Le traçage de sources sédimentaires anthropiques et naturelles : proxies magnétiques et isotopiques

Illustration : WWF

Illustration : Parc National des Ecrins

Jean Nizou

LE MAGNETISME DES SEDIMENTS, UNE METHODE NOVATRICE DE TRACAGE DES REJETS DE DRAGAGE EN MER*

Jean NIZOU, François DEMORY et Carole Brunaud

*Nizou, J., F. Demory, C. Dubrulle-Brunaud (2015). Monitoring dredge-spoil dispersal off the Bay of Seine (N France) using environmental magnetism. CR Géoscience.

Enjeux scientifiques & environnementaux

Implication

Clapage : méthode de **gestion des sédiments de dragage** qui consiste à déverser les sédiments dans une zone d'immersion spécifique

Illustration : http://www.comitedespeches-finistere.fr/?Manifestation-anti-clapage-a

Implications majeures en termes de **gestion de l'environnement :**

e.g. comblement estuaire, envasement des plages, devenir des contaminants

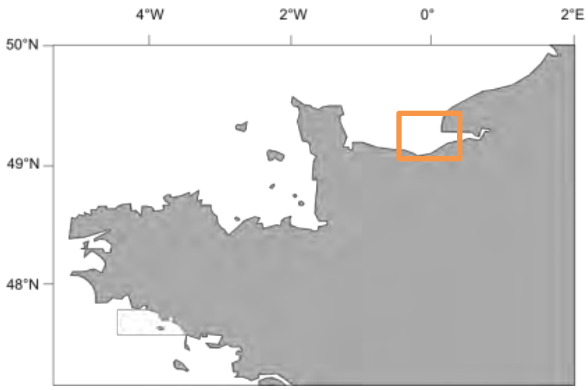
Objectif scientifique

Proposer une nouvelle méthode **d'évaluation de l'impact sédimentaire d'un clapage : traçage par les propriétés magnétiques des sédiments**

Cadre de l'étude d'impact sédimentaire

Contexte

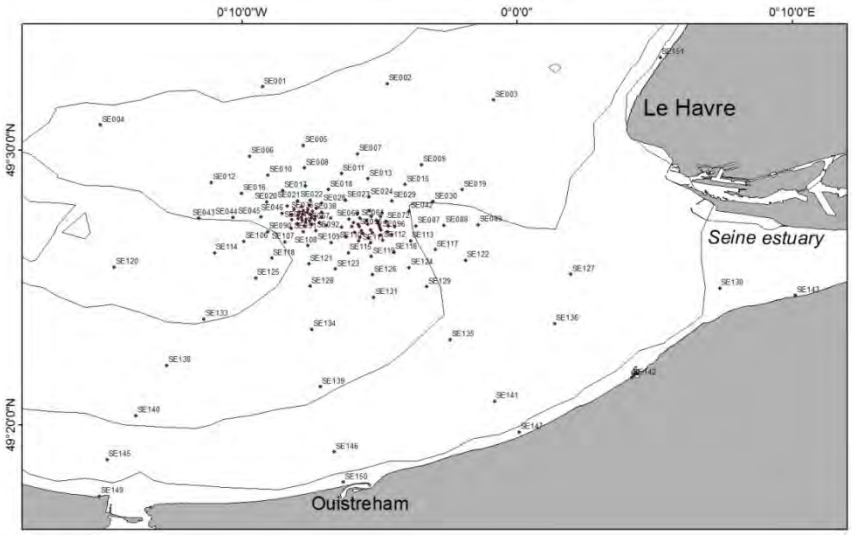
Clapage expérimental de 2 10^6 m^3 de sédiments dragués au titre de **l'entretien du chenal de navigation** du port de Rouen



Stratégie d'échantillonnage

•Caractérisation magnétique des sédiments du **chenal** (10) et de la **Baie de Seine** (142 par campagne; benne Shipek):

- **état de référence** avant clapage
- **suivi** immédiatement
- 3 mois
- 6 mois après clapage



I. La susceptibilité magnétique traceur de la dispersion des sédiments de clapage

Matériel

10 échantillons du chenal

~142 échantillons par campagne

Méthode

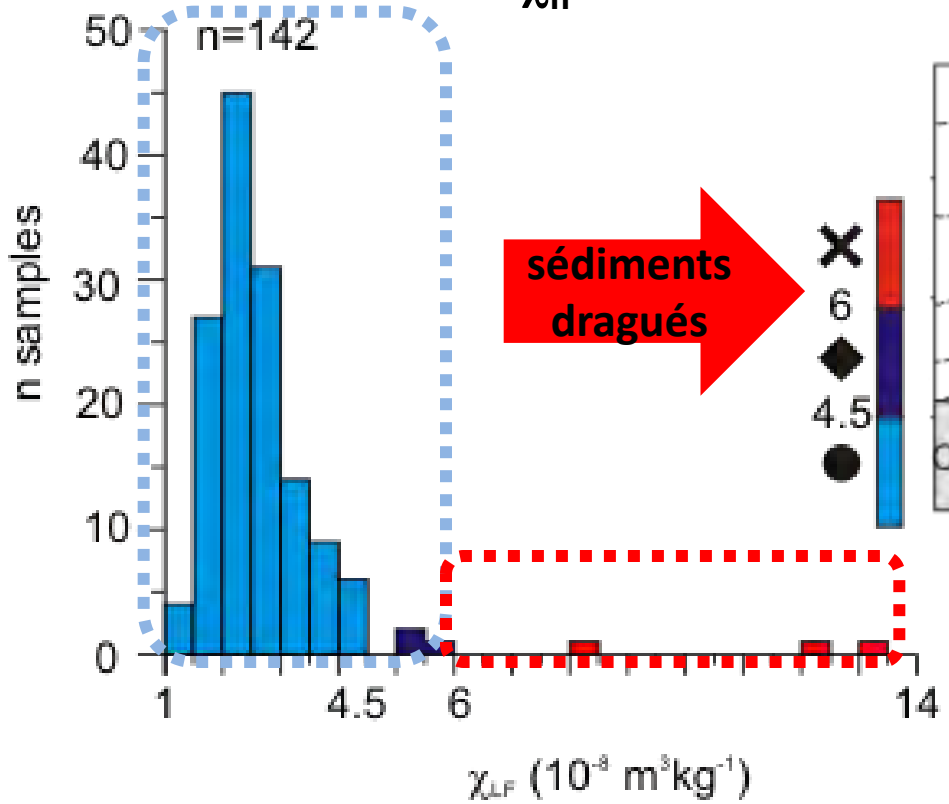
Susceptibilimètre MFK1 (AGICO)

Susceptibilité de faible champ K_{lf} (10^{-8} SI)

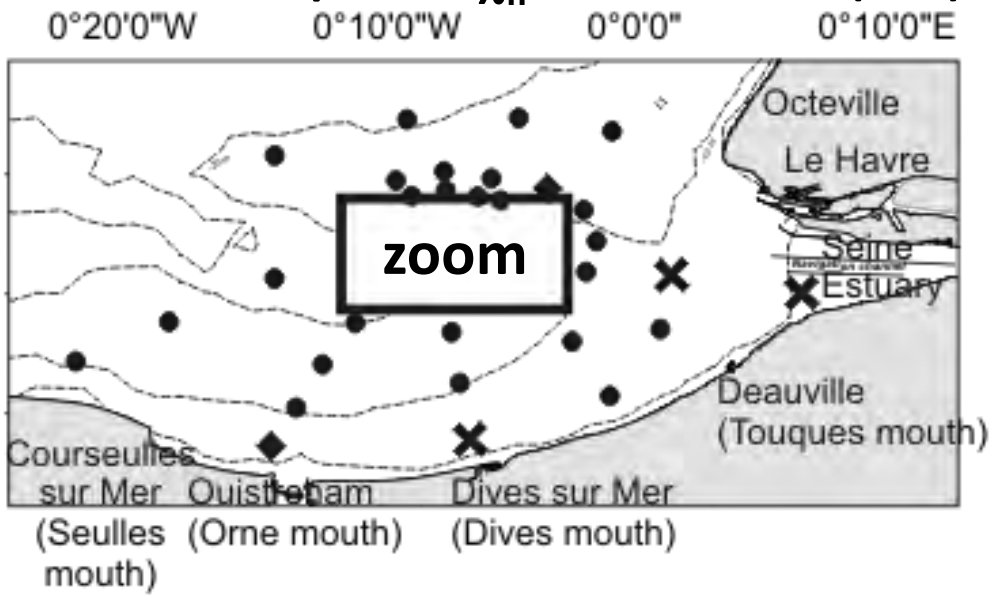
Susceptibilité spécifique de faible champ χ_{lf} (10^{-8} m^3kg^{-1})

Etat de référence avant clapage

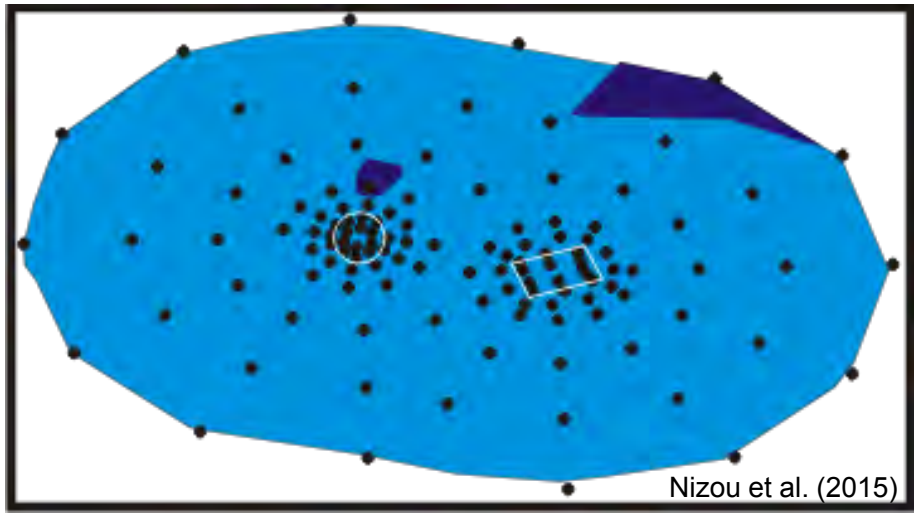
Distribution&évolution χ_{lf} en Baie de Seine



Evolution spatiale χ_{lf} Baie de Seine (BdS)



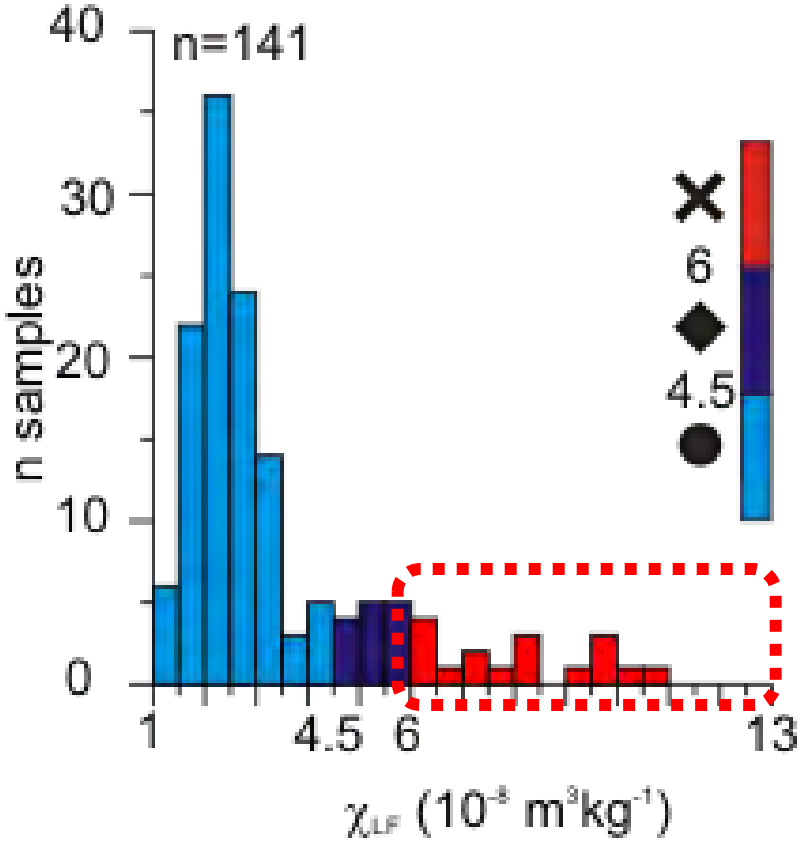
Evolution spatiale χ_{lf} sur sites de clapage



