



Actualité: 24.03.2017, V. 1

Projet scientifique FluviMag: transport fluvial des minéraux magnétiques

Michael Pirrung

Institut für Geowissenschaften/Institute des Sciences de la Terre, Friedrich-Schiller
Universität Jena/Université de Jéna,
Burgweg 11, D-07749 Jena, E-Mail: michael.pirrung@uni-jena.de

Martina Kunz-Pirrung

Helmholtz Zentrum für Umweltforschung/Helmholtz Centre d'Études de l'Environnement,
UFZ, Permoser Straße 15, D-04318 Leipzig, E-Mail: martina.kunz-pirrung@ufz.de

avec des modèles de terrain de Jörn Engelhardt et des analyses chimiques et minéralogiques
de Dirk Merten et Ralph Bolanz, Friedrich-Schiller Universität Jena.

5.10. France – Grands bassins sédimentaires et régions volcaniques

Dans une carte topographique de la France une surface presque égale se trouve sur des grands bassins sédimentaires du Méso- et Cénozoïque (ANONYMUS 1980b): comme le plus grand le Bassin de Paris / Bassin Parisien au nord, puis le Bassin d'Aquitaine au sud-ouest, les fossés de la Bresse et du Rhône au sud et du Haut-Rhin dans le nord-est. À présent, les plus importantes rivières sont le Rhône, le Rhin, la Seine, la Loire, et la Garonne avec l'estuaire de la Gironde. En suivant, quelques résultats des investigations sédimentologiques, essentiellement des observations sur terrain, et magnétiques, avec l'étude de 72 échantillons, voir **figure 5.10-1**, sont présentées de la Loire dans le Bassin de Paris, et des côtes du Vendée, de la Gironde/Garonne et des Causses dans le Bassin d'Aquitaine.

[5.10.1. Géologie dans les régions considérées](#)

[5.10.2. Résultats dans le Bassin de Paris – Val de Loire](#)

[5.10.3. Résultats dans le Bassin d'Aquitain – Val de la Gironde - Languedoc](#)

[5.10.4. Considérations à la SM dans les différentes faciès](#)

[5.10.5 Résumé](#)

[5.10.6. Commentaire](#)

[5.10.7. Littérature](#)

[5.10.1. Géologie dans les régions considérées](#)

Des cartes géologiques sommaires de la France Métropolitaine étaient publiées par le Bureau de Recherche Géologique et Minière, par exemple (ANONYMUS 1980b). Des cartes géologiques peuvent être téléchargées par exemple chez: <http://www.geologues-prospecteurs.fr/documents/cartes-geologiques-france/>. Des cartes géologiques détaillées avec notices explicatives sont disponibles par une recherche dans le web sous les mots clés: "carte géologique harmonisée du département...", par exemple pour Le Morbihan en Bretagne à

<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56656-FR.pdf>. Une carte géologique de l'estuaire de la Loire peut être téléchargée sous http://sigespal.brgm.fr/IMG/jpg/estuaire_loire-5.jpg. Une introduction moderne à la géologie de la France se trouve par exemple à <http://docs.google.com/viewer?url=http://www.geologues-prospecteurs.fr/articles/histoire-geologique-france/histoire-geologique-france.pdf>.

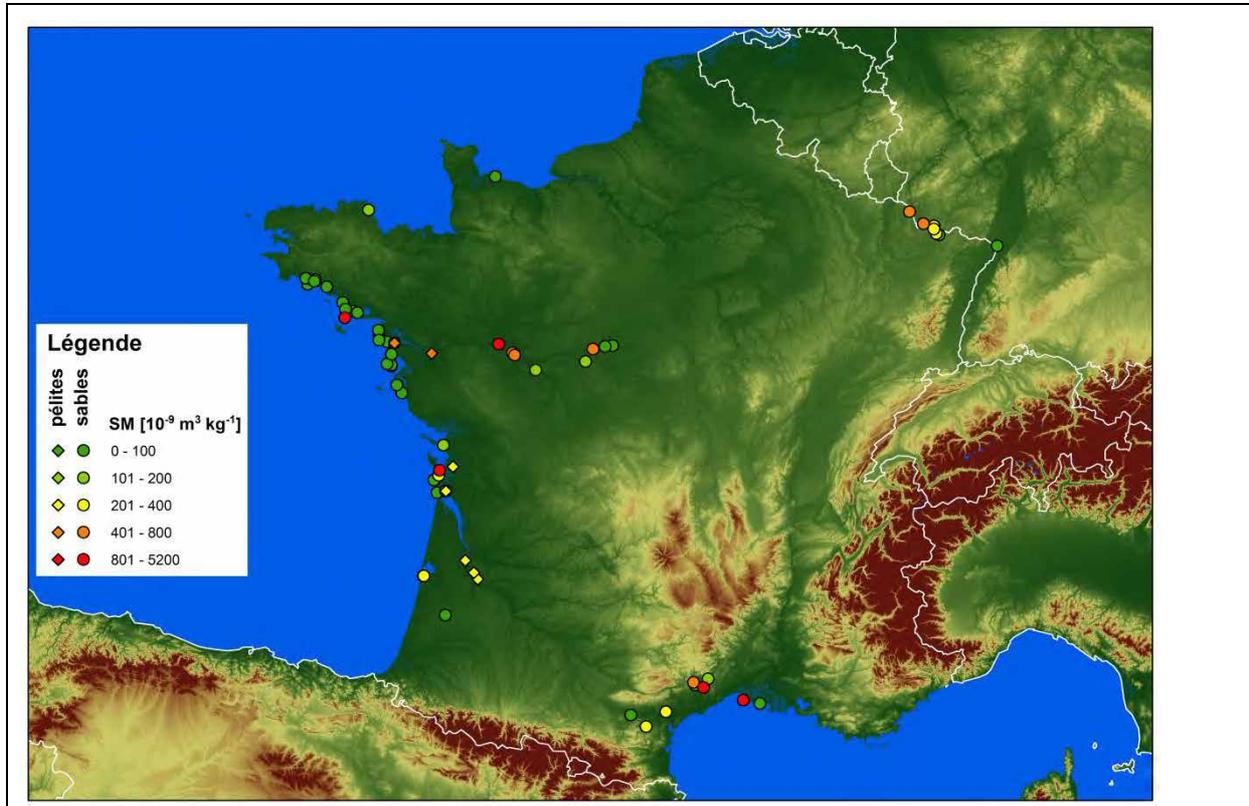


Fig. 5.10-1: Location des échantillons dans la France, avec leur susceptibilité magnétique, SM, masse-spécifique en $10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Des échantillons sableux sont marqués par un cercle, des échantillons pélitiques avec un losange. Le modèle de terrain était composé par J. Engelhardt avec des données de la mission SRTM, voir <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>. Des couleurs bruns marquent bien les élévations moyennes du Massif Central et des Vosges et les élévations hautes des Pyrénées et des Alpes.

Des échantillons pris dans le **Massif Armoricaïn**, un des massifs varisques en France Métropolitaine, visible dans la fig. 5.10-1, sont le sujet de la contribution **FM-5.11 France-Bretagne**. Dans le chapitre [5.10.4. Considérations à la SM dans différentes faciès](#) du rapport présenté ici, plusieurs échantillons de la Bretagne font partie des figures, parce-qu'une discussion en gros paraît plus raisonnable, ce-qui convient aussi pour le chapitre [5.10.5 Résumé](#).

Le **Bassin de Paris, BP**, pas de surprise, a son centre près de Paris. Au nord, le bassin se prolonge sous La Manche, au nord-ouest et ouest il avoisine le Massif Armoricaïn, dans le Poitou, autour de Poitiers, il n'existe pas de limite distincte envers le Bassin d'Aquitaine, au sud il avoisine le Massif Central et au sud-est le Fossé de La Bresse et le Jura, à l'est les Vosges et au nord-est il existe des contreforts dans la Baie de Luxembourg-Trèves (ANONYMUS 1980b). La Loire

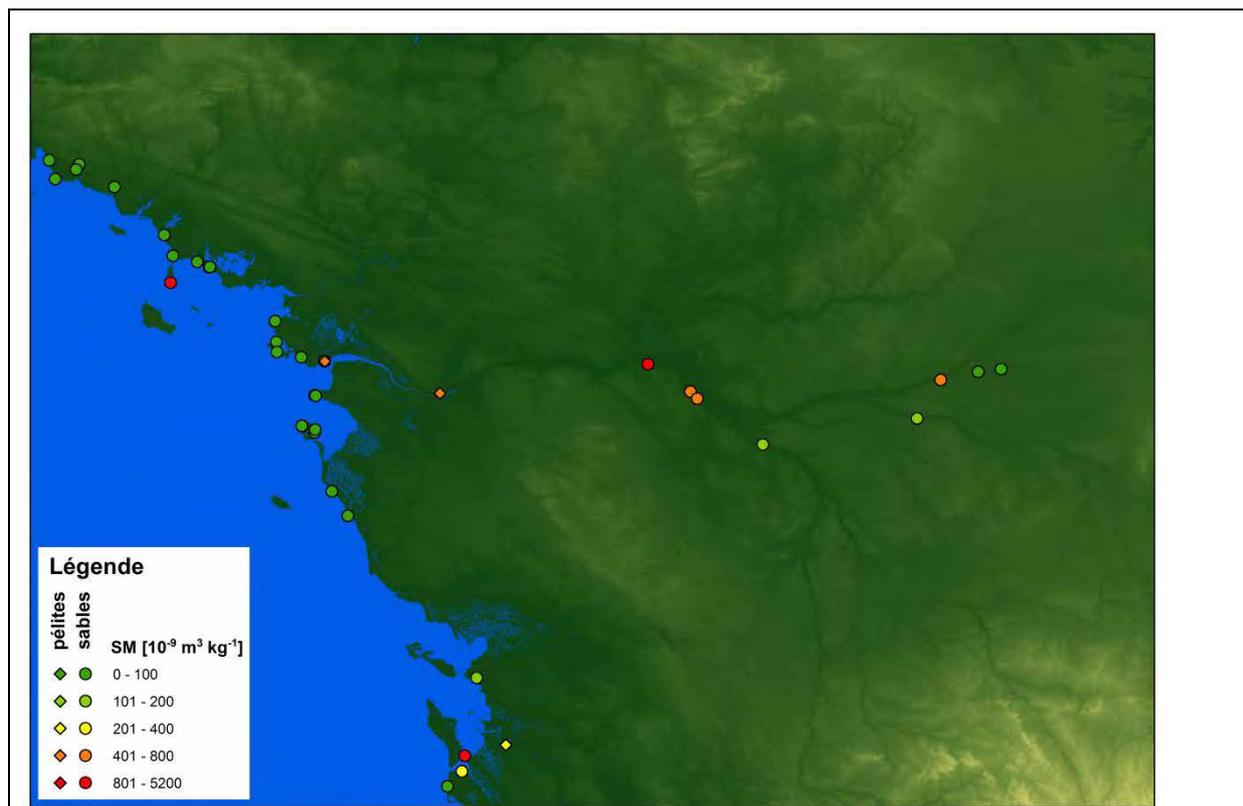


Fig. 5.10-1a: Détail de fig. 5.10-1 pour le Val de Loire, pour citation voir fig. 5.10-1. La bande des échantillons de la Loire s'étend entre Chaumont-sur-Loire à l'est et Saint-Nazaire à l'ouest. Les trois locations de l'ouest se trouvent dans le Massif Armoricain, les autres dans le Bassin Parisien. La Rochelle se trouve à la cinquième location en commençant au sud.

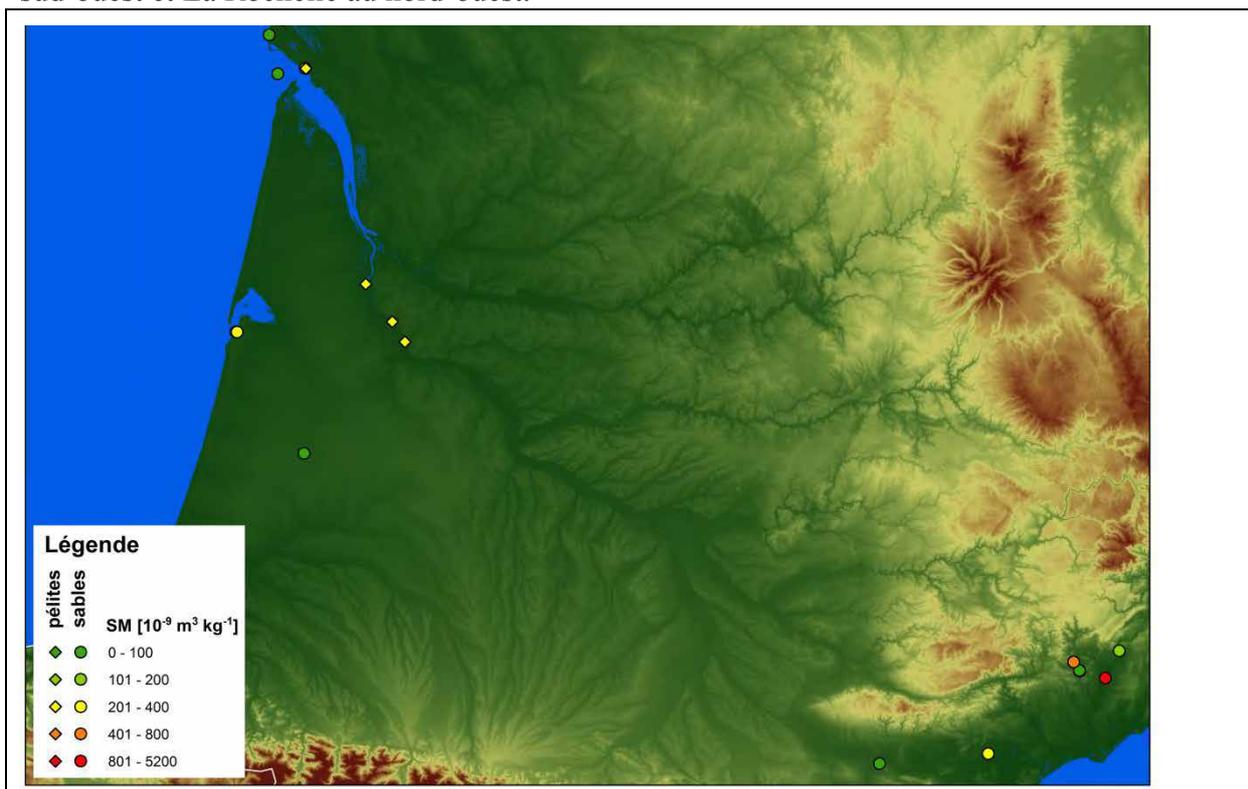
À la surface, le BP a la forme d'une ellipse composée, avec deux axes longues en direction sud-ouest et nord-ouest, se croissant à Paris, voir (ANONYMUS 1980b). Les formations forment des bandes circulaires, de l'Oligocène au centre jusqu'au Jurassique inférieur à l'extérieur. Seulement à la marge orientale, dans la Baie de Luxembourg-Trèves, dans le Palatinat et autour des Vosges, des formations du Trias s'ensuivent. La plus grande épaisseur du pile sédimentaire se trouve dans le centre du BP, avec environ 3 km (MOYEN 2005): p. 44. La base du bassin a la structure d'un verre d'horloge. En restant sur le socle varisque, les couches basales, des sables et des conglomérats terrestres du Buntsandstein, appartient au Trias inférieur (MOYEN 2005): p. 45, suivi de calcaires marins du Muschelkalk ou Anisien-Ladinien, respectivement, des argiles lacustres du Keuper, des argiles et marnes marines du Jurassique inf., des calcaires marins du Jurassique moyen, des marnes marines du Jurassique sup., des argiles saumâtres et sables deltaïques du Crétacé inf., des calcaires marins et sables et pérites saumâtres de l'Éo- Oligocène (ZIEGLER 1990b).

Au sud-ouest du BP, en Touraine, autours de Tours, et en Anjou, entourant Angers, se trouvent des dépôts de faciès marine peu profonde du Crétacé supérieur (ALCAYDÉ, et al. 1976). Au Turonien, la craie micacée, dit Tuffeau blanc, avec une épaisseur d'environ 40 m, plus résistant que la craie ordinaire, était utilisée pour des sculptures médiévales détaillées. Au-dessus, d'âge Sénonien, le calcaire avec des silex bruns, dit Tuffeau jaune, d'environ 30 m épaisseur, est plus solide (ALCAYDÉ, et al. 1976). Aux bords de la Loire des carrières souterraines, au médiéval des caves troglodytiques, sont maintenant utilisées comme caves pour conserver le vin ou pour la cultivation des champignons (ALCAYDÉ, et al. 1976): p. 19.

