

# FUSION DE DONNÉES ANCIENNES ET RÉCENTES POUR RÉALISER UNE CARTE MONDIALE DES SÉDIMENTS MARINS

*par Thierry Garlan, Isabelle Gabelotaud, Edith Le Borgne, Sylvain Lucas, Mélanie Durupt et Elodie Marchès*

*Service hydrographique et océanographique de la Marine  
13, rue du Chatellier  
CS 92803 29228 BREST Cedex 2  
thierry.garlan@shom.fr*

---

*Les cartes sédimentaires reposent en général sur des données récentes ; elles sont remplacées plusieurs décennies plus tard lorsqu'une nouvelle technique apparaît. Pour une carte mondiale une telle approche n'est pas possible, il est donc nécessaire de fusionner des données très diverses. La carte présentée ici, diffusée en accès libre, est l'aboutissement de 25 ans de développement. Elle avait été initiée pour la recherche d'épaves, la pose de câbles et la propagation acoustique et trouve de nouvelles applications pour l'étude du piégeage du CO2 et la modélisation du réchauffement climatique.*

**Mots-clés :** *Carte mondiale, fusion de données, sédiments marins*

*Sediment maps usually come from analysis of recent data. They are replaced several decades later when a new technique appears. For a world map such an approach is not possible, it is therefore necessary to merge very diverse data. The map presented here, broadcast in free access, is the culmination of 25 years of development. It had been initiated for the search for wrecks, installation of cables and acoustic propagation and finds new applications for the study of CO2 trapping and global warming modeling.*

**Keywords :** *Data Fusion, Marine Sediments, World Map,*

## Introduction

La nature des sédiments, la quantité de matière organique emprisonnée dans ceux-ci, les caractéristiques des fluides intergranulaires et les phénomènes physico-chimiques sont en effet des paramètres abiotiques primordiaux pour les études de biologie marine. La granularité des sédiments est particulièrement importante pour la connaissance des organismes benthiques et dans une moindre mesure pour toutes les espèces marines. La nature du fond marin est un facteur important ; favorisant ou entravant la transmission à distance des signaux acoustiques sous-marins, elle influe sur l'hydrodynamisme par la variation du frottement qu'elle impose aux courants et doit donc être prise en compte dans les modèles de courants ou de propagation des houles. C'est un élément important des cartes marines car la présence de roches ou de dunes sous-marines peut marquer des zones à risques potentiels, les natures de fond servent ainsi à définir la route la plus sûre, à indiquer les zones où l'ancrage est possible ainsi que le type d'ancre devant être utilisé. La connaissance de la nature des fonds marins est primordiale pour la mise en place des pipe-lines, afin d'éviter leur enfouissement qui entraverait leur surveillance

régulière. La connaissance de la morphologie et de la répartition géographique des sédiments est également primordiale pour la pose et la protection des câbles sous-marins. Les matériaux les plus exploités sur terre sont les granulats avec plus de 35 milliards de tonnes prélevés par an (*United Nations Environment Program*, 2014) et avec l'épuisement des ressources terrestres, l'extraction d'agrégats marins va croissante. En plein essor également : les énergies marines renouvelables dont la mise en place nécessite une connaissance de la répartition des sédiments, de leur épaisseur et de leur dynamique, la recherche d'épaves anciennes, de vestiges de batailles navales, et la détection des bombes et des mines des dernières guerres qui peuvent être partiellement ou totalement enfouies et apparaître au gré de la dynamique sédimentaire. Le sédiment est également le marqueur des évolutions climatiques passées, ainsi la modélisation du piégeage du carbone par les grands fonds repose sur une bonne connaissance de la répartition des sédiments océaniques. Avec des besoins de modélisation et de protection de l'environnement marin de plus en plus précis, la connaissance des sédiments marins va ainsi croissante. Mais même en faisant abstraction de toutes ces applications, le simple besoin de connaissance

des fonds marins devrait à lui seul suffire pour motiver le développement et la publication de cartes caractérisant la répartition des sédiments des côtes jusqu'aux grands fonds.

Pour répondre à ces besoins, la sédimentologie marine est soumise à une croissance et une diversification des techniques de mesures, mais l'acquisition de données sur site étant très coûteuse, les zones couvertes demeurent restreintes et les données trop parcimonieuses. Avec les progrès de la technique, la tendance a été au cours des deux derniers siècles de définir de nouveaux produits à chaque fois que de nouvelles techniques d'acquisition apparaissaient, sans tenir compte de toutes les connaissances accumulées précédemment. Dans le domaine de la cartographie des sédiments marins cela a été le cas avec l'arrivée successive du plomb suiffé, des prélèvements à la benne et par carottage, puis des systèmes d'imagerie acoustique par sonar latéral puis par sondeur multifaisceaux et enfin des systèmes acoustiques de classification des fonds. Chacun a généré une amélioration de la précision des données et des connaissances sur les processus sédimentaires, permettant ainsi la réalisation de cartes plus précises mais sur des zones restreintes. Le besoin de cartes sédimentaires très précises à proximité des côtes et de cartes des fonds marins à moyenne échelle sur le plateau continental et l'océan profond augmente. Chaque année, les surfaces étudiées avec les moyens nautiques actuellement en usage couvrent moins de 1 % des plateaux continentaux. Il faudra ainsi plus d'un siècle avant d'avoir une cartographie basée sur des données acquises avec les moyens modernes. Il est donc impossible d'avoir une couverture globale de qualité homogène. La solution mise en œuvre depuis une vingtaine d'années au Shom (service hydrographique national de France) consiste donc à rechercher toutes les données, à les normaliser, à les intégrer en base de données, puis à les fusionner pour produire des cartes sédimentaires. La solution est ensuite de compléter progressivement ce socle, parfois grossier, avec des données plus récentes afin de maintenir une carte à jour de la connaissance. Cette méthode, tout d'abord appliquée aux cartes sédimentaires à 1:50000 des côtes françaises, a été rapidement étendue au domaine océanique (Garlan, 1995).

## **Fusion de données pour la cartographie sédimentaire**

Depuis l'avènement de l'imagerie acoustique, la cartographie des sédiments marins repose sur la fusion de ces données couplées aux résultats d'analyses de sédiments prélevés sur le fond marin. Mais jusque dans les années 1980, les cartes des fonds marins étaient

réalisées à partir d'échantillons de sédiments prélevés avec des dragues ou des bennes, et dans les temps encore plus anciens la cartographie reposait sur la description visuelle des sédiments collés sur la semelle du plomb suiffé mis en œuvre par les hydrographes. Le fond évidé du plomb rempli de suif retenait le sédiment qui s'y était collé lorsque le plomb avait touché le sol. Les premières descriptions de la nature des fonds par une telle méthode remontent aux années 1750 (Rawsthorne, 2020), puis en 1897 le service hydrographique a publié pour la Marine Nationale la première carte de sédiments des fonds marins basée sur de telles séries de mesures au plomb suiffé (Garlan, 2012). Les cartes basées sur des prélèvements à l'aide de dragues, de bennes et de carottiers se sont ensuite généralisées à partir des années 1960 et sont encore régulièrement publiées notamment en Grande-Bretagne et au Japon, mais elles ont en partie cédé la place à des cartes basées sur des données de réflectivité acoustique. Ces dernières sont apparues à la fin des années 1980 avec l'interprétation de mosaïques d'images de sonars à balayage latéral (SSS) puis à partir de données similaires obtenues à l'aide de sondeurs multifaisceaux (SMF). Ces 270 ans d'évolution des techniques ont engendré un affinement de la connaissance des sédiments marins, mais la restriction à une production de cartes beaucoup mieux résolues, car basées sur les techniques les plus modernes, mais couvrant des secteurs beaucoup plus restreints. Si la même approche était appliquée en bathymétrie, seules quelques cartes marines locales couvrant de petits secteurs seraient publiées chaque année. Pour les cartes marines, les sondes les plus anciennes sont progressivement remplacées, mais des données acquises au plomb de sonde peuvent demeurer sur les cartes marines un siècle après leur acquisition. Pour que les cartes de sédimentologie marine progressent, il semble primordial de fonder une approche cartographique basée sur les mêmes principes et donc d'utiliser les données anciennes et d'améliorer progressivement les cartes obtenues au fur et à mesure de l'ajout de données plus récentes. Une telle approche est particulièrement indispensable pour la réalisation d'une carte mondiale des sédiments marins, mais même pour les cartes côtières à 1:50 000, une telle approche est nécessaire pour pouvoir répondre aux multiples besoins. Seules des études d'impact précises doivent reposer sur des données acquises à un moment donné. Ceci est nécessaire par exemple pour l'implantation de parcs d'éoliennes, pour l'exploitation d'agrégats marins ou pour la pose de câbles sous-marins. La haute résolution requise est associée à un moment donné, afin de pouvoir reprendre ensuite ces travaux et étudier les évolutions temporelles des fonds. Pour cela encore sont observées des similitudes avec les données bathymétriques des cartes marines. En effet, aux échelles du 1:50000 la bathymétrie peut

être estimée stable sur une période de plusieurs décennies. Mais à plus grande échelle, peuvent être observés des déplacements annuels décamétriques, par exemple des dunes marines, pouvant nécessiter de renouveler les levés hydrographiques. Ainsi, la fusion croisée de données sédimentaires d'âges différents est une nécessité, mais elle doit être limitée aux cartes régionales.

