

CARAC

TÉRIS

TIQUES ET

MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE

ÉTAT

ÉCOLO

GIQUE

CARACTÉRISTIQUES ET ÉTAT ÉCOLOGIQUE

MÉDITERRANÉE OCCIDENTALE

JUIN 2012

ÉTAT PHYSIQUE ET CHIMIQUE Caractéristiques physiques

Turbidité

Florence Cayocca
(Ifremer, Brest).



1. INTRODUCTION

1.1. DÉFINITION ET MESURE DE LA TURBIDITÉ

La turbidité constitue l'un des paramètres physiques descriptifs de la colonne d'eau. On entend ici par « turbidité » l'obstruction à la pénétration de la lumière dans l'eau, due à la présence de particules solides en suspension dans l'eau. Elle est reliée à la concentration massique de ces particules en suspension, communément appelées « matières en suspension » (MES), exprimée en grammes par litre ($\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$). Hormis lorsque des filtrations d'eau prélevée in situ sont effectuées – ce qui conduit, par pesée, à l'estimation de ces MES –, la mesure de turbidité se fait de manière indirecte, au moyen de capteurs acoustiques ou optiques. La mesure obtenue, exprimée en unités normalisées – le plus communément Nephelometric Turbidity Unit (NTU) ou Formazin Nephelometric Unit (FNU) –, ne peut être transformée en grammes par litre qu'à la suite d'une calibration qui requiert systématiquement des prélèvements d'eau in situ.

Si les observations satellitaires, désormais systématiques, permettent de reconstituer une climatologie de la turbidité de surface, elles ne renseignent pas sur la turbidité dans la colonne d'eau, ni au fond. Cette turbidité est due, d'une part, aux apports terrigènes et, d'autre part, à la remise en suspension par les vagues et les courants. Du fait de l'atténuation de la pénétration de la lumière qu'elle induit, elle impacte la production primaire, et donc structure la disponibilité de nourriture pour les espèces supérieures de la chaîne trophique, mais aussi la croissance d'espèces végétales benthiques ; les particules en suspension modifient quant à elles les capacités de filtration des bivalves et la répartition des espèces pélagiques, particulièrement des juvéniles. Une analyse plus détaillée des causes et conséquences de la modification de la turbidité est disponible dans la contribution thématique « Modifications de la nature du fond et de la turbidité » du volet consacré aux pressions et impacts.

1.2. ACCÈS À LA CONNAISSANCE DE LA TURBIDITÉ DANS LES SOUS-RÉGIONS MARINES

À la différence de paramètres hydrologiques « classiques » mesurés en océanographie depuis des décennies – par exemple température et salinité –, les mesures de turbidité à l'échelle régionale sont encore rares, et n'ont jamais fait l'objet de stratégie d'acquisition systématique. Les zones côtières ont en revanche été instrumentées depuis quelques années, particulièrement en zone estuarienne où des mesures en continu sont effectuées, et sur les points des réseaux de surveillance échantillonnés à basse fréquence. Une synthèse des données disponibles a ainsi identifié les mesures effectuées par le RePHY, le ROCCH (ex-RNO), le réseau environnemental SRN (Réseau de suivi régional des nutriments) et le RSL (Réseau de suivi lagunaire). Ces données sont pour la plupart archivées dans la base de données nationale Quadrigé². Les stations du Somlit produisent également des données. Des campagnes à la mer et des travaux de modélisation numérique ont été menés lors de thèses de doctorat, à l'échelle des panaches des grands fleuves français [1] [2] [3], ou à échelle plus régionale [4] [5] [6] [7] ; mais ces travaux requerraient aujourd'hui une phase de consolidation et d'analyse systématique des résultats aux échelles saisonnières et pluriannuelles afin de décrire correctement la moyenne et la variabilité de la turbidité dans les sous-régions marines françaises.

Cette synthèse s'appuie donc sur la collecte des données de turbidité disponibles auprès des instituts de recherche, universités, autorités locales ou régionales, et sur l'analyse de la bibliographie disponible – publications scientifiques et thèses de doctorat –, afin de proposer une description de l'état des connaissances. Il ne s'agit pas d'une vision synoptique de la turbidité des masses d'eau des sous-régions marines et de leur variabilité, qui n'existe pas encore.

