



HAL
open science

Analyses granulométriques. Principes et méthodes

Jérôme Fournier, Chantal Bonnot-Courtois, Raphael Paris, Monique Le Vot

► **To cite this version:**

Jérôme Fournier, Chantal Bonnot-Courtois, Raphael Paris, Monique Le Vot. Analyses granulométriques. Principes et méthodes. Centre national de la Recherche scientifique. Zenodo, pp.97, 2012, 10.5281/zenodo.13920079 . hal-04648219

HAL Id: hal-04648219

<https://hal.science/hal-04648219v1>

Submitted on 15 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Centre National de la Recherche Scientifique
Ecole Pratique des Hautes Etudes

Analyses granulométriques


principes et méthodes

Jérôme Fournier, Chantal Bonnot-Courtois
Raphaël Paris, Monique Le Vot

Ce document est destiné aux étudiants qui souhaitent réaliser des analyses granulométriques par voie de tamisage par colonne sèche ou humide selon les standards actuels.

Il est issu des cours délivrés au Laboratoire de Géomorphologie et Environnement littoral¹ de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes de Dinard lors du stage de *Techniques d'études en Géomorphologie littorale* qui s'est déroulé annuellement jusqu'en 2005 et du stage du Master Recherche *Sciences de la Vie et de la Terre, mention Environnement et Gestion de la Biodiversité*.

Les auteurs tiennent à remercier les Professeurs émérites Fernand Verger² et Louis-Robert Lafon³ pour avoir initié ce cours et le Dr Bruno Caline⁴ pour l'organisation du stage pour ingénieurs *Sédimentation des Milieux actuels* qui se déroule annuellement en baie du Mont-Saint-Michel. Les photographies du matériel de laboratoire sont de Thibaut Nebout⁵, les autres de Jérôme Fournier.

Les principaux indices granulométriques et les statistiques descriptives peuvent être calculées avec  à l'aide du package G2Sd développé par Régis Gallon⁶ et Jérôme Fournier [27] disponible à l'adresse suivante <http://cran.r-project.org/web/packages/G2Sd/index.html>. Les lecteurs sont encouragés à envoyer leurs corrections et remarques à fournier@mnhn.fr pour contribuer à améliorer ce document.

Ce document doit être cité comme suit :

Fournier J., Bonnot-Courtois C., Paris R., Voltaire O., Le Vot M., 2012. *Analyses granulométriques, principes et méthodes*. CNRS, Dinard, 100 p.

Les auteurs

Jérôme FOURNIER est Chargé de Recherche au CNRS

Chantal BONNOT-COURTOIS est Directrice de Recherche honoraire au CNRS

Raphaël PARIS est Chargé de Recherche au CNRS

Monique LE VOT est Technicienne de Recherche honoraire à l'EPHE



1. Département Milieux, Organismes, Evolution|Section des Sciences de la Vie et de la Terre

2. Ecole Pratique des Hautes Etudes et Ecole Normale Supérieure

3. Ecole Pratique des Hautes Etudes

4. TOTAL, Carbonate and Sedimentology Group

5. Muséum National d'Histoire Naturelle

6. Muséum National d'Histoire Naturelle

Table des matières

1 Définitions	9
1.1 Principe du tamisage à sec et du tamisage sous eau	10
1.2 Principe de la sédimentométrie	10
1.3 Principe de la granulométrie par diffraction laser	10
1.4 Analyse d'image	11
1.4.1 Grains <i>non-usés</i>	11
1.4.2 Grains <i>émoussés luisants</i>	11
1.4.3 Grains <i>ronds-mats</i>	11
1.4.4 L'exoscopie des quartz	12
1.5 Définitions granulométriques et classes de taille	12
2 Prélèvements sur le terrain	16
2.1 Pour l'analyse granulométrique	16
2.1.1 Accès indirect au terrain	16
2.1.2 Accès direct au terrain	17
2.2 Pour l'analyse stratigraphique	18
2.2.1 Carottier à main	18
2.2.2 Boîtes de Reineck	18
2.2.3 Carottiers tube et multi-tube	20
3 Le matériel pour le tamisage	22
3.1 Prélever et stocker	22
3.2 Laver	23
3.3 Sécher	24
3.4 Diviser	24
3.5 Tamiser	25
3.6 Peser	26
3.7 Calciner	27
3.8 Carbonate de Calcium	28
4 Analyses granulométriques	29
4.1 Traitement des échantillons	29
4.1.1 Choix de la fraction du sédiment à considérer	29
4.1.2 Schéma de l'analyse granulométrique	30
4.1.3 Techniques granulométriques	34
4.2 Traitement des données	36
4.2.1 Méthode des percentiles	36
4.2.2 Méthode des moments statistiques	40

TABLE DES MATIÈRES

4.2.3	Représentation graphique	45
4.2.4	Méthode des indices granulométriques	48
4.2.5	Traitement d'image	50
5	Autres analyses classiques	51
5.1	Forme des grains	51
5.1.1	Sphéricité	51
5.1.2	Aplatissement	52
5.1.3	Allongement	52
5.1.4	Rondeur	52
5.1.5	Divers	53
5.2	Calcimétrie	56
5.2.1	Préparation de l'échantillon	56
5.2.2	Mode opératoire	56
5.2.3	Calcul de la teneur en CaCO_3	57
5.3	Matière Organique	58
5.3.1	Mode opératoire	58
5.3.2	Calcul de la teneur en MO	58
5.4	Teneur en eau	59
5.4.1	Dosage	59
5.4.2	Calcul de concentration pour un sédiment humide	59
5.5	Tassement et rhéologie des vases	60
5.5.1	Vitesse de chute et floculation des particules	60
5.5.2	Caractéristiques granulométriques, minéralogiques et chimiques des sédiments vaseux	60
5.5.3	Tassement des vases	62
5.5.4	Propriétés physique d'une particule solide en eau calme	63
5.5.5	Ensemble de particules	63
6	Représentations cartographiques	65
6.1	Légende des cartes	65
6.2	Nature des fonds	66
6.3	Faciès sédimentaires	67
6.4	Mode opératoire	68
A	Cartes sédimentologiques	70
B	Article	78
B.1	Exemple d'article	91
C	Notes personnelles	92
	Bibliographie	94
	Index	98

Table des figures

1.1	Diamètre de Feret	9
1.2	Grain de quartz vu au MEB. Notez les nombreux impacts mécaniques suite au tsunami de 2004 (Indonésie, cliché : R. Paris) . . .	12
2.1	Benne Smith N/O <i>Louis Fage</i> MNHN	17
2.2	Seringue et pilulier	17
2.3	Boîte de Reineck	19
2.4	Echantillons prélevés par une boîte de Reineck et séchés	19
2.5	Carottier multi-tube N/O <i>Pourquoi Pas ?</i> Ifremer	20
2.6	Carottier Calypso N/O <i>Marion Dufresne</i> Institut Polaire	20
2.7	Carottier motorisé CNRS M2C Caen	21
2.8	Carottier à moteur sur chenilles CNRS GEOLAB Clermont-Ferrand	21
3.1	Laboratoire équipé pour l'analyse granulométrique	22
3.2	Benne à sédiment Shipeck à la remontée et ouverte avec son contenu de maêrl (<i>Lithothamnium corallioides</i> et <i>Phymatholithon calcareum</i>). N/O <i>Côtes d'Aquitaine</i> CNRS	23
3.3	Pilulier	23
3.4	Capsule en porcelaine avec un sédiment biogénique décanté (tube coquillier de <i>Lanice conchilega</i>)	24
3.5	Etuve	24
3.6	Séparateur de précision à riffle Jones	25
3.7	Tamis	26
3.8	Colonne de tamis et tamiseuse	26
3.9	Balance de précision	27
3.10	Four à moufle	27
3.11	Calcimètre Bernard	28
4.1	Diagrammes de Robinson, Shepard et Folk	34
4.2	Standard visuel pour l'estimation du tri (σ_I logarithmique de Folk & Ward, 1957)	38
4.3	Indice d'asymétrie et forme de la courbe de fréquence	39
4.4	Paramètres d'acuité et forme de la courbe de fréquence	40
4.5	Faciès parabolique, logarithmique, hyperbolique et composite	43
4.6	Représentation classique d'une analyse granulométrique	45
4.7	Vitesse de chute en fonction du diamètre pour des sphères de quartz dans l'eau à 20 °C	47

TABLE DES FIGURES

4.8	Diagramme de Hjulstrom. Relation entre la taille du grain, la vitesse de flux et le type de mouvement sédimentaire (densité du sédiment : 2.65 g/cm^{-3})	48
4.9	Détermination graphique de l'indice global d'évolution \mathcal{N} en fonction de \bar{x} et x_{100}	50
5.1	Caractérisation visuelle du degré d'éroulé des grains de sable	53
5.2	Diagramme de Zingg dans lequel chaque point représente un caillou (Germain et Filion, 2002. Géographie physique et quaternaire, 56(1) :81-95	54
5.3	Diagramme de Zingg. L : longueur (axe a), I : largeur (axe b), S : épaisseur (axe c) [Traduction : flach : disque; kugelig : sphère; stengelig : tige; flachstengelig : lame]	54
5.4	Diagramme de Sneed et Folk. 10 classes : C (compact), CP(compact-platy), CB (compact-bladed), CE (compact-elongate), P (platy), B (bladed), E (elongate), VP (very platy), VB (very bladed), VE (very elongate)	55
5.5	Relation entre l'indice de sphéricité et celui d'aplatissement. Chaque point représente un site d'échantillonnage (moyenne de éléments) (Germain et Filion, 2002. Géographie physique et quaternaire, 56(1) :81-95	55
5.6	Opérations d'une calcimétrie	57
6.1	Légendes utilisées pour les cartes sédimentologiques de l'archipel de Chausey	66
6.2	Sonar acoustique EdgeTech à bord du N/O <i>Serpula</i> Heriot-Watt University, Edinburgh	68
6.3	Image acoustique du Chenal de Beauchamp, Archipel de Chausey	68
A.1	Carte morpho-sédimentologique de l'archipel de Chausey	71
A.2	Carte des figures sédimentaires de l'archipel de Chausey	72
A.3	Carte des faciès sédimentaires de l'archipel de Chausey	73
A.4	Carte des formations superficielles de l'archipel de Chausey	74
A.5	Carte de la distribution du calcaire de l'archipel de Chausey	75
A.6	Carte des groupes texturaux de l'archipel de Chausey	76
A.7	Carte sédimentologique de la baie du Mont-Saint-Michel	77
A.8	Carte biosédimentologique du récif de <i>Sabellaria alveolata</i> de Champeaux	77

Liste des tableaux

1.1	<i>Définitions granulométriques selon Bellair et Pomerol (1977)</i> . . .	12
1.2	<i>Définitions granulométriques selon Bonnot-Courtois et Fournier (non publié)</i>	13
1.3	<i>Définitions granulométriques selon Migniot (non publié)</i>	13
1.4	<i>Définitions granulométriques pour les graviers, galets et blocs (non publié, modifié de Blair et McPherson, 1999)</i>	14
1.5	<i>Caractérisation sédimentaire d'après Larssonneur (1977)</i>	14
1.6	<i>Classes de tailles selon Udden (1914), Wentworth (1922), Friedman et Sanders (1978) et Blott et Pye (2001)</i>	15
4.1	<i>Feuille de données</i>	31
4.2	<i>Table d'équivalence entre les unités granulométriques</i>	33
4.3	<i>Interprétation de \mathcal{N}</i>	42
4.4	<i>Conversion des diamètres expérimentaux (vide de maille) en diamètres de Stokes-Berthois (Rivière et Vernhet, 1973)</i>	47
4.5	<i>Equivalences mailles tamis AFNOR et $X\Delta$</i>	49
5.1	<i>Relation vitesse de chute vs taille des sédiments</i>	60

Chapitre 1

Définitions

La granulométrie a pour objet la mesure de la taille de particules élémentaires ou de grains. Les méthodes qui permettent cette mesure doivent être reproductibles ; c'est pourquoi elles suivent des normes strictes. Ces méthodes sont le tamisage, les méthodes optiques, le tri par fluide ou les méthodes électriques.

- le tamisage à sec ($> 100 \mu m$)
- le tamisage sous eau ($> 30 \mu m$)
- la sédimentométrie (1 à $100 \mu m$)
- la centrifugation (0.1 à $20 \mu m$)
- la diffraction laser (0.02 à $2 mm$)
- la microscopie optique ($> 50 \mu m$ à $2 mm$)

La granulométrie consiste aussi en l'analyse de la distribution statistique des classes de tailles d'une collection de grains. Le diamètre d'une particule se mesure à l'aide du diamètre de Feret qui mesure une taille dans une direction a donnée. On définit l'exo-diamètre comme étant la position de D pour laquelle D_f est maximal et le méso-diamètre avec D_f minimal [39] (Fig. 1.1).

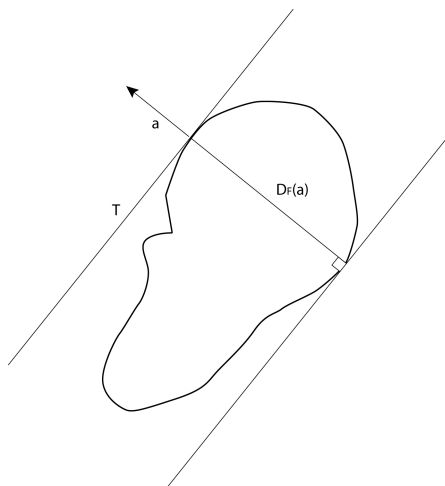


FIGURE 1.1 – Diamètre de Feret

La forme du grain peut être définie par un indice qui mesurerait la surface de l'aire projetée par le grain à la surface du cercle ayant un diamètre égal à l'exo-diamètre. Le diamètre équivalent correspond au diamètre de la sphère qui se comporterait de manière identique lors d'une analyse granulométrique. Il est important de noter qu'une particule d'origine bioclastique¹ ne présentera pas la même taille selon la méthode utilisée, le granulomètre par diffraction laser ou la granulométrie par colonne de tamis par exemple.

1.1 Principe du tamisage à sec et du tamisage sous eau

Le tamisage consiste à mesurer le poids de sédiment retenu par les toiles de mailles de tamis calibrés. Chaque tamis est superposé par taille de maille décroissante selon une progression mathématique. Le poids de sédiment retenu (refus de tamis) peut alors être connu. On utilise une tamiseuse qui va faire vibrer l'ensemble de la colonne pendant un temps précis. Il est possible de réaliser cette opération à sec lorsque les grains sont relativement grossiers (à partir des silts). Si le sédiment à analyser est composé de particules fines (vase), le tamisage s'effectue sous un flux d'eau ou, plus rarement, d'un autre liquide (alcool par exemple). Il faut alors laisser décanter puis sécher chaque refus avant de les peser.

1.2 Principe de la sédimentométrie

Il s'agit de mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau. La loi de Stokes qui décrit la vitesse de chute des particules permet de déterminer la taille des grains. Différentes méthodes sont utilisées.

- la pipette d'Andreasen
- la sédimentométrie X
- la balance de Martin

Les plus courantes sont la pipette d'Andreasen qui permet de mesurer à un temps donné et une hauteur donnée la concentration en matière de la suspension et la sédimentométrie par rayonnement X qui mesure l'absorption du rayonnement par la suspension à une hauteur donnée et un temps donné qui dépend de la concentration. Enfin, la balance de Martin mesure la quantité de matière déposée sur un plateau en fonction du temps.

1.3 Principe de la granulométrie par diffraction laser

Basé sur le principe de la diffraction de la lumière, les grains en suspension dans l'eau diffractent une lumière émise par un faisceau laser. La taille des particules modifie la répartition spatiale de la lumière qui est enregistrée par des photo-diodes. La proportion de chaque classe dimensionnelle est alors déterminée. Cette méthode, très précise, est toutefois limitée par la longueur d'onde du

1. sous forme de petite plaque ou de tuile

faisceau laser et par la transparence des grains. Il est nécessaire que les grains soient suffisamment opaques et d'une taille supérieure à celle de la longueur d'onde de la lumière. Si on prend en compte la diffusion et la réflexion de la lumière par les grains, les mesures de taille de grain nettement plus faible peuvent être réalisées. Les plus récents granulomètres par diffraction laser utilisent ce principe (Beckman Coulter LS-13320 ©, Cilas 1090/1190 ©, Malvern Mastersizer 2000 ©, Shimadzu SALD et IG-1000 ©, ...).

1.4 Analyse d'image

Les observations morphoscopiques sont effectuées à la loupe binoculaire. Des photographies numériques sont prises via une caméra reliée à l'ordinateur. L'image numérique peut être analysée par une application logicielle dédiée (ImageJ 1.44 © par exemple). Cette méthode permet la mesure des tailles de grains à partir d'une image transformée (binaire). Elle permet aussi de mesurer la forme de la particule et de connaître son origine (morphoscopie, nature du minéral). Cette méthode a le défaut, inhérent à son principe, de ne mesurer le grain ou la particule qu'en deux dimensions.

Suite aux travaux pionniers de Sorby (XIXe siècle) et Cayeux (1929), Cailleux a développé la morphoscopie qui consiste à trier les fractions granulométriques d'un échantillon sédimentaire puis à classer les grains par observation optique ($\times 5$ à $\times 80$) selon des critères de forme et d'aspect de surface, qui reflètent leur histoire et peuvent fournir des indices sur l'évolution des milieux et le mode de mise en place des sédiments. La morphoscopie a pour objectif de déterminer les milieux de dépôt des grains. Cailleux a défini trois catégories principales.

1.4.1 Grains *non-usés*

Ils se caractérisent par une forme anguleuse que les cristaux soient automorphes ou pas. Les arêtes ne doivent présenter aucune trace de polissage, ni d'arrondissement. L'aspect de la surface peut être mat ou luisant. Ces grains proviennent des arènes, des dépôts glaciaires et sont généralement d'origine proximale.

1.4.2 Grains *émoussés luisants*

Les arêtes de cette catégorie de grains offrent une forme arrondie jusqu'à présenter une forme sub-sphérique ou sphérique. L'aspect de la surface est très poli et brillant. Ces grains sont caractéristiques des rivières et fleuves, des plages littorales et de la plateforme continentale. Leur origine est déjà nettement plus distale.

1.4.3 Grains *ronds-mats*

La forme de ces grains correspond à une sphère presque parfaite. L'aspect de la surface est toujours dépoli et mat. Ces grains caractérisent un transport éolien. Ils sont typiques des dunes littorales et/ou des déserts sableux (Fig. 1.2).

1.4.4 L'exoscopie des quartz

La surface des grains de quartz est marquée par de nombreuses traces qui possèdent des formes et des tailles caractéristiques des facteurs qui les ont formé. Ces facteurs peuvent être d'origine physique, chimique, mécanique ou encore biologique. L'exoscopie permet d'observer et d'interpréter cet état de surface par l'analyse d'images prises par microscopie électronique à balayage (MEB), à des grossissements typiquement compris entre $\times 500$ et $\times 20\,000$. Près de 250 caractères ont été listés [35] [41] [42]. Ils permettent de déterminer le milieu de dépôt d'un grain, son histoire et parfois son origine géographique. Il est vivement recommandé de privilégier la fraction 250–355 μm . Les échantillons sont d'abord lavés dans un bain d'acide chlorhydrique (HCl) dilué, puis rincés à l'eau distillée. Après séchage, on sélectionne les grains, qui sont ensuite métallisés sous vide d'air (or, carbone ou argent).

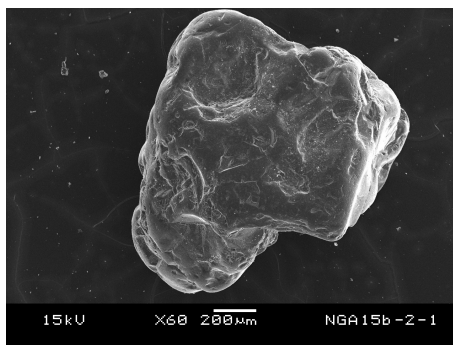


FIGURE 1.2 – Grain de quartz vu au MEB. Notez les nombreux impacts mécaniques suite au tsunami de 2004 (Indonésie, cliché : R. Paris)

1.5 Définitions granulométriques et classes de taille

Les définitions granulométriques sont nombreuses et variables selon les auteurs, l'échelle spatiale des secteurs géographiques étudiés et la nature des sédiments rencontrés. Quelques exemples peuvent être donnés [60] [56].

TABLE 1.1 – Définitions granulométriques selon Bellair et Pomerol (1977)

		Blocs (anguleux)	
	Rudites	Galets (arrondies)	20 mm
		Graviers	2 mm
Classes	Arénites	Sables	
		Sablons	0.063 ou 0.050 mm
		Silts	
	Lutites	Argiles	0.002 mm

TABLE 1.2 – *Définitions granulométriques selon Bonnot-Courtois et Fournier (non publié)*

	Taille	Dénomination
	$> 20 \text{ mm}$	Galets
	$5 \text{ à } 20 \text{ mm}$	Graviers
2 mm	$2 \text{ à } 5 \text{ mm}$	Granules
	$1 \text{ à } 2 \text{ mm}$	Sable grossier
	$0.5 \text{ à } 1 \text{ mm}$	Sable moyen
$200 \mu\text{m}$	$200 \text{ à } 500 \mu\text{m}$	Sable fin
	$100 \text{ à } 200 \mu\text{m}$	Sablon grossier
$63 \mu\text{m}$	$63 \text{ à } 100 \mu\text{m}$	Sablon fin
	$40 \text{ à } 63 \mu\text{m}$	Silt
	$2 \text{ à } 40 \mu\text{m}$	Vase
	$< 2 \mu\text{m}$	Argiles

TABLE 1.3 – *Définitions granulométriques selon Migniot (non publié)*

	Blocs	$> 200 \text{ mm}$
Rudites	Galets	$20 \text{ à } 200 \text{ mm}$
	Graviers	$> 2 \text{ à } 20 \text{ mm}$
	Sable très grossier	$1 \text{ à } 2 \text{ mm}$
	Sable grossier	$0.5 \text{ à } 1 \text{ mm}$
Arénites	Sable moyen	$0.25 \text{ à } 0.5 \text{ mm}$
	Sable fin	$125 \text{ à } 250 \mu\text{m}$
	Sable très fin	$63 \text{ à } 125 \mu\text{m}$
	Silt	$4 \text{ à } 63 \mu\text{m}$
Lutites	Précolloïdes	$0.12 \text{ à } 4 \mu\text{m}$
ou Pélites	Colloïdes	$< 0.12 \mu\text{m}$

TABLE 1.4 – Définitions granulométriques pour les graviers, galets et blocs (non publié, modifié de Blair et McPherson, 1999)

Classe	Taille (mm)
Sable	< 2
Gravier très fin	2–4
Gravier fin	4–8
Gravier moyen	8–16
Gravier grossier	16–32
Gravier très grossier	32–64
Petit galet	64–90
Galet moyen	90–128
Gros galet	128–180
Très gros galet	180–256
Petit bloc	256–512
Bloc moyen	512–1024
Gros bloc	1024–2048
Très gros bloc	2048–4096
Mégabloc	> 4096

TABLE 1.5 – Caractérisation sédimentaire d’après Larssonneur (1977)

Type de dépôt	Caractérisation
Cailloutis	> 50% de galets
Graviers	> 50% galets et de graviers
Sables	> 50% de fraction < 2 mm ; < 5% de lutites
sables graveleux	> 15% de graviers
sables grossiers	fraction 0.5–2 mm dominante
sables fins	fraction 0.2–0.5 mm dominante
sablons	fraction 0.05–0.2 mm dominante
Sédiments vaseux	> 5% de lutites
sables vaseux	de 5% à 25% de lutites
vases sableuses	de 25% à 75% de lutites
vases	plus de 75% de lutites

TABLE 1.6 – *Classes de tailles selon Udden (1914), Wentworth (1922), Friedman et Sanders (1978) et Blott et Pye (2001)*

Taille de grain		Terminologie			
ϕ	$mm/\mu m$	Udden (1914) Wentworth (1922)	Friedman & Sanders (1978)	Blott & Pye (2001)	
-11	2048 mm	Cobbles	Very large boulders		Boulders
-10	1024		Large boulders	Very large	
-9	512		Medium boulders	Large	
-8	256		Small boulders	Medium	
-7	128		Large cobbles	Small	
-6	64		Small cobbles	Very small	
-5	32	Pebbles	Very coarse pebbles	Very coarse	Gravel
-4	16		Coarse pebbles	Coarse	
-3	8		Medium pebbles	Medium	
-2	4		Fine pebbles	Fine	
-1	2	Granules	Very fine pebbles	Very fine	
0	1	Very coarse sand	Very coarse sand	Very coarse	Sand
1	500 μm	Coarse sand	Coarse sand	Coarse	
2	250	Medium sand	Medium sand	Medium	
3	125	Fine sand	Fine sand	Fine	
4	63	Very fine sand	Very fine sand	Very fine	
5	31	Silt	Very coarse silt	Very coarse	Silt
6	16		Coarse silt	Coarse	
7	8		Medium silt	Medium	
8	4	Clay	Fine silt	Fine	
9	2		Very fine silt	Very fine	
			Clay	Clay	

Chapitre 2

Prélèvements sur le terrain

L'extraction de sédiment sur le terrain nécessite l'utilisation de techniques très variées selon la nature du terrain, le problème posé et le type d'analyse, le type de sédiment (des vases aux méga-blocs) et la quantité de sédiment à analyser.

2.1 Pour l'analyse granulométrique

2.1.1 Accès indirect au terrain

Le terrain peut être de nature très variable selon sa localisation - océan, littoral, lac et étang, fleuve et rivière, bras-mort -. Le terrain d'étude peut être accessible directement ou indirectement. Dans le cas d'un travail réalisé en mer, en rivière ou sur un lac. . . par exemple, prélever du sédiment nécessitera l'utilisation de moyens spécifiques comme un navire, un semi-rigide voire une embarcation légère de type kayak. Les instruments permettant l'extraction de sédiment seront adaptés selon l'embarcation choisie : bennes dédiées à l'extraction de sédiment comme les bennes Shipeck, Eckman, Orange-Peel, Ponar, Petersen, Boxcorer ou dédiées à l'extraction du benthos mais pouvant servir aussi à celle du sédiment comme les bennes Hamon, Smith-Mac Intyre, Van Veen. . . (Fig. 2.1). Lors d'une extraction par benne, le sédiment est mélangé et la structure mise en place lors de la phase de dépôt n'est plus respectée. En outre, une benne ne permet que l'enregistrement des derniers événements sédimentaires, car l'extraction se fait sur les premiers centimètres ou dizaines de centimètres tout au plus.

La quantité de sédiment est souvent importante lors de prélèvements via une benne. Il faut ainsi considérer les possibilités de stockage et les problèmes logistiques qui sont liés (transport par exemple). Le stockage s'effectue généralement dans des sacs à échantillon de grande taille ou des containers étanches. Lors de campagnes d'échantillonnages importantes, il est nécessaire d'évoquer le problème de la durée du stockage. Si des analyses portent sur la matière organique par exemple, le stockage du sédiment doit impérativement être de courte durée avant l'analyse. Dans le cas contraire, il est possible de congeler le matériel sédimentaire. Il est rare que l'analyse granulométrique porte sur la totalité du prélèvement. Le sous-échantillonnage doit respecter certaines règles. L'utilisation d'un séparateur est alors nécessaire.



FIGURE 2.1 – Benne Smith N/O *Louis Fage* MNHN

2.1.2 Accès direct au terrain

Le prélèvement sur le terrain s'effectue directement dans le cas d'une étude portant sur une dune, une plage, un banc de sable, un cordon de galets ou de blocs, plus généralement sur le domaine intertidal... Certaines opérations peuvent parfois être réalisées en plongée subaquatique. Les techniques sont généralement identiques à celles utilisées à pied sec mais doivent être adaptées. La nature du sédiment va conditionner la quantité de matériel à prélever et la méthode qui sera utilisée. Dans le cas de sédiments meubles (jusqu'aux petits graviers), il est possible d'utiliser une seringue vétérinaire d'un diamètre inférieur à celui d'un pilulier (diamètre de 3 cm, hauteur de 5 cm soit 141 cm³) (Fig. 2.2). La seringue est enfoncée (ouverte) dans le sédiment. Le contenu est ensuite injecté dans le pilulier dont le volume¹ est largement suffisant pour caractériser un sédiment que ce soit par tamisage via une colonne de tamis ou par diffraction laser.