Les présents travaux concernent donc les cartes sédimentaires des fonds marins de l'échelle régionale jusqu'à l'échelle mondiale. La production de telles cartes par le Shom a abouti à la production de cartes du littoral français à 1:50000 (Garlan, 1993) et de la carte mondiale des sédiments des fonds marins (Garlan *et al.*, 2018). Une telle approche nécessite d'avoir une classification indépendante adaptée à chacun des systèmes d'acquisition et d'avoir des données standardisées. Ainsi, comme les autres sciences, la sédimentologie est soumise à un accroissement et une diversification des techniques employées, une interaction accrue avec d'autres sciences notamment la biologie et une fragmentation de l'information. De plus, elle est soumise à des difficultés propres aux sciences de la terre, telles que des incertitudes sur la datation des événements et des problèmes de normalisation. La démarche appliquée démontre qu'il est possible d'améliorer les connaissances en structurant des cartes sédimentaires à partir de données du passé puis en les enrichissant avec des données issues des méthodes les plus modernes. La structuration de ces données et leur gestion permet une cartographie riche de siècles de travaux réalisés par les générations précédentes sans avoir à attendre une couverture actualisée au niveau global. L'histoire de la sédimentologie montre que de nouvelles techniques sont toujours apparues avant qu'une couverture globale n'ait pu être réalisée. Comme une couverture complète par les données sédimentologiques des océans nécessiterait plus d'un siècle de mesures avec les technologies et moyens nautiques actuels, la méthode de fusion proposée est en fait la seule réaliste. L'objectif est d'avoir la meilleure représentation possible et de répondre à la plupart des besoins de connaissance des fonds marins, qui se sont multipliés ces dernières années.

## **Une évolution des connaissances variable selon les domaines marins**

Les plages présentent l'avantage d'être facilement accessibles et sont étudiées par la répétition de nombreux levés réalisés pour la protection du littoral, la prévention des risques contre les inondations, les constructions d'équipements portuaires et touristiques. Ce domaine étudié dans le cadre de programmes de recherche nationaux et internationaux permet

une relativement bonne cartographie des plages et de leurs abords immédiats. Le domaine offshore du plateau continental est à l'opposé mal connu, ce manque d'informations provient du manque d'intérêt porté à ce domaine le plus souvent décrit comme assez plat et recouvert de sédiments généralement grossiers et ne présentant en première approche que peu de changements, la dynamique des sédiments y étant assez faible. Seule la relation entre la nature des fonds et les espèces marines ainsi que les besoins de détection des engins explosifs historiques y motivait jusqu'alors l'existence de cartes sédimentaires. Les sédiments n'avaient pas de valeur économique avant l'accroissement du prix des granulats et l'installation en mer de centres de production d'énergie renouvelables. Les plateaux continentaux sont le domaine des bancs de sable, des dunes sous-marines, des pockmarks qui sont des cratères liés à l'évacuation de gaz biogénique, des affleurements rocheux, des vasières de plates-formes continentales... De telles structures sédimentaires sont encore découvertes à quelques kilomètres du littoral, et cela même sur les côtes européennes. Plus au large le talus continental et les grands fonds sont en comparaison plutôt mieux connus. Il serait néanmoins excessif de prétendre que les grands fonds marins sont bien connus, mais des cartes de très bonne qualité de vastes secteurs sont réalisées depuis les années 90, grâce aux sondeurs multifaisceaux grands fonds qui avec une fauchée pouvant atteindre 7 fois la profondeur, permettent assez rapidement de couvrir de vastes surfaces avec des données de grande qualité, venant enrichir progressivement cette connaissance. De grands programmes consacrés à la tectonique des plaques, la pose de câbles transocéaniques, et l'exploitation minière (hydrate de gaz, nodules polymétalliques) permettent de disposer de grandes quantités de levés qui enrichiront les prochaines versions de la carte sédimentaire mondiale. Comme la variabilité latérale est souvent modérée dans ces grands fonds, et que les taux de sédimentation y sont de l'ordre du centimètre par milliers d'années, il est probable que la cartographie du domaine océanique sera achevée dans les prochaines décennies alors qu'une grande partie des plateaux continentaux restera encore à explorer.

## **Une connaissance dépendante de l'évolution des systèmes d'acquisition**

Une analyse des échantillons de sédiments par tamisage ou par caméra granulométrique pour les sédiments les plus grossiers, et par granulométrie laser pour les plus fins, permet de fournir à partir d'échantillons sédimentaires une description très précise de la taille, de la forme, de la nature et de l'hétérogénéité des particules sédimentaires. Certains

pays comme le Portugal (Instituto Hidrografico, 1985) ou le Japon (Katayama *et al.*, 2000) ont initié depuis plusieurs décennies des campagnes d'échantillonnage selon une grille régulière des sédiments à l'échelle de leurs plateaux continentaux. Dans les autres régions du monde, la répartition des échantillons est très inhomogène et toujours bien en deçà des besoins. Une telle approche basée sur l'échantillonnage a l'avantage de permettre une cartographie à l'aide de techniques géostatistiques non linéaires (Rosa *et al.*, 2013). Cependant elle sous-estime toujours les affleurements rocheux, de plus les coûts d'acquisition en mer et le temps de traitement de chaque échantillon limitent cette approche aux quelques régions où sont menées des recherches à haute résolution. Depuis les premières données acquises au plomb en 1750 jusqu'aux années 1980, les données utilisées pour la cartographie étaient basées sur des échantillons sédimentaires plus ou moins bien répartis. Certains chercheurs dès le 19<sup>e</sup> siècle ont enrichi leur expertise en prenant en compte la morphologie des fonds marins issue des données de bathymétrie. La densité des données plomb suiffé a pu atteindre au 19<sup>e</sup> siècle jusqu'à 177 points/km<sup>2</sup>, en particulier à proximité de certains secteurs des côtes françaises mais également sur les côtes du Vietnam par exemple. De telles densités de points permettent de tracer facilement les limites d'extension des différents faciès sédimentaires. En 1950, avec l'avènement des sondeurs bathymétriques acoustiques, l'acquisition de données bathymétriques s'est faite sur profil engendrant la fin de l'acquisition de données sédimentaires qui nécessitaient des manœuvres et la réalisation de stations. La distance entre les échantillons s'est ensuite espacée avec des distances qui étaient de l'ordre de la dizaine de kilomètres entre les échantillons dans les années 1970, dégradant la qualité des cartes sédimentaires. Et il a fallu attendre l'arrivée des systèmes acoustiques à la fin des années 1980 pour pouvoir retrouver une vision surfacique de la répartition des sédiments. L'imagerie acoustique permet de caractériser précisément l'extension des affleurements rocheux, et de révéler la forme et la répartition des structures sédimentaires telles que les dunes, les rubans sableux, les volcans de boue... qui n'avaient été précédemment que décrites dans les formations géologiques mais qui étaient peu reconnus sur les fonds marins actuels. La cartographie s'est focalisée dans les années 90 sur ces nouvelles données acoustiques qui révolutionnaient la connaissance des fonds marins en focalisant la cartographie sur les structures sédimentaires et non sur les constituants du fond comme cela l'était auparavant. La cartographie des sédiments a ainsi évolué au cours des âges au gré des progrès techniques. Les cartes basées sur de hautes densités de descriptions visuelles des plombs suiffés ont été

suivies de cartes basées sur des échantillons dispersés prélevés avec des bennes, dragues et carottiers, puis sont venues les cartes morpho-structurales d'imagerie sonar à balayage latéral et enfin de mêmes cartes basées sur les données de réflectivité des sondeurs multifaisceaux (MES). Ce n'est qu'avec l'avènement de cette imagerie et des systèmes supervisés de classification des fonds marins dans les années 1990 que la sédimentologie a pu se développer à nouveau. Nous observons deux grandes périodes d'acquisition de données sédimentaires avant 1940 et après 1990 et une beaucoup plus faible acquisition de données sédimentaires durant la quarantaine d'années qui les ont séparées ; mais, sans que l'on puisse l'expliquer, c'est durant cette période et en particulier de 1965 à 1985 que le plus grand nombre de cartes sédimentaires ont été publiées. Un autre aspect important est la stabilité des sédiments. Pour cet aspect, la règle est que plus on s'approche d'une échelle proche du 1:1000, plus l'on observe une mobilité des sédiments marins. Sur le littoral, la stabilité est rare et se trouve perturbée dès le passage de fortes houles de tempête. Par de plus grandes profondeurs et en particulier en-deçà de la limite d'action des houles, qui varie de quelques mètres à une vingtaine de mètres de profondeur, les sédiments sont plus stables et les changements ne sont visibles que dans certains environnements spécifiques tels que la tête des canyons ou les flancs de volcans sous-marins, mais même dans ces cas, l'évolution des zones sédimentaires n'est visible que sur des cartes des fonds marins à des échelles plus grandes que 1:100000. Pour la carte sédimentaire mondiale, les données côtières sont trop précises et trop instables pour être prises en compte. Elles peuvent éventuellement être généralisées dans des produits intermédiaires avant intégration.

Ainsi, les systèmes d'acquisition de données sédimentaires se sont succédés au fil du temps permettant d'augmenter progressivement la qualité de l'information sur les sédiments et de découvrir la grande variabilité des fonds marins (fig. 1). Mais la mise en œuvre couplée de tous les systèmes demeure exceptionnelle et malgré les apports des systèmes les plus récents, la surface couverte par des cartes de la nature des fonds marins de qualité s'accroît très lentement. Cette croissance est, en première approximation, inférieure à 1% de la surface des fonds marins chaque année.