La géologie de la région hydrologique de la Loire est formée au nord-ouest, ouest, et dans la partie sud, sud-est et est des roches paléozoïques du Massif Armoricain et du Massif Central, et dans le sud-ouest, nord et centre des sédiments méso- et cénozoïques (NEHLIG 2010). Dans

la région hydrologique d'Allier, un important tributaire de la Loire, et de la Loire supérieure se trouvent localement des vulcanites, dominant de composition basique, en forme de tephra desserrée de centres éruptifs, produits au Tertiaire dans le Fossé de Limagne et au Quaternaire dans la Chaîne des Puys (BROUSSE & LEFEVRE 1990), (DE GOËR, et al. 1991), (DE GOËR DE HERVE 1997), (ANONYMUS 2009). (VELDKAMP & KROONENBERG 1993) ont observé que la fraction opaque des sables fins des terraces d'Allier est composée en majorité de lithoclastes basaltiques. Entre l'Allier et la Loire supérieure il existent des vulcanites en forme de coulées basaltiques du Plateau Devès au sud-est du Fossé de Limagne, produit au Plio-Pleistocène, avec des épaisseurs locales jusqu'à 130 m dans des vals anciens (ANONYMUS 2003), et plus à l'est dans le Velay oriental. (MACAIRE, et al. 2013) donnaient une description de la petrographie des sables de la Loire supérieure et moyenne. Ils observaient 0-48 % de minéraux opaques dans la fraction des minéraux lourds, minéraux avec une densité >2.89 g/ccm, comme magnétite, titano-magnétite et ilménite, plus fréquent dans la fraction du sable fin que dans autres fractions (MACAIRE, et al. 2013): p. 290, 291. Dans des extraits pris avec un aimant permanent ils observaient en outre du basalt. Ils citent la thèse de (CASTANET 2008), qui a observé une grande variabilité de la susceptibilité magnétique, **SM**, et interprètent ça comme conséquence de la dynamique hydrologique.

Le **Bassin Aquitaine**, **BA**, se trouve entre la marge sud du MA, la marge occidentale du Massif Central, **MC**, les Pyrénées et le Golfe de Gascogne. Ces limites superficielles ont environ la forme d'un triangle, avec des angles à Narbonne au sud-est, Bayonne/Biarritz au sud-ouest et La Rochelle au nord-ouest.



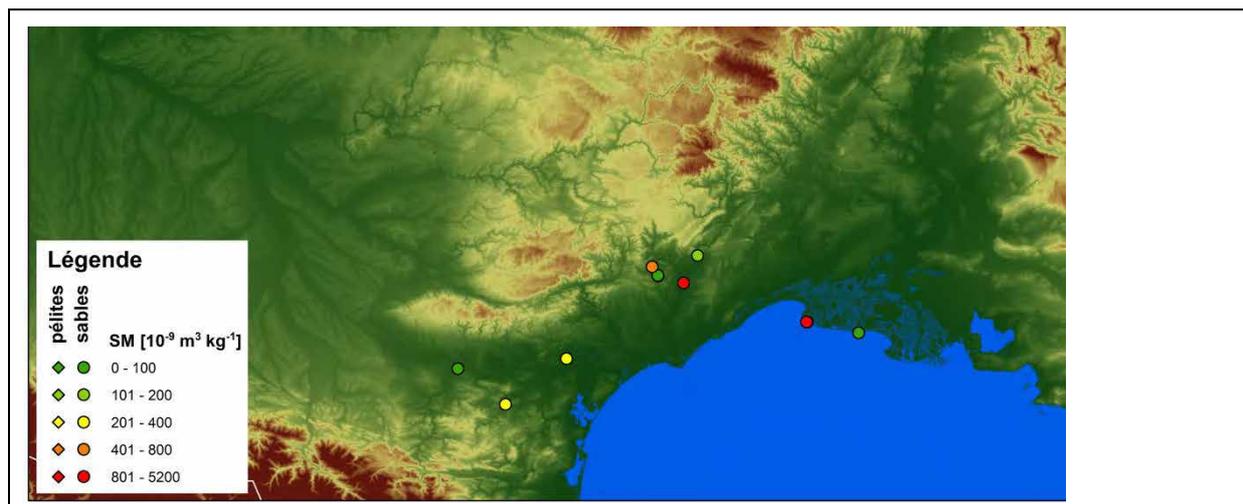


Fig. 5.10-1b: Détail de fig. 5.10-1, **au-dessus:** pour la partie ouest, entre l'estuaire de la Gironde au nord et le Bassin d'Arcachon et les Landes au sud, Bordeaux se trouve chez le troisième échantillon de la Garonne en commençant au sud. **Au-dessous:** pour la partie sud-est du Bassin d'Aquitaine, Carcassonne se trouve chez l'échantillon le plus à l'ouest entre les Pyrénées au sud-ouest et la Montagne Noire au nord, Narbonne se trouve près de la mer au sud du troisième échantillon est de Carcassonne; au milieu les Causses provençales au sud du Massif Central, et plus à l'est la Provence avec le val de Rhône, Aigues-Mortes se trouve dans les marais de la Camargue entre les deux échantillons les plus à l'est, Plage de l'Espiguette avec un échantillon en rouge, et Les-Saintes-Maries-de-la-Mer, en vert. Pour citation voir fig. 5.10-1.

Pareil au BP, les formations superficielles dans le centre, au sud de Bordeaux, étaient déposées pendant l'Oligocène, et ceux de la marge envers le MC et le MA pendant le Jurassique inférieur. Vers les Pyrénées, le domaine des formations du Jurassique et du Crétacé est très étroit, corseté à cause des failles de chevauchement du Front Nord des Pyrénées (MOYEN 2005): p. 65, 67, et vers le Golfe de Gascogne les couches du Quaternaire sont répandues dans Les Landes. La distribution des formations superficielles dans la carte géologique (ANONYMUS 1980b) montre que l'axe principale du bassin est orientée de Narbonne vers le nord-ouest. Au Permien, dans des fossés orientés nord-ouest à sud-est, des dépôts siliciclastiques, parfois palustres, collectionnaient des gravats de l'orogène varisque des Pyrénées (ANONYMUS 1980b). Au Trias inf. des grès et des conglomérats terrestres, au Muschelkalk des sédiments marins marno-calcaires et évaporitiques, et au Keuper des argiles terrestres à marins étaient déposés (ANONYMUS 1980b). Dans un coupe géologique en parallèle de la côte de Bayonne, caché par la légende dans **fig. 5.10-1b au-dessous**, à l'estuaire de la Gironde, représentant la situation pendant le fin du Trias, (MOYEN 2005): p. 48, la montée en puissance des dépôts vers le nord est bien visible. Au Jurassique, des formations marno-calcaires se formaient sur une plate-forme marine, avec intercalations lacustres, des communications avec le BP sont évident et aussi une séparation en bassins individuels vers le Jurassique sup. (ANONYMUS 1980b). Au Crétacé inf. des lagunes se sont établies, et dans quelques parties des bassins locales avec dépôts puissants se formaient, associés à l'ouverture du Golfe de Gascogne. Pendant le Crétacé sup. des dépôts palustres changeaient à des dépôts calcaires marins. Le front Nord des Pyrénées, se bougeant vers le nord, marque la limite entre une plate-forme marine au nord, et des gravats de l'orogène s'élevant, en faciès de flysch, au sud (ANONYMUS 1980b). Au Paléocène et Éocène, des dépôts calcaires marins peu profondes, des lacunes résultant d'érosion et des dépôts siliciclastiques terrestres sont observables, et des chevauchements contemporains vers le nord. À l'Oligocène, la déposition de marnes et conglomérats marins et des lacunes d'érosion se passent et pendant le Miocène des dépôts palustres et marins peu profondes sont conservés localement (ANONYMUS 1980b).

La base du BA, avec des dépôts triassiques comme les plus anciens, est empreintée d'un effondrement en parallèle de la chaîne des Pyrénées au sud, avec déformations en plis, des surfaces d'axes des plis sont inclinées vers le sud, pendant que vers le nord l'intensité des déformations diminue (MOYEN 2005), p. 49. La structure du BA reflète des processus déformatifs qui résultent du mouvement différentiel du Plat Ibérique contre le Plat Européen pendant le Crétacé, continuant dans le Tertiaire (MOYEN 2005), p. 41, suivi de l'ouverture des golfes de Gascogne et de Lion. La succession des dépôts méso- et cénozoïques en BA est en général comparable avec celle du BP, avec une dominance de sédiments marins marno-calcaires. Mais de suite des mouvements verticales des Pyrénées, les dépôts du Crétacé et du Néogène deviennent de plus en plus grossiers vers le sud-ouest.

Au nord-est du BA, dans le Massif Central, largement composé de roches paléozoïques (BRIL 1988), (BRIL 1988, FAURE, et al. 2009), grands régions sont influencées par le volcanisme cénozoïque. Une bande de centres d'éruptions, orientée N-S, coupe la partie sud-est du BA, dans les Causses provençales, principalement localisé dans des dépôts jurassiques, entre les domaines paléozoïques de l'est de la Montagne Noire et du sud-ouest des Cévennes, voir p.ex. (PETERLONGO & DE GOËR DE HERVE 1978). Dans le Bassin de Lodève, des dykes du le complexe de Roques-Ariàges forment des intrusions dans des sédiments permien, avec 'necks' et 'pipes', au Quaternaire (BROUSSE & LEFEVRE 1990). Bonnes gisements existent par ex. au Lac de Salagou, au sud de Lodève.

Dans la région Les Landes de Gascogne une vaste surface est couverte de sables dunaires du dernier cycle glaciaire (ANONYMUS 1980b). Le plateau des Landes était jusqu'au fin du 19^{ième} siècle un grand marais parce que les processus pédologiques avaient formé un horizon cimenté par des concrétions d'oxides/hydroxides du Fe³⁺ à profondeur de <1 m (PERINO 2000). Cet horizon, 'ortstein' dans les podzols en Allemagne nord, présentait une barrière pour la percolation des eaux d'infiltration, avant l'installation d'un drainage et l'établissement des forêts de pins, la plus grande zone continue de pins en Europe (PERINO 2000). Vers la côte, les dunes holocènes se trouvent (ANONYMUS 1980b). La Dune du Pilat au sud du Bassin d'Arcachon est la plus haute en Europe avec une élévation maximale de >100 m.

Au sud du BA des rivières, avec des vallées incisées dans les dépôts du Miocène, sont orientées à partir des pentes des Pyrénées vers le nord-est, le nord et le nord-ouest, comme un éventail, autour d'un centre dans la Plaine de Lannemezan, visible à la marge sud de la **fig. 5.10-1b au-dessus**, ce qui indique un grand éventail alluvial nourrit par le gravats de la haute montagne.

[menu principal](#)

[5.10.2. Résultats dans le Bassin de Paris – Val de Loire](#)

Sur une distance de environ 300 km le cours inférieur de la Loire était visité dans ce projet à l'été 2017. Les dépôts de la Loire peuvent bien illustrer des processus de transport et de sédimentation d'une rivière méandrisante. La Loire a un caractère relativement naturel dans le BP. Car il n'existe plus de trafic de bateaux commerciaux à l'est de Nantes, le cours n'est pas régulée des barrières pour réduire la vitesse de l'eau. Cette situation est différent comparé par exemple avec le Rhin entre le Lac de Constance et la Mer du Nord, où il existe normalement un banquet de roches au bord, des barrières à un angle droit au cours, des digues au cours inférieur, et plusieurs corrections pour raccourcir le cours. Le long de la Loire entre Blois et Angers seulement le bord droit, à la limite est du lit majeur, était protégée contre les inondations par un levée artificiel dès le médiéval, voir par exemple https://fr.wikipedia.org/wiki/Lev%C3%A9e_de_la_Loire et (CASTANET, et al. 2003). En descendant d'Orléans des îles permanents sont fréquents et souvent le chenal se scinde en

deux ou trois bras, ce qu'on peut observer aussi, dans une moindre mesure, en remontant le fleuve dans le Fossé de la Petite Limagne, entre le Forez et le Morvan dans le MC, par exemple à Roanne. Cependant, il existe un changement dans la dynamique fluviale dès la construction des premiers digues, en renforçant la vitesse pendant des inondations (NEHLIG 2010), et c'est visible par l'érosion distincte des terrasses à une hauteur de 1.5-2 m au-dessus du niveau du lit mineur actuel, par exemple à Chênehutte-Les-Tuffeaux, entre Angers et Saumur. L'évolution de la base des alluvions de la Loire à Tours était analysée par (MORIN, et al. 2014), à Orléans par (CASTANET, et al. 2003). Dès l'année 2000 la Loire moyenne entre Orléans et Angers et encore un peu en plus est inscrite sur la liste du patrimoine mondial de l'Unesco, pour préserver son caractère naturel et originel (TREMBLAY 2010).

Au temps d'un niveau bas de l'eau, comme en septembre 2016, on peut observer des vastes bancs de sable grossier et de gravier fin: les 'point bars' et des bancs de chenal, 'channel bars' ou 'sand flats', formant des îles temporaires. Les premiers sont accompagnés de petits bancs longitudinaux en relation du cours, parfois avec des 'ripple marks' à l'angle droit au cours. La surface des derniers peut monter à une hauteur de plus d'un mètre sur le niveau de l'eau sur la pente 'luv', avec une longueur de plusieurs centaines de mètres; par contraste, la pente 'lee' est très escarpée sur une distance horizontale de seulement quelques mètres. À un niveau bas de l'eau, des tracteurs commerciaux extraient le sable graveleux de la surface pour obtenir matériel de construction. Par conséquent, seulement directement à côté de l'eau on peut observer la surface originelle des bancs de sable, voir **fig. 5.10-2**.

Car à l'extérieur du MC des roches calcaires dominent le bassin hydrologique, les bancs de la Loire moyenne et inférieure sont relativement claires. Entre Blois et Nantes on observe peu de troncs d'arbres, peu de particules artificielles comme par exemple des bouteilles en verre cassées, de briques ou des articles de plastique; c'est différent à plusieurs rivières allemandes, comme le Rhin ou l'Elbe, où des troncs d'arbres portent souvent des déchets de plastique après une inondation.

Dans l'estuaire de la Loire, par exemple à l'Île de Nantes, l'effet de la flocculation d'argiles à cause du contact avec l'eau plus saline est évident et c'est visible avec google earth à Saint-Nazaire, voir par exemple les dernières photos de **fig. 5.10-2**.

Ci-dessous, des gisements sont présentés pour illustrer la géologie et la dynamique de la rivière, avec informations stratigraphiques selon ¹: (ANONYMUS 1980b), ²: (ALCAYDÉ, et al. 1976), dans **fig. 5.10-2**.



Les calcaires très fins, craie du Tuffeau blanc de Saumur du Crétacé sup.², permettaient une ornementation détaillée au tailleurs des pierres au médiéval. Porte du Château de Blois, statue de François I, 26.09.2016.



L'altération différentielle laisse apparaître des traces de fousissement, une forme de bioturbation, dans des calcaires, ici probablement le Tuffeau jaune du Crétacé sup.². La montée de l'eau souterrain, avec des minéraux dissoudrés, résulte en cristallisation de sels dans les pores et en la destruction des surfaces des façades.
Chapelle à Les Rosiers-sur-Loire, 12.09.2016.



La cristallisation du sel résulte parfois dans l'altération de type 'taphony' dans le Tuffeau jaune des carrières du Saumurois, Crétacé sup.².
Tour sud-est du Château de Saumur, 14.09.2016.



La rivière méandrisante avec plusieurs chenaux est typique pour la dynamique naturelle en relief bas, sinon les hommes régulent le cours. Les couleurs obscures indiquent des algues filamenteux. Cette vue – c'est comme une fenêtre dans l'environnement pré-industriel en Europe central.
Loire, vue du Château de Chaumont-sur-Loire, 7.09.2016.
[FM_Loire2016-2, ça. 200 m est du domaine visible]



Pente 'lee' étroite d'un banc de chenal, 'sand flat,' de sable grossier et de gravier fin. La hauteur du banc s'approche de plus en plus à cel de l'eau à contre-courant sur une distance de plusieurs cents de mètres. En devant est visible un chenal désseché d'un petit bras, qui était passé à un niveau d'eau plus haut.

Loire, St.-Clément-des-Levées, 12.09.2016. [FM_Loire2016-5]



Sable grossier et gravier fin du lit de la rivière avec des écailles de moules. L'orientation avec la côté concave vers le haut de la plupart des coquilles indique le manque totale d'un courant aux temps de déposition - ou des activités de mouettes.

Loire, St.-Clément-des-Levées, 12.09.2016. [FM_Loire2016-5]



Sous une mince nappe d'eau des algues colonisent des ripples de courant. Dans les dépressions, la couleur verte des pigments de chlorophylle indique que les algues sont encore vivant. Sur les élévations, des croûtes de sel et de calcaire se formaient.

