

DEUX SIÈCLES DE CARTOGRAPHIE DES SÉDIMENTS MARINS

par *Thierry Garlan*

Service hydrographique et océanographique de la Marine

13, rue du Chatellier, 29200 Brest

thierry.garlan@shom.fr

La sédimentologie marine est affectée d'un morcellement de l'information, d'une diversification des techniques mises en œuvre, et d'un accroissement des interactions avec les autres sciences de l'océanographie. À cela s'ajoutent des aspects plus spécifiques aux sciences de la Terre tels que les problèmes de changement d'échelles, les incertitudes sur la datation des événements et l'absence de normalisation. Concernant la sédimentologie des fonds des plateformes continentales, si l'on tend progressivement vers une normalisation de la classification des structures sédimentaires, une telle démarche reste à faire pour la classification du nom des sédiments. Cet aspect est un point très important, car il engendre des problèmes pour la représentation cartographique et pour l'utilisation des cartes pour d'autres applications telles que la biologie, la pêche, la géoacoustique, la dynamique sédimentaire, la pose d'infrastructures ou l'extraction de matières minérales ; car sous un même nom peuvent en fait être représentés des sédiments très différents. Nous avons étudié les classifications de plusieurs centaines de cartes sédimentaires publiées de par le monde, et recherché les aspects positifs et négatifs de chacune d'entre elles. Il apparaît que les différences observées (d'un pays à l'autre, d'un laboratoire à l'autre, voir entre différentes cartes issues d'un même laboratoire) proviennent, dans la grande majorité des cas, d'adaptations pour répondre à différents objectifs. Les autres différences sont issues des systèmes de mesure utilisés, de la latitude (particularités des domaines polaires et tropicaux) et de la profondeur (classifications différentes selon les environnements). La présente synthèse est un état des lieux de la complexité des fonds et des difficultés rencontrées pour les représenter.

1 Introduction

En 1897 le Service hydrographique français a publié la première carte sédimentologique représentant la nature des fonds marins. Quelques pays tels que le Japon, la Grande-Bretagne, la Nouvelle-Zélande et le Portugal, ont développé un programme national leur donnant une bonne connaissance de leurs territoires marins, mais, globalement, la cartographie des sédiments a progressé relativement lentement, laissant de vastes secteurs, même sur le plateau continental européen, n'ayant jamais fait l'objet d'une cartographie des sédiments. Et pourtant, il existe des besoins importants dans des domaines aussi variés que la sécurité de la navigation et l'extraction de granulats ; et ces besoins vont croissants avec l'apparition de nouvelles applications telles que la mise en place des énergies marines renouvelables, la protection des habitats marins et le développement des nouveaux modèles de courants marins.

La sédimentologie marine, comme de nombreuses autres sciences est affectée par la segmentation de l'information, par la diversification des techniques employées et par l'accroissement des interactions avec les autres sciences de l'océanographie. Les cartes sédimentaires sont la synthèse de multiples données aboutissant à un modèle de représentation

de la nature du fond marin dont la qualité repose sur la densité des données et sur l'expertise du sédimentologue. Les sédiments sont décrits par leur taille et les propriétés des particules sédimentaires selon des méthodes proches de celles adoptées par Thoulet (1907). Il s'y ajoute une approche de la géomorphologie à l'échelle des structures sédimentaires, les fonds marins comportant des dunes, des chenaux, des plaines et des reliefs très comparables à la géomorphologie terrestre. Même si nous assistons à une normalisation progressive de la classification des sédiments des plateaux continentaux, des synthèses restent à mener pour remplacer les dizaines de classifications utilisées dans le monde (Garlan, 2004). Nous avons examiné les différentes classifications utilisées dans plusieurs centaines de cartes de sédiments publiées dans le monde, et analysé les aspects positifs et négatifs de chacun de ces exemples. Il apparaît que les différences observées (d'un pays à l'autre, d'un laboratoire à l'autre, et même entre les différentes cartes produites par un même laboratoire) surviennent dans la grande majorité des cas d'adaptations apportées pour répondre à des objectifs différents. Les autres différences découlent des systèmes de mesure utilisés, de la latitude (les caractéristiques propres aux régions polaires et tropicales), et de la profondeur

(les grands fonds étant différenciés par les processus de mise en place et les petits fonds par la taille des particules).

2 La spécificité des cartes sédimentaires

2.1 Contributions de l'évolution des techniques

Entre 1820 et 1940, les études du plateau continental reposaient essentiellement sur des descriptions visuelles de sédiments collés sur le suif qui était placé dans la cavité située à la base du plomb de sonde. Ces descriptions de prélèvements ont été menées durant plus d'un siècle avec une grande densité et une excellente qualité, en particulier à proximité de la côte. Les points d'échantillonnage étaient souvent espacés d'une distance inférieure à cent mètres. Avec plusieurs dizaines de millions de données sur la nature du fond ainsi obtenus et archivés par les services hydrographiques, ces années représentent une des périodes les plus fécondes dans l'acquisition de la connaissance de la nature des sédiments marins. La valeur de ces informations va croissant car ce sont les seules permettant d'évaluer l'évolution des fonds marins due à l'impact de l'évolution du climat et/ou de l'action de l'homme sur les espèces marines. Avec l'arrivée de sondeurs acoustiques, l'acquisition de données sur la nature des fonds a brusquement décru en France, et un déséquilibre s'est produit au profit des données bathymétriques qui ont durant une cinquantaine d'années été exclusivement acquises. Avec l'arrivée des sondeurs multifaisceaux, dans les années 1990, l'acquisition simultanée d'une imagerie acoustique des fonds et de la bathymétrie a permis à la sédimentologie de recevoir de nouveau un flux important de données sur la nature des fonds marins.

Les systèmes acoustiques de classification des fonds sont venus s'ajouter, également dans les années 1990, à la palette des systèmes nécessaires à la cartographie du fond marin en complément de l'imagerie acoustique issue des sonars latéraux et des sondeurs multifaisceaux. Tous ces systèmes ont révolutionné la connaissance des fonds marins mais ils ont tous leurs limites : ils nécessitent le prélèvement d'échantillons afin de calibrer les données ainsi obtenues. De très grands progrès ont été atteints grâce aux contributions de ces nouveaux systèmes d'acquisition à haute résolution, mais aussi et surtout par une approche différente dans les méthodes de cartographie des sédiments, fondée sur l'application de l'expertise du sédimentologue sur un modèle issu de la combinaison de toutes les données sédimentaires avec la morphologie et l'hydrodynamique.

