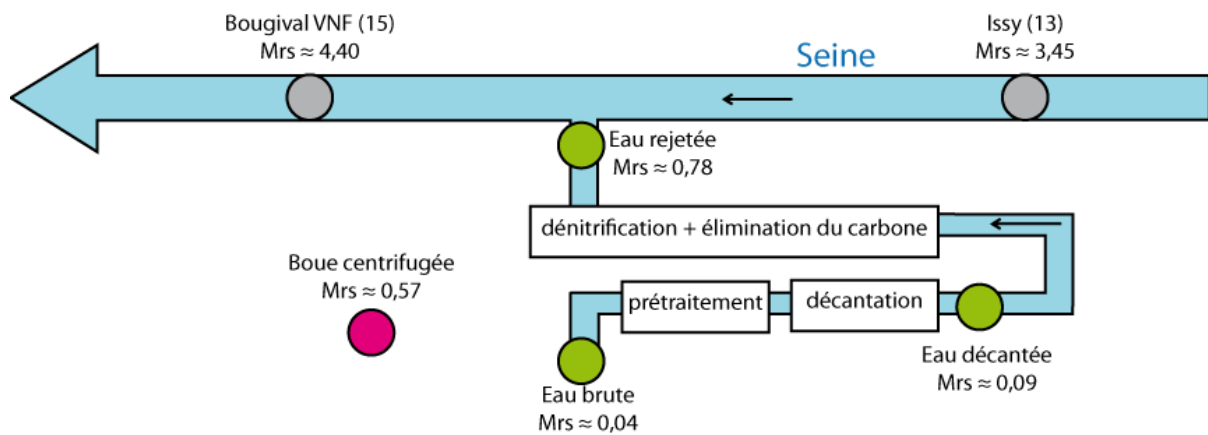
une élimination des MES et du phosphore par décantation physico-chimique, les eaux sortant de la chaîne de traitement (après élimination du carbone et de l'azote) et rejetées dans la Seine, ainsi que les boues d'épuration centrifugées. Tous ces échantillons présentent des M_{rs} significativement plus faibles que ceux de la Seine en amont et en aval de la confluence (en moyenne 3,5 à Issy-les-Moulineaux et 4,4 nAm²/mg à Bougival VNF). Les MES des eaux arrivant des égouts sont déjà très peu aimantées ($M_{rs} = 0,04$ nAm²/mg). Le M_{rs} reste similaire après décantation (0,09) et atteint une valeur moyenne de 0,78 nAm²/mg à la fin de la chaîne de traitement. Les boues centrifugées sont également peu aimantées ($M_{rs} = 0,57$ nAm²/mg) par rapport aux MES de la Seine.

Les échantillons de la station Seine Aval (Figure V.11b) représentent les eaux sortant des égouts, les eaux prétraitées et décantées avant la clarifloculation (ou s'effectue l'ajout de FeCl₃), les eaux après la clarifloculation et avant les derniers traitements, les eaux rejetées à la fin de la chaîne de traitement et les boues d'épuration séchées. Le M_{rs} est encore relativement faible à la sortie des égouts (0,73 nAm²/mg) et diminue après les prétraitements (0,10). Après clarifloculation, le M_{rs} (0,12) ne varie pas significativement, ce qui semble montrer que l'ajout de FeCl₃ n'affecte pas la fraction magnétique des MES. Les eaux rejetées de SAV ont un M_{rs} moyen de 0,26 nAm²/mg, significativement plus faible que le M_{rs} moyen de la Seine à Bougival (4,40 nAm²/mg) et Andrésy (3,08) et de l'Oise à Pontoise (2,47).

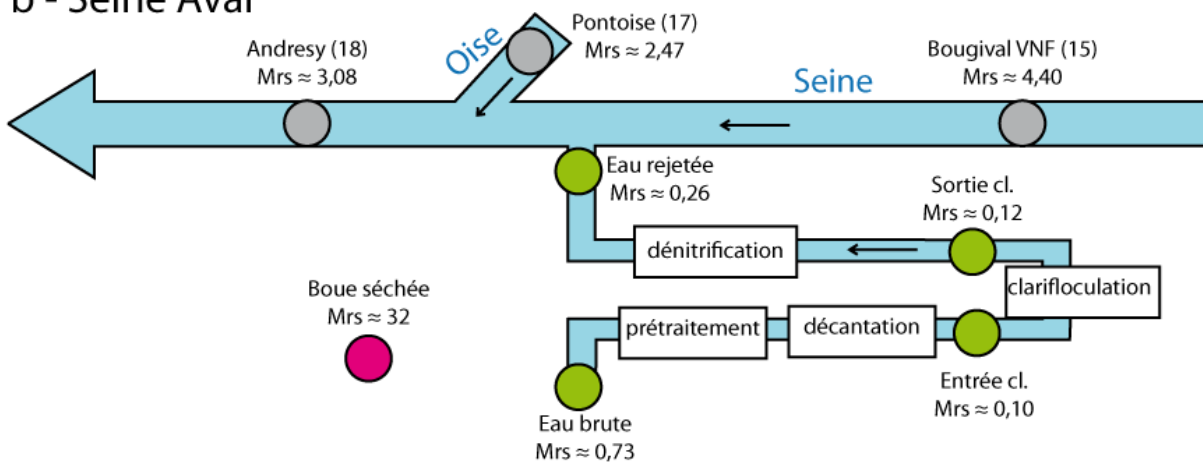
Les échantillons de boues séchées ont tous montré des valeurs de M_{rs} élevées (en moyenne 32 nAm²/mg), ce qui n'a été observé dans aucun autre échantillon de la Seine. En comparaison des valeurs mesurées dans les boues centrifugées de SEC (0,57 en moyenne), celles des boues séchées de SAV restent anormalement élevées. Outre le fait que les boues de SAV peuvent potentiellement inclure plus de métaux dont les minéraux magnétiques, une cause possible des fortes valeurs d'aimantation peut être l'étape de conditionnement thermique que subit la boue avant d'être déshydratée. Cette étape consiste à conditionner les boues sous 200°C et 20 bars pendant 45 minutes (source : <http://www.siaap.fr>) et peut expliquer une transformation de minéraux. Cette hypothèse s'appuie notamment sur l'expérience menée sur les MES de la Seine où, après une chauffe à 700°C, les minéraux ont subi une transformation minéralogique, entraînant une augmentation de l'aimantation due à la transformation de sulfures ou titanomagnétites en magnétites (voir Chapitre III).

Les échantillons de la station SEG (Figure V.11c) représentent les eaux sortant des égouts et les eaux rejetées dans la Seine après les différentes étapes de traitement. Les M_{rs} , encore très faibles, n'ont pas pu être mesurés dans les eaux entrant dans la chaîne de traitement. A la sortie, il est en moyenne à 0,41 nAm²/mg.

a - Seine Centre



b - Seine Aval



c - Seine Grésillons

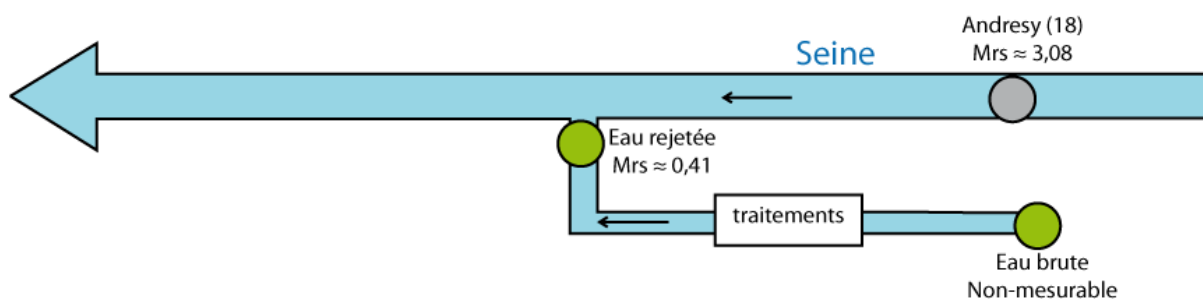


Figure V.11: Evolution de l'aimantation rémanente à saturation (M_{rs}) dans les MES des eaux du SIAAP lors des différentes étapes de traitement (ronds verts) avant d'être rejetées dans la Seine, dans les boues d'épuration (ronds rouges) et comparaison avec les M_{rs} des échantillons de la Seine (ronds gris). (a) : station Seine Centre, (b) : Seine Aval et (c) : Seine Grésillons. Les M_{rs} des échantillons de la Seine sont les moyennes des différents échantillons prélevés en 2011-2012 (voir Figure V.5). Les flèches représentent le sens de l'écoulement.

Les paramètres d'hystérésis ne permettent pas de dire quels minéraux magnétiques sont présents dans les MES du SIAAP. La magnétite est toutefois le minéral naturel qui présente les plus fortes valeurs d'aimantation. Elle a également été détectée dans les MES de la Seine et contribue à l'essentiel de l'aimantation (voir Chapitre III). De ce fait, les M_{rs} des MES du SIAAP étant significativement plus faibles que celles de la Seine, les MES du SIAAP semblent significativement plus appauvries en magnétites que les MES de la Seine.

En raison de la très faible aimantation des échantillons, la précision des paramètres d'hystérésis est fortement altérée. Il n'est donc pas possible, avec si peu de matériel (et de connaissance sur la minéralogie magnétique) d'étudier la taille des particules magnétiques des rejets du SIAAP et de dire si ces rejets sont responsables de la diminution de taille des magnétites d'Andrésey.

L'impact des différentes étapes de traitement sur les particules magnétiques est encore mal compris en raison de la faible quantité de matériel mesurable et des faibles aimantations des MES dès l'arrivée dans les stations. Que la magnétite soit le principal minéral porteur du M_{rs} des rejets de SAV ou non, il semble que la concentration en magnétite des eaux rejetées soit significativement plus faible que celle des MES de la Seine. Ces résultats sont en accord avec l'hypothèse d'un effet de dilution de magnétites provoqué par les rejets de SAV (avec l'aide de l'Oise) entre Bougival et Andrésey et pourrait expliquer la diminution du M_{rs} observé à Andrésey.

V.3.2. Impact des rejets de la station Seine Aval : formule théorique

Les résultats de la partie V.3.1 offrent une première réponse à la problématique de la potentielle contribution de SAV à la dilution des magnétites de la Seine à Andrésey (et Denouval). Afin d'estimer la contribution de la station SAV sur la concentration des magnétites des MES d'Andrésey, nous devons connaître les M_{rs} des sources : la Seine, l'Oise et la station SAV. Nous devons également connaître pour chacune de ces sources, la concentration de MES et les débits. Ainsi, si l'on considère que le M_{rs} d'Andrésey est uniquement contrôlé par les apports de la Seine, l'Oise et SAV, nous pouvons établir l'équation suivante :

$$M_{rs\ Andrésey} * [MES_{Andrésey}] = (M_{rs\ Seine} * [MES_{Seine}] * Q_{Seine} \%) + (M_{rs\ Oise} * [MES_{Oise}] * Q_{Oise} \%) + (M_{rs\ Seine} * [MES_{SAV}] * Q_{SAV} \%)$$

Où

$$M_{rs\ Andrésey} = (M_{rs\ Seine} * \frac{[MES_{Seine}]}{[MES_{Andrésey}]} * Q_{Seine} \%) + (M_{rs\ Oise} * \frac{[MES_{Seine}]}{[MES_{Andrésey}]} * Q_{Oise} \%) + (M_{rs\ SAV} * \frac{[MES_{SAV}]}{[MES_{Andrésey}]} * Q_{SAV} \%)$$

Où, à une période donnée :

- $M_{rs\ Andrésey}$ sera calculé et comparé aux mesures réelles effectuées en 2011-2012. Pour chaque campagne, la valeur réelle (M_{rs} mesuré) correspond à la moyenne des M_{rs} des sites d'Andrésey et de Denouval lorsque les deux sites ont été échantillonnés. On considère que la Seine, l'Oise et les rejets de SAV sont mélangés avant que la Seine se sépare en plusieurs bras.

- $M_{rs\ Seine}$, $M_{rs\ Oise}$ et $M_{rs\ SAV}$ sont respectivement les M_{rs} moyens de la Seine, l'Oise et SAV. Pour la Seine, on prend la valeur moyenne des M_{rs} des deux sites de Bougival (sites 15 et 16) et pour l'Oise, la valeur du site de Pontoise (17).
- Q_{Seine} , Q_{Oise} et Q_{SAV} sont les débits moyens des trois sources rapportés en pourcent.
- MES_{Seine} , MES_{Oise} , MES_{SAV} et $MES_{Andrésy}$ sont respectivement les concentrations de MES de la Seine, l'Oise, les rejets de Seine Aval. $MES_{Andrésy}$ se calcule à partir des débits et concentration en MES des différentes sources :

$$[MES_{Andrésy}] = [MES_{Seine}] * Q_{Seine} \% + [MES_{Oise}] * Q_{Oise} \% + [MES_{SAV}] * Q_{SAV} \%$$

Nous considérons que le $M_{rs\ SAV}$ est constant, estimé à $0,26 \pm 0,29$ nAm²/mg à partir des mesures effectuées sur les échantillons de février, mars, avril et septembre 2015. La concentration en MES de ces rejets sera également considérée comme constante, celle-ci variant entre 28 et 49 mg/l (Priadi, 2010), la valeur est fixée à 39 mg/l. Les valeurs de débits journaliers des rejets de la station SAV ont été fournies par le SIAAP pour chacune de nos campagnes ce qui nous a permis de calculer le débit moyen.

Nous utiliserons, pour l'Oise et la Seine, les concentrations de MES calculées par Vilmin (2014) à partir du modèle ProSe et des mesures fournies par le SIAAP. La période étudiée (2007 à 2013) recouvre l'ensemble de nos campagnes d'échantillonnage. Les débits de la Seine et de l'Oise avant la confluence ont été calculés à partir des chroniques de la Banque Hydro.

Ce modèle théorique ayant été établi, pour chaque contexte étudié, l'impact de SAV sera estimé en appliquant l'équation dans deux conditions :

- La première condition inclue les trois sources (Seine, Oise, SAV).
- La deuxième condition exclue la contribution de SAV. On considère alors que les MES d'Andrésy ne sont pas influencées par les rejets de SAV et on fixe $Q_{SAV} = 0$ %.

Nous allons ainsi, dans la dernière partie de ce chapitre, étudier le fonctionnement du système Seine dans différents contextes hydrologiques en incluant l'estimation de l'impact de la station d'épuration. Ceci permettra d'une part de confirmer son impact et d'autre part d'étudier son ampleur en fonction de l'hydrologie du système.

V.4. Contexte hydrologique et fraction magnétique

Les résultats précédemment exposés dans ce chapitre montrent que plusieurs paramètres magnétiques varient de façon significative le long de la Seine. Toutefois, parmi ces paramètres, seule la concentration en magnétite dans les MES (M_{rs}) et éventuellement la proportion de minéraux paramagnétiques semblent varier significativement dans le temps (voir partie V.1.3). La proportion de minéraux paramagnétiques semble également variable dans le temps, mais la signification de ces variations est encore inconnue.

Nous avons vu dans le Tableau V.3 et le Chapitre IV que la taille des magnétites transportées dans les MES reste relativement identique quel que soit le contexte hydrologique, ce qui

s'explique d'après les résultats des variations spatiales par le fait que les sources de magnétites des MES sont locales et ne varient pas dans le temps. Les paramètres illustrant la minéralogie n'ont pu être étudiés qu'à l'échelle spatiale.

Nous ne nous concentrerons donc dans la dernière partie de ce chapitre sur l'évolution temporelle du paramètre M_{rs} . Ce paramètre étant le plus sensible aux variations locales, il est potentiellement le plus apte à intégrer les variations de la fraction magnétique dans le temps.

Les 12 périodes d'échantillonnage représentent différents contextes mais peuvent être classés en trois catégories : les périodes d'étiages, de crues et intermédiaires.

L'étiage correspond au moment dans une période donnée où le débit est le plus faible, et inversement pour la crue. En pratique, nous identifierons les campagnes d'étiage et de crue à partir du débit moyen pendant la campagne. La classification des périodes d'étiage et de crues (ou basses/hautes eaux en termes de hauteur d'eau dans une période donnée) varie selon les études. Vilmin (2014) distingue ainsi les périodes de basses et hautes eaux selon que le débit est inférieur ou supérieur au débit médian Q_{50} de la Seine à la station de Paris Austerlitz (code de la station : H5920014), avec un Q_{50} de $205 \text{ m}^3/\text{s}$ (calculé à partir des débits journaliers durant les années 2007-2012). Cependant, le débit médian donne moins d'importance aux variations extrêmes que le débit moyen. Ainsi, nous préférons définir les campagnes de crue et d'étiage en nous inspirant des définitions d'Estèbe (1996) pour les périodes de crues et d'étiage :

- Les campagnes d'étiage correspondent aux campagnes durant lesquelles le débit moyen à Austerlitz est inférieur à $150 \text{ m}^3/\text{s}$ et relativement stable dans le temps (écart-type $\sigma \pm 30 \text{ m}^3/\text{s}$). Ainsi les périodes d'étiage sont représentées par les campagnes n°1, 2, 3, 4 et 11 (Tableau V.4).
- Les campagnes de crue correspondent aux campagnes durant lesquelles le débit moyen à Austerlitz est supérieur à $250 \text{ m}^3/\text{s}$ et où le débit varie significativement dans le temps ($\pm 80 \text{ m}^3/\text{s}$). Les campagnes n°5, 6, 8 et 12 répondent à ces critères et sont donc considérées comme des campagnes de crues (Tableau V.4). Pour les campagnes de crue, le choix se fait également en fonction de la position temporelle par rapport aux pics de crues. Ainsi, la campagne n°9 qui se situe à la fin de la crue mineure d'avril-juin 2012 est considérée comme faisant partie d'une période de crue.

Les deux campagnes restantes (7 et 10) correspondent à des périodes dites « intermédiaires ». Le contexte intermédiaire n'étant pas suffisamment représenté, il ne sera pas traité dans cette partie.

Cette dernière partie du chapitre traite donc des variations spatiales de la concentration de magnétites des MES de la Seine en périodes d'étiage et de crue. Elle étudie dans chaque contexte, les différences de concentration par rapport au cas général et s'intéresse notamment aux transitions entre milieux rural et urbain et à l'impact des rejets de la station Seine aval. Les résultats obtenus dans le reste de ce chapitre, des chapitres précédents et des précédentes études sur les variations saisonnières des ETM dans les MES de la Seine, serviront d'appui pour discuter ensuite de ces résultats.

Les échantillons prélevés sur les sites de Villeneuve-le-Roi (site 9), Alfortville (10), Paris (12), Issy-les-Moulineaux (13) et L'Île-Saint-Denis (14) n'ont été prélevés qu'en mars 2015 et ne seront donc pas inclus dans cette partie.

Tableau V.4: Classification des périodes d'étiages et de crue selon les débits moyens et extrêmes à la station d'Austerlitz. (*) Bien que la campagne n°9 ait des valeurs de débit médian proches des conditions intermédiaires, elle correspond à la fin de la crue mineure d'avril-juin 2012 et sera donc incluse dans les périodes de crues malgré son débit plus faible et plus stable.

Campagnes d'étiage ^o	Période	Q moyen calculé à Austerlitz (m ³ /s)	± σ
1	Juin-juillet 2011	97	29
2	Août-septembre 2011	128	19
3	Octobre 2011	108	9
4	Novembre 2011	134	30
11	Septembre-octobre 2012	117	37
Campagnes de crue	Période	Q moyen calculé à Austerlitz (m ³ /s)	± σ
5	Décembre-janvier 2012	585	174
6	Janvier-février 2012	338	116
8	Avril-mai 2012	317	146
9*	Juin-2012*	218*	27*
12	Octobre-novembre 2012	253	81
Campagnes intermédiaires	Période	Q moyen calculé à Austerlitz (m ³ /s)	± σ
7	Mars 2012	205	18
10	Juillet-2012	210	50

V.4.1. Périodes d'étiage

V.4.1.a. Concentration de magnétites en période d'étiage

La Figure V.12 représente l'évolution de la concentration moyenne de magnétites en périodes d'étiage le long de la Seine à partir des valeurs obtenues sur les échantillons des campagnes d'étiage. Pour chaque site, la concentration moyenne obtenue à partir de toutes les campagnes (données de la Figure V.7) est également représentée (symboles vides). Certains sites semblent avoir des variations de concentration significatives lors des campagnes d'étiage par rapport à la moyenne générale. Nous pouvons ainsi observer deux phénomènes :

- Les M_{rs} des échantillons de la partie amont/rurale (sites 1 à 6) ne varient pas significativement par rapport à la tendance générale. Il en va de même pour les échantillons de l'Orge (8), la Marne (11) l'Oise (17) et la Seine à Amfreville (20).

- Les M_{rs} des échantillons de la partie urbaine à l'entrée (7) et à la sortie de l'agglomération parisienne (15, 16, 18 et 19) sont en moyenne, dans chacun de ces sites, significativement plus élevés dans les MES prélevées en périodes d'étiage que dans l'ensemble des échantillons. Le M_{rs} moyen de ces sites augmente de 0,71 à 1,25 nAm²/mg durant l'étiage, les contrastes les plus marqués étant observés aux sites 15 et 16 à Bougival.

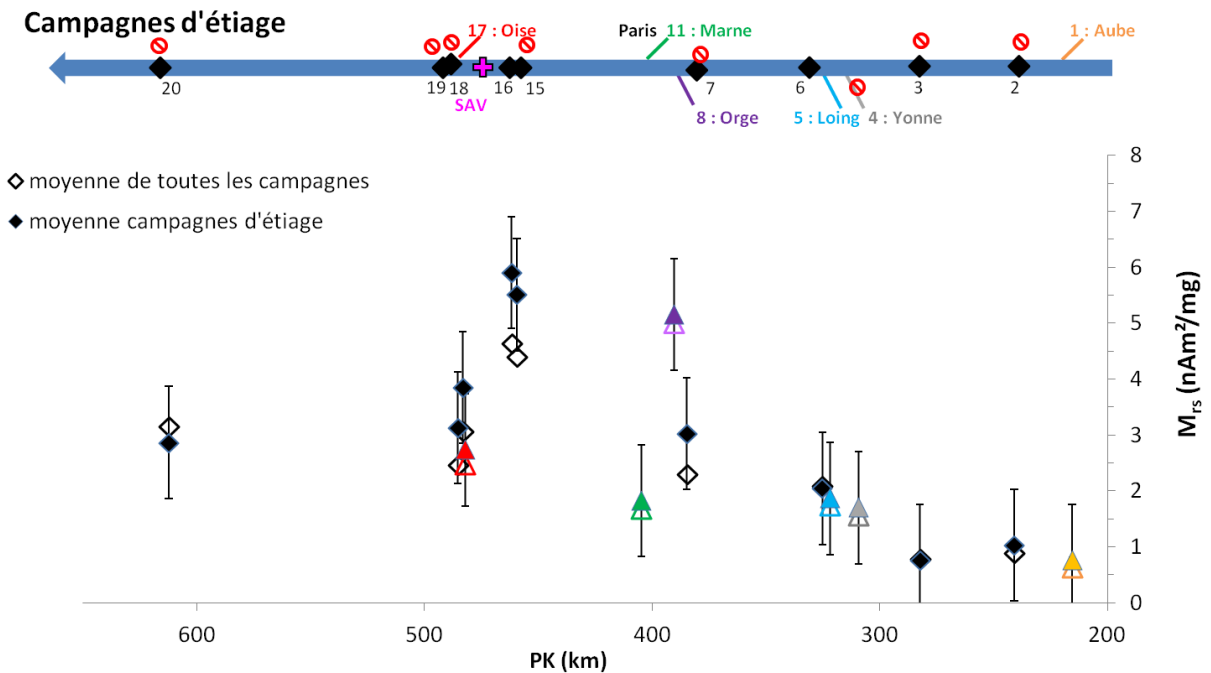


Figure V.12: Evolution d'amont en aval (de droite à gauche) de la concentration de magnétite (M_{rs}) moyenne dans les MES de la Seine (losanges noirs) et les affluents étudiés (triangles colorés) prélevés en période d'étiage (campagnes n°1, 2, 3, 4 et 11). Les barres verticales représentent l'écart-type σ_{temps} de chaque échantillon. Les sites n°4 et 7 ne sont représentés que par une seule campagne d'étiage. La flèche horizontale représente la Seine dans son sens d'écoulement, les affluents et les différents sites d'échantillonnage. La position de la station Seine Aval (SAV) est représentée par une croix rose. Les sites potentiellement mal échantillonnés en période de crue sont marqués par le symbole «⊗» sur les flèches.

Il semble donc que les variations soient prononcées dans les sites proches et dans l'agglomération parisienne. Dans cette partie, la concentration de magnétites dans les MES tend à augmenter en étiage. Les sites de la Seine situés en amont et en aval de l'agglomération, ainsi que les affluents, ne présentent pas de variations significatives.

V.4.1.b. Impact des rejets de la station Seine Aval en période d'étiage

Le Tableau V.5 représente, pour chaque campagne d'étiage, la mesure du M_{rs} à Andrésy/Denouval ainsi que son estimation avec et sans la contribution de la station SAV, à

partir de la formule et méthodologie décrite dans la partie V.3.2. La campagne n°1 ne comprenant aucun échantillon de Bougival, Pontoise, Andrésy et Denouval n'a pas permis d'estimer l'impact de SAV sur les magnétites d'Andrésy/Denouval. Pour chaque autre campagne d'étiage, lorsque le M_{rs} calculé à Andrésy/Denouval est satisfaisant par rapport aux mesures (en tenant compte de l'incertitude estimée à $\pm 0,27$ nAm²/mg à Andrésy et Denouval), la valeur est écrite en bleue dans le tableau. Autrement, elle est écrite en rouge.

Les résultats des calculs avec ou sans la contribution de SAV diffèrent selon les campagnes :

- Les M_{rs} d'Andrésy de la campagne n°2 sont surestimés dans les deux cas : 4,41 avec et 5,47 nAm²/mg sans SAV contre un M_{rs} mesuré de 2,78 nAm²/mg.
- Le M_{rs} calculé de la campagne n°3 est satisfaisant avec la contribution de SAV (3,40 nAm²/mg) par rapport aux mesures (3,59) et surestimé lorsqu'on néglige la contribution de SAV (4,49).
- A l'inverse pour la campagne n°4 : le M_{rs} calculé est sous-estimé avec SAV (4,63 nAm²/mg) par rapport aux mesures (5,54 nAm²/mg) et est satisfaisant lorsqu'on néglige la contribution du SIAAP (5,72 nAm²/mg).
- Le M_{rs} calculé de la campagne n°11 est, de même que celui de la campagne n°3, satisfaisant avec la contribution de SAV (3,53 nAm²/mg) par rapport aux mesures (3,26 nAm²/mg) et surestimé lorsqu'on néglige la contribution de SAV (4,11 nAm²/mg).

L'estimation des valeurs de M_{rs} à partir de ce calcul de mélange n'a pu donner de résultats satisfaisants que dans 2 cas sur 4 (campagnes n°3 et 11). En utilisant d'autres valeurs de M_{rs} et de MES des différentes sources dans la fourchette des valeurs mesurées, les valeurs calculées peuvent sensiblement varier selon les débits choisis mais même en tenant compte des incertitudes, les résultats obtenus ne permettent pas d'expliquer les valeurs d'Andrésy/Denouval par simple effet de mélange.

Une tendance générale s'observe toutefois sur tous les résultats reportés dans le tableau. Que les M_{rs} soient correctement estimés avec ou sans la contribution de SAV, les M_{rs} calculés avec la contribution de SAV sont significativement plus faibles que lorsqu'on la néglige. Les différences d'estimation des M_{rs} entre avec et sans SAV vont de 0,88 à 1,09 nAm²/mg. Ces différences s'expliquent par le fait que le débit des rejets de SAV représente entre 9 et 12 % du débit de la Seine à Andrésy lors de ces périodes d'étiage et que la concentration en MES des rejets (39 mg/l) est supérieure à celles de l'Oise et de la Seine (15 à 25 mg/l). Ainsi, si l'impact de SAV n'est pas toujours quantifié avec précision, il semble contribuer, au moins en période d'étiage, à la diminution de la concentration de magnétites à Andrésy par effet de dilution.

Tableau V.5: Estimation du M_{rs} d'Andrésy/Denouval en périodes d'étiages à partir des débits, concentration de MES et M_{rs} de l'Oise, la station SAV et la Seine avant l'Oise et SAV. Les M_{rs} ont été mesurés sur l'ensemble des échantillons récupérés et fournis par le SIAAP. Les débits de la Seine et de l'Oise ont été estimés à partir des débits des stations de mesure hydrologique de la Seine. Les valeurs de concentrations de MES proviennent des mesures, calculs et références citées de Priadi (2010) pour SAV et Vilmin (2014) pour la Seine et l'Oise. u_i est l'incertitude de mesure estimée pour le paramètre M_{rs} . Les M_{rs} calculés satisfaisants (égaux à $M_{rs} \pm u_i$ à Andrésy/Denouval) sont écrits en bleu et ceux non-satisfaisants en rouge.

<u>Campagne 2 (septembre 2011)</u>	Q_{moyen} (m ³ /s)	[MES] (mg/l)	M_{rs} (nAm ² /mg)	$\pm u_i$
Seine	130	15	6,28 ± 0,81	0,81
Oise	40	15	2,83 ± 0,75	0,75
SAV	17	39	0,26 ± 0,29	0,29
Andrésy / Denouval mesuré			2,78 ± 0,27	0,27
Andrésy / Denouval avec SAV			4,41	
Andrésy / Denouval sans SAV			5,47	

<u>Campagne 3 (octobre 2011)</u>	Q_{moyen} (m ³ /s)	[MES] (mg/l)	M_{rs} (nAm ² /mg)	$\pm u_i$
Seine	105	15	4,99 ± 0,81	0,81
Oise	34	15	2,97 ± 0,75	0,75
SAV	19	39	0,26 ± 0,29	0,29
Andrésy / Denouval mesuré			3,59 ± 0,27	0,27
Andrésy / Denouval avec SAV			3,40	
Andrésy / Denouval sans SAV			4,49	

<u>Campagne 4 (novembre 2011)</u>	Q_{moyen} (m ³ /s)	[MES] (mg/l)	M_{rs} (nAm ² /mg)	$\pm u_i$
Seine	135	15	6,55 ± 0,81	0,81
Oise	38	15	2,74 ± 0,75	0,75
SAV	17	39	0,26 ± 0,29	0,29
Andrésy / Denouval mesuré			5,54 ± 0,27	0,27
Andrésy / Denouval avec SAV			4,63	
Andrésy / Denouval sans SAV			5,72	

<u>Campagne 11 (octobre 2012)</u>	Q_{moyen} (m ³ /s)	[MES] (mg/l)	M_{rs} (nAm ² /mg)	$\pm u_i$
Seine	127	15	4,81 ± 0,81	0,81
Oise	52	15	2,40 ± 0,75	0,75
SAV	21	39	0,26 ± 0,29	0,29
Andrésy / Denouval mesuré			3,26 ± 0,27	0,27
Andrésy / Denouval avec SAV			3,23	
Andrésy / Denouval sans SAV			4,11	

V.4.2. Périodes de crues

V.4.2.a. Concentration de magnétites en période de crue

D'après les résultats du Chapitre IV et de la partie V.1.1 de ce chapitre, ce sont les périodes de crues qui sont susceptibles d'être mal échantillonnées et de montrer des résultats biaisés. Une attention particulière doit donc être apportée aux échantillons incriminés, qui sont ceux des sites 2, 3, 15, 18, 19 et peut-être 20 de la Seine et le site de l'Yonne (4).

A la différence des débits d'étiages, les débits des campagnes de crues sont très variables selon que les crues étudiées soient majeures (crue hivernale) ou mineures (crue printanière). De plus, la charge sédimentaire ne suivant pas une relation simple avec le débit, il est judicieux de séparer les périodes de montées et celles de descente de crue plutôt que de les regrouper en une valeur moyenne. La Figure V.13 représente l'évolution de la concentration de magnétites en périodes de crues le long de la Seine à partir des valeurs obtenues sur les échantillons des campagnes de crues. La Figure V.13a représente le M_{rs} moyen par site en crue et la Figure V.13b, le M_{rs} par site pour chaque période de crue. De même que dans la Figure V.12, pour chaque site, la concentration moyenne obtenue à partir de toutes les campagnes est également représentée.

De manière générale (Figure V.13a) les M_{rs} de crue sont similaires à la moyenne de toutes les campagnes dans la partie amont de la Seine (sites 1 à 6), la Marne (11), l'Oise (17) et la Seine à Amfreville (20).

Dans l'Orge (8) et dans l'agglomération parisienne (15, 16, 18 et 19), les M_{rs} de crue sont significativement plus faibles que la moyenne de toutes les campagnes, à l'inverse des M_{rs} d'étiage, significativement plus élevés autour de l'agglomération parisienne.

La seule campagne de crue qui se démarque des autres est celle de février 2012 (campagne 6) qui correspond à la fin d'une crue majeure (Figure V.13b). Dans presque tous les sites, les M_{rs} mesurés dans les échantillons de cette campagne sont les plus faibles. Toutefois, étant donné la précision de mesure du M_{rs} , il est difficile de dire si cette tendance est significative, car à débit égal, la charge en suspension de la Seine est plus faible lors de la descente que lors de la montée de crue (Estèbe, 1996). Ceci est observé dans une partie des échantillons de MES de la Seine, où la quantité de MES piégées est généralement beaucoup plus élevée lors de la campagne n°5 (montée de crue majeure) que lors de la campagne n°6 (voir Figure V.1 et Annexe E). La capacité de dilution de la Seine devrait donc être moins élevée lors de la descente que lors de la montée. Si les mesures acquises sont suffisamment précises, les M_{rs} les plus faibles devraient donc être observés dans les échantillons de la campagne n°5.

Concernant la question du biais d'échantillonnage, la plupart des trappes posées dans l'agglomération parisienne jusqu'à Amfreville a vraisemblablement mal échantillonné les MES. Les sites de l'Orge à Viry-Châtillon (8) et Bougival Pointe (16) ont en revanche été *a priori* correctement échantillonnés, et montrent les mêmes tendances de diminution de M_{rs} que les sites mal échantillonnés. Il en va de même pour les échantillons de la partie amont, où en général, le fait que les trappes aient bien ou mal intégré les pics de MES ne change pas le fait que le M_{rs} soit relativement peu variable par rapport aux périodes d'étiages. Il semble que

l'effet de dilution des magnétites en période de crue, observée dans les zones urbaines et non dans la partie amont ne serait donc pas biaisé par le protocole d'échantillonnage.

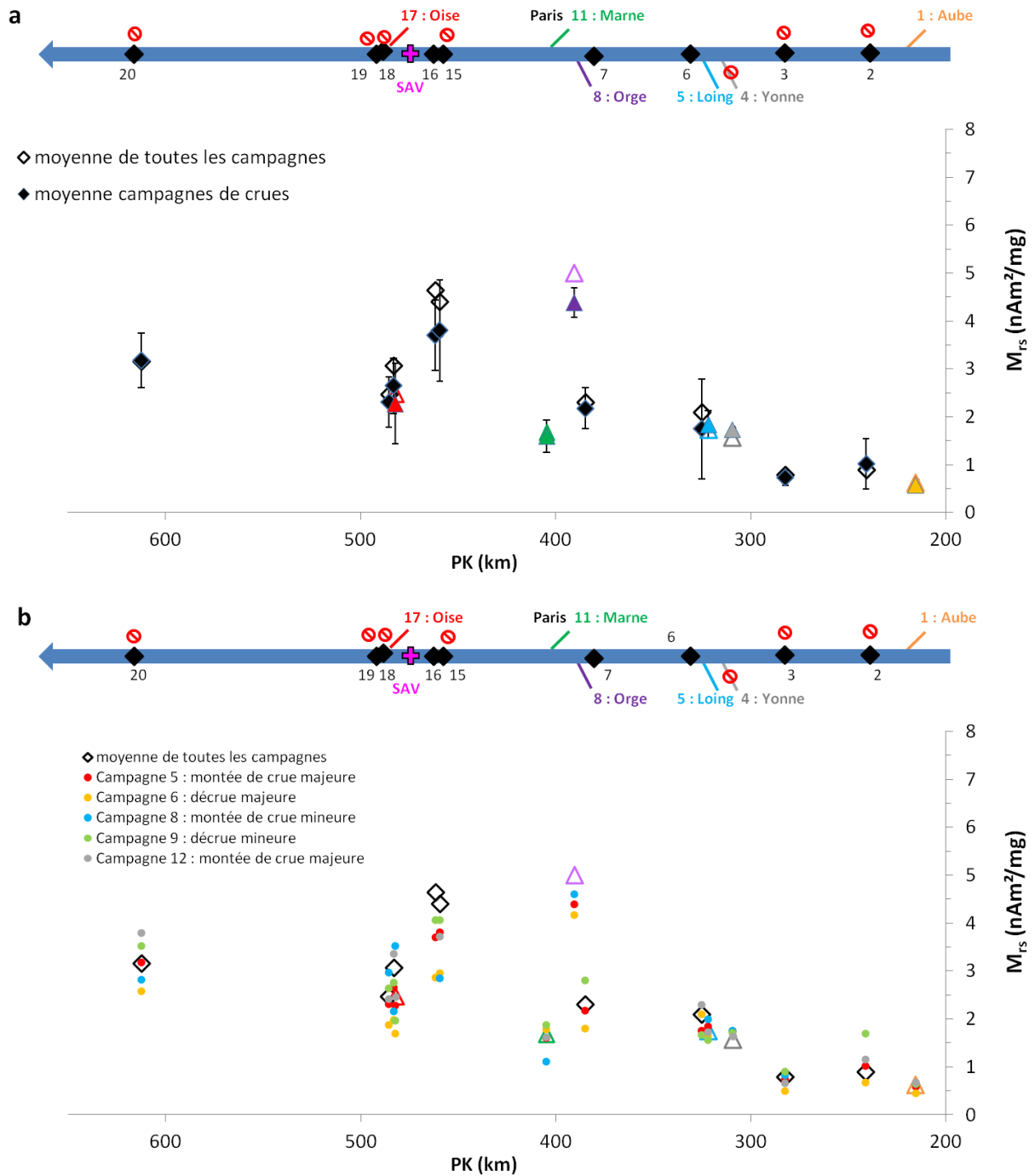


Figure V.13: Evolution d'amont en aval (de droite à gauche) de la concentration de magnétite (M_{rs}) moyenne dans les MES de la Seine (losanges noirs) et les affluents étudiés (triangles colorés) prélevés en période de crues (campagnes n°5, 6, 8, 9 et 12). (a) Moyenne de toutes les campagnes de crue et (b), valeurs mesurées lors de chaque campagne. Les barres verticales représentent l'écart-type σ_{temps} de chaque échantillon. La flèche horizontale représente la Seine dans son sens d'écoulement, les affluents et les différents sites d'échantillonnage. La position de la station Seine Aval (SAV) est représentée par une croix rose. Les sites potentiellement mal échantillonnés en période de crue sont marqués par le symbole «⊗» sur les flèches.

V.4.2.b. Impact des rejets de Seine Aval en période de crue

Le Tableau V.6 représente, pour chaque campagne de crue, l'estimation du M_{rs} des MES de la Seine à Andrésy, avec et sans la contribution de la station SAV. Le M_{rs} de l'Oise n'est pas connu pour la campagne n°12 car le site de Pontoise n'a pas été échantillonné.

Les résultats des calculs effectués sur les échantillons de crue sont les suivants :

- Les M_{rs} d'Andrésy de la campagne n°5 (montée de crue majeure/hivernale) sont surestimés dans les deux cas : 4,11 avec et 4,15 nAm²/mg sans SAV contre un M_{rs} mesuré de 2,32 nAm²/mg. Les contributions de la Seine, de l'Oise et de SAV ne suffisent pas à expliquer la diminution de la concentration de magnétites dans les MES de la Seine. Nous pouvons toutefois noter que les résultats avec et sans SAV sont très proches ($\Delta M_{rs} = 0,04$ nAm²/mg). Nous pouvons donc *a priori* considérer que lors de la montée de crue hivernale de 2012, l'impact de SAV sur la Seine est, dans tous les cas, négligeable.
- Les M_{rs} calculés pour la campagne n°6 (fin de la crue hivernale) sont surestimés dans les deux cas par rapport aux mesures (1,98 nAm²/mg) : 2,44 nAm²/mg avec la contribution de SAV et 2,56 nAm²/mg sans SAV.
- Les M_{rs} calculés de la campagne n°8 (montée de la crue mineure/printanière) sont surestimés dans les deux cas par rapport aux mesures (2,56 nAm²/mg) : 2,94 nAm²/mg avec la contribution de SAV et 3,03 nAm²/mg sans SAV.
- Les M_{rs} calculés de la campagne n°9 (fin de la crue printanière) sont surestimés dans les deux cas par rapport aux mesures (2,69 nAm²/mg) : 3,11 nAm²/mg avec la contribution de SAV et 3,50 nAm²/mg sans SAV.

