

Jean-François Beaux, Bernard Platevoet, Jean-François Fogelgesang

Atlas de pétrologie

4^e ÉDITION

DUNOD

Remerciements

Dans la réalisation de cet ouvrage, les auteurs ont bénéficié du concours d'un certain nombre de collègues. Ils sont tout particulièrement reconnaissants à Christian ROBERT, Philippe AGARD et Benjamin BRIGAUD pour le prêt d'un certain nombre de lames minces et la réalisation de microphotographies. Ils tiennent également à remercier pour leur aide ou leur contribution à l'iconographie Jérôme ALEON, Jacques-Marie BARDINTZEFF, Louis CARION, Peter HOPPE, Luc LABENNE, Éric MARCOUX, Alain MEUNIER, Beate ORBERGER, Maurice PAGEL, Giuseppe SIANI, Georges REVERDY, Michael RYGELL, Jacques VECOVEN, Nicolas MANGOLD, Erik SCHERER, Frank POITRASSON, Kevin WALSH et Thomas WITZKE. Ils expriment également leur gratitude à Évelyne CRINON pour ses recherches documentaires, à Rémy PICHON pour son aide dans l'imagerie électronique au MEB, à Serge MISKA pour la réalisation des diffractogrammes, ainsi qu'à Valérie GODARD et Éric DELAIRIS pour la confection de lames minces. Enfin les auteurs ont fait usage de quelques documents provenant des organismes suivants : Université Libre de Bruxelles, École Française des Bétons, Max Planck Institut for chemistry, Virginia Tech. University, U.S., NASA et Compagnie KHD Humboldt Wedag.

Sauf indication contraire, toutes les photos, illustrations et figures sont la propriété des auteurs.

Les données des tableaux des pages 101 à 118 sont des analyses adaptées de J. Lameyre, *Roches et minéraux*, Doin éditions, 1975, M. G. Best et E. H. Christiansen, *Igneous Petrology*, Blackwell Science, 2001, B. Bonin, *Magmatisme et roches magmatiques* 2^e édition, éditions Dunod, 2004 et V. Le Roux et al., *Earth Planet. Sci Lett.*, 2007

Couverture :

Haut : ChWeiss/shutterstock. Bas, deuxième en partant de la droite : Christian Gautier/Biosphoto.

Avant-propos

Donner du sens à l'étude des matériaux géologiques. Cet Atlas s'adresse en premier lieu à tous les étudiants engagés en cursus de Licence dans les domaines des sciences de la vie et de la Terre, mais aussi à tous ceux tentés par les concours de recrutement ou de promotion de professeurs (Agrégations et CAPES externes et internes). Il répond au triple souci de :

- se familiariser avec l'ensemble des **méthodes** de la pétrologie et en comprendre les principes et les apports ;
- développer l'approche **concrète** des objets et la conduite d'**observations raisonnées** sur l'ensemble des **minéraux** et des **roches** ;
- favoriser l'**intégration** des observations en présentant la signification et l'intérêt de chacune d'entre elles dans le cadre plus général de l'étude des **processus géologiques** et des **ressources** naturelles dans leurs **gisements** et leurs utilisations.

Une organisation en fiches servant des objectifs clairement définis. L'ouvrage s'organise en **dix parties** aux objectifs clairement définis. Chaque partie est déclinée en un ensemble de **fiches**, chacune organisée en une **double page**, et s'intégrant de manière indépendante mais complémentaire au service de l'objectif.

Chaque fiche associe une **page de photographies** (échantillons macroscopiques et lames minces), éventuellement accompagnées de schémas ou de graphiques et portant toutes les légendes nécessaires à leur compréhension, à une **page de texte explicatif**. Les explications sont complétées et éclairées par des **analyses géochimiques**, des diagrammes, des **classifications**. Les méthodes classiques de traitement de données sont rappelées et détaillées (établissement de formules structurales, calcul de norme...).