2.2 Une variété de classifications pour différentes cartes sédimentaires

Un sédiment est un produit de l'érosion par l'eau, de l'abrasion mécanique par la mer et de la déflation par le vent. Les particules ainsi formées, après une migration durant une période de quelques heures à quelques millions d'années, sont incorporées dans un mélange de fragments lithologiques et biologiques, qui évolue ensuite en fonction de l'hydrodynamique locale. Des blocs de roches fossiles de plusieurs mètres cubes, déplacés par des glaces flottantes pendant les périodes glaciaires les plus récentes, peuvent ainsi être retrouvés sur le fond marin mélangés avec des sédiments fins déposés par les courants actuels. L'hétérogénéité qui en résulte sera encore accrue par l'ajout de particules d'origine biologique (fragments de coquilles et tests d'organismes) qui ajoutent aux sédiments des particules de toutes tailles. Plus les origines seront nombreuses, et plus hétérogène sera le sédiment résultant.

En utilisant des données très diverses et en tenant compte de leur expérience acquise sur le terrain, les sédimentologues construisent un modèle représentant la répartition des sédiments du fond marin, qui ne peut pas être obtenu par des méthodes numériques classiques. L'approche naturaliste, consistant à utiliser les données ponctuelles que sont les prélèvements pour réaliser des cartes, est en fait très similaire à celle adoptée par un physicien utilisant des données de terrain pour ajuster des processus physiques modélisés. Jusque dans les années 1990, les cartes sédimentaires reposaient sur quelques prélèvements et une connaissance assez grossière de la morphologie du fond marin, la qualité de la carte reposait exclusivement sur celle du sédimentologue l'ayant réalisée. Avec les contributions de l'imagerie, de la sismique, et des systèmes de classification, calibrés par des échantillons, la part de la technique est devenue très importante et celle de l'expertise s'est réduite. Le modèle sédimentaire final repose désormais sur des giga-octets de données difficiles à synthétiser et présente l'intérêt de fournir un produit dont la qualité peut être quantifiée.

2.3 Les sédiments : un mélange complexe traduit par quelques paramètres

« Pour résumer, rien n'est moins précis que la classification ordinaire de la nature des fonds, il ne satisfait ni le chercheur ni le marin ». Thoulet a écrit ces mots en 1907 après avoir défini une classification des sédiments très semblable à celle encore utilisée plus d'un siècle plus tard. Elle est très ancienne, mais

les règles établies par cet auteur méritent d'être rappelées :

« Une classification des fonds marins doit répondre aux conditions suivantes :

- se baser sur des caractères tellement précis, indiscutables, et si nettement limités, que plusieurs opérateurs examinant isolément le même échantillon soient assurés de lui donner toujours le même nom ;

- ne présenter aucun caractère vague, ou dont les limites soient susceptibles de dépendre d'une appréciation personnelle ; ne s'appliquer à aucune localité spéciale, quelle qu'elle soit, et être complètement indépendante du gisement particulier de l'échantillon ; ne s'appuyer sur aucun caractère biologique, comme la présence de tel ou tel animal ou débris d'animal, ce qui la ramènerait à la dépendance de conditions géographiques. Pour répondre à ces conditions, une classification des fonds ne peut être que mécanique (granularité) et minéralogique (constituants) ».

Une simple application de ces principes nécessite l'utilisation d'une classification unique, quels que soient le domaine d'étude ou les moyens mis en œuvre pour l'explorer. Ces conditions doivent toujours être appliquées pour l'analyse des échantillons prélevés, mais elles sont plus difficilement applicables pour les données acoustiques maintenant couramment employées par les sédimentologues.

Des blocs de plusieurs mètres de diamètre aux particules d'argiles de quelques micromètres, les particules existant sur le fond marin peuvent avoir toutes les tailles, et tous les mélanges de ces particules sont possibles. En raison de cette continuité, les limites des classes de particules sédimentaires présentent un caractère arbitraire. La classification de Wentworth établit que lorsqu'une particule a une largeur comprise entre 2 et 1mm, il s'agit d'un sable très grossier. De cette façon cette classification, qui repose sur une loi logarithmique, définit le nom de toute les particules sédimentaires des argiles aux blocs rocheux. Une telle classification est idéale pour les sédiments homogènes, comme par exemple les sables de milieu désertique ; elle devient par contre difficile à utiliser lorsque les sédiments comportent des particules dont les tailles couvrent plusieurs classes de sédiments comme c'est fréquemment le cas des sédiments de rivières ou des sédiments marins des grands fonds. L'utilisation d'une telle classification devient impossible pour des sédiments très hétérogènes, c'est-à-dire pour la majeure partie des sédiments marins des plateformes continentales. C'est pourquoi cette classification est souvent citée

dans les articles scientifiques, mais elle demeure rarement utilisée pour la cartographie des sédiments marins.

Comme Guyon et Troadec (1994) le soulignent, la caractérisation géométrique du grain, même si elle peut parfois nécessiter des outils très sophistiqués, n'est pas très compliquée en principe. Réalisée sur un échantillonnage représentatif d'une population de grains, elle fournit un poids, une taille et un diamètre. Le problème est plus compliqué pour une particule non sphérique ; en fait, même si une seule dimension est souvent suffisante pour caractériser un grain de sable roulé, deux ou trois paramètres sont nécessaires pour des grains anguleux ou en lamelles, et encore plus pour un grain de forme irrégulière, par exemple un fragment de coquille. Par conséquent, il serait nécessaire de traduire la population de grains jusque-là représentée par le grain moyen ou la médiane, par une série de paramètres permettant une représentation de l'hétérogénéité des grains, de leur taille et de leur forme. Cette approche serait facile à mettre en œuvre car le spectre de paramètres descriptifs des sédiments mis à la disposition des sédimentologues est large, mais, la totalité des modèles de géoacoustique et de dynamique sédimentaires se limitant à la prise en compte du grain moyen, les produits cartographiques, à l'exception de ceux décrits au chapitre 3.5, se limitent encore aujourd'hui à la simple représentation de la granularité moyenne des sédiments.

3 Les différentes classifications de cartographie sédimentaire

La qualité des cartes sédimentaires dépend des quatre facteurs suivants: l'intervalle entre les échantillons, l'équipement utilisé, la méthode analytique (microgranulométrie laser, méthode de tamisage, ...), et la classification adoptée. Tous ces facteurs varient selon le temps consacré à l'échantillonnage des sédiments, l'équipement disponible, et les objectifs. Ainsi l'intervalle d'échantillonnage peut varier d'un facteur de 100 d'une carte à une autre. Pour ces raisons, le coût, la résolution et la qualité de la carte peuvent varier considérablement.