## L'apport des systèmes acoustiques

Les prélèvements sédimentaires sont les données les plus importantes car il s'agit de la donnée de référence nécessaire au géologue pour l'interprétation de toutes les autres données qu'il s'agisse de photographies, de

films ou de données acoustiques. Toutes ces données doivent être associées à des données bathymétriques définissant la morphologie précise des fonds. Une fois ces deux ensembles de données primordiales acquises, la cartographie est possible. Le couplage de données de prélèvements ponctuelles avec les données bathymétriques haute résolution permet la prise en compte des structures décamétriques à hectométriques comme les dunes, les bancs de sable, les volcans, les systèmes turbiditiques ... qui sont souvent à l'origine des limites entre différents types de sédiments, et de la limite entre les sédiments et la roche. Pour réaliser une carte avec ces deux seules données, l'expertise du sédimentologue est nécessaire afin de prendre en compte les processus sédimentaires ayant conduit à la répartition de ces sédiments. Pour une cartographie plus précise, des données de raffinement que nous qualifierons de données de deuxième ordre doivent être ajoutées, à savoir l'imagerie acoustique issue de sonar latéraux (SSS) ou de sondeurs multifaisceaux (MES), des vidéos sous-marines, des données sismiques permettant une connaissance de la variabilité des couches sédimentaires sous-jacentes, des données de systèmes de classification des fonds acoustiques tels que RoxAnn, SIVA ou QTC qui permettent de transcrire le signal acoustique en paramètres tels que la rugosité et la dureté et de remonter ainsi à une nature de fond. En troisième ordre, la mesure des propriétés physiques des sédiments, des courants proches des fonds marins, et l'analyse chimique des particules et des fluides permettent de focaliser l'analyse au niveau des grains et de leur organisation. Pour une fréquence et un angle d'incidence donnés, les systèmes acoustiques fournissent des informations combinant la granularité, la nature des fluides interstitiels, ainsi que la rugosité de la surface avec un fort impact des microrugosités telles que les rides et les traces dues à l'activité biologique. La présence de gaz dans les argiles donne par exemple une forte réflectivité comparable à celle fournie par certaines roches. Il s'ensuit que les limites sédimentaires varieront d'un système à l'autre selon sa fréquence et l'angle de rasance des ondes acoustiques. Des systèmes de classification des fonds marins assez discriminants, tels que Roxann (Pace, 1990), SIVA ou QTC (Prager *et al.*, 1995), utilisés à des fréquences proches de 50 kHz, c'est-à-dire suffisamment basses pour pénétrer les sédiments mais suffisamment élevées pour ne pas traverser plusieurs couches de sédiments, apportent une solution pour étendre la connaissance apportée par l'échantillon ponctuel à tout le profil suivi par le bateau. Ces systèmes permettent aussi de réduire le nombre d'échantillons qui ne servent plus alors que de données d'étalonnage à ces mesures acoustiques. Ces données sont également affectées par la rugosité

du fond et par la nature des fluides interstitiels, et nécessitent donc également des échantillons de sédiments pour permettre la cartographie, mais elles ont l'avantage de mieux représenter la variabilité des fonds en discriminant une large gamme de sédiments là où l'imagerie acoustique se limite à la délimitation de quelques faciès sédimentaires.

## **Les clés de la réussite de la cartographie sédimentaire**

La répartition géographique des connaissances est associée à une évolution historique des techniques d'acquisition qui est schématisée par la figure 1.

Ces nouveaux systèmes, avec leur vision surfacique des fonds marins, ont été utilisés pour délimiter les structures sédimentaires en complément des données géomorphologiques. Tous ces systèmes permettent, depuis les années 90 d'obtenir des cartes sédimentaires de très haute précision allant jusqu'à la représentation d'éléments métriques. Au-delà de 1:500 000 la technique consiste le plus souvent à ne réaliser les cartes que sur la base des prélèvements ponctuels qui ont l'avantage de reposer sur une homogénéité des données et sur une grande précision de la granularité, mais l'inconvénient d'omettre les zones rocheuses qui ne peuvent être échantillonnées ainsi que les structures sédimentaires comme les volcans de boue ou les champs de dunes. Afin de bénéficier de toutes les données d'entrée acquises, sans discrimination de technique de mesure, d'âge ou d'échelle, la méthode mise en œuvre repose sur la fusion des cartes de la grande à la petite échelle pour aboutir en fin de processus à la carte mondiale des sédiments marins présentée ici. Ceci nécessite de disposer d'une classification des sédiments adaptée aux sédiments de toutes profondeurs, de toutes latitudes et à toutes les échelles cartographiques.

## **Classification des sédiments des fonds marins des cartes des fonds marins**

Une classification des fonds marins doit reposer sur des caractéristiques précises, incontestables et clairement définies, sur des critères mécaniques ou minéralogiques garantissant que les différents opérateurs examinant le même échantillon l'identifieront toujours avec le même nom (Thoulet, 1907). La simple application de ces conditions suffirait à établir une classification unique quelle que soit la zone d'étude ou les moyens utilisés pour l'explorer. Malheureusement, l'imagerie acoustique ne satisfait pas à ces conditions car les résultats obtenus ainsi

dépendent des conditions environnementales, de la distance au fond et de la fréquence des systèmes de mesure.

L'analyse des différentes méthodes et approches appliquées à travers le monde (Garlan, 2004), montre qu'il reste un long chemin à parcourir avant de parvenir à un référentiel commun. Après avoir compilé des centaines de cartes sédimentaires et étudié les différentes classifications utilisées puis identifié les avantages de chacune d'entre-elles, il apparaît que les différences observées entre pays, laboratoires, voire entre cartes produites par un même laboratoire, sont en grande partie dues à des différences d'objectifs. Les autres écarts entre classifications proviennent des systèmes de mesure utilisés, de la latitude (grandes différences entre les sédiments polaires et tropicaux) et de la profondeur (plus grande différenciation des sédiments grossiers pour les côtes alors que cette différenciation se porte sur les vases pour les grands fonds). Tous ces critères engendrent la variabilité de la granularité et de l'hétérogénéité des sédiments, et donc une grande complexité des sédiments marins, ce qui explique les difficultés rencontrées pour atteindre une classification unique et reconnue internationalement.

Contrairement aux sédiments éoliens ou fluviaux, les sédiments des fonds marins sont en effet le plus souvent hétérogènes. Ainsi comment appeler un sédiment composé de blocs métriques largués en mer, lors de la fonte des glaciers, sur des argiles glaciaires dont les particules sont micrométriques. La multiplicité des processus dynamiques, l'origine et la forme des fragments lithologiques et biologiques et les facteurs hydrodynamiques favorisent cette hétérogénéité des sédiments marins. La qualité des cartes sédimentaires issues de prélèvements dépendent des quatre facteurs suivants : l'intervalle entre les prélèvements, l'équipement utilisé (carottier, benne, etc.), la méthode d'analyse (micro-granulométrie laser, tamisage, etc.) et la classification adoptée. D'autres facteurs tel que le temps alloué pour réaliser ces prélèvements, le matériel disponible pour la réalisation des analyses en laboratoire et des objectifs vont également influencer. Par exemple, le pas d'échantillonnage peut varier d'un facteur 100 d'une carte à l'autre, avec une faible densité d'échantillons il sera nécessaire de réduire le nombre de classes sédimentaires ce qui peut aboutir à des cartes ne comportant que 3 ou 4 types de sédiments. Par conséquent, la qualité et la résolution des cartes dérivées d'une même campagne d'échantillonnage peuvent varier considérablement. Comme le rappellent Konert et Vandenberghe (1997), les diagrammes utilisés pour les classifications impliquent divers facteurs techniques en laboratoire

qui ont évolué au cours des âges. Théoriquement, un nom de sédiment devrait pouvoir inclure toutes les phases granulométriques, de l'argile au bloc comme le fait la classification de Wentworth (1922) avec ses 11 classes pour des particules allant de 0,0001 à 300 mm. Mais une classification de sédiments marins doit également inclure tous les mélanges d'une ou plusieurs de ces classes sédimentaires. Comme une telle classification ne peut comprendre des centaines de classes, les classifications de la granularité des fonds marins privilégient les sédiments dominés par une classe et ceux composés de deux phases dominantes. Ainsi, définir le sédiment par un simple nom comme par exemple : sable, n'est pas aussi simple qu'il y paraît et cela ne fournit qu'une première indication, car ses composants et ses propriétés peuvent être très variés comme le montrent les collections de sables de plages qui peuvent être composées de milliers d'échantillons. Les cartes japonaises comportent ainsi 11 sortes de sable là où il n'y en a qu'une seule sur les cartes anglaises (Garlan, 2004). Si le sédiment est composé de grains de quartz, de mica, de débris de coquillages ou de spicules d'éponges, ses propriétés varieront de manière plus ou moins importante selon le domaine d'application considéré. De plus, la taille des grains d'un sable peut être unimodale, comme par exemple les dépôts éoliens, ou être très hétérogène comme c'est souvent le cas en milieu marin. La granulométrie des vases est encore plus complexe à définir, car l'observation visuelle et les méthodes de tamisages ne suffisent pas à les distinguer puisqu'elles contiennent des proportions variables d'argile ( $< 2 \mu\text{m}$ ) et de silts ( $63 \mu\text{m}$  à  $2 \mu\text{m}$ ) non dissociables par des méthodes simples. Certaines variations dans les proportions de vase jouent un rôle majeur dans le développement des espèces marines et la taille et la forme des grains de sable influent grandement sur les propriétés acoustiques et géotechniques des sédiments. Il est donc nécessaire de trouver la classification adaptée à la cartographie, mais assez précise pour rendre les cartes utilisables pour les différentes applications.

Il existe en fait une séquence continue de particules sédimentaires des argiles micrométriques aux blocs décimétriques. En raison de cette continuité le choix de limites est complexe. Wentworth (1922), qui a repris le système de classification développé par Udden en 1898, utilise une progression logarithmique pour définir 11 classes sédimentaires. Par la suite différentes classifications, telle que celle de Bourcart (1941), ont tenté de caractériser les sédiments selon leurs propriétés physiques, c'est-à-dire la cohésion des particules, l'absorbance, l'indice de plasticité et/ou le transport par les courants. Des classifications plus récentes telles que celles de Tauber et Lemke (1995) ou

celles du service géologique du Japon (Katayama *et al.*, 2000) introduisent des paramètres granulométriques tels que le classement ou la médiane pour prendre en compte cette hétérogénéité. Mais sur toutes les classifications étudiées, aucune n'est transposable à l'ensemble des sédiments marins. Pour pallier cet inconvénient, des schémas de classification basés sur des phases granulométriques ont été développés à l'aide de diagrammes triangulaires ou de tableaux à deux entrées. Une autre solution a été de reprendre la technique mise en œuvre par les hydrographes depuis plus de 2 siècles (Garlan, 2012) définissant le nom du sédiment à partir des deux ou trois composantes principales comme cela est fait pour les cartes marines mais aussi sur plusieurs cartes sédimentaires (Renaud *et al.*, 1899 ; Oberkommando der Kriegsmarine, 1934 ; Maritime Safety Agency, 1953, Lewis *et al.*, 1998), pour des cartes d'habitats benthiques (Thouzeau *et al.*, 1992), pour des études physiographiques (Diaz del Rio *et al.*, 1993), et pour les cartes sédimentaires couvrant de grandes régions (Rey Salgado, 1993 ; NOAA, 1990 ; Emylianov *et al.*, 1994).