Dix parties de signification affichée pour une construction solide et structurée des connaissances. La première partie est ainsi l'occasion de présenter l'ensemble des roches pour en rappeler les **principales classifications**. La seconde partie développe les apports de la réalisation des **lames minces** et de leur **observation au microscope polarisant**. La troisième partie expose les **approches géochimiques les plus récentes**, donnant accès aux structures cristallines et aux compositions chimiques des roches et de leurs minéraux. L'**identification** de ceux-ci est l'objet de la quatrième partie, avec, pour chacun, une présentation associant caractéristiques cristallographiques, optiques et géochimiques. Les connaissances acquises autorisent alors l'**étude des roches**, dans **trois parties** relatives aux roches magmatiques et mantelliques, aux roches sédimentaires et métamorphiques. Pour chaque type de roche, l'ouvrage s'attache particulièrement à donner du sens et de la cohérence aux observations en reliant **composition minéralogique, composition géochimique et gisements**. On montre alors dans une partie suivante comment l'ensemble des informations participe à la **compréhension des principaux processus pétrologiques et à leur reconstitution** : diagenèse pour les roches sédimentaires, histoire des cristallisations pour les roches magmatiques, conditions des transformations minérales et structurales pour les roches métamorphiques... Attentif au développement des missions spatiales, l'ouvrage s'intéresse ensuite aux **matériaux extraterrestres** dont la signification est discutée dans le cadre de l'histoire du système solaire et de la Terre. Enfin, la géologie est aussi, et aujourd'hui plus que jamais, ressources. La dernière partie de l'ouvrage s'attache ainsi à exposer les relations entre pétrologie et **exploitation des matériaux** et à comprendre les processus conduisant à la constitution des **gisements**.

Avant-propos	3
1 • Caractériser et classer les roches	
01 Identifier une roche à l'échelle macroscopique	6
02 Classer les roches sédimentaires	8
03 Classer les roches sédimentaires carbonatées	10
04 Classer les roches magmatiques et mantelliques	12
05 Classer les roches magmatiques : textures et couleurs	14
06 Caractériser les roches magmatiques par le calcul de la norme CIPW	16
07 Caractériser les roches métamorphiques : composition et conditions de formation	18
08 Caractériser les roches métamorphiques : structures et textures	20
2 • Observer et reconnaître les minéraux au microscope	
09 Confectionner une lame mince	22
10 Observer au microscope polarisant (1)	24
11 Observer au microscope polarisant (2)	26
12 Observer en LPNA : forme et couleur des minéraux	28
13 Observer en LPNA : relief, clivages et inclusions	30
14 Observer en LPA : teintes de biréfringence, extinctions et macles	32
15 Observer en imagerie électronique	34
3 • Établir les structures cristallines et la composition chimique des minéraux	
16 Cristallographie géométrique : réseaux cristallins et symétries	36
17 Analyse des minéraux par diffraction de rayons X (DRX)	38
18 Analyse des minéraux à la microsonde électronique	40
19 Technique d'analyse par LA-IPC-MS : analyse par ablation laser et spectrométrie de masse d'un plasma par induction	42
20 Applications de l'analyse par LA-ICP-MS : éléments-traces et rapports isotopiques dans les minéraux	44
21 Diversité des minéraux et établissement des formules structurales	46
4 • Identifier les minéraux	
22 Identifier les tectosilicates : le quartz	48
23 Identifier les tectosilicates : les feldspaths alcalins (ou sodipotassiques)	50
24 Identifier les tectosilicates : les feldspaths calcosodiques (ou plagioclases)	52
25 Identifier les tectosilicates : les feldspathoïdes	54
26 Identifier les phyllosilicates : les micas : biotite et muscovite	56
27 Identifier les inosilicates : les amphiboles (1) : caractères généraux et diversité	58
28 Identifier les amphiboles (2) : actinote et amphiboles sodiques	60
29 Identifier les inosilicates : les pyroxènes (1) : orthopyroxènes et clinopyroxènes	62
30 Identifier les inosilicates : les pyroxènes (2) : les clinopyroxènes	64
31 Identifier les néosilicates : les olivines	66
32 Identifier des minéraux accessoires : oxydes, zircon, apatite, rutile	68
33 Identifier les néosilicates : les silicates d'alumine (1) : andalousite - sillimanite - disthène	70
34 Identifier les néosilicates : les silicates d'alumine (2) : andalousite - sillimanite - disthène	72
35 Identifier la staurotide (néosilicate) et la cordiérite (tectosilicate)	74
36 Identifier les grenats (néosilicates) et la chlorite (phyllosilicate)	76
37 Identifier les sorosilicates : des alumino-silicates calciques : les épidotes - la lawsonite	78
38 Identifier les phyllosilicates : les argiles (1) : architecture et aspect microscopique	80
39 Identifier les phyllosilicates : les argiles (2) : techniques et méthodes d'identification	82
40 Identifier les minéraux carbonatés : la calcite - l'aragonite - la dolomite	84
5 • Identifier les roches sédimentaires	
41 Identifier les roches sédimentaires détritiques : les conglomérats et les grès	86
42 Identifier les roches sédimentaires carbonatées : les calcaires construits : calcaires coralliens, algaires et à stromatolithes	88
43 Identifier les roches sédimentaires carbonatées : les calcaires bioclastiques - les calcaires oolithiques	90
44 Identifier les roches sédimentaires carbonatées : les calcaires bioclastiques à foraminifères benthiques	92
45 Identifier les roches sédimentaires carbonatées : les calcaires planctoniques ou pélagiques	94
46 Identifier les roches sédimentaires évaporitiques : le gypse - la halite - la sylvite	96

