



Les matières en suspension estivales du cours moyen de la Loire ont une composition chimique et minéralogique très particulière : elles sont plus riches en silice, du fait de la présence de diatomées, et plus riches en calcium lié à la présence de cristaux de calcite endogénique, que dans le cours amont.

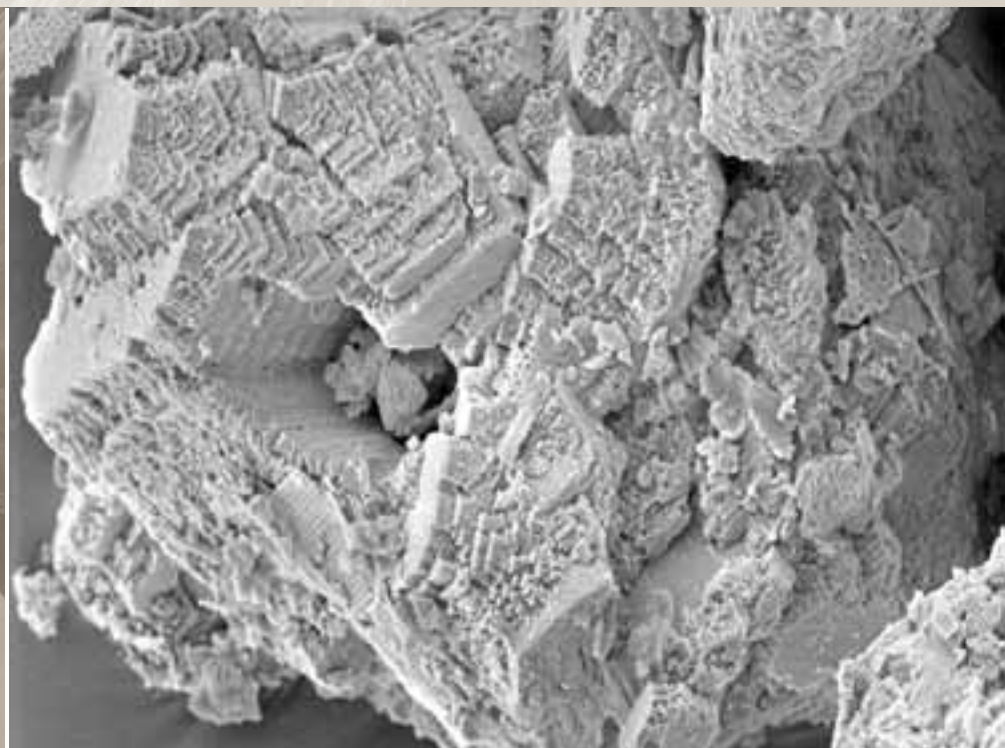
En effet, dans ce tronçon ligérien, les blooms phytoplanctoniques, nombreux et denses, perturbent l'équilibre des carbonates dissous.

La calcite peut alors se former directement dans les eaux de la Loire, phénomène qui est, à ce jour, peu décrit dans les fleuves des zones tempérées.

Agrégat de cristaux de calcite endogénique avec un fantôme de diatomée, observé dans les matières en suspension pendant les basses eaux 1997 de la Loire à l'aval de Tours. Sa morphologie est caractéristique d'une formation dans la masse d'eau.

A cluster of endogenic calcite crystals surrounding a diatom skeleton observed in suspended matter downstream from Tours during the 1997 low-water period of the Loire River. Its morphology is typical for formation in surface waters.

© Grosbois et al., 2001.



La Loire, usine à carbonates



Cécile Grosbois⁽¹⁾

GÉOCHIMISTE
cecile.grosbois@univ-tours.fr

Jean-Gabriel Breheret⁽¹⁾

SÉDIMENTOLOGUE
jean-gabriel.breheret@univ-tours.fr

Florentina Moatar⁽¹⁾

HYDROLOGUE
florentina.moatar@univ-tours.fr

Philippe Négrel⁽²⁾

GÉOCHIMISTE-ISOTOPISTE
p.negrel@brgm.fr

(1) – Laboratoire de géologie, Faculté des sciences et techniques, Université François-Rabelais de Tours, CNRS/INSU, Université d'Orléans, UMR 6113 ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans).

(2) – BRGM, Service Métrologie Monitoring Analyse.