## Bref historique des cartes mondiales des sédiments des fonds marins

D'après Thoulet (1907), l'étude de la lithologie sous-marine a été initiée dans les années 1880 par Bonjoux, capitaine de frégate, et Delesse, ingénieur de l'école des mines de Nancy. Bonjoux a inventé le recalage de la navigation par l'analyse en temps réelle des natures de fond pour la navigation de la marine de nuit ou dans des conditions de brouillard, et Delesse a étudié la sédimentologie actuelle pour améliorer la compréhension des observations des formations géologiques. Ces scientifiques sont les pionniers de la sédimentologie marine en France. Leur travail comprenait à la fin du 19<sup>e</sup> la collecte, l'analyse des constituants et la mesure de la granularité des échantillons récoltés avec les premières bennes. Thoulet a procédé à la compilation des données plomb suiffé du Service hydrographique et de quelques centaines de ses propres échantillons prélevés à la benne pour réaliser la série des cartes sédimentaires des côtes françaises à 1:100 000, qui reste encore actuellement la seule à couvrir l'ensemble du littoral français, de la frontière belge à la frontière italienne. Ces cartes publiées en 1912 reposent sur une classification très complète et standardisée : roche, sable (<5 % de vase), sable limoneux (5 à 25 % de vase), vase très sableuse (25 à 50 % de vase), sable vaseux (50 à 90% de vase), vase calcaire (>90% de vase), cailloux, pierres, graviers, sable sur roche, vase sur roche, coquillages vivants ou complets, coquillages broyés, herbiers, madrépores et maërl. Cela équivaut à seize classes de sédiments en plus de

la roche. Le professeur Delesse avait été initiateur de cette méthode de classification pour réaliser la carte du plateau continental européen (fig. 2) ainsi que celle du plateau continental nord-américain (Garlan *et al.*, 2018) qui a été publiée en 1869. Ces deux cartes ont été précurseurs dans le domaine de la cartographie des sédiments marins et ont déjà montré à quel point les plateaux continentaux étaient complexes, engendrant la remarque de Thoulet (1907) indiquant que pour être lisible une carte sédimentaire doit être limitée à la représentation de la granularité des sédiments.

Une quarantaine de cartes sédimentaires des grands fonds océaniques a été publiée dans la période de 1942 à 1991, mais leur analyse montre peu de différences entre les limites sédimentaires, seules les classifications utilisées engendrent des différences entre ces cartes. La fin de cette période de cartographie des sédiments océaniques est marquée par des synthèses sur la répartition des sédiments océaniques (Lisitzin 1972, 1986) et sur les propriétés acoustiques des sédiments océaniques mondiaux (Hamilton, 1976). La carte initiale utilisée pour réaliser la version zéro de la carte mondiale des sédiments est une synthèse de ces cartes éditée par l'UNESCO (Emelyanov *et al.*, 1990 ; Petschick *et al.*, 1996).

Les cartes sédimentaires peuvent représenter des informations variées telles que la granularité des particules, les composants chimiques du fond, les processus physiques, la répartition des structures sédimentaires ou géomorphologiques. À ces représentations est venue s'ajouter, dans les années 1980, la représentation de la réflectivité des fonds qui mixe sans les discriminer la granularité, la morphologie et les fluides interstitiels et dont les informations apportées dépendent de la fréquence, de l'angle de rasance, de la proximité du fond et des caractéristiques du sédiment. L'imagerie acoustique a amélioré la vision des fonds et en particulier dans les grands fonds océaniques, notamment : au pied du talus continental où les dépôts turbiditiques ont fait l'objet de nombreuses études liées à la recherche pétrolière et sur les dorsales médio-océaniques pour l'étude de la tectonique des plaques. Ces données ont également permis la délimitation des volcans, des volcans de boue, la recherche des nodules polymétalliques et, plus récemment, la délimitation des Zones Exclusives Economiques, dont l'extension peut être accrue selon l'épaisseur de sédiments. Dans ces fonds allant de 200 m jusqu'aux plus grands fonds, l'utilisation de cette imagerie permet de créer des cartes précises de vastes secteurs. Comme la couverture de cette imagerie couvre une largeur de l'ordre de sept fois la profondeur et que la répartition des sédiments est assez homogène sur les grands

fonds, les surfaces couvertes par des cartes des grands fonds marins progressent beaucoup plus rapidement permettant d'envisager une cartographie précise des grands fonds de tous les océans dans la prochaine décennie.

De grandes différences de terminologie des sédiments marins sont observées entre les centaines de cartes sédimentaires publiées depuis la première carte de 1897 (Renaud *et al*, 1899). Un travail de transposition reposant sur une classification unique a donc été nécessaire pour effectuer un travail de fusion de données pour réaliser des cartes régionales, comme par exemple la carte de la Méditerranée, et enfin la carte sédimentaire mondiale.

Une nouvelle génération de cartes mondiales des sédiments apparaît ces dernières années. Sur la base des descriptions de près de 14 500 échantillons provenant des rapports de campagnes océanographiques, une carte globale de la lithologie du fond marin a été réalisée pour les modèles de paléo-productivité et de cycles biogéochimiques globaux (Dutkiewicz *et al*, 2015). Cette étude démontre clairement la nécessité d'une représentation globale de la connaissance des fonds océaniques, mais elle met également en évidence la faible quantité de données d'échantillonnage disponibles (fig. 3). Cette carte est basée sur des échantillons prélevés avec une moyenne d'une donnée par zone de 25 000 km<sup>2</sup>, ce qui est trop faible pour visualiser la grande variabilité des fonds marins et les effets locaux tels que les contributions continentales, l'impact des courants de contour, les dépôts turbiditiques. Une telle approche se limite aux grands fonds, fait abstraction des plateaux continentaux et ne peut représenter l'extension des roches développées au niveau des rides médio-océaniques.

Cette approche montre également que la simple utilisation d'échantillons ponctuels de sédiments ne peut pas être utilisée seule pour cartographier les sédiments des fonds marins. En l'absence d'un maillage de données suffisant, la cartographie doit nécessairement intégrer l'ensemble des connaissances sédimentaires acquises des plus anciennes jusqu'à celles acquises avec les moyens modernes, car même comme cela la quantité de données demeure insuffisante. Enfin, les cartes des fonds marins doivent aller de la plage à l'océan profond afin d'intégrer pleinement le système allant de l'origine des sédiments à leur lieu de dépôt. Pour répondre à ces questions, le Shom a mis en place un programme de cartographie des fonds océaniques normalisée à l'aide de la classification Shom, basée sur la granularité

des sédiments adaptée à tous les fonds marins. Le programme a commencé en 1990 par la réalisation de cartes à très haute résolution, basées sur tous les systèmes d'acquisition mis en œuvre lors des levés les plus récents ; à 1:10000 pour la zone côtière et à 1:250000 pour les grands fonds. Un programme de production de cartes de synthèses au 1:50000 et au 1:150000 du littoral français ont dans le même temps été réalisées et publiées par le Shom sous forme papier (Garlan, 1993) et en ligne (<https://diffusion.shom.fr/pro/ressources/sedimentologie/natures-de-fond.html>). Enfin, en préparation à la carte sédimentaire mondiale des synthèses régionales comme par exemple de toute la Méditerranée ont été réalisées au 1:250000 et 1:500000. Ces synthèses sont également le résultat de fusion de données ponctuelles couplées aux données morphologiques et de données surfaciques comprenant des cartes sédimentaires préexistantes. Ces cartes intermédiaires sont progressivement intégrées à la carte mondiale qui s'enrichit ainsi progressivement depuis sa première édition de 2000. Pour chaque gamme d'échelles, est appliquée la même méthodologie reposant sur une norme unique indépendante de l'ancienneté et du type de données utilisées. Cette standardisation est associée à une base de données contenant toutes les données nécessaires à la réalisation des cartes, mais également les différentes versions des cartes ainsi produites.

## La carte sédimentaire mondiale

La carte mondiale des sédiments des fonds marins a été initiée par le Shom en 1996. Sa couverture n'a pas changé depuis la version initiale, elle couvre toutes les mers du monde à l'exception de l'Arctique et de l'Antarctique, au-delà des latitudes 72°N et 72°S, ce qui représente 96,6% des surfaces couvertes par les mers et les océans. Les premières versions de la carte mondiale des sédiments étaient utilisées exclusivement pour les besoins du Shom. Depuis 2012 cette carte est distribuée sous forme de fichier shape en open source. La 11<sup>e</sup> version (fig. 4) est disponible à l'adresse <https://diffusion.shom.fr/pro/ressources/sedimentologie/sedim-mondiale.html>. L'échelle équivalente pour les documents papier de ce produit serait de l'ordre de 1:500000. Cette carte sédimentaire des fonds marins était à l'origine basée sur une carte des océans intitulée «Carte sédimentaire du monde», réalisée par l'UNESCO mais non publiée. Elle a été numérisée par le Shom puis la classification d'origine a été adaptée selon la classification des sédiments du Shom (Garlan, 2004). Celle-ci comprend une classe pour les roches, 5 classes de sédiments simples : les cailloutis, les graviers, les sables, les sables fins et la vase. Lorsque les informations le permettent, la vase est séparée en silts et argiles. À ces sédiments