Loire, Chênehutte-Les-Tuffeaux, 10.09.2016. [FM_Loire2016-3]

	<p>À un niveau un peu plus élevé, les algues sont déjà desséchées et une croûte de calcaire et de sel s'est formée, voire aussi (GROSBOIS, et al. 2010). À la prochaine inondation le sable déposé au-dessus et dans des fissures peut produire des marques de dessèchement, sinon un courant éroderait les croûtes concaves et les transporterait comme des clastes bio-calcaires. Loire, Chênehutte-Les-Tuffeaux, 10.09.2016.</p>
	<p>Dans les villes avec des quais, ou murs des bords, il est difficile de prendre des échantillons à une rivière. Ici il y avait une possibilité derrière une grille sous une plateforme. Le sédiment déposé à marée haute est fin à cause de la position bien protégée. Loire, bras de la Madeleine, Quai F. Mitterand, Île de Nantes, au nord-est du Parc des Machines, 4.09.2016. [FM_Loire2016-1]</p>
	<p>La limite entre le gravier et le silt/argile peut être très distincte. L'épaisseur du silt/argile est 3 cm à la limite, il reste sur le gravier et devient plus épais vers le centre de la rivière. Sous la surface brune, le sédiment est noir, à cause d'un milieu anoxique produit par la décomposition du matériel organique. Marée basse à Saint Nazaire, 17.09.2016. [FM_Loire2016-6, -7 plus à gauche]</p>

Fig. 5.10-2: Impressions dans le Val de Loire.

Dans une figure de l'aérospectrométrie de la radiation γ du élément K, composante importante d'argiles, des teneurs élevées sont visibles dans les premiers décimètres du lit majeur de la Loire, avec dépôts holocènes d'inondations, entre la confluence avec l'Indre entre Tours et Chinon, et Nantes (NEHLIG 2010): p. 15, 21. Deux échantillons des sédiments récents de la

Loire, composé de silt et d'argile, ont une SM de 670 et $780 * 10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$, respectivement, et cinq échantillons de sable rangent entre 517 et $935 * 10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$, alors dans le même domaine. Comme exception un échantillon sableux dans l'estuaire de la Loire à Saint Nazaire a une SM de $163 * 10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$. Ce valeur se trouve entre ceux des autres sédiments sableux de la Loire, avec valeurs plus hauts, et de la côte Atlantique, avec valeurs basses.

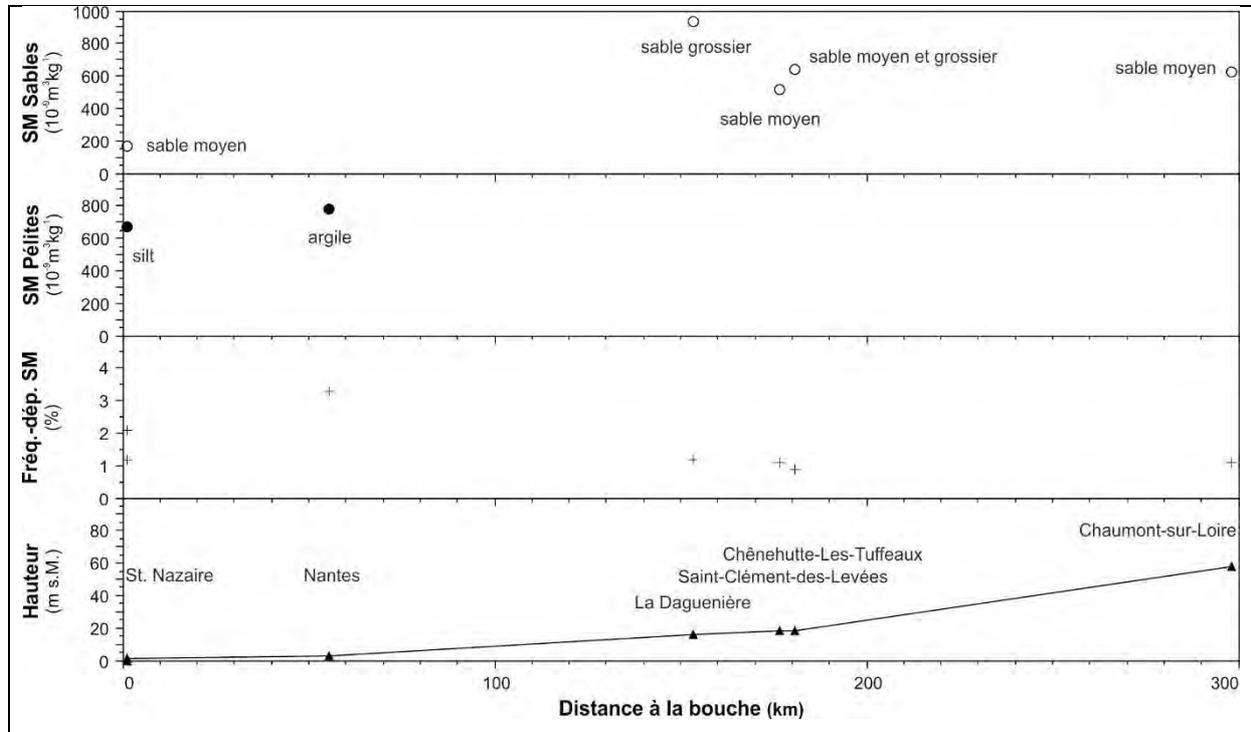


Fig. 5.10-3: SM des sédiments de la Loire, avec fréquence-dépendance de SM, et distance de la bouche et hauteur des échantillons déterminé avec Google Earth. Pour la détermination de la distance horizontale le centre du fleuve, ou - en cas de bancs de sable visible sous le niveau de l'eau - le bras qui semble le plus profond était utilisé.

Dans la **fig. 5.10-3** il est évident que la fréquence-dépendance de la SM d'argile est seulement un peu plus haut que celle de silt et de sable. La concentration de particules magnétiques très fin, particules superparamagnétiques, n'est pas grande, voir (DEARING, et al. 1996), seulement dans l'estuaire les valeurs sont un peu plus haut. Si on ignore la petite quantité d'échantillons on pourrait penser que les valeurs de SM de sable diminuent vers la bouche au profit des grains plus fins.

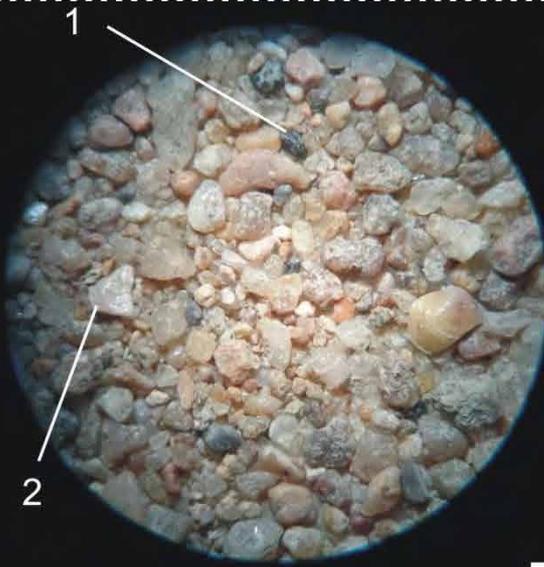
Pour quelques échantillons, la fraction ferrimagnétique était extrait avec un aimant permanent, la procédure était simplifiée d'après (DOBENECK, et al. 1987). Ci-dessous une description de sédiments sélectionnés observés sous un binoculaire est donnée.

- La location à la plus grande distance de la source: Loire2016-6, à Saint-Nazaire, Ville-es-Martin, argile silteux avec peu de sable fin, fraction non magnétique: biotite; fraction magnétique: lithoclastes bien arrondis noirs de schiste silteux <1.2 mm, rare scories rouges, magnétite isolé de taille silteux [sans photo]. Et de la même location Loire2016-7, sable moyen et fin, bien assorti, fraction non magnétique: hornblende verte, biotite; fraction magnétique: rare vulcanites gris <0.5 mm soit aphanitiques soit porphyriques [sans photo].
- La location la plus proche de la source, Loire2016-2, à Chaumont-sur-Loire, sable moyen à rares grains de sable fin et grossier, fraction non magnétique: lithoclastes de craie angulaire, biotite et muscovite <2 mm, lithoclastes de siltite noir bien arrondi; fraction magnétique: vulcanite gris aphanitique ou porphyrique <1 mm, siltite ou

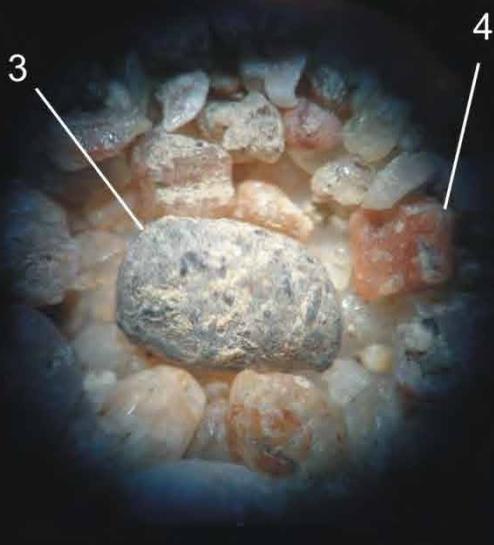
vulcanite aphanitique gris brun, un basalte avec olivine brun altéré 2 mm, petits troncs d'arbres <1.2 mm, un lithoclaste de phyllite bien arrondi, deux cristaux de hornblende verte [sans photo].

- La location avec le sédiment le plus fin: Loire2016-1, Île de Nantes, argile silteux avec rares grains de grès fin gris, fraction non magnétique: muscovite, quartz, rare biotite, capsules de graines ? de roseau, cristaux de sel sur surface résuspendé et séché; fraction magnétique: beaucoup de schistes noirs magnétiques angulaires avec biotite <3.8 mm, magnétite à grains silteux [voir **fig. 5.10-4b**].
- Le sédiment le plus grossier: Loire2016-4, à La Dagenuière, à l'est d' Angers: gravier fin avec sable moyen et avec beaucoup de sable grossier, modéré assorti, grains bien ou très bien arrondis pur la plupart, ca. 15 % de minéraux sombres dans le lot ça. 5 % de basalte, fraction non magnétique: quartz blanc arrondi en bordure, feldspath rougeâtre arrondi en bordure, lithoclastes de calcaires rosés ou jaune, rare fragments de coquilles <3 mm bien arrondis, rare muscovite <3.5 mm, amphibole ou pyroxène bien arrondi, rare lithoclastes de granites rosés bien arrondis en bordure, rare lithoclastes de grès fin gris-brun bien arrondis; fraction magnétique: des lithoclastes volcaniques <4 mm bien arrondis sans ou avec peu de vésicules et avec des phénocrystaux de hornblende noire <2 mm et de magnétite <0.5 mm émergeants et lustrés et rarement de feldspath ou feldspathoïde claire <0.8 mm et très rare olvin brun <1 mm dans une pâte aphanitique grise sont probablement des laves basiques tertiaires du MC, lithoclastes de vulcanites gris aphanitiques bien arrondi <1.7 mm sont similaires à la pâte aphanitique des vulcanites précédents, fragments noirs de hornblende, rare magnétites individuels parfois avec des plaines de cristal, deux lithoclastes de granite rouge ou jaune arrondi en bordure avec magnétite, un lithoclaste rouge arrondi en bordure et brillant de grès tres fin = ? jaspé, une hornblende verte 0.5 mm bien arrondie [voir **fig. 5.10-4a+b**]. Les échantillons Loire2016-3 et -5 sont relativement similaires.

Loire2016-4



Loire2016-5





Loire2016-5



Loire2016-5



Loire2016-4



Loire2016-1

Fig. 5.10-4a: Sables de la Loire sous le binoculaire, l'échelle blanche représente environ un millimètre. Loire2016-4: fraction entière, 1 = magnétite individuel, 2 = quartz arrondi en bordure, 3 = lithoclastes de vulcanite porphyrique bien arrondis, 4 = feldspath potassique, fraction ferrimagnétique: 5 = hornblende dans les vulcanites, 6 = magnétite ou pyroxène dans les vulcanites; Loire2016-5: fraction entière, 1 = ortho-feldspath, 2 = lithoclast de granit bien arrondi, fraction ferrimagnétique: 3 = magnétite, 4 = vulcanite aphanitique, les autres lithoclastes sont pour la plupart des vulcanites porphyriques, 5 = vulcanite porphyrique avec hornblende, 6 = vulcanite porphyrique avec magnétite.

Fig. 5.10-4b: Fraction ferrimagnétique des sables de la Loire sous le binoculaire, après traitement d'ultra-son pour enlever des croûtes de calcaire précipitées sur les bancs de sable, l'échelle blanche représente environ un millimètre. Loire2016-5: 1 = brèche volcanique, 2 = basaltoïde porphyrique avec feldspath et avec bulles, 3 = vulcanite porphyrique, 4 = basaltoïde avec phénocryste d'olivine, 5 = basaltoïde porphyrique, 6 = basaltoïde porphyrique. Loire2016-4: 1 = magnétite dans un vulcanite porphyrique, 2 = grand phénocryste de hornblende dans un basaltoïde porphyrique. Loire2016-1: 1 = schiste silteux avec biotite probablement riche en magnétite, probablement d'origine des schistes de l'Ordovicien Angevine.

Comparé à la Loire, la SM des échantillons sableux des autres rivières visitées: Beuvron, Cher et Vienne, range moins haut, entre 3 et $146 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Le bassin de réception du Beuvron est situé dans des sédiments marno-calcaires mio-pliocènes et crétacés, ce qui explique des valeurs de SM plus basses comparées aux autres rivières. La Vienne et la Cher ont leurs régions des sources dans la partie nord du Massif Central, avec des granites et des roches métasédimentaires du Précambrien au Silurien, ainsi les valeurs de SM sont plus hautes mais moins haut que ceux de la Loire.

[menu principal](#)

5.10.3. Résultats dans le Bassin d'Aquitain – Val de la Gironde - Languedoc

A: Partie occidentale du Bassin d'Aquitaine

La Gironde, l'estuaire de la Garonne et de la Dordogne, est le plus important fleuve dans le Bassin d'Aquitaine. Une spécialité est la grande marée de la Gironde. Les plus fortes grandes marées se passent au mars et au septembre, elles sont liées à la constellation spécifique du soleil, à ce temps dans le plan de l'équateur, et de la lune, voir sous <http://www.horaire-maree.fr/grande-maree/RICHARD/>. À ces occasions, une onde spectaculaire d'une hauteur d'environ un mètre se propage en remontant le fleuve et inonde les bords de la rivière, voir par exemple sous http://images.sudouest.fr/images/2016/04/08/a-langoiran-le-port-est-inonde-depuis-deux-jours_3720481_1000x500.jpg?v=1. Le phénomène est encore observable dans la Garonne à Cadillac, à une distance de 124 km de la bouche en l'Atlantique. Les dépôts pélimitiques d'une grande marée pourraient être échantillonnés le Sept. 8, 2014 à Langoiran et le Sept. 23, 2015 à Cadillac. Quelques semaines d'après leur déposition, la pluie détruira et érodéra ces dépôts.

Dans **fig. 5.10-5** des impressions des milieux fluviaux et littoraux sont présentées, avec informations stratigraphiques selon ¹: (ANONYMUS 1980b).



Sous une surface horizontale, les couches, ici: Paléocène et Éocène inf.¹, montrent le pendage, i.e. l'angle entre la horizontale et la ligne d'inclinaison maximale des plans, et la direction des couches, un azimut égal à la première, 'strike and dip'.
Orbieu à Lagrasse, Corbières, 20.09.2012. [FM_Orbieu2012-1]



Plus spectaculaire est le 'strike and dip' si les couches obliques sont érodées par une terrasse de brisant, ici: calcaires, Jurassique¹, avec des failles avec flexures. L'abrasion différentielle montre précisément des variations de composition: silification, argile, ciment, taille des grains et leurs stabilité.
Nord du Phare de Chassiron, Île d'Oléron, 4.09.2015.



Ici la pente douce suit la couche et la pente étroite illustre la résistance des couches calcaires et marneux, Éocène moyen et sup.¹. La déformation des couches est l'effet distant des chevauchements du Front Nord des Pyrénées.
Sentier Sculptural Mayronnes, 20.09.2012.



Les couleurs jaunes des fentes presque verticales des calcaires, Crétacé sup.¹, peuvent se former en plusieurs centaines d'années, comme se voit en comparaison avec les murs du château. Ça résulte principalement des précipités de Fe^{3+} -hydroxides. Les Jardins de Marqueyssac, vue vers le nord au Château de Beynac, au bord de la Dordogne, 13.09.2014.



Alternance des calcaires et des marnes, Éocène moyen et sup.¹: La pente et la végétation copient la structure des couches calcaires, plus dures et appauvries de substances nutritives, et marneux, doux, riche en argile et K^+ et plus riche en eau interstitiel - une façon de l'eau dans l'espace entre les grains. Sentier Sculptural Mayronnes, 20.09.2012.



Tandis que les calcaires, Éocène moyen et sup.¹, forment des pentes étroites et des paysages normalement caractérisés d'un manque de valls, les marnes forment des pentes douces avec une dense crépine de valls secs. Pradelles-la-Val, D3, 20.09.2012.



Conglomérat, Éocène moyen et sup.¹. L'arrondissement des galets calcaires et la structure basée sur des composants laisse penser à une origine marine. Probablement le sable infiltrait d'en haut après la déposition du conglomérat. Dans un régime fluvial on trouve souvent des galets bien arrondies basées sur la matrice ou on observe des structures basées sur des grains moins arrondies. Sentier Sculptural Mayronnes, 20.09.2012.