Pour résumer, le M_{rs} des MES d'Andrésy n'a pas pu être correctement estimé dans les 4 campagnes de crues étudiées, que ce soit en prenant en compte l'impact des rejets de SAV ou non.

Malgré ces résultats peu satisfaisants, il est intéressant de noter que l'impact théorique de SAV sur le M_{rs} d'Andrésy est significativement plus faible en crue ($\Delta M_{rs} < 0,39$ nAm²/mg entre avec et sans la contribution SAV) qu'en étiage ($\Delta M_{rs} > 0,88$ nAm²/mg). Cela s'explique par le fait qu'en crue, les rejets de SAV ne représentent au mieux qu'entre 2 et 7 % du débit de la Seine à Andrésy, sachant que les concentrations de MES varient de 20 à 150 mg/l selon la campagne. Toutefois, bien que l'impact de SAV sur les magnétites d'Andrésy soit significativement plus faible en période de crue qu'en étiage (en raison de l'augmentation des débits et flux de MES de la Seine et de l'Oise), il explique toujours dans les périodes de crue étudiées la diminution de concentration en magnétites dans les MES de la Seine à Andrésy.

Tableau V.6: Estimation du M_{rs} d'Andrésey/Denouval en périodes de crues à partir des débits, concentration de MES et M_{rs} de l'Oise, la station SAV et la Seine avant l'Oise et SAV. Les M_{rs} ont été mesurés sur l'ensemble des échantillons récupérés et fournis par le SIAAP. Les débits de la Seine et de l'Oise ont été estimés à partir des débits des stations de mesure hydrologique de la Seine. Les valeurs de concentrations de MES proviennent des mesures, calculs et références citées de Priadi (2010) pour SAV et Vilmin (2014) pour la Seine et l'Oise. Les M_{rs} calculés satisfaisants (égaux à $M_{rs} \pm u_t$) sont écrits en bleu et ceux non-satisfaisants en rouge.

Campagne 5 (janvier 2012)	Q_{moyen} (m ³ /s)	[MES] (mg/l)	M_{rs} (nAm ² /mg)	$\pm u_t$
Seine	678	150	4,83	0,81
Oise	209	150	1,92	0,75
SAV	23	39	0,26	0,29
Andrésey / Denouval mesuré			2,32	0,27
Andrésey / Denouval avec SAV			4,11	
Andrésey / Denouval sans SAV			4,15	

Campagne 6 (février 2012)	Q_{moyen} (m ³ /s)	[MES] (mg/l)	M_{rs} (nAm ² /mg)	$\pm u_t$
Seine	678	25	2,90	0,81
Oise	209	25	1,98	0,75
SAV	16	39	0,26	0,29
Andrésey / Denouval mesuré			1,98	0,27
Andrésey / Denouval avec SAV			2,44	
Andrésey / Denouval sans SAV			2,56	

Campagne 8 (mai 2012)	Q_{moyen} (m ³ /s)	[MES] (mg/l)	M_{rs} (nAm ² /mg)	$\pm u_t$
Seine	355	50	2,84	0,81
Oise	139	50	3,53	0,75
SAV	23	39	0,26	0,29
Andrésey / Denouval mesuré			2,56	0,27
Andrésey / Denouval avec SAV			2,94	
Andrésey / Denouval sans SAV			3,03	

Campagne 9 (juin 2012)	Q_{moyen} (m ³ /s)	[MES] (mg/l)	M_{rs} (nAm ² /mg)	$\pm u_t$
Seine	221	20	4,06 ± 0,81	0,81
Oise	82	25	1,96 ± 0,75	0,75
SAV	23	39	0,26 ± 0,29	0,29
Andrésey / Denouval mesuré			2,69	0,27
Andrésey / Denouval avec SAV			3,11	
Andrésey / Denouval sans SAV			3,50	

V.4.3. Résumé et de l'impact saisonnier sur les magnétites de la Seine

Dans la partie amont de la Seine, l'influence du régime hydrologique sur les particules magnétiques n'est pas observée dans les échantillons de 2011-2012. Cet impact n'est toutefois probablement pas inexistant, car l'étude de la section de méandre de Marnay-sur-Seine a permis de mettre en évidence que des variations de concentration de magnétite existent entre

les périodes de crues et d'étiage. A l'échelle du bassin de la Seine, les variations de concentration de magnétite observées le long de la section de Marnay sont cependant négligeables : autour de 0,66 nAm²/mg en étiage et entre 0,15 et 0,74 nAm²/mg en crue et selon la position dans la section. A l'aval, à Bougival VNF (15) et en un seul point dans la section, le M_{rs} est en moyenne autour de 5,51 nAm²/mg en étiage contre en moyenne autour de 3,70 nAm²/mg en crue. Le ΔM_{rs} entre étiage et crue est donc significativement plus élevé à Bougival qu'à Marnay.

Malgré un éventuel biais d'échantillonnage sur une partie des échantillons et l'incertitude de mesure du M_{rs}, ce paramètre montre une forte relation avec le contexte hydrologique dans l'agglomération parisienne. Les MES de cette partie de la Seine, significativement impactée par l'urbanisation et l'industrie, s'enrichissent en magnétites en étiage et s'appauvrissent lors des crues.

Les résultats comparés aux connaissances acquises sur l'évolution spatiale de la contamination métallique de la Seine (Thévenot *et al.*, 2009; Priadi, 2010; Ayrault *et al.*, 2014) ont permis d'associer l'augmentation de la concentration de magnétite à l'intensité de l'urbanisation et de l'industrie. Toujours en associant les magnétites à la contamination métallique, les variations du M_{rs} entre crue et étiage sont en accord avec les précédentes études effectuées sur la contamination métallique (Meybeck *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2009; Thévenot *et al.*, 2009), dont le fer (Chen *et al.*, 2014b) dans la Seine :

- Dans la partie rurale de la Seine, l'essentiel des sources de magnétites étant issues de l'altération et érosion des roches sédimentaires, la concentration en magnétites ne varie pas significativement dans les MES et le M_{rs} varie relativement peu.
- En revanche, dans l'agglomération parisienne, la capacité de dilution de la Seine est à son minimum en étiage et celle-ci est de ce fait plus sensible à la pollution ponctuelle produite par les rejets urbains (Martin, 2009). L'urbanisation et l'industrie sont sources de magnétites qui s'ajoutent aux magnétites naturelles des MES de la Seine, entraînant des fortes augmentations du M_{rs} par rapport à la partie rurale de la Seine.
- Lorsque le débit augmente, il influe sur la taille des particules transportées dans la charge en suspension de la Seine, la fraction magnétique anthropique parisienne, bien que toujours présente, est diluée par ajout de MES d'origines rurales/naturelles, moins concentrées en magnétites. Le M_{rs} est toujours plus élevé à Paris qu'en amont car la pollution anthropique est toujours présente, mais il est plus faible qu'en étiage.

L'impact des rejets de Seine Aval sur les magnétites des MES a également pu être estimé et varie significativement entre les périodes de crue et d'étiage. Moins riches en magnétites, les rejets du SIAAP semblent expliquer la diminution du M_{rs} après la confluence de l'Oise, surtout en période d'étiage. Cependant, les résultats des modèles montrent que même si l'impact du SIAAP peut être plus ou moins significatif, il n'est généralement pas suffisant pour expliquer la diminution d'aimantation à Andrésy lorsqu'on établit l'hypothèse d'un simple mélange Seine/Oise/SAV. D'autres phénomènes sont donc susceptibles d'expliquer cette diminution. En reprenant les interprétations de variation de taille des magnétites, la transition agglomération parisienne/sortie de l'agglomération après l'Oise est marquée par un

changement de taille de magnétites, indiquant que les magnétites issues de l'agglomération se déposeraient relativement rapidement avant Andrésey. Cette hypothèse peut également expliquer l'aimantation des MES d'Andrésey, qui semble à la fois illustrer la contribution des différentes sources de particules dans la Seine, mais aussi les mécanismes de transport de ces particules.

Résumé et discussion

Nous nous sommes intéressés, dans ce dernier chapitre, à étudier le lien entre l'occupation du bassin de la Seine et les propriétés magnétiques des MES des cours d'eau qui le drainent afin d'évaluer leur potentiel de traçage spatial et temporel de la pollution métallique. L'essentiel de nos interprétations est basé sur l'état des connaissances acquises sur les différents secteurs du bassin de la Seine, les principales sources de particules ferrugineuses et métalliques et le comportement de la Seine vis-à-vis de ces sources.

A l'échelle du bassin versant, les magnétites des MES de la Seine témoigne principalement des différentes zones que traverse le cours d'eau. En suivant l'évolution d'amont en aval de ces magnétites, la partie amont et essentiellement rurale et les MES prélevées possèdent une concentration relativement faible en magnétites. Les MES des milieux urbains et industriels sont enrichies en magnétites qui sont généralement plus grossières que les magnétites rurales/naturelles. Les MES des affluents navigables et aménagés sont également enrichis en magnétites par rapport à la partie amont de la Seine mais moins que les milieux fortement urbanisés. Des études ciblées sont nécessaires pour vérifier si l'origine de ces enrichissements est liée à la navigation ou à des sources urbaines et industrielles mineures.

A l'échelle temporelle, le régime hydrologique de la Seine a également un impact sur les magnétites mais celui-ci n'est pas du même ordre de grandeur entre les zones rurales et urbaines de la Seine. Les variations de concentration de magnétites dues au changement de régime observées dans la section de méandre de Marnay et dans les sites de la Seine (et affluents) en milieu rural s'avèrent négligeables par rapport à celles que l'on peut observer dans les zones urbaines. Dans ces zones, la concentration de magnétite paraît significativement plus élevée en étiage qu'en crue. Le régime hydrologique est de ce fait un facteur essentiel à prendre en compte lors d'un traçage environnemental dans les systèmes fluviaux, et même si la variabilité saisonnière de nos paramètres magnétiques est généralement plus faible que la variabilité spatiale, le facteur temps/régime hydrologique ne peut être négligé dans l'étude des milieux contaminés. L'étude de l'impact de la station de traitement des eaux de Seine Aval sur les magnétites confirme ces résultats en montrant une contribution significativement différente selon le régime hydrologique.

De manière générale, la taille et la concentration des magnétites semblent donc être adaptés pour tracer les sources d'origines urbaines et industrielles, ainsi que les mécanismes de dilution et accumulation de ces pollutions dans des milieux de transitions comme les confluences, l'aval des stations d'épuration et les sorties d'agglomération. La concentration en magnétites dans les MES permet également d'étudier les variations saisonnières de l'impact de ces contaminations et ces mécanismes en fonction du débit du cours d'eau.

La taille des magnétites permet une première approche des mécanismes de transport et dépôt des magnétites d'origine anthropique, mais un échantillonnage plus adapté au piégeage de l'ensemble de la charge sédimentaire de la colonne d'eau, du fond du lit et sur les dépôts de berges dans les zones de transition est nécessaire pour une meilleure compréhension du devenir des magnétites anthropiques une fois arrivées dans la Seine.

Ces résultats ont été essentiellement acquis à partir des paramètres magnétiques d'hystérésis, dont la rapidité d'acquisition a permis des mesures sur tous les échantillons. Selon la quantité de MES prélevées, d'autres méthodes magnétiques, et notamment celles renseignant la minéralogie magnétique, appliquées plus généralement à plusieurs sites et campagnes sélectionnées permettrait de mieux évaluer leur efficacité à caractériser l'environnement du bassin la Seine.

Conclusions et perspectives

Nous nous sommes intéressés dans ce travail à caractériser les propriétés de la fraction ferrugineuse des MES de la Seine et à en comprendre la variabilité au sein du système Seine. Ces travaux s'inscrivent en continuité avec plusieurs études effectuées depuis les travaux de Franke *et al.*, (2009) sur la caractérisation de la fraction magnétique de la Seine. En effet, le bassin de la Seine offre un terrain d'étude à la fois riche en informations et complexe où la population se concentre autour de Paris ou dans de petites agglomérations. Ces zones urbanisées et industrialisées contrastent avec les zones rurales, qui occupent la majeure partie du territoire. Le fer présent dans le réseau hydrographique provenant de différentes sources naturelles et des activités anthropiques présentes dans le bassin, cette étude nous a permis d'évaluer le potentiel des méthodes magnétiques utilisées à tracer l'impact des différentes activités humaines dans la Seine.

L'étude particulière d'une section de méandre située dans la partie amont, agricole et non aménagée (Marnay-sur-Seine) a permis d'estimer quelles variations temporelles peuvent être observées lorsque les processus et sources sont essentiellement d'origine naturelle. L'étude a été étendue à des échantillons de MES prélevés entre 2011 et 2012 (à raison d'un prélèvement mensuel couvrant des périodes de crues et d'étiage) en zones agricoles et urbaines ainsi qu'en amont et en aval des confluences des affluents majeurs. Des échantillons de MES d'eaux usées, traitées et rejetées par les stations d'épuration ont également été récupérés. Plusieurs mesures et méthodes d'acquisition de paramètres magnétiques à température ambiante ont été employées sur les échantillons de MES et comparées entre elles afin de décrire la fraction ferrugineuse de manière globale. La caractérisation s'est ensuite concentrée sur 1) la variabilité spatiale, dans le but d'observer l'impact des activités humaines sur la fraction ferrugineuse et 2) la variabilité temporelle, dans le but d'observer d'éventuels effets de dilution, d'accumulation ou de remise en suspension de particules ferrugineuses en fonction des changements de régime hydrologique. Cette étude spatio-temporelle a nécessité de prendre en compte et d'estimer le débit de la Seine et des affluents à chaque période et site étudié afin d'estimer au mieux quelles signatures magnétiques sont dues à des effets de mélanges de et lesquelles sont dues à des sources locales.

Apports du magnétisme environnemental

La magnétite est le seul minéral sur lequel nous avons travaillé car sa forte aimantation masque celles des minéraux comme l'hématite ou la goéthite, dont la présence dans les MES de la Seine est probable mais dont la proportion ne peut être correctement évaluée avec les méthodes magnétiques que nous avons employées. Dans le cas de la Seine, ces minéraux ne dominent pas le signal et les résultats basés sur les variations de la magnétite permettent déjà d'étudier la dynamique du système.

La magnétite est un élément naturellement présent dans la charge sédimentaire de la Seine dont la concentration est fortement dépendante des conditions hydrologiques. Dans un système où les formations drainées sont relativement homogènes comme le bassin de la Seine, les magnétites, essentiellement pseudo-mono-domaines sont principalement concentrées dans la charge de ruissellement (inférieure à 63 μm) et la fraction fine des sédiments de fond (inférieure à 160 μm). Lorsque la charge en suspension augmente dans la colonne d'eau, une partie des magnétites du fond du lit du cours d'eau est remise en suspension avec le reste des particules fines.

La magnétite est également produite par les différentes activités anthropiques. L'urbanisation et l'industrie en sont les principales sources : les MES des milieux les plus impactés (comme la Seine à Bougival et l'Orge à Viry-Châtillon) possèdent une aimantation rémanente à saturation environ cinq fois plus élevée (3-6,5 nAm^2/mg) qu'en amont en milieu rural (0,5-1,2 nAm^2/mg). De manière générale, l'aimantation, soit la concentration de magnétite, augmente avec l'urbanisation et les activités industrielles, lesquelles sont principalement concentrées dans l'agglomération parisienne. Ces activités sont en effet les principales sources d'émission de fer anthropique dans le bassin. Certaines activités anthropiques comme les stations d'épuration contribuent en revanche à diminuer la concentration en magnétite dans les MES. Un profil d'évolution d'amont en aval des propriétés magnétiques des MES de la Seine permet donc de tracer l'impact de l'Homme sur la fraction ferrugineuse et le devenir des particules dans le cours d'eau.

Les variations de régime hydrologique affectent la concentration de magnétites naturelles de la Seine, mais les variations temporelles d'aimantation des MES sont beaucoup plus prononcées dans agglomération parisienne qu'en amont et en aval de cette agglomération. Dans l'agglomération, l'essentiel des magnétites détectées semble avoir une origine anthropique. Si l'on considère qu'à l'échelle annuelle, les apports industriels et urbains sont relativement constants dans le temps, leur impact se manifeste par des aimantations plus élevées dans les MES prélevées en périodes d'étiage que les MES prélevées en périodes de crue.

L'affinité des oxydes de fer dans la charge sédimentaire fine, l'augmentation d'oxydes de fer dans la Seine dans l'agglomération parisienne et les effets de dilution/accumulation des particules anthropiques en périodes de crues/étiages sont des phénomènes connus, observés et mesurés avec les méthodes chimiques classiques. De même, les variations spatio-temporelles d'enrichissement de magnétite sont comparables à l'enrichissement des ETM, qui dans la Seine, sont principalement issus de l'agglomération parisienne et des zones fortement urbanisées/industrialisées. Enfin, la concentration des ETM est, de même que l'aimantation, significativement diluée en agglomération parisienne lorsque le débit augmente tout en restant significativement plus élevée que dans la partie amont.

Difficultés rencontrées dans notre étude

Les outils magnétiques utilisés dans cette étude se sont heurtés à plusieurs limites. De manière générale, la faible quantité de MES couplée à la faible concentration de particules magnétiques a réduit le nombre de mesures applicables. De plus, certaines mesures ou méthodes appliquées dans cette étude se sont révélées inadaptées.

Les méthodes de caractérisation minéralogiques magnétiques utilisées dans l'étude ne permettent pas une caractérisation environnementale satisfaisante à l'échelle spatiale et il est probable qu'elle ne le soit pas à l'échelle temporelle, les variations temporelles étant, pour la plupart des paramètres magnétiques, plus faibles que les variations spatiales. L'incertitude des mesures due à la faible concentration des oxydes de fer, couplée à la contribution magnétique inégale des différents minéraux limite l'application des méthodes à confirmer la dominance d'un minéral (ici la magnétite) et permettre les interprétations de granulométrie et concentration magnétiques en fonction.

Les méthodes magnétiques de caractérisation granulométriques peuvent être utilisées pour une caractérisation spatiale. Les paramètres magnétiques sont très sensibles à la taille des particules et permettent de discriminer des particules dont les tailles varient de quelques micromètres. Cependant, la faible aimantation de la plupart des échantillons augmente l'incertitude des mesures et rend l'application de certaines mesures (comme les FORCs ou les mesures de susceptibilité à haute et basse fréquence) difficile en raison de leur plus grande sensibilité au bruit.

De manière générale, seuls les paramètres de concentration ont pu être utilisés à des fins de caractérisation temporelle. Ceci est dû au fait que, pour les autres paramètres, les variations sont probablement plus subtiles voire non significatives et les incertitudes des résultats sont trop élevées pour que les résultats obtenus soient significatifs.

Conclusion

Les différentes analyses et méthodes magnétiques ont permis d'évaluer l'impact de l'Homme sur la fraction ferrugineuse de la Seine en montrant des tendances d'enrichissement ou d'appauvrissement en magnétites similaires à celles que l'on observe pour le fer total et les ETM avec les outils classiques. Elles ont également montré un potentiel de traçage des processus hydrodynamiques et de la charge sédimentaire.

Les propriétés magnétiques donnant les informations les plus précises ne nécessitent que quelques milligrammes de sédiments qui peuvent ensuite être éventuellement réutilisés pour d'autres mesures (magnétiques ou non). Si, au préalable, une caractérisation minéralogique magnétique complète est nécessaire sur des échantillons représentatifs pour s'assurer que la distribution minéralogique est homogène dans tous les échantillons, l'aimantation peut être utilisée comme indice de concentration de particules magnétiques.

Les méthodes magnétiques employées ici ont permis une description satisfaisante en première approximation du fonctionnement du bassin de la Seine et montrent un bon potentiel de traçage environnemental de la Seine.

Perspectives

Dans cette étude, nous nous sommes parfois heurtés à certains écueils liés à la faible quantité de matière récoltée associée à la faible aimantation des échantillons. Les méthodes du magnétisme environnemental telles que nous les avons appliquées ont donc eu leurs limites. Cependant cette étude est la première de cette ampleur menée dans le bassin de la Seine. Elle permet d'envisager des améliorations, d'autres méthodes d'analyse et elle ouvre des perspectives intéressantes.

Parmi les questions qui sont apparues lors de l'étude, une partie doit pouvoir trouver ses réponses en améliorant la méthodologie générale :

Le premier point à améliorer est le protocole d'échantillonnage, dont l'efficacité de piéger correctement la charge fine en suspension est questionnable (au moins en période de hautes eaux). Dans le cas d'un traçage de contribution anthropique, ce potentiel biais n'a apparemment pas posé de problèmes. Dans le cas de l'étude des processus hydrodynamiques, ce biais est problématique car il accentue l'effet de dilution des magnétites en lorsque le débit augmente. Il faudrait alors développer ou utiliser des dispositifs d'échantillonnage plus performants. Nous pouvons par exemple envisager d'utiliser un échantillonneur comme le US-DH48 décrit dans Hickin (1995) ou des dispositifs échantillonnant et filtrant in situ. L'échantillonnage par trappes laissées plusieurs jours serait alors remplacé par un prélèvement direct, éventuellement sur bateau pour sélectionner des emplacements précis de la section. Ce type de protocole est plus onéreux ou nécessitera une logistique et un temps de présence sur le terrain plus conséquent. Les résultats apportés par les deux méthodes pourront ainsi être comparés afin de sélectionner la méthode la plus appropriée.

Le point suivant est l'amélioration de l'estimation des incertitudes des paramètres magnétiques étudiés. Nos estimations se sont basées sur cinq mesures par sites à une période donnée et l'hypothèse a été faite que l'incertitude de chaque paramètre est constante dans le temps. Il faudrait donc systématiquement mesurer la totalité des échantillons étudiés plus de cinq fois pour connaître l'incertitude de chaque paramètre dans chaque site et à chaque période. Si ce travail devait être reproduit dans un autre système fluvial dans le temps imparti à une thèse, l'augmentation du nombre de mesures nécessiterait alors un ajustement du calendrier de prélèvement. Ceci dit, pour la Seine et ses affluents, les échantillons de 2011-2012 existent et, à la lumière des résultats obtenus, il apparaît important de prendre plus de temps pour mener cette analyse statistique sur ces derniers.

L'étude a également montré que la signature de certains environnements de transition manque et nécessite maintenant un échantillonnage supplémentaire. En particulier, les échantillons prélevés en 2015 à l'entrée et dans l'agglomération parisienne permettent une première estimation de l'évolution des particules dans cette partie, mais la fiabilité des résultats est

questionnable en raison du faible nombre d'échantillons et les sites mériteraient d'être échantillonnés à nouveau. Il en va de même pour d'autres environnements comme la transition entre milieu rural/suburbain à Montereau où l'origine exacte de l'augmentation de concentration de magnétite est incertaine.

La présente étude a également permis de montrer qu'il serait plus judicieux d'échantillonner lors de périodes de régimes hydrologiques caractéristiques (crue et étiage), plutôt que de faire un échantillonnage systématique sur de grandes distances tous les mois.

Si l'on peut considérer que le nombre d'échantillons de MES de la Seine est suffisant (hormis dans l'agglomération et certaines zones), le nombre d'échantillons « témoins » ne se limite qu'à ceux des stations d'épuration et des sédiments de fond en milieu semi-naturel. L'échantillonnage d'autres sources naturelles et anthropiques (sols agricoles, retombées atmosphériques dans les milieux urbains/industriels) est nécessaire et a d'ailleurs déjà débuté en parallèle.

Cette étude a permis d'améliorer nos connaissances sur le devenir des particules ferrugineuses dans la Seine. L'étude de la section de Marnay mériterait d'être répétée en hautes eaux avec un protocole d'échantillonnage plus adapté (par exemple celui adopté pour l'échantillonnage le long de la Seine) et d'être ensuite appliqué dans différents environnements. On peut par exemple envisager d'adapter le protocole en zones navigables en installant des trappes à proximité des berges et à différents niveaux de profondeur afin d'essayer d'observer avec les méthodes magnétiques l'effet des aménagements et/ou la navigation sur le transport sédimentaire.

Toujours au sujet du transport des particules, les résultats de granulométrie et concentration de magnétites ne suffisent pas à décrire le devenir des particules de Bougival à Andrésy. Les modèles de calculs intégrant la contribution de la station Seine Aval et de l'Oise suggèrent que si ces deux sources peuvent expliquer une partie de la dilution observée à Andrésy, elles sont généralement insuffisantes et n'expliquent pas, de toute manière, la perte des magnétites grossières propres à l'agglomération parisienne. Notre hypothèse est que ces magnétites grossières se déposent rapidement une fois dans la colonne d'eau ou qu'elles sont bloquées par les différents ouvrages, mais une étude plus focalisée sur cette transition appuyée par des échantillons supplémentaires (MES, sédiments de fond, de berges et dépôts de barrage) devrait apporter une meilleure compréhension du système sous réserve que les conditions d'oxydo-réduction à l'interface eau-sédiment ne perturbent pas les minéraux magnétiques.

Enfin, plusieurs méthodes de mesures magnétiques permettraient d'acquérir des informations supplémentaires sur la minéralogie magnétique. En effet, nous avons traité le signal comme "purement" porté par la magnétite car celle-ci a une aimantation dominante mais d'autres minéraux peuvent être abondants. D'autres techniques sont alors nécessaires pour les identifier. Les mesures de courbes de rémanence à basses températures effectuées par Franke *et al.* (2009) sur les MES de 2001, ont en effet identifié d'autres minéraux que la magnétite, tels que la goéthite et l'hématite et des différences minéralogiques entre la partie amont de la Seine et la partie aval. Ce type de mesure nécessite une certaine quantité de sédiment qui dépend de l'aimantation et qui peut aller jusqu'à 250 mg de MES. Elle devrait donc dans le futur être faisable au moins sur une partie des MES.

Si les résultats obtenus par ces méthodes confirment la prédominance de la magnétite sur l'aimantation des MES de la Seine, l'aimantation à saturation M_s (qui contrairement à l'aimantation rémanente à saturation M_{rs} , n'est pas dépendante de la taille des particules) ou la susceptibilité pourront être utilisés comme indices de concentration.

Dans les futures études, les propriétés magnétiques des MES devront également être comparées aux données chimiques et microscopiques. Nous pouvons par exemple envisager d'effectuer des analyses chimiques de fer et d'ETM avec un spectromètre ICP-MS sur l'ensemble ou sur des extractions séquentielles de MES et comparer les propriétés magnétiques à la spéciation et la concentration de fer total et présent dans chaque fraction. Ceci permettra potentiellement de voir si la fraction paramagnétique est plutôt associée aux sulfures ou aux minéraux argileux.

Bien que des observations au microscope électronique à balayage et comptages des différentes particules magnétiques (selon leur taille, forme et éléments associés) ont été effectués depuis les travaux de Franke *et al.*, (2009), l'opération mériterait d'être répétée et améliorée sur des séries d'échantillons de 2011-2012 représentatives, ou, idéalement, sur les futurs échantillons prélevés avec une méthodologie améliorée. Comme pour les précédentes études, une extraction des minéraux magnétique sera nécessaire. Des observations au microscope électronique en transmission pourront également être effectuées afin de détecter d'éventuelles nanoparticules comme les superparamagnétiques ou les magnétosomes.

Bibliographie

- A.E.S.N. (1978) Les bassins de la Seine et des cours d'eau normands. Agence de l'Eau Seine-Normandie, Nanterre.
- Abad, J.D. & Garcia, M.H. (2009) Experiments in a high-amplitude Kinoshita meandering channel: 1. Implications of bend orientation on mean and turbulent flow structure. *Water Resources Research*, 45, 19 pp.
- AIRPARIF. (2008) Surveillance des métaux dans l'air autour de la Zone industrielle de Montereau-Fault-Yonne.
- AIRPARIF. (2014) Atmosphère capitale.
- Allard, T., Menguy, N., Salomon, J., Calligaro, T., Weber, T., Calas, G. & Benedetti, M.F. (2004) Revealing forms of iron in river-borne material from major tropical rivers of the Amazon Basin (Brazil). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68, n°14, 3079–3094.
- Allen, J.R.L. (1965) A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments. *Sedimentology*, 5, 89–191. Blackwell Publishing Ltd.
- Ayrault, S., Senhou, A., Moskura, M. & Gaudry, A. (2010) Atmospheric trace element concentrations in total suspended particles near Paris, France. *Atmospheric Environment*, 44, 3700–3707.
- Ayrault, S., Le Pape, P., Evrard, O. & Priadi, C.R. (2014) Remanence of lead pollution in an urban river system: a multi-scale temporal and spatial study in the Seine River basin, France. *Environmental Science and Pollution Research*, 21, 4134–4148.
- Baati, S. (2010) Variabilité saisonnière de la fraction métallique des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine. Mémoire de stage de master effectué à l'Ecole des Mines de Paris, Centre des Géosciences, Equipe Géologie & le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE), Equipes Chronomag et TCO, CEA-CNRS-UVSQ, IPSL.
- Backes, C.A., McLaren, R.G., A.W., R. & Swift, R.S. (1994) Kinetics of Cadmium and Cobalt Desorption from Iron and Manganese Oxides. *Soil Science Society of America Journal*, 59, N°3, 778–785.
- Ballini, M., Kissel, C., Colin, C. & Richter, T. (2006) Deep-water mass source and dynamic associated with rapid climatic variations during the last glacial stage in the North Atlantic: A multiproxy investigation of the detrital fraction of deep-sea sediments. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 7, n°2, 16 pp.
- Bastié, J. (1959) Croissance et limites de l'agglomération parisienne. *L'information géographique*, 23, n°3, 107–116.
- Bazylinski, D.A. & Frankel, R.B. (2004) Magnetosome formation in prokaryotes. *Nat. Rev. Microbiol.*, 2, 217–230.

- Beverkog, B. & Puigdomenech, I. (1996) Revised pourbaix diagrams for iron at 25-300°C. *Corrosion Science*, 38, 2121–2135.
- Bian, Y., Ouyang, T., Zhu, Z., Huang, N., Wan, H. & Li, M. (2014) Magnetic properties of agricultural soil in the Pearl River Delta, South China - Spatial distribution and influencing factor analysis. *Journal of Applied Geophysics*, 107, 36–44.
- Bibby, R.L. & Webster-Brown, J.G. (2005) Characterisation of urban catchment suspended particulate matter (Auckland region, New Zealand); a comparison with non-urban {SPM}. *Science of The Total Environment*, 343, 177–197.
- Billen, G. & Garnier, J. (2009) Eutrophisation des cours d'eau dans le bassin de la Seine. Fascicule PIREN n°6.
- Billen, G., Silvestre, M., Barles, S., Mouchel, J.-M., Garnier, J., Curie, F. & Boët, P. (2009) Le bassin de la Seine. Fascicule PIREN n°1.
- Blakemore, R. (1975) MAGNETOTACTIC BACTERIA. *Science*, 190, 377–379.
- Bloemendal, J., King, J.W., Hall, F.R. & Doh, S.-J. (1992) Rock magnetism of Late Neogene and Pleistocene deep-sea sediments: Relationship to sediment source, diagenetic processes, and sediment lithology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97, 4361–4375.
- Brilhante, O., Daly, L. & Trabuc, P., 1989. Application du magnétisme à la détection des pollutions causée par les métaux lourds dans l'environnement. C.R. Acad. Sci. Paris, T 309 II, pp. 2005-2012.
- Bonnot, C. (2015) L'origine des métaux et la dynamique du zinc dans le bassin de la Seine. Institut de Physique du Globe de Paris.
- Boust, D., Fischer, J.-C., Ouddane, B., Petit, F. & Wartel, M. (1999) Fer et manganese : réactivité et recyclages. Programme Seine-Aval.
- Bowles, J.A., Tatsumi-Petrochilos, L., Hammer, J.E. & Brachfeld, S.A. (2012) Multicomponent cubic oxide exsolution in synthetic basalts: Temperature dependence and implications for magnetic properties. *Journal of Geophysical Research*, 117, 10 pp.
- Boyer, F. (2000) Impacts anthropiques. Chapitre 4.1. Evolution historique. PNRZH, projet 07, 93–106.
- Bridge, J. (2003) *Rivers and Floodplains: Forms, Processes and Sedimentary Record*. Blackwell Publishing.
- Bridge, J.S. (1977) Flow, bed topography, grain size and sedimentary structure in open channel bends: a three-dimensional model. *Earth surface processes*, 2, 401–416.
- Brilhante, O., Daly, L., Trabuc, P. (1989) Application du magnétisme à la détection des pollutions causées par les métaux lourds dans l'environnement. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, Série II, 2005-2012.

- Brilhante, O. M. Magnétisme et diagnostic de la pollution particulaire métallique dans l'environnement (1990). Thèse de doctorat en Sciences de l'environnement soutenue à l'Université Paris-Est Créteil Val de Marne.
- Burgers, H. E., Schipper, A. M. & Hendriks, A. J. (2014) Size relationships of water discharge in rivers: scaling of discharge with catchment area, main stem length and precipitation. *Hydrological processes*, 28, 5796-5775.
- Burnol, A., Duro, L. & Grive, M. (2006) *Éléments traces métalliques, Guide méthodologique, Recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines*. rapport d'étude N°INERIS-DRC-06-66246/DESP-R01a.
- Butler, R.F. (1992) *PALEOMAGNETISM: Magnetic Domains to Geologic Terranes*. Blackwell Scientific Publications.
- Campenhout, J., Denis, A.-C., Hallot, E. & Houbrechts, G. (2013) Flux des sédiments en suspension dans les rivières du bassin de la Meuse : proposition d'une typologie régionale basée sur la dénudation spécifique des bassins versants. *BSGLg*, 61, 15–36.
- Carré, C., J.-F., D., Deutsch, J.-C., J.-P., H., Gouvello, B. de, Belaidi, N. & Charrier, A. (2010) Une monographie de l'Orge. Vers l'âge de la maîtrise écologique ? Rapport PIREN Seine 2010,, 74 pp.
- Carré, C., Gouvello, B. de, J.-F., D., Deutsch, J.-C. & J.-P., H. (2011) Les petites rivières urbaines d'Île-de-France. Fascicule PIREN n°11.
- Chaddha, G. & Seehra, M.S. (1983) Magnetic Components and Particle-size Distribution of Coal Fly-ash. *Journal of Physics D-applied Physics*, 16, 1767–1776.
- Chakarvorty, M., Dwivedi, A.K., Shukla, A.D., Kumar, S., Niyogi, A., Usmani, M. & Pati, J.K. (2015) Geochemistry and magnetic measurements of suspended sediment in urban sewage water vis-a-vis quantification of heavy metal pollution in Ganga and Yamuna Rivers, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187.
- Chauvet, H. (2014) *Écoulements secondaires dans les rivières : influence sur le transport de quantité de mouvement et de soluté*. Université Paris Diderot, Sorbonne Paris Cité.
- Chauvet, H., Devauchelle, O., Metivier, F., Lajeunesse, E. & Limare, A. (2014) Recirculation cells in a wide channel. *Physics of Fluids*, 26, 11 pp.
- Chen, H., Laskin, A., Baltrusaitis, J., Gorski, C.A., Scherer, M.M. & Grassian, V.H. (2012) Coal Fly Ash as a Source of Iron in Atmospheric Dust. *Environmental Science & Technology*, 46, 2112–2120.
- Chen, J., Gaillardet, J., Louvat, P. & Huon, S. (2009) Zn isotopes in the suspended load of the Seine River, France: Isotopic variations and source determination. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 4060–4076.
- Chen, J.-B., Gaillardet, J., Bouchez, J., Louvat, P. & Wang, Y.-N. (2014a) Anthropophile elements in river sediments: Overview from the Seine River, France. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15, 4526–4546.

- Chen, J.-B., Busigny, V., Gaillardet, J., Louvat, P. & Wang, Y.-N. (2014b) Iron isotopes in the Seine River (France): Natural versus anthropogenic sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 128, 128–143.
- Chiffolleau, J.-F., Auger, D., Chartier, E., Michel, P., Truquet, I., Ficht, A., Gonzalez, J.-L. & Romana, L.-A. (2001) Spatiotemporal changes in cadmium contamination in the Seine estuary (France). *Estuaries*, 24, 1029–1040.
- Chivot, J. (2004) Fonctions thermodynamiques, diagrammes de solubilité, diagrammes E-pH des systèmes Fe-H₂O, Fe-CO₂-H₂O, Fe-S-H₂O, Cr-H₂O et Ni-H₂O en fonction de la température. ANDRA.
- Chlupacova, M., Hroudá, F., Niznansky, D., Procházka, V., Petakova, Z. & Laufek, F. (2012) Frequency-dependent susceptibility and other magnetic properties of Celtic and Mediaeval graphitic pottery from Bohemia: an introductory study. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 56, 803–825. Springer Netherlands.
- Church, M. (1996) Channel morphology and typology: in, Petts, G., and Calow, P., editors, *River Flows and Channel Forms*.
- Cojan, I. & Renard, M. (1997) *Sédimentologie*. Enseignement des Sciences de la Terre.
- Cowen, R. (1999) *The Age of Iron*, Chapter 5.
- Day, R., Fuller, M. & Schmidt, V.A. (1977) Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13, 260–267.
- Dearing, J.A., Dann, R.J.L., Hay, K., Lees, J.A., Loveland, P.J., Maher, B.A. & O’Grady, K. (1996) Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophysical Journal International*, 124, 228–240. Blackwell Publishing Ltd.
- Dearing, J.A. (1999) *Environmental Magnetic Susceptibility. Using the Bartington MS2 System*. British Library Cataloguing in Publication Data, second edition, 54pp.
- Deleplancque, B. (2016) *Caractérisation des hétérogénéités sédimentaires d’une plaine alluviale : Exemple de l’évolution de la Seine supérieure depuis le dernier maximum glaciaire*. Ecole nationale supérieure des mines de Paris.
- Delmas, M., Cerdan, O., Cheviron, B., Mouchel, J.-M. & Eyrolle, F. (2012) Sediment export from French rivers to the sea. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 754–762. John Wiley & Sons, Ltd.
- Demoisson, F. (2006) Réactivité aux échelles micronique et submicronique de particules colloïdales : oxydation d’un sulfure de fer (pyrite) par du chrome (VI) et sorption sur un hydroxyde d’aluminium (gibbsite) d’espèces organiques. Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Dewan, N., Wang, Y.-Q., Zhang, Y.-X., Zhang, Y., He, L.-Y., Huang, X.-F. & Majestic, B.J. (2016) Effect of Pollution Controls on Atmospheric PM_{2.5} Composition during Universiade in Shenzhen, China. *Atmosphere*, 7, n°57, 14 pp.

- Dieras, P.L. (2013) *The Persistence of Oxbow Lakes as Aquatic Habitats: an Assessment of Rates of Change and Patterns of Alluviation*. Cardiff University.
- Dillon, M. & Franke, C. (2009) Diagenetic alteration of natural Fe–Ti oxides identified by energy dispersive spectroscopy and low-temperature magnetic remanence and hysteresis measurements. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 172, 141–156.
- Dong, C., Zhang, W., Ma, H., Feng, H., Lu, H., Dong, Y. & Yu, L. (2014a) A magnetic record of heavy metal pollution in the Yangtze River subaqueous delta. *Science of The Total Environment*, 476-477, 368–377.
- Dong, C., Zhang, W., He, Q., Dong, Y. & Yu, L. (2014b) Magnetic fingerprinting of hydrodynamic variations and channel erosion across the turbidity maximum zone of the Yangtze Estuary, China. *Geomorphology*, 226, 300–311.
- Dunlop, D.J. (2002) Theory and application of the Day plot (Mrs/Ms versus Hcr/Hc) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107, 22 pp.
- Dunlop, D.J. & Carter-Stiglitz, B. (2006) Day plots of mixtures of superparamagnetic, single-domain, pseudosingle-domain, and multidomain magnetites. *Journal of Geophysical Research-solid Earth*, 111, 10 pp.
- Dunlop, D.J. & Özdemir, Ö. (1997) *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge University Press.
- Dzana, J.-G. (2000) Réponses morphodynamiques d'un hydrosystème à faible énergie aux aménagements hydrauliques: l'exemple de la Seine supérieure (France) / Morphological responses of a low energy hydrosystem to channelisation works: the case study of the upper Seine (France). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 6, n°3, 161–176.
- Dzana, J.-G. & Gaillard, S. (1996) Hydrodynamique et mobilité d'une boucle de méandre au stade du débit à pleins bords. L'exemple de la Seine supérieure. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 2, n°2, 13–27.
- Dzombak, D.A. & Morel, F.M.M. (1990) *Surface complexation modeling: hydrous ferric oxide*. Wiley, New York.
- Egli, R. (2004a) Characterization of Individual Rock Magnetic Components by Analysis of Remanence Curves, 1. Unmixing Natural Sediments. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 48, 391–446. Kluwer Academic Publishers-Plenum Publishers.
- Egli, R. (2004b) Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves. 3. Bacterial magnetite and natural processes in lakes. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29, 869–884.
- Egli, R. (2004c) Characterization of individual rock magnetic components by analysis of remanence curves.: 2. Fundamental properties of coercivity distributions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29, 851–867.