La formation de calcite endogénique

Comme les minéraux silicatés et les matières organiques, la calcite (CaCO₃) peut être présente dans les matières en suspension des hydrosystèmes continentaux. L'origine de la calcite est multiple :

- elle peut provenir de l'érosion mécanique des roches carbonatées du bassin versant : c'est l'origine détritique ;
- elle peut être fabriquée par des organismes à coquille calcaire vivants dans les environnements fluviaux et lacustres : c'est l'origine biogénique ;
- elle peut se former au cours de la diagenèse des sédiments, souvent comme ciment entre les grains : c'est l'origine diagénétique ; la précipitation de calcite étant également particulièrement commune en contextes hydrothermaux, souterrains et lacustres ;
- enfin elle peut précipiter *in situ* dans la masse d'eau quand les eaux sont sursaturées lors de variations de composition chimique ou via l'utilisation pendant la photosynthèse du CO₂ atmosphérique ou des ions HCO₃⁻ dissous : c'est l'origine endogénique. Si ce phénomène est connu depuis plusieurs décennies dans les lacs, il demeure peu décrit dans les systèmes fluviaux.

Dans le bassin de la Loire, Manickam en 1985 puis Négrel en 1997 mettaient en évidence de la calcite endogénique dans les sédiments de fond de l'estuaire. Au cours des basses eaux 1996-1997-1998, des flux importants de matières en suspension étaient observés de manière sporadique entre Orléans et Saumur alors que le taux d'érosion mécanique était au plus bas pendant cette période hydrologique [Grosbois *et al.*, (2001) ; encadré page suivante]. La question se posait donc de la nature et de l'origine de ces matières en suspension.

La Loire : une usine à carbonates

En plus de la matière organique, les matières en suspension (MES) de la Loire sont riches en silicium, en aluminium ainsi qu'en fer et en calcium. Dans la partie du bassin comprise entre Orléans et Saumur, la composition chimique de ces matières en suspension est beaucoup plus variable qu'en amont du cours pendant un cycle hydrologique : si les teneurs en silicium sont importantes, celles en calcium sont surprenantes pendant les basses eaux car elles dépassent de loin celles des MES en période de hautes eaux (figure 1).

“ Les matières en suspension sont riches en silicium, aluminium, fer et calcium. ”

Le cortège minéralogique, caractérisé par diffraction des rayons X, montre que les matières en suspension échantillonnées durant les crues sont essentiellement composées de minéraux silicatés : quartz, feldspaths alcalins et plagioclases et minéraux argileux (illite, smectites, kaolinite), avec également de la calcite détritique. En revanche, les proportions de ces minéraux silicatés s'effondrent au cours de l'étiage, et l'assemblage minéral est dominé par la calcite. L'analyse des relations entre éléments chimiques et phases minérales montre que les teneurs les plus fortes en calcium correspondent bien à la présence de calcite au cours de cette période. Les teneurs élevées en silicium n'apparaissent nullement corrélées à l'aluminium ou au fer ni aux faibles pourcentages de quartz et autres silicates. Ainsi, le silicium n'est pas lié à des phases détritiques mais à une phase amorphe d'origine biogénique comme les coquilles (frustules) d'opale A ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $n < 2$) de diatomées (figure 2).

