

Voyage d'un grain de Sable

Patrick De Wever & Francis Duranthon



Voyage d'un grain de Sable

Patrick De Wever & Francis Duranthon



Dans la même collection :

La valse des continents, P. De Wever et F. Duranthon, 2015, ISBN : 978-2-7598-1182-3.

L'eau de la vie, P. De Wever, 2015, ISBN : 978-2-7598-1189-2.

COLLECTION « LA TERRE À PORTÉE DE MAIN » DIRIGÉE PAR PATRICK DE WEVER

Cette collection, dont les textes sont ponctués d'anecdotes, de petites questions et richement illustrés, est destinée à un très large public. Elle a pour vocation de présenter et de donner des notions très abordables en géologie sur les phénomènes et constituants de notre planète.

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-1183-0

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2015

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes celles et tous ceux qui les ont aidés à l'élaboration de cet ouvrage : François Baudin, Marie-Madeleine Blanc-Valleron, Patrick Cabrol, Laurent Carpentier, Dominique Chabard, Berangère Clavé-Papion, Michel Colombe, Annie Cornée, Claire Dramas, Marie-Claire Fontebasso, Brigitte Gonzalez, Laurence Le Callonec, Jean-Claude Plaziat, Jean-Yves Reynaud, Jean-Marie Rouchy, Alain Trentesaux, et en particulier Jean-Claude Daniel, président du musée du Sable pour toutes les photos de sables.

Nous avons bénéficié de la relecture de François Baudin et de Dominique Carpentier

Les dessins sont l'œuvre d'Alexandre Lethiers aussi efficace que compétent.



Sommaire

Introduction : Voyage d'un grain de sable	7
1 Origine du sable	11
D'où vient le sable ?	11
Comment se dégradent les roches ?	15
Comment définir le sable ?	17
De quoi sont constitués les sables ?	19
Est-ce que tous les minéraux se retrouvent dans le sable ?	21
Qu'appelle-t-on l'altération ?	22
L'échelle de dureté des minéraux	24
Qu'est-ce que le quartz ?	25
N'y a-t-il que des minéraux dans le sable ?	27
De quand date le plus ancien sable qui se soit répandu à la surface de la Terre ?	28
2 Transport et sédimentation du sable	29
La sédimentologie du sable	29
Le transport par l'eau	29
<i>Les glaciers</i>	29
<i>Ruisseaux, fleuves et rivières</i>	31
<i>Mer et océans</i>	32
<i>Les dunes hydrauliques</i>	32
Le transport par le vent	35
<i>Tempêtes de sable</i>	35
<i>Les dunes littorales</i>	38
<i>Les dunes du désert</i>	40
<i>Morphologie des dunes</i>	41
Le granoclassement	45
3 Les usages du sable	46
Le sable des constructions	46
Le sable du verre	47
Le sable des filtres	50
Autres usages	52

4	Le Quartz et l'Homme	53
	La montre à quartz.....	53
	Production de feu.....	53
	Le quartz dans les légendes traditionnelles	54
	Quartz modifié - mysticisme	56
	Croyance sur l'absorption des « ondes néfastes »	56
	Le quartz et les technologies de pointe.....	57
5	Le sable réservoir	59
	La porosité.....	59
	Sables bitumineux.....	60
	Sables aquifères.....	61
6	La physique du sable	64
	Pente d'équilibre	64
	Sable contre éponge	65
	Un « grain » de place !	67
	Effet de voûte	67
	Sable dur comme du béton	68
	La ségrégation des grains.....	69
	La liquéfaction des sols sableux.....	71
	Sable mouvant	74
7	La vie dans le sable	76
	Dans le sable de nos plages	76
	Dans le sable des déserts	78
	Marcher sur le sable	80
	Nager dans le sable	81
	Le sable, dangereux pour la santé ?	81
8	Le sable demain	83
	Va-t-on manquer de sable ?	83
9	Proverbes, dictons et citations	85
	Glossaire	89
	Bibliographie sommaire	91
	Index	92
	Livres des mêmes auteurs	94