FIGURE 2.2 – Seringue et pilulier

Lorsque le matériel sédimentaire est très grossier (cas des graviers, galets et blocs), la technique de mesure change complètement. Il est difficile voire impossible de prélever le matériel pour une analyse ultérieure en laboratoire en raison du poids et du volume que représente ce type de matériel. Plusieurs méthodes

1. $\pi \times R^2 \times h$

ont été développées pour ce type de matériel dont la méthode de Cailleux et Tricart [11] ou, plus récente, celle de Wolman [32] [33] qui consiste à mesurer les trois axes des galets (grand axe A, axe intermédiaire B et petit axe C) selon un transect ou un quadrat. La taille de la zone d'échantillonnage doit être choisie avec soin en fonction de la taille des galets/blocs, de leur distribution dans l'espace (distribution régulière, par noyaux, aléatoire, espacée ou non...). Des tests statistiques préalables peuvent être très utiles avant de procéder à l'acquisition définitive des données. La réplication des prélèvements est nécessaire dans le cas de traitements statistiques. Lors de ce type de mesure, il est souhaitable d'effectuer une photographie (orientée au Nord) de la zone d'échantillonnage avant la mesure des galets au pied à coulisse (par exemple). Les photographies permettent ensuite d'analyser l'orientation et les fabriques de galets et de blocs [6] [14] [15].

2.2 Pour l'analyse stratigraphique

Le prélèvement de sédiment sous la forme d'une carotte permet d'analyser la structure des dépôts (stratigraphie séquentielle par exemple) et/ou d'effectuer des analyses granulométriques selon la structure. Plusieurs matériels permettent l'extraction de carottes. Les carottiers à main, les carottiers-tubes pour extraire des carottes longues mais de faible diamètre et les carottiers-boîtes (boîte de Reineck) pour des prélèvements courts de grande section.

De manière générale, il est préférable de choisir une technique qui respecte l'intégrité du sédiment. Le sédiment est toutefois systématiquement tassé et des effets de bords existent.

2.2.1 Carottier à main

Il peut être fabriqué à l'aide d'un tube de PVC que l'on bouche aux deux extrémités une fois le sédiment prélevé. Le diamètre du tube est un paramètre important à considérer. Il sera choisi en fonction de la nature du sédiment rencontré sur le terrain d'étude (présence ou non d'éléments grossiers limitant la profondeur). Il est possible d'extraire manuellement des carottes de plusieurs décimètres de hauteur ($\sim 50\text{ cm}$ maximum). Il est parfois nécessaire de creuser autour de la carotte pour l'extraire du sédiment. Ce type de carottier est enfoncé à la main ou à l'aide d'une masse et peut être utilisé en plongée subaquatique. Les sondages à l'aide d'une tarière manuelle sont encore très pratiqués, mais principalement en guise de reconnaissance car les sédiments remontés sont souvent fortement perturbés. Enfin, le carottier russe permet d'extraire des demi-carottes de 50 cm de long (tubes PVC coupés dans le sens de la longueur) dans des sédiments facilement pénétrables (ex. tourbières).

2.2.2 Boîtes de Reineck

La boîte de Reineck consiste en une boîte sans fond, de section carrée (20–30 cm de côté et 50–80 cm de hauteur) (Fig. 2.3). Une plaque *couteau* obture par le côté la boîte et traverse le sédiment. Ces boîtes existent sous différentes formes

et tailles selon qu'elles s'extraient à la main ou à l'aide de treuils embarqués à bord de navires océanographiques.



FIGURE 2.3 – Boîte de Reineck

La boîte remplie de sédiment est mise à sécher pendant 3 semaines dans un local sec et aéré. Une fois séchée, la plaque *couteau* est ôtée délicatement. Le sédiment peut être encollé par une résine (type marine). Une gaze est posée sur le sédiment encollé. Une deuxième couche de résine est posée. Le séchage de la résine doit durer une semaine. La boîte peut alors être retournée sur une plaque de bois² préalablement encollée. On ôte la boîte et on laisse sécher à nouveau une semaine. Une fois le matériel entièrement sec, à l'aide d'un petit jet d'eau, on ôte le sédiment non encollé. La structure sédimentaire devient alors parfaitement lisible et peut faire l'objet d'une interprétation (Fig. 2.4).

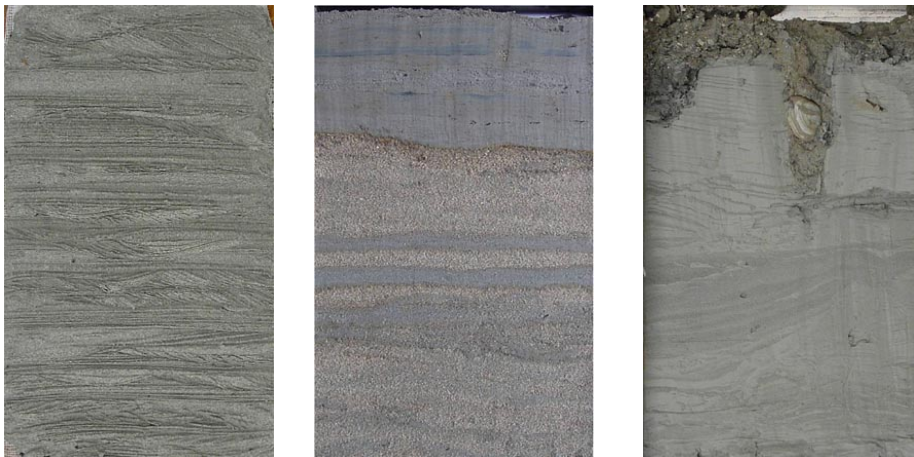


FIGURE 2.4 – Echantillons prélevés par une boîte de Reineck et séchés

2. en contreplaqué marine

2.2.3 Carottiers tube et multi-tube

Il s'agit d'un long tube en métal qui s'enfonce par gravité dans le sédiment. Ce tube contient une chemise amovible et un système d'obturation³. Plusieurs tubes peuvent être réunis dans un bâti unique. Ce type de carottier *multi-tube* permet de prélever une dizaine de carottes en un même lieu rapidement dans les environnements de sables fins ou vaseux (Fig. 2.5). Il existe bien d'autres carottiers qui sont utilisés en océanographie. Le N/O *Marion Dufresne* de l'Institut Polaire est capable d'extraire des carottes de 60 m de longueur à l'aide de son carottier Calypso (Fig. 2.6).

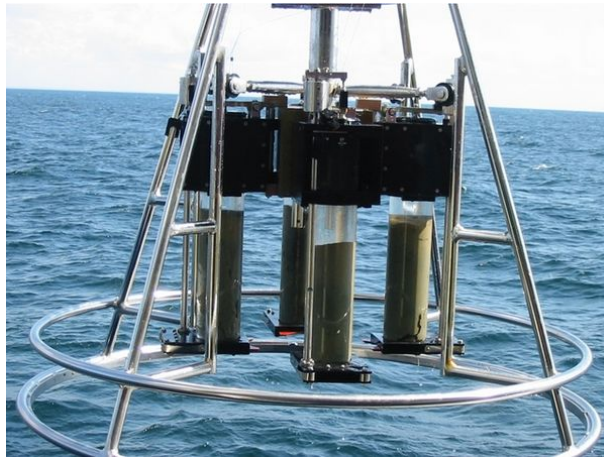


FIGURE 2.5 – Carottier multi-tube N/O *Pourquoi Pas ?* Ifremer



FIGURE 2.6 – Carottier Calypso N/O *Marion Dufresne* Institut Polaire

3. système du carottier Kullenberg

Pour les prélèvements à terre, différents types de carottiers motorisés sont utilisés, suivant les types de sédiments ou de roches à pénétrer et suivant la largeur/profondeur du carottage. Deux exemples de carottiers à moteur sont présentés ci-dessous (Fig. 2.7 et 2.8). Ils permettent de forer à des profondeurs plus importantes et surtout dans des types de terrain difficiles à pénétrer par d'autres moyens. Le contrôle de la profondeur de forage doit être rigoureuse car des phénomènes de compaction peuvent se produire.



FIGURE 2.7 – Carottier motorisé CNRS M2C Caen



FIGURE 2.8 – Carottier à moteur sur chenilles CNRS GEOLAB Clermont-Ferrand

Chapitre 3

Le matériel pour le tamisage

Un laboratoire de sédimentologie contient plusieurs instruments destinés à l'analyse granulométrique. L'idéal est de disposer d'un plan de travail laissé libre et dédié au lavage et à la décantation des échantillons. Pour information, 40 capsules de 30 cm de diamètre placées côte à côte représentent 2,8 m². Le laboratoire doit disposer de postes de travail dédiés à la pesée, à l'observation des échantillons¹, éventuellement d'un poste informatique permettant la saisie des données. Le reste du laboratoire est dédié au séchage, au tamisage et aux analyses chimiques (Fig. 3.1).



FIGURE 3.1 – Laboratoire équipé pour l'analyse granulométrique

3.1 Prélever et stocker

Plusieurs modèles de bennes sont dédiées au prélèvement de sédiment. La benne Shipeck compte parmi les plus utilisées (Fig. 3.2). Le ressort qui l'active est très puissant. De ce fait, elle est presque étanche, conserve bien les sédiments fins et reste efficace pour tout type de fonds, y compris ceux tapissés de cailloutis.

A pied sec, l'échantillon de sédiment peut être prélevé sur le terrain à l'aide d'une seringue vétérinaire d'un diamètre inférieur à celui du pilulier (Fig. 2.2, 3.3) dans le cas de sédiments peu grossiers (< 5 mm). Le nom de l'échantillon doit être indiqué au marqueur indélébile sur le côté du tube et sur le bouchon.

1. loupe binoculaire et/ou microscope



FIGURE 3.2 – Benne à sédiment Shipeck à la remontée et ouverte avec son contenu de maërl (*Lithothamnium corallioides* et *Phymatholithon calcareum*). N/O Côtes d'Aquitaine CNRS



FIGURE 3.3 – Pilulier

3.2 Laver

Le contenu du pilulier est placé dans une capsule (Fig. 3.4) dans laquelle on ajoute de l'eau distillée. A l'aide d'un agitateur en verre, on mélange le sédiment à l'eau et on laisse décanter jusqu'à ce que l'eau soit parfaitement claire. On siphonne ensuite le trop-plein à l'aide d'un tube chirurgical en latex par exemple. L'opération peut être répétée plusieurs fois jusqu'à ce que le sédiment soit parfaitement dessalé. Lors de cette opération, on ôte à l'aide d'une pince tous les débris (algues, bois...) qui flottent en surface.

Certains échantillons demandent une préparation plus longue. Citons le cas particulier des tubes sableux générés par certaines Annélides Polychètes. Les grains ne peuvent pas se détacher aisément car ils sont liés entre eux par un ciment biominéral. Après avoir rincé les tubes, il est nécessaire d'effectuer une légère attaque au peroxyde d'hydrogène (à 50%). La capsule est ensuite placée sur une plaque chauffante à 40°C pendant une dizaine de minutes. Les grains se détachent progressivement et tombent au fond de la capsule. Les tubes muqueux internes de l'animal peuvent être ôtés à l'aide d'une pince (Fig. 3.4).



FIGURE 3.4 – Capsule en porcelaine avec un sédiment biogénique décanté (tube coquillier de *Lanice conchilega*)

3.3 Sécher

Les échantillons décantés sont placés dans une étuve (Fig. 3.5) pour y être séché. Selon la nature du sédiment et le type d'analyse, les échantillons vont sécher de 24 à 48 h à une température de 50°C à 60°C. Lors de la montée en température, il est souhaitable de rester à proximité de l'étude pour en vérifier le bon fonctionnement. Certaines étuves permettent de limiter la température à l'aide d'une sécurité².



FIGURE 3.5 – Etuve

3.4 Diviser

Le séparateur permet de diviser un échantillon de sédiment en deux parties rigoureusement égales (Fig. 3.6). Ceci est très pratique lorsque l'échantillon a

2. voyant ou alarme

été prélevé à l'aide d'une benne embarquée sur un navire. Le volume de sédiment à traiter est important et il n'est pas nécessaire de l'analyser dans sa totalité. On verse la totalité du sédiment lavé et séché dans le bac verseur du séparateur. Le sédiment va se séparer en deux sous-échantillons récupérés par deux bacs. L'opération est répétée jusqu'à obtenir le volume de sédiment souhaité.



FIGURE 3.6 – Séparateur de précision à riffle Jones

Certaines analyses, la calcimétrie notamment, demandent de broyer le sédiment à l'aide d'un mortier et d'un pilon. L'intégrité des clastes n'est évidemment plus assurée et toute analyse granulométrique s'en trouvera fortement biaisée.

3.5 Tamiser

Un tamis (Fig. 3.7) est composé d'une toile de mailles dont l'ouverture est déterminée. Généralement les tamis les plus fins ont une taille de $40\ \mu m$. Les tamis les plus larges sont nommés passoirs (à partir de $3.315\ mm$). Pour information, les tamis AFNOR respectent la progression suivante : $40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800\ \mu m$, $1, 1.25, 1.6, 2, 2.5\ mm$ et les passoirs : $3.315, 4, 5, 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25\ mm$. D'autres nomenclatures sont parfois utilisées, avec des tamis en unités phi par exemple.

Les tamis sont placés les uns sur les autres dans le sens décroissant. Le sédiment sec est déversé au sommet de la colonne (Fig. 3.8). On utilise un fond étanche à la base de la colonne pour récupérer le refus.

La colonne est placée sur une tamiseuse (Fig. 3.8) qui va la faire vibrer à une fréquence connue pendant un temps connu (généralement 10 minutes). Le sédiment va ainsi être trié selon la taille des grains qui le compose. Chaque refus est alors versé délicatement dans une capsule pour être pesé. Un grand soin doit être apporté lorsque l'on enlève les derniers grains qui restent dans le tamis. On utilise généralement un pinceau ou une brosse (selon la finesse de la maille). On ne doit jamais appuyer sur le tamis à l'aide de la brosse et on ne



FIGURE 3.7 – Tamis



FIGURE 3.8 – Colonne de tamis et tamiseuse

doit jamais enlever par la force un grain resté bloqué dans une maille. Il existe des systèmes de nettoyage des tamis qui utilisent les ultra-sons. Les tamis ne doivent pas être désolidarisés et la colonne ne doit pas être dépareillée. Il est parfois utile d'utiliser un tamis d'une taille précise sur le terrain mais ce tamis ne doit pas appartenir à une colonne utilisée en laboratoire. L'usure des tamis doit être homogène [39]. Pour cette raison, la colonne doit être changée dans sa totalité (au moins les tamis).

3.6 Peser

Chaque refus de tamis est pesé à l'aide d'une balance de précision, préalablement stabilisée sur un plan parfaitement horizontal, tarée et à l'abri des mouvements d'air (Fig. 3.9). Il est également essentiel que la balance de précision soit étalonnée par un organisme certifié avec une périodicité adaptée. Les données sont notées sur une feuille (Tab. 4.1) avant d'être intégrées dans un tableur à fin d'analyses statistiques. Les refus sont stockés pour archivage dans



FIGURE 3.9 – Balance de précision

des sachets clairement identifiés. Il est souvent utile de stocker séparément les fractions supérieures et inférieures à 40 ou 63 μm .

3.7 Calciner

Le four à moufle (Fig. 3.10) permet de calciner le sédiment à très haute température (jusqu'à 2000°C). Le carbone organique (C_{org}) (produit par des organismes vivants et lié à d'autres éléments comme H , N ou P), le carbone inorganique (C_{inorg}) (associé à des composés inorganiques, CO_2 , $CaCO_3$), les carbonates peuvent être indirectement mesurés, sous certaines conditions, à l'aide de ce type de four. Le sédiment calciné est ensuite pesé une fois refroidi dans un dessiccateur. Pour rappel, le carbone organique est égal à la différence entre le carbone total et le carbone minéral.

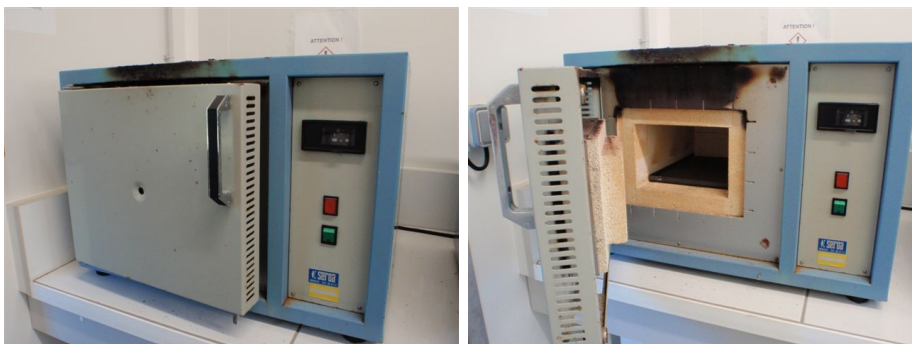


FIGURE 3.10 – Four à moufle

3.8 Carbonate de Calcium

On utilise le calcimètre Bernard (Fig. 3.11) pour mesurer le taux de carbonate de calcium contenu dans le sédiment. A l'aide d'une attaque à l'acide chlorhydrique, on élimine la partie bioclastique du sédiment et on mesure de manière indirecte le taux de CaCO_3 . Le calcimètre est composé d'une ampoule, d'un tube gradué de 100 cm^3 , d'un erlenmeyer de 100 cm^3 , d'un petit tube en verre deux fois plus court que l'erlenmeyer, deux bouchons à 1 trou adaptés au tube gradué et à l'erlenmeyer. Cette opération est délicate, aussi le port de gants spéciaux, d'une blouse en coton et de lunettes spéciales sont obligatoires.



FIGURE 3.11 – Calcimètre Bernard

Chapitre 4

Analyses granulométriques

4.1 Traitement des échantillons

4.1.1 Choix de la fraction du sédiment à considérer

Les sédiments peuvent être de nature très variable. Certains se caractérisent notamment par une teneur élevée en carbonate de calcium ($Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3$). Ce stock carbonaté est généralement de nature biogène et/ou phylogène. La présence dans un sédiment de débris coquilliers pose un problème. Certaines valeurs peuvent être faussées lorsque l'échantillon possède des bioclastes de grande taille.

Il est parfois préférable de soumettre à l'analyse granulométrique uniquement la fraction insoluble du sédiment. L'élimination systématique des particules carbonatées par attaque préalable de l'échantillon à l'acide chlorhydrique ($H_3O^+Cl^-$) (10%) offre l'avantage :

- pour la fraction grossière, de raisonner sur un stock de particules de densité plus homogène ($d = 2.65$ dans le cas d'un sable quartzeux),
- pour la fraction fine, d'aider à la dispersion de l'échantillon. En effet, les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} présents dans les carbonates, peuvent entraîner une floculation des colloïdes lors de l'analyse¹.

Cependant, en prenant certaines précautions, il est possible de soumettre les échantillons prélevés à l'analyse granulométrique sans traitement préalable à l'acide chlorhydrique. On choisit alors de considérer l'échantillon dans sa totalité.

Fraction grossière

La prise en compte de l'ensemble du matériel peut être souhaitée car les particules bioclastiques enregistrent, au même titre que les particules insolubles, les processus dynamiques majeurs survenus lors du transport et du dépôt (usure, tri granulométrique). Dans certains cas, la fraction bioclastique du sédiment dépasse 95% du total (bancs coquilliers de la baie du Mont-Saint-Michel, de l'archipel de Chausey, fonds à maërl, à crépidules...). Il reste que *la destruction des carbonates est souhaitable pour l'obtention des résultats granulométriques dans les cas suivants :*

1. cas des tangues littorales

- étude d'un sédiment originellement sans carbonate qui aura reçu ensuite un apport de carbonate,
- étude d'un sédiment dans lequel les carbonates seront recristallisés par diagenèse et n'auront donc plus les dimensions originelles.

Dans ce cas, il est nécessaire de détruire les carbonates. Dans d'autres cas, comme celui des lèss, des tanques on peut souhaiter établir la granulométrie du sédiment total, y compris des carbonates qui peuvent en être le constituant essentiel, et les granulométries établies avec ou sans carbonates peuvent être différentes [59].

On peut trouver des coquilles entières ou des bioclastes de grande taille non usés provenant d'espèces qui vivent dans le milieu étudié (rivière, lac, littoral). Dans ce cas, la mise en place de ce matériel grossier n'est pas contemporaine de celle du sédiment et biaise la granulométrie naturelle du dépôt. Il devra être éliminé de l'échantillon avant l'analyse proprement dite.

Les bioclastes, par leur densité et surtout par leur forme, s'éloignent des conditions théoriques requises pour l'application de la loi de Stokes (particules sphériques et de densité constante), principalement pour les dimensions supérieures à 0.2 mm. Même en ce qui concerne la fraction insoluble, ces conditions idéales sont souvent perturbées dans la nature par la présence soit de minéraux lourds ($d > 3$), soit de minéraux phylliteux (Biotite, Muscovite) dont le comportement hydrodynamique est sans commune mesure avec les particules quartzeuses.

Fraction fine ($< 20 \mu m$)

- l'utilisation du granulomètre par diffraction laser présente l'avantage de réduire considérablement le temps d'analyse. Ceci implique une diminution des risques de formation d'agrégats par floculation, non négligeable dans le cas des mesures traditionnelles de sédimentation libre par pipette courte d'Andreasen où l'expérience se prolonge sur 8 jours,
- pour des dimensions aussi faibles, la vitesse de chute des particules quartzeuses et carbonatées est sensiblement identique et négligeable par rapport aux variations de densité à l'intérieur même des argiles (Kaolinite : 2.61; Illite : 2.1–2.7; Montmorillonite : 1.7–2.6).

4.1.2 Schéma de l'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des sédiments meubles a pour but de connaître la répartition quantitative pour chaque classe dimensionnelle des particules élémentaires constituant l'échantillon.

Sans difficulté majeure dans le cas de sables propres et homogènes, cette analyse nécessite une préparation spéciale lorsque les échantillons renferment une quantité non négligeable de matériel fin (silt et argile). Les documents suivants présentent le protocole standard en vigueur au Bureau de Recherche Géologique et Minière et un modèle de feuille de données (Tab. 4.1). Ce protocole peut être adapté, modifié ou simplifié en fonction de la nature des questions posées. Il n'est donné ici qu'à titre d'exemple. Les données peuvent être insérées indifféremment

CHAPITRE 4. ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

en ouverture AFNOR ou ϕ^2 à l'aide du tableau 4.2.

TABLE 4.1 – *Feuille de données*

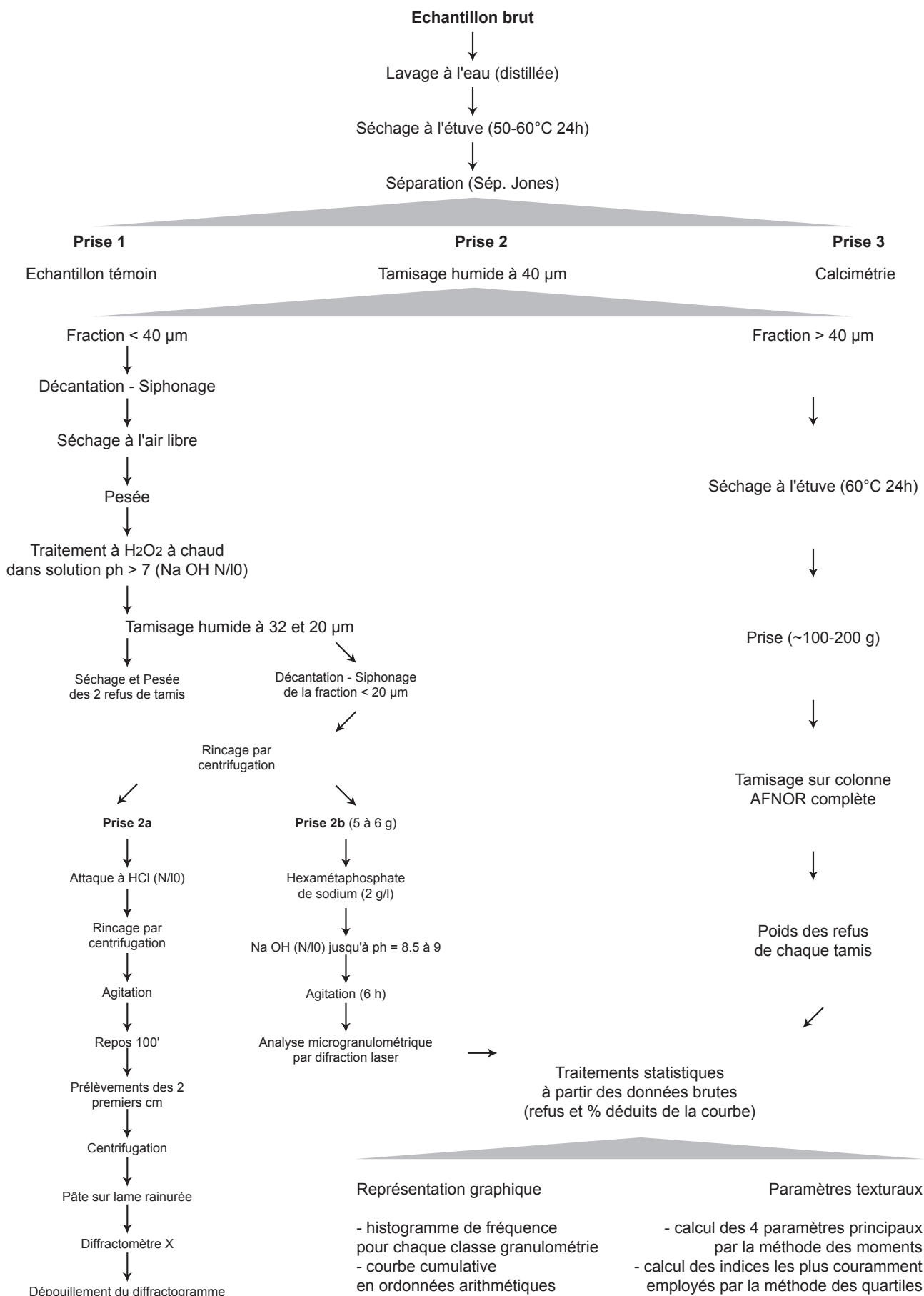
REF

Poids total :

Poids analyse :

Module AFNOR	Tamis maille en μm	Passoire diamètre en mm	Description	Poids en g	%	% cum.
44		25				
43		20				
42		16				
41		12.5				
40		10				
39		8				
38		6.3				
37		5				
36		4				
35	2500	3.15				
34	2000					
33	1600					
32	1250					
31	1000					
30	800					
29	630					
28	500					
27	400					
26	315					
25	250					
24	200					
23	160					
22	125					
21	100					
20	80					
19	63					
18	50					
17	40					
	<40					

2. $\frac{1}{2}\phi$ ou $\frac{1}{4}\phi$



↓

Traitements statistiques à partir des données brutes (refus et % déduits de la courbe)

Représentation graphique

- histogramme de fréquence pour chaque classe granulométrie
- courbe cumulative
- courbe en ordonnées arithmétiques

Paramètres texturaux

- calcul des 4 paramètres principaux par la méthode des moments
- calcul des indices les plus couramment employés par la méthode des quartiles

TABLE 4.2 – Table d'équivalence entre les unités granulométriques

Module AFNOR	Ouverture des tamis <i>mm</i>	Ouverture des tamis ϕ	Ouverture des tamis Δ
38	5	-2.32	5.70
37	4	-2.00	5.60
36	3.15	-1.66	5.50
35	2.50	-1.32	5.40
34	2.00	-1.00	5.30
33	1.60	-0.68	5.20
32	1.25	-0.32	5.10
31	1.00	0	5.00
30	0.80	0.32	4.90
29	0.63	0.66	4.80
28	0.50	1.00	4.70
27	0.40	1.32	4.60
26	0.315	1.66	4.50
25	0.250	2.00	4.40
24	0.200	2.32	4.30
23	0.160	2.66	4.20
22	0.125	3.00	4.10
21	0.100	3.32	4.00
20	0.080	3.64	3.90
19	0.063	3.98	3.80
18	0.050	4.32	3.70
17	0.040	4.64	3.60
	0.0315	4.98	3.50
	0.0250	5.32	3.40
	0.0250	5.64	3.30
	0.0160	5.96	3.20
	0.0125	6.32	3.10
	0.0100	6.64	3.00
	0.0080	6.96	2.90
	0.0063	7.30	2.80
	0.0050	7.64	2.70
	0.0040	7.96	2.60
	0.00315	8.30	2.50
	0.00250	8.64	2.40
	0.00200	8.96	2.30
	0.00160	9.28	2.20
limite inf.	0.00063		0.86

$\phi = \log_2$ de l'inverse des dimensions des particules en mm, soit

$$x_\phi = -\log_2(x_{mm}) \Rightarrow -3.32193 \log_{10}(x_{mm}) \quad (4.1)$$

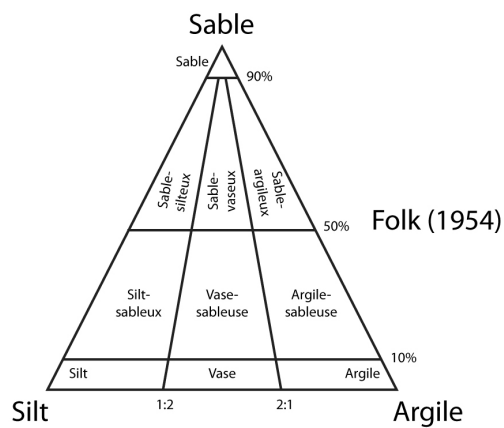
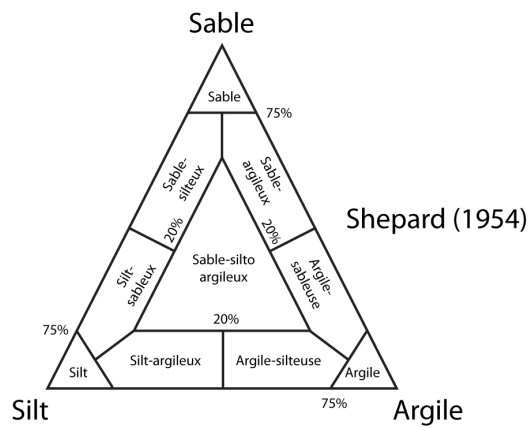
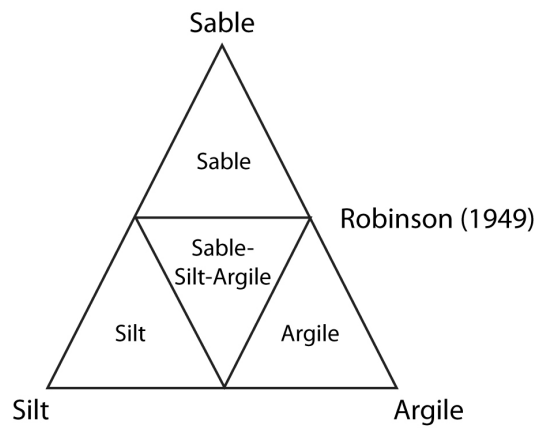


FIGURE 4.1 – Diagrammes de Robinson, Shepard et Folk

4.1.3 Techniques granulométriques

Les échantillons soumis à l'analyse granulométrique peuvent être traités à l'aide de plusieurs méthodes. Il est très importante de noter que les résultats

produits ne seront pas systématiquement comparables.