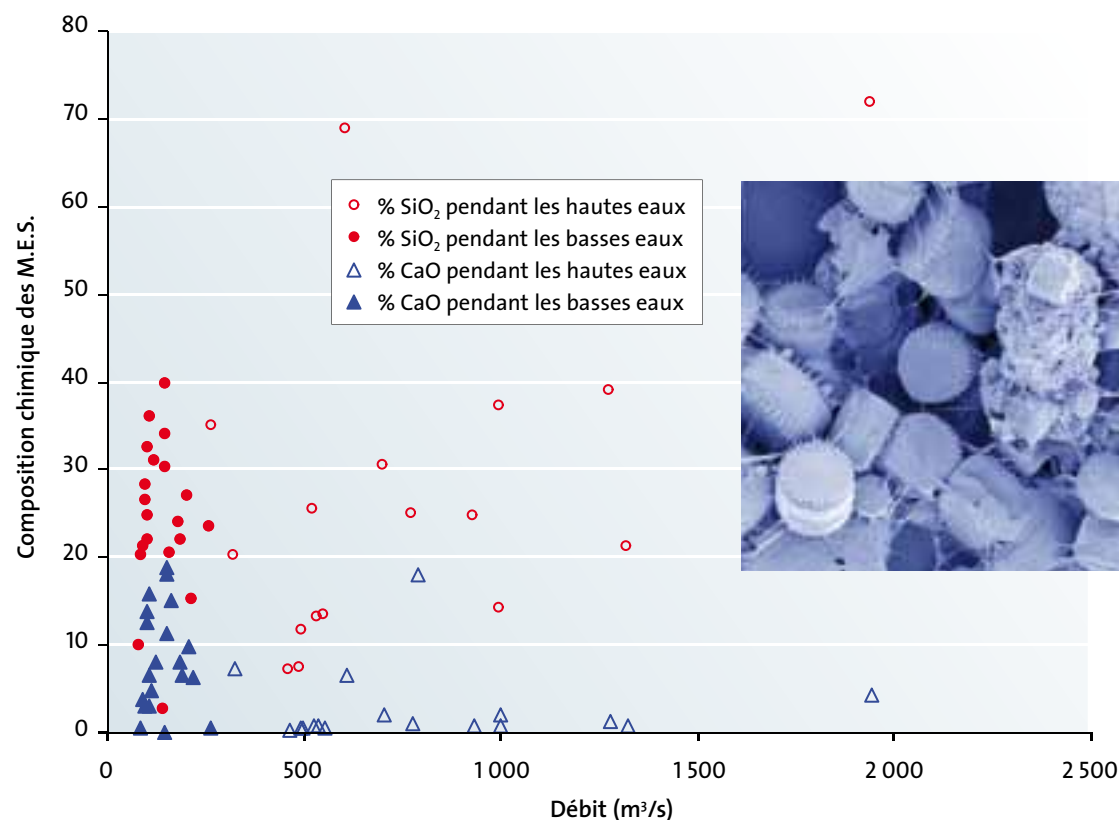


Fig. 1 : Variations des concentrations en calcium (CaO, %) et en silicium (SiO_2 , %) en fonction du débit ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) dans les matières en suspension des eaux de la Loire moyenne (cycle hydrologique 1996-1997 ; Grosbois, 1998). La photo en encart présente des frustules de diatomées (*Stephanodiscus*) lors d'un bloom algal au cours de l'étiage 1997 (observations au microscope électronique à balayage).

Fig. 1: Variations in calcium and silicon concentrations, respectively CaO (%) and SiO_2 (%) versus the discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) in suspended matter in the waters of the Middle Loire (1996-1997 hydrological cycle; Grosbois, 1998). The photographic insert depicts diatom frustules (*Stephanodiscus*) from an algae bloom that occurred during the 1997 mean low water episode (observations using a scanning electron microscope).

© J.-G. Breheret.



► PROJET AMELIE ANALYSES MULTIPROXIES DES EAUX DE LA LOIRE INFÉRIEURE ET ESTUARIENNE

B. Prud'homme, C. Bertier – GIP Loire Estuaire
H. Etcheber, A. Coynel – UMR CNRS 5805 EPOC, Université Bordeaux 1
F. Moatar, C. Grosbois – UMR 6113 ISTO, Université de Tours
G. Moguelet, G. Maillet – Université d'Angers

Depuis une trentaine d'années, des crises de sous-oxygénation surviennent régulièrement en été dans l'estuaire de la Loire, provoquant une dégradation importante de la qualité des eaux et une diminution de la biodiversité. Les réactions de décomposition et d'oxydation de la matière organique (M.O.) particulaire, qui consomment des quantités très importantes d'oxygène, sont souvent pointées du doigt. La forte affinité de la plupart des contaminants pour les particules fines nécessite également de s'intéresser à la dynamique de la M.O. et des matières en suspension (M.E.S.).

À ces fins, l'université de Bordeaux 1 et le Groupement d'intérêt public Loire-Estuaire, en association avec les universités de Tours et d'Angers, ont mis en place depuis août 2009 le projet AMELIE, une station de prélèvements manuels journaliers qui visent à évaluer les concentrations et les flux de M.O. (carbone, chlorophylle), de M.E.S. et de certains indicateurs

associés (sels nutritifs, métaux lourds) transitant dans la Loire à Montjean-sur-Loire à l'aval d'Angers.