Il existe donc un décalage entre ce qui est nécessaire, ce qu'il est possible d'atteindre, et les cartes produites. Les chapitres ci-dessous regroupent, par type de classification, les cartes sédimentaires du plateau continental, publiées ces dernières décennies. En première approche, il apparaît qu'au cours des 200 dernières années de nouvelles classifications des sédiments sont régulièrement apparues sans que pour autant, les anciennes soient abandon-

nées. Les cartes des sédiments marins reposent sur un grand nombre de modes de représentation, que nous regroupons ici en cinq familles de classification principales : classification descriptive, diagramme triangulaire, tableau à double entrée, associé au système d'acquisition, spécifique à une discipline.

3.1 Les classifications descriptives

La première carte sédimentaire fut publiée par le Service hydrographique français en 1897. Elle était basée sur une combinaison de descriptions de sédiments prélevés à l'aide du plomb de sonde enduit de suif et de quelques échantillons de sédiments prélevés à l'aide des premiers prototypes de benne (fig. 1a). Sur la base de ce travail, dans les années 1910, Thoulet a compilé les données du Service hydrographique (devenu depuis le SHOM) avec ses propres échantillons afin de publier une série de cartes sédimentaires à des échelles de l'ordre de 1 : 120 000. Cette série est, encore actuellement, la seule série à couvrir la totalité des côtes de la métropole. Ces cartes sont basées sur une classification très complète, normalisée, comprenant les seize classes de sédiments suivantes : roche, sable (moins de 5% de vase), sables vaseux (de 5 à 25% de vase), vase sableuse (de 25 à 50% de vase), vase peu sableuse (de 50 à 90% de vase), cailloux, graviers, herbiers, ... Peu de changements importants ont été réalisés par rapport à cette classification d'origine, qui a été utilisée dans différentes variantes avec juste quelques adaptations aux caractéristiques locales. C'est par exemple le cas de la carte des côtes japonaises *Bottom Sediment Chart in the adjacent seas of Kamaisi* publiée en 1953 par l'Agence pour la sécurité maritime, ou de la série des *Bathymetric and Fishing Maps series* de la côte nord-américaine publiées par la NOAA.

La classification descriptive était la première et elle demeure une des plus employées, en particulier pour les cartes destinées aux non spécialistes et au grand public. Cette classification permet de s'adapter aux particularités de l'environnement, et c'est la seule permettant de représenter les sédiments fortement hétérogènes, tels que les mélanges de sédiments très différents tels que des galets et des argiles. En outre, cette classification est la plus appropriée pour s'adapter aux changements d'échelles. Pour toutes ces raisons, la norme pour la représentation de la nature des fonds sur les cartes marines est basée sur ce type de classification. Il y a vingt ans, nous avons commencé à intégrer dans une base de données toutes les caractéristiques des fonds marins quel que soit le système d'acquisition, selon une classification aussi exhaustive que possible. Les cartes sédimentaires, obtenues à partir de la synthèse de ces don-

nées, ne sont plus le reflet d'une série de mesures, mais une synthèse de la connaissance représentée à une échelle adaptée aux besoins des pêcheurs, des exploitants de granulats marins, et de la Marine pour la recherche des mines enfouies (Garlan, 2009). Ce programme de cartographie sédimentaire des côtes françaises à l'échelle moyenne de 1 : 50 000 combine la nature des fonds avec les autres couches traditionnelles des cartes marines : les cartes G. La prise en compte des données existantes, sans levés spécifiquement réalisés pour la réalisation de ces cartes, permet d'améliorer notablement la connaissance des fonds marins, comme le montre la comparaison d'une carte faite à l'aide de dragage en 1972 par rapport à la carte 7031G publiée par le SHOM en 1994 (fig. 2). Trente cartes G ont ainsi été publiées par le SHOM, et deux nouvelles cartes paraissent chaque année. Plus de vingt mille cartes G ont été diffusées au cours des vingt dernières années, auprès des pêcheurs, mais aussi des différents usagers du domaine marin. Chacune de ces cartes est basée sur la fusion : des analyses granulométriques de quelques milliers d'échantillons, de plusieurs dizaines de milliers de descriptions visuelles obtenues au plomb suiffé, de l'imagerie acoustique, des données de systèmes de classification des fonds, des photographies aériennes pour les rivages, et de la morphologie (Garlan, 1993). La classification descriptive a pour ce faire été adoptée car elle est la seule adaptée pour ce genre de carte destinée à un large public et obtenue par la fusion d'échantillons et de données acoustiques (fig. 1d). Les classifications descriptives sont les seules à permettre les adaptations nécessaires aux environnements particuliers tels que les dépôts glaciaires. C'est le cas de la carte russe à 1 : 500 000 de la mer Baltique occidentale : *Quaternary deposits of the western Baltic* (Eymilianov et al, 1994). Parmi les 12 classes figurant sur cette carte, sont différenciés les sables graveleux marins, les sables et silts lacustres, les argiles et silts glaciaires, les tillites, les varves, ... L'âge et les processus de dépôt des sédiments ont dans cette carte autant d'importance que la classification basée sur la granularité. Cette approche est particulièrement pertinente pour le développement de modèles géoacoustiques des fonds marins. La carte de la Baltique se distingue en outre par le fait qu'elle est associée à une seconde carte de la nature des sédiments à un mètre de profondeur.

3.2 Les classifications basées sur des diagrammes triangulaires

L'utilisation de diagrammes triangulaires ayant pour sommet les graviers, les sables et la vase, ou les sables, les silts et la vase, permet la représenta-

tion claire des mélanges sédimentaires. Mais la réduction à trois sédiments de base est trop simpliste car les multiples sortes de sables existant sur terre se retrouvent dans ce cas représentés par un seul nom. Une dizaine de cartes sédimentologiques des côtes françaises à 1 : 100 000, publiées de 1960 à 1980 par le BRGM, le CNEXO et les universités, ont été basées sur une compilation des analyses des échantillons obtenus essentiellement par dragage. Ce mode de prélèvement très bien adapté pour reconnaître simultanément les organismes benthiques et les fonds sur lesquels ils se développent, s'est révélé très néfaste car il accroissait artificiellement l'hétérogénéité des sédiments en mélangeant des sédiments voisins. Les données de cette période sont donc entachées d'erreur et de qualité médiocre à l'exception toutefois des zones où les sédiments présentent une faible variation latérale. Destinée aux géographes et aux géologues, la classification employée a été créée spécifiquement pour ces cartes avec une première séparation des cailloutis, des sédiments vaseux et des carbonates et, pour les mélanges de sable et de graviers, une classification à l'aide d'un diagramme triangulaire. La classification résultante comportait les types de fonds suivants : roche, quatre classes de cailloutis, cinq classes de graviers et de sables, et quatre classes de vase. Les sédiments étaient représentés par des trames superposées sur lesquelles venaient se surajouter des trames correspondant aux débris de coquilles et au taux de carbonate de calcium. Cette représentation offrait l'avantage de représenter précisément tous les mélanges existant dans la nature, mais la lecture en était très difficile.