Éon	Ère	Système	Série	Étage	GSSP	Âge (Ma)	
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire	Holocène	Supérieur	🚩	présent	
				Moyen		0.126	
				Inférieur		0.781	
			Pléistocène	Calabrien		1.806	
				Gélasien		2.588	
		Néogène	Pliocène	Plaisancien		3.600	
				Zancéen		5.333	
			Miocène	Messinien		7.246	
				Tortonien		11.62	
		Paléogène	Oligocène	Serravallien		13.82	
	Langhien				15.97		
	Burdigalien				20.44		
	Aquitainien				23.03		
	Chattien				28.1		
	Éocène		Rupélien		33.9		
			Priabonien		38.0		
			Bartonien		41.3		
			Lutétien		47.8		
	Paléocène		Yprésien		56.0		
					59.2		
			Thanétien		59.2		
					61.6		
			Sélandien		61.6		
					66.0		
			Crétacé	Supérieur	Danien		66.0
					Maastrichtien		72.1 ± 0.2
					Campanien		83.6 ± 0.2
					Santonien		86.3 ± 0.5
	Coniacien				89.8 ± 0.3		
Inférieur	Turonien			93.9			
	Cénomannien			100.5			
	Albien			~ 113.0			
	Aptien			~ 125.0			
	Barrémien			~ 129.4			
Mésozoïque	Jurassique	Hauteriviennien		~ 132.9			
		Valanginien		~ 139.8			
		Barroisien		~ 145.0			
		Viséen		~ 129.4			
		Fortunien		~ 132.9			
	Trias	Fortunien		~ 132.9			
		Werra		~ 132.9			
		Werra		~ 132.9			
		Werra		~ 132.9			
		Werra		~ 132.9			

Éon	Ère	Système	Série	Étage	GSSP	Âge (Ma)
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire		Tithonien		152.1 ± 0.9
				Kimméridgien		157.3 ± 1.0
			Supérieur	Oxfordien		163.5 ± 1.0
				Callovien		166.1 ± 1.2
			Moyen	Bathonien		168.3 ± 1.3
		Bajocien			170.3 ± 1.4	
		Inférieur	Aalénien		174.1 ± 1.0	
			Toarcién		182.7 ± 0.7	
			Pliensbachien		190.8 ± 1.0	
			Sinemurien		199.3 ± 0.3	
	Paléozoïque	Trias	Supérieur	Hettangien		201.3 ± 0.2
				Rhétien		~ 208.5
			Moyen	Norien		~ 228
				Carnien		~ 235
				Ladinien		~ 242
		Inférieur	Anisien		247.2	
			Olénékien		251.2	
		Permien	Lopingien	Induen		252.2 ± 0.5
				Changhsingien		254.2 ± 0.1
			Wuchiapingien		259.9 ± 0.4	
					265.1 ± 0.4	
			Capitanien		268.8 ± 0.5	
					272.3 ± 0.5	
			Kungurien		279.3 ± 0.6	
					290.1 ± 0.1	
			Artinskien		295.5 ± 0.4	
					298.9 ± 0.2	
			Sakmarien		303.7 ± 0.1	
					307.0 ± 0.1	
Assélien			315.2 ± 0.2			
			323.2 ± 0.4			
Kasimovien		330.9 ± 0.2				
		346.7 ± 0.4				
Moscovien		358.9 ± 0.4				

Éon	Ère	Système	Série	Étage	GSSP	Âge (Ma)	
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire		Famennien		372.2 ± 1.6	
				Frasnien		382.7 ± 1.6	
			Supérieur	Givétien		387.7 ± 0.8	
				Eifélien		393.3 ± 1.2	
			Moyen	Emsien		407.6 ± 2.6	
		Praguien			410.8 ± 2.8		
		Lochkovien			419.2 ± 3.2		
		Pridoli			423.0 ± 2.3		
		Paléozoïque	Silurien	Ludlow	Ludfordien		425.6 ± 0.9
					Gorstien		427.4 ± 0.5
	Wenlock			Homérien		430.5 ± 0.7	
				Sheinwoodien		433.4 ± 0.8	
	Llandovery			Télychien		438.5 ± 1.1	
			Aéronien		440.8 ± 1.2		
	Rhuddanien			443.4 ± 1.5			
			Hirnantien		445.2 ± 1.4		
	Supérieur		Katien		453.0 ± 0.7		
			Sandbien		458.4 ± 0.9		
			Darriwilien		467.3 ± 1.1		
			Dapingien		470.0 ± 1.4		
	Moyen		Flouien		477.7 ± 1.4		
			Trémadocien		485.4 ± 1.9		
	Inférieur				~ 489.5		
					~ 494		
	Furongien		Jiangshanian		~ 497		
			Paibien		~ 500.5		
	Séries 3		Guzhangien		~ 504.5		
		Drumien		~ 509			
	Séries 2	Étage 5		~ 509			
Étage 4			~ 514				
Cambrien	Étage 3		~ 521				
	Étage 2		~ 529				
Terreneuvien	Fortunien		541.0 ± 1.0				

Éon	Ère	Système	GSSP/GSSA	Âge (Ma)
Pré-cambrien	Néo-protéozoïque	Ediacarien	🚩	~ 541
		Cryogénien		~ 635
		Tonien		850
		Sténien		1000
		Ectasien		1200
	Mésoprotozoïque	Calymmien		1400
		Stathérien		1600
		Orosirien		1800
		Rhyacien		2050
		Siderien		2300
	Paléo-protéozoïque	Néo-archéen		2500
		Mésoprotozoïque		2800
		Mésoprotozoïque		3200
		Paléo-archéen		3600
		Éocambrien		4000
		Hadéen		~ 4600

La définition de la limite inférieure de chaque unité formelle par un point précis dans la coupe d'un stratotype de limite global (GSSP-Global Boundary Stratotype Section and Point) est actuellement en cours, y compris celle des unités de l'Archéen et du Protérozoïque, auparavant définie par des âges absolus (GSSA-Global Standard Stratigraphic Ages).