- Einstein, H.A. (1950) The bed-load function for sediment transportation in open channel flows. TECHNICAL BULLETIN, 1026, 74 pp.
- Estèbe, A. (1996) Impact de l'agglomération parisienne et de ses rejets par temps de pluie sur les concentrations en métaux des matières en suspension et des sédiments en Seine en période estivale. Université Paris-XII Val de Marne.
- Evans, M.E. & Heller, F. (2003) Environmental Magnetism, Principles and Applications of Environmagnetics. Academic Press.
- Eyre, J.K. (1997) Frequency dependence of magnetic susceptibility for populations of single-domain grains. *Geophysical Journal International*, 129, 209–211. Blackwell Publishing Ltd.
- Farina, F., Esquivel, D.M.S. & Barros, H.G.P. Lins de. (1990) Magnetic iron-sulphur crystals from a magnetotactic microorganism. *Nature*, 343, 256–258.
- Franciskovic-Bilinski, S., Scholger, R., Bilinski, H. & Tibljas, D. (2014) Magnetic, geochemical and mineralogical properties of sediments from karstic and flysch rivers of Croatia and Slovenia. *Environ Earth Sciences*, 72, 3939–3953.
- Frank, U. & Nowaczyk, N.R. (2008) Mineral magnetic properties of artificial samples systematically mixed from haematite and magnetite. *Geophysical Journal International*, 175, 449–461. Blackwell Publishing Ltd.
- Franke, C., Kissel, C., Robin, E., Bonte, P. & Lacroix, F. (2009) Magnetic particle characterization in the Seine river system: Implications for the determination of natural versus anthropogenic input. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 10, 20 pp.
- Franke, C., Kissel, C., Cojan, I., Konecny, L., Carillo, N. & Martineau, N. (2013) Caractérisation des dynamiques des cycles oxydo-réducteurs du fer en Seine par le développement des traceurs physico-chimiques. Rapport PIREN Seine 2012., 11 pp.
- Gay, A., Cerdan, O., Delmas, M. & Desmet, M. (2014) Variability of suspended sediment yields within the Loire river basin (France). *Journal of Hydrology*, 519, 1225–1237.
- GIP-Seine-Aval. (2013) Du bassin à la baie de Seine. Seine-Aval. Groupement d'intérêt public.
- Gubbins, D. & Herrero-Bervera, E. (2007) *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Springer.
- Guerrini, M.-C., Mouchel, J.-M., Meybeck, M., Penven, M.-J., Hubert, G. & Muxart, T. (1998) La Seine en son bassin. Fonctionnement d'un système fluvial anthropisé. Chapitre I : le bassin de la Seine : la confrontation du rural et de l'urbain. Pp. 29–75 in: *La Seine En Son Bassin. Fonctionnement D'un Système Fluvial Anthropisé*.
- Harrison, R.J. & Feinberg, J.M. (2008) FORCinel: An improved algorithm for calculating first-order reversal curve distributions using locally weighted regression smoothing. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 9, 11 pp.

- Hatfield, R.G., Cioppa, M.T. & Trenhaile, A.S. (2010) Sediment sorting and beach erosion along a coastal foreland: Magnetic measurements in Point Pelee National Park, Ontario, Canada. *Sedimentary Geology*, 231, 63–73.
- Haurine, F. (2015) Caractérisation d'aterrissements d'argiles récents sur le territoire français, en vue de leur valorisation dans l'industrie des matériaux de construction en terre cuite. Ecole nationale supérieure des mines de Paris.
- Heider, F., Zitzelsberger, A. & Fabian, K. (1996) Magnetic susceptibility and remanent coercive force in grown magnetite crystals from 0.1/μm to 6 mm. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 93, 239–256.
- Heslop, D. (2009) On the statistical analysis of the rock magnetic S-ratio. *GJI Geomagnetism, rock magnetism and palaeomagnetism*, 178, 159–161.
- Heslop, D., Dekkers, M.J., Kruiver, P. & Oorschot, I.H.M. van. (2002) Analysis of isothermal remanent magnetization acquisition curves using the expectation–maximization algorithm. *Geophysical Journal International*, 148, 58–64.
- Heslop, D., McIntosh, G. & Dekkers, M.J. (2004) Using time- and temperature-dependent Preisach models to investigate the limitations of modelling isothermal remanent magnetization acquisition curves with cumulative log Gaussian functions. *Geophysical Journal International*, 157, 55–63. Blackwell Science Ltd.
- Hickin, E.J. (1978) Mean flow structure in meanders of the Squamish River, British Columbia. *Can. J. Earth Sci.*, 15, 1833–1849.
- Hickin, E.J. (1995) *River geomorphology*. Publication (International Association of Geomorphologists), Wiley.
- Horowitz, A.J., Meybeck, M., Idlafkih, Z. & Erwan, B. (1999) Variations in trace element geochemistry in the Seine River Basin based on floodplain deposits and bed sediments. *Hydrological Processes*, 13, 1329–1340.
- Hu, P., Liu, Q., Torrent, J., Barron, V. & Jin, C. (2013) Characterizing and quantifying iron oxides in Chinese loess/paleosols: Implications for pedogenesis. *Earth and Planetary Science Letters*, 369–370, 271–283.
- Ingri, J., Widerlund, A., Land, M., Gustafsson, Ö., Andersson, P. & Öhlander, B. (2000) Temporal variations in the fractionation of the rare earth elements in a boreal river; the role of colloidal particles. *Chemical Geology*, 166, 23–45.
- Ingri, J., Malinovsky, D., Rodushkin, I., Baxter, D.C., Widerlund, A., Andersson, P., Gustafsson, Ö., Forsling, W. & Öhlander, B. (2006) Iron isotope fractionation in river colloidal matter. *Earth and Planetary Science Letters*, 245, 792–798.
- Isambert, A., Menguy, N., Larquet, E., Guyot, F. & Valet, J.-P. (2007) Transmission electron microscopy study of magnetites in a freshwater population of magnetotactic bacteria. *AMERICAN MINERALOGIST*, 92, 621–630.

- Jordanova, D., Hoffmann, V. & Fehr, K.T. (2004) Mineral magnetic characterization of anthropogenic magnetic phases in the Danube river sediments (Bulgarian part). *Earth and Planetary Science Letters*, 221, 71–89.
- King, J.W. & Channell, J.E.T. (1991) Sedimentary magnetism, environmental magnetism, and magnetostratigraphy. *Review of Geophysics*, 88, 358–370.
- Kissel, C., Franke, C., Cojan, I., Kayvantash, D., Isambert, A., Carrillo, N. & Wandres, C. (2014) Dynamique spatio-temporelle des phases ferrugineuses dans la matière en suspension en Seine. PIREN-Seine – phase 6 – rapport d’activité 2013.
- Knighton, D. (1998) *Fluvial Forms and Processes : a new perspective*. Arnold, London.
- Kopp, R.E. & Kirschvink, J.L. (2008) The identification and biogeochemical interpretation of fossil magnetotactic bacteria. *Earth-Science Reviews*, 86, 42–61.
- Konecny, L. (2012) Characterization of metallic pollutants in the Seine River: Dynamic of oxido-reduction cycle of iron – Caractérisation des polluants métalliques en Seine: Dynamique des cycles oxydoréducteurs du fer. Technical report No. R120830LKON, Centre de Géosciences, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France, 41 pp.
- Kruiver, P.P., Dekkers, M.J. & Heslop, D. (2001) Quantification of magnetic coercivity components by the analysis of acquisition curves of isothermal remanent magnetisation. *Earth and Planetary Science Letters*, 189, 269–276.
- Lauer, J.W. & Parker, G. (2008) Net local removal of floodplain sediment by river meander migration. *Geomorphology*, 96, 123–149.
- Lecoanet, H., Leveque, F. & Arnbroisi, J.P. (2001) Magnetic properties of salt-marsh soils contaminated by iron industry emissions (southeast France). *Journal of Applied Geophysics*, 48, 67–81.
- Lefèvre-Drouet, E., Rousseau-Djabri, M.F. & Betremieux, R. (1993) Mobilisation du fer et d’autres éléments minéraux majeurs d’un sol en présence d’acide lactique. *Science du sol*, 31, 1/2, 47–58.
- Leopold, L.B. & Wolman, M.G. (1957) River channel patterns: braided, meandering and straight. *Geological survey professional paper 282-B*, 49 pp.
- Leopold, L.B. & Wolman, M.G. (1960) River Meanders. *Geological Society of America Bulletin*, 71 n°6, 769–793.
- Liu, S., Zhang, W., He, Q., Li, D., Liu, H. & Yu, L. (2012) Magnetic properties of East China Sea shelf sediments off the Yangtze Estuary: Influence of provenance and particle size. *Geomorphology*, 119, 212–220.
- Lowrie, W. (1990) Identification of ferromagnetic minerals in a rock by coercivity and unblocking temperature properties. *Geophys. Res. Lett.*, 17, 159–162.
- Luo, C., Mahowald, N., Bond, T., Chuang, P.Y., Artaxo, P., Siefert, R., Chen, Y. & Schauer, J. (2008) Combustion iron distribution and deposition. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, 17 pp.

- Mahowald, N.M., Engelstaedter, S., Luo, C., Sealy, A., Artaxo, P., Benitez-Nelson, C., Bonnet, S., Chen, Y., Chuang, D.D. P. Y. Cohen, Dulac, F., Herut, B., Johansen, A.M., Kubilay, N., Losno, R., Maenhaut, W., Paytan, A., Prospero, J.M., Shank, L.M. & Siefert, R.L. (2009) Atmospheric Iron Deposition: Global Distribution, Variability, and Human Perturbations. *Annual Review of Marine Science*, 1, 245–278.
- Martin, L. (2009) Fonctionnement écologique de la Seine à l’aval de la station d’épuration d’Achères : données expérimentales et modélisation bidimensionnelle. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Maxbauer, A.P., Feinberg, J.M. & Fox, D.L. (2016) Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges. *Earth -Sciences Reviews*, 155.
- Mayergoyz, I.D. (1986) Mathematical Models of Hysteresis. *Transactions on Magnetics*, 22, 603–608.
- McNeil, M.B. & Little, B.J. (1992) Corrosion mechanisms for copper and silver objects in near-surface environments. *Journal of the American Institute for Conservation*, 31, n°3, 355–366.
- Meena, N.K., Maiti, S. & Shrivastava, A. (2011) Discrimination between anthropogenic (pollution) and lithogenic magnetic fraction in urban soils (Delhi, India) using environmental magnetism. *Journal of Applied Geophysics*, 73, 121–129.
- Meybeck, M. (1998) Man and river interface: Multiple impacts on water and particulates chemistry illustrated in the Seine river basin. *Hydrobiologia*, 373-374, 1–20.
- Meybeck, M., Idlafkih, Z., Fauchon, N. & Andreassian, V. (1999) Spatial and temporal variability of Total Suspended Solids in the Seine basin. *Hydrobiologia*, 410, 295–306. Kluwer Academic Publishers.
- Meybeck, M., Horowitz, A.J. & Grosbois, C. (2004) The geochemistry of Seine River Basin particulate matter: distribution of an integrated metal pollution index. *Science of The Total Environment*, 328, 219–236.
- Milliman, J.D. & Syvitski, J.P.M. (1992) Geomorphic/Tectonic Control of Sediment Discharge to the Ocean: The Importance of Small Mountainous Rivers. *The Journal of Geology*, 100, 522–544.
- Mitchell, R.E. (2002) Mechanisms of pyrite oxidation to non slagging species. High Temperature Gasdynamics Laboratory Thermosciences Division, Mechanical Engineering Department, Stanford University, California.
- Morin, G., Le Pape, P., Priadi, C.R., Hochreutener, R., Juillot, F., Gélabert, A. & Ayrault, S. (2012) Dynamique spatiale et temporelle de la spéciation du zinc en Seine. Rapport PIREN Seine 2011, 8 pp.
- Moskowitz, B.M., Frankel, R.B., Flanders, P.J., Blakemore, R.P. & Schwartz, B.B. (1988) Magnetic properties of magnetotactic bacteria. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 73, 273–288.

- Mouchel, J.-M., Billen, G., Maisans, A. & Fresneau-Mitrecey, E. (2008) La qualité des eaux de l'Orge vue par Seneque. Rapport PIREN Seine 2007, 13 pp.
- Mouri, G. (2015) Assessment of spatiotemporal variations in the fluvial wash-load component in the 21st century with regard to GCM climate change scenarios. *Science of The Total Environment*, 533, 238–246.
- Muxworthy, A.R. & Roberts, A.P. (2007) First-Order reversal Curves (FORC) diagrams. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*, Springer, 266–272.
- Necula, C., Dimofte, D. & Panaitou, C. (2015) Rock magnetism of a loess-palaeosol sequence from the western Black Sea shore (Romania). *Geophysical Journal International*, 202, 1733–1748.
- Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993) *Turbulence in Open-Channel Flows*. A. A. Balkema.
- Paccaud, G. & Roulier, C. (2010) Espace nécessaire aux cours d'eau en méandres. Office fédéral de l'environnement. Division Prévention des dangers. Service conseil Zones alluviales.
- Le Pape, P. (2012) Etude de la dynamique, des sources et de la spéciation des éléments traces dans le bassin versant de l'Orge (Essonne, France). Université Paris Sud 11, Orsay, France.
- Le Pape, P., Ayrault, S. & Quantin, C. (2012) Trace element behavior and partition versus urbanization gradient in an urban river (Orge River, France). *Journal of Hydrology*, 472 - 473, 99–110.
- Le Pape, P., Ayrault, S., Michelot, J.-L., Monvoisin, G., Noret, A. & Quantin, C. (2013) Building an isotopic hydrogeochemical indicator of anthropogenic pressure on urban rivers. *Chemical Geology*, 344, 63–72.
- Priadi, C., Ayrault, S., Pacini, S. & Bonte, P. (2011) Urbanization impact on metals mobility in riverine suspended sediment: Role of metal oxides. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 8, 1–18.
- Priadi, C.R. (2010) Caractérisation des phases porteuses: Métaux particuliers en Seine. Ecole Doctorale: Modélisation et Instrumentation en Physique, Energies, Géosciences et Environnement.
- Razik, S., Dekkers, M.J. & Dobeneck, T. von. (2014) How environmental magnetism can enhance the interpretational value of grain-size analysis: A time-slice study on sediment export to the NW African margin in Heinrich Stadial 1 and Mid Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 406, 33–48.
- Roberts, A.P. (2015) Magnetic mineral diagenesis. *Earth-Science Reviews*, 151, 1–47.
- Roberts, A.P., Pike, C.R. & Verosub, K.L. (2000) First-order reversal curve diagrams: A new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105, 28461–28475.

- Roberts, A.P., Liu, Q., Rowan, C.J., Chang, L., Carvallo, C., Torrent, J. & Chong-Shern, H. (2006) Characterization of hematite (α -Fe₂O₃), goethite (α -FeOOH), greigite (Fe₃S₄), and pyrrhotite (Fe₇S₈) using first-order reversal curve diagrams. *Journal of Geophysical Research*, 111, 16 pp.
- Roberts, A.P., Chang, L., Rowan, C.J., Horng, C.-S. & Florindo, F. (2011) Magnetic properties of sedimentary greigite (Fe₃S₄): an update. *Reviews of Geophysics*, 49, 46 pp.
- Roberts, A.P., Chang, L., Heslop, D., Florindo, F. & Larrasoana, J.C. (2012) Searching for single domain magnetite in the “pseudo-single-domain” sedimentary haystack: Implications of biogenic magnetite preservation for sediment magnetism and relative paleointensity determinations. *Journal of Geophysical Research-solid Earth*, 117, 26 pp.
- Robertson, D.J. & France, D.E. (1994) Discrimination of remanence-carrying minerals in mixtures, using isothermal remanent magnetisation acquisition curves. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 82, 223–234.
- Rosgen, D.L. (1994) A classification of natural rivers. *Catena*, 22, 169–199.
- Rouillard, J., Benoit, P. & Morera, R. (2011) L'eau dans les campagnes du bassin de la Seine avant l'ère industrielle. Fascicule PIREN n°10.
- Roy, S., Gaillardet, J. & Allègre, C.J. (1999) Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine River, France: anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 1277–1292.
- Rozovskii, I.L. (1957) Flow of Water in Bends of Open Channels. Acad. Sci.d of Ukraine, Kiev.
- Sadeghi, S.H. & Zakeri, M.A. (2015) Partitioning and analyzing temporal variability of wash and bed material loads in a forest watershed in Iran. *Journal of Earth System Science*, 124, 1503–1515.
- Sakan, S., Popovic, A., Anelkovic, I. & Djorevic, D. (2016) Aquatic sediments pollution estimate using the metal fractionation, secondary phase enrichment factor calculation, and used statistical methods. *Environmental Geochemistry and Health*, 38, 855–867.
- Salomons, W. & Förstner, U. (1984) *Metals in the hydrocycle*. Springer-Verlag, Berlin.
- Sherriff, S. C. (2014) *Geomorphological Techniques*, Chap 1.4, Sec. 1. Environmental Magnetism: Sediment Source Tracing.
- Schott, C., Mignolet, C. & Benoît, M. (2009) Agriculture du bassin de la Seine. Fascicule PIREN n°5.
- Schulte, E.E. (1992) *Soils and Applied Iron. Understanding plant nutrients*, 2.
- Schumm, S.A. (1963) A tentative classification of alluvial river channels. *Geological Survey Circular*, 477, 16 pp.

- Schumm, S.A. (1981) Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. SEPM Special Publication, N°31, 19–29.
- Sinex, S.A. & Wright, D.A. (1988) Chesapeake & San Francisco Bays Distribution of trace metals in the sediments and biota of Chesapeake Bay. *Marine Pollution Bulletin*, 19, 425–431.
- Smith, C.E. (1998) Modeling high sinuosity meander in a small flume. *Geomorphology*, 25, 19–30.
- Strzyszczyk, Z., Magiera, T. & Heller, F. (1996) The influence of industrial immissions on the magnetic susceptibility of soils in upper Silesia. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 40, 276–286. Kluwer Academic Publishers.
- Sukhodolov, A.N. (2012) Structure of turbulent flow in a meander bend of a lowland river. *Water Resources Research*, 48, 21 pp.
- Taylor, S.N., Lagroix, F., Rousseau, D.-D. & Antoine, P. (2014) Mineral magnetic characterization of the Upper Pleniglacial Nussloch loess sequence (Germany): an insight into local environmental processes. *Geophysical Journal International*, 199, 1463–1480.
- Tessier, L. (2003) Transport et caractérisation des matières en suspension dans le bassin versant de la Seine : identification de signatures naturelles et anthropiques. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Thévenot, D.R., Moilleron, R., Lestel, L., Gromaire, M.-C., Rocher, V., Cambier, P., Bonté, P., Colin, J.L., Pontevès, C. de & Meybeck, M. (2007) Critical budget of metal sources and pathways in the Seine River basin (1994–2003) for Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn. *Science of the Total Environment*, 375, 180–203.
- Thévenot, D.R., Lestel, L., Tusseau-Vuillemin, M.-H., Gonzalez, J.-L. & Meybeck, M. (2009) Les métaux dans le bassin de la Seine. Fascicule PIREN n°7.
- Thompson, R. & Oldfield, F. (1986) *Environmental Magnetism*. Allen and Unwin Ltd, London.
- Tilston, M. & Biron, P.M. (2006) Structure de l'écoulement tridimensionnel, turbulence et contrainte de cisaillement dans une boucle de méandre. *Géographie physique et Quaternaire*, 60, n°3, 225–239.
- Tockner, K., Uehlinger, U. & Robinson, C.T. (2009) *Rivers of Europe*. Elsevier Academic Press.
- Tricart, J. & Hirsch, F. (1960) Relations entre le débit et la superficie des bassins fluviaux. In: *Annales de Géographie*. T. 69, N°375. PP. 449-461.
- Vasiliev, I., Dekkers, M.J., Krijgsman, W., Franke, C., Langereis, C.G. & Mullender, A.T. (2007) Early diagenetic greigite as a recorder of the palaeomagnetic signal in Miocene–Pliocene sedimentary rocks of the Carpathian foredeep (Romania). *Geophysical Journal International*, 171, 613–629.

- Verosub, K.L. & Roberts, A.P. (1995) Environmental magnetism: Past, present, and future. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100, 2175–2192.
- Viennot, P., Ducharne, A., Florence, H., Lamy, F. & Ledoux, E. (2009) Hydrogéologie du bassin de la Seine. Fascicule PIREN n°2.
- Vilmin, L. (2014) Modélisation du fonctionnement biogéochimique de la Seine de l'agglomération parisienne à l'estuaire à différentes échelles temporelles. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Vilmin, L., Flipo, N., Fouquet, C. de & Poulin, M. (2014) Pluri-annual sediment budget in a navigated river system: The Seine River (France). *Science of The Total Environment*, 502, 48–59.
- Vizier, J.-F. (1978) Etude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau. Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar. *Cahier ORSTOM. Série Pédologie*, 16, n°1, 23–41.
- Vu, H.P., Shaw, S., Brinza, L. & Benning, L.G. (2013) Partitioning of Pb(II) during goethite and hematite crystallization: Implications for Pb transport in natural systems. *Applied Geochemistry*, 39, 119–128.
- Vuori, K.-M. (1995) Direct and Indirect effects of iron on river eco systems. *Annales Zoologici Fennici*, 32, 317–329.
- Walden, J., Oldfield, F. & Smith, J. (1999) Environmental magnetism: a practical guide. *Technical Guide n°6. Quaternary Research Association, London*, 243 pp.
- Walling, D.E., Peart, M.R., Oldfield, F. & Thompson, R. (1979) Suspended sediment sources identified by magnetic measurements. *Nature*, 281, 110–113.
- Waychunas, G.A., Kim, C.S. & Banfield, J.F. (2005) Nanoparticulate Iron Oxide Minerals in Soils and Sediments: Unique Properties and Contaminant Scavenging Mechanisms. *Journal of Nanoparticle Research*, 7, 409–433.
- Wentworth, C.K. (1922) A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*, 30, 377–392. University of Chicago Press.
- Westphal, M. (1986) Paléomagnétisme et magnétisme des roches.
- Williams, G.P. (1989) Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111, 89–106.
- Worm, H.-U. (1998) On the superparamagnetic stable single domain transition for magnetite, and frequency dependence of susceptibility. *Geophysical Journal International*, 133, 201–206.
- Zhang, C., Qiao, Q., Piper, J.D.A. & Huang, B. (2011) Assessment of heavy metal pollution from a Fe-smelting plant in urban river sediments using environmental magnetic and geochemical methods. *Environmental Pollution*, 159, 3057–3070.

- Zhang, C., Appel, E. & Qiao, Q. (2012) Heavy metal pollution in farmland irrigated with river water near a steel plant—magnetic and geochemical signature. *Geophysical Journal International*, 192, 963–974.
- Zhang, C., Appel, E. & Qiao, Q. (2013) Heavy metal pollution in farmland irrigated with river water near a steel plant—magnetic and geochemical signature. *Geophysical Journal International*, 192, 963–974.

Annexes

Annexe A : Estimation des paramètres spatiaux aux points d'échantillonnage

L'ensemble des paramètres hydrologiques provient des données de stations de mesures implantées le long des cours d'eau du bassin de la Seine. Dans le cadre de ce travail, nous avons besoin de les connaître aux points d'échantillonnage qui peuvent être éloignés des stations de mesure.

Cette annexe est consacrée à l'acquisition des paramètres spatiaux que sont la localisation d'un site sur le tracé curviligne d'un cours d'eau et la mesure du bassin versant en ce point. Ces données sont indispensables à la représentation graphique des résultats le long des cours d'eau et au calcul des débits spécifiques (débit/surface du bassin versant).

Nous présentons dans ce qui suit les méthodes utilisées pour l'acquisition de ces deux paramètres. Celles-ci s'appuient sur les données des stations de mesures hydrologiques (Banque Hydro) et celles sur les bassins versants (Banque Hydro, Sandre) qui seront présentées dans le texte.

1) Localisation des sites sur un cours d'eau

Nous avons identifié trois types de sites (Figure A.1):

- Les stations hydrologiques
- Les confluences
- Les sites d'échantillonnage

Toutes les données géographiques sont exprimées dans le référentiel français Lambert 2 étendu.

Pour le premier type, les coordonnées des stations hydrologiques sont fournies par la Banque Hydro (<http://www.hydro.eaufrance.fr/>) en Lambert II étendu. Leur projection en carte a permis de s'assurer que toutes les stations étaient correctement géolocalisées et de corriger certaines erreurs (Tableau A.1).

Tableau A.1 : Stations hydrologiques dont les coordonnées ont été modifiées.

Station hydrologique	Cours d'eau	XBanque hydro L2 étendu	Y Banque hydro L2 étendu	X modifié L2 étendu	Y modifié L2 étendu	pK (km)
Rouen	Seine	499 000	2 400 000	508 211	2 494 734	654
Caudebec-en-Caux	Seine	200 000	2 200 000	482 440	2 504 149	723
Havre	Seine	300 000	2 300 000	454 083	2 497750	761

Les coordonnées des confluences majeures de la Seine sont répertoriées dans la base de données Carthage (cours d'eau de France, <http://professionnels.ign.fr/bdcarthage>). Pour les confluences mineures ou les confluences de petites rivières, les coordonnées GPS WGS84 ont été obtenues sur Google Earth.

Les coordonnées GPS WGS84 des sites ont été relevées lors des échantillonnages.

L'ensemble des coordonnées a été converti si nécessaire et est présenté dans les Tableaux A.10 et Tableau A.11 en fin de cette annexe.

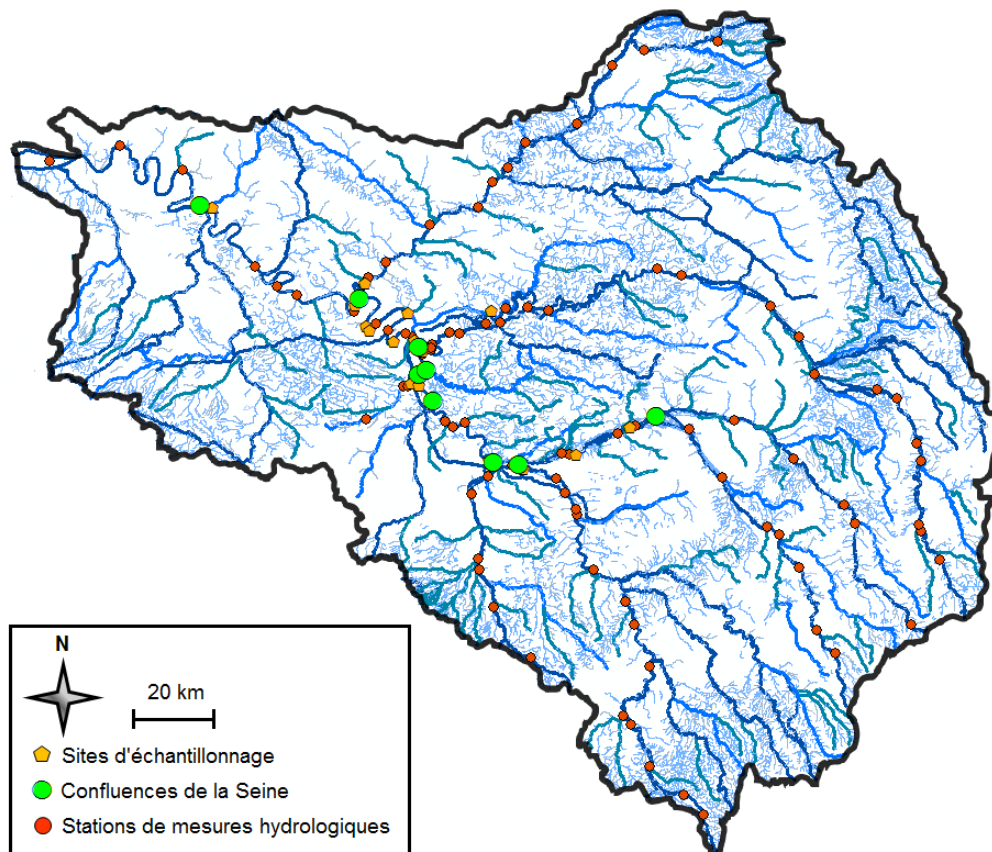


Figure A.1 : localisation des sites d'échantillonnages et des stations de mesures hydrologiques de la Banque Hydro.

Le calcul des abscisses curvilignes des stations, confluences et sites a été réalisé à partir d'un programme développé sous Scilab par O. Stab en 2006 (Programme Géosciences, MINES-ParisTech). Le programme permet une conversion d'un référentiel 2D vers 1D : le point de mesure est projeté sur le point du tracé le plus proche ce qui permet de lui attribuer une abscisse curviligne fiable. Pour chaque cours d'eau, l'origine ($pK=0$) est la source du cours d'eau.

Dans cette étude, nous avons utilisé la base de données Carthage qui fournit pour chaque cours d'eau un tracé digitalisé. Il convient de noter que les points référencés ne sont pas équidistants au sein d'un cours d'eau et entre cours d'eau ce qui peut conduire à de légères distorsions dans les projections.

2) Calcul des bassins versants

En fonction de la position du site d'échantillonnage par rapport aux stations hydrologiques et aux confluences, nous avons établi deux méthodes de calcul : une régression ou interpolation linéaire entre les points où le bassin versant (BV) est connu et une interpolation au travers d'un module incorporant les informations des affluents.

Après une présentation de ces deux méthodes, nous détaillons par cours d'eau, la méthodologie retenue pour chacun des sites d'échantillonnage.

1. Méthodologie

1. Régression linéaire à partir des données de station hydrologique

Considérons une section de cours d'eau sans affluents modifiant de façon significative l'aire drainée, par exemple le segment de la Seine entre les confluences de la Marne et de l'Oise. Ce segment est ainsi limité par deux points, la confluence amont de la Marne et la confluence aval de l'Oise. La surface du bassin versant augmente linéairement avec la distance ($R^2 > 0,9$, Figure A.2).

On peut donc utiliser l'équation de régression linéaire spécifique au segment sur lequel se trouvent le(s) site(s) d'étude pour calculer la surface du bassin versant de chacun des sites du segment étudié.

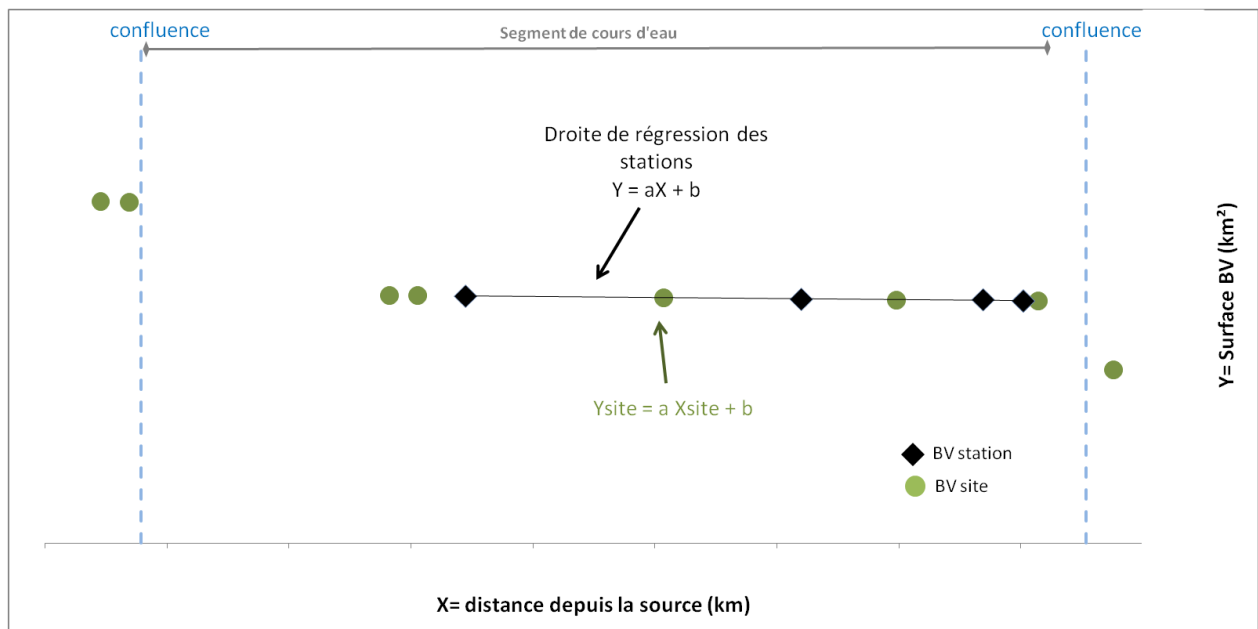


Figure A.2 : Exemple théorique de l'estimation de la surface du bassin d'un site à une distance X à partir de la droite de régression $Y = aX+b$ des stations hydrologiques référencées.

Lorsque le nombre de stations du segment est faible (par exemple pour le segment de la Seine entre l'Orge et l'Yerres), les points de confluence sont rajoutés. Pour ceux-ci, on estime la surface du BV du cours d'eau principal en soustrayant celle du BV de l'affluent concerné (station aval) ou en l'additionnant (station amont, Figure A.3)

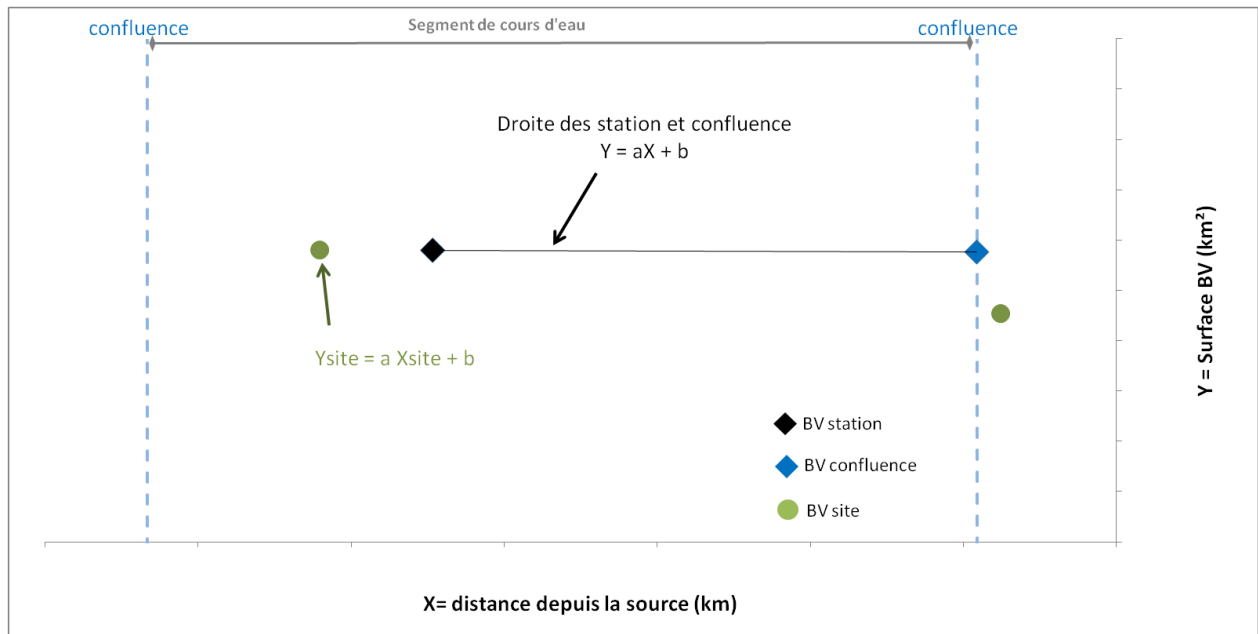


Figure A.3 : Estimation de la surface du bassin d'un site à une distance X à partir de la droite de régression $Y=aX+b$ des stations hydrologiques référencées et des confluences.

2. Régression linéaire intégrant stations hydrologiques et données des affluents

L'interpolation linéaire avec les données des stations n'est pas possible lorsqu'une ou plusieurs confluences se trouvent entre le point de mesure et les stations hydrologiques qui encadrent ce site. Il faut donc intégrer les bassins versants des affluents concernés et construire les droites de régression à partir de ces données. Les valeurs de bassins versants des affluents sont disponibles dans le site du Sandre (<http://www.sandre.eaufrance.fr/>).

Le site de Saron (Aube) illustre parfaitement ce cas, puisque le segment concerné n'a pas de station de mesure. Entre le site et la station la plus proche viennent se jeter deux affluents. Dans ce cas la droite de régression est construite à partir de la valeur du bassin versant à la station hydrologique amont, complétée par celles obtenues aux confluences en ajoutant à la valeur de la station celle de chacun des affluents. Dans le cas de Saron, à la dernière confluence, c'est l'Aube qui se jette dans la Seine, la Banque de données Sandre nous fournit alors directement la valeur du bassin versant de la Seine à la confluence. Dans cette approche, on considère que l'accroissement du bassin versant entre deux confluences peut être négligé. (Figure A.4).

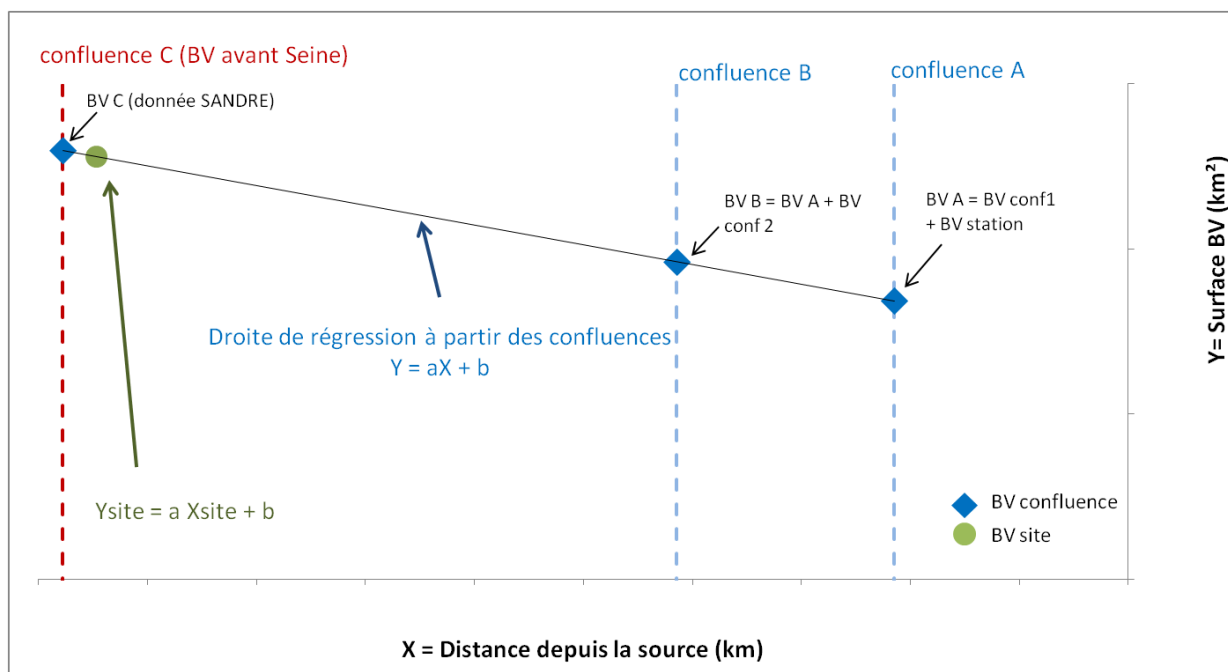


Figure A.4 : Estimation de la surface du bassin d'un site séparé des stations hydrologiques par des confluences.

2. Calculs pour les différents cours d'eau

1. La Seine

L'échantillonnage le long de la Seine est le plus riche avec 14 sites qui comprennent les 9 sites de la campagne 2011-2012 et les 5 sites de la campagne de mars 2015. C'est également sur ce cours d'eau que le nombre de stations hydrologiques est le plus important (32).

Les données de bassin versant mettent en évidence l'apport des affluents majeurs, et permettent de séparer la Seine en huit segments, caractérisés chacun par une droite de régression dont les variations de pente traduisent l'influence des affluents mineurs (Figure A.5).

Les sites d'échantillonnage appartiennent aux segments 2, 4, 5, 6, 7, 8, et 9.

- Bassin versants estimés à partir des stations hydrologiques :

Les segments 1, 2, 3, 4, 8, 9 et 10 sont suffisamment documentés en données de bassin versants ce qui permet d'effectuer une extrapolation linéaire simple. L'estimation de la surface des bassins versants est considérée comme fiable car les coefficients de détermination R^2 , sont supérieurs à 0,92, (Tableau A.2).