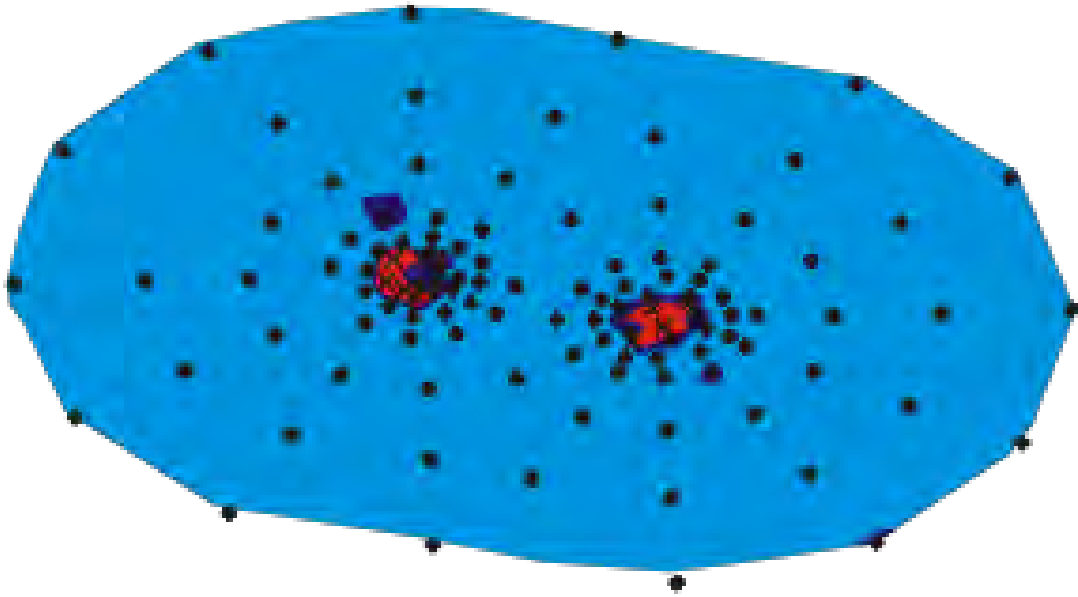
- <6 10^{-8} m^3kg^{-1} : Baie de Seine
- >6 10^{-8} m^3kg^{-1} : estuaires
- 6 10^{-8} m^3kg^{-1} : sédiments dragués

Immédiatement après clapage

Distribution&évolution χ_{lf} en BdS



Evolution spatiale χ_{lf} sites de clapage

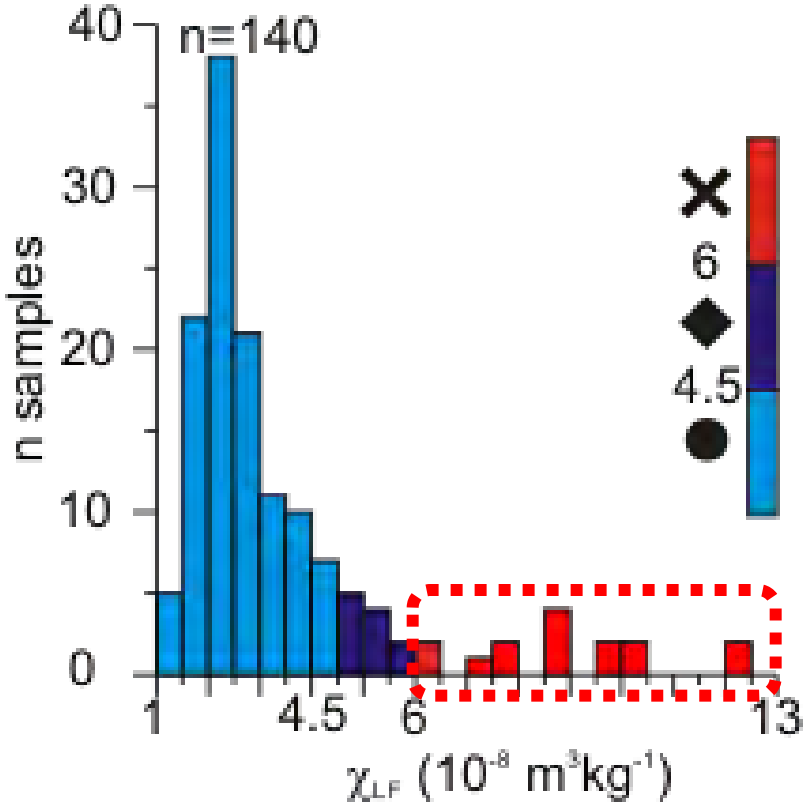


Nizou et al. (2015)

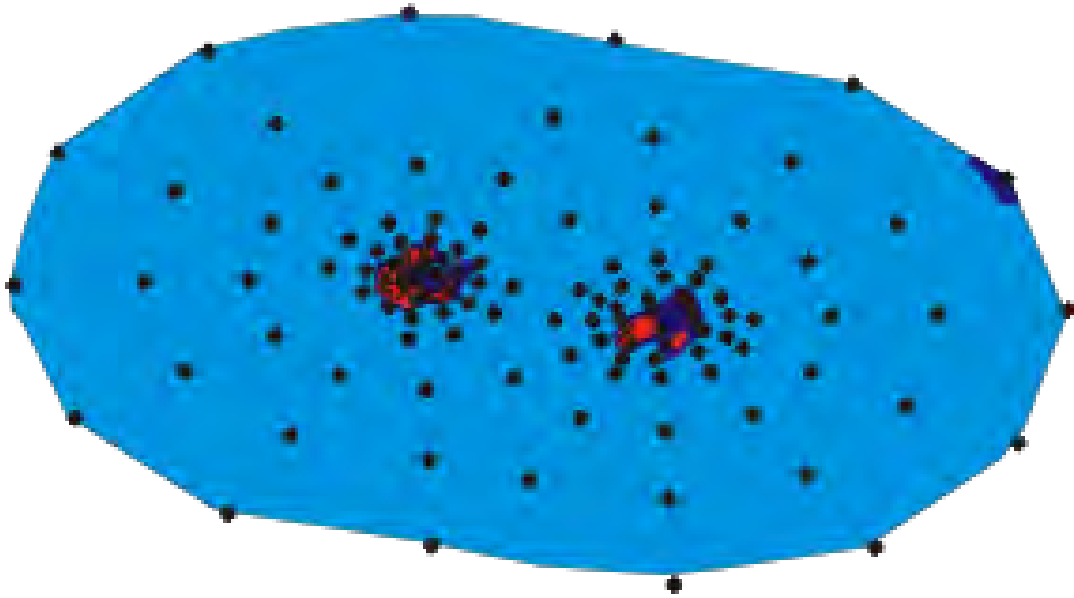
- **Apport de matériel susceptible en BdS**
- **Zones de dépôt >6 10^{-8} m^3kg^{-1}**
- **Traceur valide**

3 mois après clapage

Distribution&évolution χ_{lf} en BdS



Evolution spatiale χ_{lf} sites de clapage

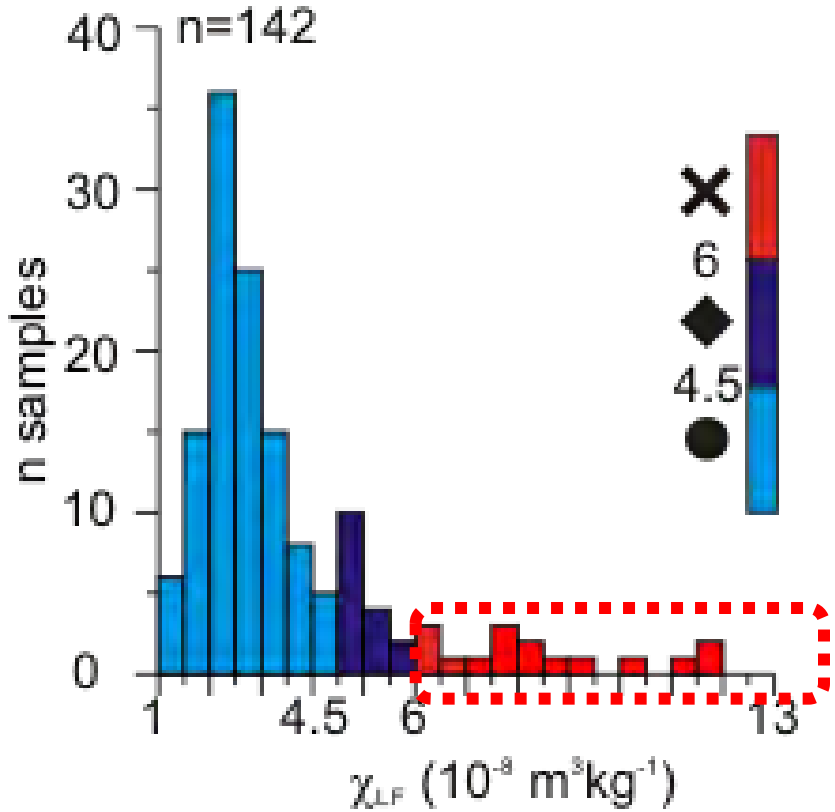


Nizou et al. (2015)

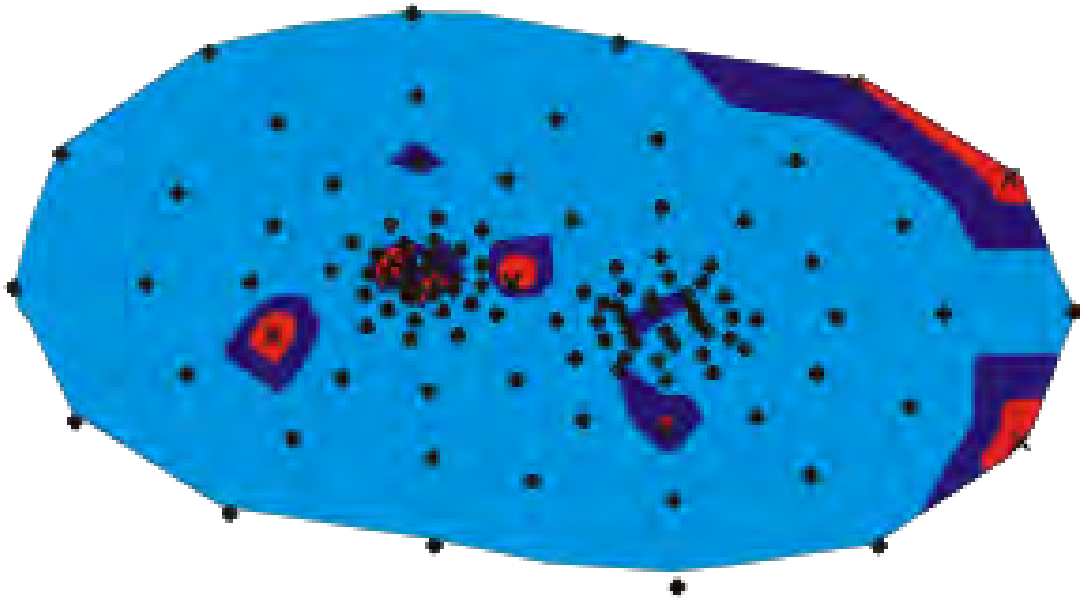
- Faible remobilisation des sédiments clapés
- Dilution du signal

6 mois après clapage

Distribution&évolution χ_{lf} en BdS



Evolution spatiale χ_{lf} sites de clapage



Nizou et al. (2015)

- Apport de matériel susceptible d'origine continentale
- Dispersion des sédiments site Est
- Différences entre les sites liées au mode de clapage

II. Nature magnétique des sédiments

Matériel

10 échantillons du chenal

30 à 40 échantillons par campagne

(NB : sites de clapage)

2 échantillons par campagne (paramagn.)