Les chartes et des informations plus détaillées sur les GSSP sont disponibles sur le site web de l'International Commission on Stratigraphy (ICS) www.stratigraphy.org.

Les âges numériques sont sujets à révision et ne définissent pas les unités du Phanérozoïque et de l'Édiacarien; seuls les GSSP le font. Pour les limites du Phanérozoïque qui n'ont pas de GSSP ratifiés ou des âges numériques calibrés, un âge numérique approximatif (±) est indiqué.

Les âges numériques de tous les systèmes à l'exception du Trias, Crétacé et Pré-cambrien sont tirés du livre "A Geologic Time Scale 2012" par Gradstein et al. (2012); ceux du Trias et du Crétacé ont été définis par les sous-commissions de l'ICS.



Les couleurs suivent l'usage de la Commission de la Carte Géologique du Monde (CCGM).
<http://www.ccgw.org>

Mai 2012 © International Commission on Stratigraphy

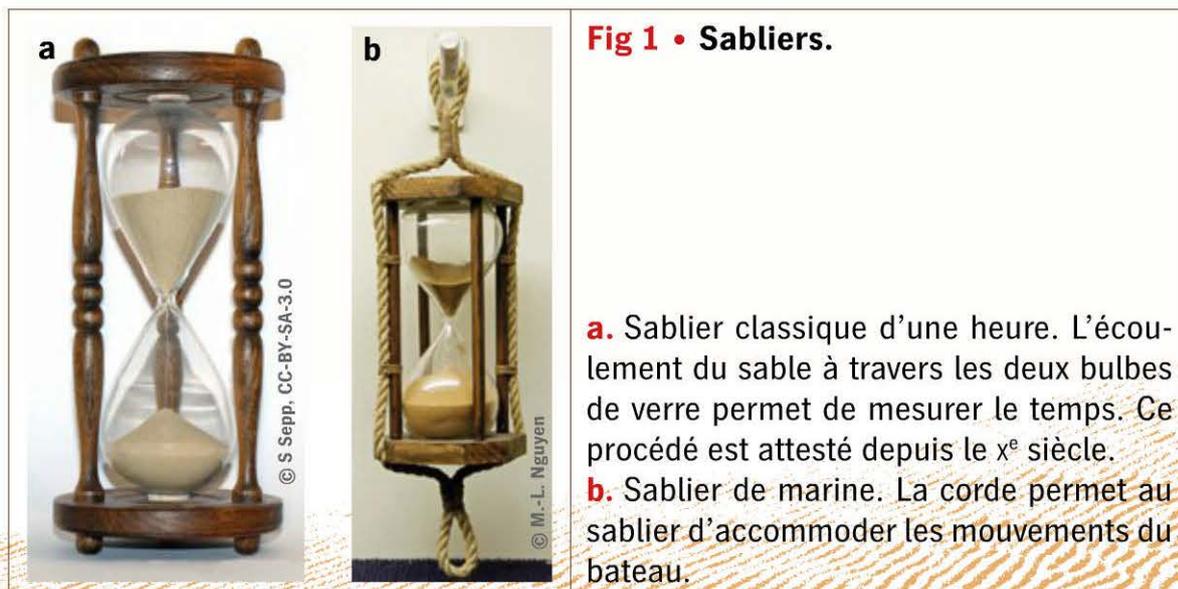
Conception & dessin : K.M. Cohen, S. Finney, P.L. Gibbard

Introduction :

le voyage d'un grain de sable

Parler du sable évoque immédiatement des images : une plage en été avec les baigneurs, ou une plage immense bordée de cocotiers, les dunes dans le désert, des pâtés de sable dans un jardin public, sans oublier le sablier qui marque le temps qui passe (*Fig. 1*)...

Le sable est aussi riche d'émotion que de dictons. Il est familier et pourtant généralement bien mal connu. En fait, un seul nom regroupe des compositions, des propriétés physiques et chimiques multiples. Le sable est un mélange de roches, peu favorable à la vie apparemment, et pourtant un milieu riche de vie. Il est tellement varié que les géologues ont utilisé ces sédiments pour trouver une composition moyenne de la croûte terrestre. Et pourtant une même baie peut receler des sables très différents, comme celle du Mont-Saint-Michel. Après l'air et l'eau, le sable est la troisième ressource la plus exploitée sur Terre, ce qui en souligne l'importance et justifie la question de la dernière partie. Mais « être sable » ne représente qu'un état transitoire, plus ou moins long, dans l'histoire de la vie d'une roche... Résumons l'histoire d'un grain de sable...