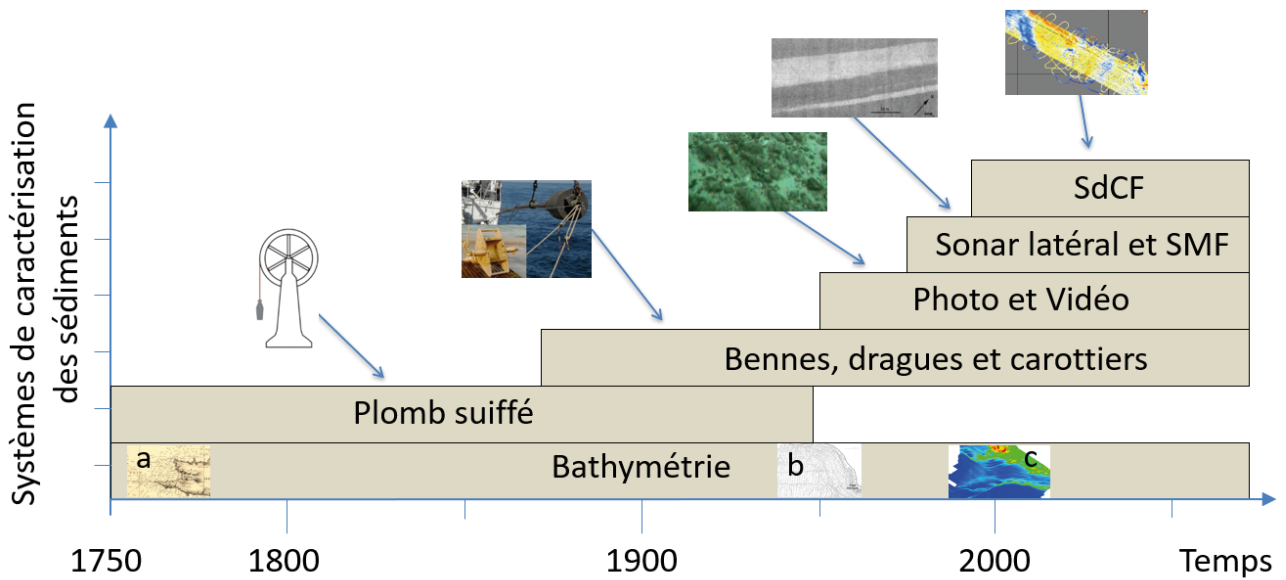


Figure 1 : Progression au cours du temps des systèmes d'acquisition mis en œuvre pour la cartographie des sédiments marins en parallèle de l'évolution des systèmes d'acquisition de la bathymétrie (a : plomb de sonde 1840\_1950, b : sondeur mono-faisceau 1950-2000 et c : sondeur multifaisceaux depuis 2000). SdCF : système de classification des fonds marins.

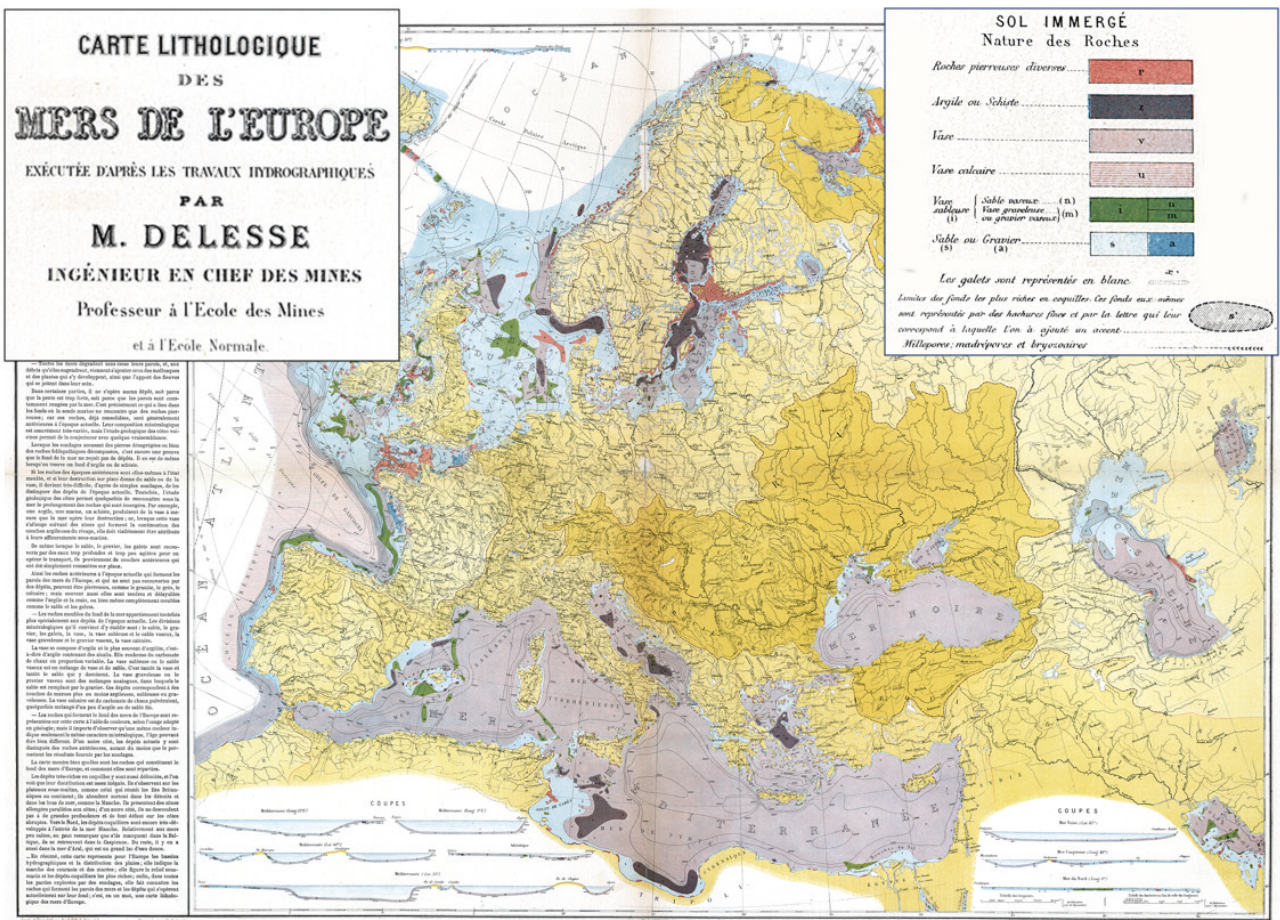


Figure 2 : La carte lithologique des mers de l'Europe (Delesse, 1872)

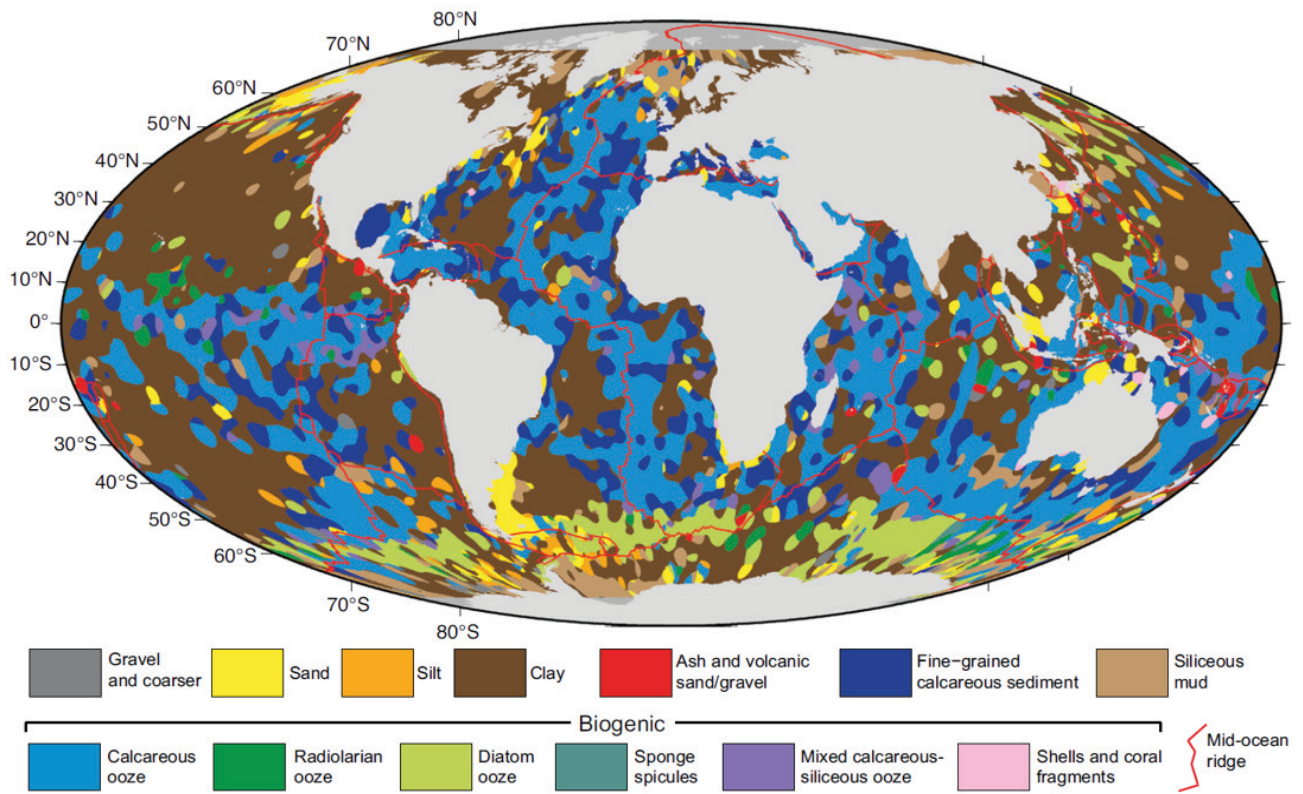


Figure 3 : Carte sédimentaire des principales lithologies des sédiments des bassins océaniques mondiaux (Dutkiewicz et al, 2015)