Méthodes

- Estimation de la **fraction diamagnétique**

Calcimètre de Bernard

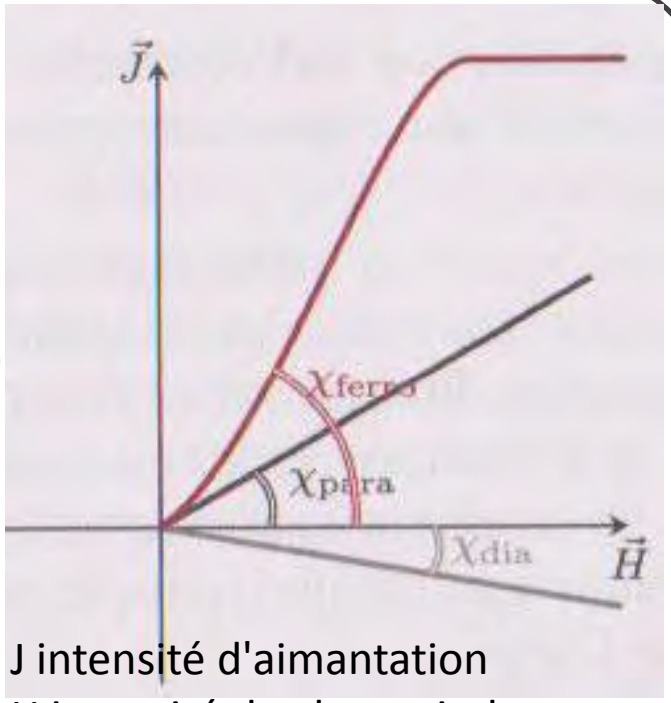
- Estimation de la **fraction ferromagnétique**

Magnétomètre à supraconducteur SRM760R (2G enterprises)

Aimantation Rémanente Isothermale à Saturation (SIRM)

- Estimation de la **fraction paramagnétique**

Vibrating Sample Magnetometer MicroMag 3900 (PMC)



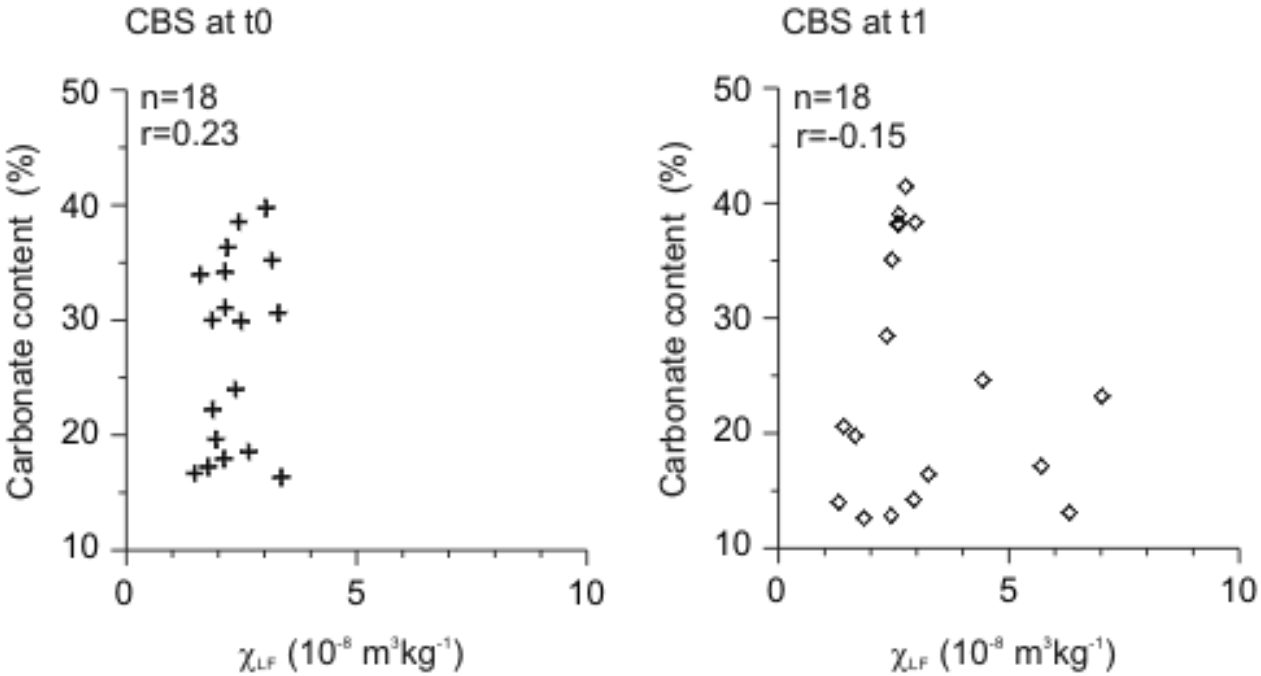
J intensité d'aimantation

H intensité du champ inducteur

Illustration issue du Mini-Manuel de Géophysique ; Langlois (2011)

Nature de l'augmentation de susceptibilité

a- Fraction diamagnétique (e.g. calcite)



Nizou et al. (2015)

- **Susceptibilité est indépendante du taux de carbonates**
- Augmentation de susceptibilité n'est pas liée à une **chute du taux de matériel diamagnétique (i.e. négatif)**

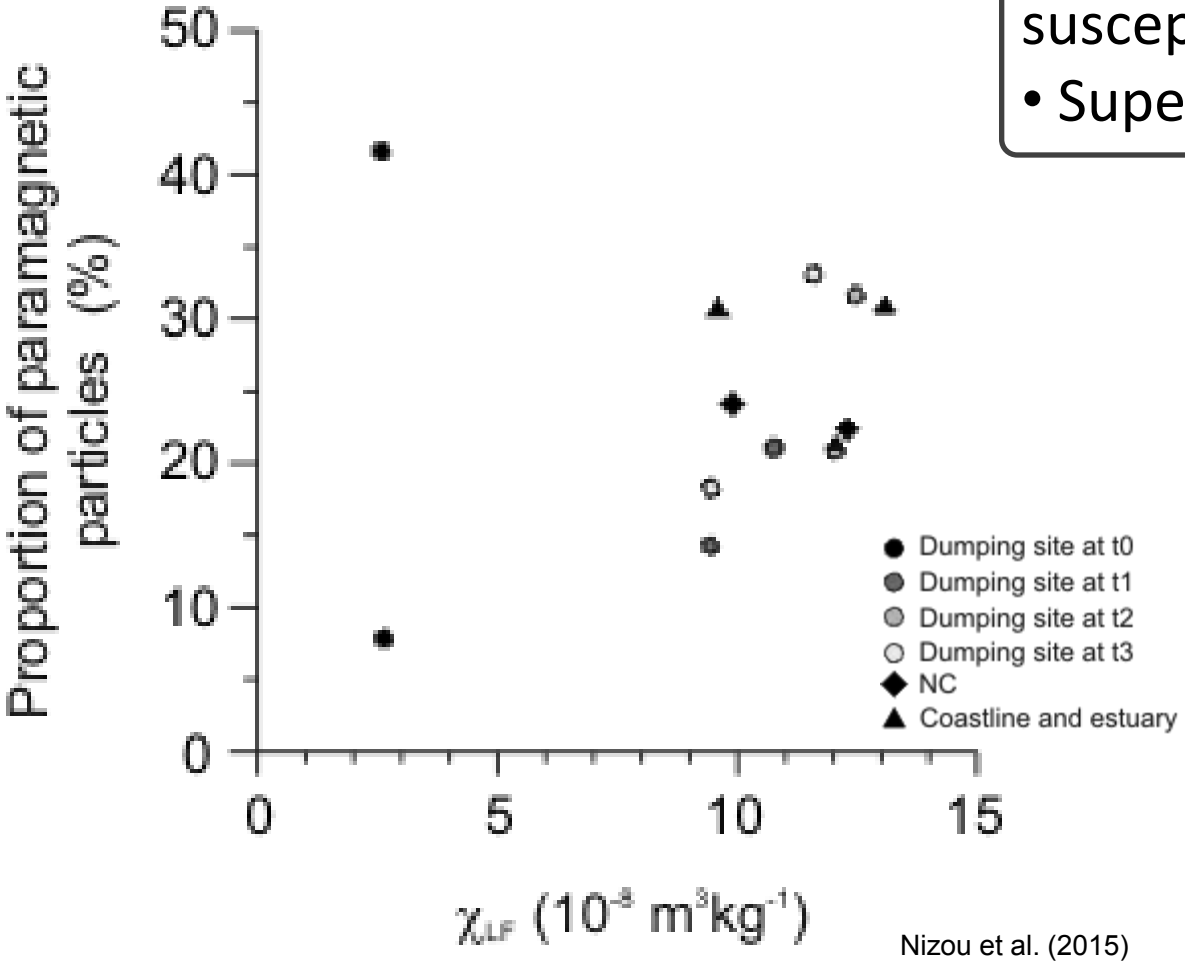
- Ordre de grandeur de correction pour valeurs de calcite pure : $-0.1\ 10^{-8}\ m^3kg^{-1}$

Dunlop and Ozdemir (1997)

Nature de l'augmentation de susceptibilité

b- Fraction paramagnétique (e.g. argiles)

- Contribution para au signal de susceptibilité: 8-42 **%**
- Super-paramagnétisme: 6 %



Nizou et al. (2015)

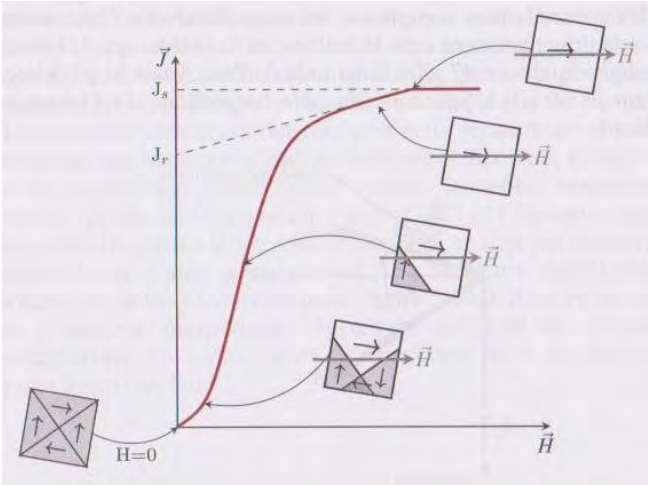
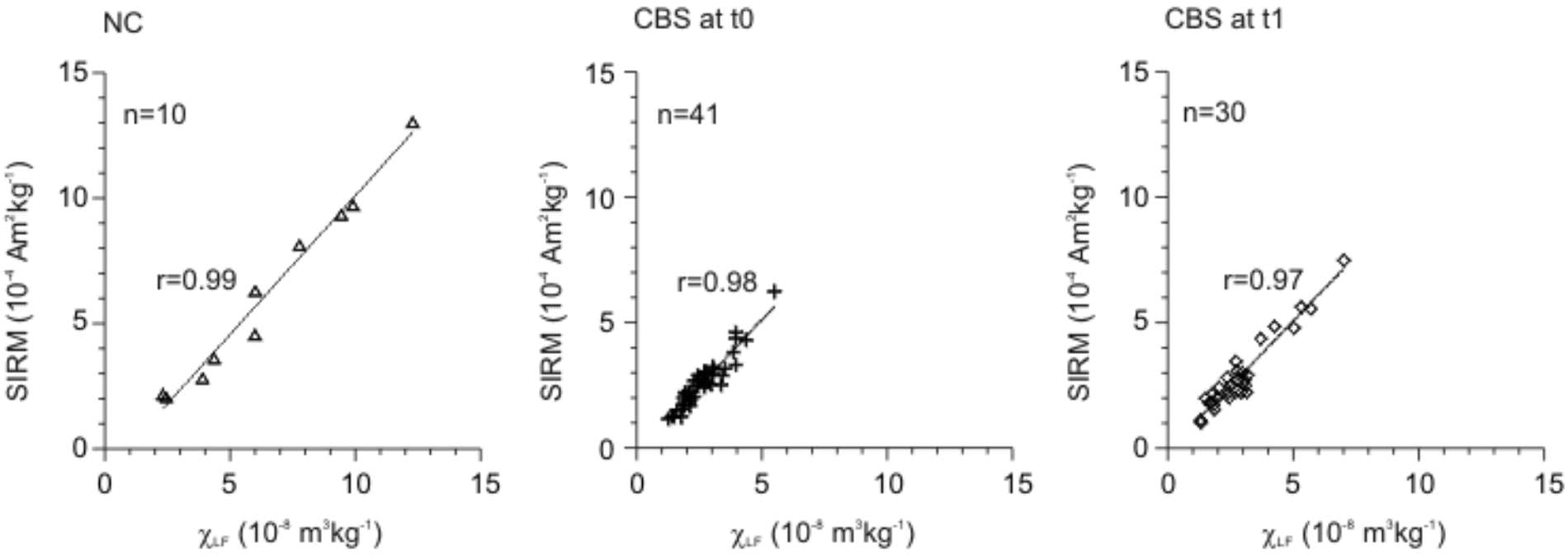