Quelque part, au sommet d'une montagne africaine, le gel fait éclater une roche. Des particules de matière sont libérées, formant des grains plus ou moins gros. S'ils ne restent pas coincés dans une faille ou dans la

fissure d'un rocher où ils peuvent attendre des décennies avant d'être à nouveau libérés, ils entreprennent lentement la descente, sous l'effet de la gravité. C'est le début du voyage, un très long périple qui va peut-être durer des décennies, des siècles, voire des milliers ou des millions d'années et durant lequel des milliers de kilomètres pourront être parcourus. De longues périodes d'attente suivies d'accélération et déplacement intenses, ce voyage est une épreuve et une école de patience. Et comme tout départ, celui-ci n'est pas forcément facile... Nos grains cherchent leur voie. Chacun aura la sienne. Ralentis tout au long de leur descente par de gros blocs de rochers, qui les contraignent au contournement, freinés par moment par une rare végétation, coincés sous une pierre au milieu du périple, ils peuvent aussi profiter d'un orage pour s'embarquer comme passager clandestin des ruissellements, rebondissant sur la pente, roulant sur le fond au gré des écoulements pour atteindre enfin un ruisseau.

C'est là que débute véritablement l'aventure. Pour ce premier voyage, l'épreuve est difficile. Projetés contre des rochers, malmenés par les rapides du ruisseau devenu torrent de montagne, retournés, roulés sans trêve ni repos, voici que l'un d'entre eux trouve enfin un instant de quiétude entre les racines d'un arbre avec quelques-uns de ses congénères... Mais la pause est de courte durée. Voici notre grain de sable repris par la montée furieuse des eaux qui arrive avec la fonte des neiges. Arraché à son havre de paix, il repart, entouré de centaines, de milliers de ses frères. Poussé, bousculé, il se fracasse contre les rochers, se casse, perd de la matière. Ce combat titanesque au milieu des flots impétueux laisse des traces qui se marquent par des arêtes vives, tranchantes. Mais la fin du premier voyage arrive. Voici la rivière, aux eaux plus calmes.

Ce second voyage est plus paisible, même s'il a encore de nombreux obstacles à franchir. Il pause un moment au fond d'un lac de barrage avant qu'une opération de vidange ne lui rende sa liberté. Le morceau de pierre brute qu'il était autrefois se transforme lentement. Il est doucement roulé sur le fond, ses arêtes s'émoussent, son profil s'arrondit (*Fig. 2*). Il séjourne quelques dizaines d'années au creux d'un méandre avant de repartir. D'un méandre à l'autre, il se déplace, descend vers l'aval. S'il a perdu assez de matière, s'il est devenu suffisamment fin, voilà même qu'il entre en suspension, qu'il flotte en quelque sorte entre deux eaux, parcourant les kilomètres. Devenu lisse et brillant, il n'hésite pas à s'arrêter au creux des racines d'un arbre, en compagnie de quelques-uns de ses compagnons de voyage parfois nés au sommet d'autres vallées, amenés là par d'autres chemins d'eau. Puis il repart, s'arrête à nouveau, repart. Il arrive enfin à l'embouchure et découvre la mer. Il est là, avec des centaines de millions d'autres grains de sable.

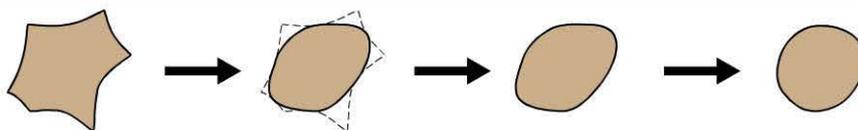


Fig 2 • Modification de forme.

Les grains anguleux au début de leur voyage (dans les rivières) deviennent progressivement arrondis (sable de plage).

Les vagues du rivage les empoignent, les brassent les uns contre les autres, les malaxent doucement leur faisant bien vite perdre leur éclat. Les plus fins d'entre eux sont poussés loin vers l'extrémité de la vague. Les autres sont triés, ordonnés, baladés, étalés par les courants marins qui les déposent sur le fond de l'océan. Des milliers d'années s'écoulent. Ils sont comprimés les uns contre les autres, entourant parfois des restes d'animaux. L'eau qui circule encore entre eux dépose quelques-uns de ses minéraux en solution, solidifiant l'ensemble, formant une nouvelle roche que les géologues nomment un grès. Notre grain est à l'étroit, emprisonné entre ses congénères dans un bloc de grès. Il ne peut plus bouger. Est-ce la fin du voyage ? Pour certains oui. Pour lui non. Quelques millions d'années plus tard, la mer se retire, mettant cette nouvelle roche à nu. Voici que les hommes arrivent pour l'exploiter. Il va être transporté jusqu'au chantier. Taillée, débitée en énormes blocs, cette roche va leur servir à construire des monuments pour honorer leurs dirigeants défunts. Voici le bloc intégré à une pyramide (*Fig. 3*) quelque part en Égypte.