Élévations de calcaires, Crétacé sup.¹, isolées et à une hauteur de quelques mètres comparé au niveau entourant des marais côtiers, Holocène¹, marquent des îles anciennes. Aujourd'hui l'ostreiculture est établie sur grands régions dans ces marais. Fort Brouage, partie nord des fortifications, 17.09.2014.



Un horizon de sable riche en humines, un paléosol forestière d'environ 20 cm épaisseur, paléosol 4 selon un plat d'information au parking, marque une épisode calme et plus humide de l'Holocène. Son potentiel d'être archivé est très petit. Ça valide aussi pour les impacts de la dernière pluie. Dune du Pilat, pente ouest, environ 80 m sur niveau de la mer, près du Bassin d'Arcachon, Holocène, 8.09.2014. [FM_Dune_du_Pilat2014-3]



Sur des pentes d'inclination faible, les processus pédologiques transforment des marnes, Éocène moyen et sup.¹, dans un sol rouge-brun, riche en argile, qui résulte de la solution des carbonates. La coloration brune indique une précipitation de hydroxides de fer. Tels sols sont nommés terra fusca. En Allemagne ce sont des paléosols qui se formaient sous un climat subtropical.
Sentier Sculpturel Mayronnes, 20.09.2012.



À une vitesse de l'eau d'environ 10 cm/s des ripples de courant, avec une crête oscillante et une asymétrie forte, se forment dans les sables d'origine dunaire.
Écomusée la Grande Lande à Marquèze, nord-ouest de Sabres, 7.09.2014. [FM_Escamat2014-1]



Argile avec fissures de dessèchement, déposée pendant une grande marée quelques jours plus tôt.
Garonne à Langoiran, 200 m nord-ouest du pont routier de la D11 entre Cadillac et Cérons, 23.09.2015. [FM_Garonne2014-1]

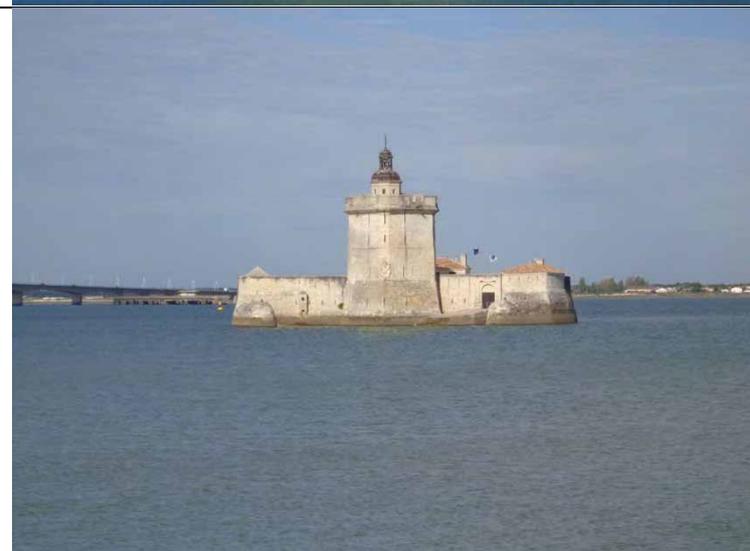
	<p>Ce verre était produit dans une région riche en sable et en pin. Ces verres sont normalement très magnétiques à cause de la présence de magnetite, $\text{Fe}^{2+}\text{O} \cdot \text{Fe}^{3+}\text{O}_2$, qui se formait dans un milieu non-saturé de O_2 pendant la fusion du sable dans un four. Écomusée la Grande Lande à Marquèze, nord-ouest de Sabres, 7.09.2014.</p>
	<p>La manque de stabilité de la tour, fondé sur des dépôts holocènes au-dessus de calcaires du Jurassique sup.¹, était corrigée pendant les travaux sur les étages supérieures, ainsi l'inclination variante entre la base et la plateforme suprême. Tour St.-Nicolas à La Rochelle, Av. Michel Crépeau, 8.09.2015. [FM_Atlantik2015-2, Plage de la Concurrence, ouest de la citadelle]</p>
	<p>Fort Louvois, construit sous l'architecte Vauban, contrôlait le passage entre la terre ferme et l'Île d'Oléron dès le 17^{ième} siècle. A gauche du fort, l'ancien point de départ du bac de l'Île d'Oléron est visible. L'échantillon pris au point du photo a une SM haute car il contient du fer métallique. Port le Capus, 17.09.2014. [FM_Atlantik2014-1]</p>

Fig. 5.10-5: Impressions dans le Val de la Gironde/Garonne et à d'autres locations dans la partie occidentale du Bassin d'Aquitaine.

La SM des sédiments pélitiques de la Gironde, voir **fig. 5.10-6**, sont comparable à ceux de la Garonne, avec des valeurs de $309 \text{ à } 375 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Il n'existe pas de tendance de diminution des valeurs de la SM vers la bouche à la base des échantillons étudiés. Mais à

cause de l'occurrence de roches cristallines dans la région hydrologique, à côté de calcaires méso- et cénozoïques, dans le Massif Central occidental (ANONYMUS 1980b), on peut bien s'imaginer que les valeurs de SM montent à contre-courant. La fréquence-dépendance de la SM pour des sédiments pélitiques avec 2-3 % est comparable à celle des pélites de la Loire. Celle des sables est <0.4 %, ainsi un grand nombre de particules ultrafines peut être exclu.

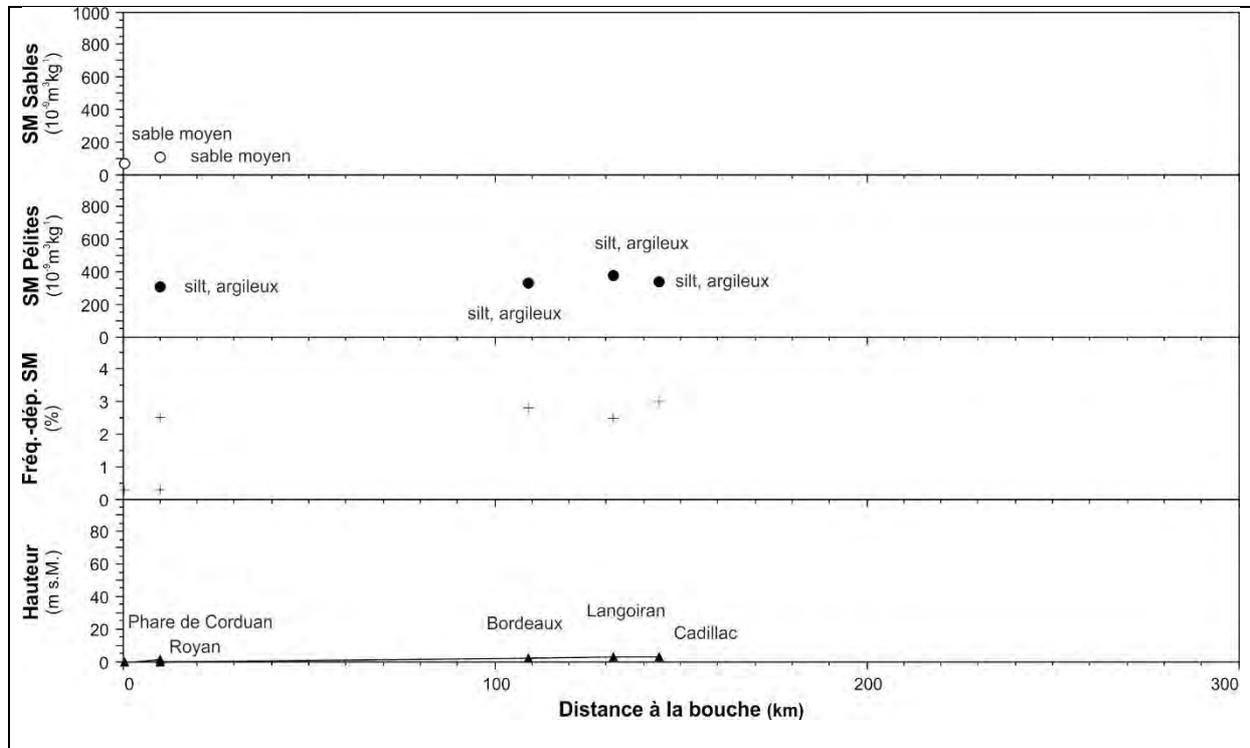


Fig. 5.10-6: SM des sédiments de la Gironde et de la Garonne, la Dordogne est tributaire à km 80.4. Les axes sont scalé de la même façon que dans fig. 5.10-3. Distances était déterminées avec google earth.

Les sédiments pélitiques de la Seudre et de la Charente ont une SM un peut moindre, avec 215 et 261 * 10⁻⁹ m³ kg⁻¹, respectivement. À l'opposé de la Charente, la Seudre n'a pas de roches cristallines dans sa région hydrologique, ce qui peut expliquer la valeur un peut moins haute. La fréquence-dépendance de la SM de silte dans la Seudre est pareil aux échantillons silteux de la Garonne/Gironde avec 3.0 %.

Les courants de surface dans le Golfe de Gascogne près de la côte au sud de l'estuaire de la Gironde sont principalement orientés ver le nord, seulement à l'été ils sont orientés inversement, voir http://sextant.ifremer.fr/image/journal/article?img_id=311747&t=1389172586064. Ainsi, le chargement de particules de la Gironde peut influencer la côte atlantique dans la partie sud-est du Golfe de Gascogne.

Trois sédiments littoraux de l'Atlantique ont une SM basse, même negative, entre -0.5 et 10 * 10⁻⁹ m³ kg⁻¹. Certainement une anomalie anthropogène est indiquée par une valeur de 2255 * 10⁻⁹ m³ kg⁻¹, mesurée dans le sables moyens près du Port de Le Capus, Bourcefranc-le-Chapus, vis-à-vis de Fort Louvois, enface de l'Île d'Oléron. Cette valeur est probablement influencée par des activités humaines dans le port, de la rouille des bateaux ou des cages d'ostreiculture, installés entre le port et le fort et aussi dans la Baie de la Grognasse au sud du port, visible avec google earth. Deplus il y'a une rampe de béton pour des bateaux des huîtres à quelques mètres de distance de la location de l'échantillon, et de plus il existe un

épi d'une longueur de environ 570 m sur échasses de béton de l'ancien bac entre Le Capus et Ors à l'Île d'Oléron, à une distance de 50 m. L'épi était abandonné 1966 quand le pont de l'Île d'Oléron était ouvert, voir par exemple http://www.bernezac.com/Oleron_histoire.htm. La fréquence-dépendance de la SM est <2.6 %. Voir aussi les observations sous le binoculaire ci-après et le dernier photo dans **fig. 5.10-5**.

La SM des sédiments éoliens de la Dune du Pilat, au sud du Bassin d'Arcachon, range entre -0.5 au littoral et $153 * 10^{-9} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ au sommet, et dans une zone sombre avec beaucoup de grains noirs une valeur de $392 * 10^{-9} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ était mesurée. La fréquence-dépendance de la SM est <1.4 %. Les valeurs de SM élevés indiquent un enrichissement de minéraux lourds dans le corps de la dune, pendant que les grains légers sont transportés plus loin. Dans Les Landes, les sables de la rivière Escamat à l'Écomusée de Marquèze près de Sabres, dans une région avec des sables éoliens holocènes (ANONYMUS 1980b), sont peu magnétiques avec $15 * 10^{-9} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, ce qui est pareil à sédiments éoliens récents de la côte allemande de la Mer du Nord, voir des chapitres du projet FluviMag présentant Langeoog et Norderney.

Les sédiments avec une haute SM étaient analysés sous le binoculaire:

- L'échantillon littoral avec la plus haute SM, partiellement d'origine anthropogène: Atlantik2014-1, vis-à-vis de Fort Louvois et en face de l'Île d'Oléron, sable fin à grossier, modéré assorti, grains arrondis en bordure, ça. 15 % de minéraux sombres, fraction non magnétique: 30 % de fragments de coquilles blanches ou rarement lilas angulaires <5 mm, beaucoup de lithoclastes de calcaires blancs ou jaunes angulaires <1 mm, relativement peu de quartz arrondi en bordure ou angulaire, muscovite, lithoclastes noirs angulaires de siltite avec taches brunes d'oxydes de fer <3 mm, lithoclastes arrondis en bordure de grès fin noir ou gris sombre <3 mm, amphiboles ou pyroxènes angulaires et rarement arrondis en bordure; fraction magnétique: magnétite angulaire et mat ou rarement bien arrondi et peu brillant <0.5 mm, plusieurs particules angulaires plats de fer métallique noir <2.5 mm, un grain de limonite ou de fer avec croûte de limonite en forme d'une lentille bien arrondie 0.3 mm, un fragment de fer avec laque vert 0.3 mm [voir **fig. 5.10-7b**].
- Concentration de minéraux lourds dans des sables éoliens: Dune du Pilat2014-3, bande d'environ 10 cm épaisseur avec concentration élevée de minéraux lourds, sable moyen très bien assorti et avec grains bien arrondis et fréquemment sphériques 0.3-0.4 mm, ca. 20 % de minéraux sombres dans la plupart non magnétiques, fraction non magnétique: beaucoup de quartz claire ou jaune bien arrondi ou rarement arrondi en bordure, rare hornblende noire bien arrondie ou arrondie en bordure; fraction magnétique: beaucoup de magnétite bien arrondi et brillant parfois avec plaines de cristal <0.4 mm, rare hornblende noire bien arrondi, rare lithoclastes de grès fin jaune bien arrondis, rare lithoclastes de vulcanite gris porphyrique bien arrondis, deux magnétites avec une surface partielle de hématite, un quartz de filon arrondi en bordure [voir **fig. 5.10-7a**].
- Sable estuarien: Gironde2014-1, à Royan, sable moyen avec beaucoup de sable fin, bien assorti, grains bien arrondis, ca. 20 % de minéraux sombres, fraction non magnétique: fragments de coquilles blanches ou rosés ou rouges bien arrondis <2,5 mm, quartz blanc ou jaunâtre arrondi en bordure < 1 mm, muscovite relativement fréquent <2 mm, amphiboles ou pyroxènes angulaires, deux lithoclastes <5 mm de calcaires blancs à grains transparents de ca. 0.3 mm peuvent être classifiés comme 'grainstone'; fraction magnétique: lithoclastes gris-bruns fins fortement magnétique sont probablement des vulcanites aphanitiques intermédiaires ou acides, rare lithoclastes gris sombres sont probablement des basaltes aphanitiques ou de siltite, rare magnétite <0.7 mm bien arrondi et brillant ou rarement arrondi en bordure et moins

brillant, lithoclastes de vulcanites aphanitiques gris bien arrondis, rare lithoclastes vulcaniques porphyriques gris bien arrondis, rare lithoclastes de quartzite gris arrondis en bordure, lithoclastes de grès fin bruns bien arrondis, deux hornblendes vertes [voir **fig. 5.10-7a**].

- Sable estuarien à jonction au littoral, Seudre2014-1, à Ronce-les-Bains: sable moyen, cage de colimaçon 7 mm, fraction non magnétique: quartz claire ou jaunâtre transparent bien arrondi ou arrondi en bordure ou angulaire, rare fragments de coquilles, rare lithoclastes de calcaires jaunes brillants à grains fins arrondis en bordure ou bien arrondis, rare biotite; fraction magnétique: rare octaèdres de magnétite arrondis en bordure soit lustres soit mats [sans photo].

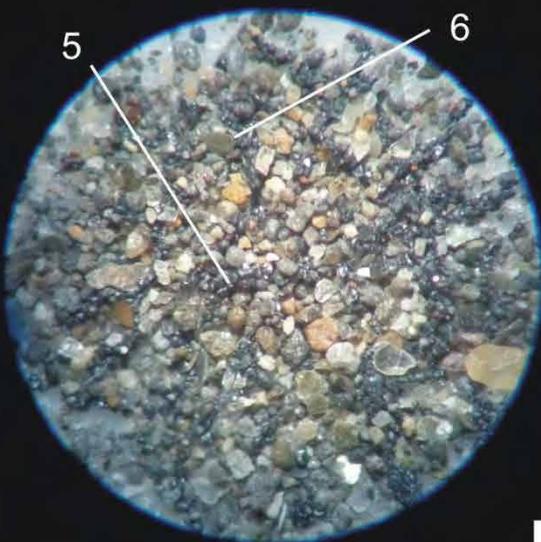
Pages suivantes:

Fig. 5.10-7a: Sables de la Gironde et de la Dune du Pilat sous le binoculaire, l'échelle blanche représente environ un millimètre. Gironde2014-1, à côté du Port de Royan, fraction entière: 1 = vulcanite porphyrique, 2 = quartz, 3 = coquille, 4 = calcaire, fraction ferrimagnétique: 5 = magnétite, 6 = siltite ou basalte. Dune du Pilat2014-3, fraction entière: 1 = quartz transparent bien arrondi, fraction ferrimagnétique: 2 = hornblende, cristaux transparents sont des grains dia- ou paramagnétique extraits liés à magnétite adhésive par le sel, plus tard éliminés de cette fraction par lavage avec magnète permanent arrêté à l'autre côté du bac, 3 = magnétite bien arrondi.