Les calculs sont ensuite effectués pour les sites appartenant à ces segments.

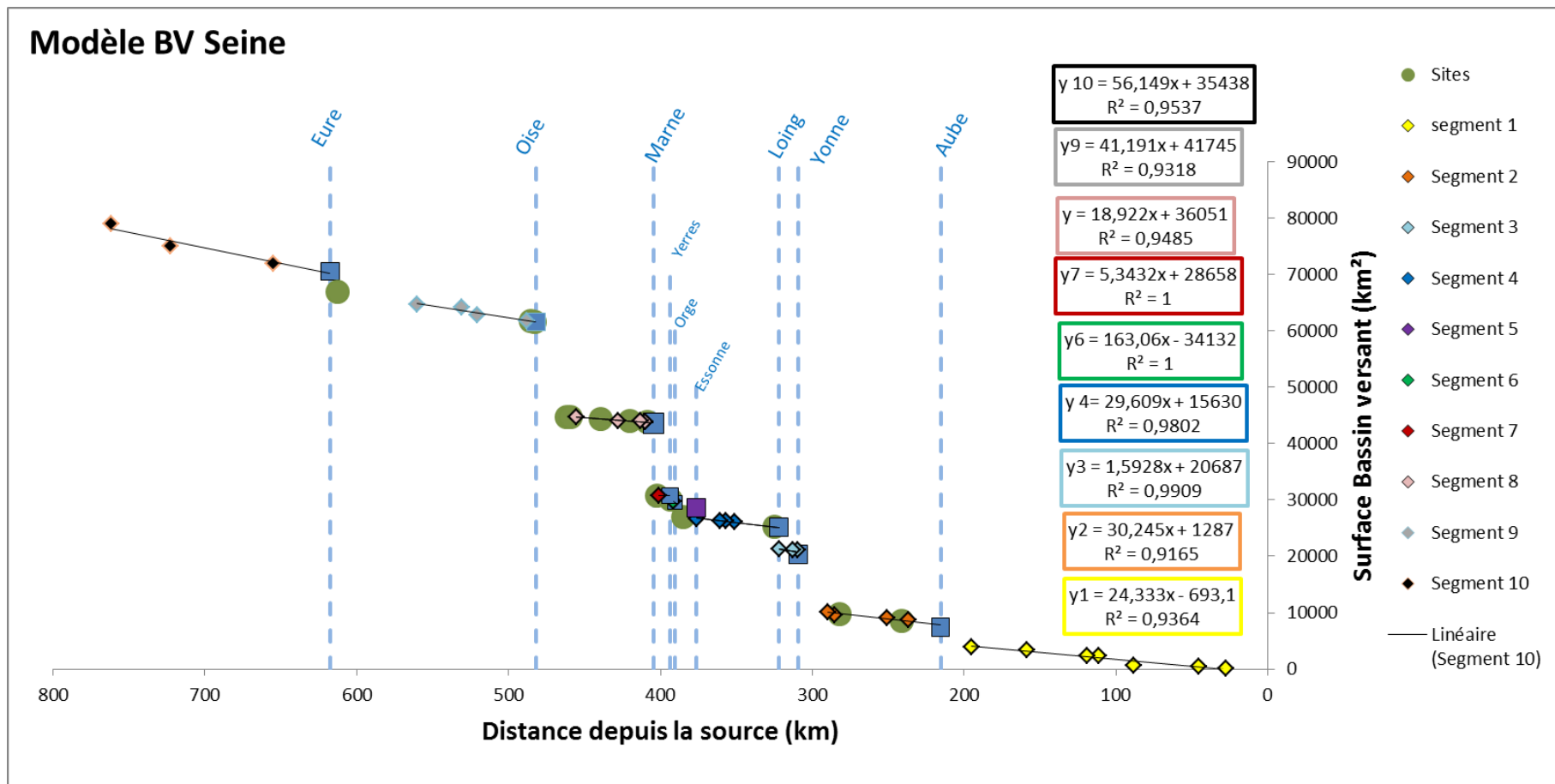


Figure A.5 : Evolution amont aval du bassin versant de la Seine (les losanges représentent les stations hydrologiques et les carrés les confluences).

Tableau A.2 : Segments de la Seine modélisés par régression linéaire simple et calcul des bassins versants des sites concernés.

Segment	N points	a	b	R ²
1-Source à Aube	7	24,33	-693	0,93
2- Aube à Yonne	5	30,25	1287	0,92
3- Yonne à Loing	4	1,59	20687	0,99
4-Loing à Essonne	5	29,61	15630	0,98
8-Marne à Oise	6	18,92	36051	0,95
9-Oise à Eure	5	41,19	41745	0,93
10-Eure à exutoire	4	56,15	35438	0,95

Sites	N°site	Segment	BV calculé (km ²)
Marnay	2	2	8576
Jaulnes	3	2	9845
Thomery	6	4	25259
Draveil	7	5	27024
Paris BFM	12	8	43782
Issy-les-Moulineaux	13	8	44002
L'Ile-st-Denis	14	8	44363
Bougival VNF	17	8	44745
Bougival Pointe	16	8	44788
Andrézy	18	9	61645
Denouval	19	9	61741
Amfreville	20	9	66970

- *Bassins versants estimés à partir des données des stations hydrologiques et des affluents*

Entre le Loing et la Marne viennent se jeter dans la Seine, d'amont en aval l'Essonne (1870 km²), l'Orge (952 km²) et l'Yerres (1020 km²). Ces affluents ont permis de composer quatre segments, dont les trois derniers (5, 6 et 7) sont peu voire non fournies en stations hydrologiques. L'estimation des bassins versants de ces trois segments se fait donc nécessairement avec les bassins versants de la Seine aux confluences et si les données existent avec les bassins versants des stations hydrologiques. Dans le cas du segment 5 où aucune station n'est disponible, on considère alors que le bassin versant du site est égal à celui de la Seine et de l'Essonne (Tableau A.3).

Tableau A.3 : Segments modélisés avec deux ou un seul point.

Segment	Type de calcul	N points	a	b
5-Essonne à Orge	On considère que BV _{site} = BV Seine+Essonne	1		
6 : Orge à Yerres	Extrapolation avec station et BV en aval de l'Orge	2	163,06	-34132
7 : Yerres à Marne	Extrapolation avec station et BV en aval de l'Yerres	2	5,34	28658

Sites	N°	Segment	BV calculé (km ²)
Draveil	7	5	28580
Villeneuve	9	6	30034
Alfortville	10	7	30808

2. La Marne

23 stations hydrologiques sont présentes sur le cours de Marne (Figure A.6). Le schéma d'évolution de son bassin versant est très semblable à celui de la Seine. Le site échantillonné se trouve sur le segment entre la confluence du Grand Morin avec la Marne et celle de la Marne avec la Seine. 8 stations hydrologiques se trouvent sur ce segment. L'estimation par régression linéaire est fiable car la droite de régression possède un bon coefficient de détermination ($R^2 = 0,93$). La valeur du bassin versant est fournie dans le Tableau A.4.

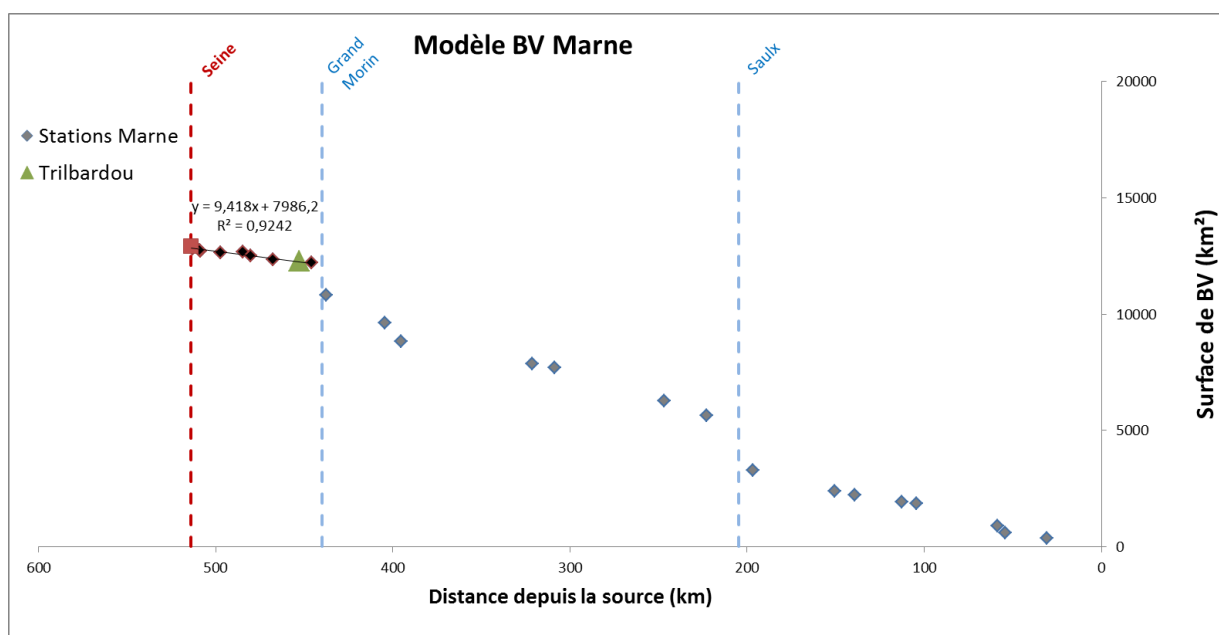


Figure A.6 : Evolution amont aval du bassin versant de la Marne.

Tableau A.4 : Méthode et calcul du bassin versant de Trilbardou (Marne).

Segment	Type de calcul	N points	a	b	R ²
Grand Morin à Seine	Régression simple	9	9,42	7986	0,92

Stations	Surface (km ²)
Condé-Sainte-Libiaire	12203
Chalifert	12326
Noisiel	12500
Joinville-le-Pont	12639
Gournay-sur-Marne	12660
Saint-Maur-des-Fossés	12721
Saint-Maurice	12728
Créteil	12816
Confluence Seine	12920

Site	N°	Surface calculée (km ²)
Trilbardou	11	12262

3. L'Oise

De nombreuses stations hydrologiques (11) sont également présentes sur le cours de l'Oise (Figure A.7). Le schéma d'évolution de son bassin versant est très semblable à ceux de la Seine et de la Marne. Le site de Pontoise se situe à moins d'un kilomètre à l'amont d'une station hydrologique mais la Viosnes, affluent de l'Oise se jette entre les deux. Connaissant le bassin versant de la Viosnes (193 km²), on estime directement le Bassin versant du site à partir de la relation ci-dessous :

$$BV_{\text{site Pontoise}} \approx BV_{\text{station Pontoise}} - BV_{\text{Viosnes}} = 16908 - 193 = 16715 \text{ km}^2 \text{ (Tableau A.5).}$$

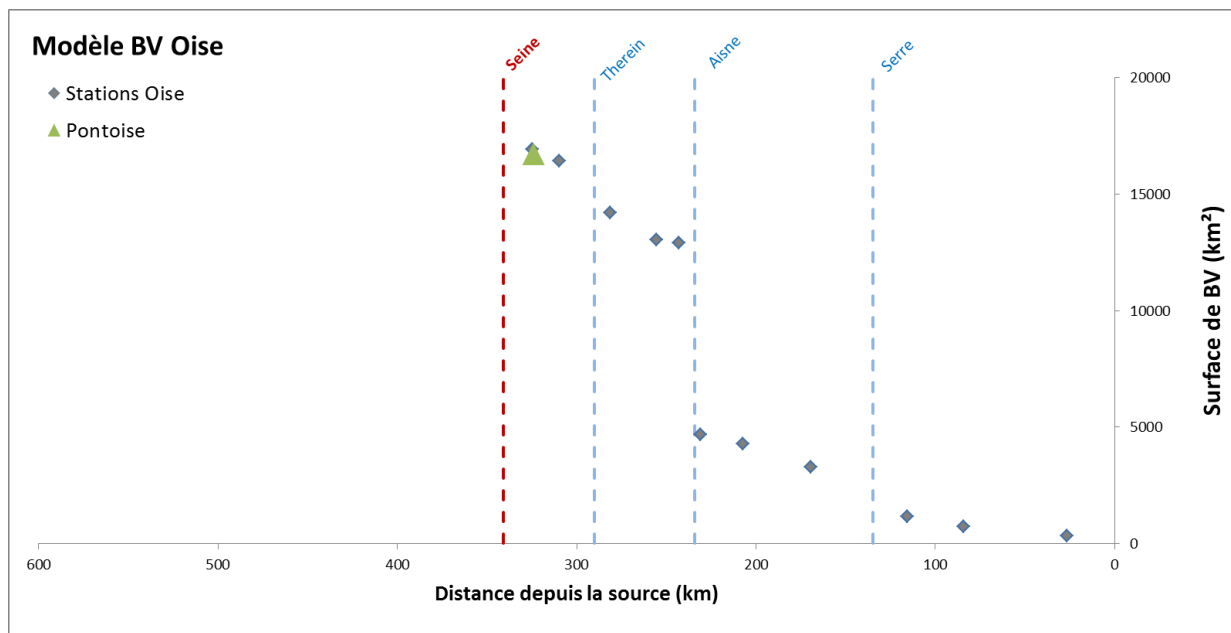


Figure A.7 : Evolution amont aval du bassin versant de l'Oise.

Tableau A.5 : Méthode et calcul du bassin versant de Pontoise (site).

Sites	Surface (km ²)
Pontoise (station)	16908
BV de la Viosne	193

Site	N°	Surface calculée (km ²)
Pontoise	17	16715

4. L'Yonne

Bien que l'Yonne possède 13 stations hydrologiques, elles se trouvent toutes à l'amont du site échantillonné (Cannes-Ecluse). La plus proche est à 20 km (Courlon-sur-Yonne).

L'Yonne ne possède pas d'affluent majeur entre Courlon-sur-Yonne et la confluence de la Seine. La droite de régression construite à partir des quatre stations hydrologiques les plus proches de Cannes-Ecluse et du bassin de l'Yonne à la confluence possède un fort coefficient de détermination ($R^2=0,92$; Figure A.8).

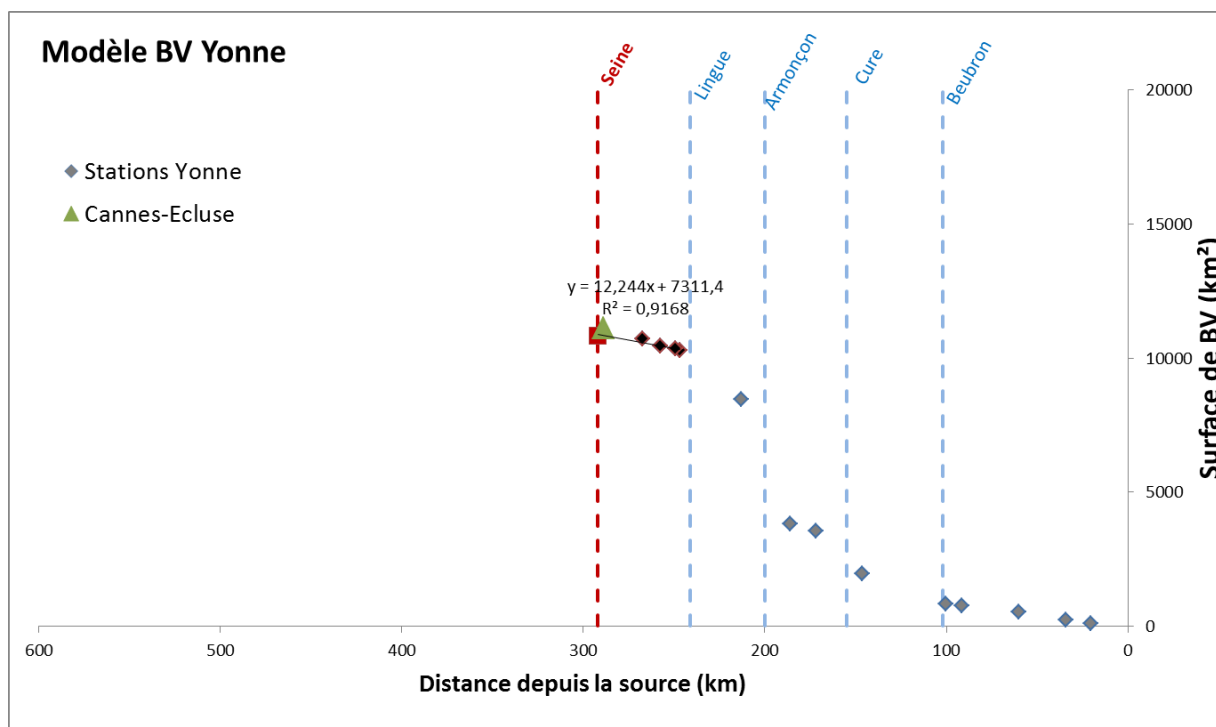


Figure A.8 : Evolution amont aval du bassin versant de l'Yonne.

Tableau A.6 : Méthode et calcul du bassin versant de Cannes-Ecluse.

Segment	Type de calcul	N points	a	b	R ²
Lingue à Seine	Régression simple	5	12,24	7311	0,92

Stations	Surface (km ²)
Sens	10289
Saint-Martin-du-Tertre	10345
Pont-sur-Yonne	10462
Courlon-sur-Yonne	10700
Confluence Seine	10836

Site	N°	Surface calculée (km ²)
Cannes-Ecluse	4	11102

5. L'Aube

Le site de Saron se situe à un kilomètre en amont de la confluence avec la Seine. Comme expliqué dans la partie 2.1.2, l'estimation du bassin versant de l'Aube à Saron est plus complexe que pour les autres affluents majeurs de la Seine. L'une des raisons est le nombre plus restreint de stations hydrologiques (5) qui ne permettent pas d'illustrer correctement les variations de bassin versant en fonction des affluents (Figure A.9). La seconde est qu'entre Saron et la station la plus proche, située à Arcis-sur-Aube (BV = 3590 km²) se jettent l'Herbissonne et la Barbuise, dont les surfaces de bassin versant sont respectivement de 95 et 235 km² d'après le Sandre. Le bassin versant de l'Aube est évalué à 4595 km². On connaît donc les valeurs de trois points de la droite de régression qui concerne le site ce qui nous permet d'utiliser la méthode de calcul décrite en 2.1.2 et d'obtenir une valeur de la surface du bassin versant de l'Aube à Saron : 4570 km² (Tableau A.7)

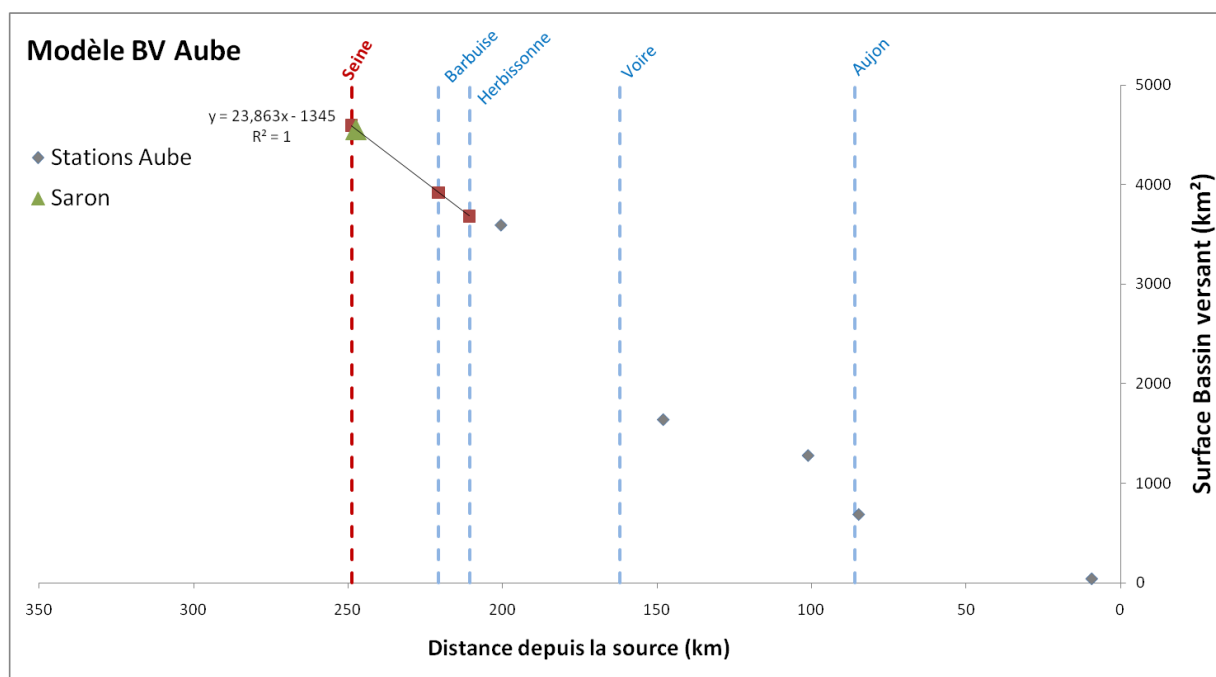


Figure A.9 : Evolution amont aval du bassin versant de l'Aube.

Tableau A.7 : Méthode et calcul du bassin versant de Saron.

Segment	Type de calcul	N points	a	b	R ²
Herbissonne à Seine	Extrapolation avec confluents et BV d'Arcis-sur-Aube	4	19,45	-1345	1

Points	Surface (km ²)
Arcis-sur-Aube	3590
Conf. Herbissonne	3590+95
Conf. Barbuise	3590+95+235
Conf. Seine	4595

Site	N°	Surface calculée (km ²)
Saron	1	4558

6. Le Loing

Le Loing à Saint-Mammès est à environ 5 km de la confluence avec la Seine et le cours d'eau comporte 6 stations (Figure A.10). La droite de régression est calculée à partir des données des deux stations amont les plus proches, plus la surface totale du Loing à la confluence de la Seine (BV = 4150 km² d'après le Sandre). Le coefficient R² élevé (0,99), associé à l'absence d'affluents majeurs entre ces points permet une bonne estimation du bassin versant du Loing à Saint-Mammès : 4072 km² (Tableau A.8).

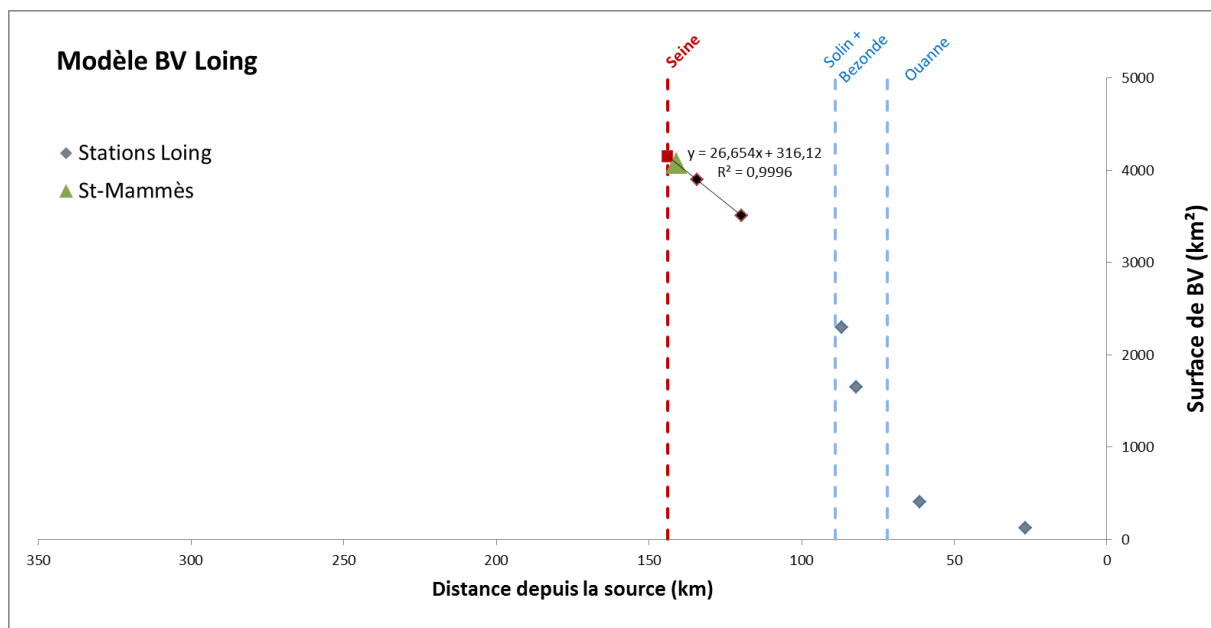


Figure A.10 : Evolution amont aval du bassin versant du Loing.

Tableau A.8 : Méthode et calcul du bassin versant de St-Mammès.

Segment	Type de calcul	N points	a	b	R ²
Bezonde à Seine	Extrapolation avec stations et BV à l'exutoire	3	26,65	316	1

Points	Surface (km ²)
Nemours	3505
Episy	3900
Conf. Seine	4150

Site	N°	Surface calculée (km ²)
St-Mammès	5	4558

7. L'Orge

L'Orge étant une petite rivière (53 km de long), son nombre de stations est limité à trois (Figure A.11). Le point d'échantillonnage, situé à Viry-Châtillon, se trouve en aval de la station de Morsang-sur-Orge, sur un segment qui ne présente pas d'affluent (la confluence avec l'Yvette, affluent principal de l'Orge se trouve à l'amont de la station). Le bassin versant est calculé par interpolation entre la valeur du bassin versant de l'Orge à la station de Morsang-sur-Orge à sa confluence avec la Seine (Tableau A.9).

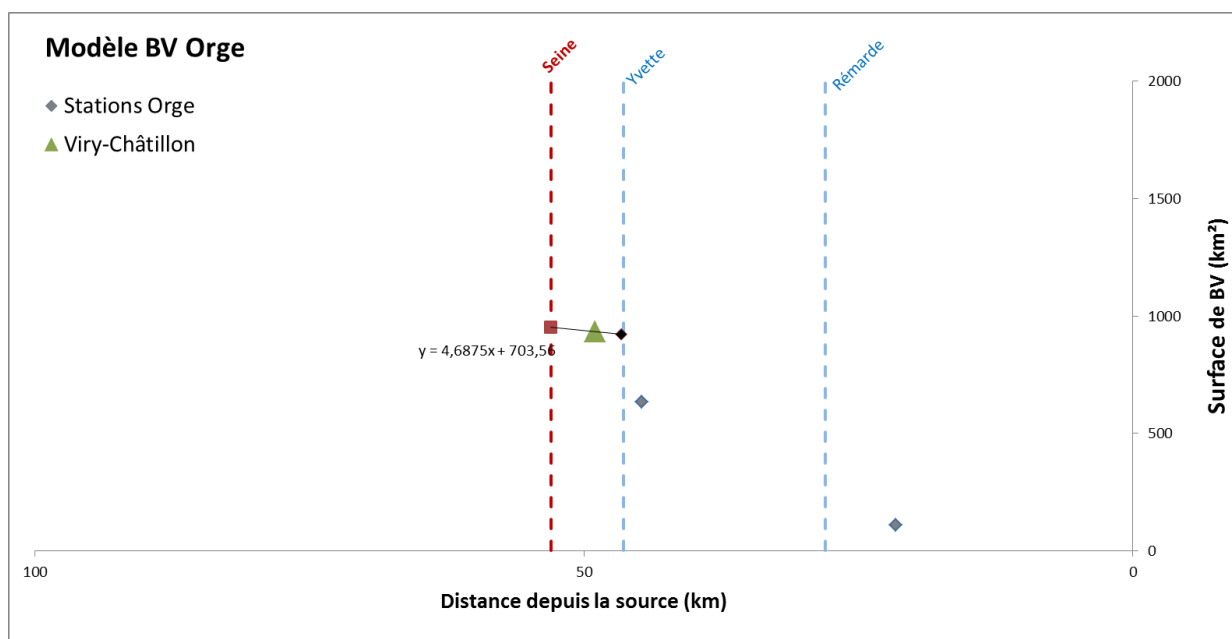


Figure A.11 : Evolution amont aval du bassin versant de l'Orge.

Tableau A.9 : Méthode et calcul du bassin versant de Viry-Châtillon.

Segment	Type de calcul	N points	a	b	R ²
Yvette à Seine	Extrapolation avec station amont et BV à l'exutoire	2	4,69	704	1

Points	Surface (km ²)
Morsang-sur-Orge	922
Conf. Seine	952

Site	N°	Surface calculée (km ²)
Viry-Châtillon	8	933

3) Synthèse

Les données des stations hydrologiques, des confluences ainsi que les résultats des calculs pour les stations hydrologiques, confluences et points de mesure sont présentés dans les tableaux ci-dessous (Tableaux A.10 et A.11).

Nous disposons ainsi pour chaque jeu de données d'une localisation en Lambert 2 étendu, d'une abscisse curviligne (pK calculé à partir de la source) et d'une surface de Bassin versant. Ces données sont indispensables pour calculer par exemple les débits spécifiques.

Tableau A.10 : Récapitulatif des données XY, pK et surfaces de bassins versants de toutes les stations et les points de confluence utilisés dans le modèle.

Station / Confluence	Cours d'eau	x L2 étendu	Y L2 étendu	pK (km)	BV (km ²)
Auberive	Aube	805615	2312260	9,2	44
Longchamp-sur-Aujon (total)	Aube	782920	2353350	84,6	689
Bar-sur-Aube	Aube	778245	2360500	101,0	1280
Blaincourt-sur-Aube	Aube	757378	2379134	147,9	1640
Arcis-sur-Aube	Aube	733353	2394788	200,4	3590
Confluence Herbissonne	Aube	727217	2396590	210,7	3685
Confluence Barbuise	Aube	720195	2395792	220,7	3920
Confluence Aube dans Seine	Aube	702643	2393444	248,9	4595
Saint-Martin-des-Champs	Loing	651350	2297500	26,6	125
Montbouy	Loing	636303	2318050	61,4	409
Montargis	Loing	630042	2333179	82,0	1654
Châlette-sur-Loing	Loing	629477	2337416	86,8	2300
Nemours	Loing	626570	2363770	119,7	3505
Episy	Loing	633515	2371067	134,2	3900
Confluence Loing dans Seine	Loing	635634	2376770	144,0	4150
Marnay-sur-Marne	Marne	817244	2338781	30,5	360
Chaumont	Marne	809693	2350127	54,1	597
Condes	Marne	808480	2352860	58,8	900
Mussey-sur-Marne	Marne	809280	2378965	104,3	1870
Joinville	Marne	807525	2386088	112,7	1920
Chamouilley	Marne	799420	2404260	139,3	2213
Saint-Dizier	Marne	791058	2407903	150,4	2380
Frignicourt	Marne	765698	2413756	196,8	3290
Chaussée-sur-Marne	Marne	759542	2428739	222,9	5647
Châlons-sur-Marne	Marne	747667	2441429	247,0	6280
Damery	Marne	711410	2453600	308,6	7700
Vandières	Marne	701685	2456300	321,2	7863
Ferté-sous-Jouarre	Marne	657541	2438819	395,2	8818
Saint-Jean-les-Deux-Jumeaux	Marne	649094	2440090	404,4	9610
Meaux	Marne	639914	2439340	437,6	10800
Condé-Sainte-Libiaire	Marne	637575	2433575	445,7	12203
Chalifert	Marne	631769	2433458	467,8	12326

Noisiel	Marne	621130	2428990	480,4	12500
Joinville-le-Pont	Marne	610050	2424600	497,4	12639
Gournay-sur-Marne	Marne	617152	2429618	484,8	12660
Saint-Maur-des-Fossés	Marne	609761	2422524	508,7	12721
Saint-Maurice	Marne	606391	2424212	509,2	12728
Créteil	Marne	609585	2423000	513,0	12816
Confluence Marne dans Seine	Marne	604641	2423805	514,0	12920
Hirson	Oise	725234	2548924	26,5	315
Flavigny-le-Grand-et-Beaurain	Oise	695589	2545030	84,4	745
Origny-Sainte-Benoite	Oise	682492	2538719	115,5	1170
Condren	Oise	668520	2514900	169,4	3280
Sempigny	Oise	647605	2507200	207,4	4290
Plessis-Brion	Oise	640242	2496850	231,0	4686
Venette	Oise	634085	2490826	242,8	12890
Verberie	Oise	628630	2480400	255,6	13052
Creil	Oise	609075	2473130	281,1	14200
Isle-Adam	Oise	591000	2458090	309,6	16430
Pontoise	Oise	582390	2448480	324,8	16908
Auvers-sur-Oise	Oise	584149	2451371	321,3	
Confluence Oise	Oise	580545	2443112	341,0	
Saint-Chéron	Orge	583595	2394050	21,6	108
Épinay-sur-Orge	Orge	598702	2407475	44,7	632
Morsang-sur-Orge	Orge	600344	2407668	46,6	922
Confluence Orge dans Seine	Orge	604908	2412534	53,0	952
Quemigny-sur-Seine	Seine	775157	2300217	27,5	188
Nod-sur-Seine	Seine	767439	2309604	45,3	371
Plaines-Saint-Lange	Seine	760029	2335130	88,4	704
Bar-sur-Seine	Seine	751916	2348365	111,1	2340
Courtenot	Seine	746950	2351620	118,9	2380
Troyes	Seine	728473	2371387	158,5	3410
Méry-sur-Seine	Seine	714764	2390999	195,3	3880
Confluence Aube	Seine	701739	2396335	215,5	7470
Pont-sur-Seine	Seine	692920	2392352	236,8	8760
Nogent-sur-Seine	Seine	685880	2389130	250,5	9102
Bray-sur-Seine	Seine	666570	2380210	285,3	9653
Bazoches-lès-Bray	Seine	663190	2381000	289,9	10100
Confluence Yonne	Seine	645825	2376086	309,3	20353
Montereau-Fault-Yonne	Seine	646210	2376785	309,3	21178
Varennes-sur-Seine	Seine	642980	2375490	312,9	21186
Confluence Loing	Seine	635634	2376770	321,8	25100
Saint-Mammès	Seine	634890	2376820	322,6	21200
Melun	Seine	623890	2392880	351,1	26170
Boissise-la-Bertrand	Seine	618732	2391158	357,2	26200
Saint-Fargeau-Ponthierry	Seine	615835	2393175	360,9	26290
Corbeil-Essonnes	Seine	610830	2401579	376,2	26710
Confluence Essonne	Seine	610655	2401788	376,4	28580

Confluence Orge	Seine	604908	2412534	390,4	29532
Ablon-sur-Seine	Seine	605888	2413407	391,7	29742
Confluence Yerres	Seine	607810	2414206	393,8	30762
Alfortville	Seine	605979	2420343	400,9	30800
Confluence Marne	Seine	604641	2423805	404,7	43616
Paris Austerlitz	Seine	602142	2427451	409,8	43800
Paris-13e__Arrondissement	Seine	602130	2427440	409,8	43800
Pont-Royal	Seine	599461	2429043	413,1	44024
Suresnes	Seine	592260	2430130	428,0	44100
Chatou	Seine	587360	2432780	455,5	44669
Confluence Oise	Seine	580545	2443112	482,1	61577
Poissy	Seine	578130	2437710	488,2	61820
Limay	Seine	538060	2455707	520,5	62859
Mericourt	Seine	546840	2447820	530,6	64200
Vernon	Seine	555260	2444090	560,0	64604
Confluence Eure	Seine	515289	2480373	617,5	70539
Rouen	Seine	508211	2494734	654,8	72000
Caudebec-en-Caux	Seine	482440	2504149	722,9	75000
Havre	Seine	454083	2497750	761,4	79000
Corancy	Yonne	721963	2234521	20,3	106
Montigny-en-Morvan	Yonne	713851	2242155	34,1	229
Marigny-sur-Yonne	Yonne	699857	2253978	60,2	540
Dornecy	Yonne	692276	2270674	91,7	754
Clamecy	Yonne	689350	2274140	100,4	841
Prégilbert	Yonne	699755	2294524	146,3	1956
Auxerre	Yonne	693299	2311200	171,6	3561
Gurgy	Yonne	689685	2320565	186,2	3807
Joigny	Yonne	676761	2333370	213,1	8474
Sens	Yonne	669835	2355803	246,7	10289
Saint-Martin-du-Tertre	Yonne	669065	2358065	249,3	10345
Pont-sur-Yonne	Yonne	664670	2364610	257,6	10462
Courlon-sur-Yonne	Yonne	660896	2370542	267,3	10700
Confluence Yonne dans Seine	Yonne	645825	2376086	292,0	10836

Tableau A.11 : Récapitulatif des surfaces de bassins versant calculées pour les sites d'échantillonnage.

Site	N°	Cours d'eau	x L2 étendu	Y L2 étendu	pK sur le cours d'eau	BV (km²)
Amfreville	20	Seine	520201	2479659	612	66970
Denouval	19	Seine	579865	2442400	485	61741
Andrécy	18	Seine	578773	2440330	483	61645
Pontoise	17	Oise	582559	2449248	324	16715
Bougival pointe	16	Seine	583418	2432075	462	44788
Bougival VNF	15	Seine	584834	2430185	459	44745
Ile st-Denis	14	Seine	600061	2437405	439	44363
Issy-les-Moulineaux	13	Seine	594392	2425653	420	44002
Paris Austerlitz	12	Seine	602889	2426458	409	43782
Trilbardou	11	Marne	634158	2438405	453	12262
Alfortville	10	Seine	606326	2421769	402	30808
Villeneuve	9	Seine	607504	2414124	394	30034
Viry-Chatillon	8	Orge	602013	2408835	49	933
Draveil	7	Seine	605008	2407844	385	27024
Thomery	6	Seine	633675	2378022	325	25259
St-Mammès	5	Loing	635262	2375813	141	4072
Cannes-Ecluse	4	Yonne	647746	2374471	289	11102
Jaulnes	3	Seine	669052	2380614	282	9825
Marnay	2	Seine	690859	2391807	241	8576
Saron	1	Aube	702258	2397018	247	4558

Annexe B : Estimation des débits aux différents points et périodes d'échantillonnage

1) : Estimation Méthodologie générale

L'Annexe A a permis d'estimer pour chaque site d'échantillonnage, une position sur le tracé de la Seine ainsi que le bassin versant associé. Ces résultats sont utilisés ici pour calculer de la manière la plus précise possible le débit en tout point d'échantillonnage. De même que pour le calcul des bassins versants, le nombre d'informations est inégalement réparti dans le bassin de la Seine, ce qui a nécessité de développer plusieurs méthodes d'estimation en fonction des informations disponibles. Cette annexe présente les différentes méthodes de calcul de débits des segments de cours d'eau de la Seine qui sont étudiés dans cette thèse. Et s'appuie des résultats, tableau et figures de l'Annexe A. Le récapitulatif des méthodes appliquées sur les différents sites est regroupé dans les Tableaux B.1 et B.2 en fin de cette annexe.

Les courbes de débit spécifique obtenues dans chaque site avec ces méthodes de calculs sont présentées dans l'Annexe E.

1. Segments bien documentés

L'équation utilisée est celle décrite dans le Chapitre II :

$$Q = c * BV^d.$$

BV est la surface du bassin versant km²

Les coefficients c et d sont des paramètres qui varient dans le temps et dans l'espace. Ils diffèrent des coefficients h et X décrit par Tricart et Hirsch (1960). En effet d'après les auteurs, X est constant dans un bassin versant où le climat est identique. D'autres études montrent en revanche que ce coefficient varie dans le temps dans un bassin donné (Burgers *et al.*, 2014). Nous avons donc dans cette étude considéré les coefficients c et d comme des coefficients d'ajustement théoriques.

Les segments sont définis entre deux confluences, la période temporelle retenue est le jour. Les coefficients c et d doivent donc être calculés dans chaque segment et chaque jour des années 2011-2012.

Pour calculer le débit Q en un site donné, on doit faire l'approximation suivante :

Dans chaque segment, on considère que les conditions environnementales jouant sur l'hydrologie sont identiques dans l'espace. Cette hypothèse permet de fixer les coefficients c et d comme deux constantes variant uniquement dans le temps et entre chaque segment. De ce fait, pour un segment donné l'équation du débit devient une équation à deux inconnues dès lors que le débit lui-même est connu. Il faut donc deux équations où Q et BV sont connus

pour déterminer c et d. Autrement dit, les coefficients ne peuvent être déterminés que dans des segments où au moins deux stations hydrologiques mesurent les débits journaliers.

Cette méthode nécessite donc la présence d'un minimum de deux points dans le segment où le débit est calculé. Dans certains cas, le nombre de stations de mesures de débits est suffisant. Dans d'autres cas, une seule station est utilisable, ce qui nécessite de créer un nouveau point de référence. Ce point est placé au pK 0 de chaque segment et nécessite donc de connaître le débit des segments amont.