Les cartes anglaises à 1 : 250 000, publiées par le British Geological Survey (BGS), sont également basées sur une classification triangulaire. Elles couvrent l'ensemble du plateau continental de la Grande-Bretagne et sont essentiellement basées sur le diagramme triangulaire de Folk, regroupant les particules en trois phases correspondant aux trois angles du diagramme : les particules grossières (cailloutis, graviers, galets), les sables et les vases. La plupart des quinze classes obtenues contiennent le terme de vase, les sables, les graviers, et les mélanges de sables et graviers donnant les trois classes restantes. Le terme de sable apparaît très rarement sur ces cartes, car il faut que plus de 90% des particules soient des sables pour que le sédiment porte ce nom. Cette classification est plutôt bien adaptée pour la cartographie de vastes zones (au-delà de l'échelle du 1 : 250 000), parce qu'elle facilite la généralisation qui est exigée à ces échelles, elle a ainsi permis la cartographie du plateau continental de Grande-Bretagne à 1 : 1 000 000 en 1987. Mais

les cartes réalisées de cette manière demeurent trop imprécises pour de nombreuses applications et il est en général nécessaire de faire appel à des cartes complémentaires. Parmi d'autres cartes utilisant la classification par diagramme triangulaire, nous pouvons citer les cartes du plateau continental norvégien ainsi que les cartes des sédiments du plateau continental des États-Unis (Poppe et al, 1989) limitées à neuf faciès sédimentaires issus d'un double diagramme triangulaire.

3.3 Les classifications basées sur un tableau à double entrée

Dans les années 1980, pour pallier les difficultés de lecture dues aux superpositions de trames, et pour pouvoir représenter de petites zones sédimentaires sur des cartes à 1 : 500 000, Larssonneur établit, à partir des 12 000 échantillons prélevés en Manche, une classification qui sera utilisée pour les cartes de la Manche (Vaslet *et al*, 1978) et du golfe de Gascogne (Klingebiel et Lesueur, 1985). Cette classification, dont le principal objectif est de souligner l'évolution de la sédimentation holocène et le contrôle de ces sédiments par les courants de marée, repose sur un tableau à deux entrées : la granularité et le taux de carbonate de calcium (Larssonneur, 1982). Son principal avantage est de bien mettre en évidence la partie biogène des sédiments ; mais cette classification très détaillée ne permet pas de présenter les sédiments bimodaux. Les sédiments grossiers (cailloutis et graviers), qui ne donnent qu'un faciès sur les cartes anglaises sont représentés par 20 faciès différents sur la carte de la Manche; en revanche les mélanges de sables et graviers, ou de vases et particules grossières, n'y figurent pas.

Parmi les cartes à classification à double entrée, les cartes allemandes de Tauber et Lemke (1995) tirent leur originalité des paramètres utilisés pour établir les classes : la médiane (M_d) et le classement. Le tableau comporte en ordonnée sept valeurs de la médiane allant des sables graveleux ($M_d > 1\text{mm}$) jusqu'aux silts ($M_d < 32\text{mm}$). En abscisse les cinq niveaux de classement permettent de différencier les sédiments homogènes des sédiments très hétérogènes. Aux 35 classes ainsi obtenues s'ajoutent des figurés pour les argiles, les pierres éparses et la roche affleurante. Une telle classification permet de réaliser une délimitation des zones sédimentaires automatiquement par traitement informatique. Cette classification est très riche ; à titre d'exemple, les sables fins et les sables, qui ne sont représentés que par un faciès dans la classification de Folk et par deux sur les cartes G du SHOM, sont ici subdivisés

en vingt classes sédimentaires. Ces cartes reflètent bien la complexité des sédiments marins et sont bien adaptées pour répondre aux besoins des modèles de dynamique sédimentaire et de géoacoustique. En revanche les cartes ainsi réalisées doivent nécessairement reposer sur un maillage fin et régulier de prélèvements et présentent une certaine complexité les rendant peu compréhensibles.

D'autres séries de cartes utilisent les tableaux à deux entrées, comme celles du Service géologique de Nouvelle-Zélande, qui représentent à différentes échelles une grande partie du plateau continental. On peut également signaler : la carte colombienne à 1 : 25 000, basée sur une classification à deux entrées : granularité (graviers, sables, sables fins, silts, argiles) et 4 classes de carbonate de calcium, donnant 20 faciès (*Dirección General Marítima Portuaria*, 1983) ; la série de cartes des côtes du Portugal à 1 : 150 000 basée sur une classification similaire mais avec une séparation des sables et argiles en 8 classes, donnant donc 32 classes sans intégrer de sédiments grossiers. Les sables sont dans ces cartes définis par un pourcentage de vase inférieur à 10, une médiane inférieure à 2 mm et la somme des vases et sables supérieure à 50% (*Instituto Hidrográfico*, 1985). Dans la série des cartes hollandaises à 1 : 100 000, les couleurs sont données par la médiane ou le grain moyen, le taux d'argile étant figuré par une trame surimposée (*Rijks Geologische Dienst*, 1992).

3.4 Les classifications liées à un système d'acquisition: l'exemple de l'imagerie acoustique

L'imagerie acoustique, obtenue à l'aide de sonars à balayage latéral ou de sondeurs multi-faisceaux (SMF), constitue une véritable avancée pour la cartographie sédimentaire, car elle permet l'observation : de structures sédimentaires même lorsque leur faible relief les rend invisibles sur les cartes bathymétriques, des objets ayant une signature acoustique spécifique comme les colonies de crépîdules, les champs d'herbiers ou d'algues, les cratères liés à l'évacuation du gaz, des limites d'affleurements rocheux, des blocs épars métriques, des traces engendrées par le chalutage ou les marques d'ancrage, des câbles, pipelines et autres objets anthropiques. Il est à noter que la plupart de ces objets anthropiques ou naturels ne peuvent être détectés que par ces systèmes.