- le tamisage à sec sur une série de tamis de type AFNOR pour les dimensions comprises entre $40\ \mu m$ et $25\ mm$. La durée du tamisage est limitée à $10\ min$ afin de limiter le bris des bioclastes, nombreux dans certains échantillons. Certaines tamiseuses permettent des vibrations continues ou intermittentes. Le choix s'effectue en fonction de la nature des sédiments (agglomérats après séchage à l'étuve). En cas de doute, se reporter à la notice d'utilisation de la tamiseuse.
- le tamisage sous eau est recommandé pour séparer la fraction inférieure à $40\ \mu m$ des particules les plus grossières ou au sein même de la fraction inférieure à $40\ \mu m$. On utilise alors deux tamis, l'un d'ouverture $32\ \mu m$, l'autre de $20\ \mu m$. Cette opération réduit l'hétérogénéité du matériel et facilite l'analyse micro-granulométrique.
- la diffraction laser est recommandée pour des sédiments dont la forme s'apparente à des particules sub-sphériques $< 2\ mm$, opaques et de densité identique. Se reporter aux manuels d'utilisation des fabricants du granulomètre à diffraction laser pour plus de précision. Cette technique n'est donc pas valable pour tous les types de sédiments, ceux à forte composante bioclastique par exemple. Il est aussi possible de soumettre une partie d'un échantillon au tamisage à sec et l'autre partie à la diffraction laser mais, dans ce cas, les résultats des analyses feront l'objet d'interprétations séparées [7], [20], [21], [34], [47], [52]. Toutefois, pour certains sédiments, les résultats issus de la diffraction laser sont comparables à ceux obtenus par tamisage [17].
- la sédimentométrie par sédigraphe à rayons X fournit le tracé de la courbe granulométrique pour la fraction inférieure à $20\ \mu m$ voire $2\ \mu m$ seulement, en mesurant la vitesse de chute par gravité des particules dans un liquide (en l'occurrence l'eau). La vitesse de chute est elle-même reliée à la dimension des particules d'après la loi de Stokes :

$$V = C \cdot r^2 \text{ soit } r = \left(\frac{V}{C}\right)^{1/2} \quad (4.2)$$

avec $C = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho - \rho_o}{\eta} \cdot g =$ constante de Stokes et r le rayon des particules, ρ la densité des particules, η la viscosité du liquide, V la vitesse de chute des particules, ρ_o la densité du liquide et g l'accélération de la pesanteur. L'emploi du sédigraphe est généralement réservé à l'étude des argiles. Il mesure par un mince faisceau de rayons X la concentration des particules qui restent en suspension à une hauteur de sédimentation diminuant avec le temps.

Signalons que pour les grains de très petites dimensions, la forme joue un rôle très important. Les particules d'argile se présentent sous la forme de plaquettes et ne sont donc pas sphériques. Le granulomètre laser à diffusion statique a pour principe l'interaction de la lumière avec les particules, celui à diffusion dynamique sur le mouvement brownien et la viscosité du mélange. Le sédigraphe a pour principe de base le frottement hydraulique. Ces méthodes ont des modes d'interaction différents avec les particules. Elles donnent donc des distributions différentes, pour les argiles notamment qui ne peuvent généralement pas être comparées entre elles.

4.2 Traitement des données

Le traitement graphique ou numérique des résultats bruts fournis par le tamisage a pour but de définir, par l'emploi de paramètres spécifiques (position, dispersion, asymétrie et acuité), l'échantillon étudié.

4.2.1 Méthode des percentiles

La courbe cumulative permet de mettre en évidence une première série de paramètres, de laquelle tous les autres découlent. Ce sont les percentiles Q_x , points correspondants à des mailles de tamis hypothétiques sur lesquelles $x\%$ en poids du sédiment est de dimension plus grande (ou plus petite). Les valeurs d'abscisse les plus fréquemment utilisées sont 1, 5, 16, 25, 50, 75, 84, 95, 99.

Les paramètres de position

- la médiane ou Q_{50} est l'indice de position le plus fréquemment employé car il donne en intégrant toutes les classes granulométriques une estimation de la grossièreté moyenne du sédiment,
- le mode qui correspond à la dimension du tamis ou le refus est maximum,
- les quartiles Q_{25} et Q_{75} et percentiles $Q_1, Q_{16}, Q_{84}, Q_{95}, Q_{99}$, sont rarement utilisés seuls (sauf Q_{95} et Q_{99} pour le test de Passega) mais associés, ils définissent des indices plus complexes.

Les paramètres de dispersion

Le plus ou moins bon classement d'un échantillon peut être connu en observant la pente de la courbe cumulative ou l'étalement de la courbe de fréquence. Des indices permettent de mesurer ce classement.

- l'indice de Trask ou Sorting-Index So . De loin le plus employé, il correspond par définition à :

$$So(mm) = \sqrt{\frac{Q_{25}(mm)}{Q_{75}(mm)}} \quad (4.3)$$

le classement est d'autant plus mauvais que les valeurs du So sont élevées et parfait pour la valeur 1,

So	Classement
1 à 1.17	Très bien classé
1.17 à 1.20	Bien classé
1.20 à 1.35	Assez bien classé
1.35 à 1.87	Moyennement classé
1.87 à 2.75	Mal classé
> 2.75	Très mal classé

- l'indice $Qd\phi$ de Krumbein. Les quartiles sont alors exprimés en unités ϕ .

$$Qd\phi = \frac{Q_{25}\phi - Q_{75}\phi}{2} \quad (4.4)$$

On a un classement parfait pour une valeur nulle de $Qd\phi$ et une hétérométrie croissante avec les valeurs croissantes de $Qd\phi$. La relation mathématique qui relie les deux paramètres précédent est :

$$Qd\phi = \log_{10} So \quad (4.5)$$

- l'indice de dispersion de Folk et Ward. Contrairement aux autres indices, celui-ci fait intervenir les extrémités de la courbe dans la définition du classement (Fig. 4.2).

$$D_{FW\phi} = \frac{Q_{84\phi} - Q_{16\phi}}{4} + \frac{Q_{95\phi} - Q_{5\phi}}{6.6} \quad (4.6)$$

- l'indice de dispersion de Otto et Inman.

$$D = \frac{Q_{84\phi} + Q_{16\phi}}{2} \quad (4.7)$$

- l'indice de dispersion de McCammon.

$$D = \frac{1}{5.4}[(\phi_{85} - \phi_{15}) + (\phi_{95} - \phi_5)] \quad (4.8)$$

- l'indice de dispersion de Cailleux. Il est défini par l'espace inter-quartile qui montre la plus forte pente pour la courbe cumulative.

$$He = Q_{50} - Q_{75} \text{ ou } He = Q_{25} - Q_{50} \quad (4.9)$$

Les faibles valeurs indiquent une faible hétérométrie.

- l'indice d'hétérométrie Hq de Pomerol. Exprimé en unité α ($\alpha = 3\phi$), il est défini comme :

$$Hq = \frac{Q_{25\alpha} - Q_{75\alpha}}{2} \quad (4.10)$$

Equivalent à l'indice de Krumbein, on a $Hq \alpha = 3Qd\phi$. Il peut être utile de rappeler que les coefficients de classement peuvent varier avec la texture des matériaux ; pour un même stade d'évolution les sables fins et très fins sont généralement mieux classés que les sables moyens et grossiers.

- le grain moyen M_G de Folk et Ward.

$$M_G = \exp \frac{\ln P_{16} + \ln P_{50} + \ln P_{84}}{3} \quad (4.11)$$

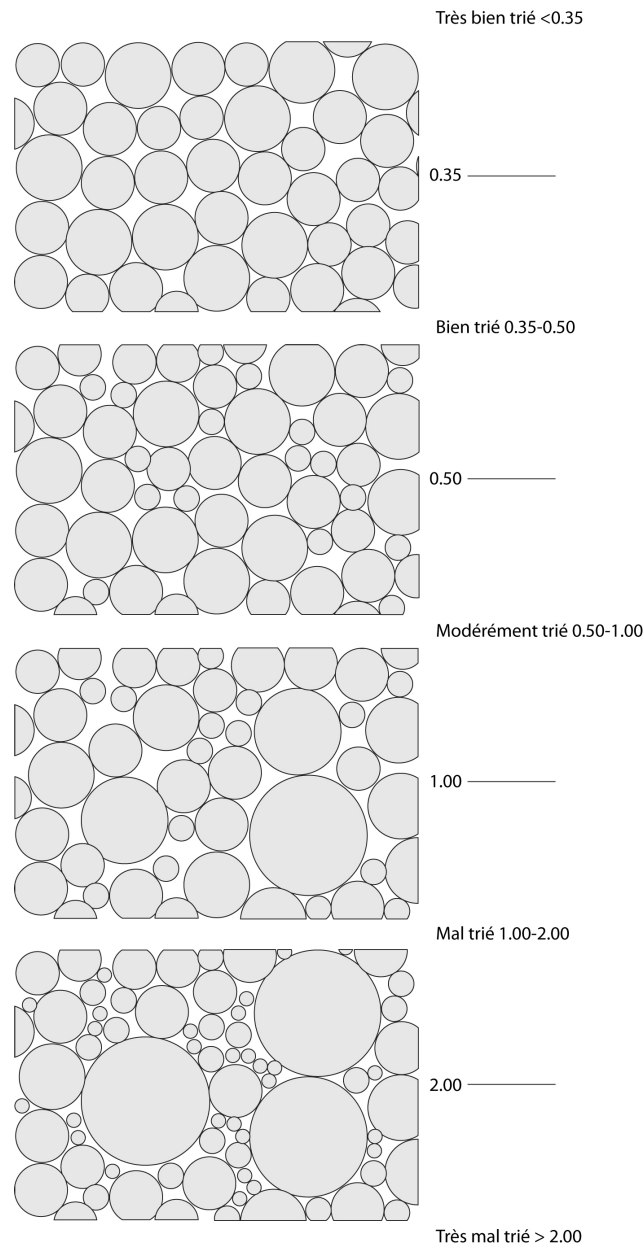


FIGURE 4.2 – Standard visuel pour l'estimation du tri (σ_I logarithmique de Folk & Ward, 1957)

Les paramètres d'asymétrie

Outre les paramètres de position et de dispersion, les paramètres d'asymétrie, mesurant l'allure de la distribution de part et d'autre de la médiane, sont nécessaires à la bonne définition d'une courbe granulométrique. Là encore, plusieurs indices ont été proposés.

— l'indice d'asymétrie de Trask est défini par :

$$ast = \frac{Q_{25(mm)} \times Q_{75(mm)}}{Q_{50(mm)}^2} \quad (4.12)$$

— l'indice d'asymétrie de Inman (partie centrale).

$$a\phi = \frac{(\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50})}{(\phi_{84} - \phi_{16})} \quad (4.13)$$

— l'indice d'asymétrie de Inman (extrémités).

$$a(2\phi) = \frac{(\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50})}{(\phi_{84} - \phi_{16})} \quad (4.14)$$

Les valeurs négatives correspondent à une dominance des sédiments fins, les valeurs à une dominance des sédiments grossiers.

— l'indice d'asymétrie de Krumbein. Il est exprimé en ϕ .

$$SK\sigma = \frac{Q_{25\phi} + Q_{75\phi} - 2Q_{50\phi}}{2} \quad (4.15)$$

Sur l'histogramme de fréquence, trois cas de figure peuvent se présenter selon les valeurs de cet indice (Fig. 4.3).

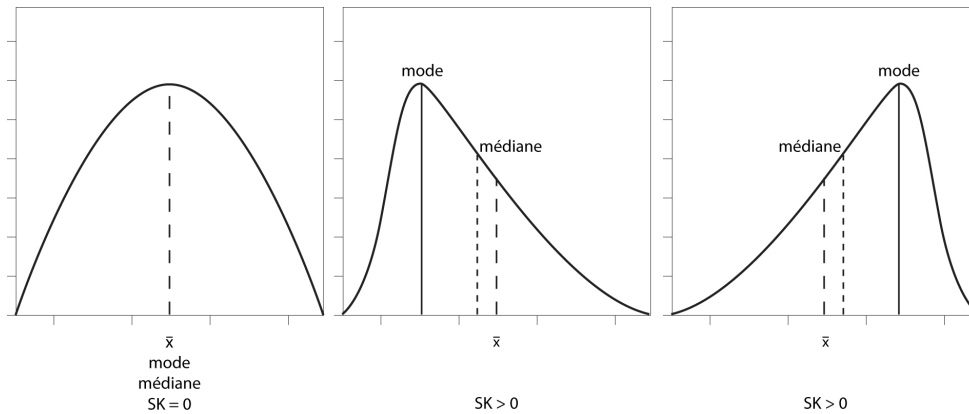


FIGURE 4.3 – Indice d'asymétrie et forme de la courbe de fréquence

1. $SK = 0$ (ou $ast = 1$), le mode coïncide avec la médiane et la moyenne, les fractions fines et grossières sont classées symétriquement par rapport à la médiane,
2. $SK > 0$ (ou $ast < 1$), la fraction grossière est plus importante donc mieux classée que la fraction fine. La médiane et le mode se situent à gauche de la moyenne,
3. $SK < 0$ (ou $ast > 1$), la fraction fine est mieux classée que la fraction grossière. La médiane et le mode sont cette fois à droite de la moyenne.

La valeur intermédiaire de 0.3 est souvent utilisée pour le skewness. A titre d'exemple, $-0.1 < SK < -0.3 =$ finely skewed ou $-0.1 < SK < -0.3 =$ very finely skewed. Les SK compris entre -0.1 et 0.1 caractérisent des distributions dites symétriques.

- l'indice d'asymétrie de Pomerol. Identique à l'indice précédent, il est seulement exprimé en unité α .

$$Asq\sigma = \frac{Q_{75\alpha} + Q_{25\alpha} - 2Q_{50\alpha}}{2} \quad (4.16)$$

On retrouve l'équivalence $Asq\alpha = 3SK\phi$

Les paramètres d'acuité

- l'indice d'acuité (ou *Kurtosis*) de Inman. Il est défini par :

$$K = \frac{(Q_{95\alpha} - Q_{5\alpha}) - \sigma_\phi}{\sigma_\phi} \quad (4.17)$$

σ_ϕ = écart-type en unité ϕ . La valeur de K varie autour de 1 ; ainsi si $0.90 < K < 1.11$, la courbe est dite mésokurtique ; elle est platykurtique si $0.67 < K < 0.90$ et leptokurtique si $1.11 < K < 1.50$ (Fig. 4.4).

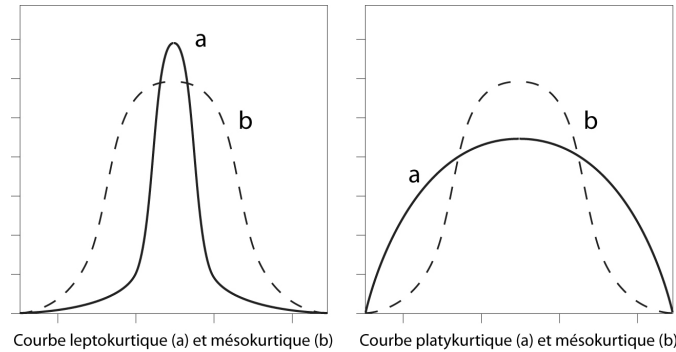


FIGURE 4.4 – Paramètres d'acuité et forme de la courbe de fréquence

- l'indice d'acuité (ou *Kurtosis*) de Krumbein et Petitjohn.

$$K = \frac{Q_{(75mm)} - Q_{(25mm)}}{2(Q_{(90mm)} - Q_{(10mm)})} \quad (4.18)$$

- l'indice d'acuité (ou *Kurtosis*) de Folk et Ward.

$$Kg = \frac{Q_{95\phi} - Q_{5\phi}}{2.44(Q_{75\phi} - Q_{25\phi})} \quad (4.19)$$

4.2.2 Méthode des moments statistiques

Principe de la méthode

En considérant l'ensemble des refus de tamis comme une série statistique, on peut définir pour chaque distribution granulométrique des indices et paramètres purement mathématiques en utilisant la méthode des moments statistiques [8].

Sachant que dans une série statistique, le moment d'ordre q par rapport à une valeur x est la moyenne arithmétique des puissances $q^{\text{ièmes}}$ des déviations $(x - x_0)$ des valeurs de x par rapport à x_0 , le calcul des moments d'ordre 1, 2,

3 et 4 suffit à définir les paramètres principaux ; respectivement, la moyenne ou diamètre moyen, l'écart-type ou déviation standard, l'asymétrie ou *Skewness* et l'acuité ou *Kurtosis*.

Le calcul de ces données est le suivant : le moment d'ordre 1 (a_1) moyenne arithmétique des déviations par rapport à x_0 , représentant la déviation de la moyenne arithmétique par rapport à x_0 , on choisit comme valeur de x_0 , une valeur assez voisine de la moyenne, par exemple celle du tamis sur lequel le refus est maximum ; on obtient alors la position du diamètre moyen par rapport à ce tamis. Enfin, on devra recentrer la moyenne ainsi calculée de $\frac{1}{2}$ tamis vers les valeurs plus faibles, l'histogramme étant construit en considérant les refus de tamis.

Le calcul des moments d'ordre 1, 2, 3 et 4 (a_1, a_2, a_3, a_4) par rapport à cette valeur x_0 permet de déduire les moments dits apparents (m_1, m_2, m_3, m_4) centrés cette fois, non plus sur x_0 mais sur la moyenne arithmétique.

$$m_1 = a_1 \quad (4.20)$$

$$m_2 = a_2 - a_1^2 \quad (4.21)$$

$$m_3 = a_3 - 3a_2a_1 + a_1^3 \quad (4.22)$$

$$m_4 = a_4 - 4a_1a_3 + 6a_1^2a_2 - 3a_1^4 \quad (4.23)$$

Connaissant la valeur de ce moment apparent, on obtient alors :

$$\text{diamètre moyen} \quad d_m = m_1 \quad (4.24)$$

$$\text{écart-type} \quad \sigma = (m_2)^{1/2} \quad (4.25)$$

$$\text{asymétrie} \quad Sk = \frac{m_3}{(m_2)^{3/2}} \quad (4.26)$$

$$\text{acuité} \quad K = \frac{m_4}{(m_2)^2} \quad (4.27)$$

Indices globaux

Il faut utiliser les dimensions équivalentes et les ordonnées réduites.

1. Moyenne (degré de grossièreté du sédiment)

$$\bar{x} = \frac{1}{100} \int_0^{100} x dy \quad (4.28)$$

2. Ecart arithmétique moyen

$$Eam = \frac{1}{100} \int_0^{100} |x - \bar{x}| dy \quad (4.29)$$

Surfaces comprises entre la courbe et la parallèle à l'axe des ordonnées d'abscisse $x = \bar{x}$. C'est la dispersion du sédiment autour de sa moyenne.

3. Ecart logarithmique moyen

$$Elgm = \bar{x} - \frac{x_{100} + x_0}{2} \quad (4.30)$$

Sommes algébrique des surfaces comprises entre la courbe cumulative et la droite passant par $x = 0.8, y = 0$ et $x_{100}, y = 100$. La courbe cumulative est exprimée sous la forme générale $y = ax^{\mathcal{N}} + b$; \mathcal{N} étant l'indice d'évolution. On peut déterminer les constantes a et b en appelant \mathcal{G} l'abscisse $x_{100} - 0.8$ et en utilisant les abscisses réduites $x_n = x - 0.8, y = 100 [(10^{\mathcal{N}x_n} - 1) / (10^{\mathcal{N}\mathcal{G}} - 1)]$ avec $x_n = x - 0.8$ (diamètre en $1/100 \mu\text{m}$) et $\mathcal{G} = x_{100} - 0.8$.

4. Méthodes permettant de déterminer \mathcal{N}

- courbes canoniques 1952,
- coordonnées bilogarithmiques. La pente des segments de droites obtenues en traçant la courbe dans ce nouveau système de coordonnées,
- méthode Vernhet-Rivière (abaque) $x = \mathcal{N}\mathcal{G}, y = 20 \log \left(\frac{x_{100}-0.8}{x-0.8} - 1 \right)$.

TABLE 4.3 – *Interprétation de \mathcal{N}*

Indices		Concavité	Courbe	Grano-faciès	Mode de dépôt
\mathcal{N}	$n = \mathcal{N} - 1$	<i>Accentuation</i>	<i>Sens</i>		
> 1	> 0	très forte	\nearrow	ultraparabolique	excès de charge équilibre avec le courant décantation zone calme
$= 1$	$= 0$	forte	\nearrow	linéaire	
$0 < \mathcal{N} < 1$	$-1 < n < 0$	variable	\nearrow	parabolique	
$= 0$	$= -1$	nulle	$=$	logarithmique	
< 0	< -1	variable	\searrow	hyperbolique	
< -1	< -2	forte	\searrow	infrahyperbolique	

Interprétation des faciès

- les sédiments à faciès hyperbolique se situent dans les zones les plus calmes où toute particule apportée par l'eau est définitivement bloquée. Il s'agit d'un faciès de décantation. Le grain moyen est toujours fin ($< 0.80 \mu\text{m}$). La fin de la distribution vers les fines se traduit par une limite très tranchée aux environs de $0.02 \mu\text{m}$. L'absence de particules de taille $< 0.02 \mu\text{m}$ oppose le faciès hyperbolique à tout autre faciès.
- les sédiments à faciès logarithmique sont représentés par des courbes rectilignes sur une grande partie centrale ou en forme de S très aplati (la partie moyenne à la dimension des limons ($5 - 10 \mu\text{m}$)). Les courbes s'incurvent vers les grossières en un crochet à faciès hyperbolique et vers les fines en un crochet à faciès parabolique. Les sédiments à faciès logarithmique peuvent contenir un pourcentage élevé de particules $< 0.063 \mu\text{m}$. Les particules fines sont généralement plus abondantes que dans le faciès hyperbolique.
- le faciès logarithmique est un faciès de transport évolué, c'est-à-dire dans lequel un équilibre s'est réalisé entre les compositions granulométriques

de la charge solide de l'eau et des sédiments. Il y a échange de particules entre la phase solide en suspension et la phase sédimentée. Cet échange favorise la rétention de particules ultrafines dans les interstices des grains déposés à l'interface eau/sédiment.

- le faciès parabolique est représenté par une courbe arquée, à concavité vers le haut, terminée vers les grossières par un crochet à concavité vers le bas. Les sédiments à faciès parabolique correspondent à des conditions de dépôt dans un courant relativement rapide. Le faciès parabolique est un faciès de transport qui apparaît au début de l'évolution fluviale des sédiments. La charge solide de l'eau n'est pas encore adaptée au courant transporteur. Les particules grossières sont en excès dans la suspension et se déposent en plus grande abondance (Fig. 4.5).

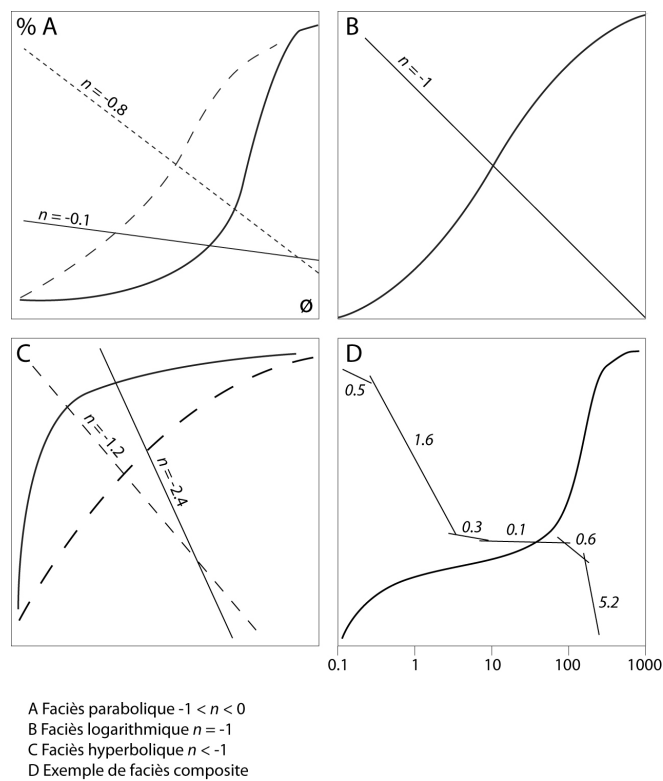


FIGURE 4.5 – Faciès parabolique, logarithmique, hyperbolique et composite

Programme de calcul

Au niveau du traitement informatique proprement dit, le calcul de ces paramètres se décompose ainsi (l'échelle utilisée étant l'unité ϕ).

1. Calcul de la somme des refus

$$N = \sum_{i=1}^k p_i \quad (4.31)$$

p est le poids de chaque refus de tamis et i le nombre de tamis.