Le calcul des coefficients c et d s'est effectué sur le logiciel Excel. Un modèle a été créé pour chaque segment concerné. Le modèle doit pouvoir calculer le débit journalier de chaque station en faisant appel aux paramètres BV, c et d. BV est une constante dans chaque point de la Seine et les paramètres c et d ont été calculés chaque jour et dans chaque segment concerné par l'outil SOLVER à partir de la méthode des moindres carrés. Cette méthode consiste à évaluer la fiabilité du modèle (et donc des paramètres c et d) à partir du carré de la différence entre la mesure et le modèle.

2. Segments avec peu de données

Plusieurs segments ne sont pas suffisamment renseignés pour calculer le débit avec la méthode précédente. Dans ce cas, deux méthodes peuvent être appliquées :

- Si un site d'échantillonnage est localisé à quelques kilomètres d'un point où le débit est connu, on considère que le débit spécifique Q_{sp} est constant entre les deux points. Connaissant Q et BV et de ce fait Q_{sp} de la station, ainsi que BV et Q_{sp} du site, Q s'obtient par règle de trois :

$$Q_1 = BV_1 * Q_2 / BV_2$$

Le calcul est de ce fait beaucoup plus simple et rapide que l'utilisation du modèle, mais il est également moins précis.

- Pour l'Oise, les deux méthodes ne peuvent être appliquées, une recherche bibliographique a permis d'obtenir des modèles de calculs à la distance voulue.

2) La Seine

1. Segments suffisamment renseignés

Parmi les dix segments de la Seine, les segments 1, 2, 4 et 9 comportent suffisamment de points pour calculer les coefficients c et d à partir du modèle théorique et l'outil SOLVER. Les sites concernés sont : Marnay (2), Jaulnes (3), Thomery (6), Andresy (18), Denouval (19) et Amfreville (20).

2. Segments insuffisamment renseignés

Les segments 3, 5, 6, 7, 8 et 10 de la Seine n'ont pas suffisamment de points par segment pour calibrer le modèle. Plusieurs méthodes ont alors été appliquées selon le segment et les sites concernés.

Le segment 3 (entre l'Yonne et le Loing) est relativement court (12 km). Nous avons donc uniquement besoin d'estimer le débit à la fin du segment (avant la confluence du Loing). Le débit au point 0 (pK = 0 km) qui est le seul point du segment a été estimé à partir du débit du segment 2 et de celui de l'Yonne. Nous avons ensuite utilisé les débits spécifiques pour estimer le débit de fin du segment.

Le segment 5 (entre l'Essonne et l'Orge) mesure environ 24 km et ne possède aucune station mesurant les débits. Ce segment contient le site de Draveil. Son débit ainsi que celui de la fin du segment ont également été estimé avec la méthode des débits spécifiques.

Le segment 6 (entre l'Orge et l'Yerres) est très court (moins de 4 km) et contient le site de Villeneuve-le-Roi. Les débits ont été également estimés avec le débit spécifique du point 0.

Le segment 7 (entre l'Yerres et la Marne) mesure moins de 10 km et contient le site d'Alfortville. On considère pour ce site que le débit mesuré dans la station d'Alfortville correspond au débit du site.

Le segment 8 (entre la Marne et l'Oise) mesure 78 km et ne possède qu'une seule station mesurant les débits : celle de Paris Austerlitz. Quel que soit le jour, le débit au point 0 (débit Marne + segment 6) est systématiquement plus élevé que celui d'Austerlitz. Deux raisons peuvent expliquer cela :

- Les débits des segments amont et de la Marne sont surestimés. Les segments 3, 5 et 6 le sont probablement légèrement avec l'utilisation des débits spécifiques et le cumul peut expliquer cette augmentation.
- La Seine subit des pertes, soit entre le point 0 du segment 8 et Austerlitz, soit dans les segments amont. Ces pertes ne peuvent pas être estimées avec nos méthodes.

La raison de cette diminution de débit observée du point 0 du segment 8 à Austerlitz étant incertaine de même que sa signification réelle, seul le point d'Austerlitz est utilisé dans ce segment. En utilisant la méthode des débits spécifiques, on surestime énormément le débit de fin de segment (qui augmenterait linéairement sur environ 70 km). En additionnant le débit d'Austerlitz à celui de l'Oise, on retrouve des valeurs de débit au point 0 du segment suivant (segment 9) proches de celles de la première station du segment 9. Ceci laisse supposer que le débit de la Seine ne varie pas significativement entre le début et la fin du segment. On considère donc que le débit du segment est constant et égal à celui de la station d'Austerlitz. Ceci nous permet donc d'estimer les débits du site de Paris BFM (12), Issy-les-Moulineaux (13), L'Île-Saint-Denis (14), Bougival VNF (15) et Bougival Pointe (16).

Le dernier segment de la Seine (segment 10, entre l'Oise et l'exutoire) ne comporte aucun site d'échantillonnage et est trop peu renseigné : aucune de ses stations ne mesure le débit. Le seul point où le débit peut être estimé est au niveau du point 0, et il est donc impossible de savoir

avec nos méthodes si ce débit est surestimé ou non. Les informations étant trop peu nombreuses, le débit du segment n'a pas été estimé.

3) Les affluents

1. La Marne

Le segment de la Marne où se situe Trilbardou (11) ne possède que 2 stations mesurant les débits. Le nombre est toutefois suffisant pour le calcul des coefficients c et d. Cependant les deux stations montrent presque systématiquement une diminution de débit sur une distance de près de 28 km. Par prudence, nous préférons donc utiliser la méthode de débits spécifiques pour calculer le débit de la Marne à Trilbardou et à la confluence en prenant pour référence la station de Créteil qui est la plus proche de la confluence.

2. L'Oise

La seule station du segment de l'Oise mesurant le débit est située à Creil, ce qui est relativement loin du site de Pontoise (près de 60 km) et de la confluence avec la Seine. Il est donc préférable de ne pas utiliser les débits spécifiques. Une formule de calcul du débit de l'Oise ($Q_{\text{Oise conf}}$) à la confluence est proposée par Vilmin (2014) :

$$Q_{\text{Oise conf}} : 16667 / (14200 + 1200) * (Q_{\text{Creil}} + Q_{\text{Maysel}}) - 3$$

La station de Maysel est située sur le Thérain, affluent de l'Oise qui se jette dans cette dernière entre Creil et la confluence de la Seine. 16 667, 14 200 et 1 200 sont les surfaces de bassins versants (km²) estimées par l'auteur pour, respectivement, l'Oise à la confluence, l'Oise à Creil et le Thérain à Maysel. Dans l'équation, la constante (3) (un nombre est constitué de chiffres) correspond aux pertes (en m³/s) dues aux prélèvements locaux (estimé par Vilmin, 2014).

Cette formule a ainsi permis de définir un deuxième point dans notre segment et de calculer des coefficients c et d pour l'estimation des débits journaliers à Pontoise.

3. L'Yonne

Dans le dernier segment de l'Yonne avant la confluence, la seule station du segment mesurant le débit est située à Pont-sur-Yonne, soit 30 km en amont du site de Cannes-Ecluse (4). La station de Courlon n'a mesuré le débit que durant les 4 premiers mois de 2011 et donne des résultats douteux. D'amont en aval, le débit augmente parfois plus entre les deux stations que la valeur obtenue en conservant les débits spécifiques. Dans certains cas en revanche, il diminue d'amont en aval. En utilisant la méthode des débits spécifiques, les valeurs calculées à la confluence ne semblent pas anormalement élevées (maximum + 8 m³/s en crue). Le débit de Cannes-Ecluse a donc été estimé avec la méthode des débits spécifiques en prenant pour référence la station de Pont-sur-Yonne.

4. L'Aube

Le calcul du débit de l'Aube à Saron (1) et à la confluence a posé le même problème que le calcul des bassins versants. Ce problème a toutefois été également résolu en intégrant les affluents de l'Herbissonne et de la Barbuise. On considère que le débit de l'Aube n'augmente pas significativement entre la station d'Arcis-sur-Aube (amont du segment), et la confluence avec l'Herbissonne. On considère la même chose pour le débit de l'Aube jusqu'à la confluence avec la Barbuise. Le débit des deux affluents est mesuré par les stations d'Allibaudières et de Pouan-les-Vallées, ce qui permet d'ajouter deux points dans le segment de l'Aube avant la confluence et de calculer le débit total de l'Aube. Les valeurs sont ensuite comparées avec les valeurs du segment 1 de la Seine (avant l'Aube) et le segment 2. Les valeurs de débit calculées étant cohérentes, on utilise ainsi le modèle pour calculer le débit de l'Aube à Saron.

5. Le Loing

Le segment du Loing possède deux stations mesurant le débit. Le nombre est suffisant pour calculer les coefficients c et d et utiliser le modèle pour estimer les débits du Loing à Saint-Mammès (5) et à la confluence.

6. L'Orge

Le segment de l'Orge où se trouve le site de Viry-Châtillon (8) n'est représenté que par une station, celle de Morsang-sur-Orge, qui mesure le débit. Le site et la station sont éloignés de moins de 3 km et le bassin versant n'augmente pas significativement entre eux (de 922 à 933 km²). On estime donc le débit de Viry-Châtillon à partir de celui de Morsang-sur-Orge en utilisant les débits spécifiques.

4) Synthèse

Tableau B 1: Récapitulatif des méthodes d'estimation de débits utilisées dans les segments de la Seine et des affluents étudiés. « Q_{sp} » indique l'utilisation de la méthode des débits spécifiques et « Modèle » indique l'utilisation du modèle utilisant les coefficients c, d et la surface du bassin versant BV. Le 1+ indique que le modèle a pu être utilisé mais que les points supplémentaires ont été déterminés avec différentes méthodes.

Segment	Limites	Sites	N points	Autres points	Interpolations
Seine 1	pK 0-Aube		3		Modèle
Seine 2	Aube-Yonne	Marnay (2), Jaulnes (3)	2		Modèle
Seine 3	Yonne-Loing		1		Q _{sp}
Seine 4	Loing-Essonnes	Thomery (6)	2		Modèle
Seine 5	Essonnes-Orge	Draveil (7)	1		Q _{sp}
Seine 6	Orge-Yerres	Villeneuve-le-Roi (9)	1		Q _{sp}
Seine 7	Yerres-Marne	Alfortville (10)	1		Q _{sp}
Seine 8*	Marne-Oise	Paris (12), Issy (13), L'Ile-st-Denis (14), Bougival (15, 16)	1		Q constant
Seine 9*	Oise-Eure	Andresy (18), Denouval (19), Amfreville (20)	2		Modèle
Seine 10*	Eure-estuaire		1		Donnés insuffisantes
Aube		Saron (1)	1+	Conf. Herbissonne et Barbuise	Modèle
Yonne*		Cannes-Ecluse (4)	1		Q _{sp}
Loing		St-Mammès (5)	2		Modèle
Orge		Viry-Châtillon (8)	1		Q _{sp}
Marne		Trilbardou (11)	1		Q _{sp}
Oise		Pontoise (17)	1+	Conf. Therain	Modèle + formule de Vilmin (2014)

Tableau B 2: Débits et débits spécifiques calculés dans chaque site d'échantillonnage de la Seine et des affluents dans les différentes campagnes. Les modèles ne prenant pas en compte les séparations de cours d'eau pour les débits, ceux-ci sont divisés si nécessaire par rapport à la largeur du segment où la trappe a été posée et celle de tous les segments dans le même pk.

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Saron	1	Aube	4558
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
07/11	16	-	4
09/11	17	-	4
10/11	13	-	3
11/11	13	-	3
01/12	71	-	16
02/12	24	-	5
03/12	23	-	5
05/12	28	-	6
06/12	24	-	5
07/12	26	-	6
10/12	19	-	4
11/12	35	-	8

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Marnay	2	Seine	8576
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
07/11	24	-	3
09/11	34	-	4
10/11	33	-	4
11/11	26	-	3
01/12	129	-	15
02/12	66	-	8
03/12	39	-	5
06/12	60	-	7
07/12	46	-	5
10/12	37	-	4
11/12	66	-	8

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Jaulnes	3	Seine	9825
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
07/11	24	5	3
10/11	33	7	4
01/12	132	26	4
02/12	69	14	3
03/12	43	9	15
05/12	47	9	8
06/12	64	13	5
07/12	46	9	7
10/12	38	8	5
11/12	66	13	4

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Cannes-Ecluse	4	Yonne	11102
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
02/12	99	20	9
03/12	77	15	7
05/12	151	30	14
06/12	85	17	8
07/12	51	10	5
10/12	27	5	2
11/12	69	14	6

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Saint-Mammès	5	Loing	4072
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
09/11	3	-	1
10/11	2	-	1
11/11	3	-	1
01/12	53	-	13
02/12	14	-	3
03/12	15	-	4
05/12	34	-	8
06/12	10	-	2
07/12	12	-	3
10/12	4	-	1
11/12	21	-	5

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Thomery	6	Seine	25242
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
02/11	140	93	8
07/11	35	23	2
09/11	60	40	4
10/11	45	30	3
11/11	55	37	3
01/12	320	213	19
02/12	140	93	8
03/12	95	63	6
06/12	115	77	7
11/12	105	70	6

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Draveil	7	Seine	27024
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
09/11	94	-	3
12/11	109	-	4
01/12	470	-	16
02/12	226	-	8
06/12	163	-	6
07/12	128	-	4

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Viry-Châtillon	8	Orge	933
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
07/11	3	-	3
09/11	2	-	2
10/11	2	-	2
11/11	2	-	2
01/12	6	-	6
02/12	3	-	3
03/12	2	-	2
05/12	4	-	4
07/12	4	-	4
10/12	3	-	3

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Villeneuve-le-Roi	9	Seine	30034
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
03/15	270	-	9

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Alfortville	10	Seine	30808
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
03/15	273	-	9

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Trilbardou	11	Marne	12262
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
09/11	33	-	3
10/11	30	-	2
11/11	29	-	2
12/11	26	-	2
01/12	163	-	14
02/12	190	-	16
03/12	59	-	5
04/12	54	-	4
05/12	55	-	5
06/12	50	-	4
07/12	76	-	6
10/12	41	-	3
11/12	91	-	8

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Paris BFM	12	Seine	43782
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
03/15	395	-	9

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Issy-les-Moulineaux	13	Seine	44002
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
03/15	395	-	9

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
L'Île-st-Denis	14	Seine	44363
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
03/15	395	-	9

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Bougival VNF	15	Seine	44745
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
09/11	132	66	3
10/11	105	53	2
11/11	139	70	3
01/12	633	317	14
02/12	327	164	8
03/12	201	101	5
05/12	276	138	6
06/12	216	108	5
07/12	208	104	5
10/12	120	60	3
11/12	253	127	6

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Bougival Pointe	16	Seine	44788
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
11/11	139	70	3
01/12	633	317	14
02/12	327	164	7
06/12	216	108	5
07/12	208	104	5
10/12	120	60	3

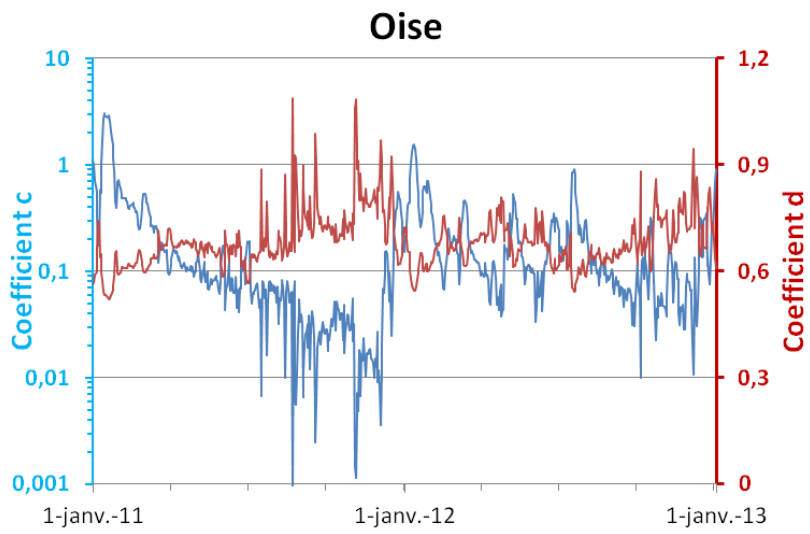
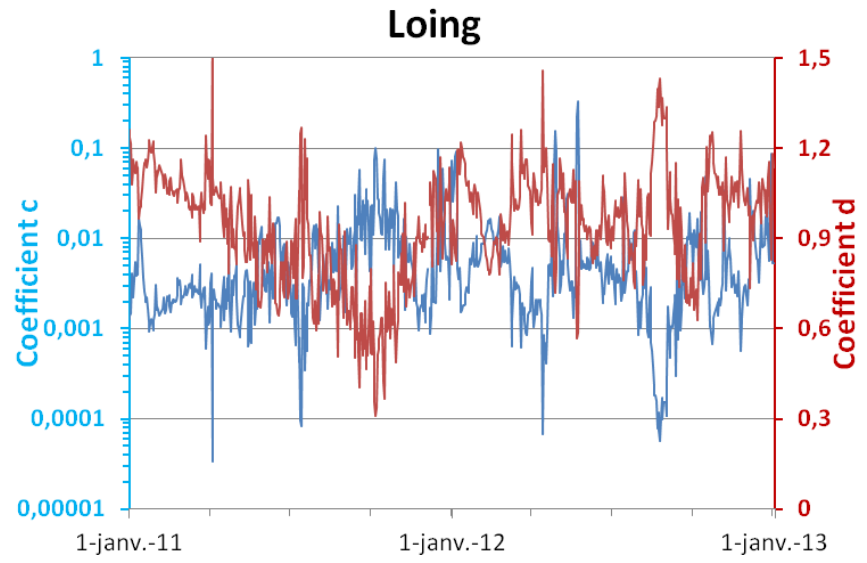
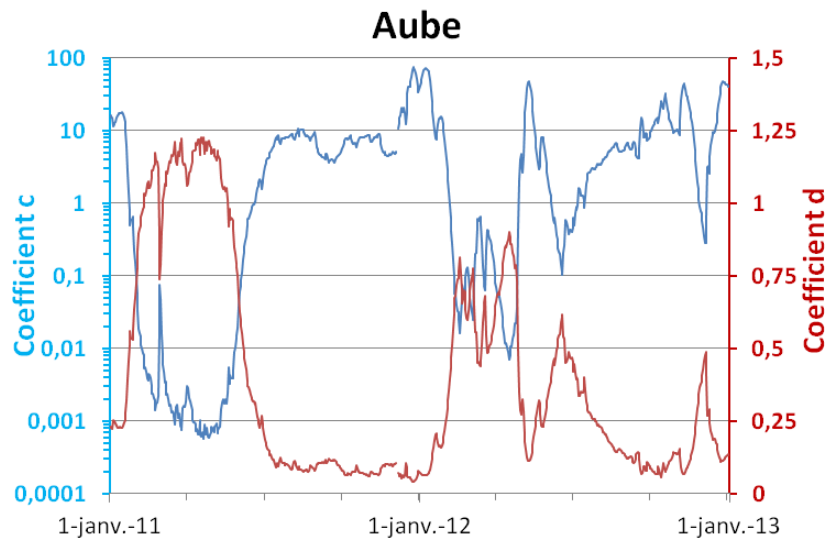
Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Pontoise	17	Oise	16715
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
09/11	39	26	2
10/11	34	23	2
11/11	37	25	2
01/12	197	131	12
02/12	125	83	8
03/12	114	76	7
05/12	120	80	7
06/12	84	56	5
07/12	129	86	8
10/12	50	33	3
11/12	78	52	5

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Andrésey	18	Seine	61645
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
09/11	187	94	3
10/11	153	77	2
11/11	186	93	3
01/12	843	422	14
02/12	460	230	7
03/12	324	162	5
05/12	411	206	7
06/12	318	159	5
07/12	350	175	6
10/12	189	95	3
11/12	347	174	6

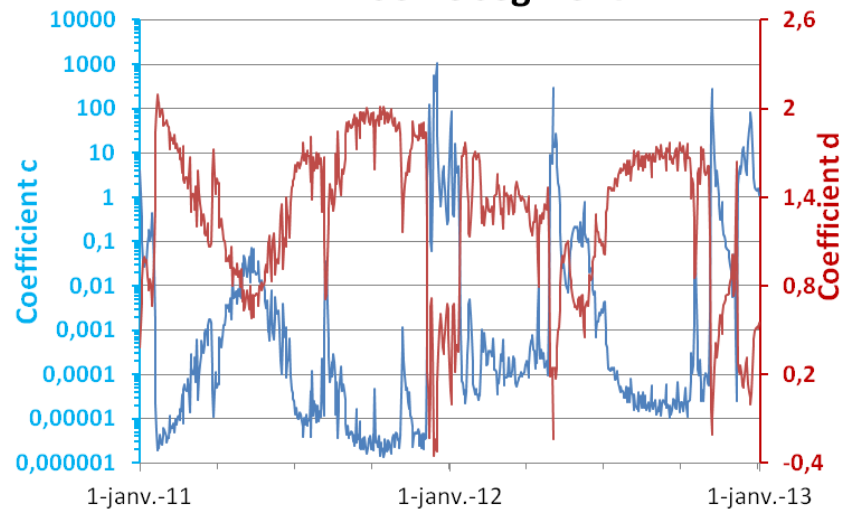
Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Denouval	19	Seine	61741
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
09/11	188	75	3
10/11	153	61	2
01/12	844	338	14
02/12	461	184	7
03/12	325	130	5
05/12	411	164	7
06/12	318	127	5
10/12	190	76	3
11/12	347	139	6

Site	N°	Cours d'eau	BV (km ²)
Amfreville	20	Seine	12262
Campagne	Débit (m ³ /s)	Débit segment (m ³ /s)	Débit spécifique (l/s/km ²)
02/12	530	265	8
03/12	357	179	5
05/12	451	226	7
06/12	351	176	5
07/12	381	191	6
10/12	210	105	3
11/12	384	192	6

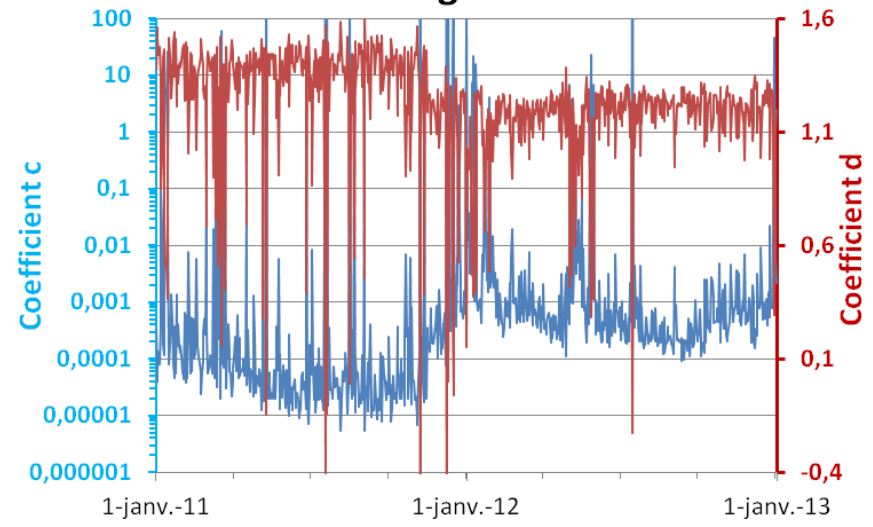
Figure B (pages suivantes) : Courbes des coefficients d'ajustement c et d calculés par l'outil SOLVER d'Excel pour les segments d'affluents de l'Aube, le Loing, la Marne et l'Oise ainsi que les segments 1, 2, 4 et 9 de la Seine



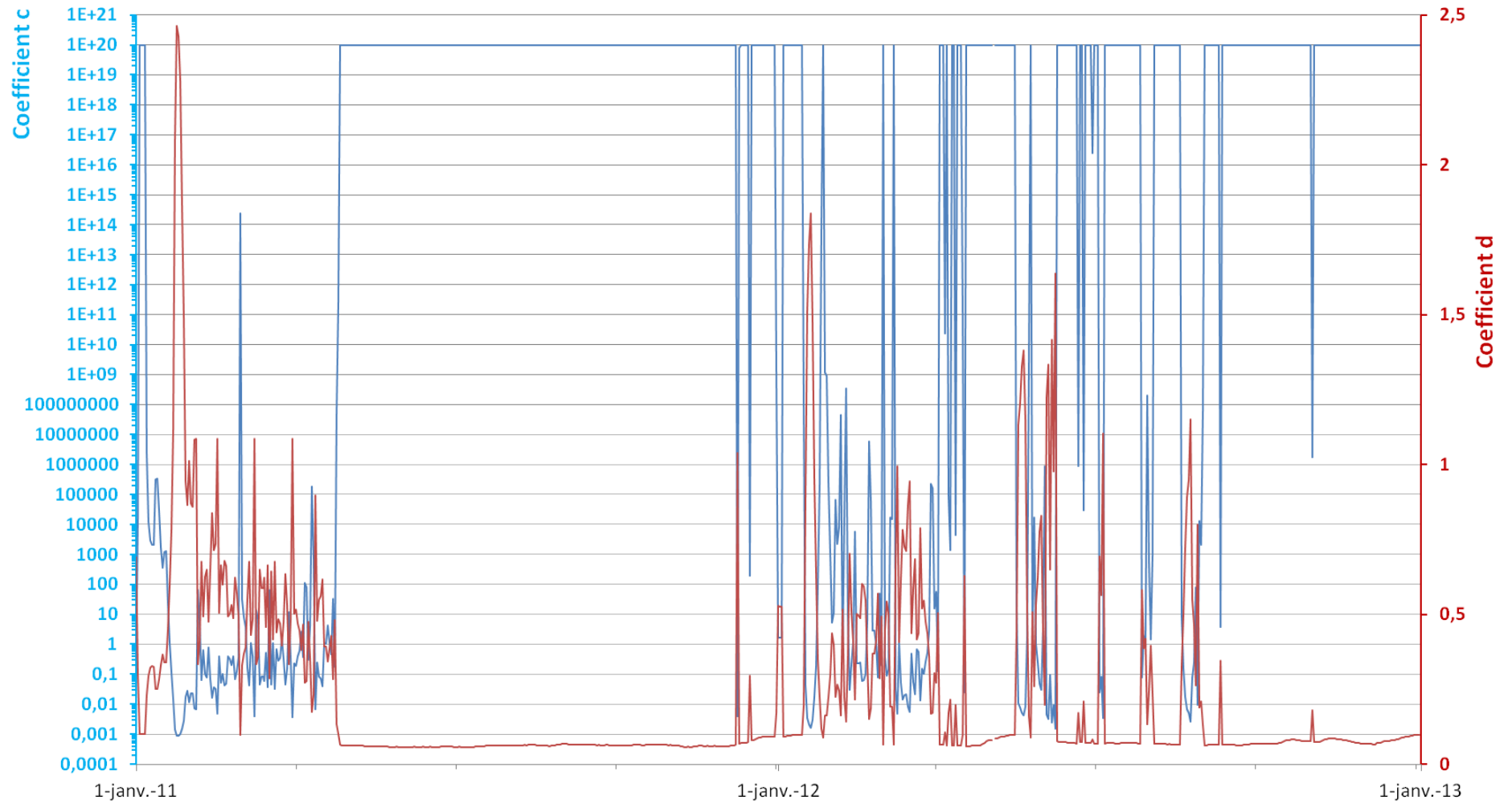
Seine segment 1



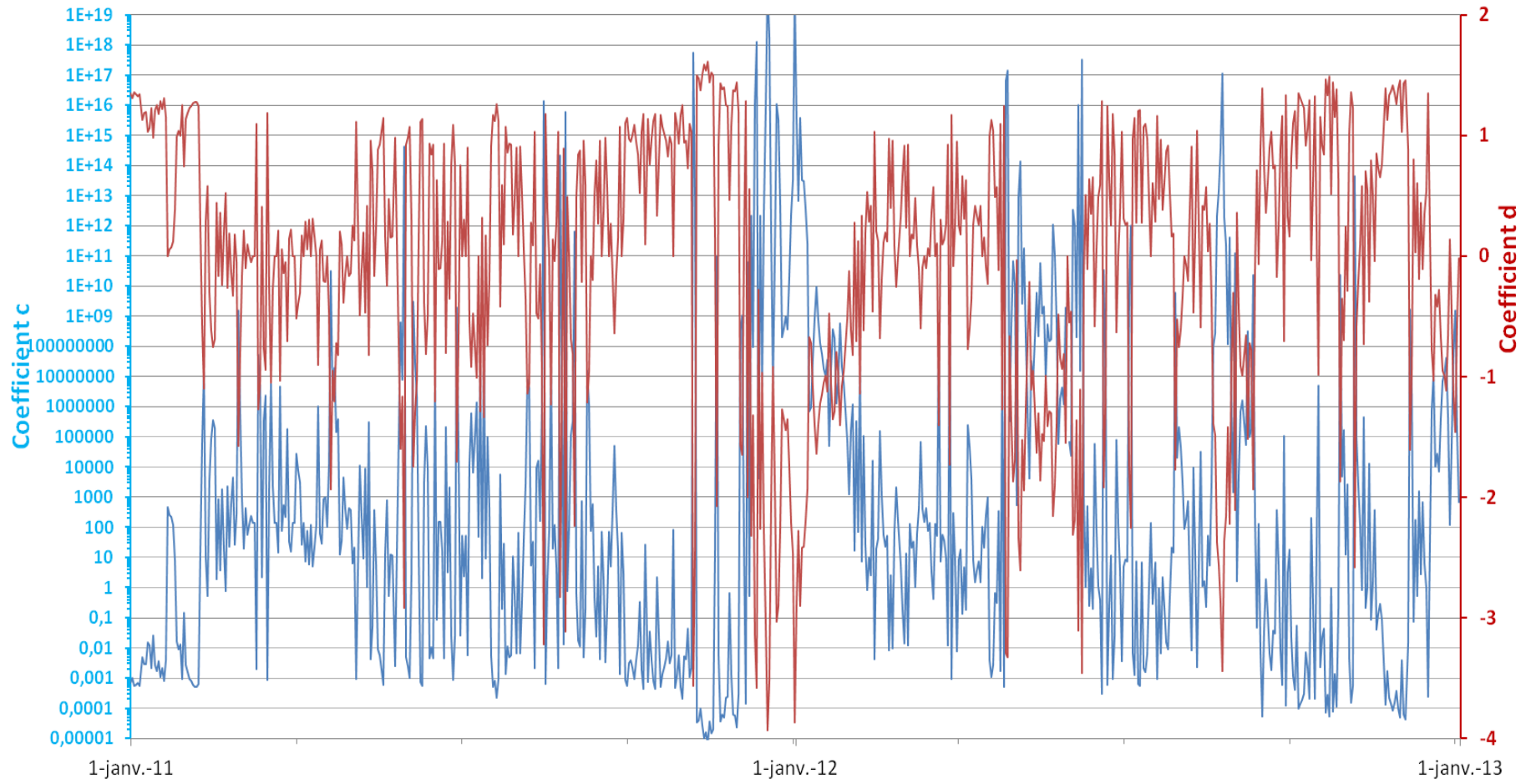
Seine segment 9



Seine segment 2



Seine segment 4



Annexe C : Liste des échantillons de MES récupérés dans la Seine et mesures magnétiques effectuées

Les mesures de paramètres magnétiques de base (paramètres d'hystérésis) ont été effectuées sur la totalité des échantillons. Les mesures plus longues à l'acquisition, au traitement et aux interprétations ont été généralement effectuées sur un seul échantillon par site. Le choix a été fait pour la caractérisation magnétique de prendre pour référentiel le paramètre « taille des magnétites », considérant que la minéralogie magnétique est constante dans le temps pour chaque site et ne varie pas avec la taille des magnétites. Ainsi, pour chaque site où plusieurs campagnes ont été effectuées, l'échantillon sélectionné est celui dont la taille moyenne des magnétites est proche de la taille moyennée sur l'ensemble des échantillons. La désaimantation thermique de l'IRM sur trois axes est destructrice et nécessite une plus grande quantité de matériel. Pour cette raison les échantillons utilisés pour cette mesure sont généralement différents de ceux sélectionnés pour les autres méthodes.

Le Tableau C regroupe l'ensemble des échantillons de MES récupérés par campagne en indiquant pour chaque trappe, les dates de mise en place et récupération (premier tableau) et pour chaque échantillon, les analyses effectuées.

Note : des échantillons ont également été prélevés en décembre 2011 à Draveil, Viry-Châtillon et Trilbardou et en avril 2012 à Trilbardou. L'échantillon de Viry-Châtillon a été laissé entre le 14 et 22 décembre et est considéré comme faisant partie de la campagne décembre 2011-janvier 2012 (5). Les deux autres échantillons de décembre 2011 ont été récupérés trop tôt pour être associés à la montée de crue hivernale et trop tard pour être associé à l'étiage de novembre et sont trop peu nombreux pour représenter l'évolution spatiale des MES durant cette période. Les résultats de ces échantillons « hors » campagne ne sont pas pris en compte dans le manuscrit mais sont présentés dans l'Annexe E.

Tableau C: Liste des échantillons de MES récupérés dans la Seine (hors échantillons du SIAAP et de Marnay 2014-2015) et mesures/analyses effectuées. Le premier tableau représente les dates de mise en place et récupération des trappes lors de chaque campagne. Le deuxième représente les mesures effectuées sur les échantillons. :

- : Echantillonnage non effectués ou douteux.

H : mesure des 4 paramètres d'hystérésis magnétiques.

Kruiv : déconvolution de l'IRM avec la méthode de Kruiver (2001).

S : calcul du S-ratio.

FORCs : acquisition de diagrammes de FORCs.

D3ax : désaimantation thermique de l'IRM sur 3 axes.

$\chi_{fd}\%$: frequency dependence.

	(0) févr.-11	(1) juil.-11	(2) sept.-11	(3) oct.-11	(4) nov.-11	(4) janv.-12	(6) févr.-12	7 : mars-12	8 : mai-12	9 : juin-12	10 : juil.-12	11 : oct.-12	12 : nov.-12	13 :mars-15
1 : Saron	-	01-19/07	11/08-06/09	03-20/10	09-23/11	13/12-05/01	03-13/02	13-27/03	16/04-04/05	04-18/06	10-23/07	11/09-05/10	24/10-05/11	-
2 : Marnay	-	29/06-19/07	11/08-06/09	03-20/10	09-23/11	13/12-05/01	03-13/02	13-27/03	-	04-18/06	10-23/07	11/09-05/10	24/10-05/11	-
3 : Jaulnes	-	29/06-19/07	-	03-20/10	-	13/12-05/01	03-13/02	13-27/03	16/04-04/05	04-18/06	10-23/07	11/09-05/10	24/10-05/11	-
4 : Cannes Ecluse	-	-	-	-	-	-	08-13/02	13-27/03	16/04-04/05	04-18/06	10-23/07	11/09-05/10	24/10-05/11	-
5 : St. Mammes	-	-	23/08-05/09	03-20/10	09-23/11	13/12-05/01	03-13/02	13-27/03	16/04-04/05	04-18/06	10-23/07	11/09-04/10	24/10-05/11	-
6 : Thomery	04-10/02	06-19/07	11/08-05/09	03-20/10	09-23/11	13/12-06/01	03-13/02	13-27/03	-	04-18/06	-	-	24/10-05/11	-
7 : Draveil	-	-	23/08-08/09	-	-	14/12-09/01	30/01-16/02	-	-	07-19/06	12-23/07	-	-	-
8 : Viry-Châtillon	-	07-20/07	07-15/09	04-19/10	08-21/11	14-22/12	30/01-16/02	16-28/03	16/04-03/05	-	9-23/07	13/09-12/10	-	-
9 : Villeneuve	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10-20/03
10 : Alfortville	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10-19/03
11 : Trilbardou	-	-	11/08-06/09	06/09-05/10	05/10-10/11	08/12-3/01	03/01-09/02	09/02-01/03	10/04-02/05	07-22/06	09-25/07	12/09-04/10	23/10-07/11	-
12 : Paris BFM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11-18/03
13 : Issy	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11-19/03
14 : ISD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10-19/03
15 : Bougival VNF	-	-	17/08-09/09	05-19/10	08-21/11	14/12-04/01	31/01-14/02	14-29/03	17/04-03/05	05-19/06	12-24/07	13/09-09/10	24/10-06/11	-
16 : Bougival Pointe	-	-	-	-	08-21/11	14/12-04/01	31/01-14/02	-	-	05-19/06	12-24/07	13/09-09/10	-	-
17 : Pontoise	-	-	17/08-09/09	05-19/10	08-21/11	14/12-04/01	31/01-14/02	14-29/03	17/04-03/05	05-19/06	12-24/07	13/09-09/10	22/10-06/11	-
18 : Andresy	-	-	17/08-09/09	05-19/10	08-21/11	14/12-04/01	31/01-14/02	14-29/03	17/04-03/05	05-19/06	12-24/07	13/09-09/10	24/10-06/11	-
19 : Denouval	-	-	17/08-09/09	05-19/10	-	14/12-04/01	31/01-14/02	14-29/03	17/04-03/05	05-19/06	-	13/09-09/10	24/10-06/11	-
20 : Amfreville	-	-	-	-	-	-	30/01-16/02	14-29/03	17/04-03/05	05-19/06	12-24/07	13/09-09/10	24/10-06/11	-

	(0) févr.-11	(1) juil.-11	(2) sept.-11	(3) oct.-11	(4) nov.-11	(4) janv.-12	(6) févr.-12	7 : mars-12	8 : mai-12	9 : juin-12	10 : juil.-12	11 : oct.-12	12 : nov.-12	13 : mars-15
1 : Saron	-	H	H	H	H	H	H*, D3ax	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H	H	H	H	H	-
2 : Marnay	-	H,D3ax	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H	H	H	H*	H	-	H	H	H	H	-
3 : Jaulnes	-	H	-	H	-	H	H*	H	H	H,D3ax,Kruiiv, S,FORC,χfd	H	H	H	-
4 : Cannes Ecluse	-	-	-	-	-	-	H*	H	H	H,D3ax,Kruiiv, S,FORC,χfd	H	H	H	-
5 : St. Mammes	-	-	H	H	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H	H*	H	H	H	H, D3ax	H	H	-
6 : Thomery	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H	H	H	H	H, D3ax	H*	H	-	H	-	-	H	-
7 : Draveil	-	-	H	-	-	H, D3ax	H*	-	-	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H	-	-	-
8 : Viry- Châtillon	-	H	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H	H	H	H*	H	H, D3ax	-	H	H	-	-
9 : Villeneuve	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H,Kruiiv,S
10 : Alfortville	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H,Kruiiv,S
11 : Trilbardou	-	-	H	H	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H, D3ax	H*	H	H	H	H	H	H	-
12 : Paris BFM	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H,Kruiiv,S
13 : Issy	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H,Kruiiv,S
14 : ISD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H,Kruiiv,S
15 : Bougival VNF	-	-	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H	H	H	H*	H	H	H	H, D3ax	H	H	-
16 : Bougival Pointe	-	-	-	-	H,Kruiiv,S, FORC, χfd	H	H*	-	-	H	H	H	-	-
17 : Pontoise	-	-	H	H	H	H	H*	H, D3ax	H	H	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H	H	-
18 : Andresy	-	-	H	H	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H	H*	H	H, D3ax	H	H	H	H	-
19 : Denouval	-	-	H	H	-	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	H*	H	H, D3ax	H	-	H	H	-
20 : Amfreville	-	-	-	-	-	-	H*	H	H, D3ax	H	H	H	H,Kruiiv,S, FORC,χfd	-

Annexe D : Représentativité des mesures magnétiques de base

1) Problématique

Les méthodes magnétiques permettent des mesures relativement rapides et précises. Toutefois, pour que ces mesures soient valables et que les résultats des différents échantillons soient comparables entre eux, il faut qu'ils soient suffisamment précis et que les incertitudes et erreurs de mesure ne nuisent pas aux interprétations.

Les résultats de l'étude de la section transversale à Marnay-sur-Seine (voir Chapitre IV) offrent une réponse à une autre question de représentativité : celle de l'échantillonnage ponctuel de MES à environ un mètre de profondeur et à quelques mètres de la berge. La quantité de MES récupérées dans les différents points de sections de Marnay était relativement faible dans la plupart des trappes (souvent inférieure à 10 grammes). Comme une partie de l'échantillon a servi pour les analyses granulométriques laser, le nombre de préparations par échantillon pour les mesures magnétiques est assez faible : entre un et quatre par point d'échantillonnage. On considère donc que le nombre de mesures est trop faible pour faire des interprétations statistiques et on se contente d'afficher les valeurs des paramètres magnétiques (M_{rs} , M_{rs}/M_s et B_{cr}/B_c) avec la moyenne \pm écart-type lorsque le nombre de mesures est supérieur à 1.