6 • Identifier les roches mantelliques et magmatiques

47	Composition minéralogique, chimique et gisements : les péridotites	98
48	Composition minéralogique, chimique et gisements : les basaltes	100
49	Composition minéralogique, chimique et gisements : les gabbros	102
50	Composition minéralogique, chimique et gisements : les andésites	104
51	Composition minéralogique, chimique et gisements : les granodiorites	106
52	Composition minéralogique, chimique et gisements : les trachytes	108
53	Composition minéralogique, chimique et gisements : les rhyolites	110
54	Composition minéralogique, chimique et gisements : les granites	112
55	Composition minéralogique, chimique et gisements : les syénites et les syénites néphéliniques	114
56	Composition minéralogique, chimique et gisements : les phonolites et les téphrites	116

7 • Identifier les roches métamorphiques

57	Composition minéralogique, chimique et gisements : les micaschistes	118
58	Composition minéralogique, chimique et gisements : les gneiss	120
59	Composition minéralogique, chimique et gisements : les migmatites ou anatexites	122
60	Composition minéralogique, chimique et gisements : les schistes verts	124
61	Composition minéralogique, chimique et gisements : les schistes bleus	126
62	Composition minéralogique, chimique et gisements : les éclogites	128
63	Composition minéralogique, chimique et gisements : les amphibolites	130
64	Composition minéralogique, chimique et gisements : les granulites - les marbres	132
65	Composition minéralogique, chimique et gisements : les cornéennes	134

8 • Reconstituer des processus pétrologiques

66	La lithification sédimentaire : diagenèse des sédiments détritiques	136
67	La lithification sédimentaire : diagenèse des sédiments carbonatés (1)	138
68	La lithification sédimentaire : diagenèse des sédiments carbonatés (2)	140
69	La cristallisation des magmas : textures particulières	142
70	La cristallisation des magmas : zonations et croissance des cristaux	144
71	La cristallisation des magmas : symplectites et réactions	146
72	La cristallisation des magmas : évolutions post-solidus : les exsolutions minérales	148
73	La cristallisation des magmas : séquence de cristallisation d'une roche basique	150
74	La cristallisation des magmas : séquence de cristallisation d'une roche acide	152
75	La différenciation des magmas : les roches de la croûte océanique	154
76	La différenciation des magmas : les laves du Mont Dore	156
77	Les transformations métamorphiques : réactions minéralogiques et cinématique	158
78	Les transformations métamorphiques : établissement d'un gradient métamorphique régional	160
79	Les transformations métamorphiques : établissement d'un chemin P, T, t	162