2. SOURCE DES DONNÉES UTILISÉES

Les données incluent des mesures de turbidité sur le plateau – profils de turbidité acquis au cours des trente dernières années –, des mesures de turbidité haute fréquence de la station côtière POEM (Plateforme d'observation de l'environnement méditerranéen, à l'embouchure de la Têt) et des mesures de concentrations en MES associées aux débits liquides pour les fleuves côtiers du pourtour du golfe du Lion, pour les trente dernières années : Agly, Aude, Rhône, Hérault, Lez, Orb, Tech, Têt et Vidourle.

3. ANALYSE DES DONNÉES

3.1. APPORTS FLUVIAUX

L'analyse des données a permis de déduire des relations entre débit liquide et débit solide, validées pour chaque fleuve. Au cours des trente dernières années, les débits liquides du Rhône ont montré une variabilité interannuelle d'un facteur 2 à 3, tandis qu'elle atteignait un facteur 10 pour les autres fleuves côtiers. La raison en est que le comportement du Rhône a un caractère saisonnier prononcé, avec un débit de base soutenu, tandis que les autres fleuves ont un caractère contrasté typique du climat méditerranéen. Alors que leur débit d'étiage est très faible, ils peuvent subir des crues brèves et intenses appelées « crues éclair » ou « crues cévenoles ». Cette différence de comportement est exacerbée lorsque l'on considère les flux solides de ces fleuves : entre 1980 et 2005, la variabilité du débit solide du Rhône a atteint un facteur 10, tandis qu'il atteignait un facteur 100 pour les autres fleuves côtiers. Ainsi n'est-il pas rare qu'une crue de quelques jours apporte plus de 80 % du débit solide annuel d'un de ces fleuves côtiers – par exemple la crue de décembre 2003 sur la Têt [8].

Ce fort contraste dans la variabilité des débits des fleuves qui apportent leurs sédiments au golfe du Lion est responsable d'une grande variabilité spatio-temporelle des panaches turbides à leur embouchure. Une partie de ces sédiments se dépose à proximité des embouchures, particulièrement lors des crues et alimente les zones prodeltaïques situées vers 30 m de profondeur. En revanche, l'extension des panaches en surface et dans la colonne d'eau est contrainte par la grande variabilité des courants et de l'agitation côtière. Par ailleurs, une estimation des flux sédimentaires des rivières méditerranéennes a été effectuée dans le cadre du programme RID (Riverine Input Discharges) de la convention OSPAR. Ces flux sont calculés à l'aide du logiciel RTrend© à partir des données de débit centralisées par le Schapi (Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations) (voir la contribution thématique « Apports fluviaux » pour la liste des bassins versants pris en compte). Ces simulations confirment que la quasi-totalité du flux en MES de la sous-région marine est due au Rhône et présente une forte variabilité interannuelle (voir la figure 6 de la contribution thématique « Apports fluviaux en nutriments et matière organique » du volet pressions et impacts).

Une analyse plus détaillée des apports fluviaux est disponible dans la contribution thématique « Apports fluviaux en nutriments et matière organique ».

3.2. TURBIDITÉ CÔTIÈRE

Les tempêtes d'E-SE, ainsi que les courants induits par les vents de N-NO et par la formation des eaux denses sur le plateau apparaissent comme les événements les plus énergiques qui se produisent dans le golfe du Lion. Ces mécanismes sont caractérisés par une grande variabilité interannuelle. Les tempêtes d'E-SE sont des événements brefs, habituellement de un à quelques jours, qui se produisent surtout pendant l'automne. Ils sont généralement associés à des événements pluvieux générés par le transport de l'air humide marin sur le relief continental. Les événements les plus intenses conduisent à des crues éclairs qui sont responsables de la plus grande partie du transport de matières particulaires provenant des fleuves à la mer [8] [9] [10].