Le Chapitre V s'intéresse à la variation des paramètres magnétiques dans les échelles spatiale et temporelle. Dans ces deux échelles, pour que les variations soient significatives, il faut qu'elles soient supérieures à celles que l'on peut mesurer au sein d'un échantillon. Si ce n'est pas le cas cela peut vouloir dire deux choses :

- L'appareil utilisé n'est pas assez précis pour étudier les variations.
- Si l'appareil est suffisamment précis et que la variabilité des paramètres au sein d'un échantillon est plus importante que les variations spatiales et/ou temporelles, c'est que les variations dans ces deux échelles ne sont probablement pas significatives.

L'incertitude des paramètres magnétiques peut être estimée à partir des tests statistiques (on parle d'incertitude de type A) ou d'informations fournies par les constructeurs (incertitudes de types B).

2) Incertitude de type B

1. Sensibilité de l'appareil

La sensibilité ou la précision de l'appareil est donnée sur la fiche technique de l'appareil (site : <http://www.lakeshore.com/products/Vibrating-Sample-Magnetometer/PMC-MicroMag-2900-Series-AGM/Pages/Overview.aspx>) : elle est de 10^{-2} nAm².

2. Répétabilité de la mesure : erreur aléatoire

Il s'agit de la capacité de l'appareil à obtenir les mêmes valeurs mesurées plusieurs fois de suite sur un même échantillon. Sur la fiche technique de l'appareil, l'erreur aléatoire est estimée à 1 % si l'échantillon est remesuré en restant en place et à 2 % s'il est déplacé ou remis.

3) Incertitude de type A

Pour estimer l'incertitude des paramètres magnétiques, les tests ont été effectués sur une série de MES prélevées durant la campagne de février 2012, celle-ci étant la seule où l'on dispose de tous les sites étudiés en 2011 et 2012.

Les tests de représentativité ont été faits uniquement sur les mesures de paramètres d'hystérésis avec le Micromag AGM 2900 du LSCE, car celles-ci sont suffisamment simples et rapide à acquérir pour être répétées.

1. Erreur aléatoire

Dans le cas de nos préparations constituées de poudre consolidée, il est possible que l'erreur aléatoire soit plus élevée que ± 1 % en raison de leur stabilité. Pour vérifier cette hypothèse, un premier test a consisté à mesurer cinq fois une seule portion d'échantillon pour chaque MES sélectionnées. L'incertitude produite par l'erreur aléatoire u_{ech} s'écrit alors, pour chaque paramètre et dans chaque site :

$$u_{ech} = 2.78 * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Où 2,78 est le coefficient de Student applicable pour un intervalle de confiance de 95 % à partir de $n = 5$ mesures, et σ , l'écart-type des valeurs.

Les résultats sont présentés dans le Tableau D.1. Les résultats du test montrent que l'incertitude produite par l'erreur aléatoire est en moyenne, pour chaque paramètre, entre 2 et 4 % si l'on utilise les coefficients de Student, soit légèrement plus que ce qu'indique la fiche technique. Cette erreur va jusqu'à 12 % pour certains paramètres mais il s'agit généralement

du même échantillon : celui de Jaulnes (3). Il est en effet possible que l'échantillon se soit détérioré le temps des mesures.

2. Variabilité de l'échantillon

Sur une dizaine de grammes récupérés au total dans chaque trappe, quelques milligrammes sont nécessaires pour les analyses magnétiques. Dans un système enregistrant de nombreux phénomènes naturels et anthropiques, il est judicieux de se demander ce que quelques milligrammes représentent sur l'ensemble des MES piégées dans chaque trappe.

La problématique de variabilité de l'échantillon a été abordée en sélectionnant 5 portions d'échantillons de chaque trappe à MES sélectionnée pour le test. Les mesures de paramètres d'hystérésis ont ainsi été effectuées tous dans les mêmes conditions.

4) Incertitude totale

L'incertitude totale tient en compte de la sensibilité et de la répétabilité de l'appareil ainsi que de la variabilité au sein de l'échantillon. Il faudrait donc en théorie associer les trois écarts-types. L'incertitude due à la sensibilité de l'appareil n'est pas connue hormis les aimantations (10^{-2} nAm²). Il semble toutefois qu'elle est négligeable (on mesure des M_{rs} de 0,5 à 8 nAm²/kg).

De ce fait, l'incertitude totale u_t prend en compte l'erreur aléatoire et la variabilité de l'échantillon et s'écrit :

$$u_t = 2.78 * \sqrt{u_{al}^2 + u_{ech}^2}$$

Où 2,78 est le coefficient de Student applicable pour un intervalle de confiance de 95 % à partir de 5 mesures, u_{al} et u_{ech} sont respectivement l'erreur aléatoire et la variabilité de l'échantillon.

Toutefois, le protocole permettant d'estimer la variabilité intègre également l'erreur aléatoire, qui ne peut être dissociée lors des mesures. u_{al} et u_{ech} ne sont donc pas indépendants (u_{ech} intègre u_{al}). Nous considérerons donc que :

$$u_t = 2.78 * u_{ech}$$

Les résultats sont présentés dans le Tableau D.2.

Les 5 mesures sont statistiquement insuffisantes pour estimer avec précision l'incertitude totale. Toutefois, celle-ci ne semble pas être systématiquement dépendante de la valeur du paramètre. Parfois les valeurs moyennes se ressemblent et les incertitudes diffèrent (par exemple pour le paramètre H_c des sites 2 et 3), parfois les moyennes sont significativement différentes et les incertitudes sont proches (exemple du paramètre M_{rs} des sites 7 et 8). Il est donc possible que si on effectue suffisamment de mesures sur toutes les MES, on tend vers une incertitude totale uniforme. Une autre possibilité serait que l'incertitude varie localement

(par exemple à cause de mélanges minéralogiques/granulométriques différents au sein de chaque échantillon), mais cette possibilité ne peut pas être confirmée avec le test sur les échantillons de février 2012.

La Figure D représente, pour chaque paramètre, les incertitudes des échantillons de février 2012 en fonction de l'aimantation à saturation M_s . Dans l'ensemble, la plupart des incertitudes ne dépendent pas de l'aimantation, sauf pour le M_{rs} et le M_s . Pour ces deux paramètres, plus l'aimantation est élevée, plus la mesure est précise et l'incertitude tend à être faible.

Pour les autres paramètres, les incertitudes sont physiquement et proportionnellement très variables d'un échantillon à l'autre. Même si aucune tendance n'est apparente, le nombre de données ne permet pas de dire si l'incertitude est constante et tendrait à s'homogénéiser si l'on effectuait suffisamment de mesures.

Ainsi, avec les informations obtenues par les tests de représentativité, on considère que, dans chaque site et pour chaque paramètre, l'incertitude est constante : on néglige les variations d'incertitude dans le temps. L'incertitude est en revanche variable d'un site à l'autre.

Tableau D.1 : Résultats du test d'estimation de l'incertitude produite par l'erreur aléatoire des paramètres d'hystérésis des MES de la Seine prélevées en février 2012. Pour chaque paramètre, les valeurs sont les moyennes obtenues sur 5 préparations par échantillon. Les valeurs d'incertitude totale extrêmes et moyennes sont affichées en bas des tableaux.

Site n°	B _c (mT)	u _{al}	%	B _{cr} (mT)	u _{al}	%	M _{rs} (nAm ² /mg)	u _{al}	%	M _s (nAm ² /mg)	u _{al}	%	S.C./m	u _{al}	%	B _{cr} /B _c	u _{al}	%	M _r /M _s	u _{al}	%
(1)	10,6	0,4	4	34,2	0,5	1	0,42	0,02	5	3,5	0,0	1	-3	0	2	3,2	0,1	4	0,12	0,01	4
(2)	12,0	0,2	2	36,7	1,0	3	0,47	0,02	4	3,1	0,0	1	-13	0	0	3,1	0,1	4	0,15	0,01	4
(3)	11,6	1,4	12	31,0	1,4	4	0,40	0,04	11	2,5	0,1	2	3	0	2	2,7	0,3	12	0,16	0,02	11
(4)	9,3	0,5	5	30,1	1,6	5	1,48	0,05	3	11,7	0,2	2	-9	1	6	3,3	0,3	8	0,13	0,00	4
(5)	12,3	0,6	5	37,6	2,0	5	0,88	0,03	3	5,9	0,1	2	-11	0	2	3,1	0,3	8	0,15	0,00	3
(6)	12,6	0,2	2	35,9	0,9	2	1,42	0,05	4	9,2	0,0	0	-20	0	0	2,8	0,1	3	0,15	0,01	4
(7)	8,9	0,3	1	31,1	0,3	1	1,35	0,06	4	11,8	0,2	2	-18	0	2	3,4	0,1	3	0,12	0,00	3
(8)	10,0	0,4	3	34,5	1,2	3	3,05	0,16	5	23	0,4	2	-23	0	2	3,4	0,1	4	0,13	0,01	7
(11)	10,3	0,2	3	32,0	0,9	3	0,68	0,02	3	4,9	0,1	1	-8	0	1	3,1	0,1	2	0,14	0,00	2
(15)	8,2	0,2	2	28,8	0,7	2	3,02	0,09	3	29,3	0,7	2	-30	1	3	3,5	0,1	4	0,10	0,00	2
(17)	10,5	0,2	2	33,6	0,6	2	1,14	0,03	3	8,3	0,1	1	-25	0	1	3,2	0,1	2	0,14	0,00	2
(18)	9,5	0,4	8	32,4	2,5	8	1,75	0,11	7	15,3	1,2	8	-6	0	6	3,4	0,3	8	0,11	0,01	10
(20)	10,1	0,2	1	33,0	0,5	1	1,93	0,03	1	13,8	0,1	0	-29	0	1	3,3	0,1	2	0,14	0,00	1
	Min u _t	0,2	1	Min u _t	0,3	1	Min u _t	0,02	1	Min u _t	0,0	0	Min u _t	0	0	Min u _t	0,1	2	Min u _t	0,00	1
	Max u _t	1,4	12	Max u _t	2,5	8	Max u _t	0,16	11	Max u _t	1,2	8	Max u _t	1	6	Max u _t	0,3	12	Max u _t	0,02	11
	Moy u_t	0,4	4	Moy u_t	1,1	3	Moy u_t	0,05	4	Moy u_t	0,4	2	Moy u_t	0	2	Moy u_t	0,2	5	Moy u_t	0,01	4

Tableau D.2 : Résultats du test de représentativité de mesures des MES de la Seine prélevées en février 2012. Pour chaque paramètre, les valeurs sont les moyennes obtenues sur 5 préparations par échantillon. Les valeurs d'incertitude totale extrêmes et moyennes sont affichées en bas des tableaux.

Site n°	B _c (mT)	u _t	%	B _{cr} (mT)	u _t	%	M _{rs} (nAm ² /mg)	u _t	%	M _s (nAm ² /mg)	u _t	%	S.C./m	u _t	%	B _{cr} /B _c	u _t	%	M _r /M _s	u _t	%
(1)	11,7	3,2	27	36,6	5,9	16	0,54	0,32	59	3,8	2,6	68	-5	2	40	3,2	0,8	25	0,15	0,04	27
(2)	10,7	2,0	19	34,4	6,1	18	0,83	0,35	42	6,1	2,7	44	-14	3	21	3,2	0,7	22	0,14	0,05	36
(3)	10,8	0,8	7	34,8	2,0	6	0,78	0,49	63	5,5	4,2	76	-6	3	50	3,2	0,4	13	0,15	0,01	7
(4)	9,8	1,7	17	31,5	2,2	7	1,65	0,75	45	12,3	3,2	26	-14	10	71	3,2	0,4	13	0,13	0,04	31
(5)	12,3	0,8	7	38,1	0,9	2	1,49	0,27	18	10,2	1,4	14	-25	9	36	3,1	0,2	6	0,15	0,02	13
(6)	11,2	0,6	5	35,4	1,5	4	1,72	0,62	36	12,5	5,0	40	-21	15	71	3,2	0,2	6	0,14	0,02	14
(7)	9,8	1,7	17	33,8	2,1	6	1,60	0,30	19	12,6	4,0	32	-18	5	28	3,5	0,4	11	0,13	0,02	15
(8)	8,4	0,9	11	34,0	2,1	6	4,10	0,28	7	36,7	6,4	17	-31	8	26	4,0	0,4	10	0,11	0,02	18
(11)	11,0	2,5	23	35,7	4,3	12	1,70	0,40	24	12,3	4,5	37	-21	8	38	3,3	0,4	12	0,14	0,03	21
(15)	9,0	2,5	28	33,0	2,8	8	2,16	0,81	38	17,4	5,4	31	-24	5	21	3,8	0,9	24	0,12	0,03	25
(17)	11,2	2,1	19	35,2	6,1	17	2,04	0,75	24	14,2	4,5	32	-27	11	41	3,2	0,5	16	0,14	0,01	7
(18)	9,3	1,1	12	35,0	1,8	5	2,07	0,27	7	18,4	5,2	28	-26	4	15	3,8	0,6	16	0,12	0,02	17
(20)	10,4	0,2	2	34,5	0,9	3	2,43	0,35	24	18,0	2,8	16	-30	12	40	3,3	0,2	6	0,14	0,01	7
	Min u _t	0,4	2	Min u _t	0,9	2	Min u _t	0,27	7	Min u _t	1,4	14	Min u _t	2	15	Min u _t	0,2	6	Min u _t	0,01	7
	Max u _t	3,2	28	Max u _t	6,1	18	Max u _t	0,81	63	Max u _t	6,4	76	Max u _t	15	71	Max u _t	0,9	25	Max u _t	0,05	36
	Moy u_t	1,6	15	Moy u_t	3,0	9	Moy u_t	0,46	32	Moy u_t	4,0	36	Moy u_t	7	38	Moy u_t	0,4	14	Moy u_t	0,03	18

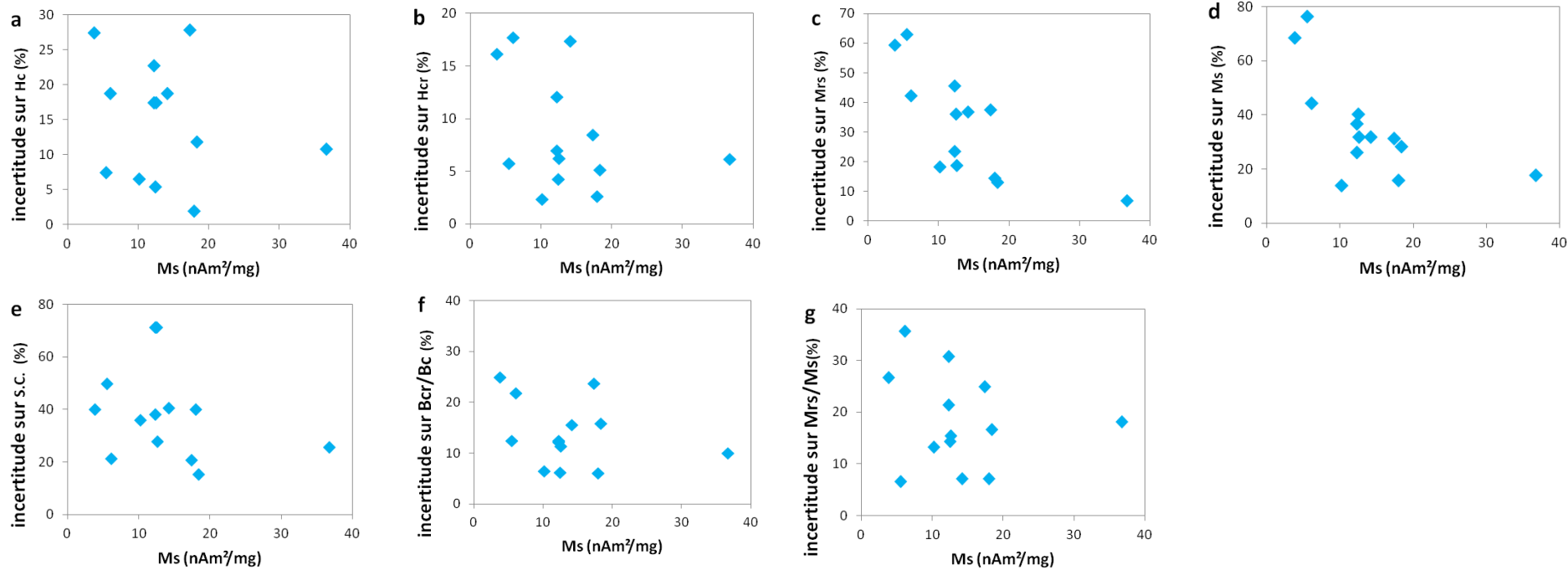


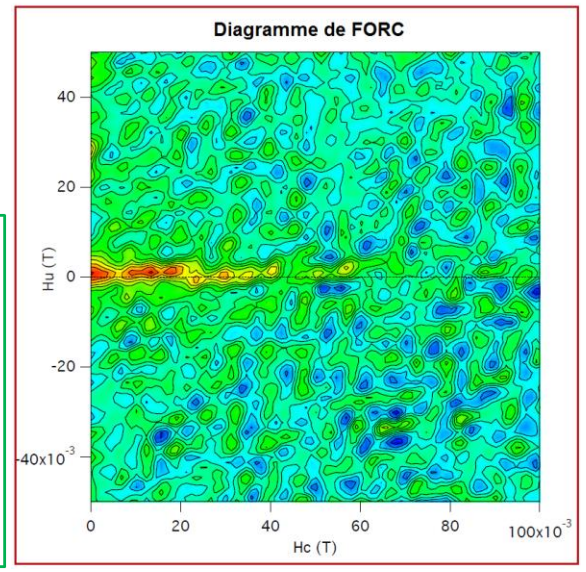
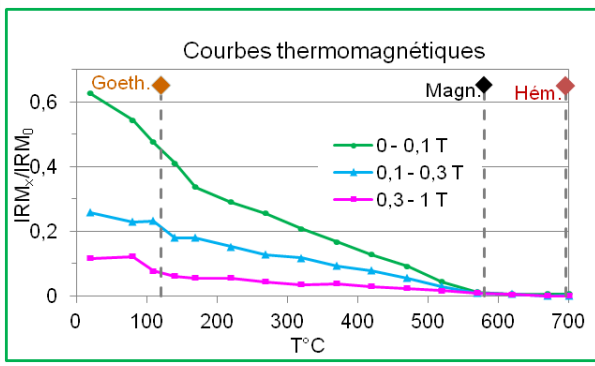
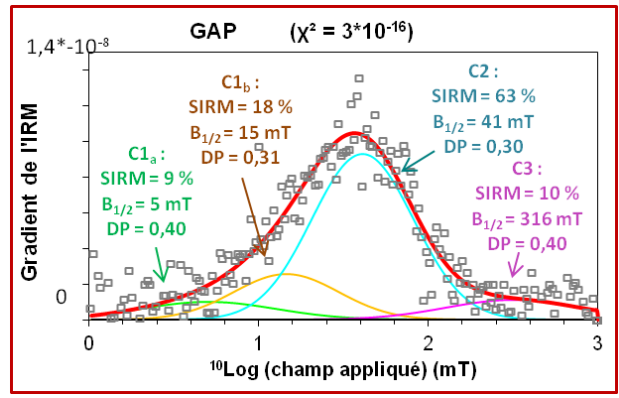
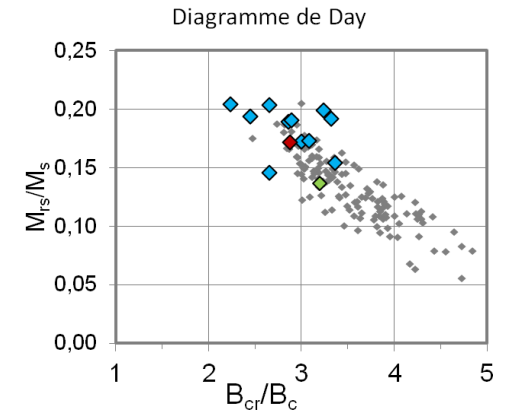
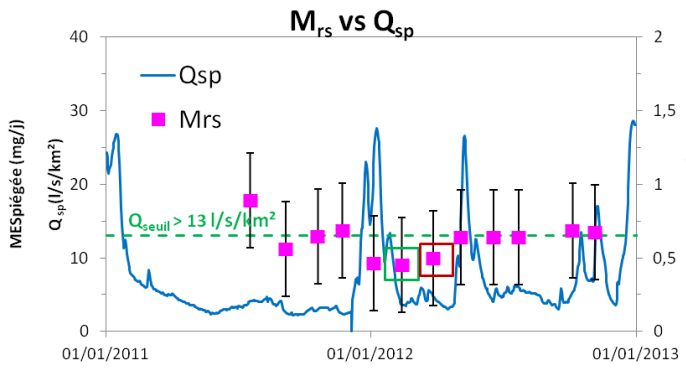
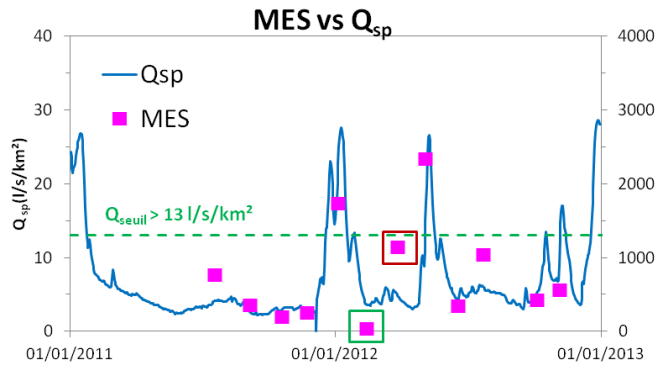
Figure D: Incertitude (en %) en fonction de l'aimantation à saturation M_s sur les échantillons de février 2012.

Annexe E : Données des MES de la Seine

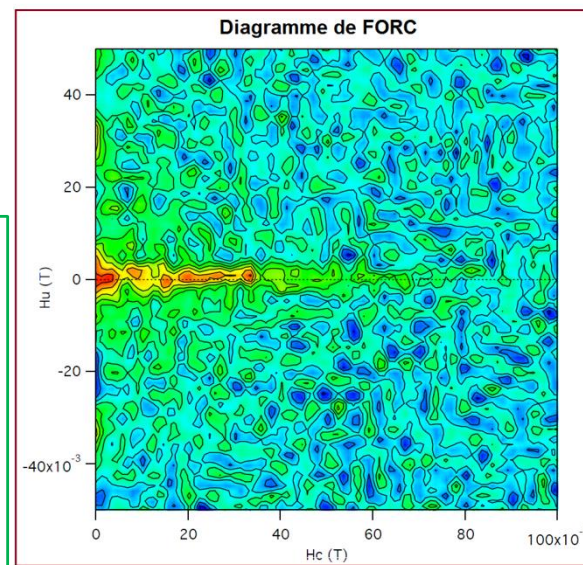
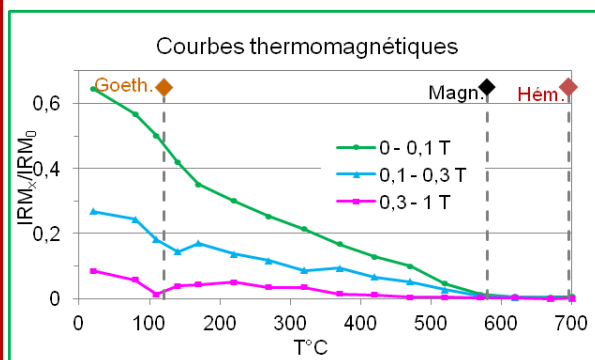
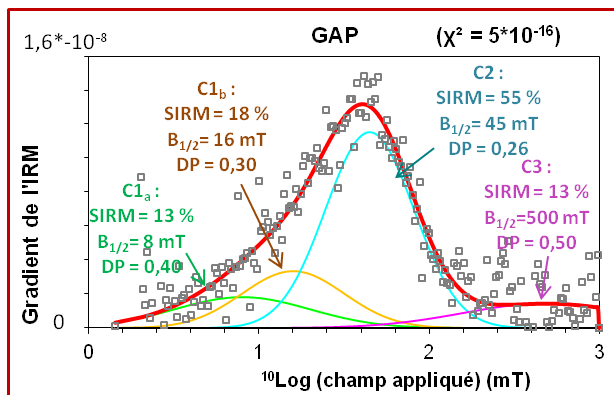
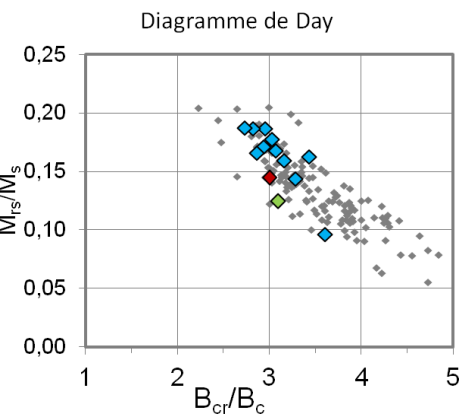
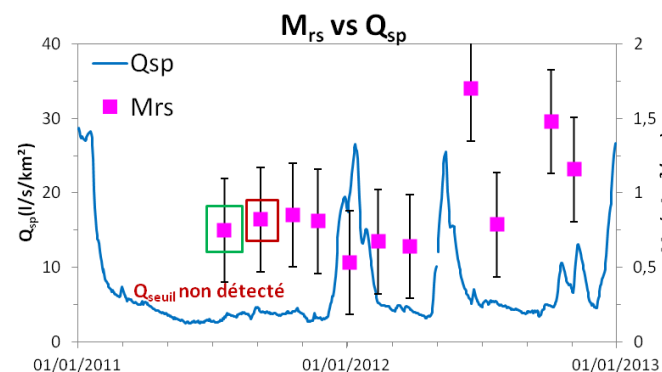
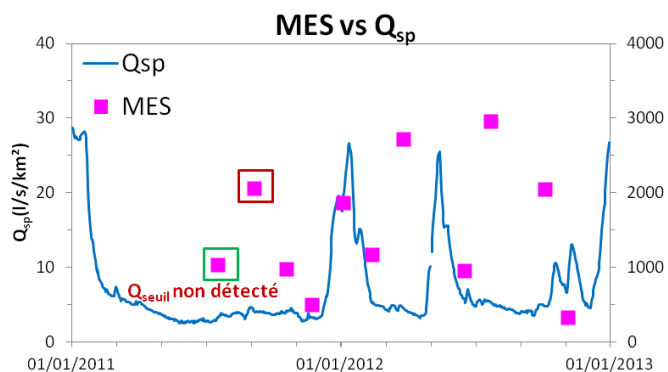
Les pages suivantes représentent, pour chaque site, l'ensemble des principaux résultats de cette étude :

- En haut à gauche : Quantité de MES piégée dans les trappes et débit spécifique Q_{sp} en fonction de la date de prélèvement. Le débit seuil minimal à partir duquel il existe une relation entre débit et MES est graphiquement estimé lorsque possible. Les échantillons sur lesquels les mesures magnétiques ont été réalisées sont entourés en vert (décomposition en gaussiennes cumulées) et en rouge (désaimantation thermique d'IRM 3-axes).
- En haut au milieu : Aimantation rémanente à saturation (M_{rs}) dans les MES et débit spécifique Q_{sp} en fonction de la date de prélèvement. Les carrés vert et rouge autour des échantillons ont la même signification que dans le diagramme de gauche.
- En haut à droite : Diagramme de Dunlop. Les échantillons sélectionnés pour les analyses magnétiques sont représentés par des losanges rouges et verts, les autres par des losanges bleus.
- En bas à gauche : Déconvolution de la courbe du gradient du Log de l'IRM en Gaussiennes et propriétés des composantes C_1 à C_3 (échantillon en rouge sur diagramme Dunlop).
- En bas au milieu : Désaimantation magnétique en champ nul de l'IRM 3-axes (échantillon en vert sur diagramme Dunlop).
- En bas à droite : diagramme de FORC (échantillon en rouge sur diagramme Dunlop).

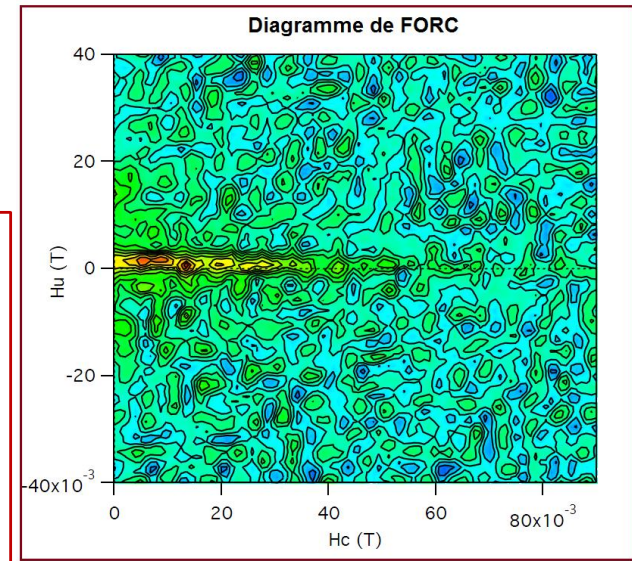
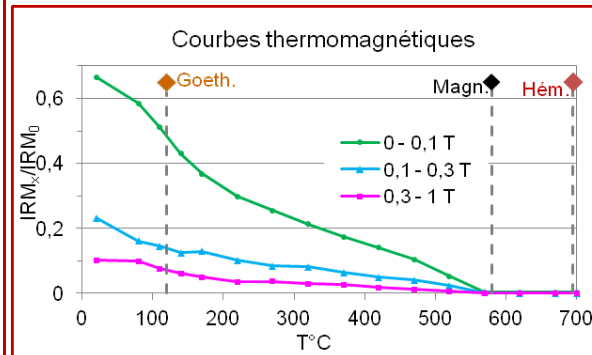
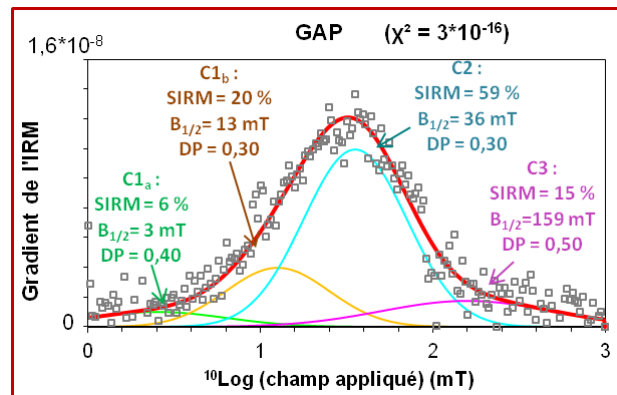
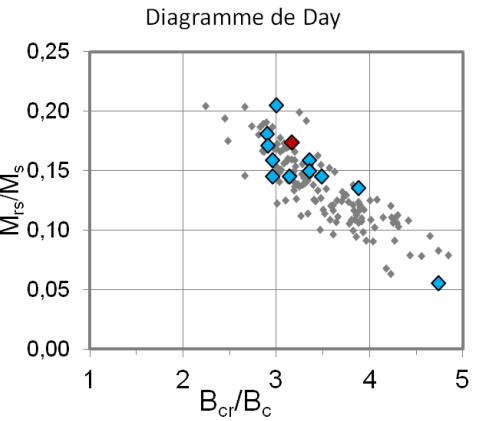
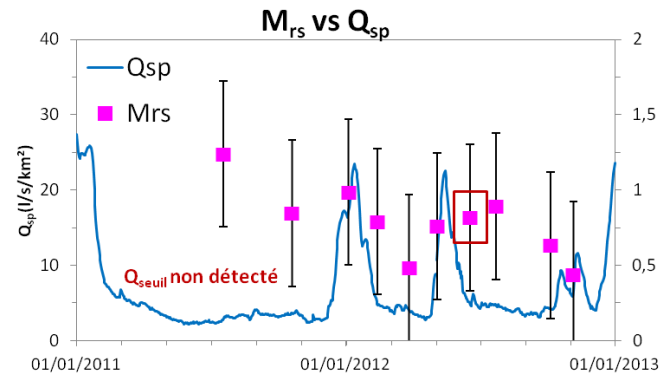
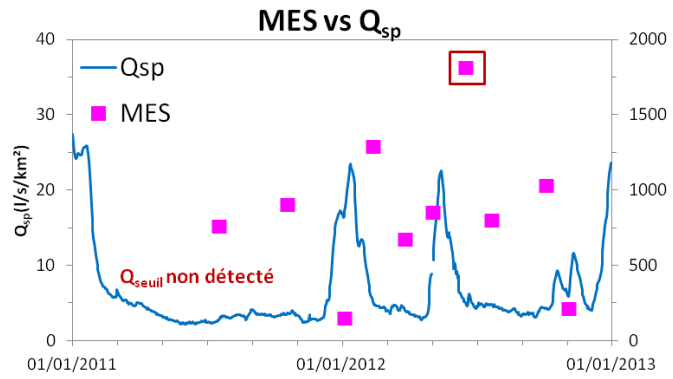
1) Saron



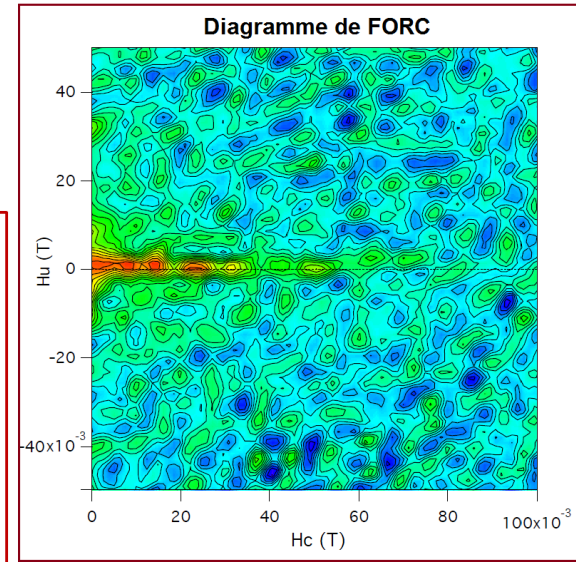
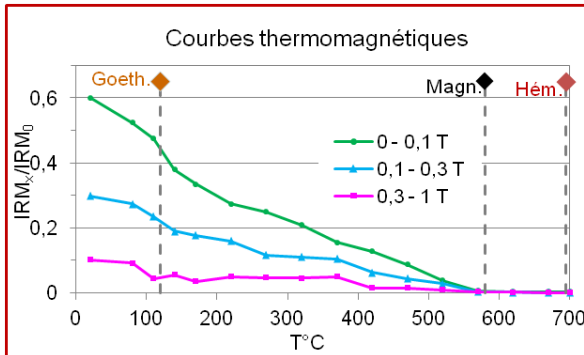
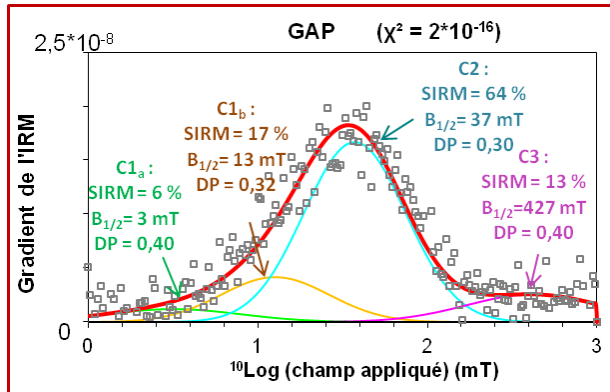
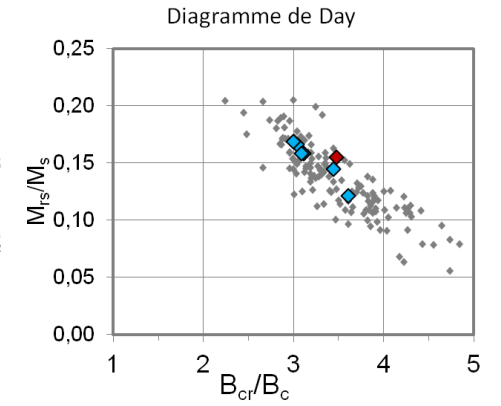
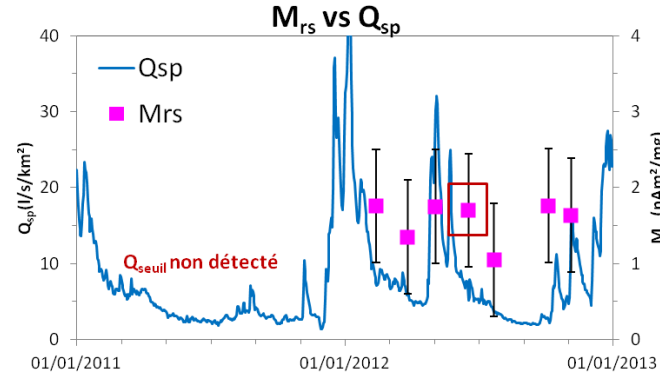
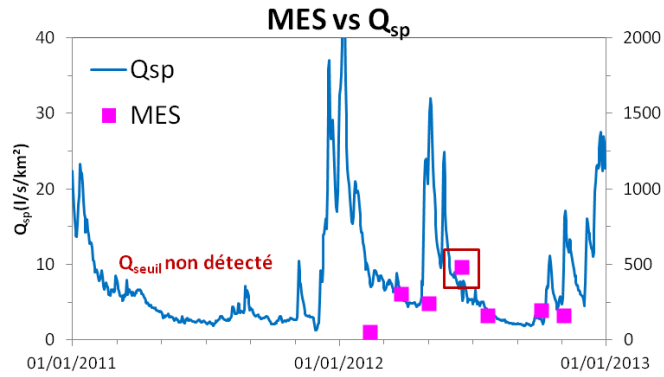
2) Marnay-sur-Seine



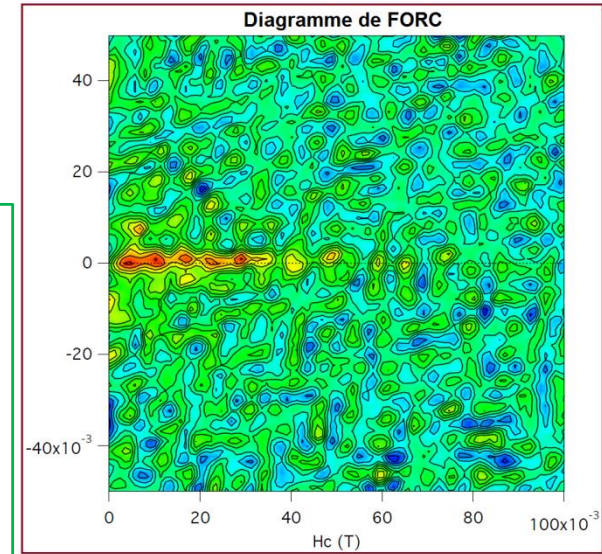
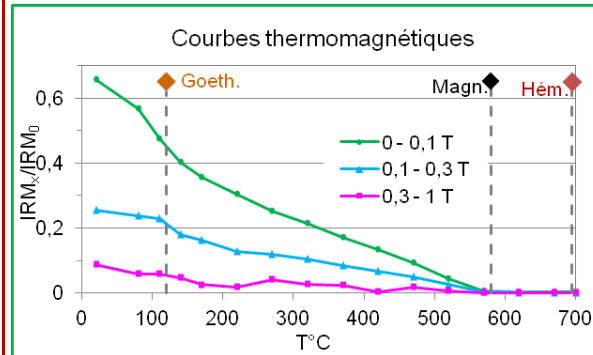
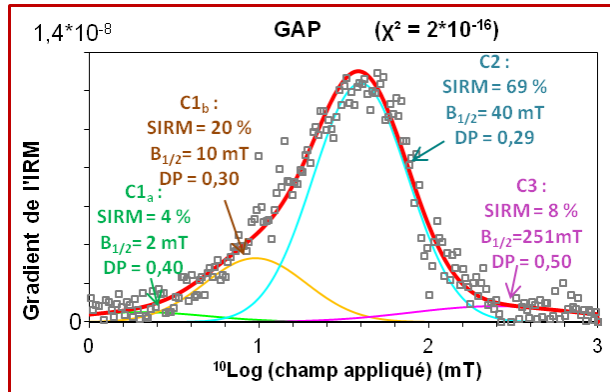
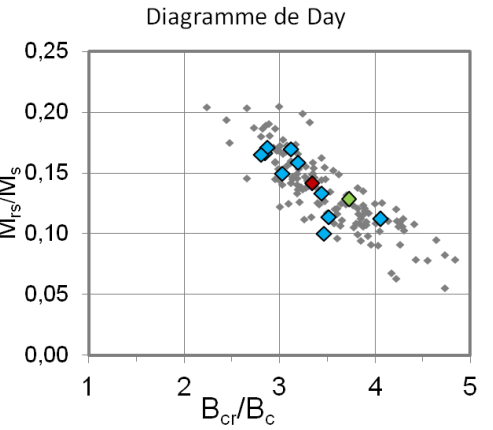
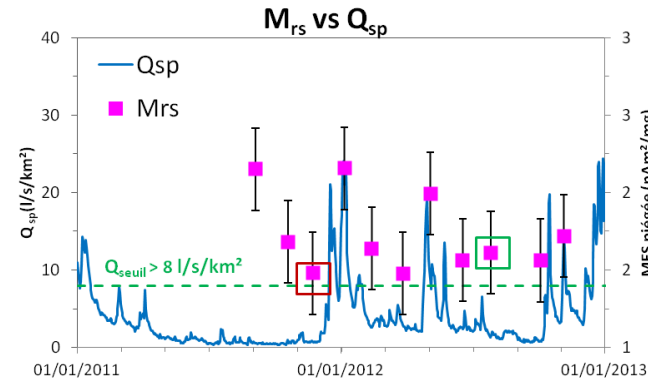
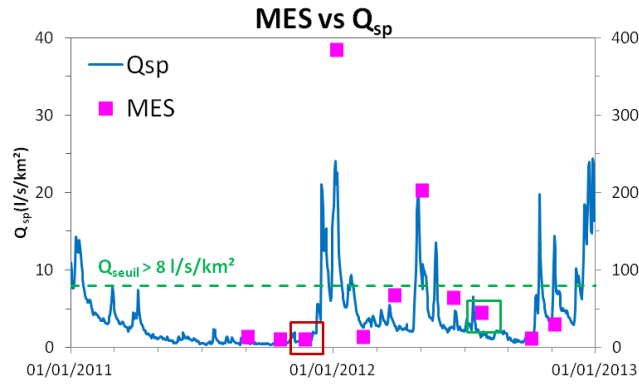
3) Jaulnes