9 • Accéder aux mondes extraterrestres

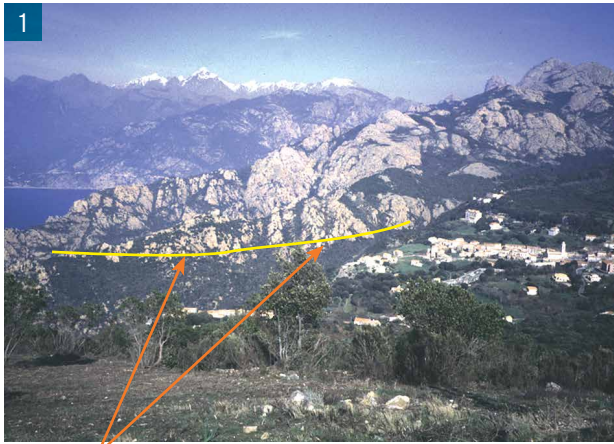
80	Identifier les roches extraterrestres : météorites primitives et différenciées	164
81	Identifier les roches extraterrestres : chondres et matrice des chondrites	166
82	Identifier les roches extraterrestres : inclusions réfractaires et grains présolaires	168
83	Connaître les corps extraterrestres : météorites et formation du système solaire	170
84	Connaître les corps extraterrestres : les roches de la Lune	172
85	Connaître les corps extraterrestres : Mars : nouvelle histoire minéralogique et pétrologique	174

10 • Exploiter les matériaux et comprendre la formation des gisements

86	Exploiter les matériaux : minéraux et pierres de construction	176
87	Exploiter les matériaux : chaux et ciment	178
88	Exploiter les matériaux : le béton hydraulique	180
89	Exploiter les matériaux : charbons et bitumes	182
90	Exploiter les matériaux : les principaux minerais	184
91	Comprendre la formation des gisements : processus liés à la géodynamique externe	186
92	Comprendre la formation des gisements : processus liés à la géodynamique interne	188

Index	190
-------	-----

Intrusion plutonique (Porto, Corse)



contact de l'intrusion granitique avec l'encaissant

Granite



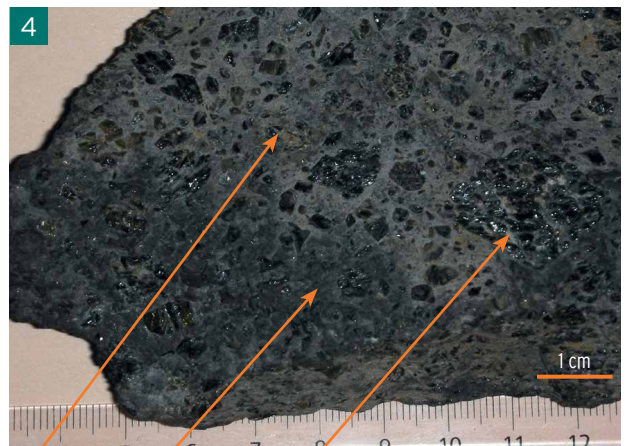
plagioclase quartz feldspath potassique

Coulées basaltiques (Ile de Madeire)



empilement de coulées prismées

Basalte porphyrique



olivine pâte noire pyroxène

Gneiss (Saint-Malo)



plis et foliation minérale
lits clairs (leucosome) quartzo-feldspathiques et lits sombres (mélanosome) riches en mica

Gneiss



Les roches à l'affleurement

L'étude de terrain permet le plus souvent de reconnaître le contexte général de la formation à laquelle appartient une roche donnée. On peut distinguer trois grands types de formation. Les **formations sédimentaires** sont généralement stratifiées et montrent des figures liées à la sédimentation ; elles renferment souvent des fossiles ou des traces de vie (les terriers). Les **formations magmatiques** (photos 1, 3) comprennent les formations de surface **d'origine volcanique** (photo 1) et les formations profondes **d'origine plutonique** (photo 3), affleurant grâce à l'érosion. Les premières comportent soit des roches massives et ternes (coulées de lave, dômes), soit des roches fragmentées de calibres variés (appareils volcaniques avec leurs **tephra**) qui sont parfois difficiles à séparer des formations sédimentaires ; les secondes sont constituées de roches massives, cristallines (cristaux bien visibles) et présentent des contacts intrusifs francs avec l'encaissant qui subit des transformations liées à la chaleur de l'intrusion. Les **formations métamorphiques** (photo 5) forment également de grands ensembles de roches cristallines qui présentent les marques de la déformation : plis, schistosité, foliation (fiche 8).