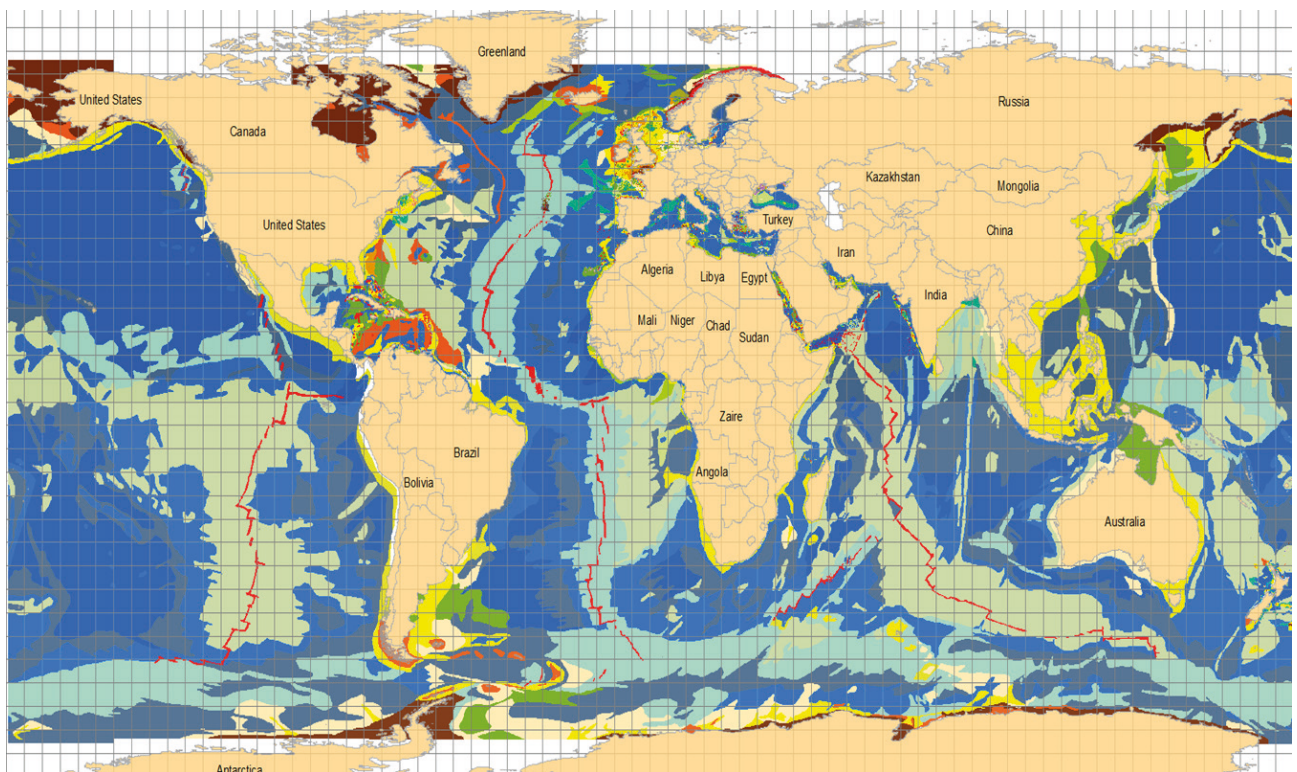


Figure 4 : Carte mondiale des sédiments marins v11.0 (Shom, 2021)

homogènes s'ajoutent 18 classes de mélanges binaires des éléments précédents et un mélange ternaire des sables graviers et vases nécessaire à la représentation des milieux périglaciaires. Les fonds marins peuvent ainsi être différenciés par 27 faciès sédimentaires. La carte initiale très imprécise permettait de disposer sur toutes les mers d'une information de base sur la nature des fonds marins. L'un des inconvénients de ce support initial est qu'il était focalisé sur les grands fonds et que la grande majorité des plateformes continentales était intégralement couverte de sables. La qualité de cette carte a été améliorée par secteurs, à commencer par l'Atlantique Nord et la Méditerranée. Ces ajouts ont consisté à rechercher des informations de meilleure qualité et à les intégrer dans la carte initiale. Pour ce faire chaque polygone comporte dans ses attributs l'information indiquant sa carte d'origine. Un second point important est de disposer pour la réalisation de ces fusions de l'expertise nécessaire, car il est essentiel de connaître et prendre en compte toutes les spécificités régionales pour bien intégrer de nouveaux composants dans le système complexe que sont les fonds marins.

Cette carte sédimentaire a été progressivement améliorée par l'intégration de cartes plus précises, récentes ou anciennes, réalisées par le Shom ou numérisées puis standardisées avant intégration. La onzième version est le résultat de la fusion de 283 cartes sédimentaires des fonds marins. Ces cartes ont été sélectionnées lorsque la zone qu'elles couvraient était suffisamment grande, et lorsque leur qualité et la valeur de leur contenu permettaient d'enrichir la carte globale (fig. 4). Les cartes qui ont été intégrées dans cette carte sédimentaire globale ont été publiées de 1921 à 2016 avec des échelles comprises entre 1:100000 et 1:1000000. Elles peuvent provenir d'anciennes données plomb suiffé, c'est par exemple le cas de la carte du plateau du nord Vietnam qui a été réalisée dans le cadre d'une étude sur les milliers de données plomb suiffé réalisées par le Service hydrographique français au Vietnam de 1901 à 1958 (Gabelotaud, 1996). La carte mondiale des fonds marins montrait dans toute cette région du sable alors que les données plomb suiffé présentent des fonds essentiellement vaseux ainsi qu'une multitude de petits affleurements rocheux autour desquels existent des sables. Une telle intégration nécessite de faire une correction des sédiments environnants en se basant sur les données de nature de fond des cartes marines régionales (fig. 5), mais perdurera une limite brute tant que les données des régions avoisinantes n'auront pas été

traitées. Il n'existe pas de projet cartographique de cette région actuellement, et une telle poursuite de la cartographie du plateau vietnamien à partir de ces données anciennes nécessiterait plusieurs années.

Les nouvelles données du plateau continental sont parfois plus conformes aux données de la carte initiale mais, de manière générale et en particulier en milieu intertropical, les nouvelles données introduisent des fonds plus vaseux que ne l'indiquait la carte initiale réduisant progressivement, au gré des nouvelles versions, la surface globale de sables. La carte mondiale peut ainsi permettre de calculer les surfaces de chaque classe sédimentaire, mais elle demeure de précision insuffisante pour obtenir les volumes de sables réellement disponibles et ainsi pouvoir les comparer aux volumes extraits. Et cela d'autant plus que les extractions ne s'effectuent que par des profondeurs inférieures à 70 m. Ce que montre l'évolution au cours des versions successives, c'est que la surface globale de sable doit être inférieure à ce qui est actuellement présenté sur la carte actuelle (fig. 4).

Au cours des onze éditions de la carte sédimentaire mondiale, l'amélioration a porté sur le domaine littoral qui était le moins bien caractérisé et qui présente une plus grande variabilité spatiale des sédiments. Certaines versions ont concerné l'amélioration de la qualité du produit et des limites entre les faciès sédimentaires. Au même titre que les données bathymétriques haute résolution améliorent la précision des isobathes sur les cartes marines, ces améliorations n'ont pas engendré de changement visible sur la carte ni de modification notable du nombre de polygones. L'amélioration de la connaissance par l'ajout de cartes côtières s'est intensifiée à partir de 2012, entraînant un accroissement du nombre de polygones de zones sédimentaires. Celui-ci est ainsi passé en 20 ans de 2 389 à 35 655 (fig. 6).

La petite quantité de cartes ajoutées dans l'hémisphère sud implique que le nombre total de polygones de l'hémisphère sud ne représente que 5% du nombre total du nombre total de polygones de la carte du monde. L'amélioration de la connaissance dans cette moitié du monde est nécessaire mais les données y demeurent peu nombreuses. Des quantités de cartes restent à intégrer et ce travail se poursuit en vue de la prochaine édition prévue en 2023. Cette amélioration du produit est nécessaire avant de l'utiliser comme un outil de caractérisation de l'état des lieux de la connaissance.

	Roche	Cailloutis et Gravieres	Sables et sables fins	Vases et silts	Argiles
% de polygones	39	16	37	7	1
% de Surface couverte	0,9	2,3	9,8	50,6	36,4

Tableau 1 : Pourcentage de polygones et de surfaces couvertes par les différents types de sédiments des fonds marins de la carte sédimentaire mondiale synthétisés en 5 classes principales

La carte globale des sédiments des fonds marins permet d'approcher les surfaces couvertes par chaque type de sédiment (tableau 1). La forte proportion d'argiles, de limons et de vase (87 %) est due à une grande domination de ces sédiments sur les grands fonds. Les sédiments océaniques n'étaient connus dans les années 1960 que par des échantillonnages clairsemés, et la figure 3 montre que l'approche d'une cartographie par les prélèvements aboutit aux mêmes résultats, de sorte que l'extension des zones rocheuses et des éventails turbiditiques sablo-vaseux y sont sous-représentés. Pourtant les grands fonds ont donné lieu à plusieurs centaines de levés ayant donné des mosaïques d'imagerie sondeur multifaisceaux couvrant de vastes territoires et permettant d'enrichir la carte. L'intégration de quelques-unes d'entre-elles améliore grandement la qualité de la carte sédimentaire mondiale. C'est par exemple le cas pour la dorsale sud-est de l'océan Indien (fig. 7). L'amélioration se caractérise dans ce cas par une localisation plus précise des roches formant la ride médio océanique, et par une organisation plus complexe et plus morcelée des sédiments environnants.

cartes intégrées ont progressivement permis d'affiner les connaissances. L'amélioration apportée par chaque carte est très variable. Elle peut être très importante, lorsqu'une carte remplace une zone homogène par des centaines de polygones comme c'est par exemple le cas de la carte de la baie d'Halong (cf. biblio p.23 7e référence) (fig. 5) ou des cartes de pêches américaines (National Ocean Service, 1989).

La comparaison des surfaces couvertes par rapport au nombre de polygones pour chaque type de sédiment (fig. 8) montre une forte représentation des polygones présentant des fonds rocheux (39 %) alors que ceux-ci ne représentent que 0,9 % des surfaces des fonds marins mondiaux. Cela s'explique par l'apport par les cartes côtières de petits pointements rocheux parsemant les côtes. À l'opposé les argiles ne représentent que 1 % des polygones alors qu'elles recouvrent 36,4% des fonds, ce qui caractérise

l'existence de grandes surfaces argileuses nappant les grands fonds océaniques.