2. Calcul de fréquences

$$n_i = \frac{p_i}{N} \quad (4.32)$$

3. Recherche de l'ouverture t_j du tamis donnant un refus maximum.

4. Calcul des coefficients de moments $c_i = x_i - t_j$ avec x_i étant le diamètre d'ouverture des tamis (en unité ϕ).

5. Calcul des moments pour $q = 1, 2, 3$ et 4

$$a_q = \sum_{i=1}^k c_i^q \cdot n_i \quad (4.33)$$

6. Calcul des moments apparents

$$m_2 = a_2 - a_1^2 \quad (4.34)$$

$$m_3 = a_3 - a_1(3m_2 + a_1^2) \quad (4.35)$$

$$m_4 = a_4 - 2a_1(m_3 + a_3 - a_1^3) \quad (4.36)$$

7. Calcul du diamètre moyen (unité ϕ) avec R , l'écart entre 2 tamis consécutifs (unité)

$$d_m = a_1 + \left(t_j - \frac{R}{2} \right) \quad (4.37)$$

8. Calcul de l'écart-type (unité ϕ)

$$\sigma = m_2^{1/2} \quad (4.38)$$

9. Calcul de l'asymétrie

$$Sk = \frac{m_3}{\sigma^3} \quad (4.39)$$

10. Calcul de l'angulosité

$$K = \frac{m_4}{\sigma^4} \quad (4.40)$$

Limites d'utilisation

En toute rigueur, l'utilisation de cette méthode statistique nécessite la connaissance de la distribution granulométrique d'un échantillon dans sa totalité, c'est-à-dire entre 0 et 100%. Cette condition, surtout dans le cas des sédiments argileux, étant rarement réalisée, le pourcentage de la fraction résiduelle (diamètre inférieur à $50 \mu m$ ou $2 \mu m$ selon le diagramme utilisé) se trouve centré sur une seule classe (respectivement $31.5 \mu m$ ou $1.25 \mu m$, de ce fait, les valeurs des moments ne sont plus représentatives de l'ensemble de l'échantillon. Ainsi, chaque fois que cette fraction résiduelle restera inférieure à 5%, les valeurs fournies par la méthode des moments pourront être retenues et comparées entre elles. Par

contre, dans les autres cas, les indices issus de la méthode des percentiles, lorsqu'ils pourront être calculés, seront pris en compte. Blott et Pye ont proposé une macro fonctionnant sous Microsoft Excel© [8] [9] qui calcule les indices issus de la méthodes des moments³.

4.2.3 Représentation graphique

Représentation traditionnelle

Celle-ci consiste à reporter en abscisse sur une échelle logarithmique la dimension des grains et des particules correspondant aux ouvertures des mailles de tamis du type AFNOR, c'est-à-dire selon une progression géométrique d'ordre $10^{1/10} = 1.2589$. En ordonnées, les pourcentages cumulés des particules de taille supérieure à la dimension données sur l'axe des abscisses, sont portés sur une échelle arithmétique. Ce type de représentation couplé au tracé de l'histogramme de fréquence pour chaque classe granulométrique est celui le plus fréquemment utilisé (Fig. 4.6).

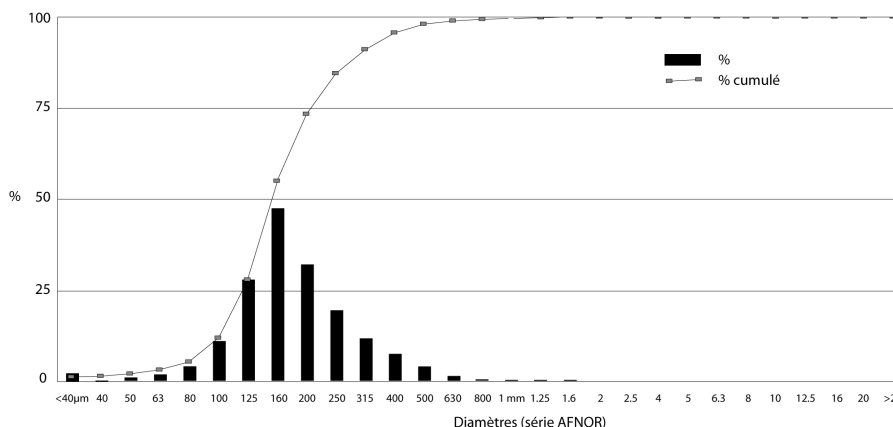


FIGURE 4.6 – Représentation classique d'une analyse granulométrique

Les auteurs anglo-saxons emploient fréquemment sur l'axe des abscisses, une échelle particulière (ϕ) qui correspond aux logarithmes de base 2 de l'inverse des dimensions de particules exprimées en mm soit $x_\phi = -\log_2 \times x_{mm} = -3.32193 \log_{10} \times x_{mm}$. En choisissant arbitrairement un diamètre de particule de 1 mm pour la valeur 0 ϕ , l'unité ϕ est telle qu'une valeur est toujours le double de celle immédiatement plus petite. Certains paramètres texturaux, calculés par la méthode des percentiles ou des moments statistiques, sont exprimés avec cette unité (Tab. 4.2).

Méthode des indices d'évolution

L'utilisation de la méthode Rivière, précise et originale, nécessite l'emploi d'une échelle logarithmique spéciale sur l'axe des abscisses. On recommande

3. disponible à l'adresse suivante <http://www.kpal.co.uk/gradistat.html>

de prendre comme échelle des abscisses, les logarithmes décimaux (base 10) ou échelle Δ . De plus, l'unité dimensionnelle étant fixée au $1/100$ de μm on a :

$$X\Delta = \log_{10} \times x_{mm} = \log_{10} 10^5 \mu m \times 10^{-2} = 5 \quad (4.41)$$

Les pourcentage pondéraux cumulatifs sont exprimés en ordonnées sur une échelle arithmétique.

Lorsque l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique comporte une fraction non négligeable (supérieure à 10%) de lutite (diamètre inférieur à $50 \mu m$), parallèlement au tamisage des arénites (de $50 \mu m$ à $2 mm$) et des rudites (supérieures à $2 mm$), l'emploi du sédigraphe ou du granulomètre à diffraction laser permet de connaître la courbe granulométrique de cette fraction fine (inférieure à $20 \mu m$).

Cependant l'analyse de cette fraction (possible aussi par le moyen de la pipette courte d'Andreasen) fournit, à partir de la vitesse limite de chute, des informations sur les dimensions équivalentes des particules de la suspension. Ces dimensions équivalentes sont des dimensions fictives qui correspondent au diamètre de particules de quartz, sphériques, ayant la même vitesse de chute; elles sont donc sans commune mesure avec les dimensions réelles des particules. La courbe tracée par le sédigraphe ou le granulomètre à diffraction laser est exprimée directement en dimensions équivalentes par application de la formule de Stokes aux vitesses limites de chute.

En revanche, la technique de tamisage sur la fraction grossière du sédiment (diamètre supérieur à $50 \mu m$ ou à $10 \mu m$ dans le cas du tamisage sous eau) donne des valeurs correspondant à la dimension réelle des grains. Il est cependant nécessaire de corriger cette valeur, en exprimant la taille des grains au moyen de leur diamètre nominal (x_n) qui correspond à $x_n = 1.15x_v$ où x_v est la *vide de tamis*. Rivière insiste sur l'importance de cette notion de diamètre nominal car *le comportement hydraulique des grains d'un diamètre nominal donné est pratiquement équivalent à celui d'une sphère de même diamètre et bien entendu de même rugosité et densité*.

Jusqu'à la valeur $90 \mu m$, la vitesse limite de chute des grains peut être calculées directement en fonction du diamètre nominal par la loi de Stokes. Néanmoins, pour des diamètres supérieurs à $90 \mu m$, la loi de Stokes devient inutilisable; Rivière recommande alors l'utilisation des formules de Berthois-Gendre pour calculer les vitesses limites de chute à $20^\circ C$, ce qui donne.

$$x_n \leq 0.009 \text{ cm} \quad W = 5403(2.65 - 1)x_n^2 \quad (4.42)$$

$$0.009 \leq x_n \leq 0.052 \quad W = 334x_n^{1.309} \quad (4.43)$$

$$0.052 \leq x_n \leq 0.152 \quad W = 67.795x_n^{0.76103} \quad (4.44)$$

$$0.152 \leq x_n \leq 2.043 \quad W = 43.33x_n^{0.52819} \quad (4.45)$$

$$x_n = \text{diamètre nominal (cm)} \quad W = \text{vitesse limite de chute (cm/s)} \quad (4.46)$$

Pour exprimer les dimensions de la fraction granulométrique soumis au tamisage, en dimensions équivalentes, il reste alors à appliquer la formule de Stokes

TABLE 4.4 – Conversion des diamètres expérimentaux (vide de maille) en diamètres de Stokes-Berthois (Rivière et Vernhet, 1973)

Diamètre expérimental (μm)	30	50	100	200	500	1000	5000	10 000	20 000
Diamètre de Stokes-Berthois (μm)	35	57	108	170	290	380	590	720	860

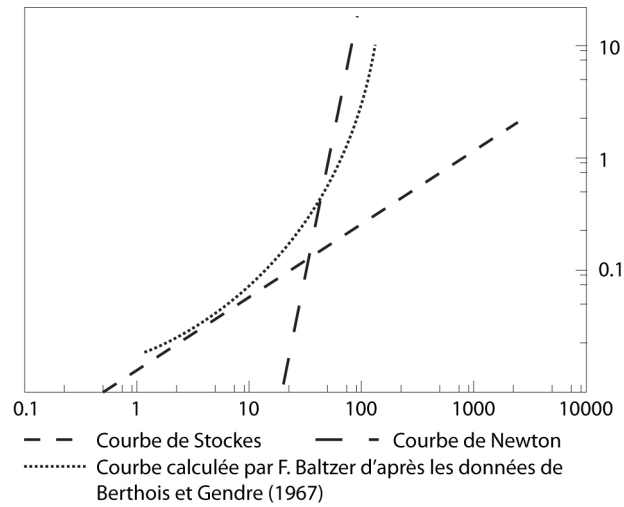


FIGURE 4.7 – Vitesse de chute en fonction du diamètre pour des sphères de quartz dans l'eau à 20 °C

aux vitesses limites de chute calculées précédemment. On obtient alors :

$$x_n \leq 0.009 \text{ cm} \quad X = X_v + 0.0607 \quad (4.47)$$

$$0.009 \leq x_n \leq 0.052 \quad X = 0.6545X_v + 1.3993 \quad (4.48)$$

$$0.052 \leq x_n \leq 0.152 \quad X = 0.38051X_v + 2.6803 \quad (4.49)$$

$$0.152 \leq x_n \leq 2.043 \quad X = 0.2641X_v + 3.2746 \quad (4.50)$$

avec X = diamètre équivalent, échelle Δ et X_v = diamètre du vide de maille, échelle Δ .

En résumé, l'expression numérique des particules tamisées, en dimensions équivalentes, nécessite les opérations suivantes :

1. Calcul des diamètres nominaux x_n ,
2. Calcul des vitesses limites de chute W (formules Berthois-Gendre)

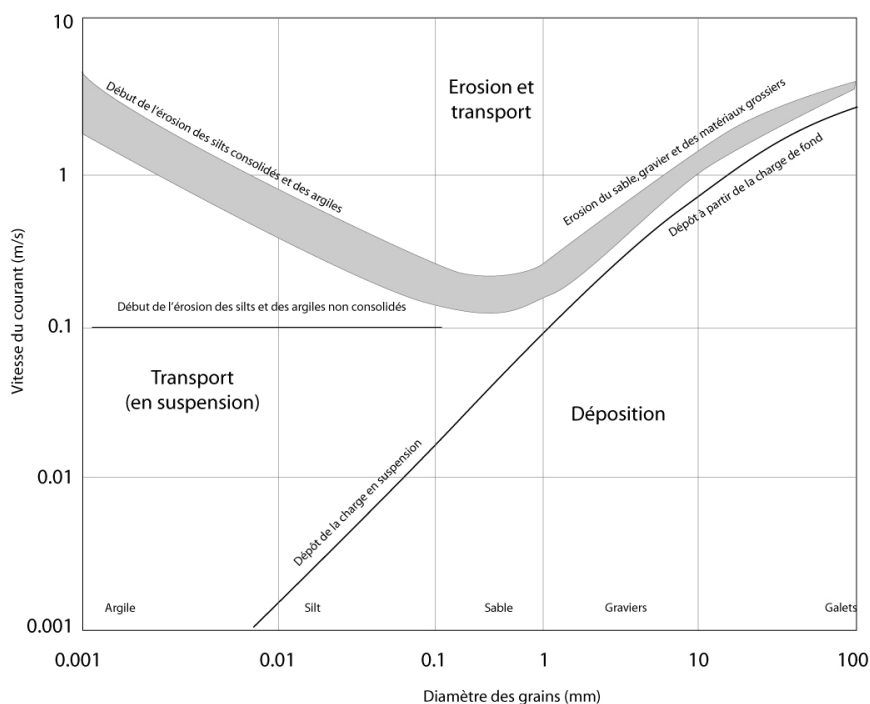


FIGURE 4.8 – Diagramme de Hjulstrom. Relation entre la taille du grain, la vitesse de flux et le type de mouvement sédimentaire (densité du sédiment : 2.65 g/cm^{-3})

4.2.4 Méthode des indices granulométriques

En 1952, Rivière a élaboré une méthode permettant d'exprimer toute courbe granulométrique par une équation mathématique de type $y = ax^{\mathcal{N}} + b$. Depuis cette date, plusieurs méthodes de calcul visant à définir \mathcal{N} ont été proposées et la signification dynamique de ce paramètre a pu être précisée, principalement à travers les travaux du laboratoire de sédimentologie d'Orsay.

Il est apparu très tôt que cette valeur \mathcal{N} , quantifiant la concavité ou convexité de la forme générale de la courbe granulométrique, reflète avec précision le niveau énergétique régnant lors du transport et du dépôt d'un sédiment.

La méthode d'évolution de \mathcal{N} nécessite la connaissance successive des paramètres \bar{x} (moyenne), \mathcal{G} (indice de classement), v (paramètre permettant de déterminer $\mathcal{N}\mathcal{G}$). Cette méthode graphique et numérique se compose comme suit :

1. Tracé de la courbe granulométrique entière, exprimée en dimensions équivalentes (correction au moyen du tableau 4.4 des dimensions réelles en dimensions équivalentes pour la fraction grossière analysées par le tamisage,
2. Délimitation du domaine de la courbe à intégrer (limite $< 0.063 \mu\text{m}$, soit

TABLE 4.5 – *Equivalences mailles tamis AFNOR et $X\Delta$*

Mailles en mm ($\sqrt[10]{10}$)	$X\Delta$
4	4.754
2.5	4.674
1.6	4.649
1.25	4.620
1	4.583
0.8	4.546
0.63	4.506
0.5	4.468
0.4	4.411
0.315	4.343
0.25	4.278
0.2	4.214
0.16	4.151
0.125	4.081
0.1	4.017
0.08	3.954
0.063	3.860
0.05	3.760
0.04	3.663

0.8Δ (module) pour l'abscisse; limite inférieure y_{inf} (pourcentage cumulé correspondant à $0.063 \mu m$, et limite supérieure y_{99} (pourcentage cumulé correspondant à 99% pour l'ordonnée,

3. Intégration de la surface S (cm^2),
4. Mesure de $y_{cm} = y_{99} - y_{inf}$,
5. Calcul de $x_{cm} = \frac{S}{y}$,
6. Transformation de x_{cm} en $\bar{x}r$ (moyenne réduite).

$$\bar{x} = \frac{x}{4} \text{ en } \Delta \quad (4.51)$$

7. Calcul de \bar{x} (moyenne).

$$\bar{x} = \bar{x}r + 0.8 \text{ en } \Delta \left(\log \frac{6.3}{100} = 0.8\Delta \right) \quad (4.52)$$

8. Mesure de \mathcal{G} en Δ .

$$\mathcal{G} = (x_{99} - 0.8) \text{ en } \Delta \quad (4.53)$$

9. Mesure de v .

$$v = 20 \log \left(\frac{\mathcal{G}}{\bar{x}r} - 1 \right) \quad (4.54)$$

10. Détermination graphique de \mathcal{NG} à partir de l'abaque de Rivière (1977).
11. Calcul de \mathcal{N}

$$\mathcal{N} = \frac{\mathcal{NG}}{\mathcal{G}} \quad (4.55)$$

12. Représentation graphique sur un diagramme $\bar{x} - -\mathcal{N}$

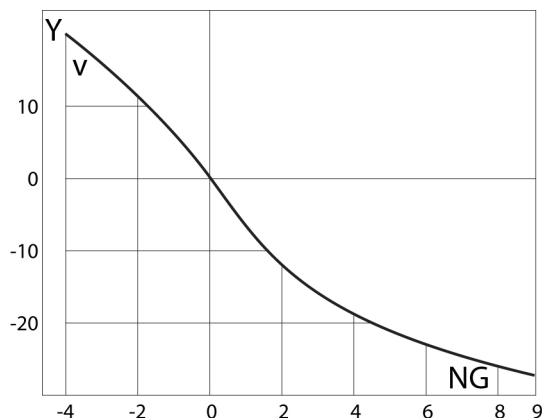


FIGURE 4.9 – Détermination graphique de l'indice global d'évolution \mathcal{N} en fonction de \bar{x} et x_{100}

Fonction paramétrique $x = \mathcal{NG}$ et $y = 20 \log \left(\frac{x_{100} - 0.8}{\bar{x} - 0.8} - 1 \right)$

4.2.5 Traitement d'image

La caractérisation d'un sédiment et des particules (clastes) qui le constituent repose en grande partie sur l'analyse quantitative de leur forme, dite analyse morphométrique. Les géosciences sont en la matière "à l'école" des sciences médicales, où les techniques de traitement d'image sont couramment utilisées. De nombreux logiciels, commerciaux ou libres, existent, le plus utilisé étant ImageJ©, fourni par le National Institute of Health aux Etats-Unis (<http://rsbweb.nih.gov/ij/>). La première synthèse sur les apports du traitement d'image à la sédimentologie a été publiée en 2005 (Francus, 2005). Les méthodes de traitement d'image se décomposent en plusieurs étapes :

- 1 Préparation de l'échantillon et acquisition de l'image,
- 2 Calibration de l'image, filtres et organisation des métadonnées,
- 3 Techniques de mesures et estimation des erreurs. Les programmes visent à mesurer automatiquement et rapidement le plus de paramètres possibles (métriques).

Chapitre 5

Autres analyses classiques

5.1 Forme des grains

Les formules permettant le calcul des principaux paramètres de forme des grains sont fournies ci-dessous.

5.1.1 Sphéricité

Les indices bi-dimensionnels de sphéricité sont donnés par Wadell (1935).

$$\varphi_w = \frac{d_c}{D_c} \quad (5.1)$$

et Riley (1941).

$$\varphi_r = \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

avec d_c le diamètre de la section nominale (diamètre d'un cercle d'une aire égale à la projection de la particule), D_c le diamètre du plus petit cercle circonscrivant, D_i le diamètre du cercle inscrit. Ces indices sont basés sur les mesures de la section maximale transversale de l'aire.

Les indices tri-dimensionnels de sphéricité sont donnés par Krumbein (1941).

$$\psi_i = \left(\frac{BC}{A^2} \right)^{1/3} \quad (5.3)$$

$$\psi_k = \left\{ \left(\frac{B}{A} \right)^2 \frac{C}{B} \right\}^{1/3} \quad (5.4)$$

et par Sneed et Folk (1958).

$$\varphi_p = \left(\frac{C^2}{AB} \right)^{1/2} \quad (5.5)$$

où A est la longueur du grand axe, B la longueur de l'axe médian et C la longueur du petit axe.

5.1.2 Aplatissement

L'indice d'émoissé est donné par Wentworth (1919).

$$F_{wl} = \frac{(A + B)}{2C} \quad (5.6)$$

Les indices d'aplatissements sont donnés par Wentworth (1919).

$$F_{w2} = \frac{(A + B + C)}{3} \quad (5.7)$$

et Cailleux (1947).

$$F_c = \frac{(A + B)}{2C} \times 100 \quad (5.8)$$

où A est la longueur du grand axe, B la longueur de l'axe médian et C la longueur du petit axe.

5.1.3 Allongement

Un indice bi-dimensionnel a été fourni par Dapples et Rominger (1945).

$$E_p = \frac{W_p}{L_p} \quad (5.9)$$

et un indice tri-dimensionnel par Scheiderhohn (1954).

$$E_s = \frac{B}{A} \quad (5.10)$$

avec W_p la largeur de la projection de la particule, L_p la longueur de la projection de la particule, A la longueur du grand axe et B la longueur de l'axe médian.

5.1.4 Rondeur

Ces indices sont donnés par Wentworth (1933).

$$P_s = \frac{r_s}{D} \quad (5.11)$$

Cailleux (1947).

$$P_i = \frac{2r_s}{A} \quad (5.12)$$

Wadell (1933) :

$$P_d = \frac{\sum \frac{r}{R}}{N} \quad (5.13)$$

et Ouma (1967) :

$$X = \frac{3\bar{r}}{(A + B + C)} \quad (5.14)$$

avec r_s le rayon du plus petit angle, r le rayon de chaque angle, \bar{r} le rayon moyen de chaque angle, R le rayon du plus grand cercle circonscrit, D le rayon

du grain moyen $= (A + B)/4$ avec A la longueur du grand axe et B la longueur de l'axe médian, N le nombre d'angle de la particule (les mesures de Wadell et d'Ouma imposent la mesure de tous les angles).

5.1.5 Divers

L'indice de forme de Fleming (1965).

$$\text{diamètre nominal vrai ou approché : } D_e = (ABC)^{1/3} \quad (5.15)$$

Celui de Folk (1974).

$$\text{volume, } V = \left(\frac{\pi}{6}\right) ABC \quad (5.16)$$

$$\text{aire de projection maximale, } MPA = \left(\frac{\pi}{4}\right) AB \quad (5.17)$$

de Rivière et Ville (1967).

$$\text{indice morphologique, } K = \frac{1}{3} \left(\frac{A}{C} + \frac{2r}{C} + \frac{B}{C} \right) \quad (5.18)$$

avec A la longueur du grand axe, B la longueur de l'axe médian et C la longueur du petit axe et r la rayon du plus petit angle. Il est aussi possible de caractériser visuellement l'émoissé d'un grain (Fig. 5.1).

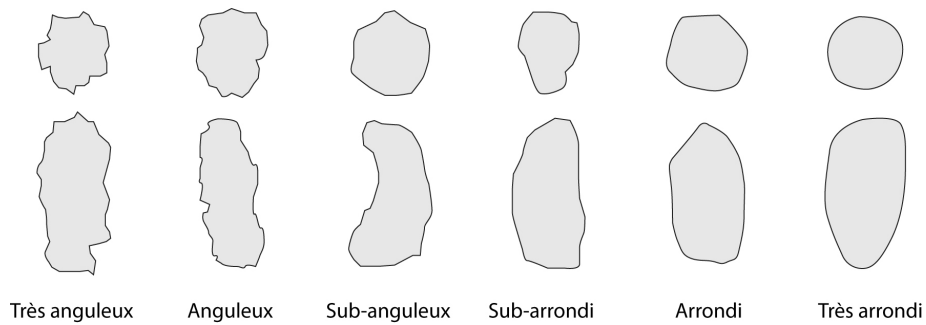


FIGURE 5.1 – Caractérisation visuelle du degré d'émoissé des grains de sable

Diagramme de Zingg (1935).

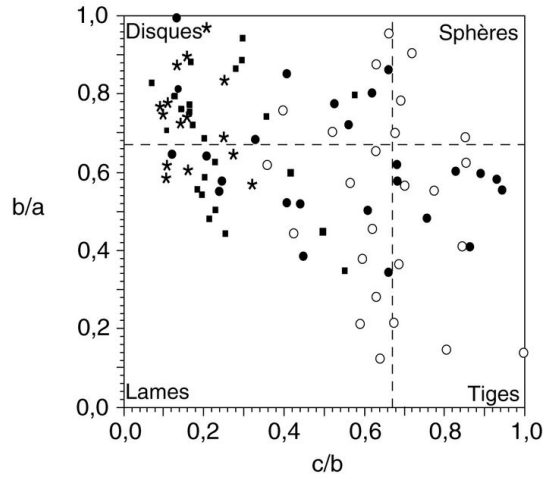


FIGURE 5.2 – Diagramme de Zingg dans lequel chaque point représente un caillou (Germain et Filion, 2002. Géographie physique et quaternaire, 56(1) :81-95

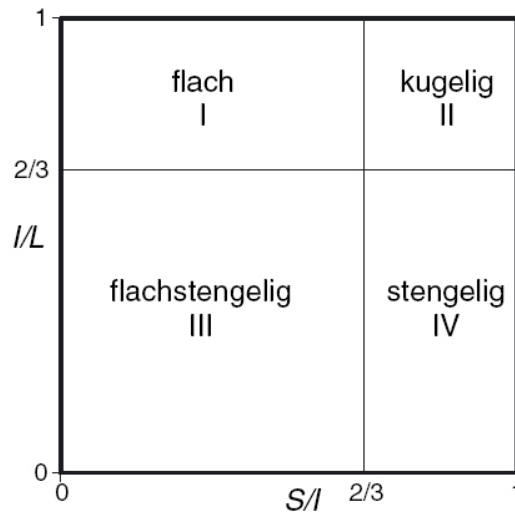


FIGURE 5.3 – Diagramme de Zingg. L : longueur (axe a), I : largeur (axe b), S : épaisseur (axe c) [Traduction : flach : disque; kugelig : sphère; stengelig : tige; flachstengelig : lame]

Diagramme de Sneed et Folk (1958).

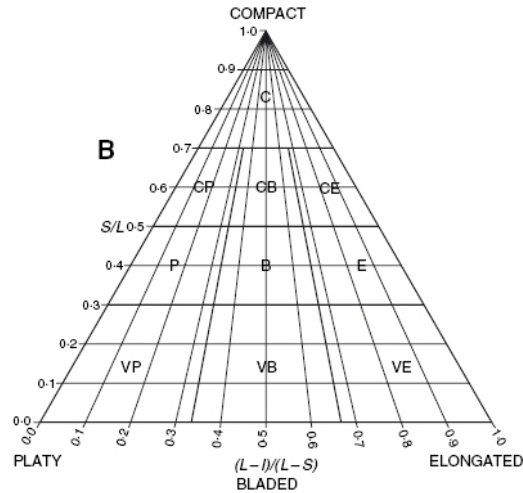


FIGURE 5.4 – Diagramme de Sneed et Folk. 10 classes : C (compact), CP(compact-platy), CB (compact-bladed), CE (compact-elongate), P (platy), B (bladed), E (elongate), VP (very platy), VB (very bladed), VE (very elongate)

Relation entre l'indice de sphéricité et celui d'aplatissement.

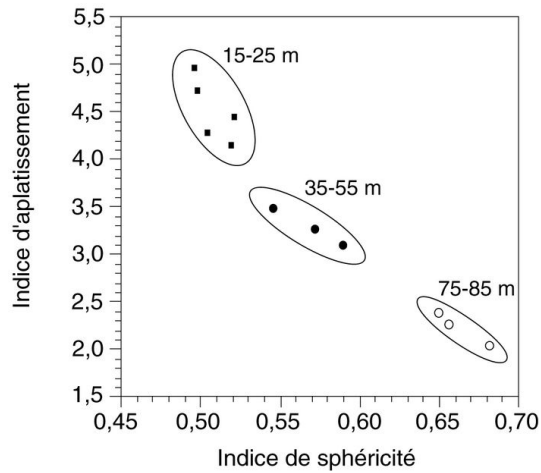


FIGURE 5.5 – Relation entre l'indice de sphéricité et celui d'aplatissement. Chaque point représente un site d'échantillonnage (moyenne de éléments) (Germain et Fillion, 2002. Géographie physique et quaternaire, 56(1) :81-95

5.2 Calcimétrie

Une calcimétrie consiste à déterminer le volume de CO_2 dégagé par l'action de l'acide chlorhydrique (HCl) sur le carbonate de calcium (CaCO_3) d'un échantillon (Fig. 5.6). En toute rigueur, les conditions de température et de pression atmosphériques de la pièce où est effectuée l'analyse doivent être connues et contrôlées.