Caractères macroscopiques des roches

- **Roches sédimentaires.** La présence d'une stratification et/ou de fossiles est un indice déterminant. La présence de galets ou de cristaux issus d'une érosion mécanique caractérise certaines **roches détritiques** comme les conglomérats et les grès. Le test de dureté avec l'acier ou le verre met en évidence la présence de quartz. Si la roche est constituée d'éléments fins non identifiables à l'œil nu, il peut s'agir soit d'**argilites** ou de **pélites** (la roche « happe la langue » et peut se déliter en présence d'eau) soit de **roches carbonatées** (le test à l'acide chlorhydrique dilué est positif), voire de **marnes** (pélites carbonatées) qui présentent les deux propriétés.
 - **Roches plutoniques** (photo 2). Elles sont entièrement cristallisées. La reconnaissance des principaux minéraux est possible si le grain de la roche est supérieur au millimètre (usage conseillé de la loupe) :
 - 1) dans le cas où les **feldspaths** sont **dominants** (la roche est souvent claire mais attention, les feldspaths ont des teintes très variables suivant leur état d'altération et leurs micro-inclusions minérales), il s'agit d'une **roche felsique**, un **granitoïde** si le quartz est abondant et donc visible à l'œil nu (> 20 %) ;
 - 2) si les **feldspaths** sont associés à une quantité équivalente de **minéraux verts** comme l'olivine ou **noirs** comme le pyroxène, l'amphibole et la biotite, c'est une **roche mafique** de la famille des gabbros ;
 - 3) lorsqu'on ne voit pas de feldspath (< 10 %), la roche est souvent verte : l'olivine est vert clair, les pyroxènes magnésiens sont vert foncé (diopside, enstatite) ; il s'agit d'une **roche ultramafique** : **péridotite** ou **pyroxénite**. Le plus souvent, la **serpentinisation** de l'olivine donne une roche massive dense et très sombre.
 - **Roches volcaniques.** Elles sont **compactes**, contenant ou non des **phénocristaux** visibles à l'œil nu, dans une **pâte** plus ou moins claire suivant le rapport (feldspaths/minéraux mafiques) :
 - 1) une pâte noire et des phénocristaux d'olivine et de pyroxène caractérisent un **basalte** (photo 4) ;
 - 2) une pâte grise et des plagioclases relèvent d'une roche **intermédiaire** (andésite, trachy-andésite) ;
 - 3) une pâte gris-clair à blanche et des phénocristaux de feldspath alcalin voire de quartz caractérisent un **trachyte** et une **rhyolite** respectivement. Certaines sont entièrement vitreuses, ce sont des **obsidiennes**.

Si la roche est fragmentée, vacuolaire voire fibreuse, de densité très faible, il peut s'agir d'éléments **ponceux** provenant d'une coulée pyroclastique. Si les fragments sont sombres, arrondis ou de forme aérodynamique, on est en présence de **lapillis** basaltiques, de **scories** ou de **bombes** volcaniques selon l'aspect et la taille.
 - **Roches métamorphiques** (photo 6). Leur aspect feuilleté est dû à la **schistosité** (plans de moindre résistance) et à la **foliation minérale** (lits de minéraux différents). L'alternance de lits de quartz et de micas caractérise un **micaschiste** ; le feldspath s'y ajoute dans les **gneiss** et les **gneiss oeillés** ; la calcite est dominante dans les **marbres**. Les **amphibolites** sont très sombres ; les grenats rouge-marron sont dans un fond vert de pyroxène pour les **éclogites** ; l'aspect bleu-noir caractérise les **schistes bleus** ou **glaucophanites**.
- Cette approche doit être confirmée et affinée par une étude indispensable au **microscope polarisant**.