L'objectif est de quantifier les flux annuels de M.O., M.E.S. et contaminants apportés à l'estuaire, d'évaluer leur variabilité temporelle et spatiale, et de définir la forme sous laquelle ces contaminants sont transportés, notamment la partition dissous/particulaire. Ces travaux doivent également contribuer à évaluer le devenir des sédiments et des polluants dans l'estuaire et en mer en générant une base de données utile notamment aux études menées sur les processus hydrosédimentaires dans l'estuaire et le proche littoral (thèse IFREMER 2009-2012 de I. Khojasteh).

Cette approche a déjà permis de révéler la richesse de l'eau en matière organique et l'importance majeure de la fraction organique phytoplanktonique. Avec des teneurs en sels

nutritifs élevées (en moyenne $\text{SiO}_2=290 \mu\text{mol/l}$ et $\text{NO}_3^-=200 \mu\text{mol/l}$), les eaux fluviales entrant dans l'estuaire témoignent de l'importance des processus biologiques dans la Loire. Néanmoins, en raison d'une année 2009-2010 hydrologiquement sèche (déficit de 30 %), on ne note qu'une érosion mécanique limitée du bassin versant et de faibles concentrations en M.E.S. ($< 100 \text{ mg/l}$).

Si le projet est reconduit pour 2010-2011, les bilans pourront être confirmés et les objectifs orientés sur la caractérisation de la cyclicité des apports fluviaux (contribution des événements de crue/étiage, impact des alternances jour/nuit sur les blooms algaux/phytoplanctoniques et les concentrations en chlorophylle résultantes...) et sur la comparaison avec les autres systèmes fluviaux et estuariens macro-tidaux français. ■

Contact : h.etcheber@epoc.u-bordeaux1.fr



Pont de Montjean-sur-Loire (Maine-et-Loire), site de prélèvement.

La station n° 6 est la dernière station de mesure des débits de la Loire par VNF (Voies Navigables de France) avant l'estuaire. Les prélèvements AMELIE sont faits par un opérateur depuis le pont à l'aide d'une bouteille lestée.

Montjean-sur-Loire bridge (Maine-et-Loire Department), the sampling site. Station 6 is the last station before the estuary, operated by VNF (French navigable watercourses), which measures flow rates on the Loire River. AMELIE samples are taken from the bridge by an operator using a weighted bottle.

© Université Angers.

Un lien entre production de calcite endogénique et activité algale.

Les observations effectuées en microscopie électronique à balayage des matières en suspension montrent deux formes (*habitus*) de carbonates en fonction de la période d'échantillonnage. Pour la période des hautes eaux hivernales, les particules carbonatées correspondent à des amas de formes irrégulières, de taille très variable. Elles sont généralement associées à des grains silicatés usés et à des feuillettes argileux. Cet *habitus* est caractéristique d'une origine détritique.