Fig 3 • Pyramide de grès.

Les pyramides du plateau de Dahchour, près du Caire ont été édifiées entre 2450 et 2670 avant J.-C. Elles sont formées d'un assemblage de blocs de grès à ciment calcaire.

Voyage d'un grain de sable

La roche aussi va être soumise à la pluie, aux écarts de températures, au vent... et enfin, libérer à nouveau notre grain de sable. Emporté par le vent qui le pousse, le voici parcourant le désert saharien, formant parfois des dunes avant de repartir. Ce troisième voyage éolien laisse des traces spécifiques. Notre grain devient de plus en plus rond, opaque, dépoli. Il erre sur ces vastes espaces sans obstacles où rien ne l'arrête. Emporté par un alizé, le voici qui survole l'océan Atlantique avant de pénétrer au cœur de la forêt amazonienne à la faveur d'une pluie tropicale qui le précipite à nouveau au sol. Il rejoint la rivière, regagne l'océan, y participe à nouveau à la formation d'un nouveau grès. Enfoui profondément, ce grès va se transformer pour former une autre roche, la quartzite (*Fig. 4*). Comprimé, compressé, notre grain de sable a changé. Le voici redevenu constituant d'une roche...

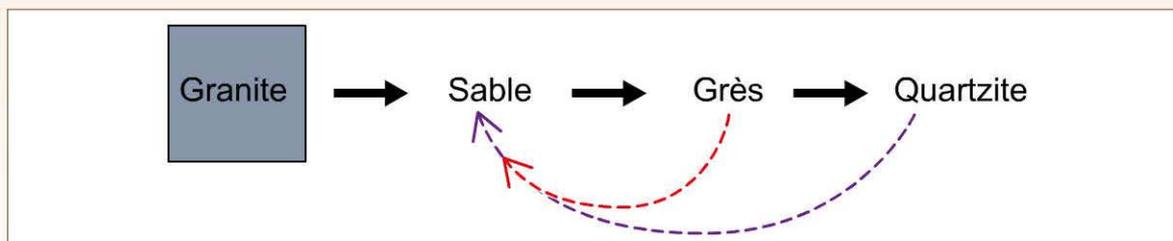


Fig 4 • Itinéraire d'un grain.

Le granite s'altère et libère des grains de sable. Le sable s'indure parfois et donne un grès. Encore plus cimenté, cristallisé, ce grès devient un quartzite. Mais à chaque étape, il se peut que la roche s'altère, s'érode et redonne un sable.

1 Origine du sable

D'où vient le sable ?

Le sable est le produit de la dégradation des roches. Classiquement, les géologues distinguent trois grands types de roches.

Les premières sont qualifiées de **roches magmatiques**.



Fig 5 • Piton magmatique.

Cette roche en pain de sucre qui émerge en bordure de cette route du Mozambique est un piton de granite, une roche magmatique intrusive.

Elles constituent la majeure partie des roches continentales et océaniques. Elles se forment lors du refroidissement d'un magma, d'une lave. Elles se décomposent en deux grands ensembles : les roches **plutoniques**, qui refroidissent lentement sous la surface (*Fig. 5*), à des profondeurs plus ou moins importantes, et les roches **volcaniques** qui refroidissent très rapidement en surface lors d'une éruption, au contact de l'atmosphère ou de l'eau. Plus leur vitesse de refroidissement est lente, plus les grains qui la composent sont gros. Granites et basaltes sont les roches les plus courantes de cette catégorie.

GRANITE ET GRANIT

On rencontre les deux orthographe. Le granite (avec e) est un terme de géologue. Il est défini par une texture grenue (avec des grains) et une composition minéralogique précise (quartz + feldspaths + micas).

Le granit (sans e) est un terme de marbrier. Il définit toute roche, quelle que soit sa composition, qui une fois polie montre des grains. Ce peut être un granite, mais aussi un calcaire, un grès.

De la même façon, le **marbre** des géologues est un calcaire (carbonate de calcium) métamorphique, alors que le marbre du marbrier correspond à toute roche qui, une fois polie, ne montre pas de grain.

Dans les cas de refroidissements particulièrement rapides, les grains n'ont pas le temps de se former et on obtient des verres naturels, comme l'obsidienne par exemple (*Fig. 6*).



Fig 6 • Coupe-papier en obsidienne.