Les cartes dérivées de ces données sont caractérisées par leur haute résolution, elles représentent des niveaux de réflectivité du fond marin (fig. 4) et

donc dépendent de la fréquence du système utilisé et de l'angle d'incidence selon lequel le fond a été exploré. La cartographie des sédiments paraît, avec de telles données, facile à réaliser, car les images sonar latéral semblent aussi explicites que des photographies du fond. Pourtant, des écarts entre ce que présentent les données sonar latéral et la vérité terrain ont été fréquemment rencontrés. Ainsi les petites dunes ne sont observées que lorsque les profils sont réalisés longitudinalement à leur crête et il est parfois observé, pour une zone homogène sur les données d'imagerie, plusieurs types de sédiments très différents. À l'opposé, nous avons reconnu des limites très nettes qui ne correspondraient en réalité qu'à une légère variation du sédiment tel que le passage de sables moyens à des sables grossiers au sud du raz de Sein, ou celui de sables fins à des sables fins comportant de petites coquilles de 2 à 3 mm aux abords de Trafalgar,

À la fin des années 1980, du Japon au Canada en passant par la Nouvelle-Zélande et la France, des mosaïques d'images sonar latéral ont été publiées, puis ceci a été interrompu car ces mosaïques dépourvues d'informations complémentaires se sont avérées peu utilisables pour les utilisateurs. La réalisation de cartes sédimentaires issue de l'interprétation de données d'imagerie se poursuit mais demeure assez peu développée au niveau mondial. On peut citer parmi elles les cartes de l'IFREMER (Augris *et al*, 1999), de Nouvelle-Zélande (Lewis *et al*, 1998) et du Japon (Ikehara *et al.*, 1988). Sans l'apport de données complémentaires, les systèmes d'imagerie sonar latéral et SMF ne permettent pas la cartographie des sédiments, mais ils sont les outils indispensables pour caractériser la répartition des structures sédimentaires et des processus sédimentaires.

3.5 Les cartes basées sur une classification multiple

La première approche de classification multiple a été présentée par Larssonneur (1971) qui réalisa une série de cartes de la Manche montrant la répartition des différents composants du fond marin à partir de l'étude approfondie de quelques milliers d'échantillons. Des cartes distinctes affichaient ainsi les minéraux majeurs, les éléments phycogènes (maërl), les minéraux accessoires, les paramètres issus des mesures granulométriques, ... La distribution des sédiments était représentée par plusieurs cartes donnant les différentes phases granulaires. Enfin, une carte de synthèse de la répartition des sédiments reposait sur une classification à 16 classes obtenue à l'aide d'un tableau à double entrée qui donna ensuite la classification utilisée pour la carte de la Manche de Vaslet *et al* (1978).

Plus récemment, les cartes publiées par la Commission géologique du Canada (Barrie *et al*, 1990), ont montré les sites d'acquisition de données ponctuelles, les profils d'acquisition des données acoustiques, la nature du fond marin au niveau des points de prélèvement, la distribution des sédiments selon 12 classes descriptives, les zones d'isovaleur du grain moyen, les processus de dépôt, et les unités morpho-sédimentaires. L'approche dans ce cas consiste à produire autant de cartes que de types de données obtenues, de manière à permettre aux utilisateurs de localiser facilement l'information qu'ils recherchent. Cette richesse de l'information fournie a pour principal inconvénient de laisser à l'utilisateur le soin de faire la synthèse de ces multiples informations.

Les cartes sédimentaires publiées par le *British Geological Survey*, à l'échelle du 1 : 250 000, comprennent une centaine de publications depuis 1980 ; elles ont déjà été évoquées car elles comportent une carte principale basée sur un diagramme triangulaire sables-argiles-graviers. Autour de celle-ci, de deux à huit cartes annexes sont présentées à des échelles allant du 1 : 500 000 au 1:4 000 000. Ces cartes annexes présentent un grand nombre de caractéristiques du fond marin : les dépressions majeures, les zones rocheuses, les bancs et dunes de sable, ... La précision de ces éléments peut être grande puisque les zones de champs de dunes sont parfois complétées d'une indication de la hauteur des dunes, de l'orientation des crêtes, et même du sens de leur déplacement. L'examen de ces cartes annexes met en évidence les différents caractères importants qui ne figurent pas sur la carte principale, et qui ne sont donc pas caractérisés par le diagramme de Folk. Les cartes annexées et leur sujet sont adaptés à la complexité de la sédimentologie locale et varient considérablement d'une carte à l'autre. Si les proportions en carbonate de calcium et en sable sont représentées sur presque toutes les cartes, une seule carte représente les champs de cratères dus à l'évacuation du gaz. Par ailleurs, plus de la moitié des cartes annexes concernent la teneur en calcaire, les autres sujets principaux figurant sur ces cartes étant la proportion de vase, les structures sédimentaires, et l'épaisseur des sédiments.

Depuis une quarantaine d'années, le service géologique du Japon publie chaque année deux ou trois nouvelles cartes sédimentaires au 1 : 200 000. Ces cartes sont composées d'une carte principale en couleurs et de cartes additionnelles composées de trames, à la même échelle, dont les sujets varient en fonction de la carte concernée. Ces cartes, qui étaient respectivement sur papier et sur calque, sont