Considérant que les apports par les crues se déposent sur la partie interne du plateau, l'énergie des vagues et l'intensification des courants le long des côtes peuvent remettre en suspension les sédiments de la zone côtière à la partie interne du plateau – 0-30 m au moins [11]. En effet, les observations montrent que des épaisseurs de sédiments de plusieurs centimètres ont été érodées à une profondeur de 30 m lors de fortes tempêtes de S-SE [12]. Ces événements fortement énergiques sont les principales causes engendrant de la turbidité dans la colonne d'eau dans le compartiment côtier. Le maximum de turbidité intervient lorsque les événements de tempête sont associés aux événements de crue. En effet, les événements de type cévenol, typiques du climat méditerranéen, se traduisent souvent par de fortes décharges de sédiments lors des crues, puis par de fortes houles qui remobilisent ces sédiments à la côte et les transportent vers le large sur le plateau ou hors du plateau par les canyons [13]. L'intensité de la turbidité des eaux côtières est fortement dépendante de la séquence ou chronologie des événements. Elle sera d'autant plus forte si des apports de sédiments par les crues se sont produits avant des événements de remise en suspension par les vagues et les courants, du fait de la plus faible compaction des dépôts récents.

3.3. TURBIDITÉ SUR LE PLATEAU

Les premières études sur la distribution des particules en suspension effectuées dans les eaux de la marge continentale ont conduit à la description d'une structure multicouche dans laquelle la couche néphéloïde benthique (CNB) joue un rôle important dans le transport de particules. La répartition proposée par Aloisi *et al.* [14] près de l'embouchure des fleuves comprend : i) une couche néphéloïde de surface généralement liée aux apports fluviaux, ii) une couche néphéloïde intermédiaire superposée à la thermocline estivale, et iii) la couche néphéloïde de fond, d'une épaisseur de plusieurs mètres, couvrant quasiment tout le plateau.

La distribution des particules en suspension sur l'ensemble du plateau et de la pente supérieure, basée sur une compilation de mesures de turbidité recueillies sur une période de vingt années (1986–2006), confirme cette structuration verticale, mais montre également une variabilité spatiale et saisonnière importante (figure 1). Les conditions hydrologiques changent rapidement et passent d'une colonne d'eau quasi homogène pendant l'hiver à une colonne d'eau fortement stratifiée en été, avec la présence d'une thermocline, et donc d'une pycnocline à quelques dizaines de mètres de profondeur. Les apports d'eau et de sédiments par les fleuves montrent aussi une forte saisonnalité, avec des débits et une fréquence des événements de resuspension par les vagues et les courants plus forts pendant l'automne et l'hiver. En conséquence, la distribution moyenne des concentrations particulaires à proximité du fond pendant l'hiver est marquée par un gradient de concentration décroissant à partir de la source principale, le Rhône (figure 2). Pendant l'été, alors que le débit des fleuves et la resuspension sont minimaux, les plus fortes concentrations en MES sont observées sur la moitié occidentale du plateau, et résultent probablement de la remise en suspension de sédiments fins par des ondes internes quasi inertielles.

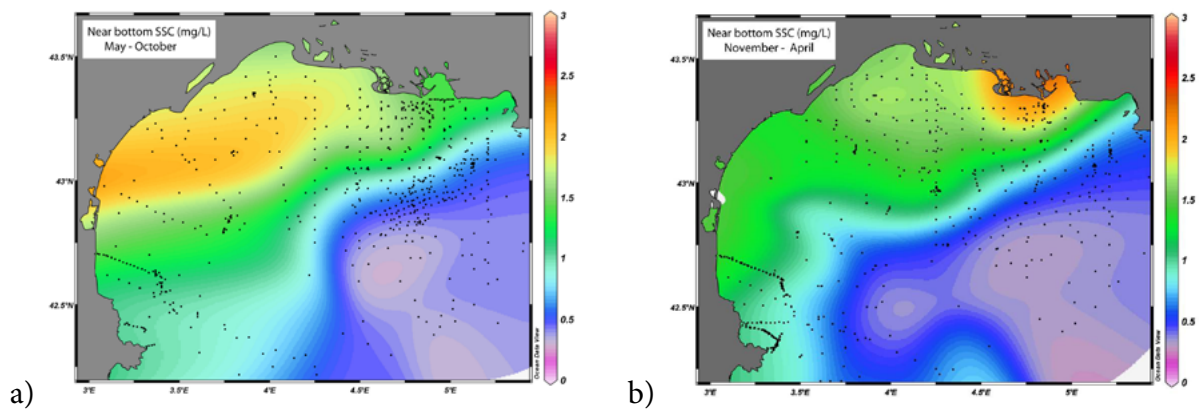


Figure 1 : Concentration moyenne de sédiments en suspension près du fond dérivée des mesures optiques — transmissométrie (atténuation de la lumière) et rétrodiffusion (diffusion vers l'arrière de la lumière) — en période stratifiée (mai-octobre) (a) et période non stratifiée (novembre–avril) (b) (Sources : CEFREM ; données 1986 et 2006).