1 Clé de détermination simplifiée des principales roches sédimentaires

roches stratifiées ;
fossiles éventuels :
roches sédimentaires

effervescence à l'acide
chlorhydrique dilué :
roches carbonatées

dureté > ongle en général ; roches
cohérentes : **calcaires**

dureté < ongle ; roches friables,
faisant pâte avec l'eau : **marnes**

dureté < ongle ; débit en feuillets ;
happent la langue : **argilites**

dureté < verre ; roches solubles :
roches salines

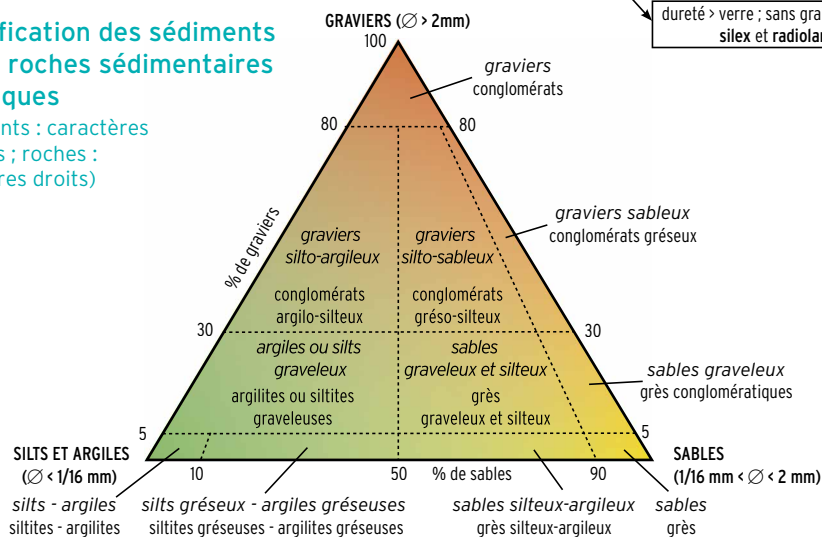
dureté > verre ; éléments cimentés :
conglomérats et grès

dureté > verre ; sans grain apparent :
silex et radiolarites

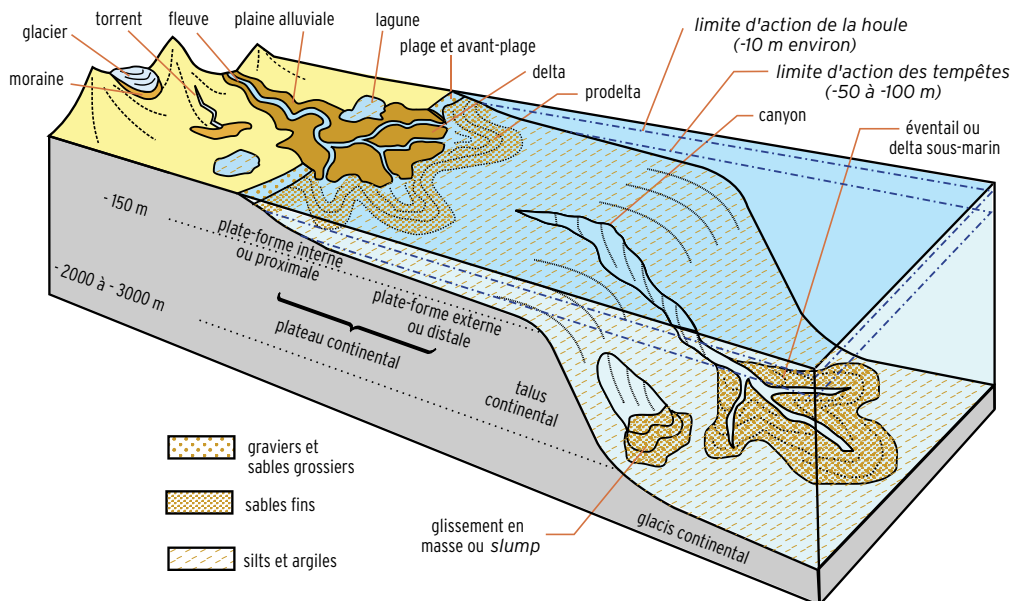
pas d'effervescence
à l'acide chlorhydrique dilué