Illustration issue du Mini-Manuel de Géophysique ; Langlois (2011)

- Signal de susceptibilité n'est pas **dominé par la fraction paramagnétique**

Nature de l'augmentation de susceptibilité

c- Fraction ferromagnétique *s.l.* (e.g. magnétite & hématite)



Nizou et al. (2015)

- Forte corrélation entre les **ferromagnétiques *s.l.*** et **la susceptibilité**
- **Apport de matériel plus concentré en ferromagnétiques**

III. Minéralogie magnétique

Matériel

2 échantillons par campagne

Méthodes

Identification des phases porteuses

Four MMTD80 (Magnetic Measurements ltd)

Magnétomètre à supraconducteur SRM760R (2Genterprises) :

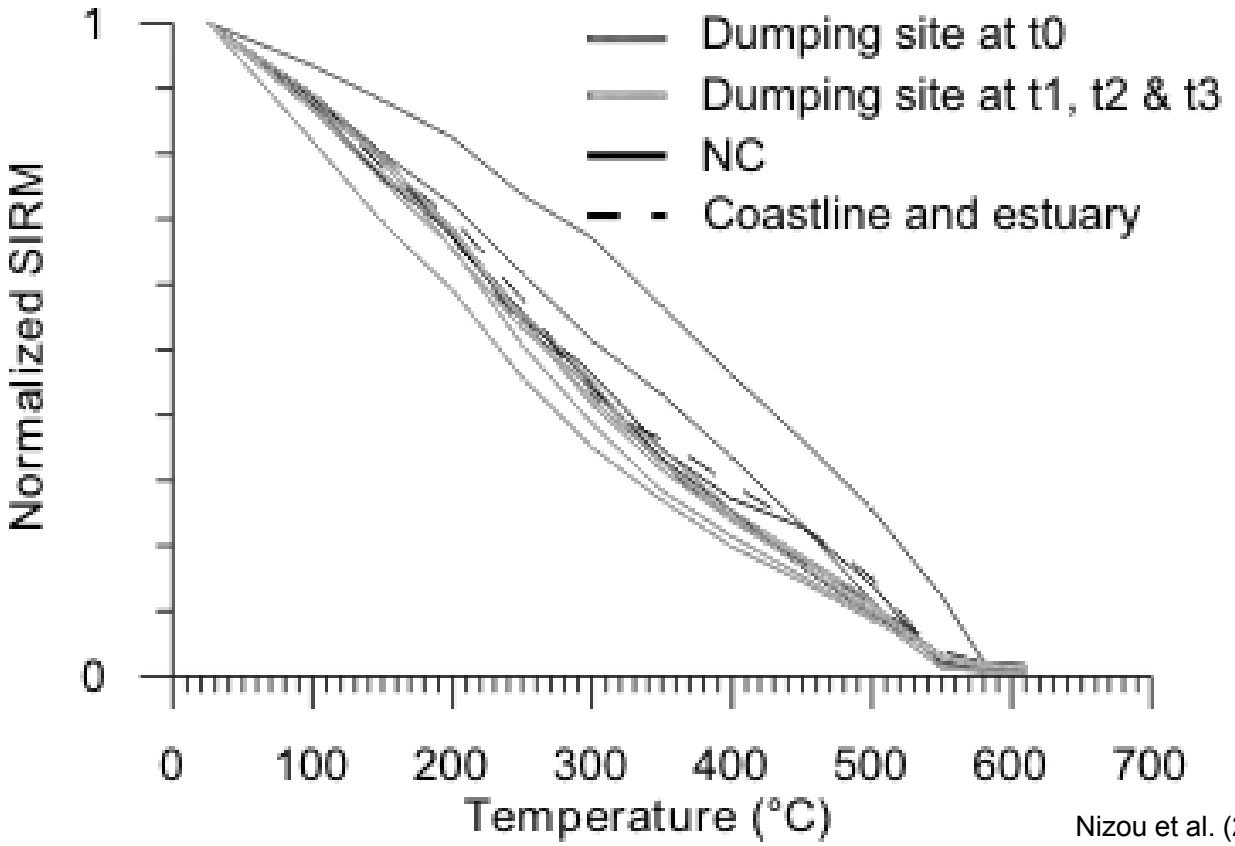
Aimantation Rémanente Isothermale à Saturation (SIRM)

Mineral	Formula	T_c
Magnetite	Fe_3O_4	578°C
Hematite	αFe_2O_3	675°C
Maghemite	γFe_2O_3	645°C
Goethite	$\alpha FeOOH$	120°C
Greigite	Fe_3S_4	350°C

Dekkers (1997)

Minéralogie magnétique

Désaimantation thermale de SIRM

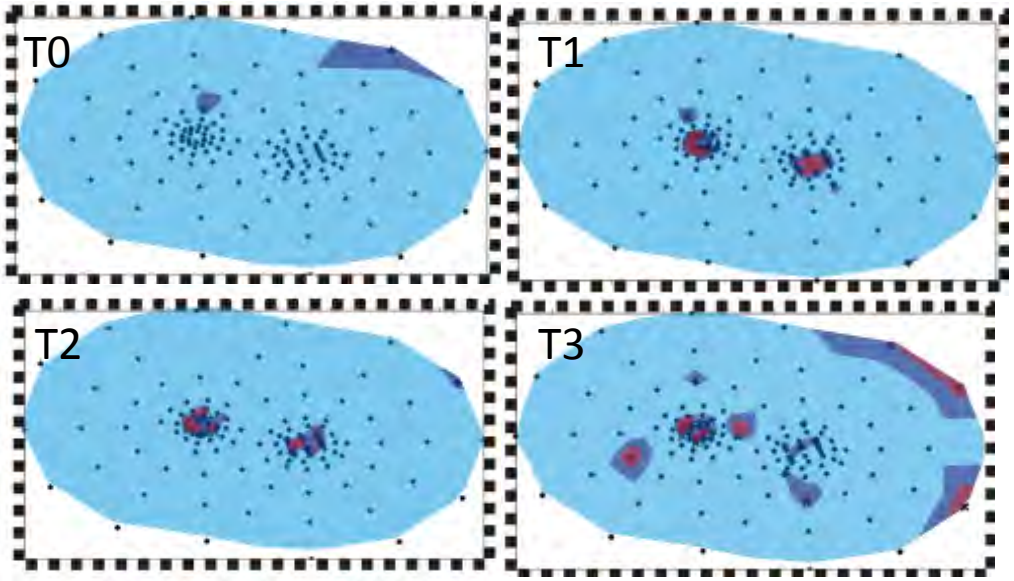


Nizou et al. (2015)

- Minéralogie magnétique **constante** portée par des **magnétites** et **titanomagnétites**

Conclusions

- La susceptibilité est un **traceur valide de la dispersion des sédiments de clapage**



Nizou et al. (2015)

- L'augmentation de susceptibilité est provoquée par **un apport** de matériel concentré en **ferromagnétiques dominés** par des **magnétites et titanomagnétites**

Perspectives

- **Dispersion -> évaluation contamination;**

Augmentation de susceptibilité: **anthropique** vs **naturelle?**

Enregistrement des fluctuations environnementales rapides du dernier cycle glaciaire dans les sédiments marins du forage PRGL1-4 (Golfe du Lion) par les marqueurs isotopiques Nd et Sr

Jean Nizou, Sidonie Révillon , Bernard Dennielou ,
Marina Rabineau , Gwenael Jouet, Serge Berné

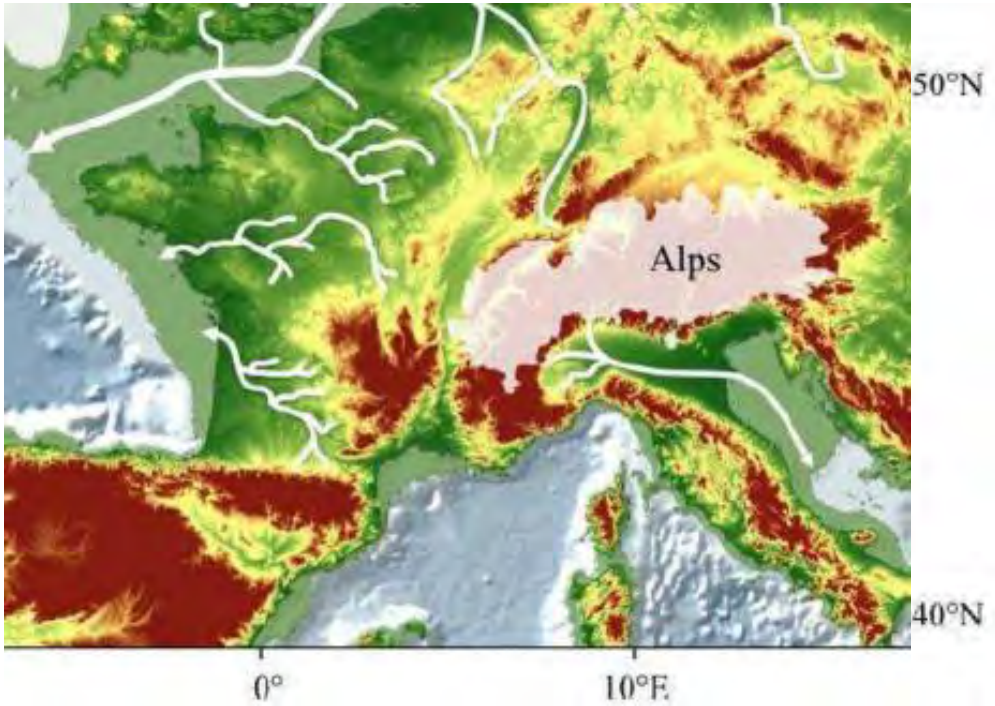
Ifremer

INSTITUT CARNOT Ifremer EDROME

IUEM-OSU DOMAINES OCEANIQUES CNRS-UBO

Thématique : approche source-to-sink pour comprendre les facteurs de contrôle de la variabilité des flux sédimentaires (paramètres de forçage climatique & eustatique)

Problématique : peut-on enregistrer les avances/retraits des glaciers alpins avant le dernier maximum glaciaire?