Fig. 5.10-7b: Sables du littoral et sables fluviaux vendéens sous le binoculaire, l'échelle blanche représente environ un millimètre. Atlantik2014-1, en face Fort Louvois, fraction entière: 1 = fragment de calcaire, 2 = coquille, fraction ferrimagnétique: 3 = lentille de limonite ou de fer avec croûte de limonite, 4 = plat de fer métallique, 5 = fragment de fer métallique avec laque verte, 6 = magnétite. Seudre2014-1, Ronce-les-Bains, fraction entière: 1 = colimaçon, 2 = quartz transparent clair, 3 = quartz translucide, fraction ferrimagnétique: 4 = groupe de magnétites satinés mats et bien arrondis.

Gironde2014-1

Dune du Pilat2014-3



Atlantik2014-1

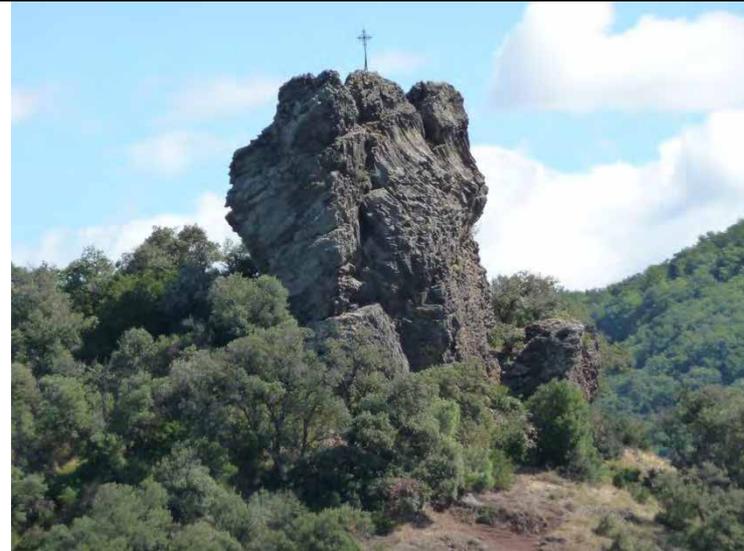
Seudre2014-1



B: Partie orientale du Bassin d'Aquitaine jusqu'au val de Rhône

La **fig. 5.10-8** montre quelques gisements intéressants près de locations d'échantillons de sédiments fluviatiles, avec informations stratigraphiques selon ¹: (ANONYMUS 1980b), ³: (BROUSSE & LEFEVRE 1990).

	<p>Une cyclicité majeure à dimension de plusieurs mètres dans des argilites alternant avec des bancs de grès, Permien³ dans le Bassin de Lodève, probablement indique l'un des cycles orbitaux de Milankovitch. Au bord sud du Lac de Salagou, 13.09.2012.</p>
	<p>Dans ces sediments, une seconde cyclicité est développée à l'échelle métrique dans les argilites, Permien³. Au bord nord du Lac de Salagou, 13.09.2012. [FM_Révérignes2012-1]</p>
	<p>Les calcaires dolomitiques, Jurassique sup.¹, sont peu structurés, car ils étaient formés dans des récifs qui étaient altérés pendant la diagenèse par la dolomitisation. Cirque de Saint-Guilhem-le-Desert, 14.09.2012. [FM_Hérault2012-1, Pont du Diable dans la ville de Saint-Guilhem-le-Desert]</p>



Un filon de basalt, Pleistocène¹, est entouré d'argilites, Permien¹. L'orientations des colonnes montrent un 'dyke' étroit en forme d'un tonnoir. Ça indique le fond du cratère, qui s'élargait au-dessus du niveau actuel. Au bord sud du Lac de Salagou, 13.09.2012.



Les colonnes verticales sont à l'angle droit sur les bords du filon de lave, hawaïite du Pleistocène¹, qui s'écoulait horizontalement sur les sédimentites, Permien¹, à faible pendage vers le sud-ouest. Au bord sud du Lac de Salagou, 13.09.2012.



La solution du calcaire d'un récif, Jurassique sup.¹, par la réaction avec l'acide carbonique de la pluie, forme des cannelures verticales, un phénomène de carstification. Cirque de Saint-Guilhem-le-Désert, 14.09.2012.



Un autre phénomène karstique est la dissolution différentielle. Les parties de calcaire, Jurassique moyen¹, sont plus soluble que le dolomite.
Cirque de Mourèze, 15.09.2012.



Dans une échelle plus grand, la karstification des roches carbonatées, Jurassique moyen¹, produit des cônes isolés. Probablement l'espace entre les aiguilles était occupé de caves, qui se formaient quand le niveau de l'eau souterrain se trouvait à cette hauteur.
Cirque de Mourèze, 15.09.2012.



Une crevasse dans les calcaires, Jurassique moyen¹, donne accès à l'eau, la karstification produit de l'argile comme résidu de la solution des calcaires, et en combinaison un endroit colonisable par les pines résulte. Le même phénomène sur une échelle plus grand fait possible de cartifier des joints sur une photo aérienne.
Cirque de Mourèze, 15.09.2012.



Des chutes de roches carbonatées, Jurassique moyen¹, et l'altération forment un éboulis de calcaires et d'argile résiduel. On note que la forme des lithoclastes est anguleux, ils restent dans une matrice marneux, peut-être de sol emporté par la pluie et infiltré dans le cadre de clastes.
Cirque de Mourèze, 15.09.2012.
[FM_Dourbie2012-2, plus au sud sur le Sentier artistique]



Après quelques centaines de mètres de transport fluvial, la différence de résistance est bien visible: La taille des lithoclastes basaltoides, Pleistocene³, est celle de blocs et de galets grossiers arrondis, pendant que les lithoclastes d'argilite, Permien³, sont desintégrés à particules de la taille de gravier moyen ou fin et de sable.
Au bord nord du Lac de Salagou, 13.09.2012.
[FM_Révérignes2012-1]



L'érosion à la rive concave, à berge abrupte, et la déposition à la rive convexe en pente douce, 'point bar', d'un fleuve méandrisant est bien visible. Les galets sont presque exclusivement des calcaires.
Lagrasse, Corbieres. 20.09.2012.
[FM_Orbieu2012-1]

	<p>Un seul clast de brique rouge indique des activités humaines. La majorité des galets sont des calcaires du Jurassique¹. On voit bien la forme caractéristique des galets, peu sphériques mais bien arrondis. Dans la plupart, l'orientation des galets est ±plat horizontal.</p> <p>Hérault, 100 m nord du pont routier de la D2 de Clermont-l'Hérault à Villeveyrac, 14.09.2012. [FM_Hérault2012-2]</p>
	<p>Les 'ripples' étaient encore humide de la marée ou à cause de l'ascent d'eau interstitiel, évaporant à la surface. Les ripples se formaient par les ondes de la marée haute précédente. Ils sont cachés sous une mince couche adhésive de sable éolien. À cette côte, l'abrasion annuelle est çà. 30 m selon l'information d'un habitant d'Aigues-Mortes.</p> <p>Plage de l'Espiguette, au sud de Le Grau-du-Roi, 12.09.2012. [FM_Mare_Mediterraneum2012-2]</p>
	<p>Dans les salines le sel grossier et le fleur de sel sont produit, profitant par la salinité plus haute de la Méditerranée comparé à l'Atlantique du Nord. Les régions peu élevées seront effectuée fortement par la montée de la mer en la future. Probablement un jour la mer reviendra aux quais historiques de cette ville, qui étaient abandonnés à cause de la progradation littorale.</p> <p>Aigues-Mortes, 12.09.2012.</p>

Fig. 5.10-8: Impressions dans le Languedoc, les Causses et le delta du Rhône.

Les valeurs de SM des sables littoraux de la Méditerranée rangent entre 49 à Les Saintes-Maries-de-la-Mer, et $3557 * 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, à la Plage de l'Espiguette, au sud de Le Grau-du-Roi, le dernier accompagné d'une valeur de 1834 pour des sables éoliens littoraux. Au contraste aux sédiments littoraux de l'Atlantique, la couleur grise des sables déjà indique la présence des

minéraux lourds. Le chargement de particules du Rhône, qui a par exemple des roches ultrabasiqes alpines dans sa région hydrologique, peut être l'origine des minéraux magnétiques. Alternativement, à la Plage de l'Espiguette une contamination pourrait résulter des activités humaines dans le Port-Camargue à Le Grau-du-Roi. Mais le port est un port de plaisir, ce qui ne soutient pas cette possibilité. De plus, le courant principal de la surface est orienté vers le ouest, en passant l'estuaire du Rhône situé à l'est à une distance de environ 50 km, voir https://letangnouveau.files.wordpress.com/2014/09/carte_courants-universitc3a9-paris-1.jpg. La fréquence-dépendance de la SM est $< 1.0 \%$, ça indique l'absence de particules magnétiques très fins.

La SM des sables fluviaux des échantillons étudiés range entre 3 et $876 * 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, avec les valeurs les plus hautes dans l'Hérault entre Clermont-l'Hérault et Villeveyrac, et dans le Révérignes au nord du Lac de Salagou. À côté de calcaires méso- et cénozoïques, L'Hérault a des granites du Massif Central et des basaltes du Tertiaire et Quaternaire dans sa région hydrologique, et le Révérignes des basaltes pleistocènes et des couches siliciclastiques rouges du Permien, à côté de grès triassiques et calcaires jurassiques (ANONYMUS 1980b). À l'autre extrême, la SM des sédiments du Dourbie dans le Cirque de Mourèze, avec des calcaires jurassiques pour la plus grande partie, mais aussi avec des vulcanites basiques du Tertiaire et Quaternaire dans la région hydrologique, est $< 10 * 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$.

La fréquence-dépendance de la SM des sables fluviaux range entre 1.5 et 6.0 %. La plus haute valeur était mesurée dans un échantillon de l'Aude à Sallèles d'Aude, le seul échantillon avec une portion significative de silt, indique la présence de particules superparamagnétiques. Un autre échantillon sableux avec une fréquence-dépendance de 4.4 %, du Révérignes nord du Lac de Salagou, contient des clasts silteux rouges, ainsi leur teneur de particules ultrafines détermine la fréquence-dépendance élevée du sédiment sableux. En ce cas, ce paramètre ne peut pas être utilisé comme proxy de la granulométrie actuelle, mais c'est héritée de l'histoire des composants.

Quelques observations sous le binoculaire sont référées ci-dessous.

- L'échantillon avec la plus haute SM, littoral: Mare Mediterraneum2012-1, Plage de l'Espiguette, au sud de Le Grau-du-Roi: sable moyen avec beaucoup de sable fin, très bien assorti, grains $< 1 \text{ mm}$ bien ou très bien arrondis par la plupart, ca. 30 % de minéraux sombres, fraction non magnétique: quartz incolore ou jaunâtre bien arrondi et rarement angulaire, pas de mica, amphibole arrondie et fréquemment brillante partiellement avec plaines de cristal, rare grenat rouge turbide bien arrondi ou rarement rosé transparent et angulaire, rare fragments de coquilles brillants blanches ou jaunes; fraction magnétique: magnétite bien arrondi et brillant parfois avec plaines de cristal $< 0.3 \text{ mm}$, rare minéraux verts turbides sont probablement des hornblendes, deux lithoclastes rougeâtre brun translucides bien arrondis $< 0.6 \text{ mm}$ riche en grains noirs [voir **fig. 5.10-9**].
- Sable fluvial avec granites et sédiments siliciclastiques permien et marno-calcaires mésozoïques et basaltes néogènes dans la région hydrologique: Hérault2012-2, entre Clermont-l'Hérault et Villeveyrac: sable grossier avec gravier fin $< 3 \text{ mm}$, fraction non magnétique: beaucoup de lithoclastes de siltite rouge et rarement gris bien arrondis ou arrondis en bordure, rare quartz anguleux transparent ou blanc, rare schistes avec mica blanc arrondis en bordure, rare schistes bien arrondis, branchettes, rare calcaire granuleux arrondi en bordure, rare fragments de coquilles; fraction magnétique: beaucoup de lithoclastes de basaltoïdes porphyriques gris bien arrondis avec phénocristaux de magnétite ou hornblende ou de feldspath, basaltoïdes noirs aphanitiques avec et sans bulles, magnétite angulaire satiné mat, un lithoclaste

angulaire de quartz avec un cristal de magnétite, un lithoclaste de scorie rouge angulaire [sans photo].

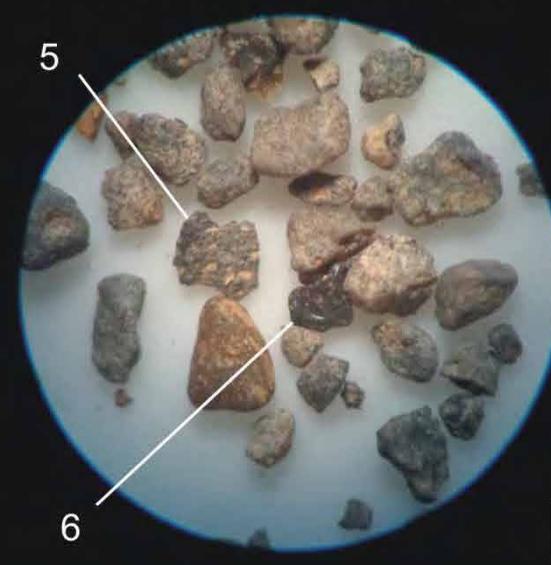
- Sable fluvial avec sédiments siliciclastiques permien et basaltes quaternaires dans la région hydrologique: Réverignes2012-1, au bord nord du Lac de Salagou, banc de sable et de gravier, fraction non magnétique: lithoclastes anguleux de siltite à couleur rouge-violâtre; fraction magnétique: beaucoup de lithoclastes <3 mm de basaltoides porphyriques gris bien arrondis ou arrondis aux bords avec structure porphyrique-hiatal ou -sériel avec phénocristaux qui rangent entre 0.1 et 0.5 mm de magnétite ou hornblende et dans la plupart avec bulles, basaltoides aphanitiques qui ressemblent les basaltoides précédents avec très petits phénocristaux parfois avec bulles. [sans photo].

Page suivante:

Fig. 5.10-9: Sédiments de la Méditerranée et des Causses sous le binoculaire, l'échelle blanche représente environ un millimètre. Mare_Mediterraneum2012-1, fraction entière: 1 = quartz transparent, 2 = lithoclaste de calcaire bien arrondi, 3 = grenat, 4 = magnétite bien arrondi et brillant. Hérault2012-2, fraction entière: 1 = lithoclaste de siltite bien arrondi du Permien inférieur, 2 = lithoclaste de basaltoïde porphyrique, 3 = phénocryste d'olivine, 4 = lithoclaste de calcaire granuleux, 5 = lithoclaste de basaltoïde avec phénocristaux de feldspath, 6 = magnétite.

Mare_Mediterraneum2012-1

Hérault2012-2



5.10.4. Considérations à la SM dans les différentes faciès

Dans ce projet nous avons pris des échantillons de faciès variable: faciès littorale inter- et supratidale, estuarienne et lagunaire intertidale et supratidale, éolienne de dunes côtières, fluviatile 'floodplain', 'point bar', et 'channel bar'. Dans ce chapitre les résultats sont examinés sous l'aspect du milieu de déposition, en premier pour les sables, en deuxième pour les pélites.

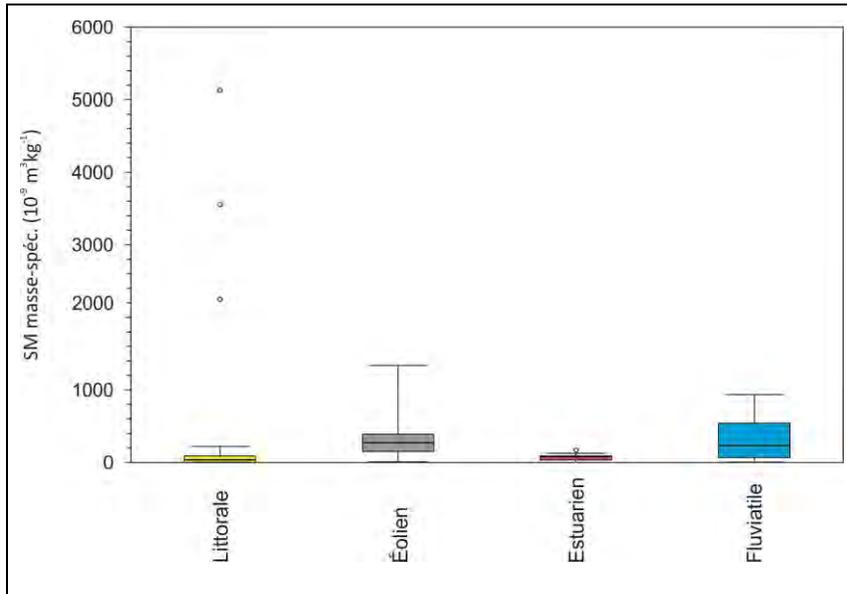


Fig. 5.10-10: Présentation comme 'Whisker plot' de la SM des sables déposés dans différents milieux sédimentaires. Nombre d'échantillons: 30x littoral, 4x éolien, 7x estuariens y compris des locations fluviatiles influencées par la marée, et 24x fluviatile.