5.2.1 Préparation de l'échantillon

1. Verser à mi-hauteur de l'ampoule une solution saturée de chlorure de sodium (NaCl) (1/4l environ),
2. Tarer la balance et peser l'échantillon,
3. Vérifier que le poids de l'échantillon ne dépasse pas 0.4 g,
4. Placer l'échantillon dans l'erlenmeyer,
5. Placer le petit tube dans l'erlenmeyer (le tube doit être droit, le coller si besoin)¹,
6. A l'aide d'une pipette, verser dans le petit tube de l' HCl ,
7. Boucher l'erlenmeyer.

5.2.2 Mode opératoire

1. Modifier la hauteur de l'ampoule pour que l'eau salée soit au même niveau dans l'ampoule et le tube gradué (le contenu de l'erlenmeyer sera à la pression atmosphérique),
2. Noter le niveau,
3. Incliner l'erlenmeyer pour faire couler l'acide sur l'échantillon,
4. Reposer l'erlenmeyer et attendre la fin de la réaction et le rééquilibrage thermique,
5. La pression du tube graduée est supérieure à la pression atmosphérique,
6. On rétablit la pression atmosphérique en descendant l'ampoule jusqu'à obtenir le même niveau dans l'ampoule et le tube,
7. Le CO_2 est à la pression atmosphérique, la mesure peut être effectuée,
8. Ouvrir l'erlenmeyer, ajouter un peu d'acide sur l'échantillon pour vérifier que tout le CaCO_3 a été attaqué.

1. il existe aussi des modèles rares d'erlenmeyer avec un doigt inversé dit erlenmeyer pour culture. l' HCl est versé directement dans le doigt inversé, il suffit ensuite d'incliner l'erlen pour que l' HCl coule sur le sédiment.

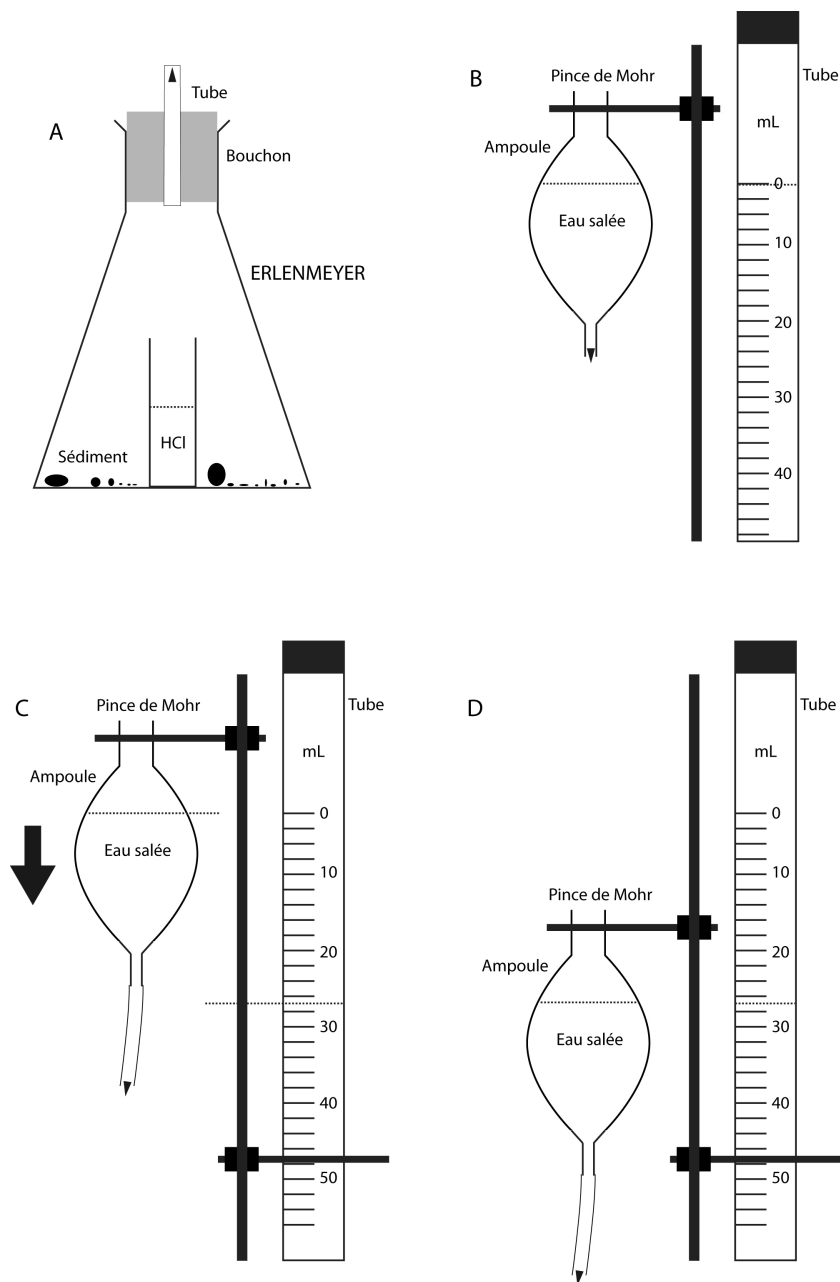
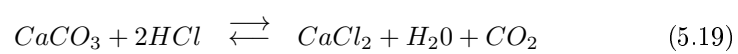


FIGURE 5.6 – Opérations d’une calcimétrie

5.2.3 Calcul de la teneur en CaCO_3



HCl étant en excès, son action sur une mole de CaCO_3 (100 g/mol) libère

une mole de CO_2 (22400 mL). Connaissant le volume de CO_2 dégagé (niveaux final et initial), on calcule la masse de CaCO_3 attaqué. Connaissant la masse de CaCO_3 et la masse de l'échantillon, on peut calculer le pourcentage de CaCO_3 dans l'échantillon.

Soit une masse de l'échantillon de 0.50 g, un niveau initial de 0 mL, un niveau final de 25 mL.

Masse. de CaCO_3	Volume de CO_2	
100 g	22400 mL	$x = (25 \times 100)/22400$
x g	25 mL	$x = 0.11$
Masse. de CaCO_3	Masse de sédiment	
0.11 g	0.50 g	$y = (0.11 \times 100)/0.50$
y g	100 g	$y = 22,0$

Il est fortement recommandé d'effectuer plusieurs mesures sur un même échantillon afin d'estimer précisément la teneur en CaCO_3 d'un échantillon en calculant l'intervalle de confiance (95%) de la moyenne.

5.3 Matière Organique

La matière organique (MO) peut être calculée grâce au rapport constant $\%MO/\%C = 1.724$. La teneur en MO peut s'obtenir par la méthode de la perte au feu. Cette méthode est déconseillée pour les échantillons possédant beaucoup de calcaire. Le domaine d'étalonnage de cette méthode varie de 1 à 50% de MO.

5.3.1 Mode opératoire

1. Broyer l'échantillon à l'aide d'un pilon dans un mortier. Les fragments doivent être inférieurs à 2 mm),
2. Sécher l'échantillon pendant 16 h à 150°C,
3. Nettoyer les creusets de porcelaines, les chauffer au rouge et les laisser dans un dessiccateur,
4. Peser le creuset à vide,
5. Ajouter le sédiment (max 10 g) et peser à nouveau le creuset rempli,
6. Calciner 16 h dans un four à moufle à 375°C,
7. Laisser refroidir dans un dessiccateur et peser le creuset avec les cendres.

5.3.2 Calcul de la teneur en MO

Les résultats sont calculés à l'aide des équations suivantes :

$$\%MO = \left(\frac{\text{Poids séd. sec (g)} - \text{Poids séd. incinéré (g)}}{\text{Poids séd. sec (g)}} \right) \times 100 \quad (5.20)$$

$$\%MO = \left(\frac{(P_1 - P_0) - (P_2 - P_0)}{(P_1 - P_0)} \right) \times 100 \quad (5.21)$$

Avec P_0 , la masse du creuset vide, P_1 , la masse finale, P_2 , la masse du creuset contenant les cendres.

Une régression permet l'équivalence entre les résultats par la méthode de la perte au feu (PAF) et celle de Walkley Black (WB) pour une étendue de 0 à 8% de MO.

$$\%MO(PAF) = 0.9932 \times MO(WB) + 0.587 \quad (5.22)$$

5.4 Teneur en eau

La teneur en eau d'un échantillon varie en fonction de la granulométrie du sédiment, de sa nature (composante argileuse par exemple) et d'autres paramètres comme la température et l'humidité de l'air. La mesure de la teneur en eau d'un échantillon prélevé dans le domaine intertidal peut parfois s'avérer très problématique selon le degré de ressuyage du sédiment. Ce degré de ressuyage est directement lié au temps écoulé depuis le début de l'exondation mais aussi à d'autres paramètres comme la température de l'air et la vitesse du vent qui contribuent à accélérer le séchage du sédiment.

5.4.1 Dosage

Le sédiment humide est pesé et mis à l'étuve (105°C pendant 24 h). Le matériel sec est pesé à nouveau. La teneur en eau peut alors être calculée.

$$\text{Teneur en eau} = \left(\frac{\text{Poids échantillon humide} - \text{Poids échantillon sec}}{\text{Poids échantillon sec}} \right) \times 100 \quad (5.23)$$

5.4.2 Calcul de concentration pour un sédiment humide

- pesée du sédiment humide (PSH),
- séchage à l'étuve (105 °C) pendant 24 h puis pesée du sédiment sec (PSS).

$PSH - PSS =$ Poids ou Volume d'eau contenu dans cette solution. On considère que la densité du sédiment (sable-vase) est de 2.5. Un poids de x_{gr} de sédiment sec, occupe un volume de $x_{gr}/2.5 =$ Volume du sédiment. Dans une solution de sédiment, existe un volume d'eau et un volume de sédiment. En divisant le poids du sédiment sec par la somme des deux volumes trouvés et en multipliant ce résultat par 1000 (volume du litre d'eau), on obtient la concentration.

Poids séd. humide	Poids séd. sec	Vol. sédiment	Vol. d'eau	Vol. total solution
61.2934	30.124	12.05	31.17	43.22

Concentration : $(30.124 \times 1000)/43.22 = 697 \text{ g/l}$. Pour obtenir une concentration de 100 g/l , prendre $(100_{gr} \times 1000 \text{ cc})/697_{gr} = 143.47 \text{ cc}$ de solution et compléter à 1l.

5.5 Tassement et rhéologie des vases

5.5.1 Vitesse de chute et floculation des particules

Les sédiments pélitiques ou lutites ont une taille inférieure à $40 \mu m$. On peut classer sommairement les sédiments fins comme suit :

- Silts. De 100 à $10 \mu m$. Faible tassement du culot de dépôt,
- Limons. De 40 à $2 \mu m$. Tassement effectué en quelques jours,
- Argiles. $< 2 \mu m$. Elles correspondent à une variété minéralogique particulière,
- Boues. Terre et/ou poussières d'origine terrestre mélangées d'eau,
- Poudres. Substances solides finement broyées. Mélangées à l'eau, elles forment des substances aux propriétés analogues à celles des limons ou des boues mais elles possèdent un élément qui domine leur composition,
- Tangué. Sédiment déposé dans certaines vasières intertidales dominé par une fraction carbonatée d'origine bioclastique (débris coquilliers ou phyco-gènes - maërl - concassés très finement) et d'une fraction limoneuse et/ou argileuse,
- Vases. Terme générique qui caractérise des matériaux très fins à fort pourcentage de colloïdes avec une abondance de matière organique. Leur tassement est très long et leur rigidité (ou cohésion) varie rapidement avec leur teneur en eau,

5.5.2 Caractéristiques granulométriques, minéralogiques et chimiques des sédiments vaseux

Les études de tassement sont réalisées sur les fractions $< 40 \mu m$ ou *vases pures* ou sur des mélanges avec des pourcentages croissants de silts et de sables fins. La mise en suspension a lieu dans des eaux de salinité croissante ou dans les eaux d'origine.

Granulométrie

Les particules de $30 \mu m$ chutent à environ $1 mm/s$. Les diamètres moyens s'étalent de $1/10^{ième}$ de μm à une dizaine de μm pour certains limons. Les vases marines les plus fines ont une courbe hyperbolique (décantation en zone calme), les sédiments fluviaux une courbe parabolique (excès de charge).

TABLE 5.1 – Relation vitesse de chute vs taille des sédiments

0.00001	0.0001	0.001	0.01	0.1	1	Vitesse de chute en mm/s
0.1	0.3	1	3	10	30	Diamètre équivalent en μm

Composition chimique et minéralogique

Les vases marines équatoriales, riches en kaolinite, ont des formes hyperboliques. Les vases marines des régions tempérées à illite dominante, kaolinite et smectite, ont un profil logarithmique. Les vases estuariennes ont souvent des profils logarithmiques ou paraboliques.

Vitesses de chute et floculation des particules

Les éléments grossier de type sable, graviers et galets ont un comportement individuel en milieu aqueux. Au contraire, les limons et les vases sont soumis à la floculation, phénomène qui contribue à former des agrégats dont la vitesse de chute est supérieure à celle des particules élémentaires. La surface spécifique est la surface latérale de la masse unitaire. Un volume de matière de 1 cm^3 de particules de $1 \mu\text{m}$ représenterait une surface développée de 4.20 m^2 en admettant un indice de vide de 30%. La loi de Stokes décrit la vitesse de chute :

$$W = \frac{1}{18} \cdot \frac{\rho_s - \rho_o * d^2 g}{\rho_o \cdot \nu} \quad (5.24)$$

avec ρ_s la masse spécifique de la particule en kg/m^3 ; ρ_o la masse cinématique de l'eau en m^2/s (ou en Stokes cm^2/s) ($= 1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 20°C pour l'eau pure et à $1.6.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'eau pure à 4°C), d le diamètre équivalent de la particule.

Si une particule de densité 2.5 à 2.6 tombe dans une eau douce à 20°C (viscosité $= 1.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), le rapport entre le diamètre équivalent en μm et la vitesse de chute en μ/s est donné par $d_{\text{en } \mu\text{m}} = W_{\text{en } \mu\text{m}/\text{s}}^{1/2}$

La floculation est d'autant plus élevée que :

- la concentration électrolytique augmente,
- les valeurs des ions augmentent,
- la température augmente,
- la dimension de l'ion hydraté diminue,
- la constante diélectrique diminue,
- le pH diminue,
- le pouvoir d'absorption des anions diminue.

Une suspension de vases dans l'eau sera d'autant mieux floculée que :

- les particules élémentaires seront plus petites,
- leur concentration dans la suspension sera élevée,
- le milieu contiendra beaucoup de sels floculants,
- la température de l'eau sera élevée.

Les vitesses moyennes de chute de vases ou de limons, à l'état défloculé (sous forme de particules élémentaires) dans l'eau pure sont comprises entre 10^{-5} et $10^{-1} \text{ mm}/\text{s}$. Dans l'eau de mer, pour une concentration en particules solides de $10 \text{ g}/\text{l}$, les vitesses moyennes de chute des flocons sont comprises entre $1.5.10^{-1} \text{ mm}/\text{s}$ et $6.10^{-1} \text{ mm}/\text{s}$, donc un rapport de 1 à 4. Le facteur de floculation est :

$$F = \frac{W_f 50\%}{W_p 50\%} \quad (5.25)$$

Avec W les vitesses de chutes moyennes, W_f des flocons en milieux aqueux floculant, W_p des particules élémentaires en milieu défloculé.

Ce facteur de floculation varie comme l'inverse du diamètre équivalent d des particules élémentaires. Le facteur de floculation est d'autant plus élevé que les particules sont plus petites. Pour $10 \text{ g}/\text{l}$ de sédiment sec dans une eau de mer à 30‰ de salinité $\rightarrow F = 250 d^{-2}$. Une suspension de vases, en milieu floculant,

aura en eaux calmes des vitesses moyennes de chute de 0.15 à 0.60 mm/s , quelle que soit la dimension des particules élémentaires. Quand les particules sont $> 40 \mu m$, la floculation ne joue plus. Si la suspension est agitée, la formation des agrégats peut être accélérée et on peut subir des vitesses moyennes de chute des flocons de l'ordre de 1 à 1.5 mm/s , par exemple à l'étale des pleines-mers en estuaire.

5.5.3 Tassement des vases

Au cours du tassement, les vases perdent dans un premier stade leur eau interstitielle et dans un stade ultérieur de l'eau de la double couche avec arrangement des particules solides et de leur eau adsorbée. Une vase liquide contient encore beaucoup d'eau interstitielle. Une vase devient plastique quand il reste encore l'eau de la double couche et elle est solide lorsque les particules sont en contact les unes avec les autres. L'évacuation des eaux s'effectue de façon homogène en surface par remontée des eaux mais des puits préférentiels de drainage, où s'accumulent les éléments grossiers, peuvent apparaître. Le drainage peut aussi se faire par la base ou latéralement si la vase repose sur du sable perméable. La concentration moyenne d'un dépôt varie comme le log du temps avec différents domaines de tassement correspondant à la vitesse entravée des flocons. La concentration (poids de particules sèches par volume de mixture) est :

$$T_s = \alpha \log t + \beta \quad (5.26)$$

Avec t le temps de tassement, α le facteur lié au diamètre des particules, β le facteur lié au milieu aqueux. Pour les études de tassement, on utilise la sonde α -densimétrique qui mesure la densité des dépôts en profondeur et la sonde rhéologique qui mesure la rigidité des dépôts en profondeur. A l'aide de tubes transparents de 10 cm de diamètre et des hauteurs croissantes de 0.25 à 4 m , on introduit des mixtures de vases (en eau douce ou de diverses salinités) avec des concentrations variables allant de 5 à 300 g/l . La température est maintenue constante à 20 °C. On peut également ajouter des pourcentages variables de sables et de silts. On effectue périodiquement des mesures de concentrations des dépôts au α -densimètre. Les caractéristiques des dépôts sont :

- T_s la teneur en sédiment sec soit la masse de sédiment sec contenue dans l'unité de volume de mixture. T_s s'exprime en kg/m^3 ou en g/l ,
- T_e la teneur en eau soit le rapport du poids de l'eau contenue dans l'échantillon au poids de sédiment sec après étude à 105 °C. T_e s'exprime en %,
- $\frac{\rho_m}{\rho}$ la densité de mixture soit le rapport entre la masse de l'unité de volume de mixture à la masse volumique de l'eau à 4 °C.

$$\frac{\rho_m}{\rho} = 1 + \left(\frac{\rho_s - \rho_o}{\rho_s} \right) \cdot \left(\frac{T_s}{1000} \right) \quad (5.27)$$

Si $\rho_s = 2500 \text{ kg}/m^3$ et $\rho_o = 1000 \text{ kg}/m^3$, alors

$$\frac{\rho_m}{\rho} = 1 + 0.6 \cdot 10^{-3} T_s \quad (5.28)$$

$$T_e \% = \left(\frac{\rho_o}{T_s} \right) - \left(\frac{\rho_o}{\rho_s} \right) \cdot 100 \quad (5.29)$$

5.5.4 Propriétés physique d'une particule solide en eau calme

Selon que le mouvement relatif du fluide par rapport à la particule est lent, moyen ou rapide, l'écoulement sera laminaire (régime de Stokes), semi-turbulent (régime d'Allen) ou turbulent (régime de Newton-Rittinger). Ces différents régimes correspondent à des nombres de Reynolds déterminés. Le nombre de Reynolds est le rapport des forces d'inertie aux forces de frottements visqueux. Pour une particule tombant dans l'eau, $Re = (W \cdot D)/\mu$ avec W la vitesse de chute, D le diamètre de la particule et μ la viscosité cinématique de l'eau soit $10^{-6} m^2/s$ à $20^\circ C$ et $1.6 \cdot 10^{-6} m^2/s$ à $3.5^\circ C$.

- écoulement laminaire : $Re < 1$, $W = KD^2$ ($D < 0.12 mm$), vases, limons, silts,
- écoulement semi-turbulent : $1 < Re < 500$, $W = KD(0.12 < D < 2 mm)$, sables,
- écoulement turbulent : $Re > 500$, $W = KD^{1/2}$ ($D > 2 mm$), graviers, galets.

Il est nécessaire de prendre en considération l'influence de la viscosité du liquide et donc de la température. La vitesse de chute pourra être réduite de moitié quand la température de l'eau passe de $30^\circ C$ à $4^\circ C$.

- écoulement laminaire : la vitesse de chute (cm/s) est $(\frac{D}{100})^2$. Une particule de $30 \mu m$ chute à $0.1 cm/s$,
- écoulement semi-turbulent : pour des sables naturels de masse volumique $\rho = 2.6 kg/m^3$, la vitesse de chute (mm/s) est $125D$. Un sable de $1 mm$ de diamètre chute à $12.5 cm/s$,
- écoulement turbulent : Un galet de $50 cm$ chute à une vitesse de $2 m/s$.

5.5.5 Ensemble de particules

Lorsque les particules qui tombent dans un liquide sont très nombreuses, elles peuvent se gêner et la vitesse de leur chute d'en trouve considérablement modifiée. On parle alors de vitesse entravée. Si ces particules sont fines, elles ont tendance à s'agglomérer et à former de petits flocons. On parle de floculation.

Vitesse de chute entravée

La vitesse de chute des particules supérieures à $100 \mu m$ diminue quand la concentration de la suspension augmente. Par exemple, un sable fin à une concentration de $100 g/l$ chute 0.75 fois moins vite que la particule élémentaire.

Floculation des fines

Pour les particules fines, la floculation est la propriété de générer des agrégats de dimensions très supérieures à celles des particules élémentaires (agrégats de 0.7 à $2 mm$ pour des particules de quelques μm). Une particule élémentaire de vase de $1 \mu m$ a une vitesse de chute de $0.001 mm/s$, c'est-à-dire qu'elle met 12 jours pour parcourir 1 m de hauteur dans une eau calme. A l'état floculé, sa vitesse de chute est comprise entre 0.1 et $0.8 mm/s$. Elle est donc multiplié par un facteur 100 à 800 (en moyenne un facteur 500). Elle ne mettra donc plus que 2000 secondes soit 1/2 heure pour parcourir 1 m de hauteur d'eau. La vitesse de chute augmente :

- avec la concentration, entre 0 et 20 g/l , puis elle rediminue la vitesse de chute entravée. Elle augmente de 0.02 à 0.2 mm/s (facteur 10),
- avec la salinité. La vitesse de chute augmente quand la salinité passe de 0 à 5‰ puis elle reste constante. Pour une concentration de 2 g/l , la vitesse de chute passe de 0.05 mm/s à 0.5 mm/s pour une salinité de 3‰.

Dans la nature, les vases défloculées ont des vitesses de chutes de l'ordre de 0.5 mm/s en eau calme. Dans les estuaires, la vitesse de chute des macroflocons qui se forment au voisinage des étales de haute et basse-mer peut atteindre 1 à 2 mm/s .

Chapitre 6

Représentations cartographiques

L'objectif d'une campagne d'échantillonnage de sédiment peut être la réalisation d'une carte sédimentologique et/ou morpho-sédimentologique. Ce type de carte peut représenter plusieurs informations superposables. La couverture sédimentaire d'un secteur géographique peut être étudiée à travers l'analyse de sa surface (couverture superficielle) ou de sa sub-surface (épaisseur des dépôts). L'estimation de l'épaisseur des dépôts sédimentaires peut s'effectuer par réflexion sismique. Les sonogrammes produits permettent de connaître et de mesurer la structure interne et la puissance des sédiments meubles et d'étudier ainsi leur mise en place.

6.1 Légende des cartes

La légende de la carte représentera généralement les classes de tailles de grains selon une échelle existante (Blott et Pye, Folk et Ward, Udden, Wentworth. . .) ou à définir (Fig. 6.1), les groupes texturaux, le pourcentage de carbonates mais aussi la teneur en eau ou la matière organique. Selon la nature des sédiments rencontrés sur la zone d'étude, l'échelle de la carte, les classes de tailles de grains devront être fusionnées (dans le cas d'un secteur très hétérogène) ou, au contraire, divisées (dans le cas d'un secteur très homogène) [2] [3] [10] [40] [57]. Les principaux types de cartes sont :

- carte morpho-sédimentologique,
- carte des figures sédimentaires,
- carte des faciès sédimentaires,
- carte de distribution du calcaire,
- carte des formations superficielles,
- carte des groupes texturaux.

Les cartes peuvent être séparées en deux groupes : celles qui portent principalement sur la morphologie et la nature des fonds et celles qui portent sur la distribution des sédiments ou des carbonates.



FIGURE 6.1 – Légendes utilisées pour les cartes sédimentologiques de l'archipel de Chausey

6.2 Nature des fonds

Les cartes de nature des fonds permettent de séparer distinctement les fonds rocheux et les fonds sédimentaires. Les principaux ensembles sédimentaires (ou faciès) peuvent être décrits en détails (bio ou lithoclastiques, présence de dé-

bris coquilliers, phycogènes. . .) et classés en catégories (domaine infralittoral et domaine intertidal par exemple) (Fig. A.1).

Les cartes de figures sédimentaires sont réalisées grâce à des images acquises par sondeur bathymétrique et sonar latéral. Elles permettent de connaître et de spatialiser l'architecture et l'orientation des figures d'accumulations sédimentaires (Fig. A.2). Ces figures peuvent généralement être séparées en deux catégories en fonction de leur orientation par rapport à la direction dominante du transport sédimentaire. Lorsque les figures sont parallèles à la direction dominante, on parle de figures longitudinales et lorsqu'elles sont perpendiculaires, on parle de figures transversales.

- Les figures longitudinales peuvent être des bancs sableux de plus ou moins grande amplitude (plusieurs kilomètres de longueurs parfois) et souvent façonnés par des structures transversales (rides et méga-rides), de traînées sableuses, de rubans et de langues sableuses, de queues de comètes. . .
- Les figures transversales peuvent être des mégarides de longueur d'onde supérieure au mètre, des vagues de sables d'une amplitude maximale de plusieurs mètres et d'une longueur d'onde très grande (supérieure à la centaine de mètres) mais aussi des croissants de plage, des barres d'estran. . .

6.3 Faciès sédimentaires

Les cartes de répartition des sédiments superficiels sont établies à partir de données granulométriques. Ces données correspondent à l'analyse granulométrique du sédiment comprenant une phase lithogène détritique et une phase biogène carbonatée. On utilise ensuite les indices classiques pour déterminer la taille du grain moyen et identifier la phase granulométrique principale ou dominante et le classement du sédiment (*So* de Trask par exemple). Les faciès peuvent ainsi être définis (Fig. A.3, A.4). Il est souhaitable d'indiquer systématiquement la classe de taille à laquelle se rapporte le faciès (silts et sables fins, 40 à 200 μm). Parfois, subdiviser les faciès selon la prédominance (> 75–80%) ou la dominance (50–60%) de chaque fraction granulométrique est inévitable lorsque le secteur d'étude est composé de sédiments pluri-modaux. Des faciès intermédiaires peuvent alors exister. Par exemple, un sédiment composé de 40% de sables grossiers, 40% de sables moyens et 20% de sables fins est représenté par une classe intermédiaire de sables grossiers et moyens. Certains sédiments sont encore plus hétérogènes et peuvent être composés de graviers, de sables grossiers et de vases. Il s'agit souvent de sédiments très riches d'un point de vue biologique.

Les cartes de distribution du calcaire peuvent être représentées à part ou avec les principaux faciès (Fig. A.5). Dans ce cas, il est nécessaire d'établir une légende croisée (Fig. 6.1). Il est possible de représenter la nature de la phase carbonatée lorsqu'elle peut être connue (coquilles entières, débris, bivalves et gastéropodes, maërl. . .), ce qui n'est pas possible pour les tangues par exemple. Les pourcentages relatifs entre les différents types de bioclastes peuvent être estimés visuellement sur photographies et représentés.

6.4 Mode opératoire

Pour procéder à la réalisation d'une carte sédimentologique, il est souhaitable de s'appuyer sur une image aérienne ou acoustique (acquise par sonar latéral) (Fig. 6.2). L'interprétation de cette image permettra de dessiner les principales structures visibles et de délimiter, au moins grossièrement, les faciès les plus caractéristiques du point de vue de la structure et de la texture (Fig. 6.3). On nomme isophène ces entités homogènes. A titre d'exemple, un secteur de sables moyens modelés en ripple-marks pourra être assez aisément délimité.