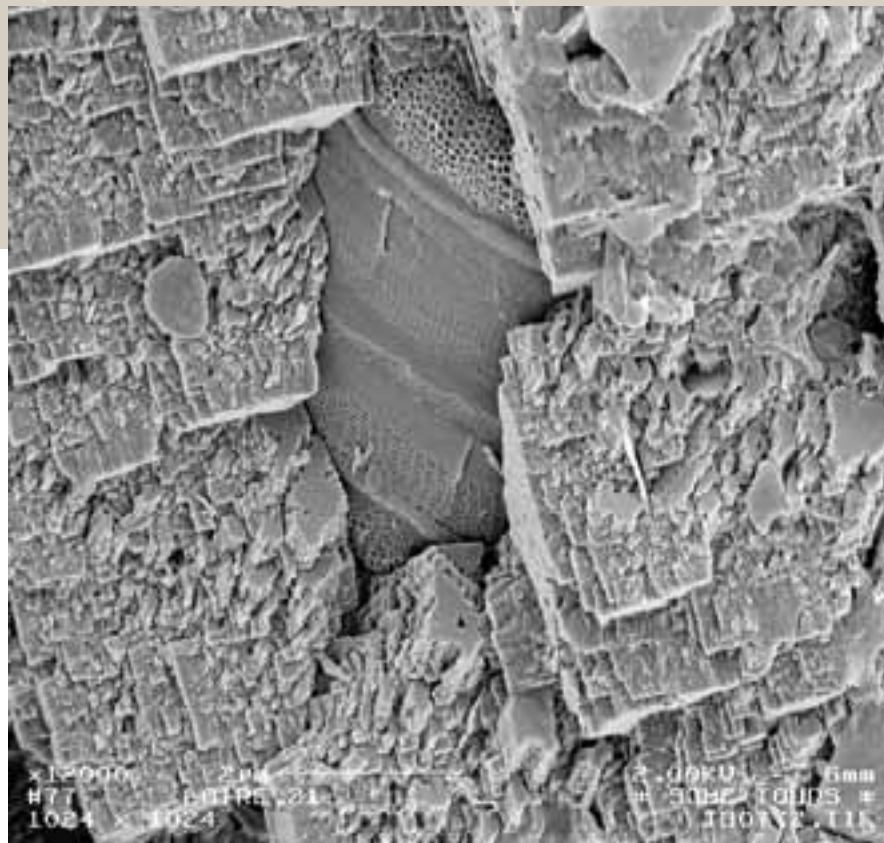
À l'opposé, les M.E.S. prélevées pendant les basses eaux estivales sont constituées d'agrégats de cristaux de calcite dont l'*habitus* est typique d'une formation dans la masse d'eau (*photo d'entrée*). Elles présentent donc une origine endogénique. En plus de cet *habitus* particulier, l'abondance de frustules de diatomées est remarquable (*photo 1*). Ces frustules sont soit directement enchâssés dans l'agrégat carbonaté, soit sous forme de fantômes, empreintes de squelettes qui se dissolvent dans les eaux quand celles-ci sont sous-saturées en silice. Les diatomées servent alors de *nucléus* à la précipitation de calcite dans la masse d'eau.

La prolifération (*bloom*) de ces diatomées et d'autres algues planctoniques sont présentes essentiellement dans la Loire moyenne entre Chaumont-sur-Loire et Villandry : entre mai et septembre ces *blooms* y sont plus fréquents, plus denses et plus variés [Leitao et Lepretre (1998) ; Picard et Lair (2005)]. Un lien étroit apparaît ainsi entre la production de calcite endogénique et l'activité algale, tout au moins celle des diatomées.

Degré de saturation vis-à-vis de la calcite et eutrophisation des eaux de la Loire moyenne

Pour que de la calcite puisse précipiter dans la masse d'eau, des conditions chimiques et physiques doivent être réunies à l'instar des systèmes lacustres bien connus à cet égard : les eaux doivent être calmes, chaudes et sursaturées vis-à-vis de la calcite.

Dans le cours moyen de la Loire, ces conditions semblent réunies *a contrario* de la partie amont du bassin. En effet, le lessivage des roches sédimentaires carbonatées du Bassin parisien rend, tout au long de l'année, les eaux de la Loire moyenne bicarbonatées



calciques ($\text{HCO}_3^- \text{Ca}^{2+}$) avec des concentrations beaucoup plus fortes en ces deux paramètres pendant les basses eaux que pendant les hautes eaux.

De plus, en conséquence de très faibles débits d'étiage, de faibles vitesses de courant, une importante augmentation de température des eaux de surface (jusqu'à 32 °C en plein été au maximum d'ensoleillement), un éclaircissement maximal, auxquels s'ajoutent des apports diffus en nutriments, favorisent les *blooms* phytoplanktoniques dans cette partie du cours ligérien [Descy *et al.* (2009)]. L'activité de photosynthèse/respiration de ces *blooms* entraîne des maxima de chlorophylle (jusqu'à 120 µg/L à Orléans en 1985 et 1996), de dioxygène dissous ainsi que des minima des teneurs en nutriments. Cela engendre aussi des augmentations de pH (jusqu'à 9,2) et une perturbation de l'équilibre des « carbonates » dissous favorable à la précipitation de calcite. Tous ces mécanismes se trouvent fortement accentués à micro-échelle autour des frustules de diatomées. Aussi, la production de calcite endogénique apparaît liée à l'état eutrophe de la Loire moyenne.

▲
Photo 1 : Frustule de diatomée servant de nucléus à la formation d'un agrégat de cristaux de calcite (basses eaux 1997 à l'aval de Tours).