Fig. 5.10-10 montre des médianes de SM des échantillons sableux, assortie d'après le milieu de déposition. Si on regarde seulement les boxes, on voit bien que les sables éoliens et fluviatiles ont une SM plus élevée que ceux des milieux littoraux et estuariens. Ça peut indiquer

1. l'enrichissement de minéraux lourds dans les dépôts dunaires près de la côte qui met du matériel nouveau à la disposition: pour analyser cette hypothèse, il faudrait prendre des échantillons éoliens à différentes distances d'un secteur de la côte;
2. l'enrichissement de particules diamagnétiques dans le littoral, comme le quartz avec sa grande résistance contre la destruction mécanique par les ondes, ou de matériel biologique, comme les coquilles calcaires: puis le teneur en la fraction diamagnétique devrait être plus élevée et en la fraction ferrimagnétique moins élevée dans les échantillons littoraux et estuariens en comparaison avec les sables fluviatiles; **tableau 5.10-1** supporte cette hypothèse.
3. la destruction des minéraux magnétiques dans un milieu suboxique dans les estuaires à cause de hautes teneurs en matériel organique: des investigations sous un microscope électronique à balayage pourraient donner une solution;
4. la réduction de la grandeur des minéraux magnétiques dans les sables des estuaires et de la côte en comparaison aux sables fluviatiles fait plausible leur enrichissement dans les dépôts pélitiques qui sont déposés aux locations avec une plus grande profondeur de l'eau, loin de la côte sur le plateau continental, pas accessible dans ce projet: le

quotient des médianes des fractions ferri- et dia-/paramagnétique d'un même échantillon peut donner des informations importantes; **tableau 5.10-1** supporte cette idée.

Tab. 5.10-1: Médianes de la fraction ferrimagnétique et la relation entre les diamètres des grains magnétique et non magnétique dans des différentes faciès. Ø = estimation des diamètres moyens sous le binoculaire, N = nombre d'échantillons.

Faciès	Fraction ferrimagnétique [masse-%]	Ø fraction ferrimagn./ Ø fraction dia-/paramagn.	N
éolienne	0.3	<<1	1
fluviale	2.9	~1	9
littorale	0.9	<=1	5
fluviale-estuarienne	0.2	<<1 à ~1	11

Si on reparle de la **Fig. 5.10-10** et si on prend la distance entre le troisième quartile et le premier et la multiplie avec 1.5, trois échantillons littoraux peuvent être regardés comme points aberrants, énumérés en suite de SM progressive: Atlantik2014-1 vis-à-vis de Fort Louvois au Port de Le Capus, Mare_Mediterraneum2012-1 à la Plage de L'Espigette au sud de Le Grau-du-Roi, et Atlantik2015-10 à Port Maria, Presqu'Île de Quiberon. Pour ces locations une contamination par des activités humaines est semblable, cependant pour la Plage de L'Espigette c'est difficile à comprendre, voir la discussion avant.

Dans ce projet, les échantillons pélitiques, de silt et d'argile, sont localisés dans les estuaires. Dans tous ces pélités la présence de mica blanc est observable sous le binoculaire, probablement d'origine des granites de type métasédimentaire ou des micaschistes. Par radiographie de poudre, XRD, on peut prouver la présence de quartz >> feldspath, muscovite, calcite > chlorite, magnétite, voir **tableau 5.10-2**. Clinopyroxène est trop rare pour une détection dans la fraction entière, il peut être présent dans les échantillons Loire2016-1 et -6. Si on estime le teneur en magnétite selon l'analyse XRD, avec deux méthodes, une corrélation positive avec la SM est évidente, voir **fig. 5.10-12**. Ça veut dire qu'au moins pour les pélités estuariens la SM reflète le teneur en magnétite.

Tab. 5.10-2: XRD des sédiments pélitiques des estuaires. **XX** = beaucoup, **X** = moyen, **x** = peu, **{x}** = traces. La SM se réfère à la fraction entière en [$10^{-9} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$].

Échantillon	Quartz	Feldspath	Muscovite/ Illite	Chlorite	Halite	Calcite	Diopside	Gypse	Magnétite
Loire2016-1	XX	X	X	x		X	{x}		x
Loire2016-6	XX	X	X	x	X	X	{x}	{x}	x
Garonne2014-1	XX	X	X	x		X			x
Gironde2014-2	XX	X	X	x	x	X			x

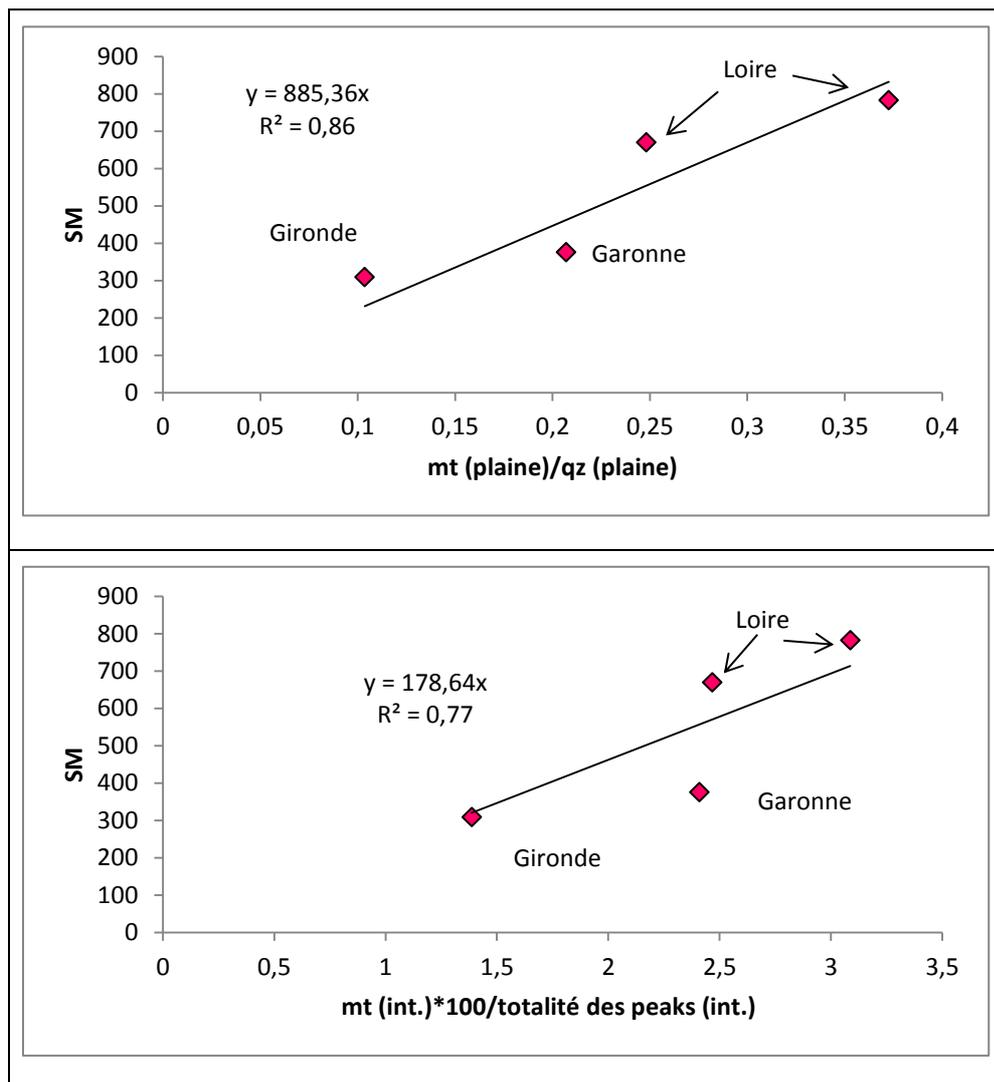


Fig. 5.10-11: En haut, corrélation entre le quotient des plaines des 'peaks', réflexions de rayonnement X, de magnétite sur quartz vers la SM [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] pour les sédiments estuariens et fluviatiles avec influence de la marée, pour la Garonne/Gironde et la Loire. Les plaines des 'peaks' pour quartz étaient centrées à 4.257 \AA , avec une hauteur de 'peak' relative de 22 % correspondant à 8.24 % de toutes les intensités de quartz, et pour magnétite à 1.4992 \AA , avec une hauteur de 'peak' de 41 % correspondant à 14.5 % de toutes les intensités de magnétite. En bas, quotient de l'intensité du 'peak' XRD de magnétite $\cdot 100/14.5 \cdot 100$ sur la somme des intensités de tous les 'peaks' avec une intensité >100 'counts', i.e. au-dessus le 'background', vers la SM. Si on prenait l'axe x comme teneur en masse-% et le multiplie avec la SM de magnétite, $500\ 000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$ selon (THOMPSON & OLDFIELD 1986), une SM totale trop haute résultait comparé à l'échantillon entier mesuré. Ainsi, sans une calibration de la XRD avec des mélanges de magnétite et d'autres minéraux fluviatiles, ces teneurs ne peuvent pas être transformé en masse-%. Lignes de corrélation sont forcées par l'origine.

La SM des pélites, voir **tab. 5.10-3**, montre que la Loire transporte 3-40x la quantité de particules ferrimagnétiques comparé aux autres estuaires visitées. La SM de la fraction ferrimagnétique est moins haute dans la Loire comparé à la Charente et la Garonne/Gironde. Une explication peut être le teneur de vulcanites tertiaires et quaternaires d'origine en Auvergne et en Limagne dans le bassin hydrologique (ANONYMUS 1980b). Ces lithoclastes ont une SM moins haute que celle du magnétite pur.

Tab. 5.10-3: SM des sédiments pélitiques des estuaires et des parties des fleuves sous l'influence de la marée. En [] le nombre. Des informations géologiques données ignorent des roches calco-marneux du Méso- et Cénozoïque, qui contribuent peu de minéraux magnétiques et qui composent une grande partie de toutes les régions hydrologiques.

Estuaire	Masse de fraction ferrimagnétique [%]	SM de fraction ferrimagnétique [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$]	Géologie de la région hydrologique
Loire	0.41 [2]	61000 [2]	Massif Central: granites, gneiss, migmatites, vulcanites tertiaires et quaternaires
Garonne	0.13 [3]	82000 [3]	Massif Central et Pyrénées: schistes, granites, gneiss, granites, gneiss
Gironde	0.06 [1]	103000 [1]	Massif Central et Pyrénées et val de Dordogne: schistes, granites, gneiss, vulcanites tertiaires
Charente	0.01 [1]	119000 [1]	Massif Central: granites, gneiss

Est-ce que la relation entre la SM et la fréquence-dépendance de SM, indication pour le teneur en particules superparamagnétique de petite diamètre (DEARING, et al. 1996), permet une interprétation de faciès, par exemple dans des dépôts anciens? Dans **fig. 5.10-12** un diagramme de ces deux paramètres est présenté. Il n'est pas possible d'attribuer tous les échantillons à un milieu spécifique, mais à la base des échantillons analysés il y'a un groupe avec SM haute et fréquence-dépendance de SM basse de milieu littoral avec une probable influence anthropogène. Il existe un autre groupement avec SM basse et fréquence-dépendance de SM haute en milieu estuarien de la Loire et en milieu fluvial de l'Aude à Sallèles d'Aude, Réverignes au Lac de Salagou et Hérault entre Clermont-l'Hérault et Villeveyrac, tous avec basalte dans leurs bassins hydrologiques. Cependant, pour une analyse plus détaillée d'autres techniques seraient nécessaires, comme par exemple la mesure de paramètres de magnétisme d'environnement et l'inspection microscopique.

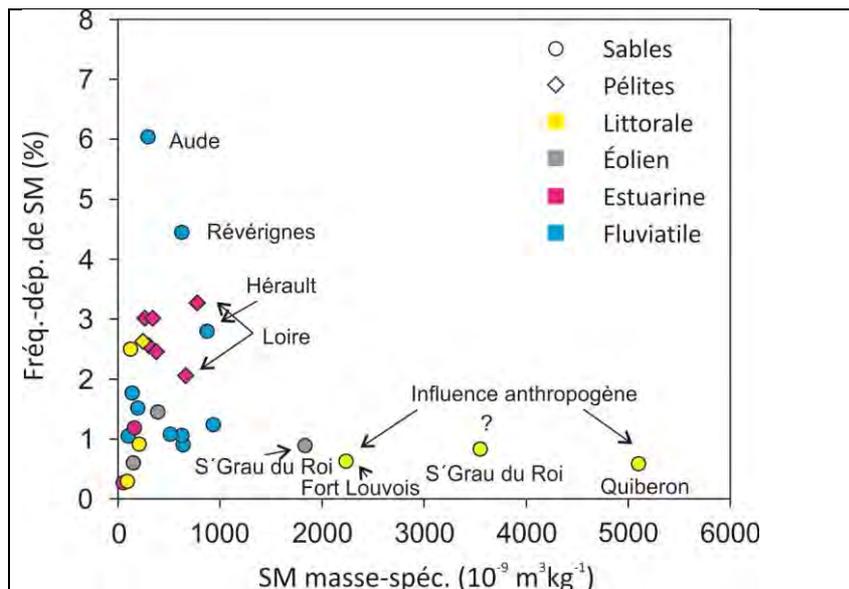


Fig. 5.10-12: SM vers fréquence-dépendance de SM pour différents faciès. La faciès estuarienne comprend aussi des locations fluviales influencées de la marée.

Comme indiqué en avant, la raison pour les hautes valeurs de SM à Port Maria et à Fort Louvois est une concentration de minéraux lourds naturel et aussi de fer anthropogène. Le fer avec lustre métallique résulte probablement de travaux sur les bateaux dans les ports à une distance de quelques cents de mètres, le fer avec croûte brun-rouge peut originer de l'abrasion de fortifications du seconde guerre mondiale ou de môles de béton.

Une observation étonnante était que quatre échantillons argileux des estuaires de la Loire et la Garonne/Gironde ont perdu une partie significative de leur SM quand on les a remesurés 2-3 semaines d'après la première fois, voir **fig. 5.10-13**. Après encore une fois trois semaines plus tard peut de changement additonel était observable. Cette perte ne comprend pas trois outre échantillons argileux. Ça implique l'existence de minéraux magnétiques instables sous l'influence d'oxygène à ces quatre locations. On pourrait y penser a greigite, un sulfide fortement magnétisable (THOMPSON & OLDFIELD 1986). Dans des prairies de sel, 'salt-marsh', des bactéries forment des magnétosomes de greigite dans un milieu anoxique, voir (EVANS & HELLER 2003): 203. D'après (BETHKE 1996), citation dans (RUSSELL & HALL 2006), greigite est stable à pH 8 et eh -5.5 volts. Les sédiments argileux contiennent initialement un certain teneur de matière organique, indiqué par un odeur de pourriture. L'oxydation progressive après le mettre à sécher pourrait détruire des sulfides métastables au bien de pyrite et puis hématite avec gypse. Fe-sulfides et hématite ne sont pas identifiable dans les analyses de XRD, mais gypse peut être présent dans l'échantillon Loire2016-6. La fréquence-dépendance ne diffère pas de façon significative sur 2-3 semaines, ça montre que la perte de SM n'est pas limité aux particules ultra-fins.

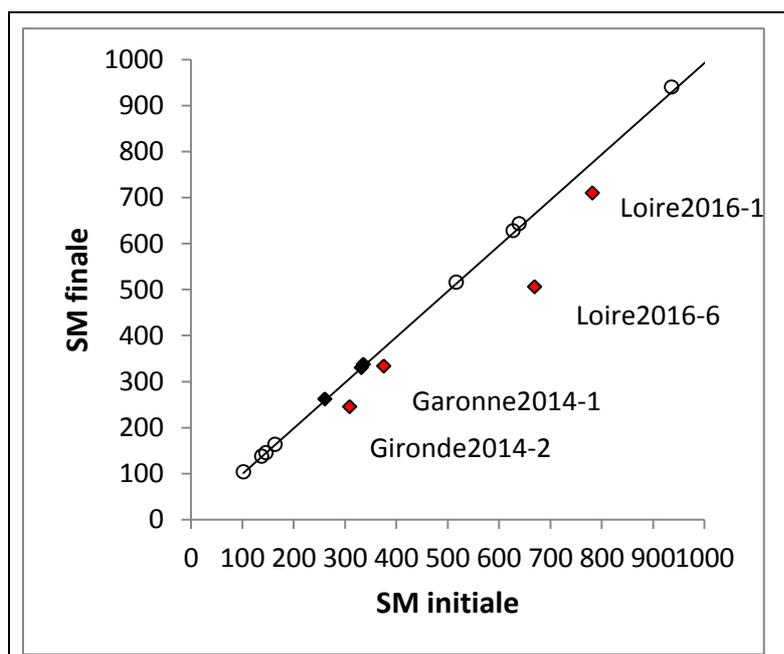


Fig. 5.10-13: La SM initiale contre la SM finale, mesuré 2-3 semaines plus tard, en $10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Des cercles ouverts représentent des sables, des losanges pleins des argiles et siltes, les symboles rouges marquent les échantillons qui déparient de premier plan de la ligne de trend linéaire, laquelle est forcée à travers de l'origine. Un échantillon, le sable atlantique de Port Maria, est situé en dehors la figure mais était localisé sur la ligne de trend.