Elhers et Gibbard (2004)

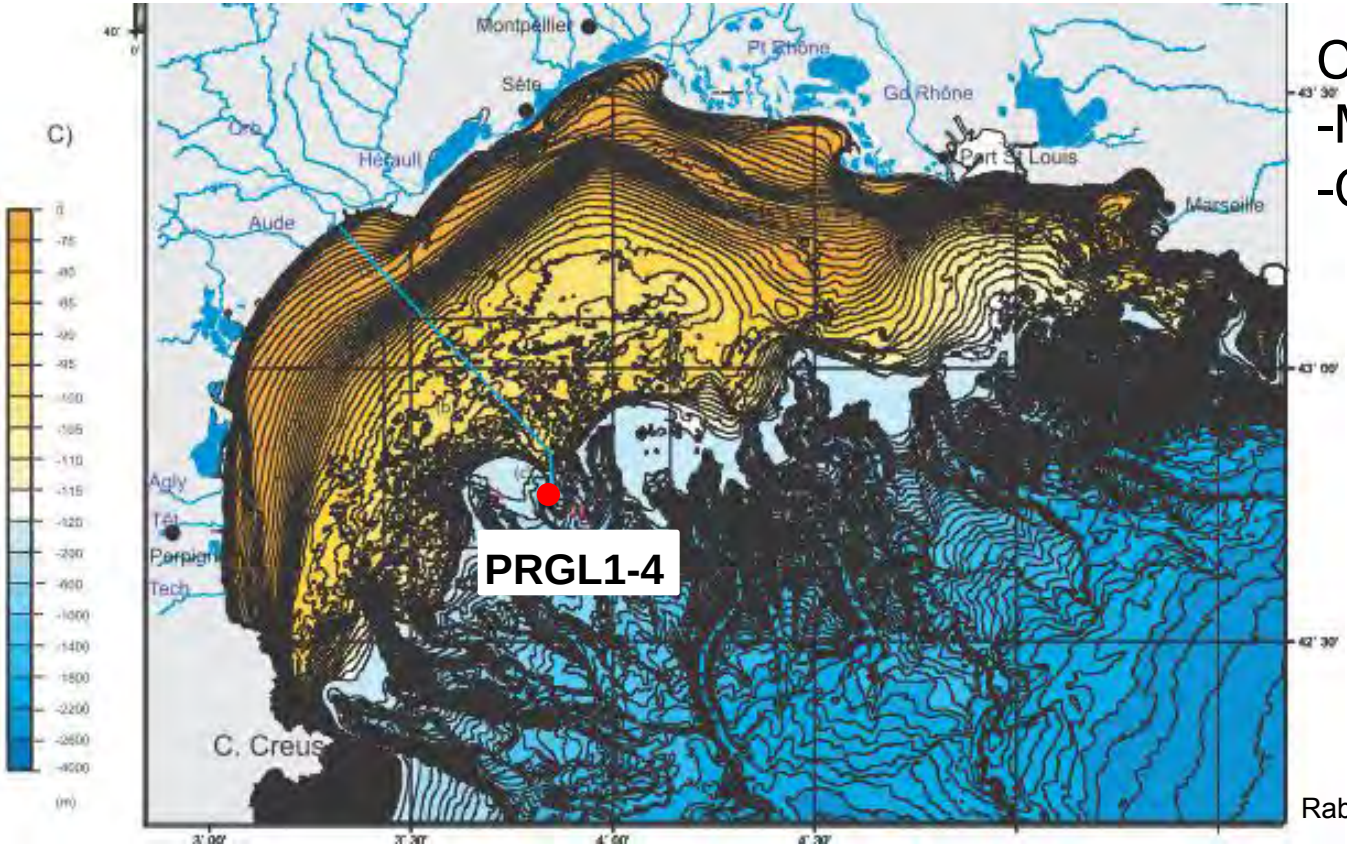
- Archives géomorphologiques
- Archives lacustres

➢ Archives marines (évolution des provenances et des conditions d'érosion/altération durant les évènements climatiques millénaires pré-DMG)

Zone d'étude

• Communément, les études paléoclimatiques se concentrent sur les régions de hautes & basses latitudes où climats extrêmes prévalent

➢ Empreinte sédimentaire des changements climatiques abrupts dans une région au climat tempéré : le Golfe du Lion



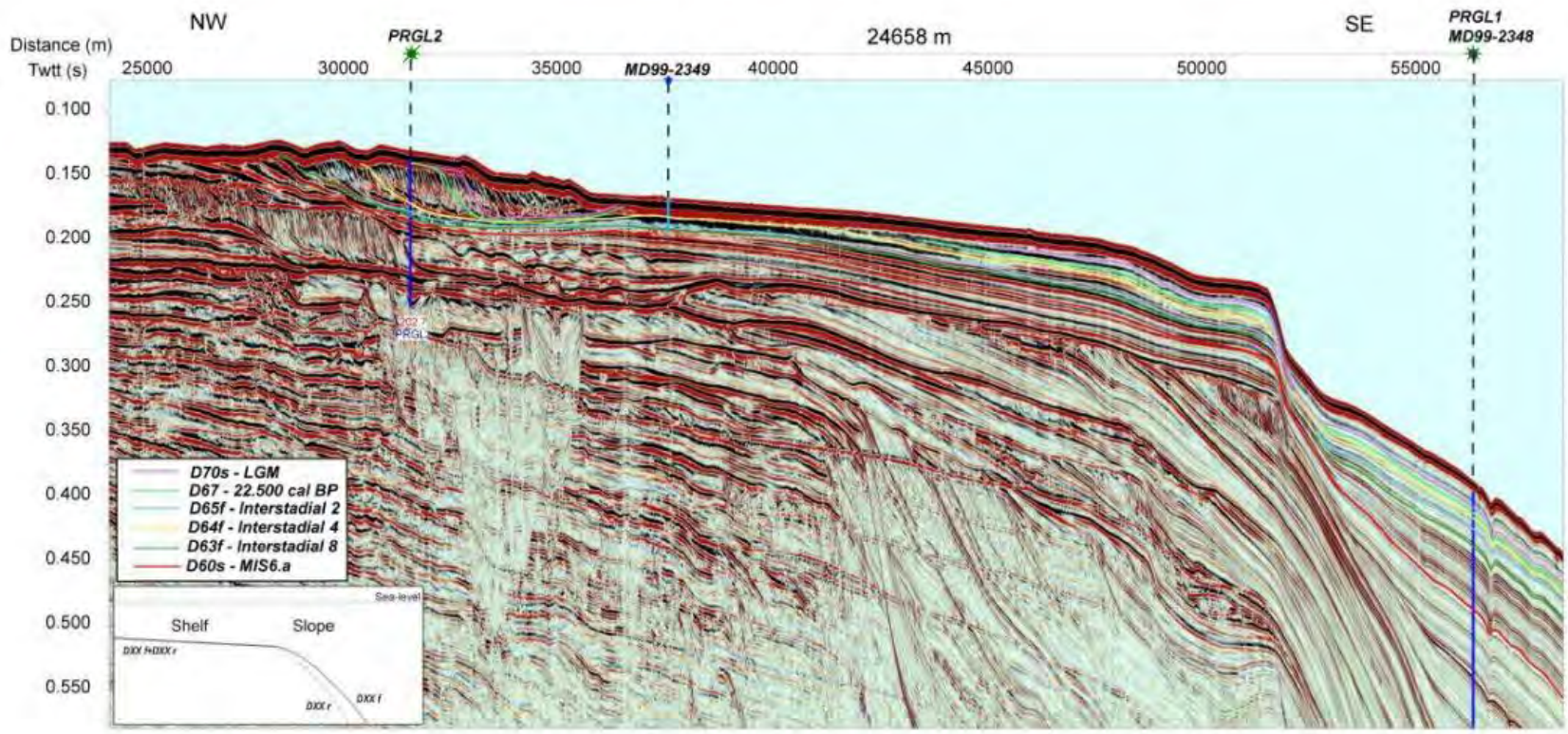
Climat méditerranéen :
-Mousson africaine
-Climats nord-européens

Rabineau et al. (2006)

Matériel

- Forage PRGL1-4 (PROMESS) :
- 300 m de long
- 300 m de profondeur
- haut de pente

➢ Archive sédimentaire continue pour enregistrer évènements climatiques abrupts dans plusieurs bassins versants



Mauffrey et al. (2015)

Méthodes

• Compositions isotopiques Nd & Sr (TIMS Triton; PSO Brest)
- εNd : traceur de provenance des sédiments
- $^{87}Sr/^{86}Sr$: traceur de provenance des sédiments (intensité des phénomènes de lessivage des sols)

Illustration : http://www-iuem.univ-brest.f

Conclusions préliminaires

- **Enregistrement des phénomènes climatiques (εNd)** :

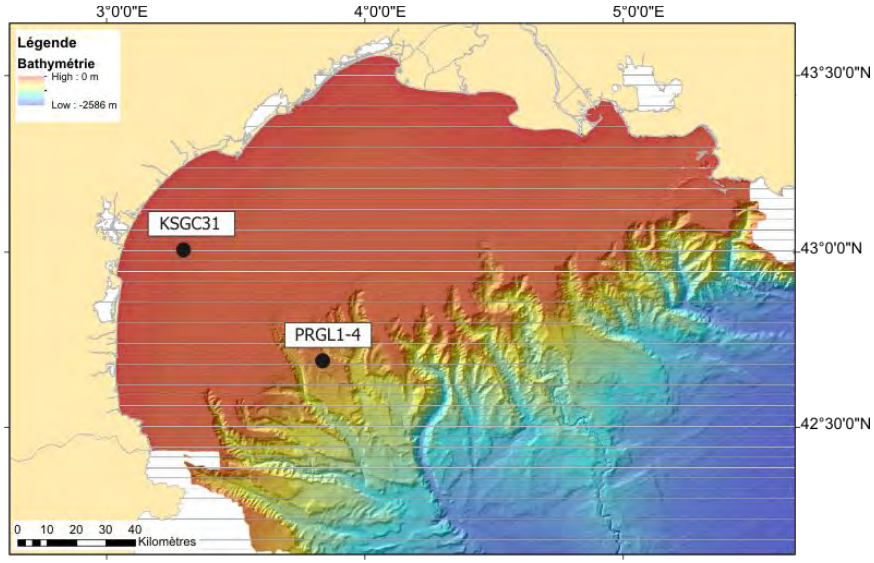
- Evénements froids => les **avances des glaciers alpins** enregistrées par des compositions isotopiques plus éloignées du pôle-source alpin (blocage sédimentaire)
- Evénements chauds => les **retraits des glaciers alpins** sont enregistrés par des compositions isotopiques plus proches du pôle-source alpin (débâcle ; relargage)

- **Enregistrement des variations du niveau marin ($^{87}Sr/^{86}Sr$)** :

- Bas niveau marin => compositions isotopiques plus proches du pôle-source pyrénéen (**déconnexion du Rhône par rapport au site de forage**)
- Haut niveau marin => compositions isotopiques plus proches du pôle-source rhodanien (**connexion du Rhône par rapport au site de forage**)

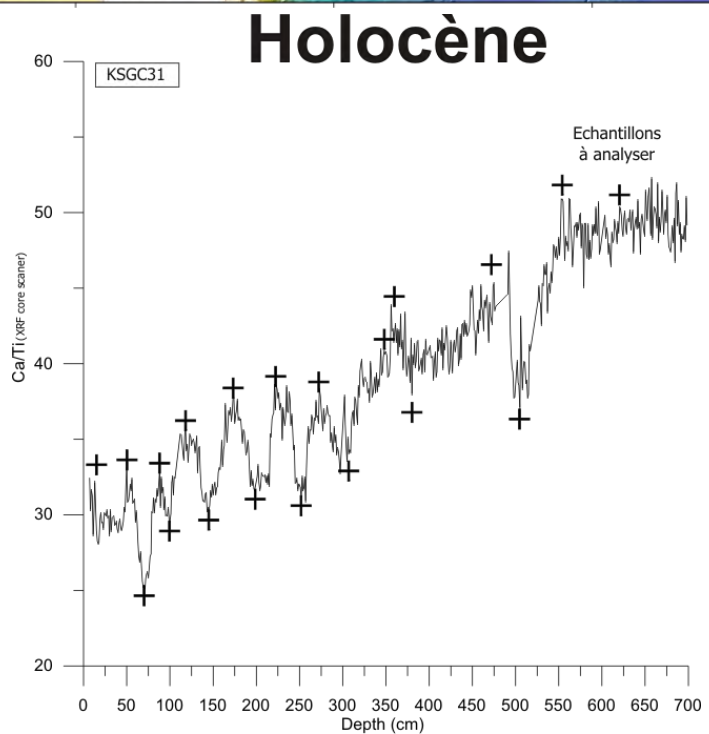
Quelle est la composition géochimique des sédiments du Golfe du Lion lorsque l'on s'affranchit des variations du niveau marin?