Photo 1: Diatom frustule used as a nucleus for the formation of a calcite crystal cluster (1997 low flow period downstream from Tours).

© Grosbois *et al.*, 2001.

La production de calcite endogénique apparaît liée à l'état eutrophe de la Loire moyenne.

► LE SYSTÈME D'INFORMATION SUR L'ÉVOLUTION DU LIT DE LA LOIRE ET DE SES GRANDS AFFLUENTS (SIEL) DE LA DREAL⁽¹⁾ CENTRE

Fabien Pasquet - Chef de l'unité systèmes d'information du lit et des levées - DREAL Centre - Fabien.PASQUET@developpement-durable.gouv.fr

Les aménagements et atteintes subis par le fleuve Loire au cours de l'histoire (endiguement, chenalisation par les ouvrages de navigation, barrages hydro-électriques, et surtout extraction massive de matériau alluvionnaire) ont provoqué un grave déséquilibre de la dynamique sédimentaire du fleuve. Privée d'une grande partie de sa charge alluviale immédiatement disponible, la Loire l'a reprise sur son propre fond, provoquant un enfoncement important de son chenal principal (entre 1 à 2 mètres en moyenne) et une déconnexion des bras secondaires. Aujourd'hui, s'écoulant initialement sur un fond alluvial sablo-graveleux, le fleuve a atteint sur certains secteurs le substratum, calcaire ou crayeux en région Centre. Celui-ci est parfois même apparent en basses eaux (étiage), comme à l'amont de Blois par exemple.

Ce phénomène d'enfoncement a permis un développement excessif d'une végétation typique des milieux plus secs du lit majeur, provoquant une banalisation écologique du milieu alluvial. La section d'écoulement des crues s'est également réduite, augmentant leur niveau. Les ouvrages (ponts, digues, quais) voient

leurs fondations affouillées, et leur stabilité menacée. Enfin, l'enfoncement de la nappe alluviale peut perturber les captages d'eau potable.

Afin de disposer des informations nécessaires à un suivi quantitatif fiable de l'évolution du lit du fleuve, la DREAL Centre a mis en œuvre un Système d'Information sur l'Évolution du Lit (SIEL) de la Loire et ses grands affluents (Allier, Cher, axe Creuse-Vienne). Les informations produites aident à la programmation de travaux de restauration du lit les plus pertinents possibles.

Depuis le milieu des années 1990, en plus de données anciennes, sont ainsi collectées :

- des prises de vue aériennes verticales du lit mineur de ces cours d'eau ;
- des profils en long du fil d'eau en crue ou en étiage, intérateur des évolutions du lit ;
- des données bathymétriques (profils en travers) du lit.

Ces données sont valorisées sous forme de cartes de végétation et de morphologie, grâce une typologie précise des communautés végétales (végétation aquatique, végétation

herbacées pionnières du lit mineur, forêt de bois tendre ou de bois dur...) ou des formes alluviales (bancs de sable, bras secondaires ou déconnectés, îles...). Ces cartes fournissent alors une synthèse de l'état du lit du cours d'eau et les éléments nécessaires à une analyse diachronique de son évolution. Les changements morphologiques d'un grand cours d'eau se déroulant à l'échelle de plusieurs dizaines d'années, ce système d'information gagne en intérêt avec le temps : sa pérennité et son homogénéité sont donc primordiales.

L'ensemble de ces données, en tant que données environnementales publiques, est diffusé librement et gratuitement par l'intermédiaire d'un site Internet (<http://www2.centre.ecologie.gouv.fr/SIEL/index.htm>). ■