Retournons à la fraction de sable, qui porte une information interprétable plus facilement que celle des pélites. La raison pour les valeurs des SM plus hauts dans le sable de la Loire inférieure, comparé à celui à l'estuaire de la Gironde, est la présence de vulcanites du Massif Central dans les sables de la Loire, voir en haut. Dans des sables de la Loire supérieure et moyenne (MACAIRE, et al. 2013) ont observé les plus hautes concentrations de roches

volcaniques à km 69 de la source, 80 km au sud-sud-ouest de St. Étienne et situé entre le plateau basaltique du Devès à l'ouest et celui du Velay oriental à l'est, avec 17 vol.-% de vulcanites. Leur dernier échantillon à km 800, à Bréhémont, 50 km ouest de Tours, est composé de encore 4 vol.-% de vulcanites.

Par rapport à la localité Bréhémont, les échantillons les plus proches de notre projet sont Loire2016-3, à une distance de 71 km contre le courant, et Loire2016-2, 47 km avec le courant. La fraction ferrimagnétique fait ça. 3.2 masse-% de l'échantillon original et des lithoclastes volcaniques porphyriques sont présents avec 1.4 masse-%. Ces derniers composants sont présents aussi dans les échantillons Loire2016-5, 51 km avec le courant, et Loire2016-4, 74 km avec le courant. La SM des vulcanites porphyriques est au moyen $17900 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$. Selon (HUNT, et al. 1995) ce valeur est dans le domaine de vulcanites acides et basiques.

D'après les observations sous le binoculaire des vulcanites porphyriques des sables des échantillons Loire2016-2, -3, -4 et -5, voir en haut, il s'agit de fragments non-altérés de laves. À cause de la pauvreté de bulles on peut exclure des lapillis de scorie des pyroclastiques quaternaires de la Chaîne des Puys. Seulement dans les échantillons Loire2016-2 et -3 rare lithoclastes avec olivine et parfois avec des feldspaths sont présents. Cependant, on ne peut pas exclure la présence d'olivine dans la matrice des vulcanites. L'abondance des pyroxènes ou des amphiboles noirs, parfois presque 40 vol.%, peut être un argument pour un vulcanite différencié, comme trachybasalt / hawaïite.

Pour savoir plus des vulcanites des sables de la Loire, deux échantillons, Loire2016-4 et -5, étaient analysés par XRD. Leurs diffractogrammes donnent des réflexions presque identiques en relation de leur position et intensité, voir **fig. 5.10-14**. L'absence d'une base élevée autour de $26.7^\circ 2\theta$, la réflexion principale de quartz, montre que peu de verre riche en silice est présent dans la matrice. L'absence probable d'olivine, en forme de fayalite ou forstérite, de leucite, et de néphéline indique une composition saturé en SiO_2 . D'une côté, l'absence probable de quartz, orthoclase et sanidine, d'autre côté la présence d'un plagioclase basique ou intermédiaire et de magnétite et titanomagnétite indique qu'il ne s'agit pas d'un magma très différencié. La présence du clinopyroxène diopside indique selon (TRÖGER, et al. 1982) un magma intermédiaire. Pour localiser la région d'origine des vulcanites porphyriques, la pétrographie des laves dans le Devès et le Velay, les champs volcaniques les plus probables pour l'origine des lithoclastes, est discuté en suivant.

Le Plateau du Devès comprend des coulées exclusivement basaltoides ou basaltiques s.l., avec basanites, néphélinites et hawaïites établis entre 7.3 et 0.3 Ma, Mio-Plio-Pleistocène (MERGOIL, et al. 1993): p. 11. Les laves basaltoides du Devès contiennent des phénocristaux d'olivine > clinopyroxène > plagioclase, et des microlites avec titano-magnétite, feldspaths alcalines, plagioclase, feldspatoïdes en cas des basanites et néphélinites, phlogopite, rhönite, apatite, du verre, et souvent des enclaves ultrabasiqes (MERGOIL, et al. 1993): p. 20. De l'analyse géochimique, des basanites et néphélinites à olivine sont dominants comparé aux basaltes subalkalines.

Le Velay oriental se compose de laves basaltiques et intermédiaires, avec phonolites, trachytes, formés entre 13.5 et 1.5 Ma, Mio-Plio-Pleistocène. Les laves trachytiques et phonolitiques sont gris avec phénocristaux de hornblende > feldspath > pyroxène > sphène, ou gris avec phénocristaux de feldspath alcalin, ou ils sont gris à noir ou sombre vert et aphyriques (MERGOIL, et al. 1993): p. 19-20.

Les valeurs de SM, les observations sous le binoculaire, et les dates de XRD des échantillons de ce projet indiquent un matériel riche en clinopyroxène, ainsi un trachybasalte / hawaïite du Velay oriental est le plus semblable roche d'origine pour les lithoclastes dans les sables de la Loire. Des analyses géochimiques pourraient donner des arguments complémentaires.

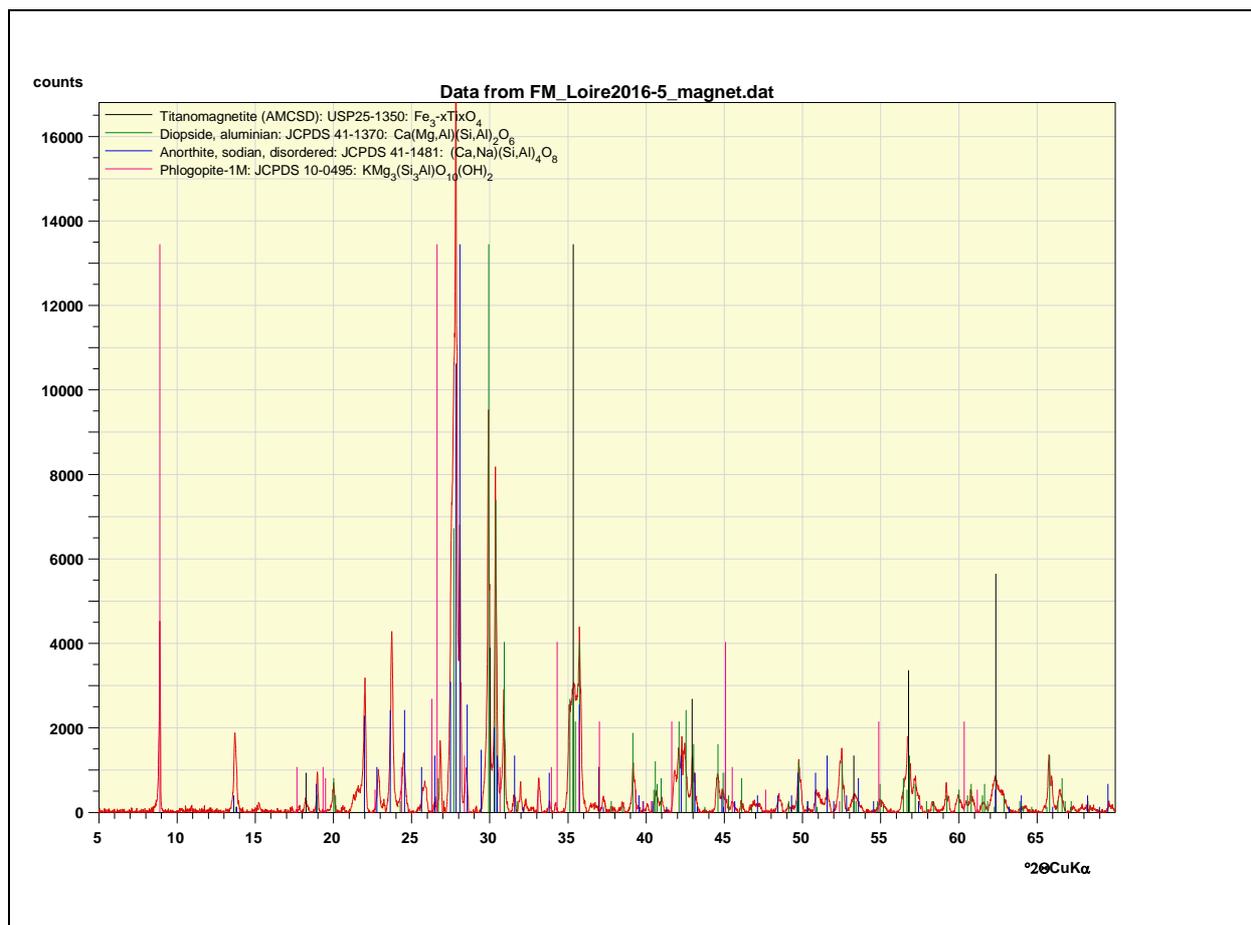


Fig. 5.10-14: XRD de l'échantillon Loire2016-5, fraction ferrimagnétique, lithoclastes de basaltoides porphyrique. Mesurage de Ralph Bolanz, Minéralogie Générale et Appliquée, Institut des Sciences de la Terre, Université de Jéna, Bruker D8 Advance, Cu K α 1+2, 40 kV, 40 mA, Bragg-Brentano géométrie, 5-120° 2θ , incrément 0.01527° 2θ , 1.5 s par étape, software: MacDiff 4.2.5 (PETSCHICK 2001).

La hypothèse que la SM en général reflète le teneur de grains ferrimagnétiques se trouve souvent dans des publications qui analysent le magnétisme des sédiments récents ou anciens, voir par exemple (THOMPSON & OLDFIELD 1986). Dans **fig. 5.10-15 en haut**, un plot de SM de l'échantillon original resp. complet vers la masse de la fraction ferrimagnétique montre que cette relation est valide pour les sédiments de la Loire. Ça indique que la fraction ferrimagnétique est d'une composition relativement homogène, un petit nombre de différents lithologies de roches mères contrôle le caractère magnétique. Dans **fig. 5.10-15 en bas** la même relation est regardée pour d'autres environnements. On voit que seulement deux échantillons avec basalte se trouvaient près de la ligne de régression de la figure en haut, tandis que les autres sédiments suivent un trend différent. La pente des lignes de régression dépend de la SM de la fraction ferrimagnétique: une inclinaison plus forte résulte pour les lithoclastes de basalte comparé aux autres échantillons qui sont plus riche en magnétite isolé ou de fer métallique.

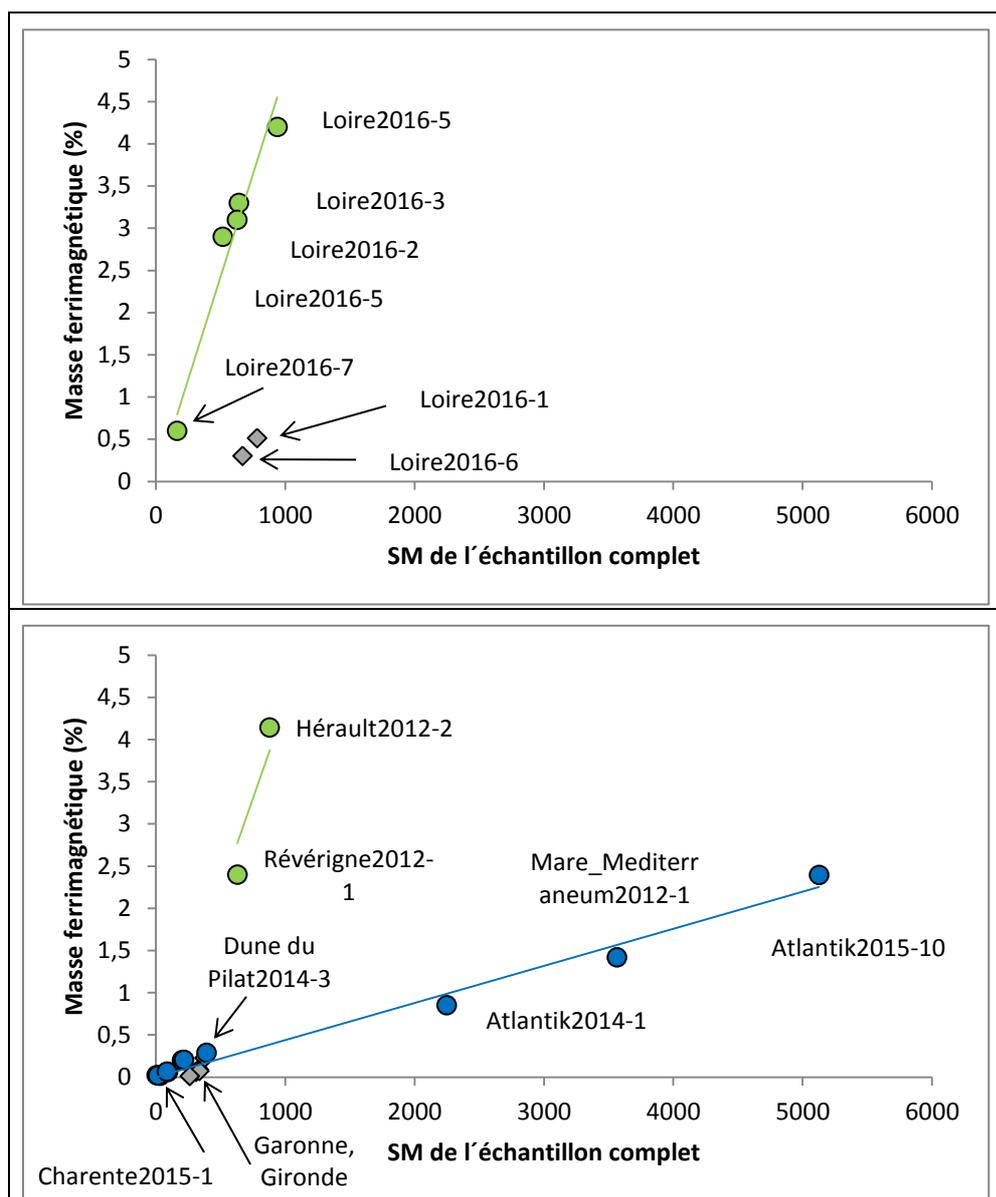


Fig. 5.10-15: Corrélation entre la SM de l'échantillon original resp. complet vers la masse de la fraction ferrimagnétique, en haut pour les sédiments de la Loire, en bas pour les autres sédiments; des cercles représentent des sables et des losanges des pélites; les échantillons avec vulcanites porphyriques sont symbolisés par cercles verts. Les lignes de trend sont forcées par l'origine du repère; les échantillons de l'Atlantique étiquetés contiennent du fer métallique.

Tab. 5.10-4: SM de la fraction ferrimagnétique des sables sélectionnés.

Milieu sédimentaire et régional	SM [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] fraction ferrimag.	SM [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] fraction para- et diamagn.	Commentaire
Loire, N=3	17700	57	contient du basalte
Escamat, N=1	48000	-3	dunes
Aven, N=1	106000	18	contient du granite
Dune du Pilat, N=1	116000	27	magnétite
Atlantik, N=2	203000	90	magnétite et fer

Si on regarde la SM de la fraction ferrimagnétique, voir **tab. 5.10-4**, les valeurs restent sous la SM de magnetite, 500 000, et celle de fer, 200 000 000 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] selon (THOMPSON & OLDFIELD 1986); (MAHER 1988): SM de magnétite de 20-50 μm est çà. 700 000 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$], grains plus grands ont une SM moins haute. (ORLICKÝ 2010) a observé que la SM de magnétite-titanomagnétite diminue avec augmentation de Ti. La présence d'une fraction insoluble après la désintégration des échantillons Dune du Pilat2014-3 et Mare Mediterraneeum2012-1 indique que dans ces cas une partie importante de titane est présente. Combiné avec les données citées, la présence de grands grains de titano-magnétite dans les sables analysés pourrait donner une explication des valeurs de SM.

Pour évaluer si la SM dépend du teneur en minéraux sombres, typiquement une partie significative des minéraux lourds, comme pyroxène, hornblende, biotite, **fig. 5.10-16** montre un 'plot' de SM des sédiments de la Loire vers la réflexion, estimé avec (ANONYMOUS 1991). On voit que la SM augmente pour les sédiments plus sombres, même en considération que les valeurs de réflexion sont seulement estimés. Pour la totalité des échantillons de la France cette corrélation n'est pas significative, à cause de variations de minéralogie pour différentes roches mères. L'influence de la SM de la fraction ferrimagnétique, seulement quelques pourcents de masse, sur la réflexion des sédiments entières est certainement renforcé par la fraction de minéraux lourds sombre paramagnétiques, comme pyroxène et amphibole.