Une lave refroidie très vite donne un verre appelé obsidienne. Ce coupe-papier mexicain, semi-translucide laisse apercevoir quelques niveaux plus sombres d'impuretés : de tous petits minéraux regroupés en fins lits.

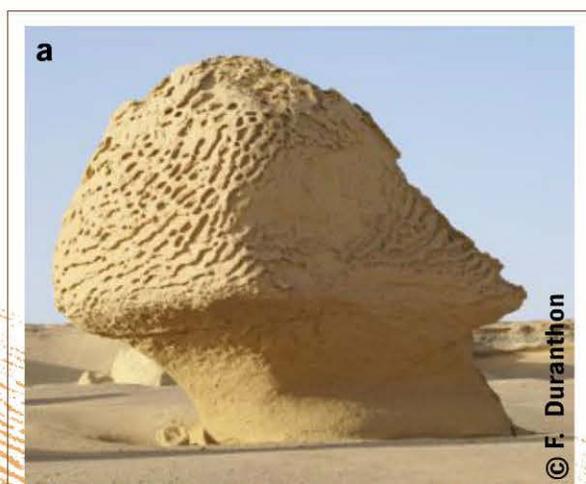


Fig 7 • Blocs de grès.

a. Un « champignon » de grès dans le désert libyque, la forme résulte ici de l'altération éolienne.

La deuxième catégorie est constituée par les roches dites **sédimentaires**. Elles se forment par l'accumulation de couches de matériaux à la surface de la terre ou dans les océans. Ces matériaux, appelés aussi sédiments, proviennent en fait de la dégradation des autres types de roches. Le grès ou le calcaire font partie de cet ensemble.

Le grès (*Fig. 7*), roche sédimentaire détritique, résulte de l'accumulation de grains de sable

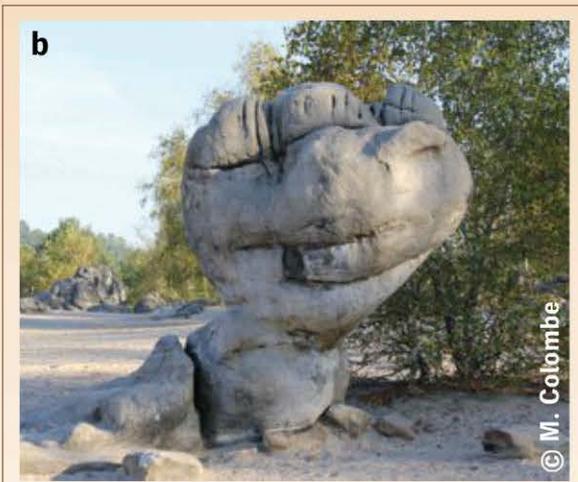


Fig 7 • Blocs de grès.

b. Une concrétion de grès en forêt de Fontainebleau, appelée « gogotte ». La forme résulte de la cimentation.

(généralement du quartz). La circulation de fluides soude parfois ces grains. Le sable devient alors un grès. Selon la qualité de la cimentation, le grès est plus ou moins dur. Quand le grès est pur, il est blanc. Selon le type et la quantité de pigments inclus (oxyde de fer...), il prend une couleur jaunâtre, rouille...

LES GRÈS : PIF, PAF, POUF

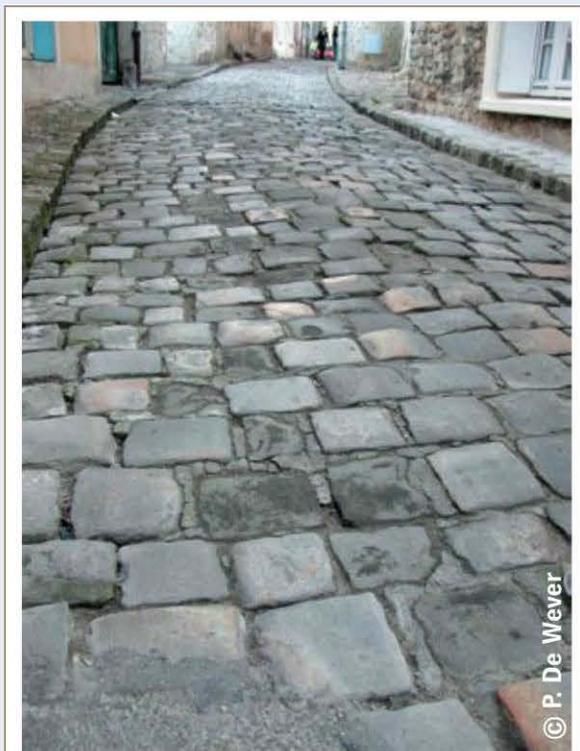


Fig 8 • Pavage de rue en grès.