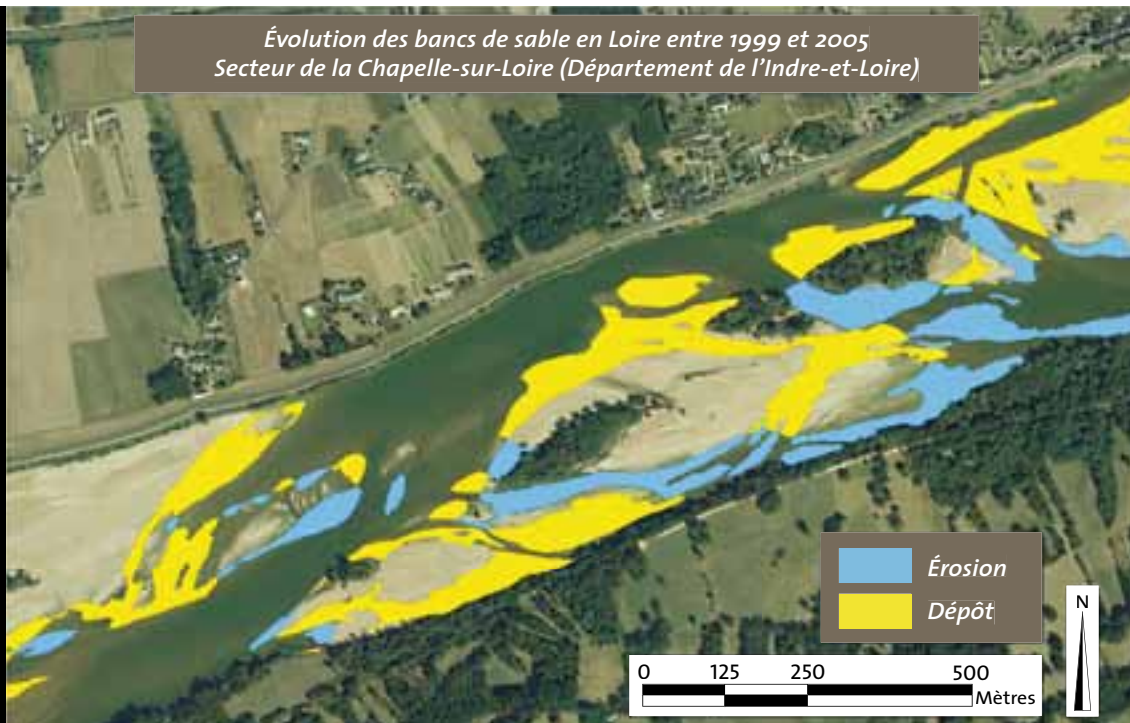
(1) - La DREAL Centre (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement), service déconcentré en région Centre du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM), a été créée le 9 janvier 2010 dans le cadre de la RGPP (Réforme générale des politiques publiques). Ce nouveau service est issu de la fusion des trois structures initiales qu'étaient la DIREN (Direction régionale de l'environnement), la DRE (Direction régionale de l'équipement) et la DRIRE (Direction régionale de l'industrie, de la recherche et de l'environnement).

Évolution des bancs de sable en Loire entre 1999 et 2005
Secteur de la Chapelle-sur-Loire (Département de l'Indre-et-Loire)

► Exemple de carte d'évolution du lit de la Loire réalisée à partir des données du SIEL (fond : prise de vue aérienne de 2005).

An example of a map, produced from SIEL data, depicting the evolution of the Loire riverbed (in the background, an aerial photograph from 2005).

© DREAL Centre





The Loire River: A Factory Producing Carbonates

Endogenic calcite (CaCO_3) forms in surface waters when they are supersaturated in dissolved calcium and carbonates. This phenomenon has been identified for a number of years in various contexts, notably lacustrine, but has rarely been described in fluvial environments. However, analyses of suspended matter (SM) in waters of the Middle Loire and further downstream conducted during the hydrological cycles of 1996-1998 and 2009-2010 show that this phenomenon can also occur in a river. The amounts of SM, naturally high during winter flood conditions due to mechanical erosion, have also been high, sporadically, during low-water episodes. Winter SM is rich in silicate minerals, while that observed in summer contains far less, but displays a high calcite content. The higher contents for this mineral coincide with high concentrations of amorphous silica. Observations made by electron microscope reveal the presence of tiny crystals (or groups of crystals) of endogenic calcite often closely associated with diatoms, unicellular algae with siliceous skeletons. The formation of endogenic calcite is thus related to the photosynthetic activity of these organisms which causes a pronounced alcalinization in the environment close to these cells (micromilieu) and therefore a supersaturation of this environment with respect to calcite. The significant production of calcite in the Middle Loire and downstream detected over several decades in relationship to the river's eutrophic state would appear to be declining substantially, as indicated in the most recent observations in 2010. This could be the result of measures taken to limit nutrient contributions (from agricultural and urban runoff) to aquatic environments like the Loire in view of improving their condition.