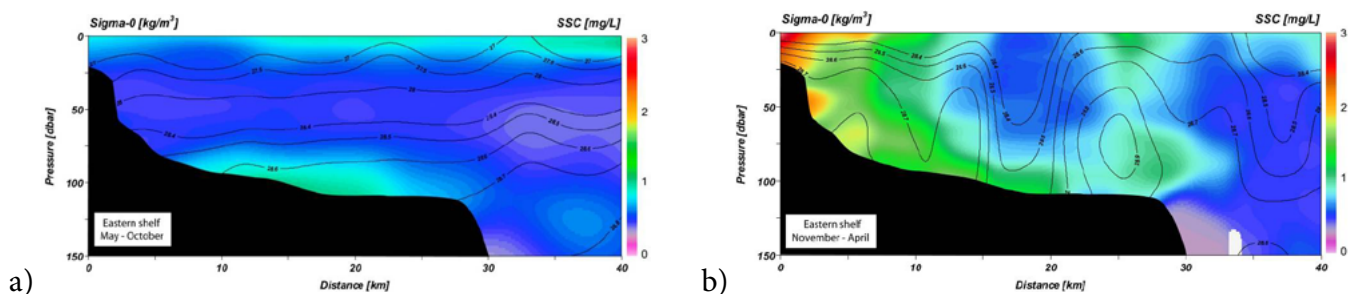


Figure 2 : Sections représentant la concentration en MES (en couleur) et l'anomalie de densité potentielle (lignes pleines), issues des mesures optiques — transmissométrie et rétrodiffusion — en période stratifiée (mai-octobre) (a) et période non stratifiée (novembre–avril) (b) le long de deux transects situés aux limites ouest et est du plateau du golfe du Lion et la partie supérieure de la pente (Sources : CEFREM ; données 1986 et 2006).

Ainsi la distribution de la matière particulaire près du fond est-elle caractérisée par la persistance tout au long de l'année d'une couche néphéloïde de fond, dont la zone de concentration maximale varie avec la position des sources de sédiments en suspension : embouchures des rivières côtières et remise en suspension pendant l'hiver, plateau médian durant l'été. La moyenne des concentrations en MES dans cette couche est faible, généralement comprise entre un et quelques milligrammes par litre. Le matériel particulaire dans la couche

néphéloïde de fond est composé de particules fines – argiles et limons fins –, qui ont tendance à former des agrégats pouvant mesurer jusqu'à 1 mm de diamètre [15] [16]. Les micro-flocs ($\approx 50 \mu\text{m}$) et les macro-flocs ($\approx 150 \mu\text{m}$) constituent les tailles les plus couramment observées [17].

Afin de connaître l'extension des couches néphéloïdes depuis le plateau jusqu'à la pente et leur variabilité spatiale et temporelle, un certain nombre de campagnes de mesures ont été menées de manière synoptique. Une couche néphéloïde intermédiaire a été identifiée à la rupture de pente dans la continuité de la couche néphéloïde de fond sur le plateau [18] [19] ; de petites couches néphéloïdes intermédiaires apparaissent plus profondément dans les canyons [20]. Durrieu de Madron *et al.* [18] et Lapouyade et Durrieu De Madron [21] ont montré que l'intensité et la taille des structures turbides augmentent d'environ un ordre de grandeur entre les limites est et sud-ouest du plateau. L'extension vers le large des structures néphéloïdes est limitée par la circulation générale le long de la pente, qui balaie le matériel particulaire exporté du plateau et l'entraîne vers le sud-ouest. Les concentrations en MES sont plus élevées dans les têtes de canyon que sur les pentes voisines, révélant leur rôle de pièges naturels et de convoyeurs de matière particulaire vers la pente et le bassin profond.