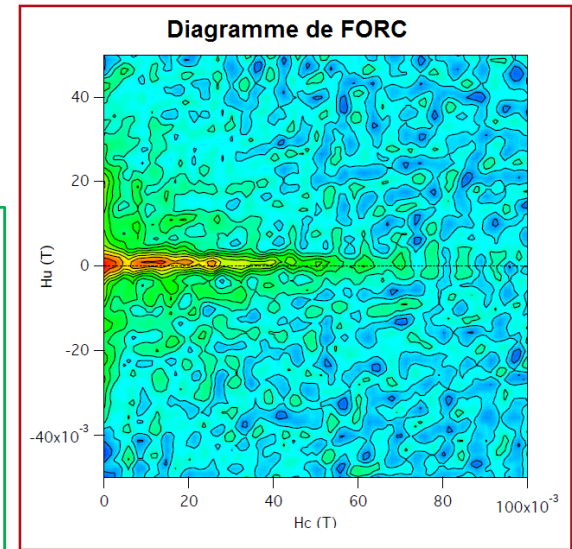
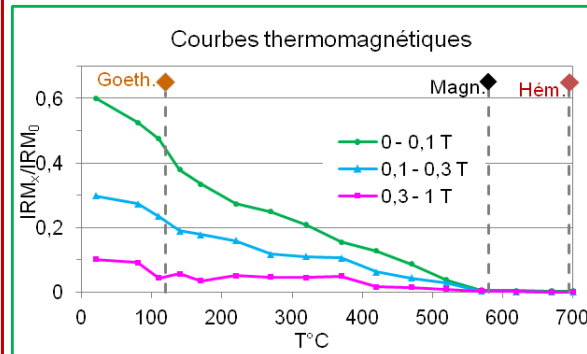
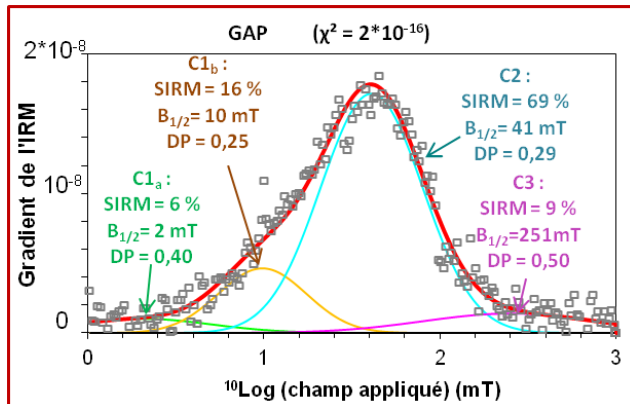
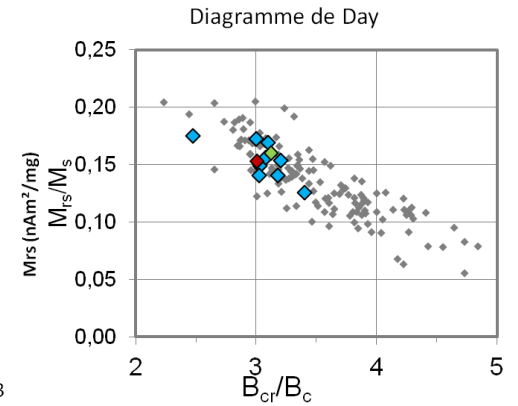
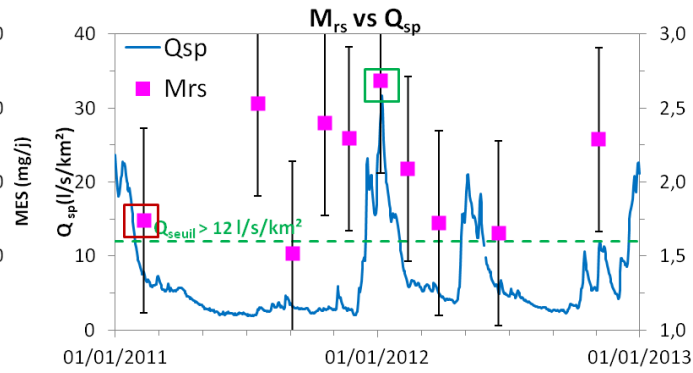
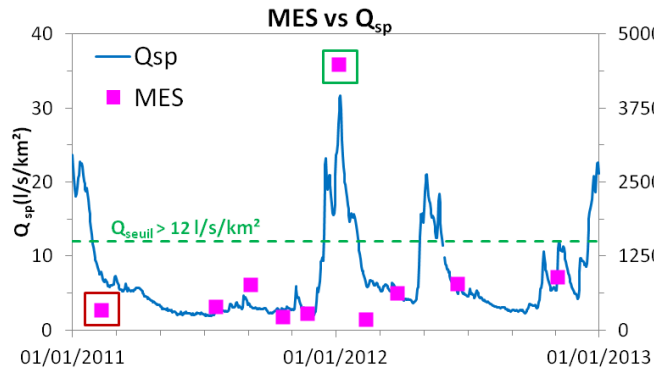
4) Cannes-Ecluse (Yonne)



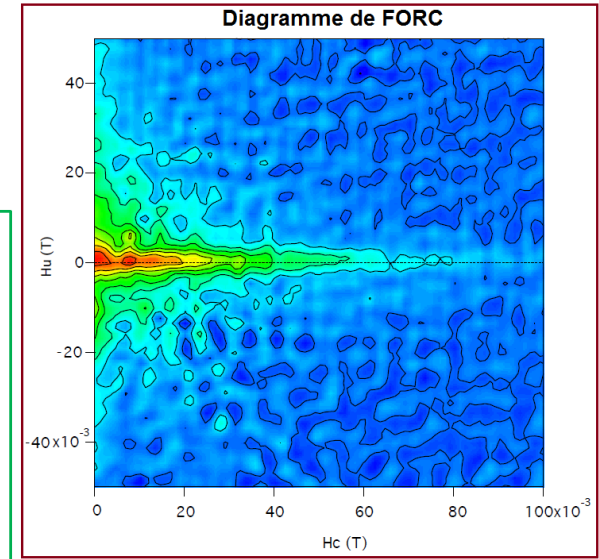
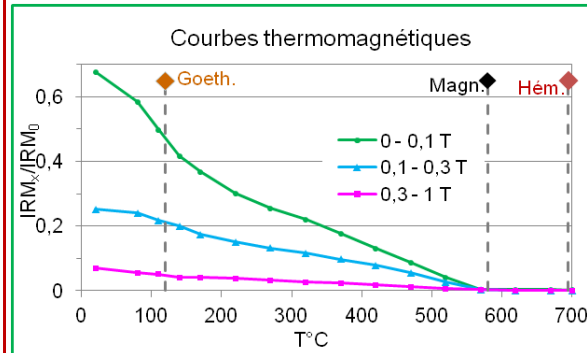
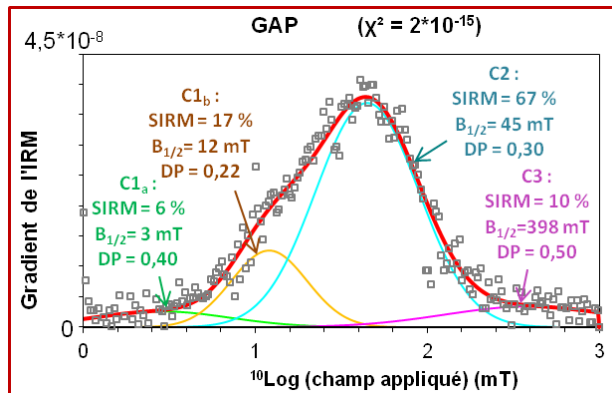
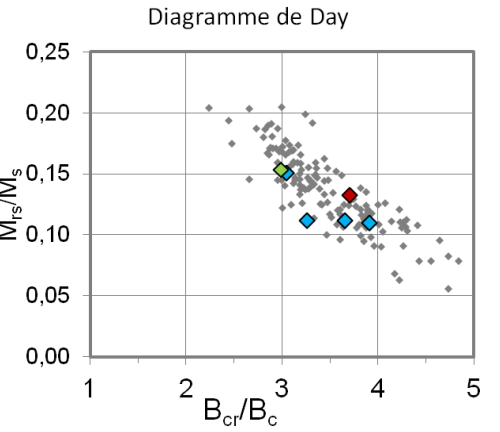
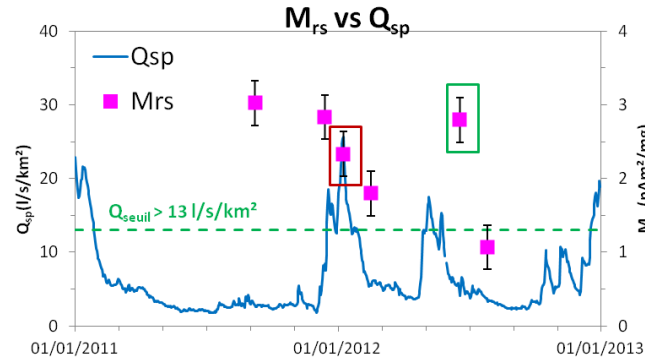
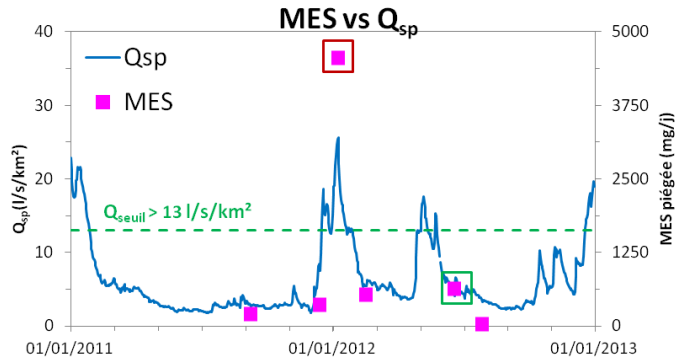
5) Saint-Mammès (Loing)



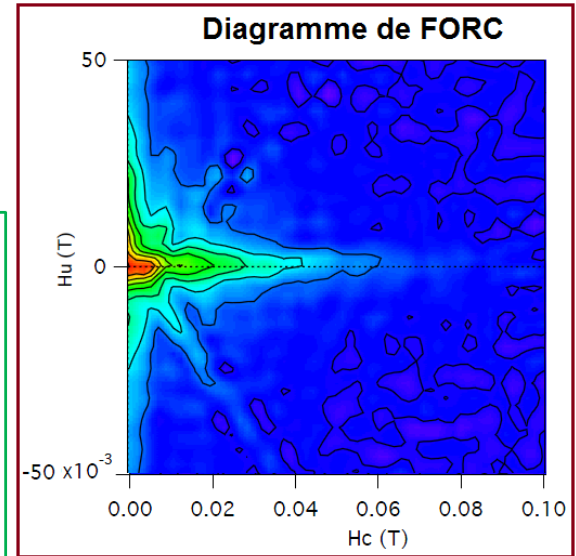
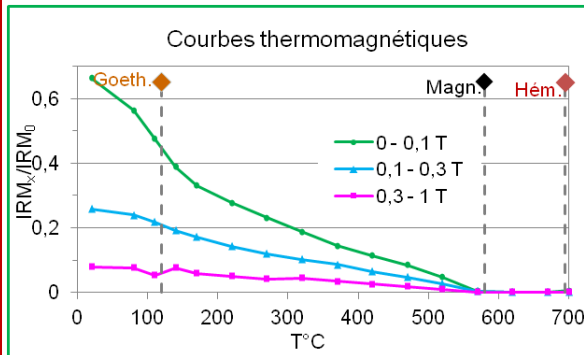
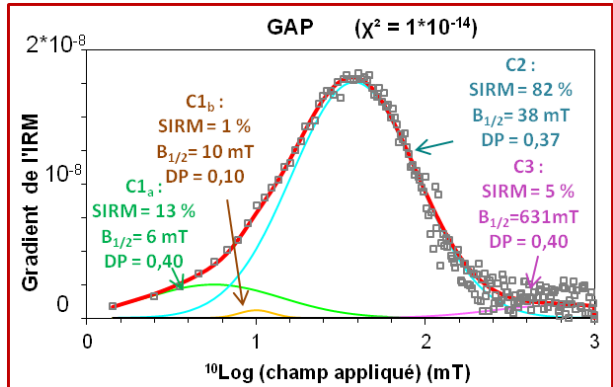
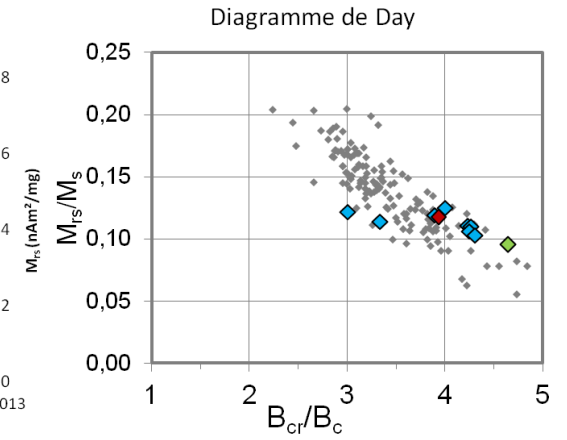
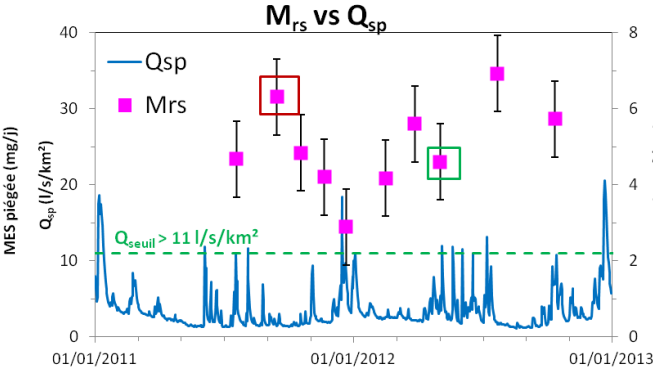
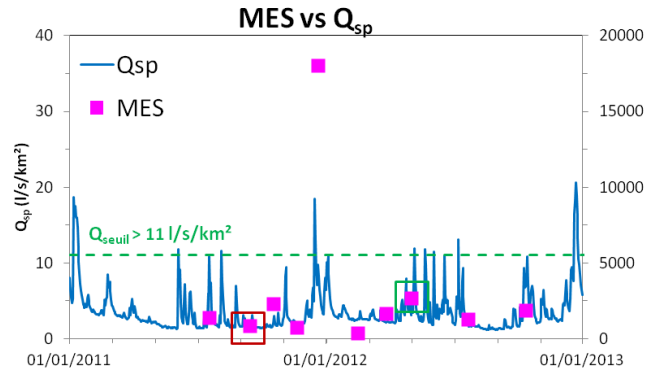
6) Thomery



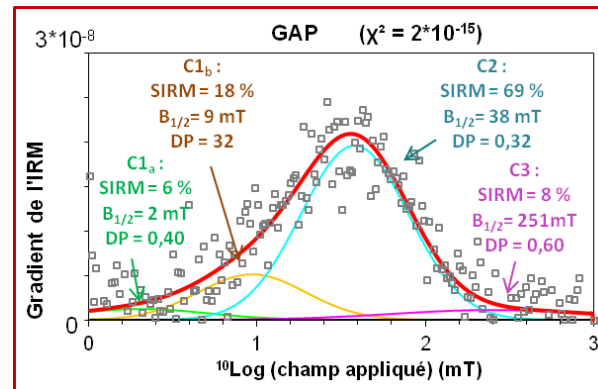
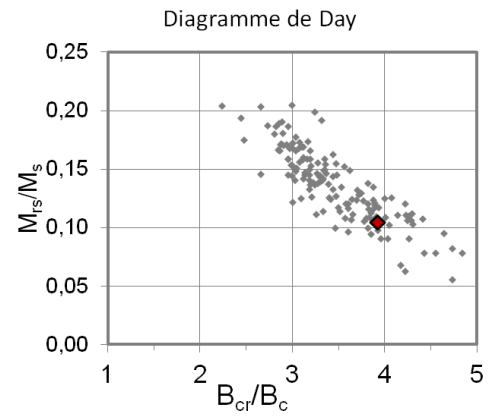
7) Draveil



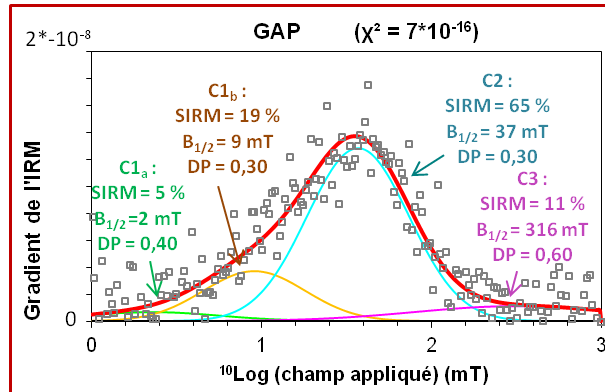
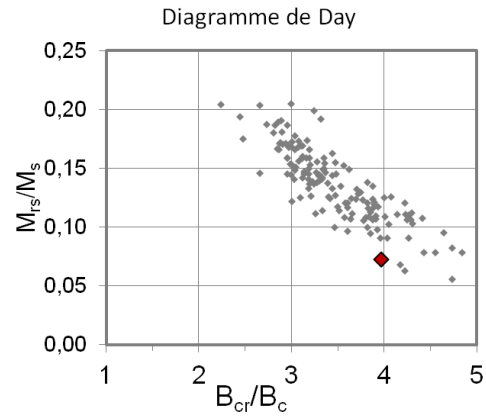
8) Viry-Châtillon (Orge)



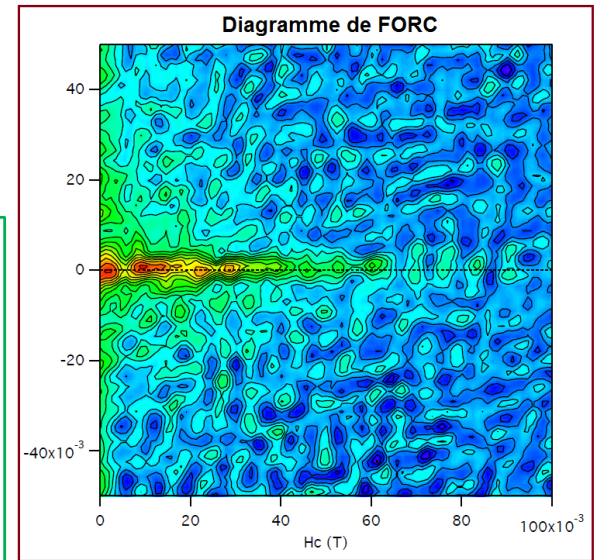
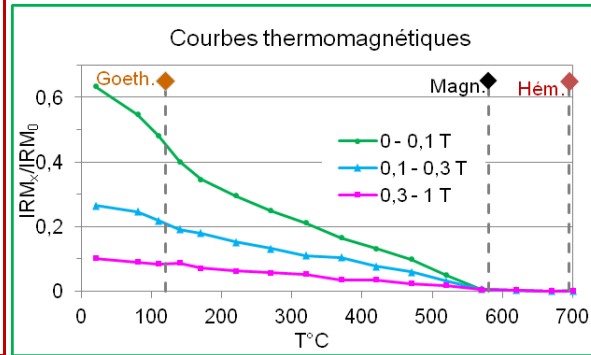
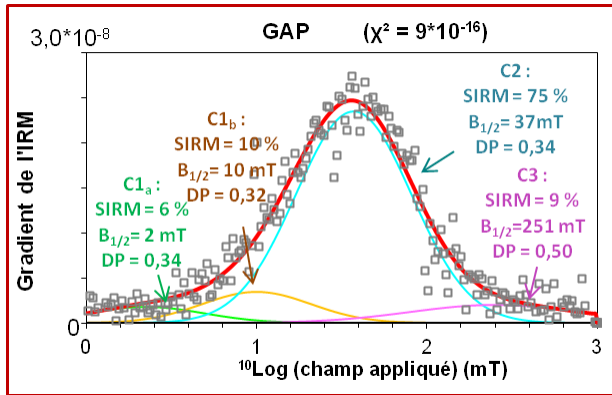
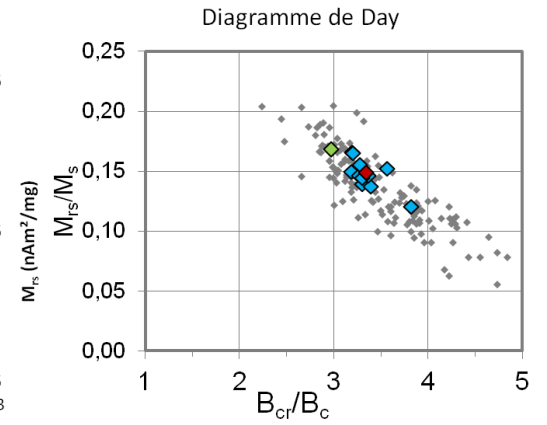
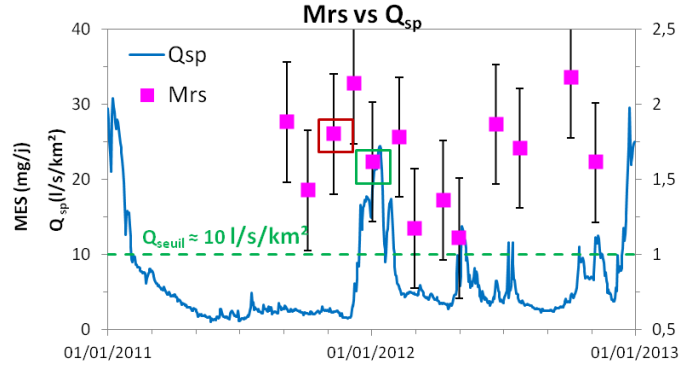
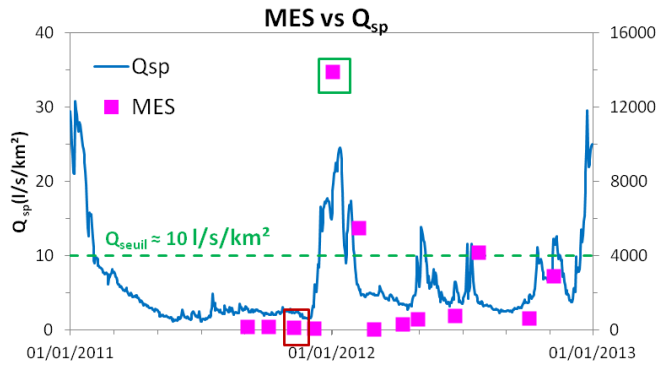
9) Villeneuve-le-Roi



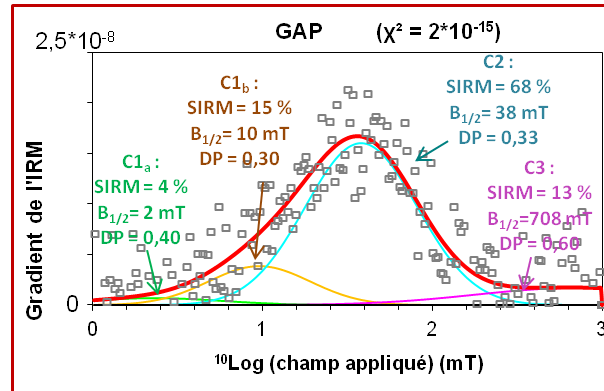
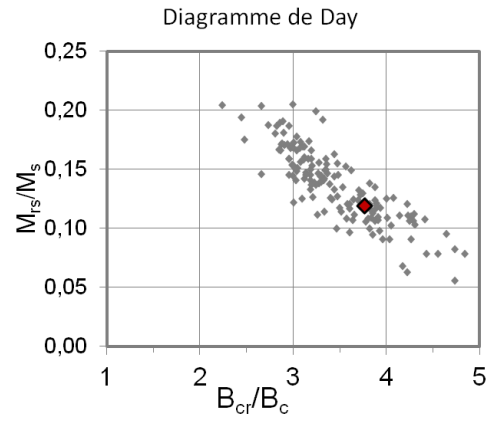
10) Alfortville



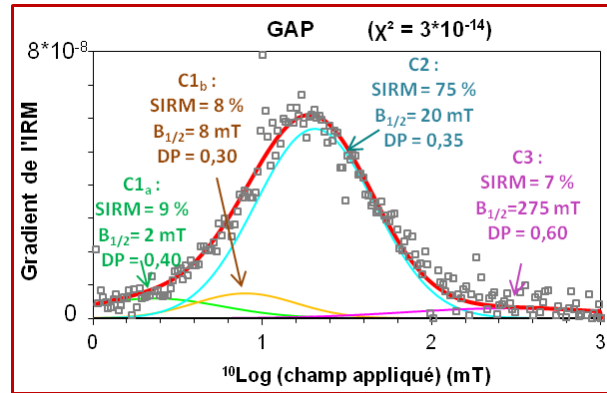
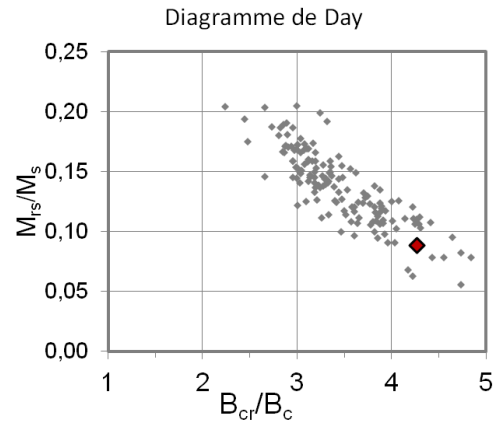
11) Trilbardou (Marne)



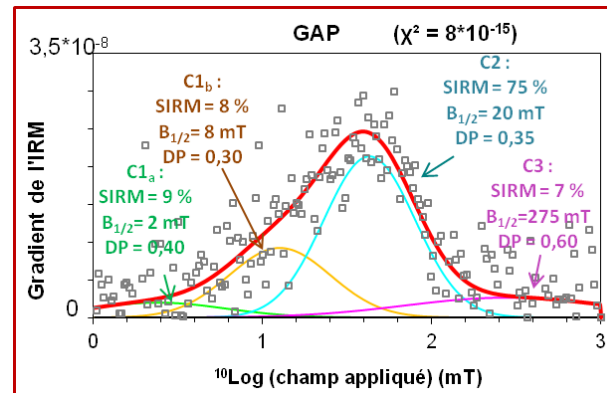
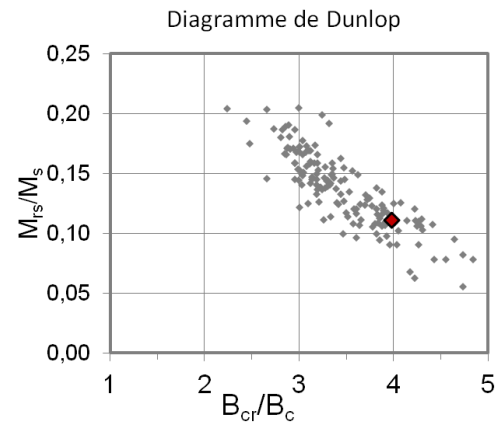
12) Paris (Bibliothèque François Mitterrand)



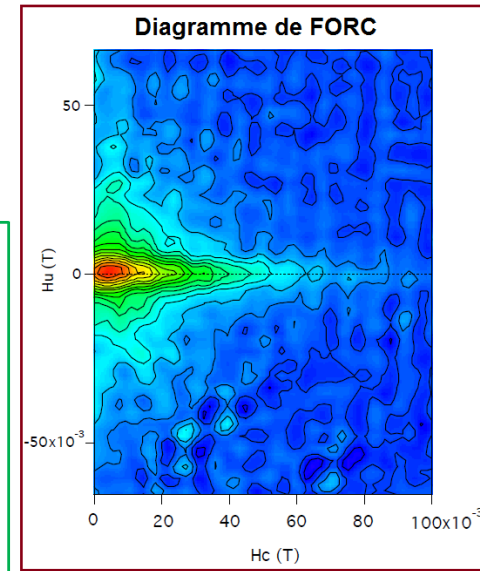
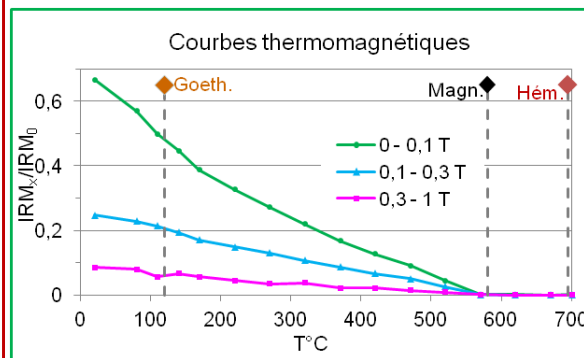
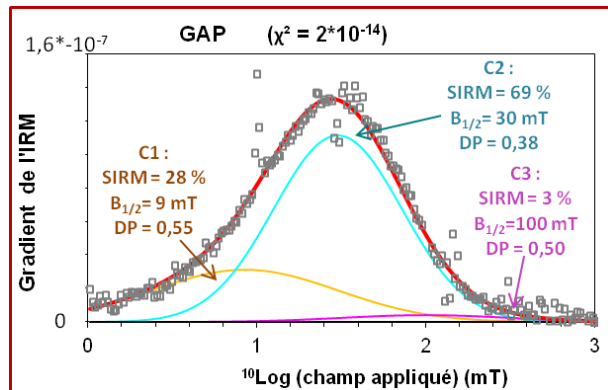
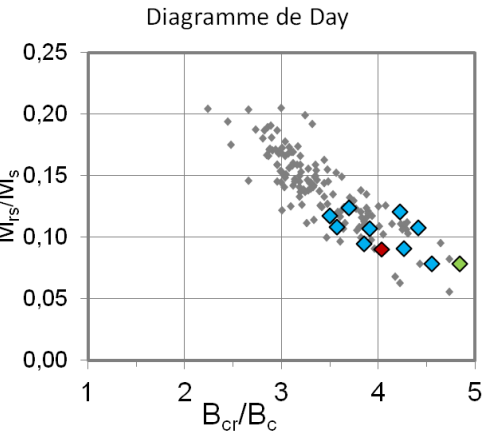
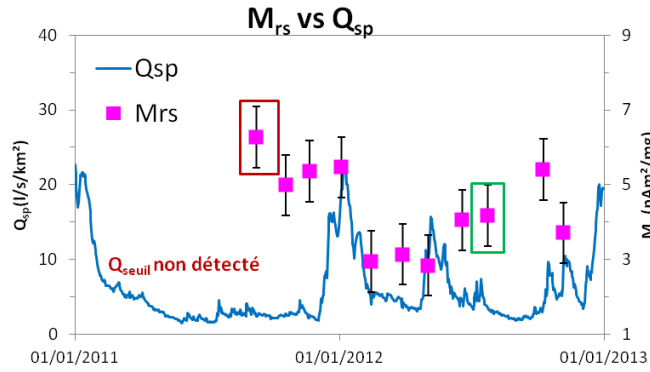
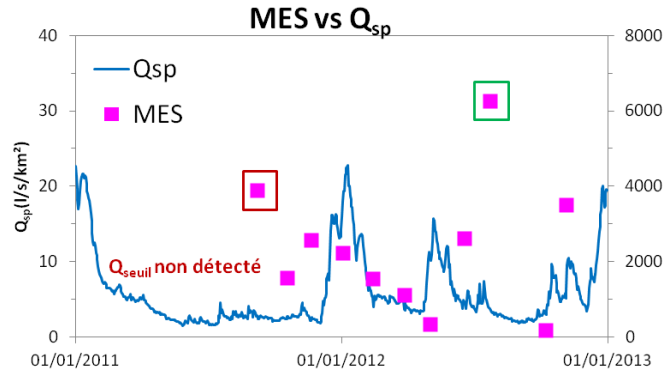
13) Issy-les-Moulineaux



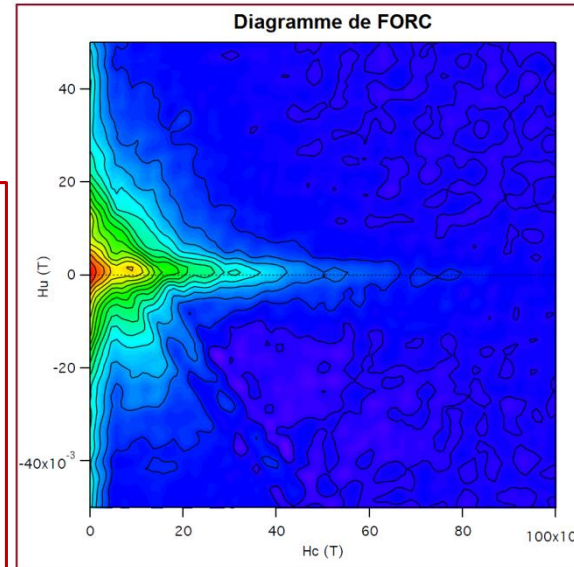
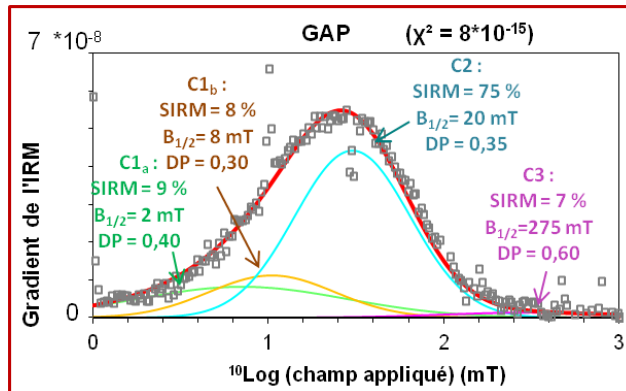
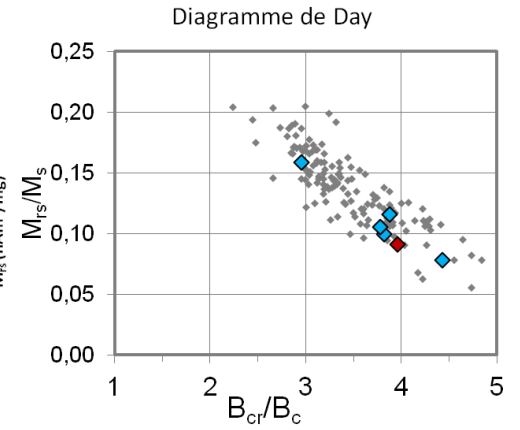
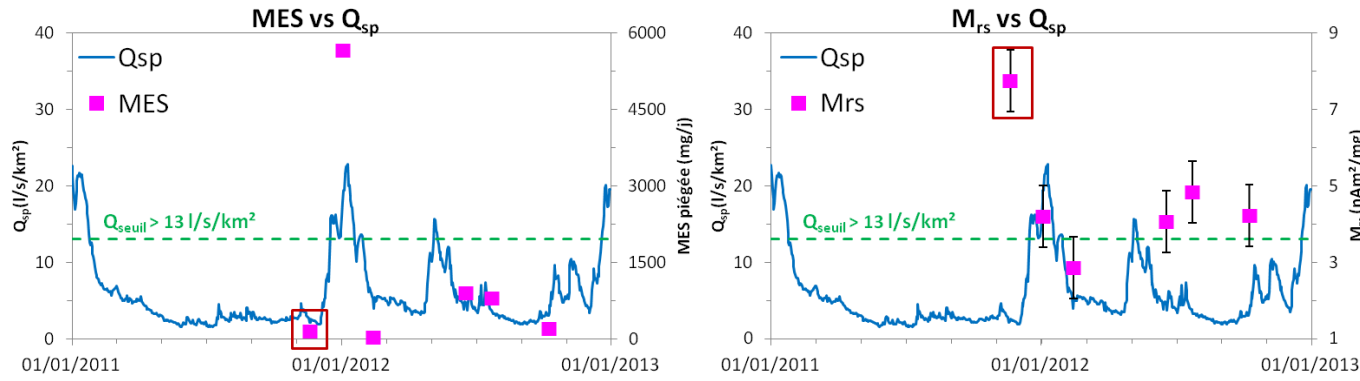
14) L'Île-Saint-Denis



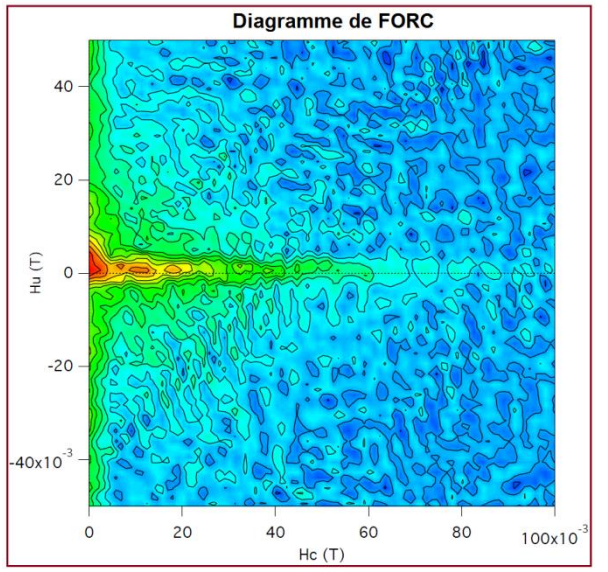
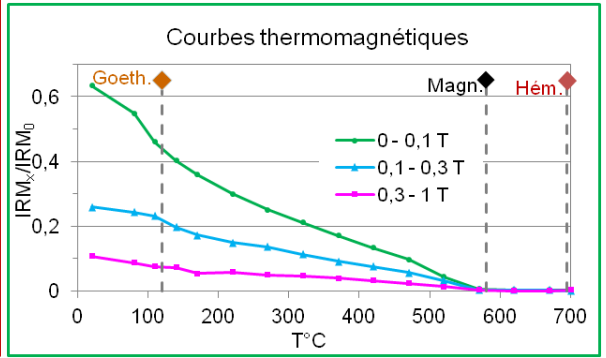
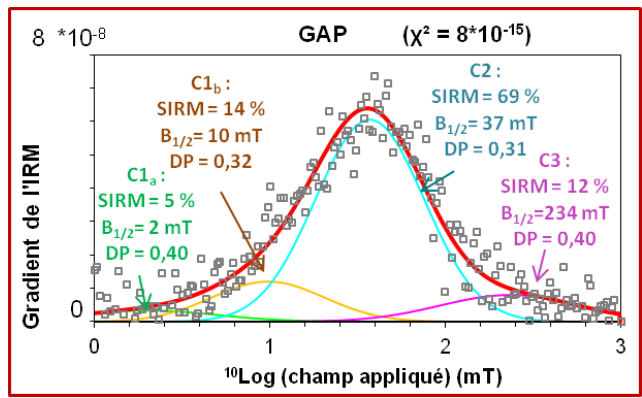
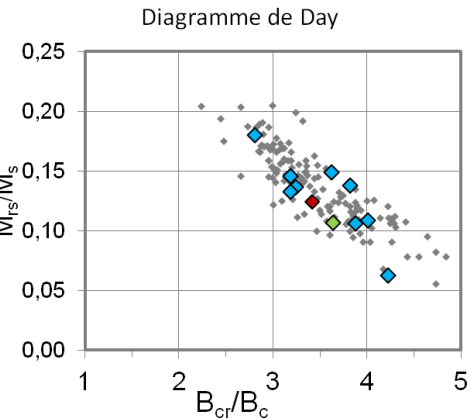
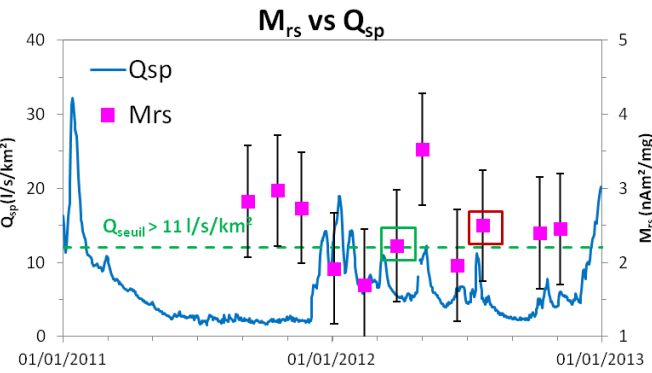
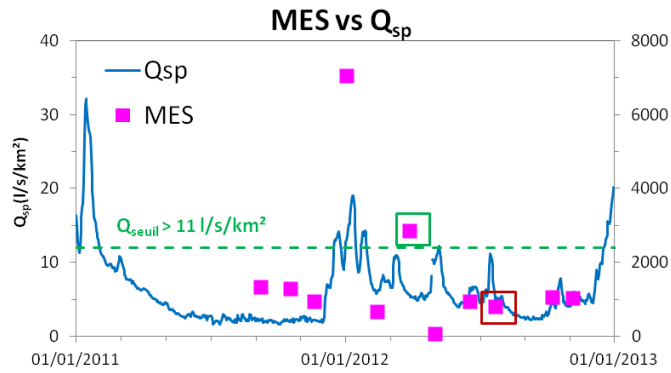
15) Bougival (VNF)