FIGURE 6.2 – Sonar acoustique EdgeTech à bord du N/O *Serpula* Heriot-Watt University, Edinburgh

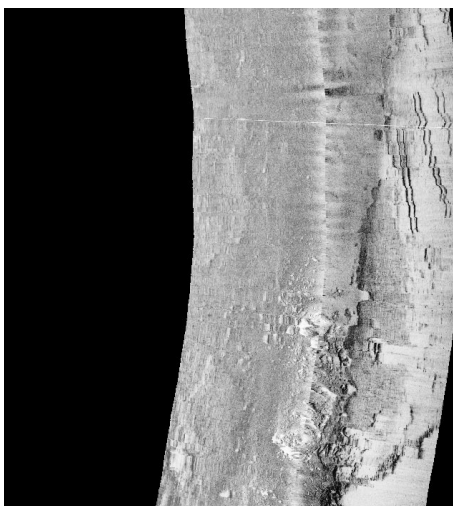


FIGURE 6.3 – Image acoustique du Chenal de Beauchamp, Archipel de Chausey

Une stratégie d'échantillonnage pourra alors être choisie selon un plan stratifié. Cette méthode est particulièrement recommandée pour les secteurs très hétérogènes comme les archipels. Si le secteur d'étude est en apparence particulièrement homogène, comme certaines baies, on optera pour un plan régulier

selon une maille à définir en fonction de critères logistiques et scientifiques. Sur le terrain, les échantillons prélevés sont systématiquement géoréférencés à l'aide d'un GPS, de manière à ce que chaque rupture de faciès ou de modelés soit localisée. Des photographies du sédiment sont aussi très utiles pour le choix des classes (sédiment nu, colonisé ou non par des algues, avec des dépôts coquilliers...). Il devient ensuite possible d'insérer l'ensemble de ces informations (images, photographies, coordonnées x, y et z, courbe granulométrique, données quantitatives et qualitatives...) dans un Système d'Information Géographique (SIG). Enfin, les cartes proprement dites sont réalisées à l'aide d'un logiciel de dessins vectoriels de type Adobe Illustrator CS4©.

L'archipel de Chausey (Manche), situé dans le golfe normand-breton, a récemment fait l'objet d'une vaste campagne de cartographie morpho-sédimentaire de son domaine intertidal. Quelques cartes sont fournis ci-après (Fig. A.3, A.4, A.6, A.5, A.1, A.2 et Fig. A.7, A.8). Enfin, un article est proposé à titre d'exemple.

Annexe A

Cartes sédimentologiques

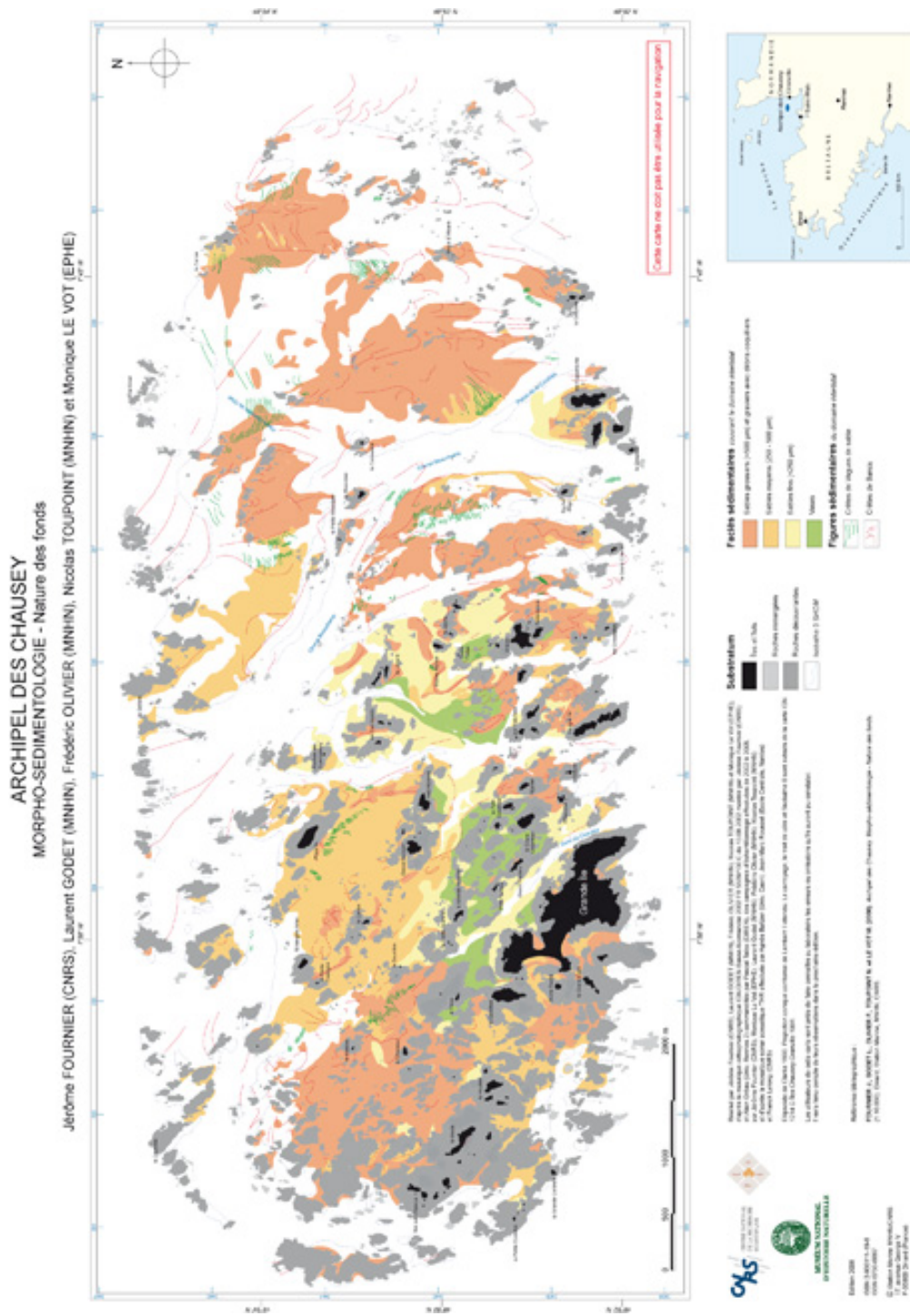


FIGURE A.1 – Carte morpho-sédimentologique de l’archipel de Chausey

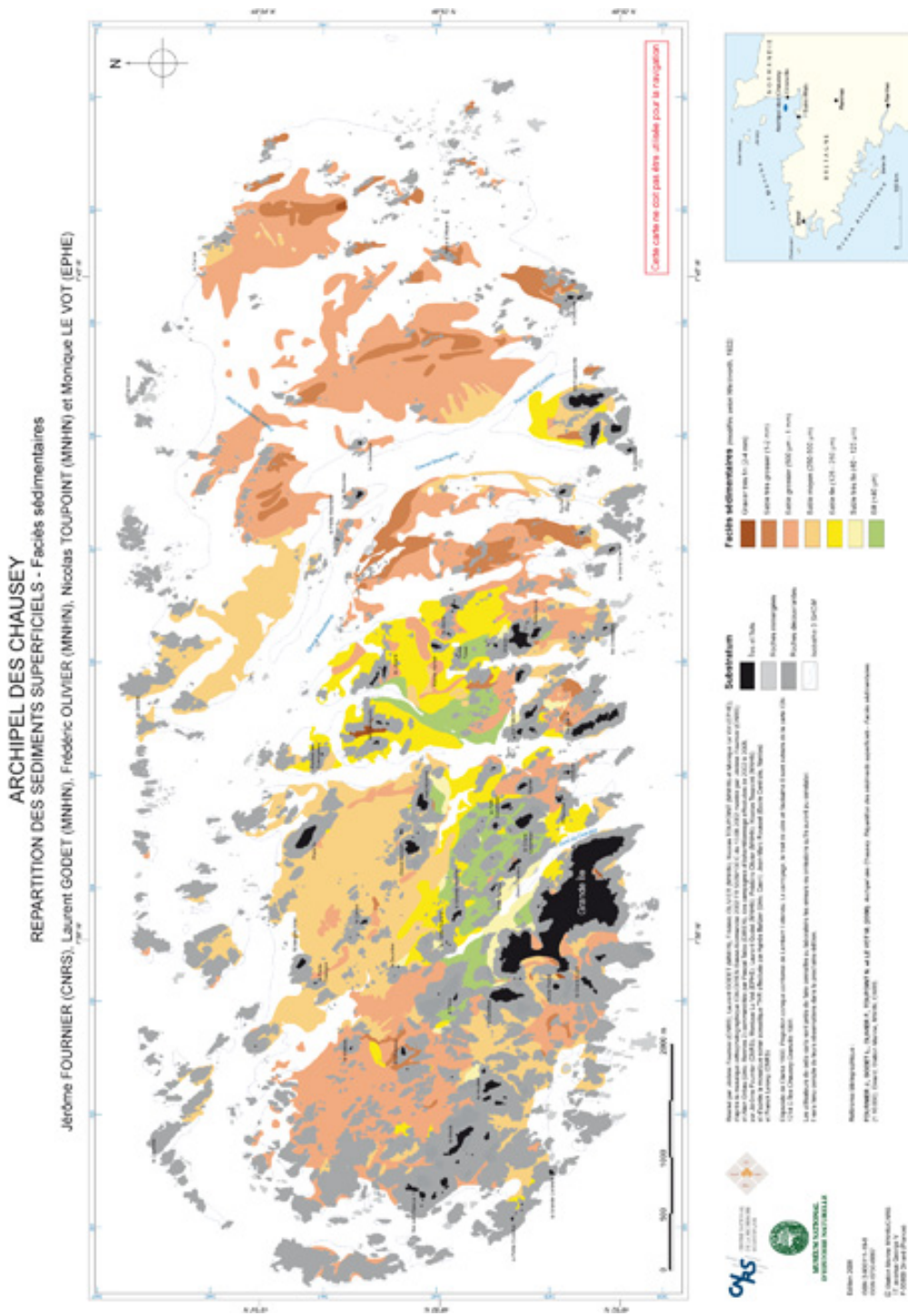


FIGURE A.3 – Carte des faciès sédimentaires de l’archipel de Chausey

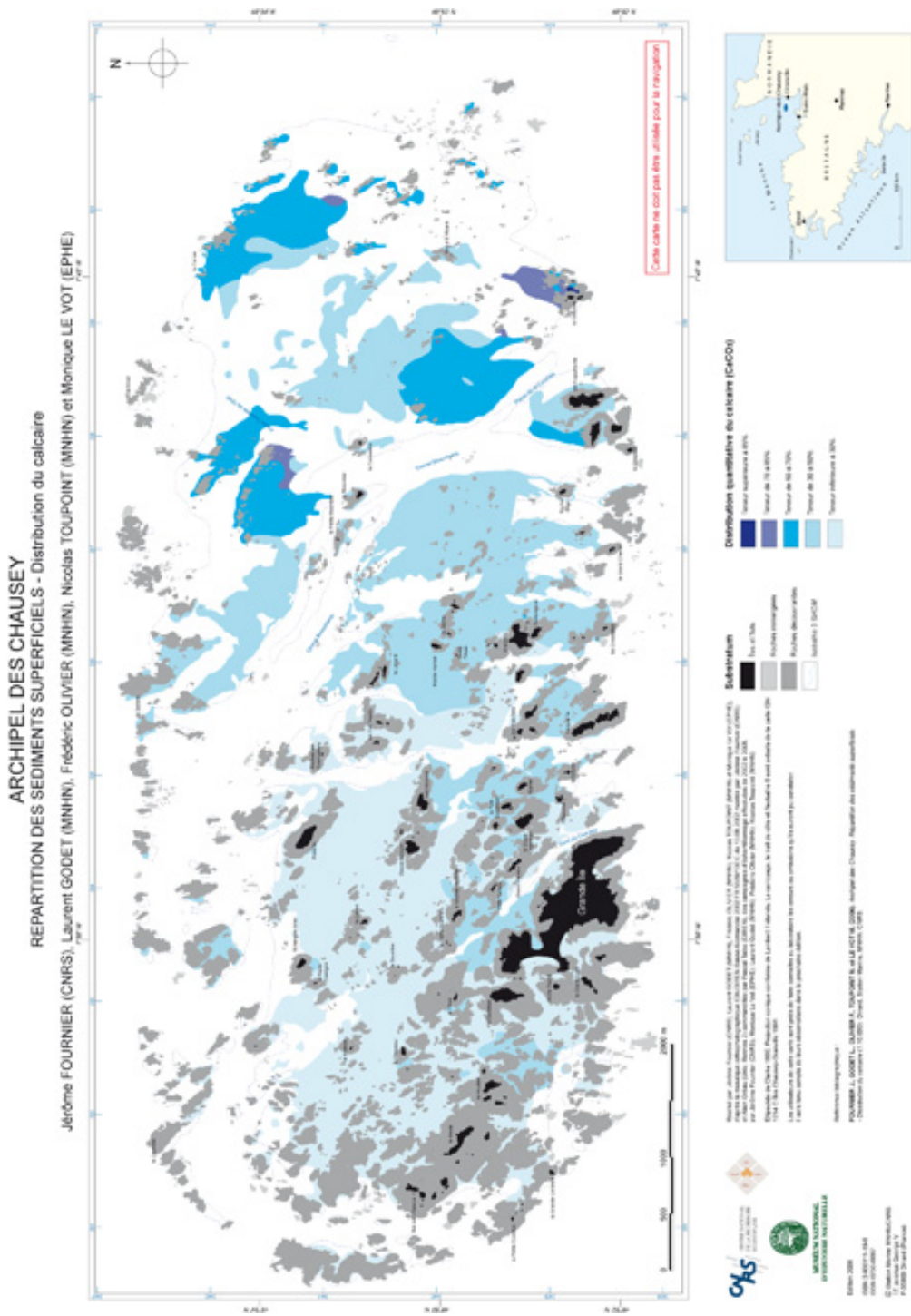


FIGURE A.5 – Carte de la distribution du calcaire de l'archipel de Chausey

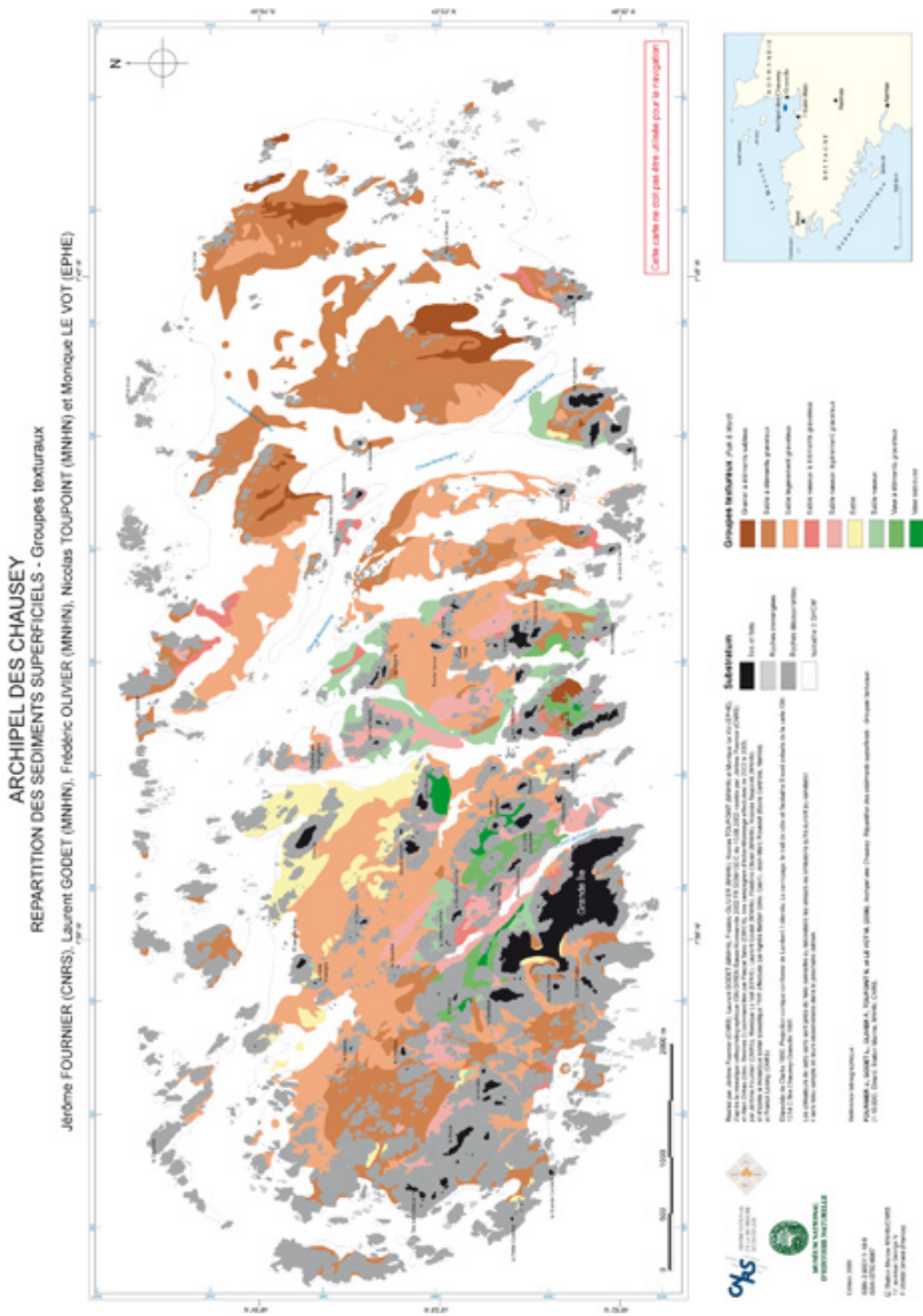


FIGURE A.6 – Carte des groupes texturaux de l’archipel de Chausey

ANNEXE A. CARTES SÉDIMENTOLOGIQUES

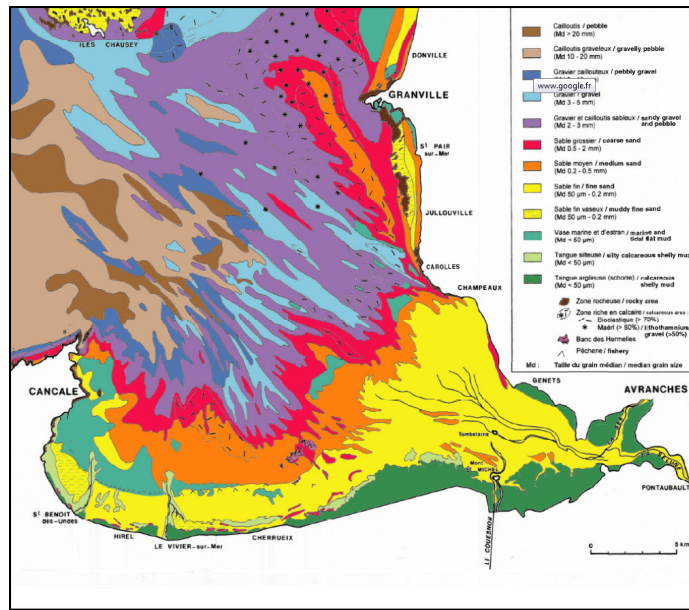


FIGURE A.7 – Carte sédimentologique de la baie du Mont-Saint-Michel

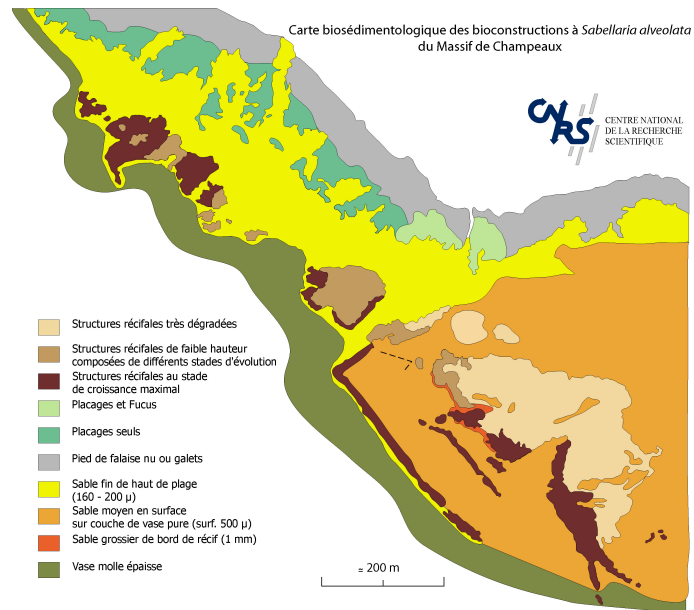


FIGURE A.8 – Carte biosédimentologique du récif de *Sabellaria alveolata* de Champeaux

Annexe B

Article

Distribution des formations superficielles intertidales de l'archipel de Chausey (Manche)

Jérôme Fournier* (1)
Laurent Godet (1)
Chantal Bonnot-Courtois (2)
Agnès Baltzer (3)
Bruno Caline (4)

Intertidal sediment distribution of the Chausey archipelago (The Channel, France)

Géologie de la France, n° 1, 2009, p. 5-17, 6 fig.

Mots-clés : Sédiment marin, Milieu littoral, Figures sédimentaires, Archipel de Chausey, Manche.

Key word: Marine sediment, Nearshore environment, Sedimentary features, Chausey Archipelago, English channel.

Résumé

La distribution des formations superficielles de l'estran de l'archipel de Chausey (Manche) a été établie à partir d'analyses granulométriques et calcimétriques d'échantillons sédimentaires prélevés sur l'ensemble du domaine intertidal et dans le proche domaine subtidal et de l'étude de la morphologie de l'estran et des petits fonds basée sur une mosaïque photographique associée à une campagne de prospection au sonar à balayage latéral. Cette étude a été menée dans le cadre du Programme National Environnement Côtier (PNEC) qui s'est déroulé de 2004 à 2007. En domaine intertidal, la répartition des faciès sédimentaires est complexe en raison du régime hydrodynamique particulièrement fort de la région, lié à l'amplitude exceptionnelle des marées (marnage de 14 m en vive eau). Le domaine infralittoral proche présente quelques accumulations de sables bioclastiques et terrigènes et de dépôts phycogènes (maërl) et zoogènes qui se rencontrent entre 5 et 15 m de profondeur. La multitude d'affleurements rocheux isolés, de platiers et la prédominance de sédiments grossiers sur l'ensemble du secteur cartographié témoignent de la puissance des agents hydrodynamiques dans cette zone (courants de marée et houles). D'autre part, l'archipel de Chausey offre une grande variété de formes sédimentaires dont des bancs de maërl à l'est qui se développent dans des secteurs moins soumis aux fortes agitations. Il se caractérise aussi par la coexistence de deux systèmes de dépôts : l'un terrigène, d'origine proximale, localisé principalement dans la partie occidentale ; l'autre carbonaté, d'origine distale mais aussi proximale, situé dans la partie orientale. Cette production carbonatée est

particulièrement abondante compte-tenu du milieu tempéré et de la présence de biocénoses intertidales comme les herbiers de phanérogame marine (*Zostera marina*) et des banquettes à lanices (*Lanice conchilega*), qui modifient localement les conditions de sédimentation.

Abstract

The distribution of the superficial sedimentary deposits of the Chausey archipelago has been studied by means of grain size and carbonate content analysis on subtidal and intertidal facies. The landform analysis of intertidal and shallow-water areas was achieved using a combination of a mosaic of aerial photographs and side-scan sonar data. This study was part of the French National Coastal Environment Program (PNEC) which was conducted from 2004 to 2007. The extreme tidal regime of the study area, which has 14 m tidal range during high spring tides, induces strong tidal currents. The intertidal sedimentary deposits have a complex distribution linked to the wide range geomorphological diversity of the small islands. The subtidal zone shows various bedforms between 5 and 15 m water depths. The archipelago is characterized by numerous rocky outcrops and very coarse sediments widely distributed over the mapped area; this abrasion platform is submitted under very high hydrodynamic conditions and consequently has a poorly developed sedimentary prism. Two systems of deposit occurs: the first one, located in the western part of the archipelago, is proximal and terrigenous whereas the other one, dominating the eastern part of Chausey, is distal and has a high carbonate content. The Chausey carbonate production is extremely abundant given its temperate

(1) CNRS, UMR 7208 BOREA, CRESCO MNHN, 38 rue du Port-Blanc, 35801 Dinard cedex

(2) CNRS, UMR 8586 PRODIG, Laboratoire de Géomorphologie et Environnement littoral EPHE, 15 boulevard de la mer, 35800 Dinard

(3) Université de Caen Basse-Normandie, UMR 6143, M2C 2-4 rue des tilleuls, 14000 Caen

(4) TOTAL, CSTJF, Carbonate & Sedimentology Group, BA2083, av. Larribau, 64018 Pau cedex

*Auteur pour correspondance - Corresponding author: fournier@mnhn.fr

environment and the presence of intertidal benthic communities that may play an active role in the sedimentation such as seagrass meadows (Zostera marina) or worm bioherms (Lanice conchilega).

Introduction

Dans le cadre de plusieurs programmes scientifiques récents portant sur la distribution des habitats benthiques à l'échelle du golfe normand-breton (REBENT, PNEC, CNES-IFEN, Natura 2000) des campagnes de prospection de l'estran et des petits fonds ont été réalisées sur l'archipel de Chausey. La cartographie des formations superficielles concerne essentiellement le domaine intertidal, largement découvrant dans ce secteur à très fort marnage, mais aussi le proche domaine infralittoral et précisément les chenaux qui structurent l'archipel en trois ensembles distincts. Les techniques utilisées comprennent la cartographie de la zone intertidale par l'analyse d'une mosaïque ortho-photographique, des levés et des prélèvements sur le terrain et la reconnaissance des fonds des chenaux à l'aide d'un sonar à balayage latéral auquel ont été associés des prélèvements à la benne Shipek (Augris *et al.*, 1996).

L'objectif de cette étude est de décrire la nature et la morphologie de l'estran et des chenaux afin d'identifier les grandes structures morpho-sédimentaires qui caractérisent cet archipel assez peu étudié jusqu'alors. Après une présentation générale du site, les techniques utilisées seront décrites ainsi que l'origine des données ayant servi de base à l'élaboration de la carte morpho-sédimentaire (Fournier *et al.*, 2007a). Les principaux résultats obtenus sont interprétés en relation avec les caractéristiques hydrodynamiques du golfe normand-breton.

1. Géologie et bâti structural

L'archipel de Chausey est situé dans le golfe normand-breton à 5 milles à l'ouest de Granville et à 10 milles au nord de Saint-Malo (Fig. 1). Il a fait l'objet de plusieurs études concernant la géologie de son substratum rocheux (Doré *et al.*, 1988 ; Hommeril, 1967 ; Jonin, 1978). En revanche, la couverture

sédimentaire de l'estran et des fonds marins associés n'a fait l'objet que d'une seule étude menée par Fortin (1972). L'archipel s'étend d'est en ouest sur 12 km et du nord au sud sur 5,5 km. Il compte 52 îlots toujours émergés d'une superficie totale de 82 hectares (dont 49 pour Grande-Île) ; 38 îlots sont végétalisés et 14 des rochers nus. L'estran s'étend sur plus de 1 995 hectares et présente des caractéristiques géomorphologiques particulières qui s'expliquent par la géologie de l'archipel et les paramètres hydrodynamiques du golfe normand-breton (Le Hir *et al.*, 1986a).