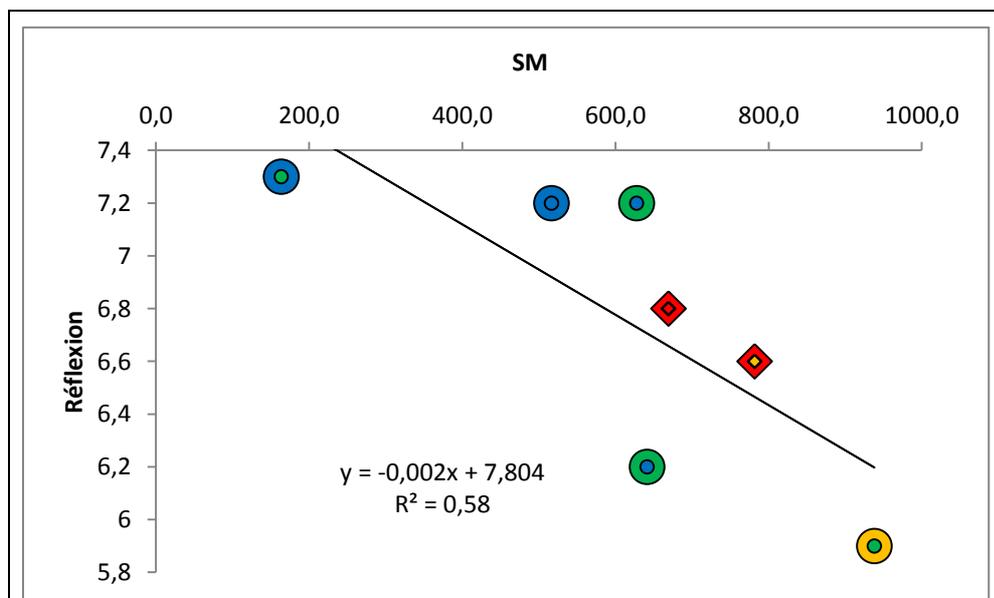


Fig. 5.10-16: Corrélation pour les sédiments de la Loire entre la SM [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$] de l'échantillon entier vers la réflexion. Des valeurs de réflexion diminuantes indiquent une couleur plus sombre. Les cercles caractérisent des sables et les losanges des siltes/argiles, les derniers peuvent être estimés trop clair à cause de la précipitation de sel. La coloration des petits symboles montre la SM de la fraction ferrimagnétique: bleu = 17000-20000, vert = 23000-25000, orange = 40000, rouge = 82000 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$], celle des grands symbols montre la SM de la fraction dia- et paramagnétique: bleu = 10-40, vert = >40-60, orange = 60-100, rouge = >100 [$10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}$].

Pour évaluer si la composition chimique peut être estimée avec la SM, de quatre échantillons argileux, Garonne2014-1, Gironde2014-2, Loire2016-1 et -6, une analyse géochimique de la fraction entière était exécuté après désintégration totale avec HNO_3 , HF et HClO_4 et mesurement avec ICP-OES, 'inductively-coupled plasma with optical emission spectrometry', et ICP-MS, 'ICP with mass-spectrometry'. Les corrélations positives de SM avec Fe ou Ti, éléments essentiels dans magnétite, titano-magnétite, hématite, ilmenite, ne sont pas significantes. La plus grande corrélation positive avec des

éléments analysés résultait pour – en ordre de r^2 diminuant – Cs, U, P, Sn, As, voir **fig. 5.10-17** pour les deux premiers. Le seul minéral fréquent dans des roches qui peut contenir tous ces éléments, incorporés ou adsorbés, est l'apatite, voir par exemple (VOS & TARVAINEN 2005) et (RIGALI, et al. 2016). C'est un minéral typique pour des roches magmatiques, comme basaltes, granites et rhyolites (WEBSTER & PICCOLI 2015). Cs est un élément incompatible dans la solidification de magma qui se trouve préférentiellement dans des granites et pegmatites, voir (VOS & TARVAINEN 2005). Car des granites couvrent grandes surfaces dans le Massif Central, ces roches sont la probable source des apatites dans la Loire et la Garonne/Gironde. On ne peut pas extraire l'apatite avec un aimant et dans la fraction dia- et paramagnétique il est difficile à observer car il est incolore et l'arrondissement détruit ses plaines hexagonales de cristal. La densité d'apatite est 3.16-3.22 g/ccm et celle de magnétite 5.15-5.2 g/ccm, selon par exemple <http://webmineral.com>. Ainsi les deux minéraux peuvent être transportés ensemble avec d'autres minéraux lourds.

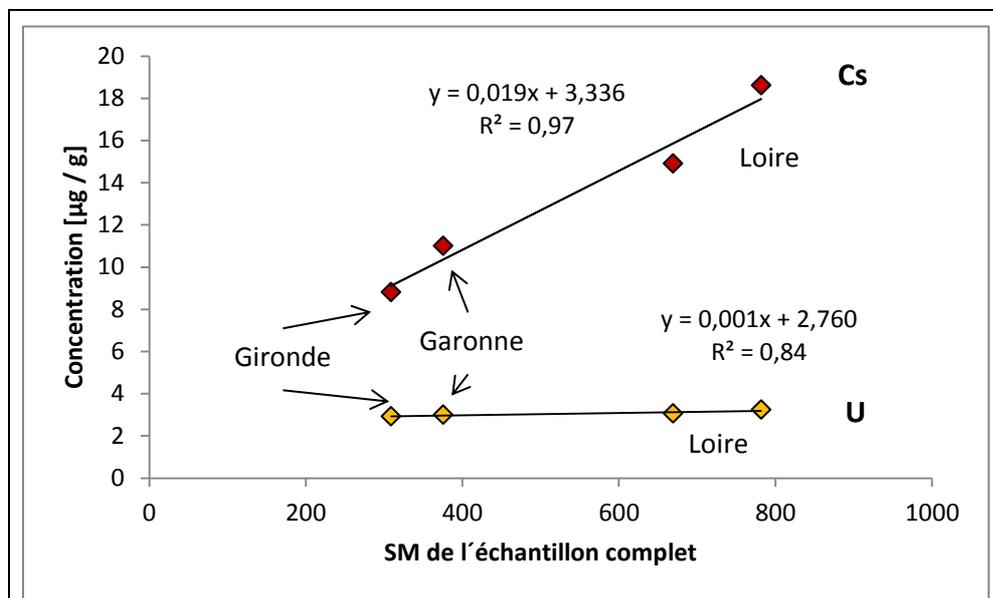


Fig. 5.10-17: Corrélation de SM des sédiments estuariens pélicitiques [$10^{-9} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$] vers la concentration de Cs, symboles rouges, et U, symboles jaunes. Mesurage avec DAS Picotracer 'digestion system', ICP-MS de ThermoFisher Scientific, X-Series II, et ICP-OES Varian 725 ES, par Dirk Merten et Ines Kamp, Laboratoire Hydrogéochimie de la Géologie Appliquée, Institut des Sciences de la Terre, Université de Jéna.

[menu principal](#)

5.10.5. Résumé

À la base des investigations d'échantillons fluviaux et littoraux de la France présentées dans ce rapport, la SM reflète

- le teneur en minéraux lourds sombres comme résultat de transport et de sédimentation,
 - o ce qui est visible par la réflexion, mais seulement en un seul système fluvial;
- la lithologie dans la région hydrologique
 - o par le teneur et la composition de la fraction ferrimagnétique,
 - o par grains individuels de magnétite ou titano-magnétite,

- par des roches riche en magnétite ou titano-magnétite, comme basalte au sens large;
- des changements de matériel en descendant le courant d'une rivière comme la Loire, par
 - changements de la taille des grains de la fraction ferrimagnétique, qui sont similaire aux grains de la fraction non-magnétique,
 - la transformation de grains de sable ferrimagnétique à grains silteux, conséquence de collisions fréquentes inter-particules produit par la dynamique hydrologique;
- des anomalies anthropogènes dans la proximité des ports
 - accompagné de valeurs de SM $>2000 [10^{-9} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}]$,
 - comme on peut le démontrer par la présence de clastes de fer métallique.

Un complètement d'échantillons et de régions en France est prévu.

[menu principal](#)

5.10.6. Commentaire

Ce rapport technique était réalisé avec l'assistance de (FOUCAULT & RAOULT 1988), <http://dict.leo.org/frde/>, et de (WEIS 1991). L'auteur prit d'excuser des fautes de grammaire et d'expression. Des propositions pour améliorer l'article sont bien félicitées!

Dr. Dirk Merten et l'équipe du laboratoire hydrogéochemie, Géologie Appliquée, et Dr. Ralph Bolanz, Minéralogie Générale et Appliquée, Université de Jéna, ont fait possible les analyses géochimiques et de XRD, merci beaucoup!

Dr. Rainer Petschick, Johann-Wolfgang Goethe Universität, Frankfurt, a créé la 'software' MacDiff, que nous considérons comme un bon instrument d'interprétation pour les analyses des XRD.

Nous sommes obligés aux propriétaires des chambres d'hôtes visitées pour leur grande hospitalité, les plats délicieux, et les discussions intéressantes.

[menu principal](#)

5.10.7. Littérature

ALCAYDÉ, G., CADET, J.-P., GIGOUT, M., LORENZ, J., BROSSÉ, R., DEBRAND-PASSARD, S., LORENZ, C., RAMPNOUX, J.-P. & RASPLUS, L. (1976): Val de Loire - Anjou, Touraine, Orléanais, Berry. - 1. Ed.; 192 pp.; Paris, Milan, Barcelone, Mexico (Masson).

ANONYMOUS (1991): Rock color chart with genuine Munsell color chips. 1. Ed. - Geological Society of America;

ANONYMUS (1980b): Carte géologique de la France et de la marge continentale à l'échelle de 1/1 500 000, Notice explicative. 1. Ed. - Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM); Orléans.

ANONYMUS (2009): Chaîne des Puys. - 1. Ed.; 128 pp.; Clermont-Ferrand (Chamina).

- ANONYMUS (2003): Le volcanisme en Auvergne: Cantal, Haute-Loire, Puy-de-Dôme. - 1. Ed.; 144 pp.; Clermont-Ferrand (Chamina).
- BETHKE, C. (1996): Geochemical reaction modeling. - Ed.; 397 pp.; Oxford, UK (Oxford University Press).
- BRIL, H. (1988): Découverte géologique du Massif central - Du Velay au Quercy. - 1. Ed.; 72 pp.; Orléans (Éditions BRGM).
- BROUSSE, R. & LEFEVRE, C. (1990): Le volcanisme en France et en Europe limitrophe. - 1. Ed.; 263 pp.; Paris, Milan, Barcelone, Mexico (Masson).
- CASTANET, C. (2008): La Loire en Val d'Orléans. Dynamiques fluviales et socio-environnementales durant les derniers 30000 ans: de l'hydrosystème à l'anthroposystème. - 545 S.; Thèse PhD, Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- CASTANET, C., GARCIN, M., BURNOUF, J. & CARCAUD, N. (2003): Le val d'Orléans : dynamique fluviale tardiglaciaire et holocène, interactions entre les facteurs géodynamiques et anthropiques Vol. 1. - Ed.; 68+68 pp.; Orléans (BRGM).
- DE GOËR, A., BOIVIN, P., CAMUS, G., GOURGAUD, A., KIEFFER, G., MERGOIL, J. & VINCENT, P.-M. (1991): Volcanologie de la Chaîne des Puys. - 1. Ed.; 127 pp.; Clermont-Ferrand (Parc Naturel Régional des Volcans d'Auvergne).
- DE GOËR DE HERVE, A. (1997): Volcans d'Auvergne - la menace d'une éruption? - 1. Ed.; 64 pp.; Rennes (Éditions Ouest France).
- DEARING, J.A., DANN, R.J.L., HAY, K., LEES, J.A., LOVELAND, P.J., MAHER, B.A. & O'GRADY, K. (1996): Frequency-dependant susceptibility measurements of environmental materials. – Geophys. J. Intern., 124: 228-240.
- DOBENECK, T.V., PETERSEN, N. & VALI, H. (1987): Bakterielle Mikrofossilien - palaeomagnetische und palaeontologische Spuren einer ungewöhnlichen Bakteriengruppe. – Geowiss. uns. Zeit, 5: 27-35.
- EVANS, M.E. & HELLER, F. (2003): Environmental magnetism - principles and applications of enviromagnetics. - 1. Ed.; 299 pp.; Amsterdam, Boston etc. (Academic Press).
- FAURE, M., LARDEAUX, J.-M. & LEDRU, P. (2009): A review of the pre-Permian geology of the Variscan French Massif Central. – C. R. Geoscience, 341: 202-213.
- FOUCAULT, A. & RAOULT, J.-F. (1988): Dictionnaire de géologie. - 3. Ed.; 352 pp.; Paris, Milan, Barcelone, Mexico (Masson).
- GROSBOIS, C., BREHERET, J.-B., MOATAR, F. & NÉGREL, P. (2010): La Loire, usine à carbonates. – Géosciences 2010: 54-59.
- HUNT, C.P., MOSKOVITZ, B.M. & BANERJEE, S.K. (1995): Magnetic properties of rocks and minerals. - In: AHRENS, T.J. (Hrsg.): Rock physics & phase relations: a handbook of physical constants. pp. 189-204; 1. Ed.; Washington, D.C. (American Geophysical Union).

- MACAIRE, J.-J., GAY-OVEJERO, I., BACCHI, M., COCIRTA, C., PATRYL, L. & RODRIGUES, S. (2013): Petrography of alluvial sands as a past and present environmental indicator: Case of the Loire River (France). – *Intern. J. Sediment Res.*, 28: 285-303.
- MAHER, B. (1988): Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. – *Geophysical J.*, 94: 83-96.
- MERGOIL, J., BOIVIN, P., BLÈS, J.-L., CANTAGREL, J.-M. & TURLAND, M. (1993): Le Velay - son volcanisme et les formations associées. Notice explicative de la carte à 1/100 000. – *Géologie France*, 3: 3-96.
- MORIN, E., RODIER, X., LAURENT-DEHECQ, A. & MACAIRE, J.-J. (2014): Morphological and sedimentary evolution of an alluvial floodplain in an urban area: geoarchaeological approaches and applications (Tours, France). – *J. Archaeol. Sci.*, 46: 255-269.
- MOYEN, J.F. (2005): Les grands traits de l'histoire géologique de la France (métropolitaine). - 3.1. Ed.; 84 pp.;
- NEHLIG, P. (2010): Géologie du bassin de la Loire. – *Géosciences 2010*: 10-23.
- ORLICKÝ, O. (2010): Magnetism and magnetic properties of Ti-rich titanomagnetite and its tendency for alteration in favour of titanomaghemite. – *Contrib. Geophys. Geodesy*, 40: 65-86.
- PETERLONGO, J.M. & DE GOËR DE HERVE, A. (1978): Massif Central - Limousin, Auvergne, Velay. - 2. Ed.; 224 pp.; Paris, Milan, Barcelone, Mexico (Masson).
- RIGALI, M.J., BRADY, P.V. & MOOR, R.C. (2016): Radionuclide removal by apatite. – *American Min.*, 101: 2611–2619.
- RUSSELL, M.J. & HALL, A.J. (2006): The onset and early evolution of life. – *Geol. Soc. America Mem.*, 198: 1-32.
- THOMPSON, R. & OLDFIELD, F. (1986): Environmental magnetism. - 1. Ed.; 227 pp.; London (Allen & Unwin).
- TREMBLAY, D. (2010): Le Val de Loire inscrit au patrimoine mondial de l'Unesco. – *Géosciences 2010*: 124-125.
- TRÖGER, W.E., BAMBAUER, H.U., TABORSZKY, F. & TROCHIM, H.D. (1982): Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale, Teil 1 Bestimmungstabellen. - 5. Ed.; 188 pp.; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- VELDKAMP, A. & KROONENBERG, S.B. (1993): Application of bulk sand geochemistry in mineral exploration and Quaternary research: a methodological study of the Allier and Dore terrace sands, Limagne rift valley, France. – *Appl. Geochem.*, 8: 177-187.
- VOS, W.D. & TARVAINEN, T. (2005): Geochemical Atlas of Europe - Part 2: Interpretation of geochemical maps, additional tables, figures, maps and related publications. - 1. Ed.; 429 pp.; Helsinki (Association of the Geological Surveys of The European Union (EuroGeoSurveys)/ the Geological Survey of Finland).

WEBSTER, J.D. & PICCOLI, P.M. (2015): Magmatic apatite: a powerful, yet deceptive, mineral –Elements, 11: 177-182.

WEIS, E. (1991): PONS Französisch-Deutsch Kompaktwörterbuch. - 2. Ed.; 1253 pp.; Stuttgart, Dresden (Ernst Klett Verlag für Wissen und Bildung).

ZIEGLER, P.A. (1990b): Geological atlas of western and central Europe, Enclosures. - 2. Ed.; 56 pp.; Den Haag (Shell Koninklijke Nederlandsche Petroleum Maatschappij).