Dans les rues d'Étampes, le grès de Fontainebleau a été utilisé. Selon la qualité du grès, la roche est plus ou moins perméable et donc plus ou moins humide. Les roches humides, parce que moins bien cimentées sont plus vite endommagées que les autres.

Le sable insaisissable (sous forme de poudre) est devenu un grès solide. Selon la qualité de la cimentation, le grès est plus ou moins dur, et plus ou moins imperméable.

Les carriers définissent la qualité d'un grès par le son que produit le marteau sur la roche. Un grès « PIF » (son aigu) est de bonne qualité, bien cimenté et idéal pour l'utilisation. Un grès « POUF » (son creux, évoquant l'effondrement du matériau sous le marteau) n'est pas assez cimenté, il est poreux et perméable. Il présente de grands risques de se fissurer au cours du temps et, friable, de rapidement s'éroder. Ce type de grès n'est pas utilisé. Un grès « PAF », intermédiaire, présente quelques risques de fissures bien qu'il soit de meilleure qualité qu'un grès « POUF ». Sa très légère porosité a tendance à retenir l'eau. Il apparaît souvent humide alors que les grès « PIF » sont secs.

La troisième catégorie est celle des roches **métamorphiques** (Fig. 9). Elles résultent de la transformation par la chaleur et/ou la pression des deux catégories de roches précédentes. Des phénomènes de recristallisation donnent alors naissance à d'autres types de roches. Ainsi, parmi les roches sédimentaires, un calcaire se métamorphose en marbre, un grès en quartzite, tandis que chez les roches magmatiques, un basalte se transforme en amphibolite et un granite en gneiss. La nature de la roche initiale influe donc sur la composition du sable.



Fig 9 • Roche métamorphique de la montagne Noire (Gorges d'Héric).
On comprend son appellation de gneiss œillé à cause de ses yeux de feldspath (en clair sur l'image).

LA MEULIÈRE

La meulière (Fig. 10) est une roche de couleur beige à rouille, plus ou moins caverneuse, formée entièrement de silice (SiO_2). C'est une roche secondaire, c'est-à-dire qui s'est formée aux dépens d'une formation pré-existante. La meulière résulte en général de la silicification d'un calcaire lacustre. Elle tire son nom des meules qui étaient taillées dans ce type de formation pour les moulins. Elle était utilisée pour les meules car elle ne laisse pas s'échapper de grains à l'usure, à la différence du grès. Elle est un excellent matériau de construction car elle est à la fois extrêmement solide, insensible à l'altération de l'eau de pluie, imperméable et poreuse. Elle constitue de ce fait un isolant phonique et thermique. >



Fig 10 • Meulière utilisée dans la construction, sud de la région parisienne (Soisy-sur-Seine).

La structure est caverneuse et les pores de la roche sont isolés les uns des autres.

Comment se dégradent les roches ?

Dès qu'une roche est présente à la surface du globe, elle est l'objet d'une désagrégation, d'une fragmentation reposant à la fois sur des processus chimiques (connus sous le nom d'altération) et physiques regroupés par les géologues sous le terme d'érosion. Soumise à l'action du vent, du gel, à l'alternance journalière du chaud et du froid, de la pluie, voire du choc répété des vagues, les roches se disloquent, se fissurent, se cassent, se fragmentent en rochers anguleux, aux arêtes vives et tranchantes. L'eau joue un rôle essentiel dans ces mécanismes. Elle se caractérise par deux grandes propriétés. Tout d'abord, l'eau est un solvant. Pour s'en persuader, il suffit par exemple de mettre une pincée de sel dans un verre d'eau. Le sel est un minéral (l'halite). Il va très rapidement se dissoudre dans l'eau, disparaissant complètement. Mais le sel n'est pas le seul minéral à se dissoudre ainsi. La composition chimique des eaux minérales que nous achetons dans le commerce en témoigne. Les étiquettes (*Fig. 11*) nous donnent leur teneur en calcium, sodium magnésium, sulfates, nitrates...

Eau Minérale Naturelle Gazéifiée
Source Bron Montfras

Autorisée par le Ministère de la Santé le 28/04/05.
 Toelating door het Ministerie van Volksgezondheid sinds 28/04/05.

Minéralisation caractéristique

Calcium	Ca ²⁺	96,00 mg/l
Magnésium	Mg ²⁺	6,10 mg/l
Sodium	Na ⁺	10,60 mg/l
Potassium	K ⁺	3,70 mg/l
Bicarbonate	HCO ₃ ⁻	297 mg/l
Sulfate	SO ₄ ²⁻	9,30 mg/l
Nitrate	NO ₃ ⁻	<2 mg/l
Chlorure	Cl ⁻	22,60 mg/l

Résidus secs à 180°C = 349 mg/l
 Droogresten op 180°C = 349 mg/l

Fig 11 • Étiquette d'une bouteille d'eau. La composition chimique est détaillée.