Perspectives



Géochimie isotopique :

- Nd → Sources
- Sr → Sources (altération)
- **Pb → Activité anthropique**



- **Modification anthropique** des apports sédimentaires holocènes

➢ Installations métallurgiques et activités minières datant de l'Age du Bronze

Je vous remercie de votre attention

IV. Paramètres qualitatifs

Matériel

10 échantillons du chenal

30 à 40 échantillons par campagne

(NB : sites de clapage)

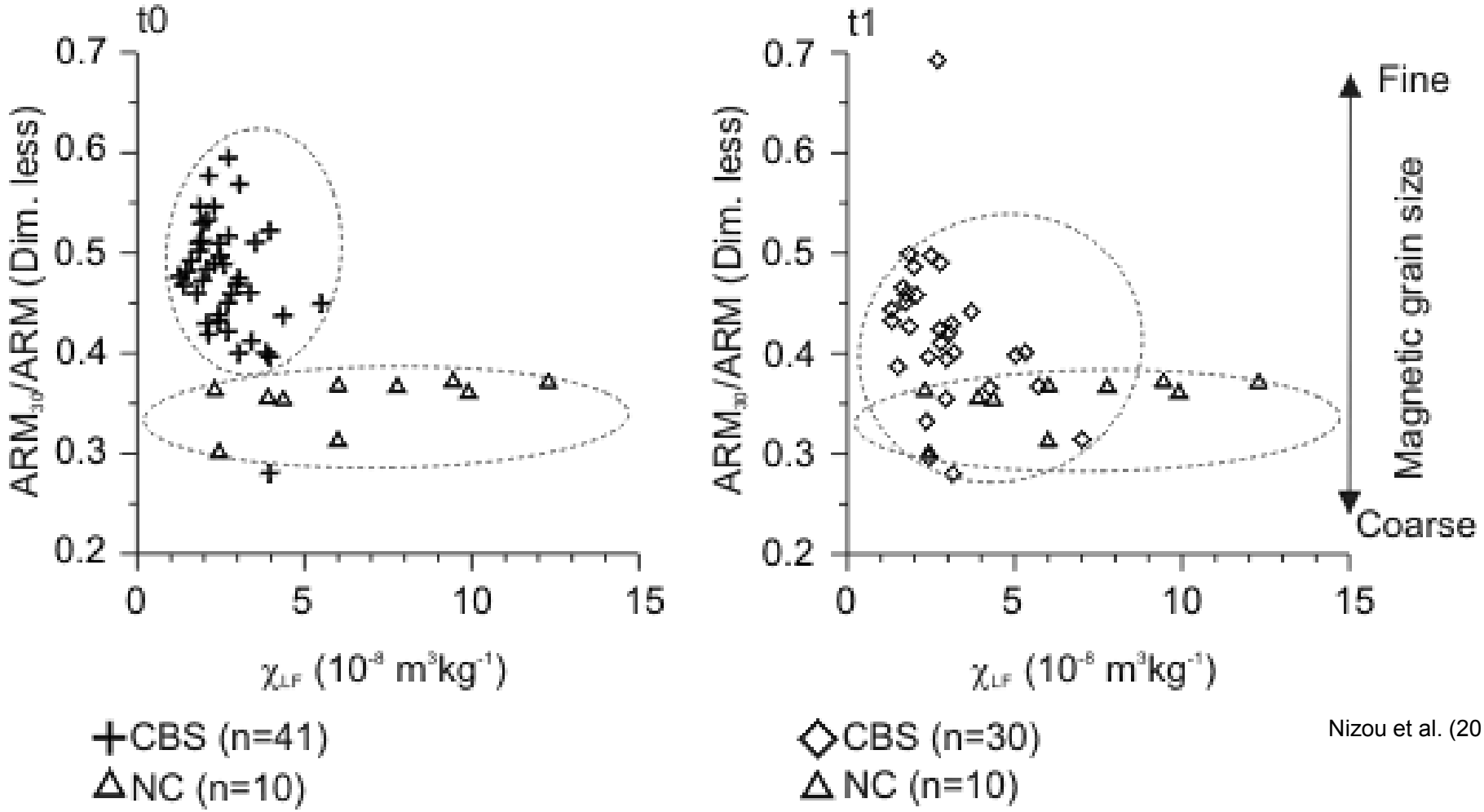
Méthodes

- **Paramètres qualitatifs**

Magnétomètre à supraconducteur SRM760R (2G enterprises) :

Aimantation Rémanente Anhystérétique (ARM & ARM_{30})

Paramètres qualitatifs



Nizou et al. (2015)

- Avant clapage, deux nuages de points distincts
- **A minéralogie constante**, ARM_{30}/ARM estimateur de la **taille de grains**
- Apport de **matériel magnétique grossier**

Johnson et al. (1975)

V. Résilience du milieu

Matériel

10 échantillons du chenal

30 à 40 échantillons par campagne

(NB : sites de clapage)

$$S\text{-ratio} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{IRM_{-0.3T}}{SIRM}\right)$$

Bloemendal et al. (1992)

$$HIRM = (SIRM - S_{-0.3T})/2$$

Thompson and Oldfield (1986)

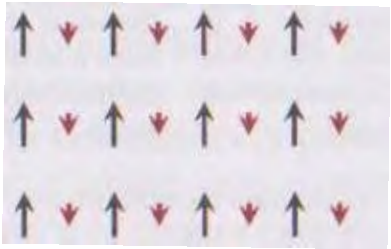
Méthodes

- **Paramètres qualitatifs**

Magnétomètre à supraconducteur SRM760R (2G enterprises) :

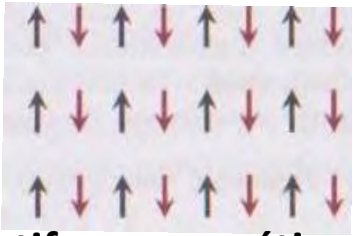
Aimantation Rémanente Anhystérétique (ARM & ARM_{30})

Aimantation Rémanente Isothermale (IRM) à Saturation (SIRM)



Ferrimagnétisme

Ex: magnétite

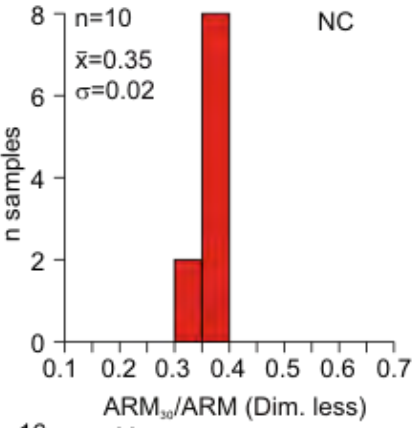


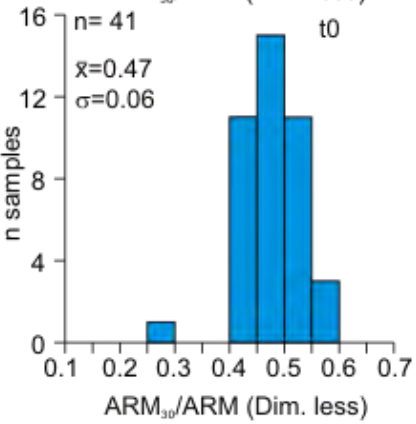
Antiferromagnétisme

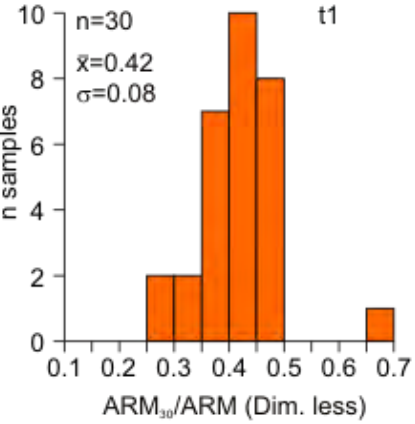
Ex: hématite

Illustration issue du Mini-Manuel de Géophysique ; Langlois (2011)

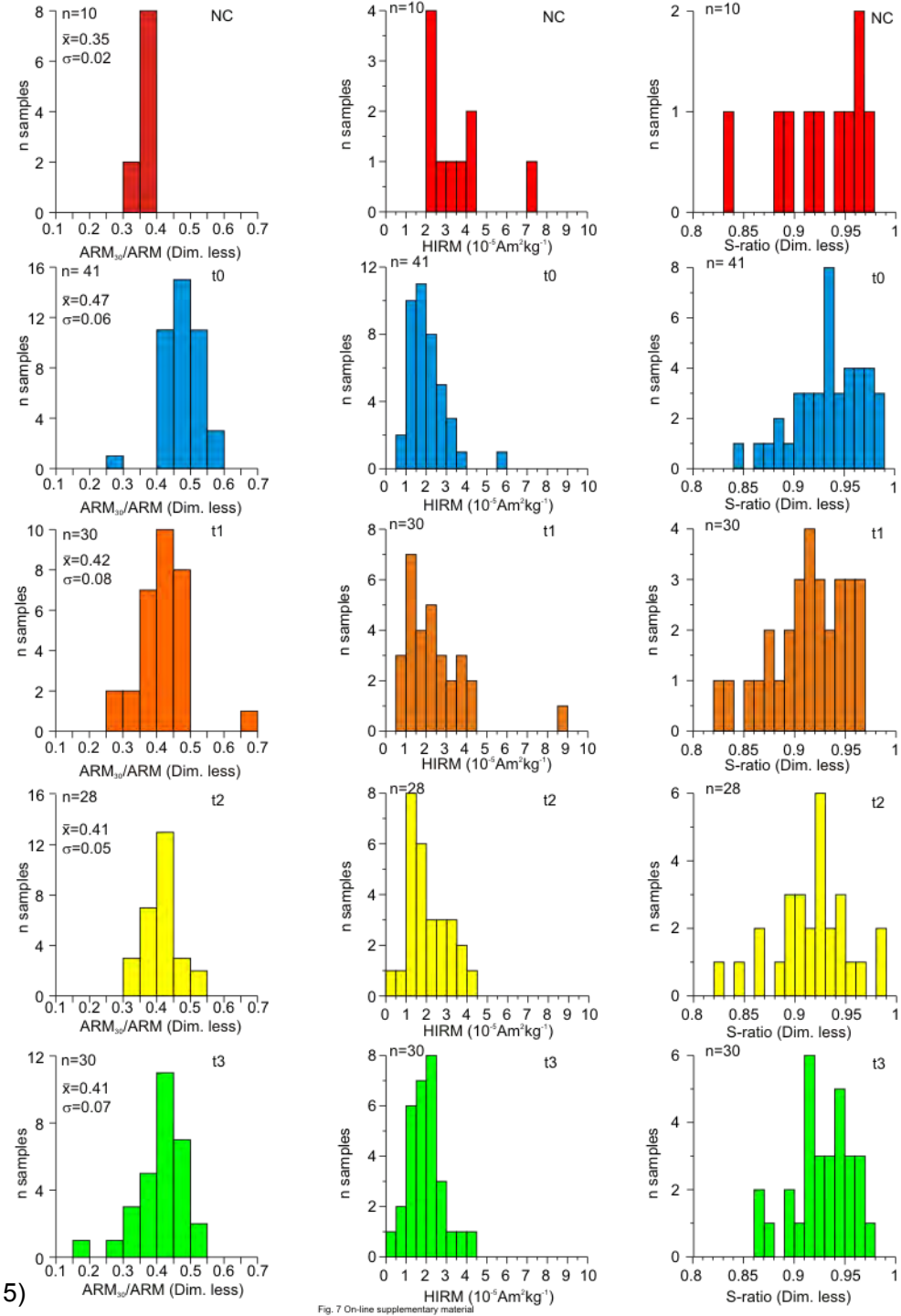
Résilience







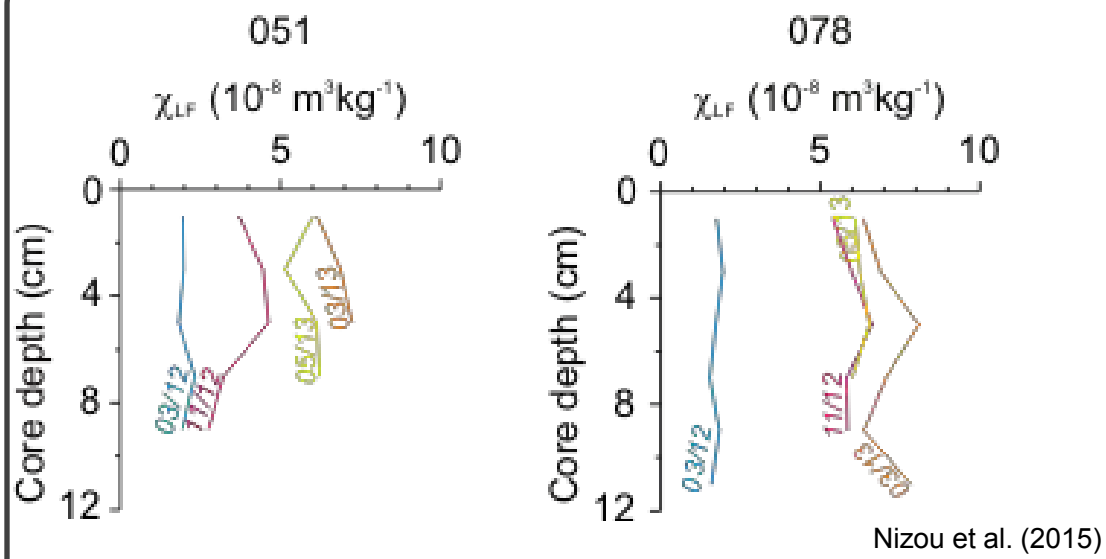
- **Paramètres discriminants : ARM_{30}/ARM**
- Paramètres non-discriminants : S-ratio & HIRM (minéralogie constante)