3.4. TURBIDITÉ DE SURFACE

La chlorophylle *a* et la turbidité sont deux paramètres environnementaux issus des capteurs satellitaires dits « de la couleur de l'eau ». La technique de mesure, sensible aux nuages, est dite « passive », par opposition aux techniques basées sur les radars. Le principe de base consiste à mesurer le signal (radiance) réémis par la couche de surface océanique après absorption et diffusion de la lumière solaire (irradiance). Dans les eaux côtières, le milieu est optiquement complexe, car les matières minérales remises en suspension par le courant de marée et les tempêtes ainsi que les substances organiques dissoutes colorées, véhiculées dans le panache des fleuves, vont ajouter leurs effets à l'eau pure et au phytoplancton. Si la chlorophylle *a* est estimée par une technique empirique dérivée du rapport des réflectances bleu/vert, les MES sont déduites d'un algorithme semi-analytique qui fait intervenir les propriétés optiques inhérentes au milieu, l'absorption et la rétrodiffusion. La turbidité est ensuite calculée à partir de la concentration en chlorophylle *a* – biomasse du phytoplancton – et de la concentration en MES minérales.

Des atlas de turbidité moyenne mensuelle ont ainsi été réalisés à partir des données satellitaires entre 2003 et 2009, après validation *via* des mesures *in situ* prises le long du littoral – principalement les mesures issues des réseaux pérennes comme Somlit et Rephy (Figure 3). Elles reflètent la forte variabilité saisonnière de la turbidité minérale, essentiellement liée à la remise en suspension des sédiments par les vagues en période hivernale.