2 Classification des sédiments et des roches sédimentaires détritiques

(sédiments : caractères
italiques ; roches :
caractères droits)



3 Principaux environnements de la sédimentation détritique ou terrigène



Caractères généraux

Les roches sédimentaires se forment à la surface de la Terre ; toujours d'**origine secondaire**, elles proviennent de l'altération de roches préexistantes, magmatiques, métamorphiques ou déjà sédimentaires. Les roches sédimentaires sont en général **litées** ou **stratifiées**, la puissance des couches variant de l'échelle millimétrique à l'échelle décimétrique. La stratification s'observe le plus souvent au niveau de l'affleurement et, parfois, à l'échelle de l'échantillon. Les roches sédimentaires peuvent contenir des **fossiles** (coquilles, restes de plantes, tests d'organismes planctoniques, empreintes de terriers, traces de pas...). Ces deux critères associés constituent un élément certain d'identification des roches sédimentaires. Celles-ci sont classées en fonction de l'origine de leurs constituants ou de la nature de ceux-ci.

Classification génétique des roches sédimentaires

L'origine des constituants permet de distinguer :

- les **roches détritiques** ou **terrigenes** formées à partir des particules issues de l'altération des reliefs ;
- les **roches biochimiques** dont la formation fait intervenir l'action des êtres vivants, de manière directe lorsqu'ils prélèvent dans le milieu des solutés minéraux pour édifier leur squelette (coquilles, tests, polypiers...), ou indirecte lorsque leur activité métabolique conduit à la précipitation de solutés minéraux (précipitation de la calcite en lien avec la photosynthèse par exemple) ;
- les **roches d'origine chimique** obtenues par précipitation purement chimique de solutés, sous l'effet de l'évaporation de l'eau de mer par exemple.

Classification chimique des roches sédimentaires

Elle se fonde sur la nature des constituants principaux avec, pour classes principales :

- les roches **carbonatées**, contenant du carbonate de calcium CaCO_3 (cristallisant sous forme de calcite ou d'aragonite) ou du carbonate de calcium et de magnésium $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (sous forme de dolomite) ;
- les roches **siliceuses**, constituées essentiellement de silice SiO_2 à l'état de quartz ou de produits finement cristallisés (opale...) ;
- les roches **salines**, comprenant notamment des chlorures et des sulfates.

Analyse d'une roche sédimentaire

Elle vise à retrouver grâce à l'examen attentif de la roche, à l'œil nu, à la loupe ou au microscope, et au moyen de quelques tests simples (réaction ou non à l'acide chlorhydrique dilué, dureté par rapport au verre, au clou ou à l'ongle, comportement à l'eau... – voir [figure 1](#)) :

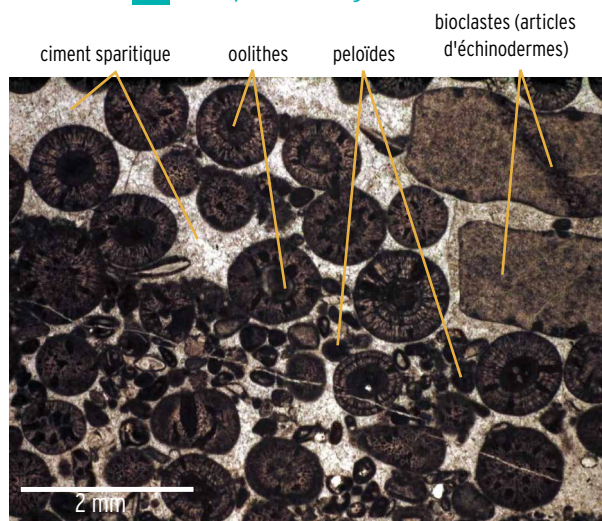
- la composition chimique de la roche ;
- les caractères de ses constituants (taille et forme des grains, nature des fossiles...) et de leur ciment ;
- son origine probable et les modalités de sa genèse (milieu et conditions dans lesquelles le dépôt s'est effectué : marin ou continental, peu profond ou profond, agité ou non, chaud ou tempéré, etc.).