L'archipel de Chausey constitue l'affleurement d'un massif intrusif de granitoïdes datés à 596 ± 12 Ma mis en place au Cadomien au sein de roches encaissantes briovériennes qui n'affleurent pas (Jonin, 1978). Il appartient au pluton fini-cadomien de la Mancellia (Doré *et al.*, 1988). Jonin (1978) a montré que le massif est constitué

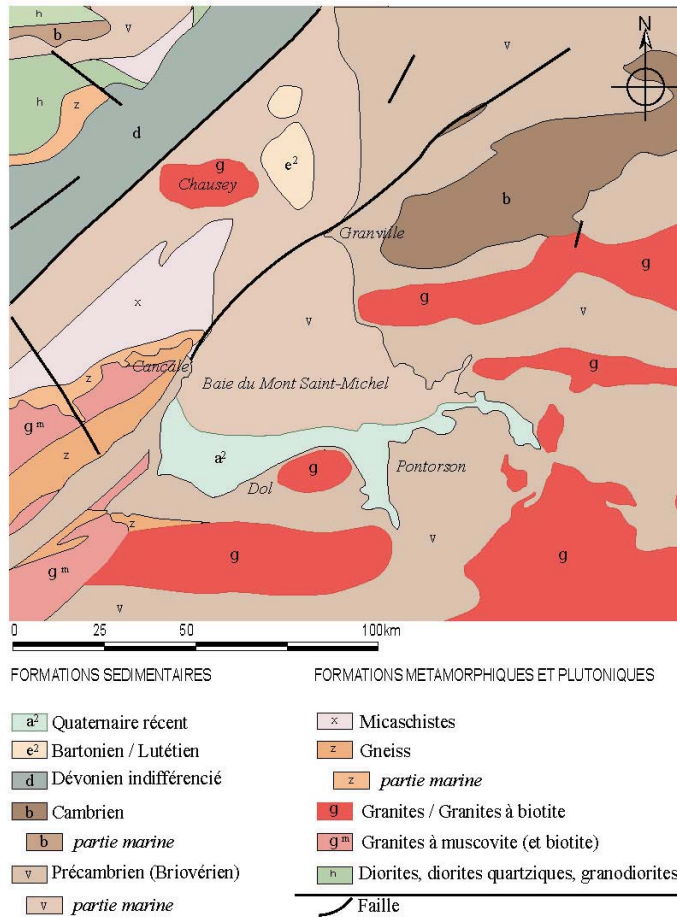


Fig. 1 - Carte géologique simplifiée du fond du golfe normand-breton (d'après Boillot *et al.*, 1974).
 Fig. 1 - Geological map of the normand-breton gulf (from Boillot *et al.*, 1974).

par une granodiorite avec injection centrale d'un granite porphyroïde tardif. Ce massif a été brisé en trois blocs par un jeu de failles normales orientées SE-NW et son extension sous la mer correspond approximativement à l'isobathe -10 mètres (cote marine). Ces deux couloirs de failles sont empruntés actuellement par les grandes passes que sont le Chenal de Beauchamp à l'est et le Sund à l'ouest, profondes d'une dizaine de mètres au maximum. Le secteur occidental correspond au bloc le plus haut ; on y trouve les îlots les plus étendus et les plus élevés, dont Grande-Île (24 m). La granodiorite a été exploitée depuis plusieurs siècles pour la construction du Mont Saint-Michel et jusqu'à la reconstruction de la ville de Saint-Malo après la seconde guerre mondiale ; l'archipel constitue ainsi l'une des plus vastes carrières marines de France. De très nombreux fronts de taille sont encore visibles sur l'ensemble des platiers rocheux de Chausey.

Trois secteurs peuvent être distingués :

- le secteur oriental de l'archipel qui est composé de sables grossiers bioclastiques et ne compte que peu d'îlots ;
- le secteur central autour du Sund qui est formé de vase sableuse avec une fraction grossière lithoclastique très variable ;
- le secteur occidental, le plus élevé (20-30 m), qui compte de très nombreux platiers et îlots et présente des sédiments très hétérogènes, allant des sables vaseux et sables moyens coquilliers jusqu'aux sables grossiers lithoclastiques.

des zones du large à forte énergie, les courants s'affaiblissent graduellement vers la baie du Mont Saint-Michel, amenant la mise en place de dépôts graveleux, puis sableux, voire vaseux selon un gradient granulométrique décroissant du nord au sud (Bonnot-Courtois *et al.*, 2002) (Fig. 2). À l'échelle du golfe, les changements rapides de bathymétrie dans les secteurs

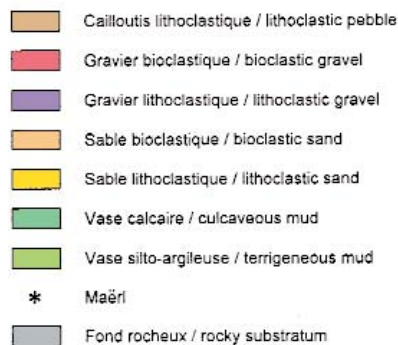
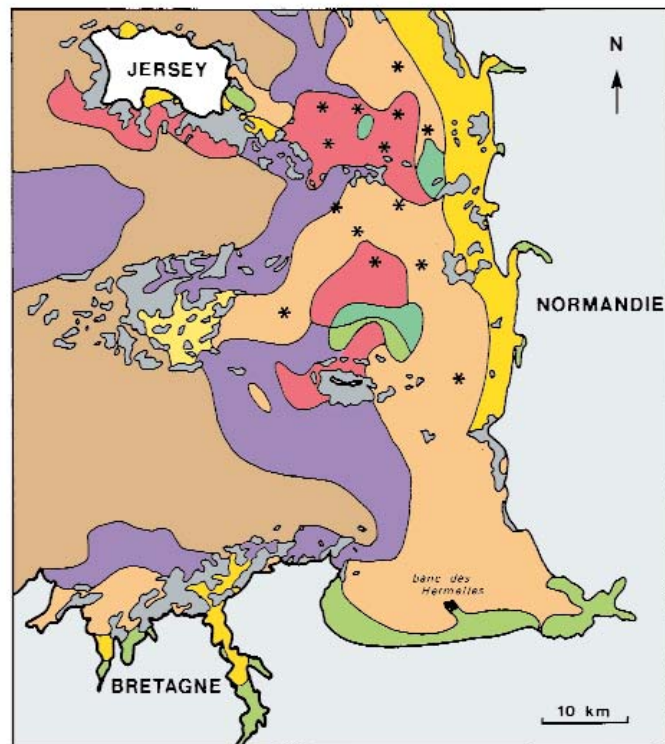


Fig. 2 - Localisation de l'archipel de Chausey et répartition des sédiments superficiels dans le golfe normand-breton (extrait de Vaslet *et al.*, 1979 in Bonnot-Courtois *et al.*, 2002).

Fig. 2 - Location of the Chausey archipelago and distribution of superficial sediments in the normand-breton gulf (extract from Vaslet *et al.*, 1979 in Bonnot-Courtois *et al.*, 2002).

de hauts-fonds (plateau des Minquiers, archipel de Chausey) engendrent des disparités de directions des vecteurs des courants résiduels qui se présentent sous la forme d'une succession de tourbillons anticycloniques et cycloniques (Garreau, 1993).

À Chausey, le régime de marée est mégatidal, avec une amplitude atteignant 14 mètres lors des marées de vives-eaux exceptionnelles. En raison de ce très fort marnage, les courants sont particulièrement puissants et peuvent atteindre localement 3 m/s. Ils modèlent profondément l'estran et les petits fonds, en créant des figures sédimentaires variées (ripples-marks, structures linguïdales, ridins, rides et mégarides de 1 à 30 m de longueur d'onde, langues sableuses, queues de comètes...) en raison de la présence de la multitude d'îlots et d'écueils présents sur l'archipel. Ces courants contribuent, dans la partie orientale plus exposée, à la mise en place de vastes bancs de sables moyens à grossiers, souvent bioclastiques, nettement visibles sur les photographies aériennes. À l'inverse, on observe dans la partie centrale et surtout dans le secteur occidental, plus protégé des houles et des courants, des dépôts de sédiments plus vaseux.

Les roses de courant de marée, établies par le SHOM, présentent deux caractéristiques : au SE de l'archipel, entre Granville et Chausey, les courants sont de type giratoire ; au SSW de Chausey, ils sont de type alternatif, orientés selon un axe WNW-ESE avec une prédominance des courants de flot vers le SE. Même près du fond, les vitesses de courant sont suffisantes pour mettre en mouvement des sables grossiers, voire des petits graviers ainsi que des débris calcaires (maërl) de taille encore plus importante mais plus facilement mobilisables en raison de leur forme et leur densité (Ehrhold, 1999). Autour de l'archipel, la circulation résiduelle se présente sous forme de courants tourbillonnaires dont les vitesses ont été estimées à 10 m/s (Le Hir *et al.*, 1986b ; Garreau, 1993).

Les houles, mesurées entre 1990 et 1992 au large de Saint-Malo, ont une hauteur significative comprise entre 0,50 et 0,70 m, une période moyenne d'environ 5 secondes et proviennent majoritairement du secteur WNW (STNMTE, 1995).

3. Méthodologie

La cartographie des formations superficielles a été établie à partir de la photo-interprétation d'une mosaïque orthophotographique de 2002 (mission spéciale IGN 2002 FR 5539/100 C), validée par des campagnes de prélèvement réalisées entre 2002 et 2005 (Cotonnec *et al.*, 2005 ; Fournier *et al.*, 2005). Les photographies aériennes constituent un outil indispensable pour l'analyse géomorphologique des zones intertidales et les zones faiblement immergées (Bonnot-Courtois *et al.*, 2004, 2005a, 2005b). Les prises de vues ont été réalisées au moment de la basse mer de vive-eau du 13 août 2002 dans des conditions optimales d'observation des estrans alors très largement découverts. La morphologie des

plages apparaît clairement et l'identification des structures morpho-sédimentaires a été possible même dans les petits fonds immergés inaccessibles au sonar.

L'échantillonnage a été effectué en 384 stations régulièrement réparties sur l'ensemble du domaine intertidal et localisées à l'aide d'un GPS (MLR SP24XC) d'une précision de l'ordre de ± 5 m (Fig. 3). Les données photographiques, les observations de terrain et les résultats sédimentologiques sont intégrés dans un SIG (Système d'Information Géographique) utilisé pour l'élaboration des cartes. Les prélèvements ont été effectués à la seringue sur une épaisseur de 8 à 10 cm. L'analyse granulométrique classique a été effectuée sur colonne de tamis après séparation des fractions fines ($< 40 \mu\text{m}$) par tamisage sous eau. Les statistiques associées aux granulométries ont été calculées à l'aide du programme Gradistat 4.0 (Blott et Pye, 2001), modifié par Fournier (non publié) pour utiliser la norme AFNOR (Gradistat 4.1), via la méthode de Folk et Ward (1957). La classification granulométrique adoptée est analogue à celle de Wentworth (1922) (Textural Groups) et les faciès sédimentaires correspondants sont reportés en légende de la carte. Les teneurs en CaCO_3 des sédiments ont été déterminées par la méthode du calcimètre Bernard sur l'ensemble du sédiment et/ou sur la fraction fine quand elle était présente.

Les principaux chenaux de l'archipel ont été cartographiés à partir des données d'un sonar à balayage latéral associées à des prélèvements d'échantillons afin de calibrer les images acoustiques (Baltzer *et al.*, 2004, 2005). Le sonar à balayage latéral permet une reconnaissance en continu des fonds marins et fournit une image acoustique qui permet l'identification des différentes formations et la morphologie détaillée des figures sédimentaires (Augris et Clabaut, 2001). Le sonar utilisé est du type EdgeTech 270 TD dont la résolution horizontale est de l'ordre de 30 cm. Le sonar à balayage latéral émet, grâce à deux transducteurs situés de part et d'autre de son axe, une onde acoustique de très haute fréquence (100 kHz ou 500 kHz) qui se réfléchit sur l'interface eau-sédiment, pénétrant de quelques centimètres au maximum dans les sédiments. Les différents tons de gris sont fonction du coefficient de rétrodiffusion du fond. L'intensité de ce coefficient est liée à trois paramètres : la nature du fond, la topographie et l'état de compaction du sédiment.

Les images sont réalisées en continu le long de profils de navigation sub-parallèles et sont géoréférencées avec un GPS différentiel (Trimble Pathfinder Pro XRS). Les images acoustiques (traitées grâce aux logiciels Isis Sonar® et DelphMap®) ne donnent pas d'informations formelles sur la nature des formations superficielles rencontrées. L'ensemble de la zone prospectée au sonar latéral a fait l'objet de 26 prélèvements de sédiments à l'aide d'une benne de type Shipek afin d'associer aux différentes réponses acoustiques des classes de sédiment.

4. Résultats

4.1. Le domaine intertidal

La cartographie des formations superficielles intertidales montre deux domaines sédimentaires, séparés par une ligne NW-SE partant du nord de Plate-Île vers le sud d'Aneret (Fig. 4). La partie occidentale, nettement plus protégée par des platiers rocheux et des îlots, présente des dépôts à dominante silico-clastique issus du remaniement des arènes. La granulométrie de ces sédiments est très variée puisque l'on passe des silts autour du Sund à des sables grossiers près du Chapeau notamment, les sables moyens à grossiers étant dominants dans ce secteur. La partie orientale, relativement uniforme, comprend pour l'essentiel des sédiments grossiers biolithoclastiques et bioclastiques qui sont proches de ceux rencontrés dans le domaine subtidal peu profond.

Le secteur occidental est presque entièrement recouvert de sables et de vases lithoclastiques. Les sables, fins au nord-est, grossiers au nord-ouest, graveleux au Sud, enserrent complètement les vases qui ne se maintiennent que dans la partie centrale, abritée des courants de marée et des houles. Cette vase sableuse comporte une fraction grossière de graviers et peut ponctuellement passer (secteur du Grand Puceau/ Grand Colombier) à un sable vaseux enrichi en carbonates (CaCO_3 jusqu'à 50 %). En outre, au débouché du chenal du Sund, se situe un dépôt vaseux exceptionnellement riche en calcaire ($\text{CaCO}_3 > 75\%$).

Ces dépôts vaseux sont généralement colonisés par des algues vertes (*Vaucheria* spp., *Enteromorpha* spp.) et une phanérogame marine (*Zostera noltii*) qui exercent une rétention préférentielle des particules fines pouvant aller jusqu'à la formation de matras d'épaisseurs variables. Les secteurs les plus élevés sont colonisés par plusieurs espèces halophiles typiques du schorre (*Salicornia* spp., *Suaeda vera*, *S. maritima*, *Spergularia media*, *Limonium vulgare*, *Aster tripolium*, *Atriplex portulacoides*...).

Le secteur oriental est composé de sables grossiers à forte teneur en carbonate. Les bancs sableux situés au sud de La Canue, par exemple, contiennent 50 à 70 % de maërl qui comprend soit des colonies denses de *Lithothamnium corallioides* sous forme de fragiles arbuscules, soit de *L. calcareum*, le plus souvent à la périphérie des nappes, qui génère des nodules de type oncolithe. En général, la proportion de maërl vivant n'atteint qu'exceptionnellement 50 % du total du maërl dragué. Elle est proche de 20 à 30 % au nord de l'archipel et ne dépasse pas 15 % au sud-est de l'archipel. La zone de maërl vivant se situe donc essentiellement au nord de l'archipel comme l'a déjà montré Ehrhold (1999). Ces accumulations phycogènes peuvent atteindre près de 8 m d'épaisseur dans la zone située au sud de la Canue constituant des bancs orientés selon un axe NW-SE, dans le sens de la composante résiduelle du flot. L'emprise totale des bancs bioclastiques ($\text{CaCO}_3 > 50\%$), situés dans l'est de l'archipel, représente une surface de

212 hectares environ. L'épaisseur de ces bancs est très variable dans le temps et dans l'espace mais est toujours pluri-métrique, le banc dit de « La Canue » étant le plus important de tous.

La partie orientale des îles Chausey est prise en écharpe par ces dépôts bioclastiques, mais ils ne sont réellement phycogènes qu'en quelques points et surtout à l'entrée nord du chenal de Beauchamp. Les autres dépôts sont zoogènes avec, localement, des placages de sable grossier litho-bioclastique ou, au centre du platier, de sable litho-vaseux. Au nord-est, des dépôts fins de type sablons sont liés aux installations mytilicoles.

4.1.1. Faciès sédimentaires

L'ensemble du domaine intertidal et proche subtidal de l'archipel de Chausey comprend plusieurs faciès principaux allant des vases sableuses aux graviers présents dans les bancs de l'est.

Les vases sablo-graveleuses, dont le mode principal est inférieur à 63 μm , ont un taux moyen de calcaire oscillant entre 15 et 20 %. Localement, certaines vases présentent un taux proche de 25 à 50 %, notamment à la périphérie des deux principales vasières de haut estran de l'archipel : autour du Sund et celle localisée au sud du Petit Romont, près du Grand Colombier, à l'est de Longue Île et au sud d'Aneret. Ces vasières ne sont pas pures et contiennent presque systématiquement une part importante de sables moyens à grossiers, voire des graviers. La vasière située au nord de Grande-Île et à l'est du Grand Puceau est recouverte par un fucus vasicole *Fucus lutarius*.

Le groupe des sables fins (63-250 μm) et moyens (250-500 μm) a une teneur en calcaire comprise entre 30 et 50 % ; seules deux zones situées de part et d'autre du Vieux ont des teneurs inférieures à 30 %, tandis qu'à l'ouest des Huguenants, ces valeurs s'élèvent à plus de 50 %. Ces sables se situent généralement à proximité immédiate des vasières précédemment décrites, mais à des niveaux bathymétriques inférieurs. Leur répartition est plus dispersée que celle des vasières. Leur principale extension se trouve dans un vaste secteur de part et d'autre de Plate-Île et sous forme de petites taches isolées au sud de l'Épinet et au nord du Grand Romont.

Les sables vaseux à graviers, dont le mode principal est compris entre 200 et 500 μm , peuvent avoir des teneurs en vase extrêmement variables (entre 2 et 30 %), et des teneurs en carbonates entre 10 et 95 %. Ces sédiments se répartissent en plusieurs points de l'archipel sous forme de bandes plus ou moins continues. Quatre principaux secteurs peuvent être identifiés. Le secteur situé autour du Sund comprend des sables vaseux-graveleux qui ont des taux de carbonates compris entre 10 et 50 %. Comme pour les sables fins et moyens, ces faciès sont localisés à des niveaux bathymétriques plus bas que les vasières précédemment décrites. Le secteur situé près des îlots de l'ouest (Île aux oiseaux, La Meule, La Houllée) est plus morcelé et est composé de sédiments

moins carbonatés (20 % en moyenne). Le secteur central situé au nord de Longue-Île jusqu'aux Roches des Guernesiais et d'Aneret jusqu'au Léopard constitue un ensemble continu généralement plus fortement bioclastique (30 % en moyenne). Enfin, le secteur situé au nord des Huguenants, colonisé par un herbier de phanérogame marine (*Z. marina*), possède un taux de carbonate pouvant atteindre 60 %. D'autres secteurs, moins étendus, se localisent au Nord de l'archipel (sud de la Sellière) et au nord de la Conchée. Ce dernier secteur est tout à fait remarquable du fait de sa teneur exceptionnellement élevée en CaCO₃ (85 %).

Les sables grossiers, constitués par la classe granulométrique comprise entre 500 µm et 2 mm, sont les sédiments dominants de l'archipel et couvrent, de loin, la plus grande superficie. On peut séparer cet ensemble en deux sous-ensembles. Le secteur occidental est très largement dominé par des sédiments avec un taux de carbonates compris entre 5 et 25 %, exception faite de larges secteurs plus bioclastiques situés à l'est du Petit Colombier, autour de la Roche Hamon et à l'est d'Aneret/Petite Ancre. Ce dernier secteur fait la transition avec le secteur oriental à sédimentation nettement plus bioclastique (25 à 75 % de carbonates) qui peut atteindre des teneurs de 80 à 95 % vers la Canue, la Conchée et au Nord de la Mauvaise.

Les graviers sableux, dont le mode principal est supérieur à 2 mm, se localisent dans la partie orientale de l'archipel et forment des bancs orientés nord-sud. Il s'agit du banc de la Canue et celui situé à l'ouest du Roc à la Mauve. Les taux de carbonates sont élevés, supérieurs à 25 %, mais atteignent généralement 50 à 75 %. Les sables de l'extrémité sud du banc de la Canue contiennent près de 90 % de carbonates.

4.1.2. Figures sédimentaires

L'interprétation de la mosaïque orthophotographique met en évidence la morphologie et l'orientation des figures sédimentaires de l'estran de l'archipel (Fig. 5). Ces figures sédimentaires peuvent être classées en deux types : les figures transversales qui se caractérisent par une succession de lignes de crêtes perpendiculaires aux courants et à la houle et les figures longitudinales qui s'allongent parallèlement au courant de marée qui les génère (Reineck et Singh, 1980).

Les figures transversales sont constituées par des rides et des mégarides dont la longueur d'onde peut être extrêmement variable : de l'ordre de quelques dizaines de centimètres avec une amplitude de 5 à 20 cm à plusieurs dizaines de mètres (jusqu'à près de 30 m) avec une amplitude d'ordre métrique. La présence et la morphologie des rides dépendent principalement de la granulométrie des sédiments et de l'hydrodynamisme local. Les champs de rides inframétriques sont localisés, pour l'essentiel, dans les sables fins à moyens du secteur oriental de l'archipel. Quelques champs sont toutefois visibles au nord du Chenal du Centre et du Sund dans des sédiments identiques. Les secteurs à mégarides se situent généralement à proximité

des grands chenaux de marée et se développent préférentiellement sur les sédiments moyens à grossiers. Les plus développés peuvent s'observer au sud de Plate Île et au nord de la Passe de la Conchée. Leur profil transversal est généralement dissymétrique, caractéristique d'une influence marquée des courants de marées. L'étude des séries de photographies aériennes anciennes (1923 à 2002) montre que ces systèmes de mégarides sont localisées exactement au même endroit et possèdent les mêmes caractéristiques (longueur d'onde et extension) et ce malgré les aménagements mis en place progressivement sur l'estran (mytiliculture et vénériculture).

Les figures longitudinales sont de plusieurs types et comprennent les traînées sableuses, les rubans et les bancs. Ces figures sont de bons indicateurs indirects de la direction des courants de marée. Les rubans se localisent généralement derrière des îlots et/ou platiers rocheux comme celui, particulièrement bien développé, de l'Enseigne Amer et se développent à la manière de « queue de comètes ». Leur direction est principalement nord-sud ou WNW-ESE. La morphologie particulièrement complexe de l'archipel offre de nombreux exemples de bancs sableux et de traînées sableuses. Le banc le plus développé se situe au sud de la Canue, où il atteint plus d'un kilomètre de longueur et découvre à chaque marée du fait de sa hauteur (Fig. 5). Ces figures s'orientent selon un axe WNW-ESE dans la partie septentrionale de l'archipel et pivotent ensuite pour prendre une direction nord-sud.

4.2. Le domaine infralittoral

La prospection au sonar latéral a permis d'identifier les principales figures sédimentaires des trois chenaux majeurs de l'archipel (Fig. 6).

4.2.1. Le chenal du Sund

Cinq faciès acoustiques ont été reconnus :

- 1) un *faciès gris soutenu irrégulier* présentant un relief à bord noir délimitant une ombre portée blanche (fig. 6B/6D). Cette réponse acoustique caractérise un ressaut morphologique qui est la signature d'un affleurement rocheux, comme par exemple, les rochers situés en bordure du sud de Grande-Île et de l'Ebauché ;
- 2) un *faciès gris foncé avec un aspect irrégulier* (fig. 6C) révèle un fond marin assez dur qui correspond à un platier rocheux dépourvu de sédiments ;
- 3) un *faciès gris clair homogène* (fig. 6C) qui correspond à des sédiments fins vaseux situés en périphérie des banquettes à *Lanice conchilega*. Ce faciès est recoupé par des sédiments plus grossiers répartis en rubans dans lesquels des systèmes de rides s'organisent ;
- 4) un *faciès gris très foncé* (fig. 6A) qui se subdivise en deux sous-faciès : le « texturé granuleux » correspond aux couvertures d'algues (principalement *Ascophyllum nodosum*) (fig. 6A) situées sur les platiers rocheux et les blocs dans le secteur méridional de Grande-Île et

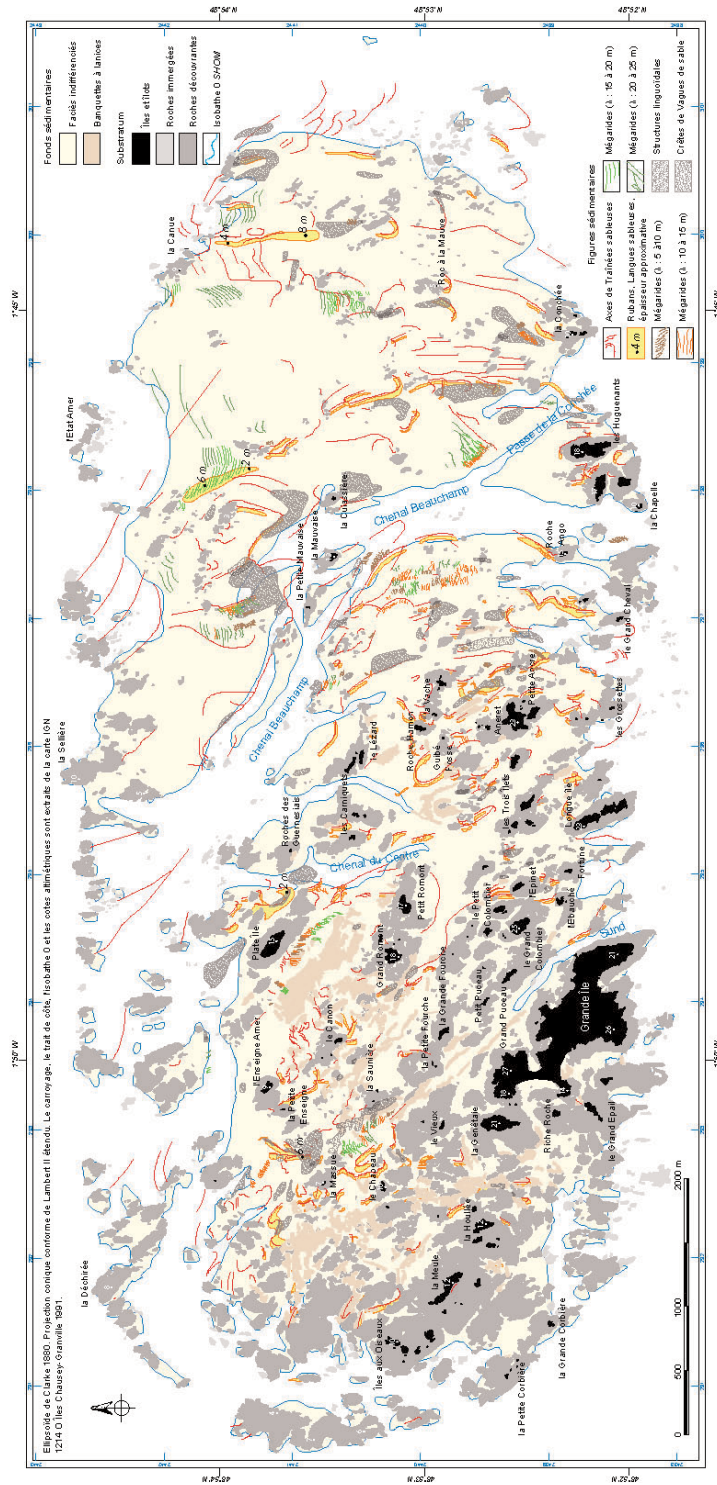


Fig. 5 - Figures sédimentaires de l'archipel de Chausey.
 Fig. 5 - Sedimentary features of the Chausey archipelago.