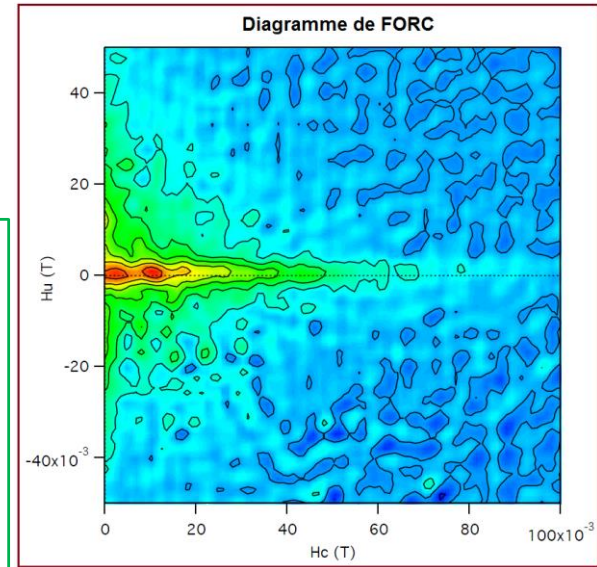
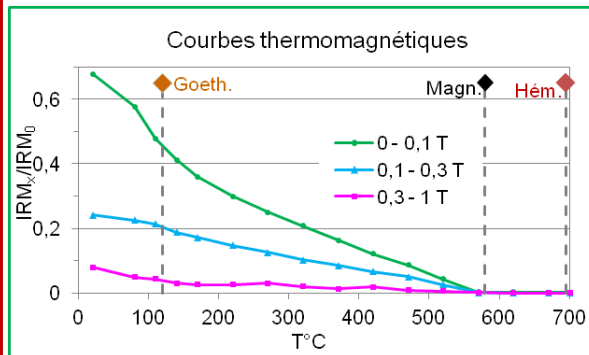
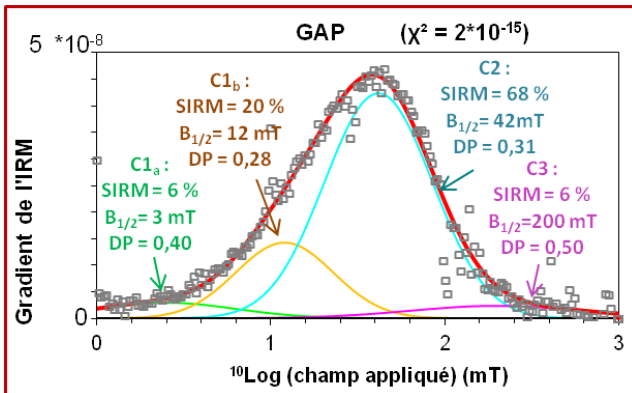
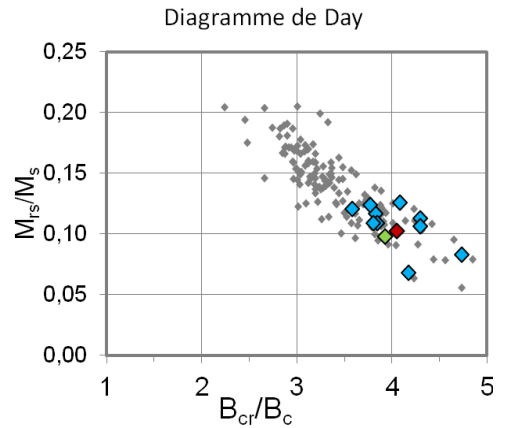
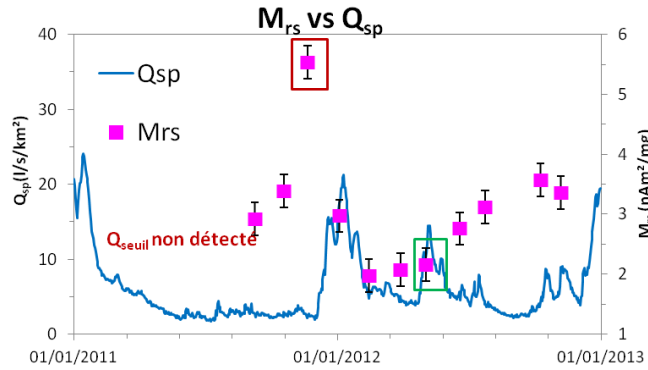
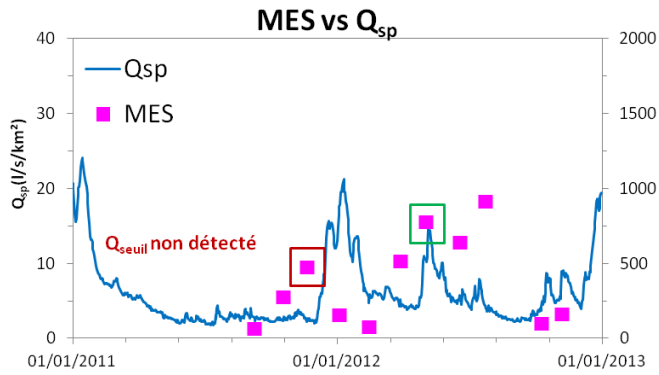
16) Bougival (Pointe)



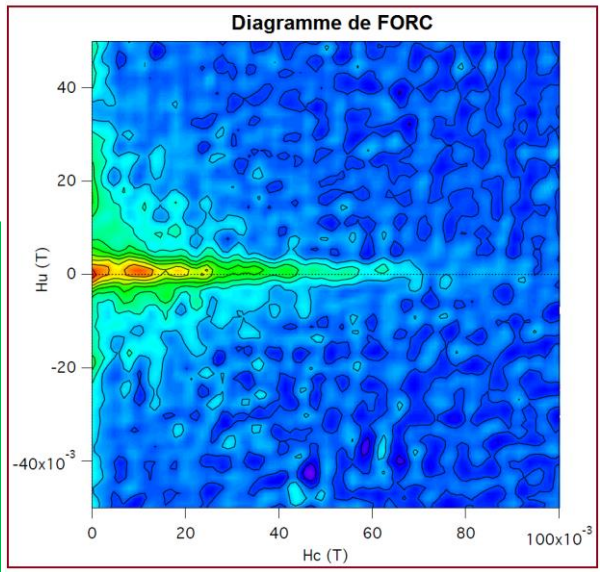
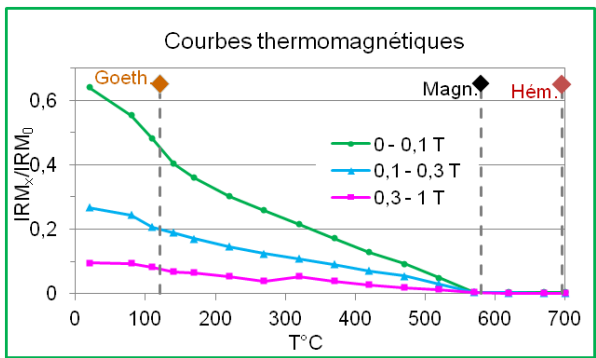
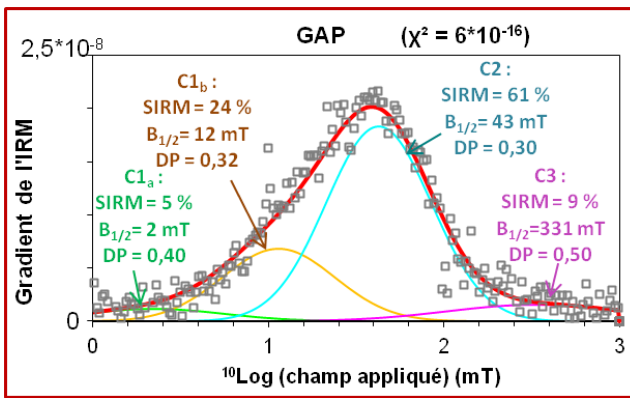
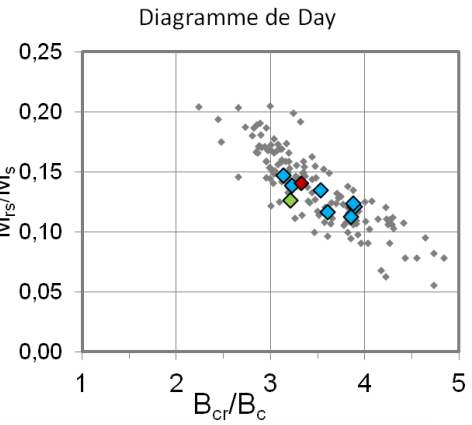
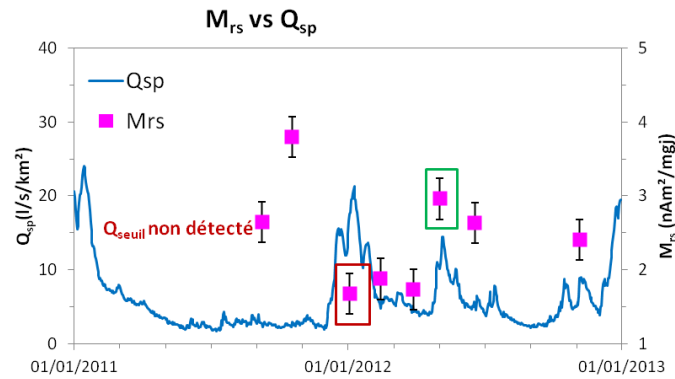
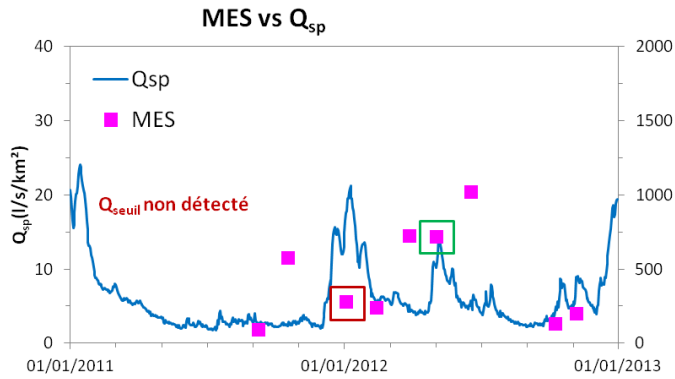
17) Pontoise (Oise)



18) Andrésy



19) Denouval



20) Amfreville

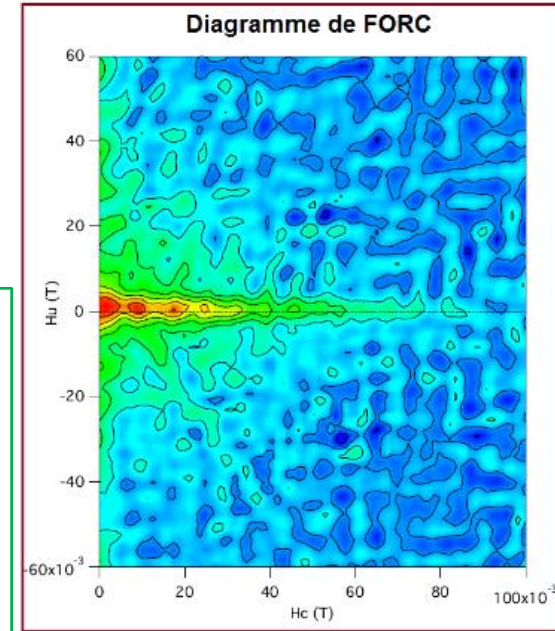
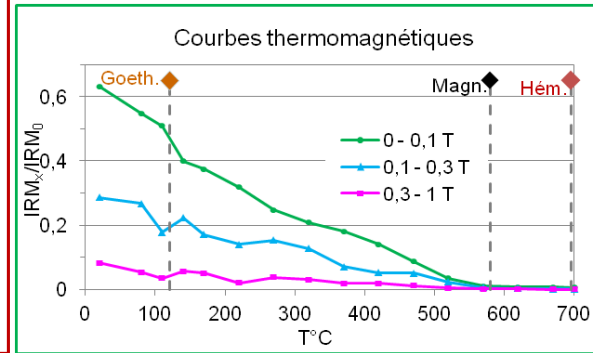
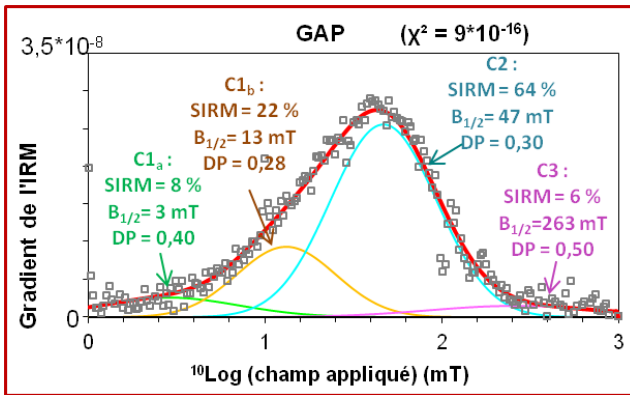
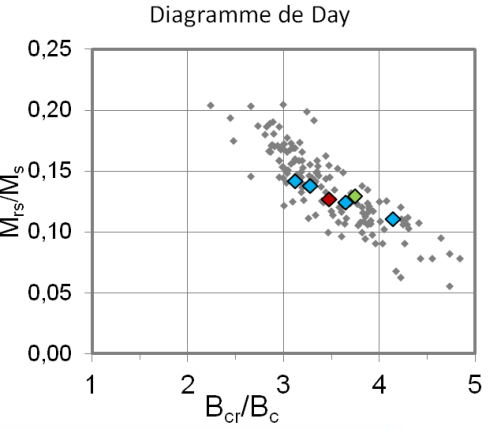
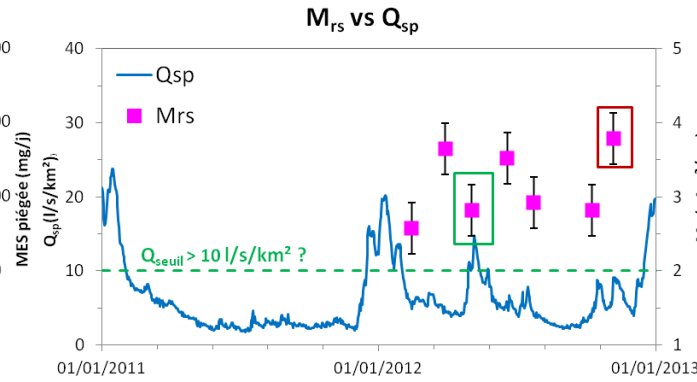
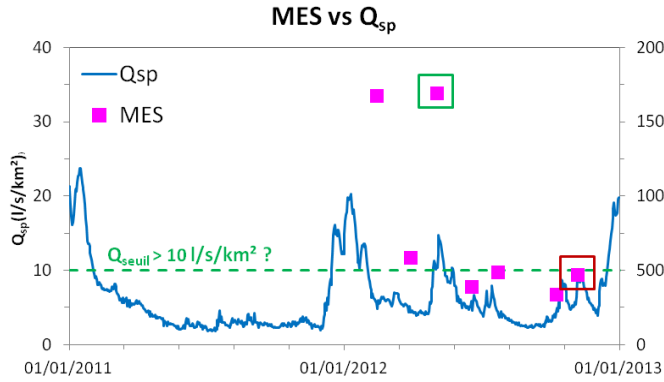


Tableau E : Récapitulatif des paramètres magnétiques et hydrologiques des échantillons de 2011-2012. Les échantillons où les paramètres d'hystérésis ont été mesurés sont classés par sites. Le dernier tableau regroupe les échantillons sélectionnés pour les FORCs, déconvolution d'IRM et S-ratio et présente leurs paramètres. Pour les sites présents sur des branches de cours d'eau les valeurs de Q_{moy} sont données en m^3/s et divisés par rapport à la largeur du segment au pk sur la largeur totale des différentes branches.

Saron (1)												
Campagne	pk _{conf Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
07/11	215	4558	764	14	31	0,89	4,4	-9	2,2	0,20	16	4
09/11	215	4558	357	14	34	0,56	2,9	-8	2,4	0,19	17	4
10/11	215	4558	190	12	35	0,65	3,4	-16	2,9	0,19	13	3
11/11	215	4558	256	13	37	0,68	3,6	-19	2,9	0,19	13	3
01/12	215	4558	1739	15	41	0,46	2,3	-9	2,7	0,20	71	16
02/12	215	4558	40	12	39	0,45	3,3	-6	3,2	0,14	24	5
03/12	215	4558	1147	13	36	0,50	2,9	-16	2,9	0,17	23	5
05/12	215	4558	2337	12	37	0,64	3,7	-27	3,0	0,17	28	6
06/12	215	4558	343	12	41	0,64	3,3	-21	3,3	0,19	24	5
07/12	215	4558	1036	12	37	0,64	3,7	-27	3,1	0,17	26	6
10/12	215	4558	427	12	42	0,68	4,4	-18	3,4	0,15	19	4
11/12	215	4558	564	14	38	0,67	4,6	-11	2,7	0,15	35	8

Marnay (2)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
07/11	241	8576	22	10	30	0,75	6,0	22	3,1	0,12	24	3
09/11	241	8576	2056	12	36	0,82	5,7	-18	3,0	0,14	34	4
10/11	241	8576	970	13	38	0,85	4,6	-22	3,0	0,19	33	4
11/11	241	8576	497	13	37	0,81	4,7	-19	2,9	0,17	26	3
01/12	241	8576	1858	12	33	0,53	3,2	-14	2,9	0,17	129	15
02/12	241	8576	1169	12	37	0,67	4,0	-18	3,1	0,17	66	8
03/12	241	8576	2709	12	34	0,64	3,4	-19	2,8	0,19	39	5
06/12	241	8576	947	11	34	1,70	9,6	-39	3,0	0,18	60	7
07/12	241	8576	2955	11	36	0,79	4,8	-20	3,4	0,16	46	5
10/12	241	8576	2043	9	32	1,48	15,3	-22	3,6	0,10	37	4
11/12	241	8576	317	10	32	1,16	8,0	-12	3,3	0,14	66	8

Jaulnes (3)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
07/11	282	9825	756	13	37	0,84	4,7	-9	2,9	0,18	24/5	2
10/11	282	9825	903	13	38	0,99	4,8	-23	3,0	0,20	33/5	3
01/12	282	9825	148	11	38	0,79	5,5	-16	3,5	0,15	132/5	13
02/12	282	9825	1291	11	33	0,48	2,8	-4	2,9	0,17	69/5	7
03/12	282	9825	674	11	34	0,76	4,8	-18	3,0	0,16	43/5	4
05/12	282	9825	851	13	41	0,82	5,6	-11	3,1	0,14	47/5	5
06/12	282	9825	1814	11	33	0,89	5,1	-19	3,2	0,17	64/5	6
07/12	282	9825	797	9	34	0,63	4,7	-22	3,9	0,14	46/5	5
10/12	282	9825	1031	10	35	0,44	2,9	-14	3,4	0,15	38/5	4
11/12	282	9825	209	10	29	0,65	4,5	-5	3,0	0,15	66/5	7

Cannes-Ecluse (4)												
Campagne	pk _{conf Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
02/12	309	11102	48	8	30	1,76	14,6	-24	3,6	0,12	99/5	9
03/12	309	11102	301	12	36	1,35	8,1	-22	3,0	0,17	77/5	7
05/12	309	11102	238	11	34	1,75	10,4	-41	3,0	0,17	151/5	14
06/12	309	11102	479	10	36	1,70	11,0	-46	3,5	0,15	85/5	8
07/12	309	11102	157	10	33	1,05	7,3	-13	3,4	0,14	51/5	5
10/12	309	11102	191	11	33	1,76	11,1	-42	3,1	0,16	27/5	2
11/12	309	11102	156	11	34	1,64	10,3	-26	3,1	0,16	69/5	6

Saint-Mammès (5)												
Campagne	pk _{conf Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
09/11	322	4072	142	10	30	2,15	14,4	-6	3,0	0,15	3	1
10/11	322	4072	104	10	35	1,68	14,7	-13	3,5	0,11	2	1
11/11	322	4072	107	11	36	1,48	10,4	-12	3,3	0,14	3	1
01/12	322	4072	3838	12	33	2,16	12,9	-37	2,8	0,17	53	13
02/12	322	4072	138	13	38	1,64	9,6	-28	2,9	0,17	14	3
03/12	322	4072	676	11	36	1,48	9,3	-27	3,2	0,16	15	4
05/12	322	4072	2021	12	38	1,99	11,8	-44	3,1	0,17	34	8
06/12	322	4072	638	11	37	1,56	11,7	-27	3,4	0,13	10	2
07/12	322	4072	450	10	37	1,61	12,6	-27	3,7	0,13	12	3
10/12	322	4072	112	9	35	1,56	13,9	-15	4,1	0,11	4	1
11/12	322	4072	303	11	35	1,72	10,4	-14	2,8	0,17	21	5

Thomery (6)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
02/11	325	25242	331	12	35	1,74	11,4	-27	3,0	0,15	140/1,5	8
07/11	325	25242	393	11	34	2,53	17,0	-9	3,0	0,15	35/1,5	2
09/11	325	25242	756	10	33	1,52	10,8	-18	3,2	0,14	60/1,5	4
10/11	325	25242	211	11	36	2,40	15,7	-28	3,2	0,15	45/1,5	3
11/11	325	25242	278	11	34	2,29	16,3	-28	3,0	0,14	55/1,5	3
01/12	325	25242	4484	8	23	2,68	17,2	-37	3,1	0,16	320/1,5	19
02/12	325	25242	180	12	36	2,09	13,1	-32	3,1	0,16	140/1,5	8
03/12	325	25242	614	10	34	1,72	13,7	-23	3,4	0,13	95/1,5	6
06/12	325	25242	780	12	36	1,65	9,6	-46	3,0	0,17	115/1,5	7
11/12	325	25242	894	13	33	2,3	13,1	-23	2,5	0,17	105/1,5	6

Draveil (7)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
09/11	385	27024	198	9	28	3,02	27,1	-8	3,3	0,15	94	3
12/11	385	27024	364	9	34	2,83	25,4	-33	3,7	0,11	109	4
01/12	385	27024	4557	10	30	2,33	15,2	-26	3,0	0,11	470	16
02/12	385	27024	533	9	34	1,80	16,4	-24	3,9	0,15	226	8
06/12	385	27024	640	10	37	2,79	21,1	-38	3,7	0,11	163	6
07/12	385	27024	33	11	33	1,07	7,1	-5	3,0	0,13	128	4

Viry-Châtillon (8)												
Campagne	pk _{conf Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
07/11	390	933	1338	9	26	4,68	38,4	-18	3,0	0,12	3	3
09/11	390	933	813	9	34	6,31	52,9	-53	3,9	0,12	2	2
10/11	390	933	2272	8	34	4,84	43,7	-45	4,2	0,11	2	2
11/11	390	933	697	9	34	4,20	35,8	-36	3,9	0,12	2	2
01/12	390	933	17985	9	30	2,90	25,5	-39	3,3	0,11	6	6
02/12	390	933	310	9	37	4,17	33,4	-39	4,0	0,12	3	3
03/12	390	933	1614	8	34	5,60	50,9	-54	4,3	0,11	2	2
05/12	390	933	2616	7	32	4,60	48,3	-34	4,6	0,10	4	4
07/12	390	933	1249	7	30	6,93	65,3	-58	4,3	0,11	4	4
10/12	390	933	1839	7	32	5,73	55,7	-52	4,3	0,10	3	3

Villeneuve-le-Roi (9)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
03/15	394	30034	108	9	34	2,09	20	-4	3,9	0,11	270	9

Alfortville (10)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
03/15	402	30808	58	7	28	2,56	35	-2	4,0	0,07	273	9

Trilbardou (11)												
Campagne	pk _{conf Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
09/11	405	12262	145	11	35	1,88	12,8	-34	3,2	0,15	33	3
10/11	405	12262	154	11	35	1,43	8,6	-21	3,3	0,17	30	2
11/11	405	12262	113	11	36	1,80	12,1	-33	3,2	0,15	29	2
12/11	405	12262	65	11	36	2,14	13,7	-41	3,3	0,16	26	2
01/12	405	12262	13866	13	38	1,62	9,6	-26	3,3	0,17	163	13
02/12	405	12262	5455	11	35	1,78	12,8	-32	3,0	0,14	190	16
03/12	405	12262	14	11	36	1,17	7,8	-21	3,3	0,15	59	5
04/12	405	12262	256	10	34	1,36	9,9	-26	3,4	0,14	54	4
05/12	405	12262	554	1011	36	1,11	7,6	-20	3,4	0,15	55	5
06/12	405	12262	722	10	34	1,87	12,9	-21	3,3	0,14	50	4
07/12	405	12262	4123	11	40	1,71	11,2	-46	3,6	0,15	76	6
10/12	405	12262	580	10	39	2,18	18,0	-35	3,8	0,12	41	3
11/12	405	12262	2888	11	35	1,61	9,8	-25	3,2	0,17	91	8

Paris Bibliothèque François Mitterrand (12)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
03/15	409	43782	159	9	33	2,16	18,3	-22	3,8	0,12	395	9

Issy-les-Moulineaux (13)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
03/15	420	44002	122	9	30	3,24	30,4	-16	3,5	0,11	395/3	9

L'Île-Saint-Denis (14)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
03/15	439	44363	181	8	31	1,90	16,6	-13	3,8	0,11	395/2	9

Bouival VNF (15)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
09/11	459	44745	3879	7	28	6,28	93,2	-38	4,0	0,09	132/2	3
10/11	459	44745	1561	8	31	4,99	46,7	-35	3,9	0,11	105/2	2
11/11	459	44745	2551	7	29	5,37	59,0	-34	4,3	0,09	138/2	3
01/12	459	44745	2212	8	30	5,47	57,9	-37	3,9	0,09	633/2	14
02/12	459	44745	1528	9	31	2,95	25,2	-33	3,5	0,12	327/2	8
03/12	459	44745	1095	9	32	3,14	25,3	-41	3,7	0,12	201/2	5
05/12	459	44745	332	8	34	2,84	23,6	-55	4,2	0,12	276/2	6
06/12	459	44745	2602	8	34	4,05	37,6	-56	4,4	0,11	216/2	5
07/12	459	44745	6253	6	29	4,18	53,2	-41	4,8	0,08	208/2	5
10/12	459	44745	176	7	32	5,40	69,0	-28	4,6	0,08	120/2	3
11/12	459	44745	3490	8	29	3,71	34,2	-25	3,6	0,11	253/2	6

Bouival Pointe (16)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
11/11	462	44788	143	5	21	7,74	85,1	-25	4,0	0,09	139/2	3
01/12	462	44788	5653	7	33	4,19	53,3	-29	4,4	0,08	633/2	14
02/12	462	44788	24	12	35	2,86	17,9	-27	3,0	0,16	327/2	7
06/12	462	44788	901	8	31	4,06	35,0	-43	3,9	0,12	216/2	5
07/12	462	44788	796	7	29	4,84	48,6	-33	3,8	0,10	208/2	5
10/12	462	44788	199	8	31	4,22	39,9	-27	3,8	0,11	120/2	2,7

Pontoise (17)												
Campagne	pk _{conf Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
09/11	482	16715	1313	9	34	2,83	26,7	-48	3,9	0,11	39/1,5	2
10/11	482	16715	1268	10	32	2,97	21,7	-46	3,2	0,14	34/1,5	2
11/11	482	16715	927	10	32	2,74	20,6	-38	3,2	0,13	37/1,5	2
01/12	482	16715	7042	12	34	1,92	10,7	0	2,8	0,18	197/1,5	12
02/12	482	16715	647	10	37	1,69	11,4	-41	3,6	0,15	125/1,5	8
03/12	482	16715	2849	9	34	2,22	20,8	-20	3,6	0,11	114/1,5	7
05/12	482	16715	45	7	32	3,53	55,9	-7	4,2	0,06	120/1,5	7
06/12	482	16715	932	10	37	1,96	14,2	-84	3,8	0,14	84/1,5	5
07/12	482	16715	782	11	36	2,50	20,1	-48	3,4	0,12	129/1,5	8
10/12	482	16715	1048	9	37	2,40	22,0	-57	4,0	0,11	50/1,5	3
11/12	482	16715	1024	11	36	2,45	16,9	-45	3,2	0,15	78/1,5	5

Andrésey (18)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
09/11	483	61645	63	9	34	2,92	25,1	-7	3,8	0,12	187/2	3
10/11	483	61645	277	8	31	3,39	31,1	-24	3,8	0,11	153/2	2
11/11	483	61645	476	8	33	5,54	54,1	-51	4,1	0,10	186/2	3
01/12	483	61645	156	8	36	2,97	36,0	-18	4,7	0,08	843/2	14
02/12	483	61645	73	10	35	1,98	16,5	-22	3,6	0,12	460/2	7
03/12	483	61645	515	9	34	2,08	21,2	-47	3,9	0,10	324/2	5
05/12	483	61645	774	9	35	2,16	17,2	-63	4,1	0,13	411/2	7
06/12	483	61645	640	8	35	2,76	24,5	-51	4,3	0,11	318/2	5
07/12	483	61645	912	9	34	3,12	25,3	-50	3,8	0,12	350/2	6
10/12	483	61645	97	8	34	3,57	33,6	-42	4,3	0,11	189/2	3
11/12	483	61645	164	8	31	3,36	31,0	-28	3,8	0,11	347/2	6

Denouval (19)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
09/11	485	61741	90	10	33	2,64	19,1	-13	3,2	0,14	188/2,5	3
10/11	485	61741	574	8	32	3,79	31,4	-42	3,9	0,12	153/2,5	2
01/12	485	61741	278	10	34	1,67	11,9	-45	3,3	0,14	844/2,5	14
02/12	485	61741	238	12	36	1,88	12,8	-41	3,1	0,15	461/2,5	7
03/12	485	61741	726	10	36	1,73	12,8	-50	3,5	0,13	325/2,5	5
05/12	485	61741	719	10	31	2,96	23,4	-26	3,2	0,13	411/2,5	7
06/12	485	61741	1019	9	36	2,63	21,2	-60	3,9	0,12	318/2,5	5
10/12	485	61741	134	9	33	11,12	98,6	-22	3,9	0,11	190/2,5	3
11/12	485	61741	200	8	30	2,41	20,6	-22	3,6	0,12	347/2,5	6

Amfreville (20)												
Campagne	pk _{Seine} (km)	BV (km ²)	MES (mg/jour)	B _c (mT)	B _{cr} (mT)	M _{rs} (nAm ² /mg)	M _s (nAm ² /mg)	S.C (nAm ² /mg T)	B _{cr} /B _c	M _{rs} / M _s	Q _{moy} (m ³ /s)	Q _{sp moy} (l/s/km ²)
02/12	612	66970	1673	11	34	2,58	18,1	-43	3,1	0,14	530/2	8
03/12	612	66970	584	10	34	3,65	26,5	-54	3,3	0,14	357/2	5
05/12	612	66970	1694	9	35	2,82	21,8	-61	3,7	0,13	451/2	7
06/12	612	66970	389	10	37	3,53	28,3	-46	3,7	0,12	351/2	5
07/12	612	66970	486	8	35	2,92	26,3	-46	4,1	0,11	381/2	6
10/12	612	66970	337	10	36	2,81	12,12	-32	3,7	0,23	210/2	3
11/12	612	66970	471	10	35	3,79	29,9	-41	4,1	0,13	384/2	6

Echantillons sélectionnés									
Site	pk (km)	camp.	S-ratio	C _{1a} % / B _{1/2} (mT) / DP	C _{1b} % / B _{1/2} (mT) / DP	C ₂ % / B _{1/2} (mT) / DP	C ₃ % / B _{1/2} (mT) / DP	residual χ^2	Classe FORC
Saron (1)	215	03/12	0,89	9 % / 5 mT / 0,40	18 % / 14 mT / 0,31	63 % / 41 mT / 0,30	10 % / 316 mT / 0,40	3*10 ⁻¹⁶	PSD fin
Marnay (2)	241	09/11	0,96	13 % / 8 mT / 0,40	18 % / 16 mT / 0,40	55 % / 45 mT / 0,26	13 % / 501 mT / 0,50	5*10 ⁻¹⁶	PSD fin
Jaulnes (3)	282	06/12	0,90	6 % / 3 mT / 0,40	20 % / 13 mT / 0,30	59 % / 36 mT / 0,30	15 % / 159 mT / 0,50	3*10 ⁻¹⁶	PSD fin
Cannes-Ecluse (4)	309	06/12	0,91	6 % / 3 mT / 0,40	17 % / 13 mT / 0,32	64 % / 37 mT / 0,30	13 % / 427 mT / 0,40	2*10 ⁻¹⁶	PSD fin
Saint-Mammès (5)	322	11/11	0,93	4 % / 2 mT / 0,40	20 % / 10 mT / 0,30	69 % / 40 mT / 0,29	8 % / 251 mT / 0,50	2*10 ⁻¹⁶	PSD fin
Thomery (6)	325	02/11	0,91	6 % / 2 mT / 0,40	16 % / 10 mT / 0,25	69 % / 41 mT / 0,29	9 % / 251 mT / 0,60	2*10 ⁻¹⁶	PSD fin
Draveil (7)	385	06/12	0,94	6 % / 3 mT / 0,40	17 % / 12 mT / 0,22	67 % / 45 mT / 0,30	10 % / 398 mT / 0,50	2*10 ⁻¹⁵	PSD
Viry-Châtillon (8)	390	09/11	1,00	13 % / 6 mT / 0,40	1 % / 10 mT / 0,10	82 % / 38 mT / 0,37	5 % / 631 mT / 0,40	1*10 ⁻¹⁴	PSD grossier
Villeneuve-le-Roi (9)	394	03/15	0,90	6 % / 2 mT / 0,40	18 % / 9 mT / 0,32	69 % / 38 mT / 0,32	8 % / 251 mT / 0,60	2*10 ⁻¹⁵	-
Alfortville (10)	402	03/15	0,92	5 % / 2 mT / 0,40	19 % / 9 mT / 0,30	65 % / 37 mT / 0,30	11 % / 316 mT / 0,60	7*10 ⁻¹⁶	-
Trilbardou (11)	405	11/11	0,90	6 % / 2 mT / 0,34	10 % / 10 mT / 0,32	75 % / 37 mT / 0,34	9 % / 251 mT / 0,50	9*10 ⁻¹⁶	PSD fin
Paris BFM (12)	409	03/15	0,88	5 % / 2 mT / 0,40	19 % / 9 mT / 0,30	65 % / 37 mT / 0,30	11 % / 316 mT / 0,60	2*10 ⁻¹⁵	-
Issy-les-Moulineaux (13)	420	03/15	0,99	4 % / 2 mT / 0,40	15 % / 10 mT / 0,30	68 % / 38 mT / 0,33	13 % / 708 mT / 0,60	7*10 ⁻¹⁶	-
L'Ile-saint-Denis (14)	439	03/15	0,93	9 % / 2 mT / 0,40	8 % / 8 mT / 0,30	75 % / 20 mT / 0,35	7 % / 275 mT / 0,60	3*10 ⁻¹⁴	-
Bougival VNF (15)	459	09/11	0,94	-	26 % / 8 mT / 0,60	71 % / 29 mT / 0,38	3 % / 251 mT / 0,50	2*10 ⁻¹⁴	PSD grossier
Bougival Pointe (16)	462	11/11	0,97	20 % / 7 mT / 0,60	17 % / 11 mT / 0,36	60 % / 30 mT / 0,33	3 % / 316 mT / 0,50	8*10 ⁻¹⁵	PSD grossier
Pontoise (17)	482	07/12	0,92	5 % / 2 mT / 0,40	14 % / 11 mT / 0,36	69 % / 37 mT / 0,31	12 % / 234 mT / 0,40	8*10 ⁻¹⁵	PSD
Andrésy (18)	483	11/11	0,94	6 % / 3 mT / 0,40	20 % / 12 mT / 0,28	68 % / 42 mT / 0,31	6 % / 200 mT / 0,50	8*10 ⁻¹⁵	PSD
Denouval (19)	485	01/12	0,89	5 % / 2 mT / 0,40	24 % / 12 mT / 0,32	61 % / 43 mT / 0,30	9 % / 331 mT / 0,50	6*10 ⁻¹⁶	PSD
Amfreville (20)	612	11/12	0,93	8 % / 3 mT / 0,40	22 % / 13 mT / 0,28	64 % / 47 mT / 0,30	6 % / 2631 mT / 0,50	9*10 ⁻¹⁶	PSD

Résumé

Le fer et ses composés, notamment les (oxyhydr)oxydes, sont présents dans la nature et produits par les activités anthropiques. Ce caractère ubiquiste du fer et sa sensibilité aux conditions environnementales en fait un excellent traceur de sources et de processus.

Cette thèse a pour objectif de tracer l'impact de l'Homme sur les matières en suspension (MES) de la Seine à partir des propriétés magnétiques de sa fraction ferrugineuse en utilisant les outils et méthodes du magnétisme environnemental.

Un échantillonnage des MES a permis de couvrir le cours de la Seine et ses affluents durant différents contextes hydrologiques. Des analyses ont été conduites sur ces MES afin de caractériser les particules ferrugineuses magnétiques et d'examiner leurs relations avec les conditions environnementales dans lesquelles elles se sont formées et/ou ont évolué.

La magnétite apparait comme l'oxyde dominant et montre une forte affinité avec la fraction fine des MES et ses propriétés magnétiques peuvent être utilisées pour décrire la charge sédimentaire de la Seine et les phénomènes de remise en suspension.

Des augmentations de tailles et de concentration de magnétites sont associées à l'urbanisation et aux activités industrielles. Les variations spatiales entre amont et aval des confluences et les variations temporelles montrent que le cours d'eau joue un rôle dans les mécanismes d'accumulation, transport et dilution de ces particules.

Mots Clés

Magnétisme environnemental, particules ferrugineuses, Seine, matières en suspension, magnétite.

Abstract

Iron and its compounds, in particular iron (oxyhydr)oxides are ubiquitous in both nature and human activity, and are sensitive to environmental conditions. They can hence be used as environmental source and process tracers.

This thesis focuses on tracing the human activities impact in the ferruginous compound of the suspended particulate matter (SPM) in the Seine River (France) using environmental magnetism tools.

SPM sampling was conducted along the Seine path and its tributaries during different hydrological contexts. Magnetic properties were measured to characterize the ferruginous magnetic particles and to examine their relationship with the environment in which they have been formed.

The main magnetic carrier is magnetite. It is concentrated in the fine sediment fraction and its magnetic properties can be used to trace the sediment load and hydrodynamic processes of the Seine.

Increases in concentration and grain size of magnetite particles are associated to urbanization and industrial activities which are sources of anthropogenic particles. Significant variations can be observed between upstream and downstream of confluences and in the temporal scale and can be associated to hydrodynamic processes such as dilution, accretion, transport and re-suspension of the ferruginous particles.

Keywords

Environmental magnetism, iron particles, Seine River, suspended particulate matter, magnetite.