Nizou et al. (2015)

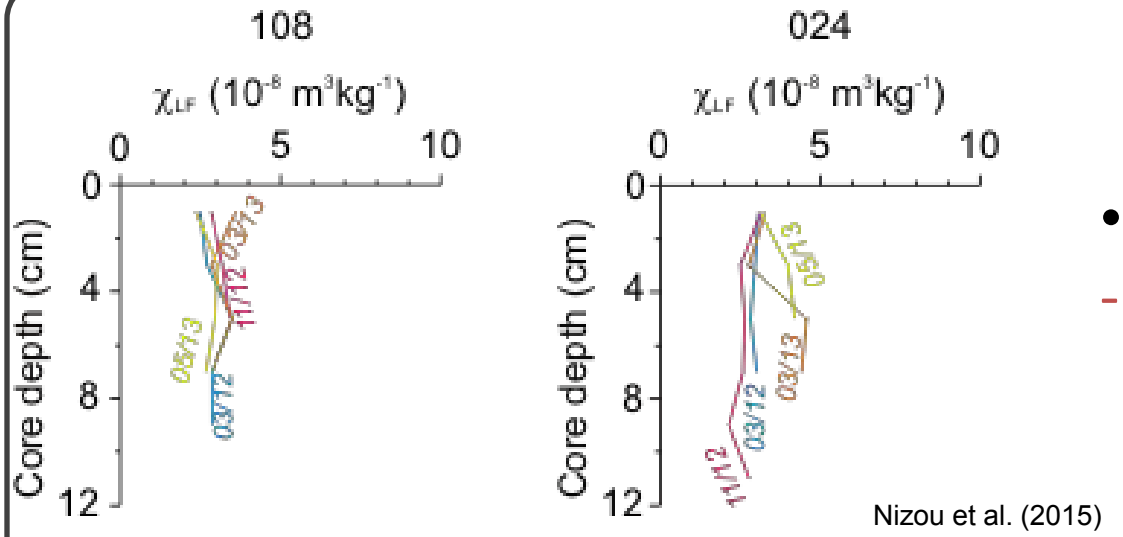
Fig. 7 On-line supplementary material

Résilience



Nizou et al. (2015)

- Sites de clapage
- **Variations de χ_{lf}**
- **Observation de résilience**



Nizou et al. (2015)

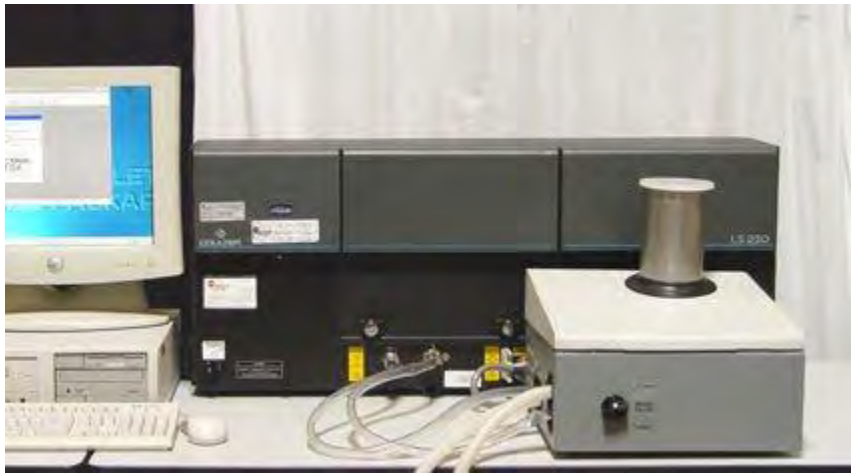
- A 2 km au N & S des sites
- **Remobilisation faible**

VI. Comparaison avec une autre méthode de traçage : la granulométrie

Matériel

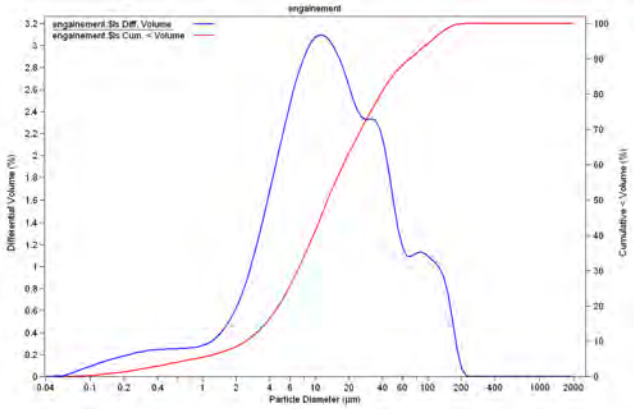
~122 échantillons par campagne

(NB : sites de clapage)

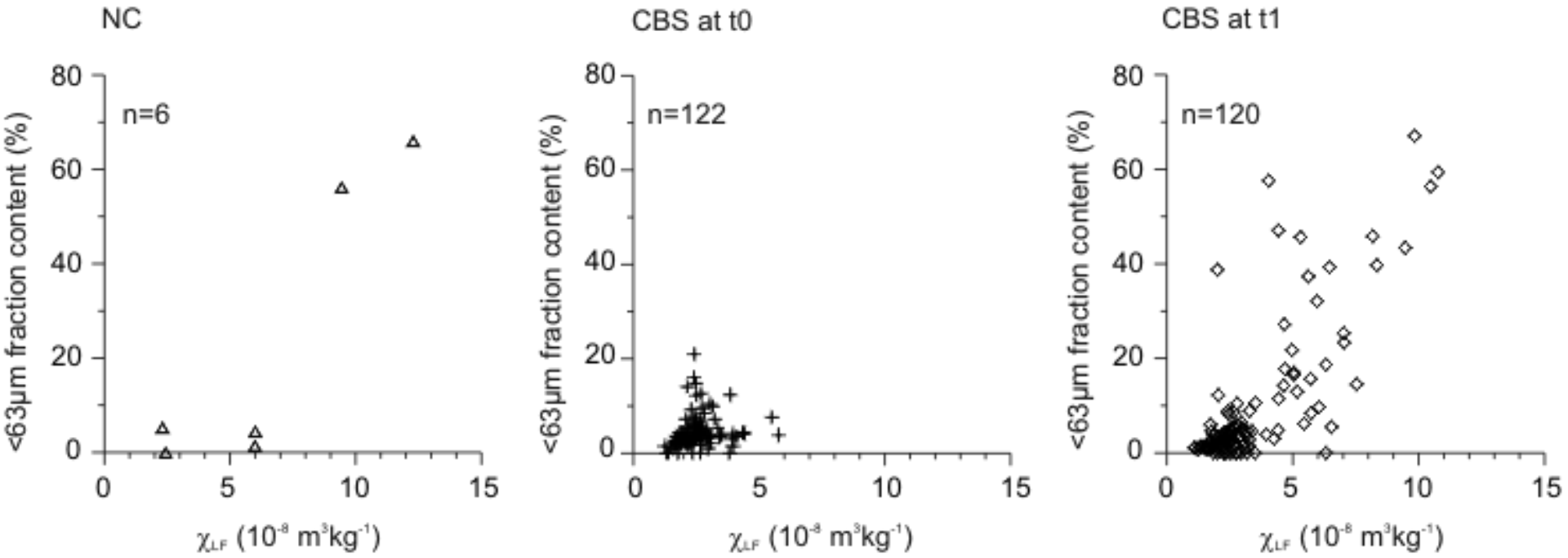


Méthode

Beckman Laser Particle Size Analyzer LS 230 : pourcentage de fraction fine



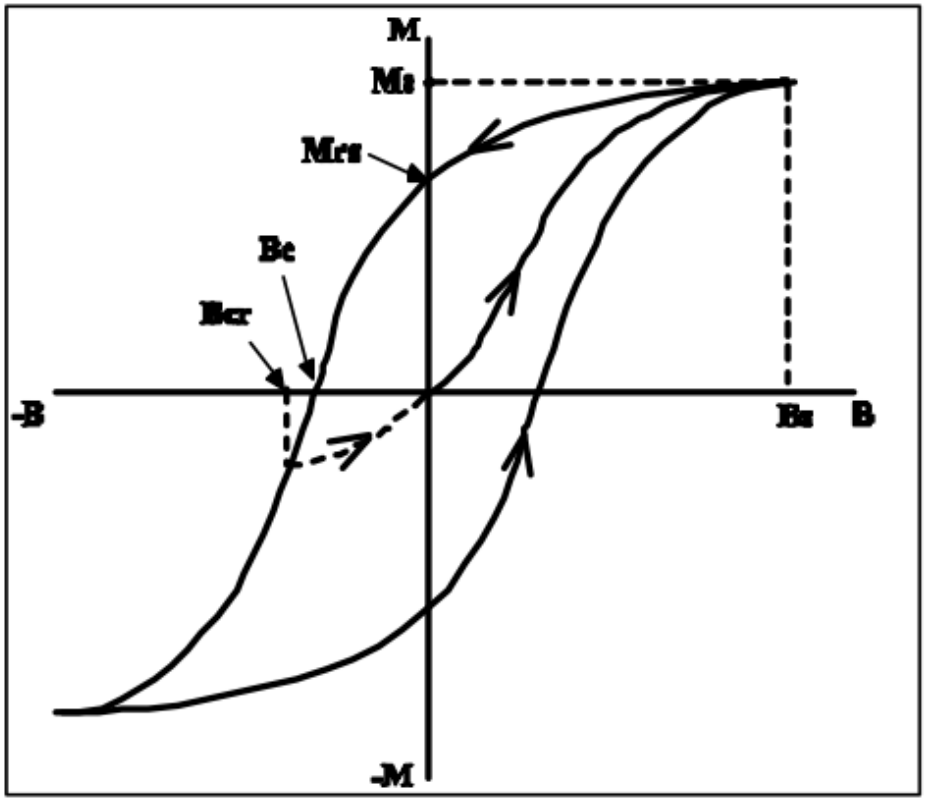
Corrélations granulométrie laser vs magnétisme

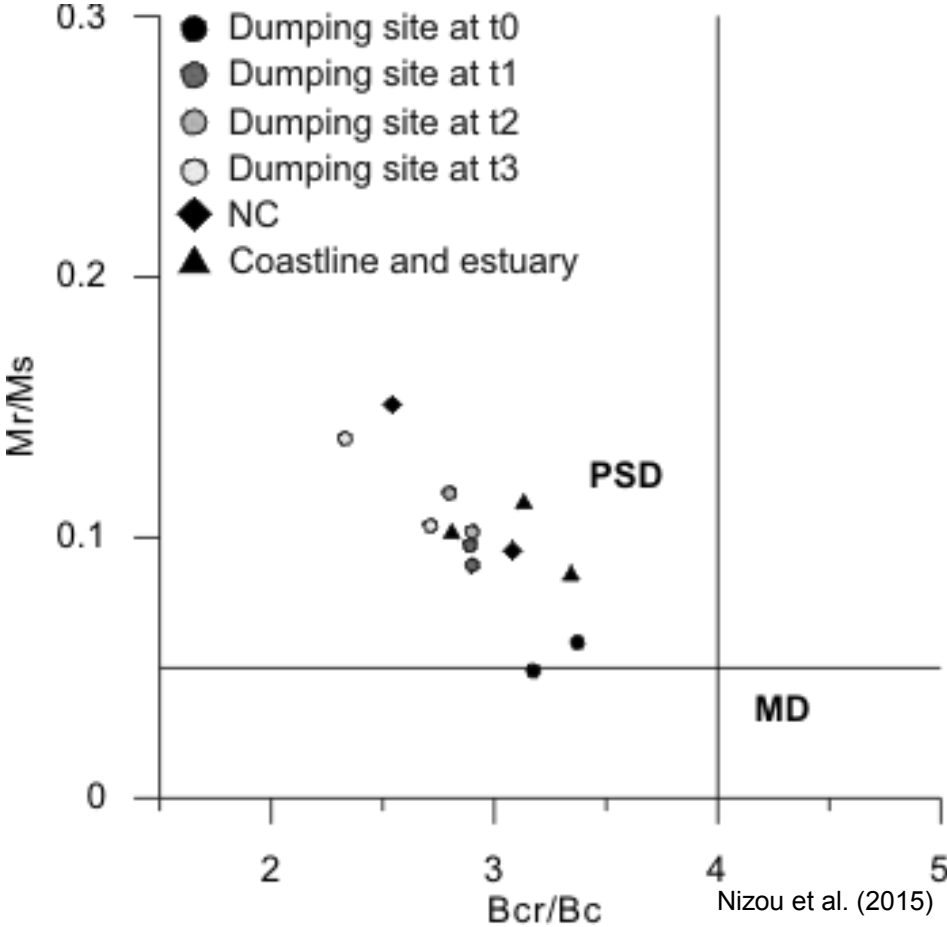


Nizou et al. (2015)