depuis une dizaine d'années fournies sous forme numérique comme par exemple la carte de Cap Ochiishi (GSJ, 2011). Contrairement aux exemples précédents, ces cartes ne se limitent pas au plateau continental et peuvent se prolonger au-delà de 1 000 mètres de profondeur. La majeure partie du plateau continental du Japon est ainsi couverte par ces cartes qui sont d'une richesse inégalée. Pour chaque secteur, la carte principale indique la nature des sédiments selon des classifications qui ont évolué au cours du temps. De 1976 à 1980, les cartes étaient basées sur un diagramme triangulaire sables-silts-argiles donnant 15 types différents de classes sédimentaires. De 1978 à 1982, cette classification a été complétée par les proportions des différents composants de la fraction grossière pour donner neuf symboles pour les sables, quatre pour les sédiments vaseux, et six pour les faciès supplémentaires. Entre 1984 et 1990, les cartes reposent sur une classification originale basée sur le *Fineness Modulus*. Les initiateurs de cette classification voulaient par ce paramètre permettre l'expression en un seul nombre des trois paramètres caractéristiques des sédiments que sont le classement, la médiane, et l'asymétrie. La variation de ce paramètre de synthèse est complexe à comprendre et son utilisation ne s'est pas poursuivie. Depuis 1993, les cartes sont basées sur une classification simple composée de 5 à 10 classes, sans mélanges, et délimitée par les valeurs médianes. Afin de compléter cette information, le pourcentage en graviers, les courbes d'isovaleurs de la proportion de vase, la présence de dunes, sont, selon les besoins, superposées à l'aide de symboles. Chacune de ces cartes principales est complétée par deux à six cartes annexes à la même échelle, montrant toutes les informations permettant de décrire au mieux le fond marin. Parmi la liste de ces cartes annexes, on peut citer les cartes selon diverses classifications, des cartes de concentration des composants (débris volcaniques, débris végétaux, test de plancton, minéraux, ...), des cartes des structures sédimentaires, des cartes de l'épaisseur des sédiments, des mosaïques sonar latéral, des cartes des paramètres physiques. Toutes ces cartes permettent ainsi la représentation des spécificités régionales utiles pour de nombreuses applications. Une telle approche nécessite la collecte d'un très grand nombre d'échantillons spécialement acquis pour la carte et une analyse en laboratoire particulièrement complète. Plutôt que d'utiliser une classification unique, le service géologique du Japon a donc adapté la représentation cartographique de la variabilité des fonds en séparant les différents éléments, suivant en cela les principes de Thoulet. Il faut tout de même remarquer que les 150 à 400 échantillons prélevés pour chacune des cartes, limitent l'échelle de

représentation au 1 : 200 000. Il existe ainsi un écart entre la grande précision de la classification utilisée et le manque relatif de précision des limites d'extension des sédiments représentés. La large gamme d'éléments présentés sur ces cartes montre clairement la complexité de la nature des fonds marins et la difficulté de les représenter clairement et précisément. Ces cartes sont d'une qualité exceptionnelle et sont les seules à poursuivre ce travail jusqu'aux grands fonds.

4 Conclusion

Une carte des sédiments peut montrer une grande variété d'informations : la taille des particules, les composants chimiques et physiques, la géomorphologie, et les processus de dépôt. Ces cartes ont des échelles allant du 1 : 5 000 au 1 : 30 000 000. Elles sont fondées sur des données qui varient considérablement dans leur nature, leur qualité et quantité. L'arrivée des systèmes acoustiques, tout d'abord les sondeurs bathymétriques dans les années 1950 puis les systèmes d'imagerie dans les années 1990, ont entraîné des périodes de réduction des prélèvements de sédiments marins, permettant de réaliser des économies en réduisant les périodes de station des bateaux au profit de l'acquisition sur profils. Le gain apparent offert par ces systèmes acoustiques s'est accompagné d'une perte de la connaissance des constituants du fond et de leur répartition. Les campagnes de prélèvement ont ensuite repris entraînant ainsi des périodes de campagnes de prélèvements

importantes à la fin du XIXe siècle, dans les années 1970 et depuis une dizaine d'années. La cartographie des sédiments marins a ainsi vu passer des modes liés aux systèmes d'acquisition ; mais avec la numérisation et la mise en base de toutes ces données, la cartographie repose maintenant sur des données numériques de plus en plus séparées du mode de mesure.

Si un sable peut être représenté par une classe unique ou par une douzaine de classes sédimentaires, cela signifie que des fonds très différents sont parfois représentés sous un même nom. Si ce n'est pas très gênant pour la connaissance globale de l'environnement, c'est un problème pour les études de biologie, pour les estimations de la répartition des espèces, et par voie de conséquence pour les estimations de stocks de pêche.

Cette étude montre une grande diversité des classifications des sédiments marins. Elle met en évidence que de nombreuses tentatives ont été menées dans de nombreux pays pour rechercher la représentation idéale de la nature des fonds marins. Les classifications décrites dans cet article ne sont pas exhaustives ; de nouvelles classifications verront le jour pour s'adapter aux différents besoins et pour tirer parti de l'évolution de la science et de la technologie. Il semble que la complexité des fonds marins soit de toute façon incompatible avec une norme universelle s'adaptant à tous les environnements, tous les besoins et toutes les échelles.

Bibliographie

- Augris C., Cirac P., Satra C., Mazé J.P.**, *Le domaine marin côtier du pays Basque (Pyrénées-Atlantiques) : Carte des formations superficielles et mosaïque d'images acoustiques sonar à balayage latéral*, IFREMER Ed., carte à 1 : 20 000, 1999.
- Barrie J.V., Luternauer J.L., Conway K.W., Sawyer B., Bedard L.J., L'Espérance G.F.**, *Surficial geology of the Queen Charlotte basin, Moresby Island-Queen Charlotte sound*, Commission géologique du Canada Ed., huit cartes à 1 : 250 000, 1990.
- British Geological Survey**, *Sea bed sediments around the United Kingdom*, B.G.S. ed., carte à 1:1 000 000, 1987.
- Dirección General Marítima Portuaria**, *Mapa de repartition de las facies sedimentarias, Bahía de Cartagena*, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas y Misión Técnica Francesa, carte à 1 : 25 000, 1983.
- Emylianov E., Neumann G., Harff J., Kramarska R., Uscinowicz S., Shirchshov P.P.**, *Quaternary deposits of the western Baltic et Bottom sediments of the western Baltic*. Head Department of Navigation and Oceanography, Russian federation Ministry of Defense, Sankt Petersburg, carte à 1: 500 000, 1994.
- Garlan T.**, "Innovation in marine cartography at SHOM", *International Hydrographic Review*, LXX(1), 1993, p. 103-120.
- Garlan T.**, *Apports de la modélisation dans l'étude de la sédimentation marine récente*, Mémoire d'HDR, Université des Sciences et Techniques de Lille, 2004, 155 pp.
- Garlan T.**, "Gis and mapping of moving marine sand dunes", *Proceedings ICC2009*, Santiago, Chili, 2009.
- Geological survey of Japan AIST**, *Sedimentological map offshore of Cape Ochiishi*, Marine Geological map, series N°70 CD, carte à 1 : 200 000, 2011.
- Guyon E., Troadec J.P.**, *Du sac de billes au tas de sable*, Éditions Jacob, Sciences, 1994, 306 p.
- Ikehara K.**, *Sedimentological map of South of Tosa Wan*, Geological survey of Japan, Marine Geology Map series, N°34, carte à 1 : 200 000, 1988.
- Instituto Hidrografico**, *Carta dos sedimentos superficiais de Cabo de S. Vicente ao Rio Guadiana*, Instituto Hidrografico Ed., carte à 1 : 150 000, 1985.
- Klingebiel A., Lesueur P.**, *Carte des sédiments superficiels du plateau continental du golfe de Gascogne*", BRGM et IFREMER Ed., carte à 1 : 500 000, 1985.
- Larsonneur C.**, *Manche centrale et baie de Seine, géologie du substratum et des dépôts meubles*, Mémoire de thèse doctorat, Université Caen, 1971, 394 p.
- Lewis K.B., Garlick R.D., Dawson S.M.**, *Kaikoura canyon: depths, shelf texture and whale dives*, NIWA Chart Miscellaneous series N° 78, carte à 1 : 40 000, 1998.
- Maritime Safety Agency**, *Bottom sediment chart in the adjacent seas of Kamaisi*, Carte N° 7005, Tokyo, Japon, carte à 1 : 200 000, 1953.
- NOAA**, *Bathymetric Fishing Maps of Gloucester at 1/100 000*, US Department of Commerce Ed., National Ocean Service, carte à 1 : 100 000, 1986.
- Poppe L.J., Schlee J.S., Butman B., Lane C.M.**, *Map of the distribution of surficial sediment, Gulf of Maine and Georges Bank*, US Geological Survey and NOAA Ed., carte à 1 : 1 000,000, 1989.
- Rijks Geologische Dienst**, *Geologische kaart Rabsbank*, Rijks Geologische Dienst Ed., carte à 1 : 250 000, 1992.
- Tauber F., Lemke W.**, *Meeresbodensedimente in der westlichen Ostsee – Blatt Darss*, Institut für Ostseeforschung, Warnemünde, carte à 1 : 100 000, 1995.
- Thoulet J.**, *Précis d'analyse des fonds sous-marins actuels et anciens*, Librairie militaire R. Chapelot Ed., 1907, 220 p.
- Vaslet D., Larsonneur C., Auffret J.P.**, *Carte des sédiments superficiels de la Manche*, BRGM, France, carte à