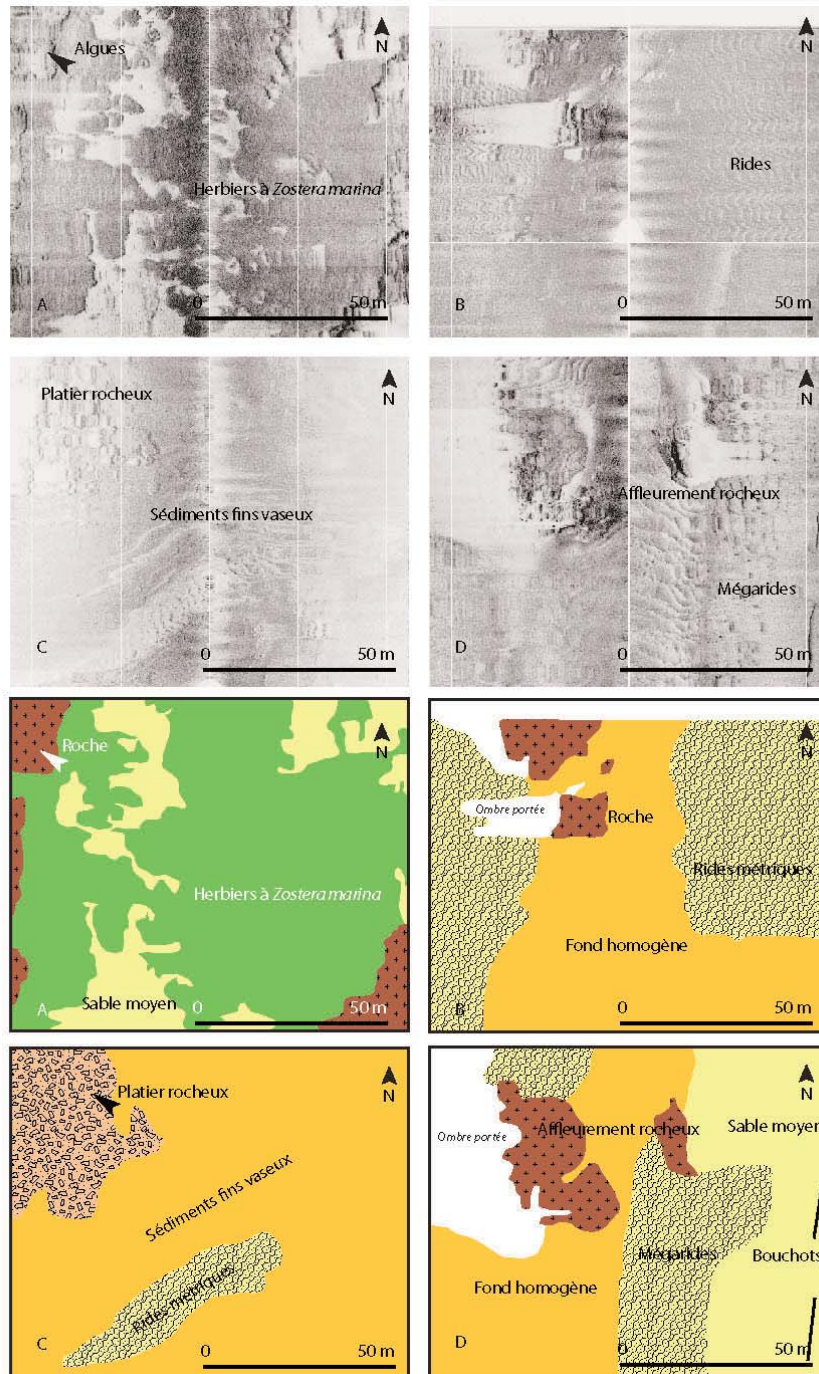


Fig. 6 - Sonogrammes du chenal du Sund.

Fig. 6 - Sonograph of the channel of Sund.

le « texturé lisse » qui signe les herbiers de *Zostera marina* (fig. 6A) ;

- 5) un faciès *gris très clair et lisse* (fig. 6A) qui correspond à du sable moyen. Le contact des herbiers avec ce faciès est très net.

4.2.2. Le chenal du Centre

Ce chenal est situé à l'ouest de la Roche des Guernesais au nord et entre Fortune et Longue-Île au sud. Quatre réponses acoustiques non illustrées permettent de distinguer :

- 1) un faciès *rocheux* déjà décrit précédemment et qui correspond à des rochers épars ;
- 2) un faciès *foncé lisse* qui correspond à une banquette à *Lanice conchilega*, en surélévation topographique puisque sa bordure noire signe un ressaut morphologique ;
- 3) un faciès *cailloutis* qui correspond à la présence de plusieurs petits rochers et blocs au pied de l'affleurement rocheux ;
- 4) un faciès *lisse* qui correspond à du sable vaseux. De petites flèches sableuses, s'étirant en arrière des rochers isolés, sont modelées par des rides métriques.

4.2.3. Le chenal Beauchamp

Il s'agit du plus important et du plus profond des trois chenaux (-12 m). Il emprunte successivement deux directions NW-SE puis N-S qui coïncident avec la paléovallée fluviale creusée dans l'axe d'une fracture du socle. Les mêmes faciès acoustiques que précédemment ont été reconnus. À l'extrémité méridionale, des rubans de sable se surimposent à un fond plus lisse que l'on retrouve tout le long du chenal et qui correspond à une accumulation de coquilles de crépidules (*Crepidula fornicata*).

5. Synthèse et conclusion

5.1. Unités morpho-sédimentaires

Les trois unités structurales de l'archipel contrôlent la distribution des sédiments superficiels de la zone intertidale et des petits fonds :

- a - le bloc occidental, le plus haut, compte de très nombreux îlots (dont Grande-Île) et platiers rocheux. Les sédiments sont le plus souvent grossiers (sable graveleux et sable grossier) et peu carbonatés (< 30 %) ;
- b - le bloc central, le plus vaste, est couvert en majorité de sables moyens avec des teneurs moyennes en carbonates (entre 30 et 50 %) ;
- c - le bloc oriental le plus bas, compte peu d'îlots et de platiers rocheux. Il est composé des sédiments les plus grossiers (sables grossiers et graviers) et les plus carbonatés (teneur moyenne en CaCO₃ supérieure à 50 % pouvant atteindre 85 %).

La juxtaposition de ces trois unités morpho-sédimentaires correspond à une évolution progressive du paysage sédimentaire entre deux pôles :

- a - le pôle silico-clastique rocheux de la partie occidentale caractérisé par un paysage sédimentaire varié et hétérogène :
 - large spectre granulométrique depuis les graviers jusqu'aux vases,
 - mosaïque de petits corps sédimentaires séparés par de nombreux îlots et vastes platiers rocheux,
 - signature autochtone des sédiments sableux majoritairement composés de minéraux (quartz et feldspath) provenant de l'érosion du granite,
 - présence discrète mais récurrente d'une fraction bioclastique composée principalement de bivalves et secondairement de gastéropodes (surtout les littorines (*Littorina* spp., *Gibbula* spp.) et les troques (*Calliostoma zizyphinum*) ;
- b - le pôle bioclastique sableux de la partie orientale présentant des faciès plus homogènes modelés en nombreuses figures sédimentaires :
 - sédiments sableux moyens à grossiers, localement riches en coquilles entières de bivalves et de débris de maërl,
 - un ensemble de bancs sableux de géométrie et taille variables localement développés en « queue de comète » à l'abri des rares îlots rocheux,
 - rubans de mégarides construits par les courants de marée et remodelé superficiellement par la houle et les vagues de tempête. Formation locale de flèches et de cordons sableux,
 - signature allochtone des sédiments. Les bioclastes et coquilles de mollusques, les débris de maërl et les graviers de micaschistes soulignent l'origine allochtone des sédiments,
 - richesse exceptionnelle des sédiments en calcaire ;
- c - l'unité morpho-sédimentaire centrale constitue la charnière entre les deux pôles sédimentaires. Elle se caractérise par des traits communs aux paysages silico-clastique et bioclastique.

La distribution des sédiments de l'archipel de Chausey se caractérise par des gradients granulométriques directement guidés par la dynamique tidale à laquelle s'ajoute l'influence secondaire de la houle qui remodèle la morphologie et accentue le développement des bancs sableux.

5.2. Interactions bio-sédimentologiques

Certaines biocénoses jouent un rôle sur la sédimentation intertidale, notamment :

- les herbiers à zostères (*Z. marina*, *Z. noltii*) : ces végétaux jouent un rôle actif dans la sédimentation en favorisant les atterrissements puis le maintien en place des particules sableuses et argileuses. Les surfaces colonisées par ces herbiers peuvent être importantes

et soumises à des variations spatio-temporelles significatives. Ainsi, entre 1924 et 1953, la surface de l'herbier est passée de 763 à 60 ha pour remonter ensuite à 164 ha en 1982. Après une période de relative stabilité jusqu'en 1992 où l'herbier s'étendait sur 179 ha, les surfaces couvertes ont nettement progressé pour atteindre, en 2002, 343 ha (Godet *et al.*, 2008a). En 2008, les herbiers de *Z. marina* sont toujours en forte expansion à Chausey ;

- les banquettes à lanices (*Lanice conchilega*) : de denses colonies de ces vers tubicoles piègent le sable entre le réseau de tubes. Ce polychète a la particularité de sélectionner préférentiellement les particules bioclastiques pour édifier son tube arénacé (Fournier *et al.*, 2007b ; Godet *et al.*, 2008b ; Toupoint *et al.*, 2008) ;
- les velours à Vauchérie (*Vaucheria spp.*) : ces algues vertes contribuent à stabiliser les vasières intertidales ;
- les gazons à *Fucus lutarius* : cette algue brune vasicole vit à moitié enfouie dans la vase. La longueur des frondes est en moyenne de 5 à 20 cm. C'est sur l'archipel de Chausey que se trouve la station la plus étendue à *F. lutarius* (2 ha) sur le littoral français où elle a longtemps été considérée comme endémique ;
- « l'usine à carbonates » : en zone subtidale, elle est formée par le maërl (*Lithothamnium calcareum*) et les crépidules (*Crepidula fornicata*) alors qu'en zone intertidale, les autres gastéropodes et les bivalves y contribuent de façon notable.

En conclusion, le modèle sédimentaire de l'archipel de Chausey se caractérise par :

- un système « dominé tidal » avec une influence secondaire de la houle ;

- la coexistence de deux systèmes de dépôts, l'un terrigène d'origine proximale, l'autre carbonaté d'origine proximale et distale ;
- une production carbonatée abondante compte-tenu du climat tempéré (association type Foramol et algue rouge) se traduisant par la mise en place d'importantes accumulations sédimentaires préférentiellement dans l'est de l'archipel, secteur plus calme d'un point de vue hydrodynamique ;
- la présence de biotopes intertidaux qui jouent un rôle actif sur la sédimentation (piégeage, sélection des particules, consolidation du substrat vaseux ou sableux, maintien en place des sables et vases).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier plus particulièrement M. Le Vot (EPHE, Dinard) pour l'ensemble des analyses granulométriques et calcimétriques, N. Toupoint (MNHN, Dinard) et C. Guérin (INTECHMER, Cherbourg) pour leur contribution à la cartographie. Merci également à ceux qui ont participé aux campagnes de prélèvements sur le terrain : T. Abiven (CEL Basse-Normandie) ; L. Brigand et S. Le Berre (UBO, Brest) ; A. Caline, A. Dréau et H. Gloria (EPHE, Dinard) ; A. Cotonnec et V. Dubreuil (Univ. Rennes 2) ; G. Frébourg et M. Fuchs (Univ. Genève) ; F. Lelong (CNRS, Caen) ; F. Olivier (MNHN, Dinard) ; J.-M. Rousset (École Centrale, Nantes). La traduction du résumé en anglais a été assurée par A. Curd (ANAMP, Brest). Nous tenons aussi à remercier les deux correcteurs anonymes pour leur suggestions qui ont permis l'amélioration du manuscrit et des illustrations.

Références

- Augris C., Clabaut P. (2001) – Cartographie géologique des fonds marins côtiers. Exemples le long du littoral français. Éditions Ifremer, Plouzané, 75 p.
- Augris C., Hamon D., Mazé J.P., Bonnot-Courtois C., Garreau P., Guénnoc P., Guénoles A., Houlgatte E. (1996) – Atlas thématique de l'environnement marin en baie de Saint-Brieuc. Éditions IFREMER, Plouzané, 65 p.
- Baltzer A., Bonnot-Courtois C., Fournier J., Rousset J.-M., Schoorens J. (2004) – Réponses acoustiques de différents faciès morphosédimentaires d'une lagune côtière et d'une flèche littorale. Exemple de Sables d'Or en baie de Saint-Brieuc (Bretagne Nord). In VIII Journées nationales Génie Côtier Génie Civil, UTC, CETMEF, CFL, Compiègne, vol. 4, instrumentation et mesures, p. 1-8.
- Baltzer A., Rousset J.M., Lelong F., Fournier J. (2005) – Reconnaissance au sonar latéral des principaux chenaux des îles Chausey (Cotentin) – mai 2005. Rapport DIREN, Université de Caen, M2C CNRS, Caen. 30 p.
- Blott S., Pye K. (2001) – Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth, Surface, Processes and Landforms*, 26, p. 1237-1248.
- Boillot G., Lefort J.-P., Cresard A., Musellec P. (1974) – Carte géologique de la Manche au 1/1 000 000. BRGM-CNEXO, Orléans.
- Bonnot-Courtois C., Augris C., Blanchard M., Houlgatte E. (2002) – Répartition des formations superficielles du domaine marin côtier entre le Cap Fréhel et Saint-Malo (Côtes d'Armor – Ille-et-Vilaine). *Géologie de la France*, 3, p. 31-42.
- Bonnot-Courtois C., Caline B., L'Homer A., Le Vot M. (éds.) (2002) – La baie du Mont Saint-Michel et l'estuaire de la Rance. Environnements sédimentaires, aménagements et évolution récente. Bulletin du Centre de Recherche Elf Exploration et Production, Pau, n° 26, 256 p.
- Bonnot-Courtois C., Fournier J., Dréau A. (2004) – Recent morphodynamics of shell banks in the western part of Mont Saint-Michel Bay (France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, p. 65-80.

- Bonnot-Courtois C., Fournier J., Baltzer A. (2005a) – Complémentarité des photographies aériennes et des images sonar pour l'analyse des structures bio-morpho sédimentaires du littoral. in « Milieux littoraux : perspectives nouvelles », dir. P. Durant & L. Goeldner-Gianella, éd. L'Harmattan, Paris, p. 13-28.
- Bonnot-Courtois C., Fournier J., Rollet C., Populus J., Guillaumont B., Loarer R. (2005b) – Cartographie bio-morpho-sédimentaire des estrans dans le cadre du Réseau Benthique (complémentarité des orthophotographies littorales et des données Lidar). *Photo-interprétation*, 41(2), p. 13-27, p. 35-39.
- Cotonnac A., Fournier J., Gouéry P., Mokrani M., Anselme B., Dréau A., Dubreuil V., Panizza A., Talec P. (2005) – Utilisation de données SPOT5 pour la cartographie des habitats benthiques littoraux : application à l'archipel des îles Chausey (golfe normand-breton, France). *Noréis*, 196, p. 37-50.
- Doré F., Dupret L., Lautridou J.P., Hommeril P. (1988) – Notice explicative de la feuille Granville à 1/50 000. Éditions BRGM, Orléans, 55 p.
- Ehrhold A. (1999) – Dynamique de comblement d'un bassin sédimentaire soumis à un régime mégatidal : exemple de la baie du Mont Saint-Michel. Thèse de doctorat, Université de Caen, 294 p.
- Folk R.L., Ward W.C. (1957) – Brazos Riber bar: a study in the significance of grain parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, p. 3-26.
- Fortin J. (1972) – Les sédiments et la dynamique sédimentaire dans l'archipel des îles Chausey (Manche). Thèse de Doctorat, Université de Caen, 65 p.
- Fournier J., Baltzer A., Bonnot-Courtois C., Godet L., Guérin C., Le Vot M., Olivier F., Retière C. (2005) – Morpho-sedimentary and benthic habitats mapping of Chausey archipelago from remote sensing, airborne and acoustic data. MESH-Malo Interreg IIIb NW MESH Mapping European Seabed Habitats, IFREMER, Saint-Malo, 31 p.
- Fournier J., Caline B., Godet L., Baltzer A., Le Vot M., Abiven T. (2007a) – Cartographie morpho-sédimentaire des formations superficielles de l'archipel de Chausey (golfe normand-breton). 11^e Congrès français de sédimentologie, Publ. ASF, n° 57, Caen, p. 130.
- Fournier J., Olivier F., Toupoint N., Godet L., Le Vot M., Caline B. (2007b) – Signature morpho-sédimentaire des biohermes à *Lanice conchilega* (Pallas, 1766) de la baie du Mont Saint-Michel. 11^e Congrès français de sédimentologie, Publ. ASF, n° 57, Caen, p. 129.
- Garreau P. (1993) – Hydrodynamics on the North Brittany coast: a synoptic study. *Oceanologica Acta*, 16(5-6), p. 469-477.
- Godet L., Fournier J., Van Katwijk M., Olivier F., Le Mao P., Retière C. (2008a) – Before and after wasting disease in common eelgrass *Zostera marina* along the French Atlantic coasts: a general overview and first accurate mapping. *Diseases of Aquatic Organisms*, 79, p. 249-255.
- Godet L., Toupoint N., Olivier F., Fournier J., Retière C. (2008b) – Considering the functional value of common marine species as a conservation stake. The case of the sandmason worm *Lanice conchilega* (Annelid polychaeta, Pallas 1766) beds. *Ambio*, 37, p. 347-355.
- Hommeril P. (1967) – Étude de géologie marine concernant le littoral bas-normand et la zone pré-littorale de l'archipel anglo-normand. Thèse de Doctorat d'État, Université de Rouen, 304 p.
- Jonin M. (1978) – Étude pétrographique du massif granitique des îles Chausey (Massif Armoricaïn). *Bulletin de la Société linnéenne de Normandie*, 106, p. 15-25.
- Le Hir P., Bassoulet P., Erard E., Blanchard M., Hamon D., Jegou A.M. (1986a) – Étude régionale intégrée du golfe normand-breton, tome 4 : Estrans et zones humides. IFREMER DERO-86.27-EL, Plouzané, 182 p.
- Le Hir P., Bassoulet P., Erard E., Blanchard M., Hamon D., Jegou A.M. (1986b) – Étude régionale intégrée du golfe normand-breton, tome 1 : Présentation de l'étude, hydrodynamique et sédimentologie. IFREMER DERO-86.27-EL, Plouzané, 265 p.
- Reineck H.E., Singh I.B. (1980) – Depositional sedimentary environments. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 551 p.
- STNMTE (1995) – Catalogue de fiches synthétiques de mesures de houle. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Équipement et des Transports, 171 p.
- Toupoint N., Godet L., Fournier J., Retière C., Olivier F. (2008) – Does Manila clam cultivation affect habitats of the engineer species *Lanice conchilega* (Pallas, 1766)? *Marine Pollution Bulletin*, 56, p. 1429-1438.
- Vaslet D., Larsonneur C., Auffret J.-P. (1979) – Carte des sédiments meubles superficiels de la Manche à 1/500 000. BRGM-IFREMER, carte géologique de la marge continentale, Orléans.
- Wentworth C.K. (1922) - A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, p. 377-392.

Annexe C

Notes personnelles

ANNEXE C. NOTES PERSONNELLES

Bibliographie

- [1] AFNOR, *Granulométrie - 2 volumes*, tomes 1 et 2, AFNOR, Paris, 2000
- [2] AUGRIS, C., CLABAUT, P., *Cartographie géologique des fonds marins côtiers. Exemples le long du littoral français*, Editions IFREMER, Plouzané, 2001
- [3] AUGRIS, C., HAMON, D., MAZÉ, J.P., BONNOT-COURTOIS, C., GARREAU, P., GUÉNNOC, P., GUÉNOLE, A., HOULGATTE, E., *Atlas thématique de l'environnement marin en baie de Saint-Brieuc*, Editions IFREMER, Plouzané, 1996
- [4] BAGNOLD, R.A., BARNDORFF-NIELSEN, O.E. The pattern of natural grain size distribution. *Sedimentology* 27 :199–207, 2004
- [5] BELL, D.F., Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. *Journal of Soil Science* 15 :84–92, 1964
- [6] BELLAIR, P., POMEROL, C., *Eléments de géologie*, Armand Colin, Paris, 1977
- [7] BEUSELINCK, L., GOVERS, G., POESEN, J., DEGRAER, G., Grain-size analysis by laser diffractometry : comparison with the sieve-pipette method. *Catena* 32 :193–208, 1998
- [8] BLOTT, S., FOURNIER, J., *Gradistat v. 4.1. A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments by $\frac{1}{2}\phi$, $\frac{1}{4}\phi$ or AFNOR sieving or Laser Granulometer*, Royal Holloway University of London, Centre National de la Recherche Scientifique, Dinard, 2004
- [9] BLOTT, S.J., PYE, K., GRADISTAT : a grain size distribution and statistic package for the analysis of uncololidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26 :1237–1248, 2001
- [10] BOILLOT, G., LEFORT, J.P., CRESARD, A., MUSELLEC, P., *Carte géologique de la Manche au 1/100 000*, BRGM-CNEXO, Orléans, 1974
- [11] CAILLEUX, A., TRICART, J., *Initiation à l'étude des sables et des galets*, 3 tomes, Centre Doc. Univ., Paris, 1959
- [12] CAMPY, M., MACAIRE, J.J., *Géologie des formations superficielles*, Masson, Paris, 1989
- [13] CAMPY, M., MACAIRE, J.J., *Géologie de la surface*, Dunod, Paris, 2003
- [14] CHAMLEY, H., *Sédimentologie*, Dunod, Paris, 1987
- [15] CHAMLEY, H., *Les milieux de sédimentation*, Tec & Doc, Lavoisier, Paris, 1988
- [16] CHAMLEY, H., DECONINCK, J.F., *Bases de sédimentologie*, Dunod, Paris, 2011

BIBLIOGRAPHIE

- [17] CHEETHAM, M.D., KEENE, A.F., BUSH, R.T., SULLIVAN, L.A., ERSKINE, W.D., A comparison of grain-size analysis methods for sand-dominated fluvial sediments. *Sedimentology* 55 :1905–1913, 2008
- [18] COJEAN, I., RENARD, M., *Sédimentologie*, Dunod, Paris, 1999
- [19] DAVIS, M.W., EHRLICH, R. Relationships between measures of sediment-size-frequency distributions and the nature of the sediments. *Geological Society of America Bulletin* 81 :3537–3548, 1970
- [20] DI STEFANO, C., FERRO, V., MIRABILE, S., Comparison between grain-size analyses using laser diffraction and sedimentation methods. *Biosystems Engineering* 106 :205–215, 2010
- [21] DUR, J.C., ELSASS, F., CHAPLAIN, V., TESSIER, D., The relationship between particle-size distribution by laser granulometry and image analysis by transmission electron microscopy in a soil clay fraction. *European Journal of Soil Science* 55 :265–270, 2004
- [22] FOLK, R.L., The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology* 62 :344–359, 1954
- [23] FOLK, R.L., A review of grain-size parameters. *Sedimentology* 6 :73–93, 1966
- [24] FOLK, R.L., WARD, W.C. Brazos River bar : a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27 :3–26, 1957
- [25] FRANCUS, P., *Image analysis, sediments and paleoenvironments*, Springer, Berlin, 2005
- [26] FRIEDMAN, G.M., Differences in size distributions of populations of particles among sands of various origins. *Sedimentology* 26 :3–32, 1979
- [27] GALLON, R.K., FOURNIER, J., Grain-size statistics and description of sediment. CRAN R-package, 2012
- [28] GARDINER, V., DACKOMBE, R., *Géomorphological Field Manual*, George Allen & Unwin, London, 1983
- [29] INMAN, D.L., Sorting of sediments in the light of fluid mechanics. *Journal of Sedimentary Petrology* 19 :51–70, 1949
- [30] INMAN, D.L., Measures for describing the size distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology* 22 :125–145, 1952
- [31] KOLDIJK, W.S., On environment-sensitive grain-size parameters. *Sedimentology* 10 :57–69, 1968
- [32] KONDOLF, G.M., SALE, M.J., WOLMAN, M.G. Modification of fluvial gravel size by spawning Salmonids. *Water Resources Research* 29 :2265–2274, 1993
- [33] KONDOLF, G.M., WOLMAN, M.G. The sizes of Salmonid spawning gravels. *Water Resources Research* 29 :2275–2285, 1993
- [34] KONERT, M., VANDENBERGHE, J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis : a solution for the underestimation of the clay fraction. *Sedimentology* 44 :523–535, 1997
- [35] KRINSLEY, D.H., DOORKAMP, J.C., *Atlas of quartz sand surface textures*, Cambridge University Press, London, 1973
- [36] KRUMBEIN, W.C., Size frequency distributions of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology* 4 :65–77, 1934

BIBLIOGRAPHIE

- [37] KRUMBEIN, W.C., Size frequency distributions of sediments and the normal phi curve. *Journal of Sedimentary Petrology* 8 :84–90, 1938
- [38] KRUMBEIN, W.C., PETTIJOHN, F.J., *Manual of Sedimentary Petrography*, Appleton-Century-Crofts, New-York, 1938
- [39] LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES, *Granulométrie*, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Ministère de l'Équipement et du Logement, Paris, 1988
- [40] LARSONNEUR, C., La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français : méthode mise au point et utilisée en Manche. *Journal de la Recherche Océanographique* II(2) :33–39, 1977
- [41] LE RIBAUT, L., *L'exoscopie ; méthodes et applications*, Notes et mémoires 12, Total Cie française des Pétroles, Paris, 1975
- [42] MAHANEY, W.C., *Atlas of sand grain surface textures and applications*, Oxford University Press, Oxford, 2002
- [43] MCCAMMON, R.B., Efficiencies of percentile measures for describing the mean size and sorting of sedimentary particles. *Journal of Geology* 70 :453–465, 1962
- [44] MIDDLETON, G.V., Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Journal of Geology* 84 :405–426, 1976
- [45] MILLER, F.P., VANDOME, A.F., MCBREWSTER, J., *Sédimentologie*, Alphascript Publishing, Mauritius, 2010
- [46] OTTO, G.H., A modified logarithmic probability graph for the interpretation of mechanical analyses of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology* 9 :62–75, 1939
- [47] RAMASWAMY, V., RAO, P.S., Grain size analysis of sediments from the northern Andaman Sea : Comparison of laser diffraction and sieve-pipette techniques. *Journal of Coastal Research* 22 :1000–1009, 2006
- [48] READING, H., *Sedimentary environments : processes, facies and stratigraphy*, Blackwell, London, 1996
- [49] REINECK, H.E., SINGH, I.B., *Depositional sedimentary environments*, Springer-Verlag, Berlin, 1980
- [50] RIVIÈRE, A., *Méthodes granulométriques. Techniques et interprétation*, Gulf Publishing Company, Houston, 1932
- [51] RIVIÈRE, A., VERNHET, S., *Contribution à l'étude de la sédimentation des sédiments carbonatés*, reprinted from Developments in Sedimentology, Vol. 1, L. M. J. U. van Straaten (Editor), Deltaic and Shallow Marine Deposits, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1964
- [52] RODRIGUEZ, J.G., URIARTE, A., Laser diffraction and dry-sieving grain size analyses undertaken on fine- and medium-grained sandy marine sediments : a note. *Journal of Coastal Research* 25 :257–264, 2009
- [53] SNEED, E.D., FOLK, R.L., Pebbles in the Lower Colorado River, Texas : a study in particle morphogenesis. *Journal of Geology* 66 :114–150, 1958
- [54] TRASK, P.D., *Origin and Environment of source sediments of petroleum*, Masson, Paris, 1977
- [55] TUCKER, M.E., *Sedimentary petrology*, Blackwell, London, 2001

BIBLIOGRAPHIE

- [56] UDDEN, J.A., Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America* 25 :655–744, 1914
- [57] VASLET, D., LARSONNEUR, C., AUFFRET, J.P., *Carte des sédiments meubles superficiels de la Manche à 1/500 000*, BRGM-IFREMER, carte géologique de la marge continentale, Orléans, 1979
- [58] VATAN, A., *Manuel de sédimentologie*, Technip, Paris, 2000
- [59] VERGER, F., *Marais et wadden du littoral français, étude de géomorphologie*, Thèse, Bordeaux, 1968
- [60] WENTWORTH, K.H., A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30 :377–392, 1922
- [61] ZINGG, T., Beitrag zür schotteranalyse. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 15 :39–140, 1935

Ce document a été édité avec T_EXmaker 3.0.2[©] compilé sous L^AT_EX2_ε
avec MikT_EX 2.9[©]

Dinard, janvier 2012