- Apport : matériel **fort % fines**
- Pas de corrélation
- Méthodes **différentes** & **complémentaires**

Paramètres quantitatifs





Aimantation à saturation (Mr /Ms) versus le rapport des forces coercitives (Bcr /Bc)

Nizou et al. (2015)
Day et al. (1977)
Dunlop (2002)

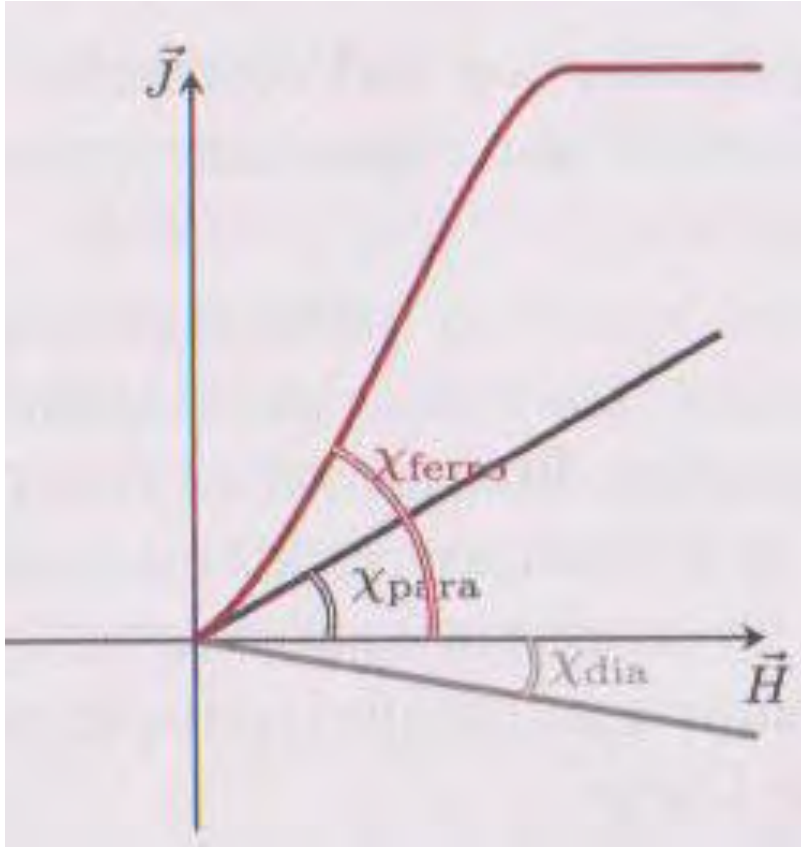
- **PSD magnétites** et **titanomagnétites (1 – 20 µm)**

Comportements de la matière

1) **Diamagnétisme** : précession des électrons, prod. χ faible, même direction, sens opposé. Ex.: quartz, carbonates.

2) **Paramagnétisme** : éléments de transition, proportionnalité χ, même direction, même sens. Ex.: biotite.

3) **Ferromagnétisme *sl***: Fe Ni Co + chp magnéto-christallin, augmentation rapide χ jusqu'à saturation, aimantation rémanente.
Ex.: magnétite.

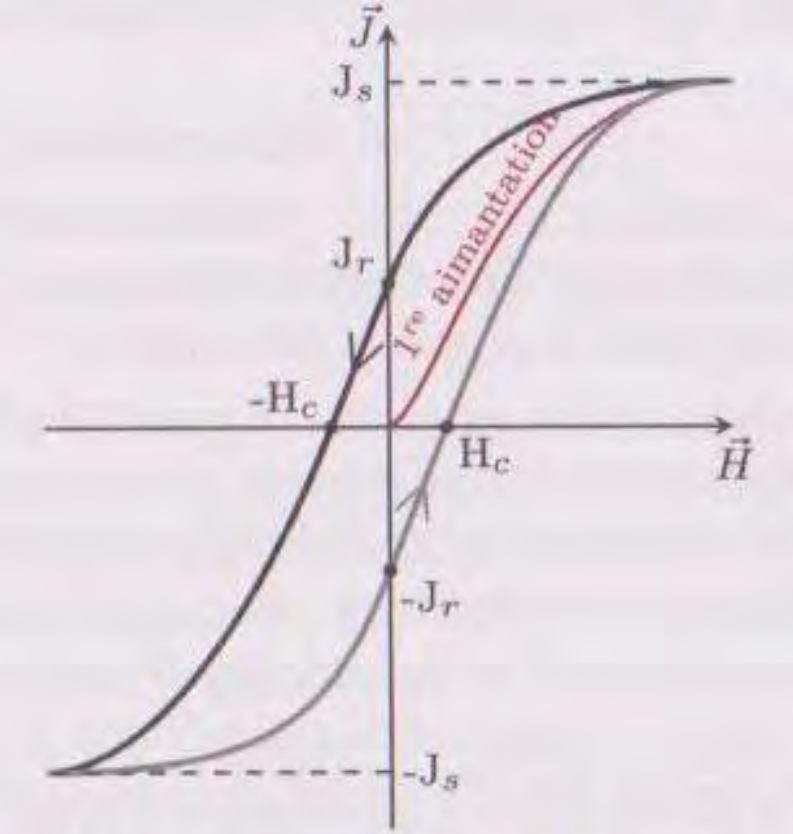


J intensité d'aimantation
H intensité du champ inducteur

Illustration issue du Mini-Manuel de Géophysique ; Langlois (2011)

Comportement ferromagnétique *sl*

Orientation & maintien des spins libres

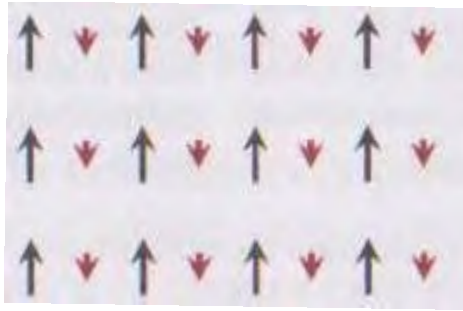


(b) Courbe hystérésis d'aimantation d'un matériau ferromagnétique.

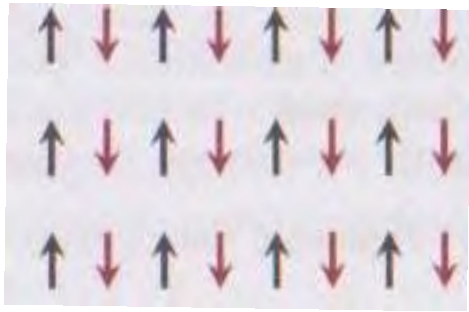
J intensité d'aimantation
H intensité du champ inducteur
J_s aimantation à saturation
J_r aimantation rémanente

Ferromagnétisme *ss* : spins orientés dans le même sens
Ex: fer métal.

Ferrimagnétisme : spins orientés dans sens opposés, intensité plus forte ds un sens, aimantation non nulle.
Ex: magnétite.

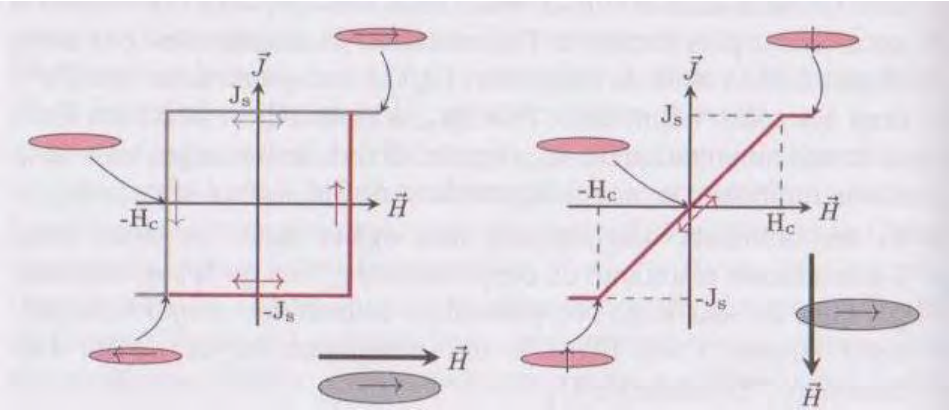


Antiferromagnétisme : spins orientés dans sens opposés, même intensité, aimantation nulle.
Ex: hématite.

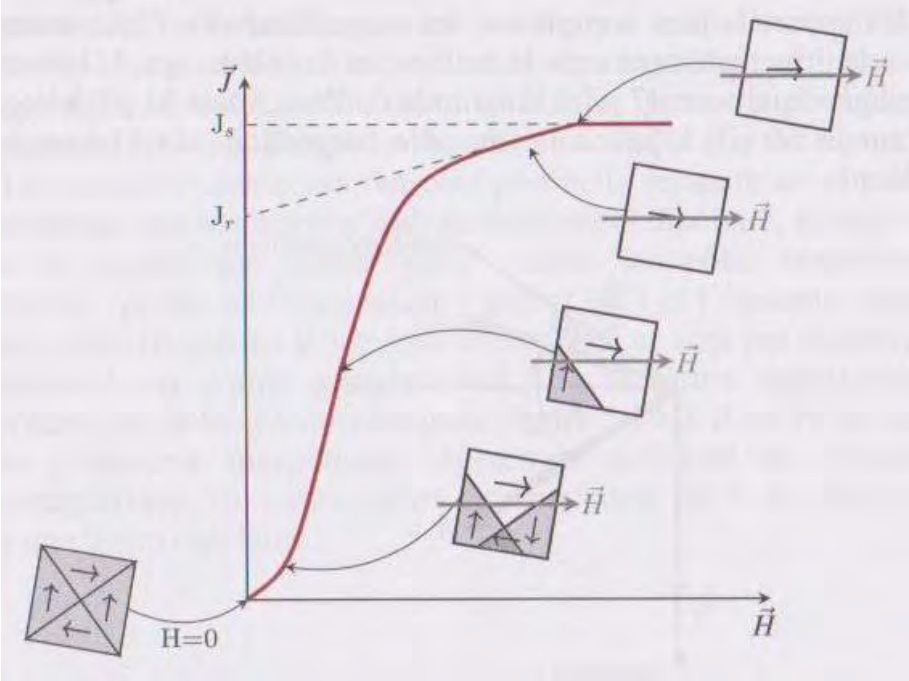


Illustrations issues du Mini-Manuel de Géophysique ; Langlois (2011)

Comportements idéaux vs naturels: domaines magnétiques



Comportement d'un **cristal idéal** ferrimagnétique **monodomaine**



Comportement d'un **sédiment réel** composé de cristaux **polydomaines**

Caractéristiques de la courbe d'hystérésis (e.g. aspect, valeurs aimantation rémanente, à saturation, du champ coercitif) informent sur **la nature et proportion** de minéraux magnétiques.

Illustrations issues du Mini-Manuel de Géophysique ; Langlois (2011)