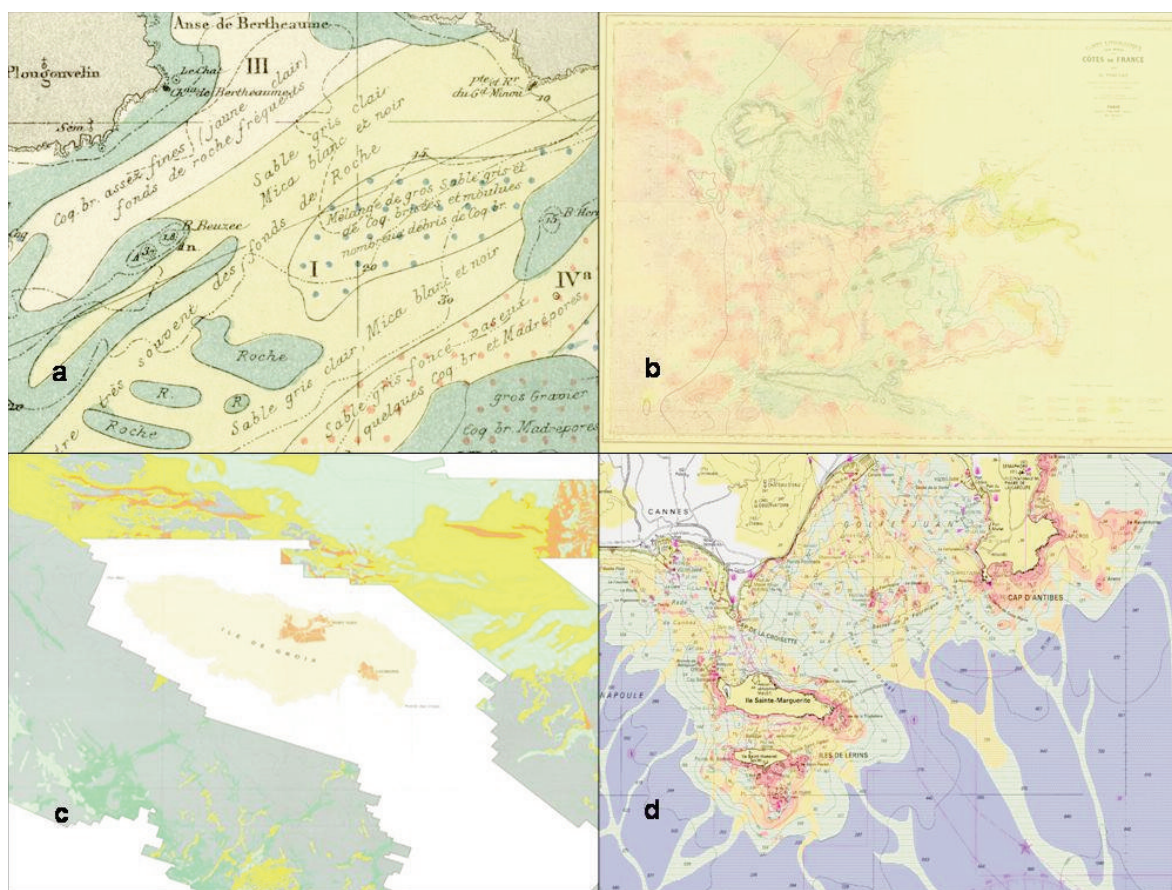


Figure 1 : Cartes sédimentaires éditées ou co-éditées par le SHOM en 1897 (a); 1912 (b); 1995 (c); 2011 (d)