De telles analyses seront poursuivies au fur et à mesure des futures éditions. Elles devraient progressivement présenter de moins grandes différences entre chacune des futures versions. Cette analyse pourra alors se faire selon une sectorisation par profondeurs ou par régions et pourrait ainsi être utilisée pour évaluer l'évolution de la connaissance. La version actuelle demeure imprécise dans les régions où aucune donnée n'a été fusionnée au produit initial. Les cartes en attente d'intégration sont nombreuses et les données existant dans les archives plus encore. Afin de définir les secteurs où doivent se porter les efforts, une carte des cartes intégrées dans le produit est entretenue depuis la version initiale. Cette carte (fig. 9) est l'outil complémentaire indispensable pour permettre la gestion du développement d'un tel produit réalisé par fusion sur le long terme.

## Conclusion

L'approche présentée ici, permet de combiner des données extraites d'archives anciennes avec des données sédimentaires acquises avec les techniques les plus modernes. Cette méthode est nécessaire car, la sédimentologie marine ne pouvant bénéficier des techniques satellitaires, elle ne repose que sur des données acquises par des bateaux dont la mise en œuvre est coûteuse et qui ne réalisent que des surfaces annuelles très restreintes. La fusion de données permet, grâce aux travaux menés par les sédimentologues depuis plus de deux siècles, d'effectuer la cartographie de vastes zones pour lesquelles aucune donnée récente, c'est-à-dire des 50 dernières années, n'est disponible. Il est à noter que cette approche est en tout point comparable à celle appliquée pour la réalisation des cartes marines sur lesquelles des sondes de plus d'un siècle côtoient des données acquises à très haute résolution et dont la précision géométrique est infra-métrique. Les

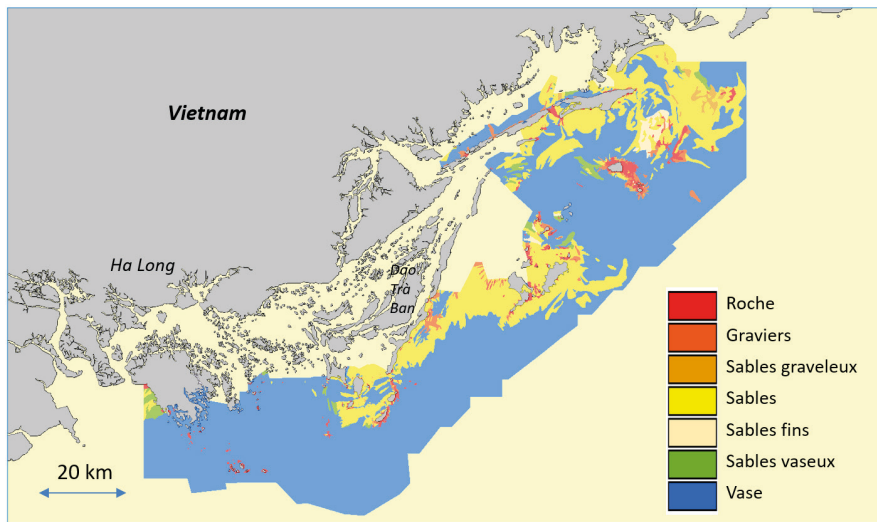


Figure 5 : Carte sédimentaire de la baie d'Ha Long à partir des données plomb suiffé des années 1920 (Gabelotaud, 1996) superposée à la carte mondiale des sédiments des fonds marins v10.0 (Shom, 2020)

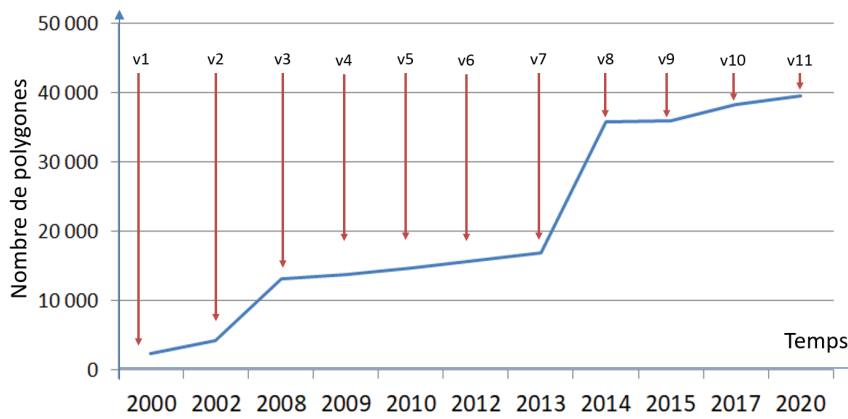


Figure 6 : Nombre de polygones des versions successives de la carte mondiale de sédiments des fonds marins

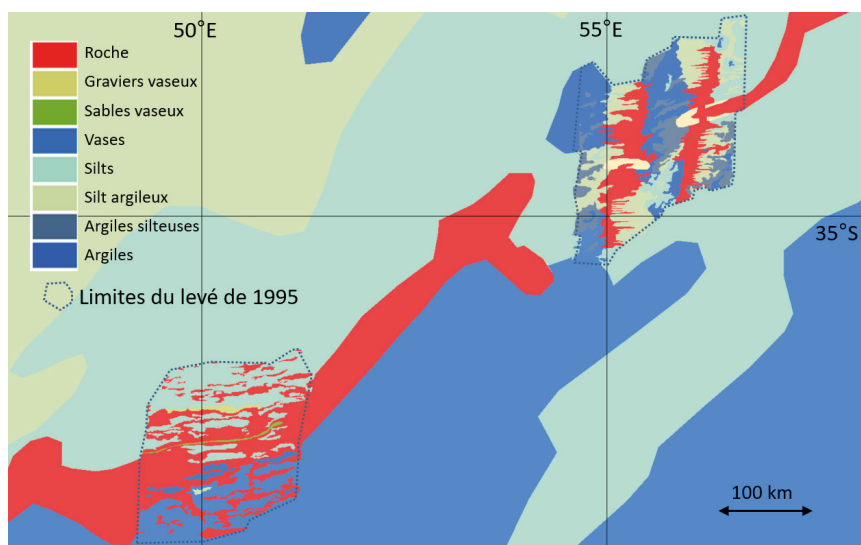


Figure 7 : Exemple de deux cartes issues de levés géophysiques, réalisés en 1995 sur la ride médio-océanique de l'océan Indien méridional (Sauter et al., 2009), analysées et normalisées en 2006 par le Shom

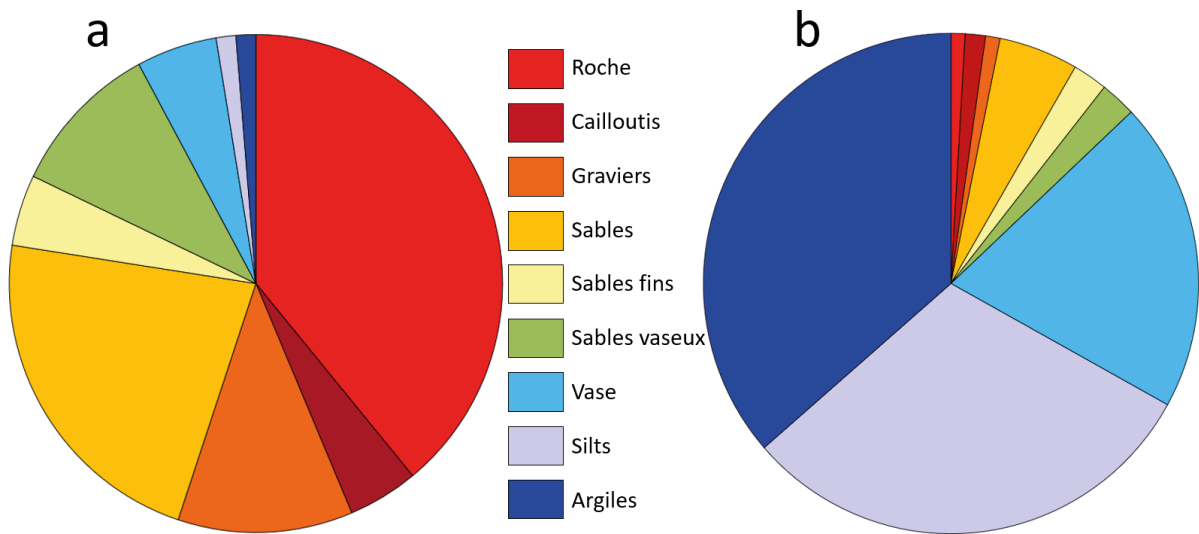


Figure 8 : Pourcentage du nombre de polygones (a) et de surfaces couvertes (b) pour les différents types de sédiments des fonds marins des océans regroupés en 9 classes principales