Les deux premiers points doivent amener à nommer précisément la roche.

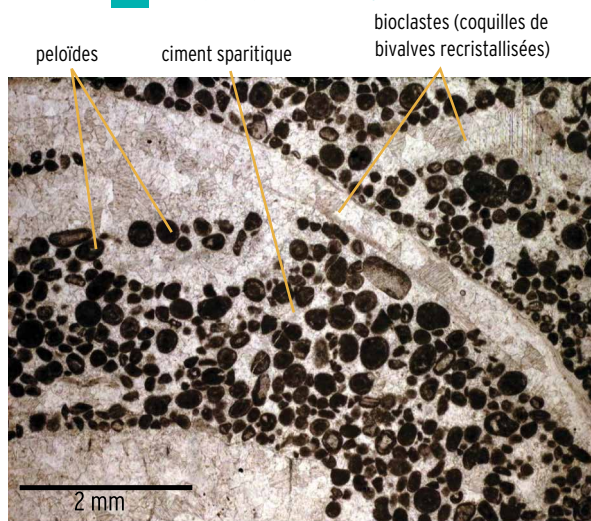
Classification des roches détritiques

Ce sont les roches sédimentaires les plus abondantes. Elles contiennent très souvent du quartz, minéral très résistant à l'altération, mais pas exclusivement (des fragments calcaires y sont assez fréquents). Elles sont classées selon la taille ou **granulométrie** des éléments figurés qui les constituent ([figure 2](#)). Y sont distingués les **sédiments** qui ne sont pas à proprement parler des roches car non consolidés, et les **roches** issues de leur cimentation. La [figure 3](#) illustre les principaux environnements où se rencontrent les formations détritiques.

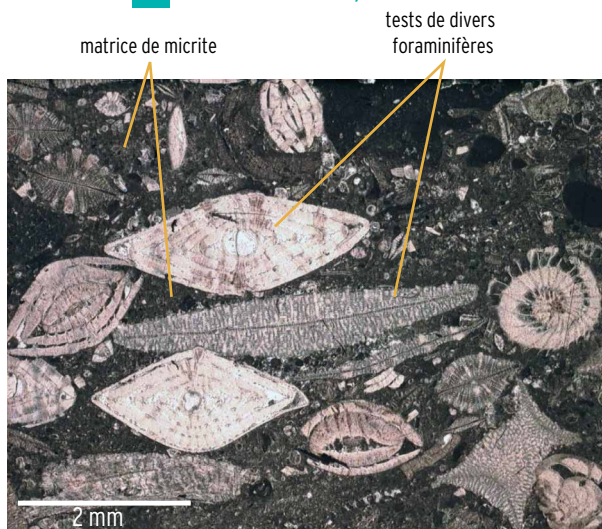
1 Oosparite ou grainstone



2 Biopelsparite ou grainstone



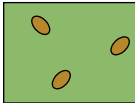
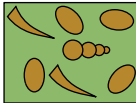
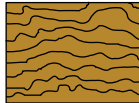
3 Biomicrite ou packstone



4 Classification simplifiée des calcaires selon Folk

éléments figurés	bioclastes	oolithes	peloïdes
matrice micritique	biomicrite	oomicrite	pelmicrite
ciment sparitique	biosparite	oosparite	pelsparite
construction	biolithite		

5 Classification simplifiée des calcaires selon Dunham et correspondance avec la classification de Folk

éléments figurés ou "grains" non liés entre eux au moment du dépôt				composants initiaux soudés entre eux dès leur formation (calcaires construits)
présence de boue carbonatée		absence de boue carbonatée		
éléments figurés non jointifs		éléments figurés jointifs		
moins de 10% d'éléments figurés <i>mudstone</i>	plus de 10% d'éléments figurés <i>wackestone</i>	<i>packstone</i>	 ciment de sparite <i>grainstone</i>	
			 <i>boundstone</i>	
micrite	biomicrite		biosparite	biolithite