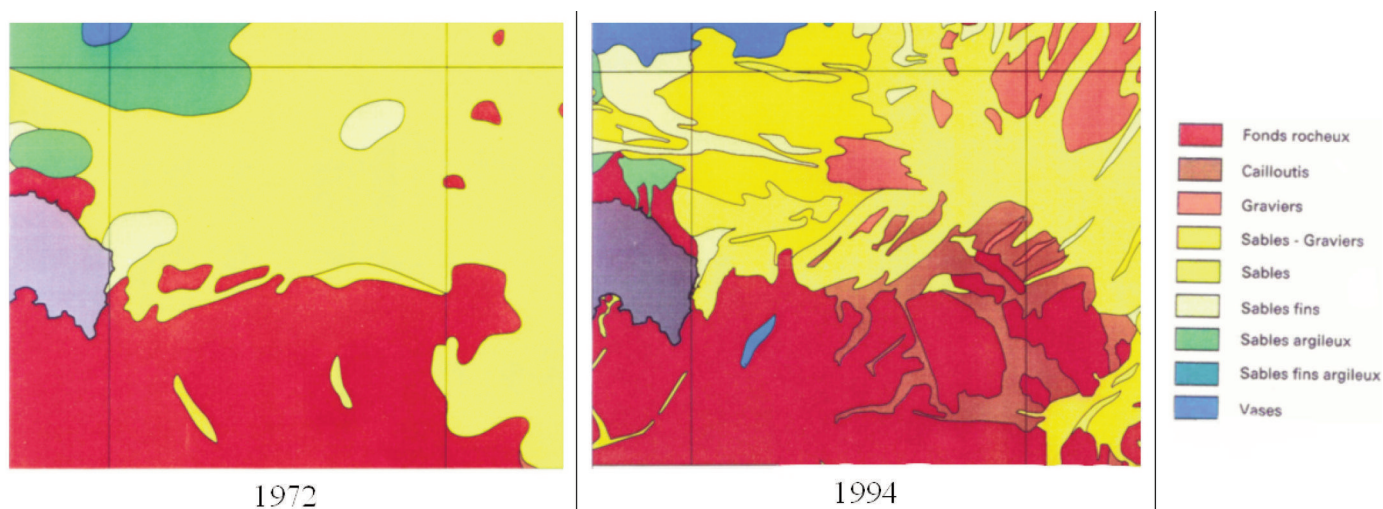


Figure 2 : Comparaison de la carte des abords de Groix publiée en 1972 avec la carte 7031 G réalisée en 1994 à partir de données de plomb suiffé, de prélèvements, de mosaïques sonar latéral et d'un modèle numérique de terrain synthétisant toutes les données bathymétriques

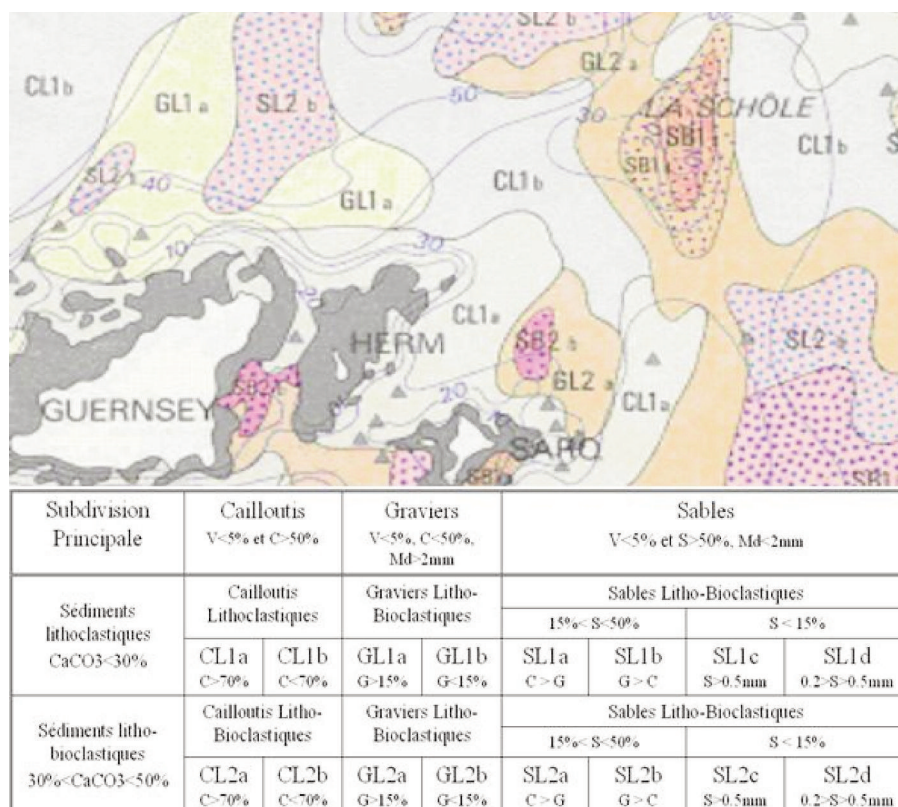


Figure 3 : Extrait de la carte des sédiments superficiels de la Manche (Vaslet et al., 1978) et de sa légende

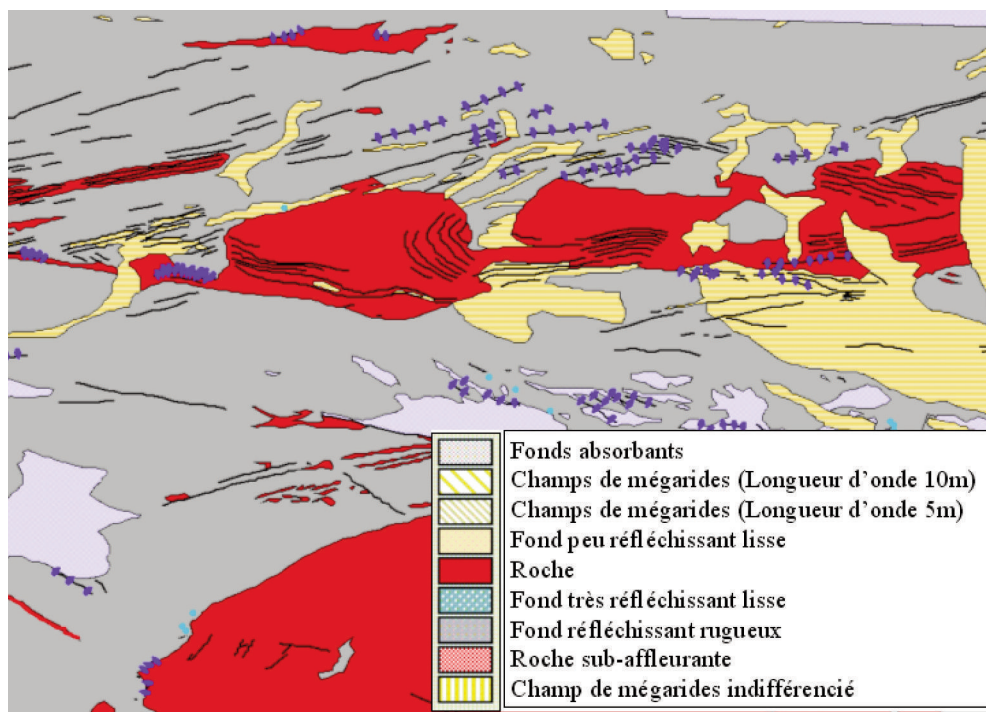


Figure 4 : Extrait de la base de données sédimentologiques du SHOM : carte des sédiments obtenue par analyse d'images sonar latéral et légende associée