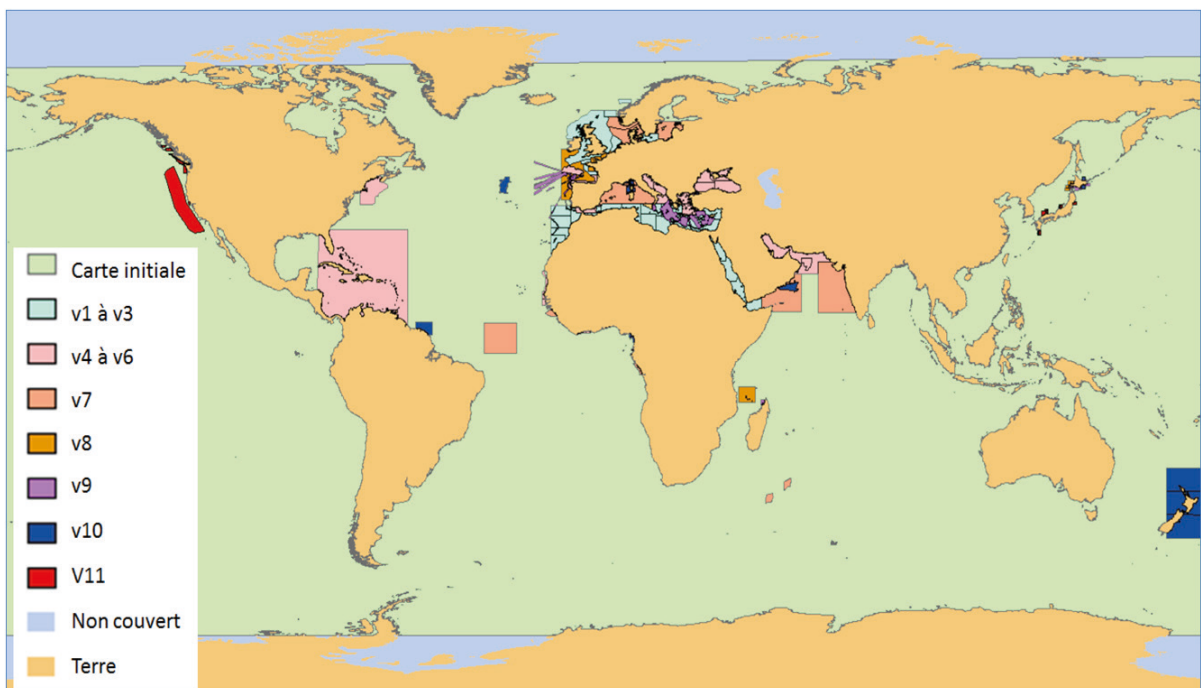


Figure 9 : Zones implémentées dans chacune des versions de la Carte mondiale des sédiments marins de 2000 à 2021 (Shom, 2021)

premiers résultats d'analyse de la carte sédimentaire des fonds marins présentée ici montrent que cette carte vectorielle globale peut être un outil utile pour la connaissance de la répartition des sédiments pouvant servir à la pose de câbles aux études de biologie... Mais c'est également une carte utile pour de nombreuses autres applications comme par exemple pour le calcul des coefficients de frottement en entrée des modèles de courants ou de houles, pour modéliser la propagation acoustique ou le piégeage du carbone. La diffusion de cette carte sur le site diffusion.shom.fr permet à chacun de l'utiliser en soutien à des études régionales mais elle pourrait également servir à

terme de base pour le calcul de la disponibilité des matériaux et en particulier du disponible en sables et graviers à l'échelle globale. La qualité de cette carte sédimentaire mondiale doit encore être améliorée et les données déjà acquises non encore intégrées sont très nombreuses. Des efforts doivent en particulier, être faits pour tout l'hémisphère sud où peu de données ont jusqu'alors été incorporées. La poursuite de la fusion de nouvelles données dans cette carte permettra progressivement de la rapprocher de la vérité terrain et ainsi de pouvoir définir les pourcentages et surfaces couvertes par les différents types de sédiments.

---

## Bibliographie

Bourcart J., 1941, « Essai d'une classification raisonnée des matériaux meubles. » *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. S5-XI, p. 117-153.

Diaz del Rio V., Somoza L., 1993, Mapa fisiografico del Mar Menor. Instituto Espanol de Oceanografia Ed., n° 14, 1:25000.

Delesse M., 1872, Lithologie du fond des mers. Eugène Lacroix Ed., 5 cartes 45\*33cm.

Dutkiewicz A., Müller R.D., O'Callaghan S., Jónasson H., 2015, Census of seafloor sediments in the world's ocean. *Geology*, published online as doi:10.1130/G36883.12015.

Emelyanov E.M., Ilyin A.V., Lisitzin A.P., *et al.*, 1990, « International Geophysical Atlas of the Atlantic Ocean ». Min. Geol. USSR, UNESCO/IOC, Udsintev G.B. Ed.

Emylianov E., Neumann G., Harff J., *et al.*, 1994, Quaternary deposits of the western Baltic and Bottom sediments of the western Baltic. 2 seabed map 1:500000, Head Department of Navigation and Oceanography, Russian Ministry of Defense, Sankt Petersburg.

Gabelotaud I., 1996, Carte sédimentaire de la Baie d'Halong à partir des données plomb suiffé. Carte sédimentaire à 1:50000, Shom Ed..

Garlan T., 1993, « Innovations in Marine cartography at Shom », *International Hydrographic Review*, Monaco, LXX (1), p. 103-120.

Garlan T., 1995, « Caractérisation des fonds et des sédiments sous-jacents du plateau continental au domaine océanique », *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 1995-2, p. 169-172.

Garlan T., 2004, Apports de la modélisation dans l'étude de la sédimentation marine récente, Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques de Lille, p. 155 p.

Garlan T., 2012, « Deux siècles de cartographie des sédiments marins ». *Cartes et Géomatique, Revue du Comité Français de Cartographie*, 211, p.115-139.

Garlan T., Gabelotaud I., Lucas S., *et al.*, 2018, « A world map of seabed sediment based on 50 years knowledge ». *New York USA Jun 03-04, 2018, 20 (6) Part I*, p. 139-149.

Hamilton E.L., 1976, « Variation of density and porosity with depth in deep-sea sediments ». *Journal of Sedimentary Petrology*, 46, 2, 280-300.

- Instituto Hidrografico, 1985, Carta dos sedimentos superficiais de Cabo de S. Vicente ao Rio Guadiana. Instituto Hidrografico Ed., 1:150000.
- Katayama H., Satoh M., Ikehara K., 2000, Sedimentological map of Gentatsu-Se. Geological survey of Japan, Marine Geology Map series, N°53, 1:200000.
- Konert M., Vandenberghe J., 1997, « Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction ». *Sedimentology*, 44, 1997, p. 523-535.
- Lewis K.B., Garlick R.D., Dawson S.M., 1998, Kaiboura Canyon: depth, shelf texture and whale dives. Chart Miscellaneous Series n°78, NIWA Ed., New-Zealand.
- Lisitzin A.P., 1972, « Sedimentation in the world Ocean ». *SEPM Spec. Pub.*, n°17, Tulsa Oklahoma, p. 1-196.
- Lisitzin A.P., 1986, « Principles of geological mapping of marine sediments – with special reference to the African continental margin ». *UNESCO Reports in Marine Science*, n°37, 101 p.
- Maritime Safety Agency, 1953, Bottom sediment chart in the adjacent seas of Kamaisi. Seabed map n° 7005, Tokyo, Japan, 1:200000.
- National Ocean Service, 1989, Bathymetric Fishing map: Long Island Sound-New Haven at 1:100000. U.S. Dept of Commerce – National Oceanic and Atmospheric Administration/NOS.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, 1990, Beaufort Bathymetric Fishing Maps, 1:100000, US Dept. of Commerce NOAA Ed., Washington DC.
- Oberkommando der Kriegsmarine, 1934, Atlas der Bodenbeschaffenheit des Meeres. Südliche Nordsee, Deutsche Bucht, Britische und Französische kanalküsten. N° 2310, 76 cartes sédimentaires à 1:1000000, 1:250000 et 1:150000.
- Pace N.G., 1990, « Acoustic backscatter and sea bed characteristics ». *Proceedings of Institute of Acoustics*, 12, 1, p. 21-31.
- Petschick R., Kuhn G., Gingele F. 1996, « Clay mineral distribution in surface sediments of the South Atlantic: sources, transport, and relation to oceanography ». *Marine Geology*, vol. 130, 3-4, p. 203-229.
- Prager B.T., Caughey D.A., Poeckert R.H., 1995, « Bottom classification: Operational results from QTC View ». *Oceans '95*, San Diego, California.
- Rawsthorne H., 2020, De la sonde à la carte - Une campagne hydrographique au XVIIIe siècle dans le golfe de Gascogne : analyse historique et traitement des données obtenues. Master 2 Épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Brest, 295p.
- Renaud J., Ganthier M.M., Cot D., 1899, Natures des fonds de l'Iroise et Entrée de Brest. Service Hydrographique de la Marine Ed., 1:75000.
- Rey Salgado J., 1993, Mapa de la distribución sedimentaria superficial; relacion morfosedimentaria entre la plataforma continental de galicia y las rias Bajas y su evolucion durante el Cuaternario. Publication especialles Instituto Espanol de Oceanografia, N°17, Madrid.
- Rosa F., Rufino M.M., Ferreira O., *et al.*, 2013, « The influence of coastal processes on inner shelf sediment distribution: The Eastern Algarve Shelf (Southern Portugal) ». *Geologica Acta*, 11, 1, p. 59-73.
- Sauter D., Cannat M., Meyzen C., *et al.*, 2009, « Propagation of a melting anomaly along the ultraslow Southwest Indian Ridge between 46 degrees E and 52 degrees 20'E: interaction with the Crozet hot spot? ». *Geophysical Journal International*, 179(2), p. 687-699.

- Shom, 2021. Descriptif de contenu du produit externe carte sédimentaire mondiale. [https://services.data.shom.fr/static/specifications/Descriptif\\_Contentu\\_CarteSedimentaireMondiale.pdf](https://services.data.shom.fr/static/specifications/Descriptif_Contentu_CarteSedimentaireMondiale.pdf)
- Tauber F., Lemke W., 1995, Meeresbodensedimente in der westlichen Ostsee – Blatt Darss. Institut für Ostseeforschung, Warnemünde, 1:100000.
- Thoulet J., 1907, *Précis d'analyse des fonds sous-marins actuels et anciens*. Librairie militaire R. Chapelot Ed., 220 p.
- Thouzeau G., Hamon D., Coic D., *et al.*, 1992, Carte des peuplements benthiques des substrats meubles de la Baie de Saint-Brieuc. Carte sédimentaire 1:50000, Ifremer Ed.
- United Nations Environment Program 2014, « Sand-Rarer than one thinks ». Nairobi, Kenya: UNEP Global Environmental Alert Service, accessed September 2018. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8665>
- Wentworth C.K., 1922, « A scale of grade and class terms for clastic sediments ». *Journal of Geology*, vol. 30, n°. 5, p. 377-392.