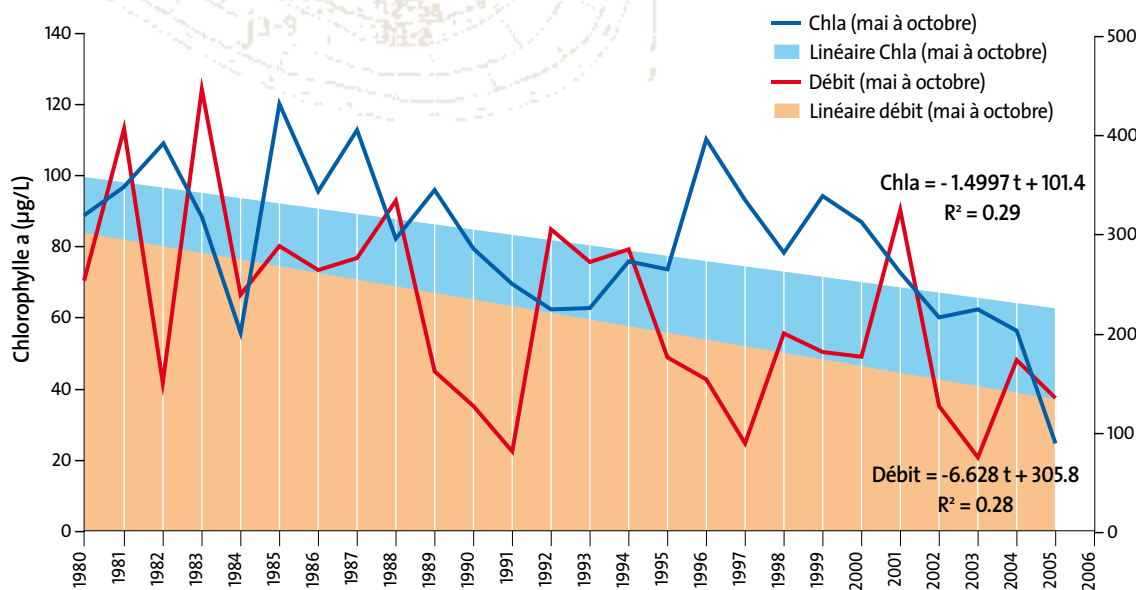


Fig. 2 : Évolution temporelle des teneurs en chlorophylle a (Chla) dans les eaux de la Loire à Orléans ainsi que du débit moyen annuel (données Agence de l'eau Loire-Bretagne – Moatar, 2006).

Fig. 2: Evolution versus time for chlorophyll a (Chla) content in the waters of the Loire River at Orléans as well as of the mean annual flow rate (data from the Agence de l'eau Loire-Bretagne - Loire-Brittany Water Agency - In Moatar, 2006).

Et en 2010 ?

Depuis la fin des années 1990, en lien avec les dispositions prises pour l'amélioration de l'état des milieux aquatiques, les teneurs en chlorophylle tendent nettement à diminuer (figure 2) tout comme les concentrations en nutriments. De plus, pour certaines années et compte tenu des aléas climatiques et hydrologiques, la Loire présente des périodes d'étiage peu favorables à des proliférations de diatomées [Descy *et al.* (2009)]. Cela a-t-il un effet sur la production de calcite endogène ? Ce minéral a encore été observé dans les matières en suspension en juillet 2009 dans la Loire moyenne, mais avec une plus faible abondance. À la différence de la calcite observée il y dix ans, celle-ci ne paraît pas autant associée aux frustules de diatomées, et les agrégats semblent plus petits. Enfin, alors que ces carbonates endogéniques étaient transportés jusqu'à Nantes, actuellement aucun agrégat de calcite endogène n'a pu être observé dans les matières en suspension à l'entrée de l'estuaire de la Loire. Celles-ci présentent même de très faibles teneurs en calcium (7,5 - 9,5 % pds CaO ; Programme CNRS/INSU EC2CO Variqual) par rapport à ce qui avait été observé dix ans auparavant (figure 1), illustrant une moindre production, sinon une dissolution ou une sédimentation de ces carbonates au cours du transport solide jusqu'à l'estuaire. L'usine à carbonates présenterait-elle le dépôt de bilan ? ■

“ Les teneurs en chlorophylle tendent nettement à diminuer. ”