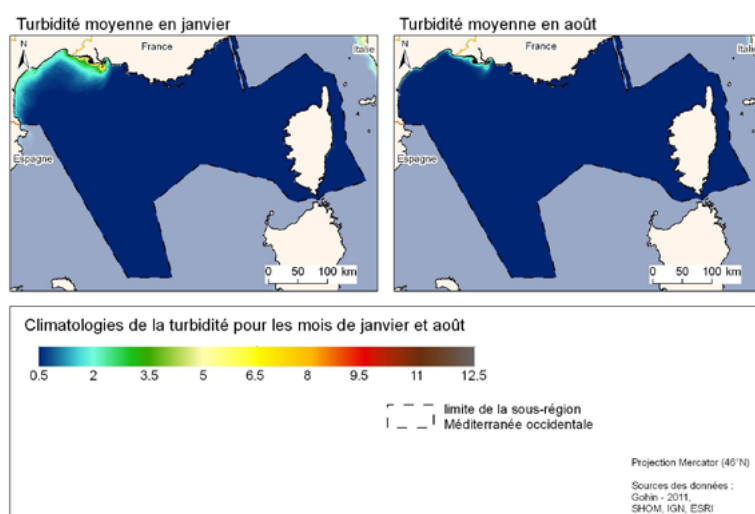


Figure 3 : Climatologies de la turbidité pour les mois de janvier et août (Sources : Gohin, 2011 (22), SHOM, IGN, ESRI).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Brenon I., 1997. Modélisation de la dynamique des sédiments fins dans l'estuaire de la Seine, Thèse de doctorat, Université Bretagne Occidentale.
- [2] Waeles B., 2005. Modélisation morphodynamique de l'embouchure de la seine, Ph.D. Thesis, Université Caen Basse Normandie.
- [3] Dufois F., 2008. Modélisation du transport particulaire dans le Golfe du Lion en vue d'une application au devenir des traceurs radioactifs issus du Rhône. PhD Thesis, Université du Sud Toulon-Var. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/6308/>
- [4] Tessier C., 2006. Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière : L'exemple de la région marine Bretagne Sud. PhD Thesis, Université de Bordeaux 1. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/2325/>
- [5] Ferré B., 2004. Comparaison de l'effet des tempêtes et du chalutage sur la resuspension et le transport de matières particulaires dans le Golfe du Lion, Thèse de doctorat, CEFREM.
- [6] Ulsès C., 2005. Dynamique océanique et transport de la matière particulaire dans le Golfe du Lion : crue, tempête et période hivernale, thèses Laboratoire Aérologie.
- [7] Guillou N., 2007. Rôles de l'hétérogénéité des sédiments de fond et des interactions houle-courant sur l'hydrodynamique et la dynamique sédimentaire en zone subtidale - applications en Manche orientale et à la pointe de la Bretagne, Université Bretagne Occidentale.
- [8] Bourrin F., Friend P.L., Amos C.L., Manca E., Ulses C., Palanques A., Durrieu de Madron X. et Thompson C.E.L., 2008b. Sediment dispersal from a typical Mediterranean flood: the Têt, Gulf of Lions. *Continental Shelf Research*.
- [9] Pont D., Simonnet J.-P. et Walter A.V., 2002. Medium-term Changes in Suspended Sediment Delivery to the Ocean: Consequences of Catchment Heterogeneity and River Management (Rhône River, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 54: 1-18.
- [10] Bourrin F., Durrieu de Madron X. et Ludwig W., 2006. Contribution of the study of coastal rivers and associated prodeltas to sediment supply in North-western Mediterranean Sea (Gulf of Lions). *Vie et Milieu* 56: 1-8.
- [11] Dufois F., Garreau P., Le Hir P., Forget P., 2008. Wave- and current-induced bottom shear stress distribution in the Gulf of Lions. *Continental Shelf Research*, 28(15), 1920-1934. Publisher's official version : <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2008.03.028>, Open Access version : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00000/6305/>
- [12] Guillén J., Bourrin F., Palanques A., Durrieu de Madron X., Puig P. et Buscail R., 2006. Sediment dynamics during wet and dry storm events on the Tet inner shelf (SW Gulf of Lions). *Marine Geology* 234: 129-142.
- [13] Bourrin, F., Durrieu de Madron X., Heussner S. et Estournel C., 2008a. Impact of winter dense water formation on shelf sediment erosion (evidence from the Gulf of Lions, NW Mediterranean). *Continental Shelf Research*.
- [14] Aloisi J.C., Cambon J.P., Carbonne J., Cauwet G., Millot C., Monaco A. et Pauc H., 1982. Origine et rôle du néphéloïde profond dans le transfert des particules au milieu marin. Application au golfe du Lion. *Oceanologica Acta* 5 : 481-491.
- [15] Ferré B., Guizien K., Durrieu de Madron X., Palanques A., Guillén J. et Grémare A., 2005. Fine grained sediment dynamics during a strong storm event in the inner-shelf of the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Continental Shelf Research* 25: 2410-2427.
- [16] Curran K.J., Hill P.S., Milligan T.G., Mikkelsen O.A., Law B.A., Durrieu de Madron X. et Bourrin F., 2007. Settling velocity, effective density, and mass composition of suspended sediment in a coastal bottom boundary layer, Gulf of Lions, France. *Continental Shelf Research* 27: 1408-1421.
- [17] Bourrin F., 2007. Variabilité et devenir des apports sédimentaires par les fleuves côtiers : cas du système Têt-littoral roussillonnais dans le golfe du Lion. Thèse de doctorat, Université de Perpignan Via Domitia, 305 p.
- [18] Durrieu de Madron X., Nyffeler F. et Godet C.H., 1990. Hydrographic structure and nepheloid spatial distribution in the Gulf of Lions continental margin. *Continental Shelf Research* 10: 915-929.
- [19] Durrieu de Madron X. et Panouse M., 1996. Transport de matière en suspension sur le plateau continental du golfe du Lion - Situation estivale et hivernale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris Série D* 322 : 1061-1070.
- [20] Durrieu de Madron X., 1994. Hydrography and nepheloid structures in the Grand-Rhône canyon. *Continental Shelf Research* 14: 457-477.
- [21] Lapouyade A. et Durrieu de Madron X., 2001. Seasonal variability of the advective transport of particulate matter and organic carbon in the Gulf of Lions (NW Mediterranean). *Oceanologica Acta* 24: 295-312.
- [22] Gohin F., 2011. Atlas de la Température, de la concentration en Chlorophylle et de la Turbidité de surface du plateau continental français et de ses abords de l'Ouest européen, Rapport Ifremer pour la DCSMM.