Tous ces éléments chimiques en solution dans l'eau proviennent des roches à travers lesquelles l'eau a circulé et des minéraux qu'elle a dissous. Ainsi, par sa capacité à mettre en solution, l'eau modifie les propriétés physico-chimiques des constituants des roches et donc celles des roches elles-mêmes. Certes son pouvoir varie en fonction de sa température, de son acidité, du climat, de la nature des roches, de leur degré de fracturation. Mais d'une manière générale, elle les rend moins cohérentes, ce qui facilite leur désagrégation. C'est le processus d'altération (*Fig. 12 et 13*). Cependant, son rôle ne se limite pas à cela. L'eau est aussi un fluide visqueux. Par sa capacité de transport, elle déplace,

à l'état solide (glaciers) ou liquide (fleuves, rivières, courants marins) sur des distances considérables, des blocs parfois volumineux qui s'entrechoquent, se cassent...

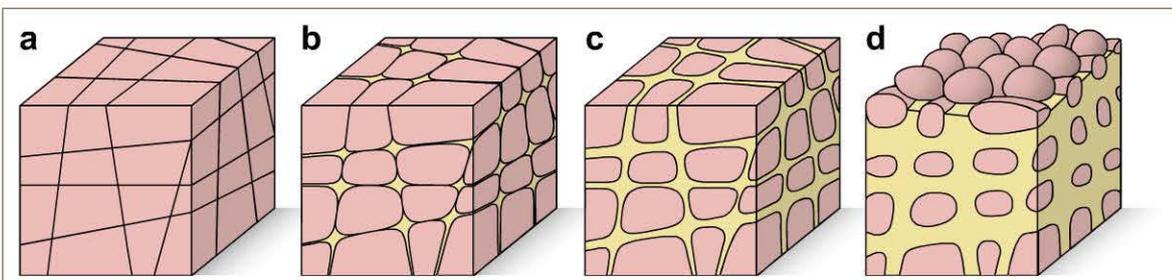


Fig 12 • Altération d'un massif de granite.

De simples fractures (a) permettent à l'eau de circuler et d'altérer tout doucement la roche (b et c). Seuls subsistent les grains de quartz (en jaune). Les arrêtes des blocs s'émoussent. Des blocs arrondis semblent reposer les uns sur les autres (d).



Fig 13 • Bloc de granite.

La Peyroclavado est une curiosité géologique du massif granitique du Sidobre (Tarn) provoquée par l'altération en boule du granite. L'arène granitique (le sable) a été enlevée par la pluie et le ruissellement.

Comment définir le sable ?

Quelle que soit la nature des roches initiales, toutes sont vouées à se transformer en sable. Mais point n'est besoin d'être géologue pour observer que les morceaux détachés des roches massives qui forment montagnes et falaises sont de tailles variées. Les termes de blocs, galets, cailloux, graviers nous sont familiers et ils correspondent à des tailles ou des formes différentes. D'où la nécessité de bien les définir. Plusieurs géologues se sont attachés à calibrer précisément la taille du sable. Chester Keeler Wentworth (1891-1969), un géologue américain, Nikolai Mikhailovich Strakhov (1900-1978), un géologue russe et André de Cayeux de Senarpont, dit André Cailleux (1907-1986), un géologue français, se sont particulièrement dédiés à cette entreprise. Chacun d'eux a proposé de définir des classes granulométriques basées sur un diamètre minimal et un diamètre maximal des grains. Il s'agit bien sûr d'une convention qui doit être adoptée par l'ensemble de la communauté des chercheurs. La classification unanimement acceptée aujourd'hui est celle de C.K. Wentworth (*Fig. 14*). Publiée en 1922,

elle indique que le terme de sable doit être réservé à des grains dont le diamètre varie entre 1/16 mm et 2 mm. Cet intervalle de classification, qui regroupe des sables très fins à des sables très grossiers, porte le nom d'arénites (voir encadré « arènes »). Au-delà, on a affaire à des graviers, en deçà, à des silts.

Pour résumer, un sable est défini par une taille des grains, une granulométrie et non par une composition.

Dimension en mm de la limite inférieure de la classe	Sédiments ou roches meubles	Classe	Roches consolidées
256	Bloc	RUDITES	Conglomérats
32	Grave		
4	Cailloux - galets		
2	Granule (gravillons)		
1	Sable très grossier	ARÉNITES	Grès
0,5	Sable grossier		
0,25	Sable moyen		
0,125	Sable fin		
0,0625	Sable très fin		
0,0312	Silt grossier	PÉLITES ou LUTITES	Siltites
0,0156	Silt moyen		
0,0078	Silt fin		
0,0039	Silt très fin		
0,0006	Argile		Argilites
	Pré-colloïdes		

Fig 14 • Classes granulométriques.

La classe des arénites regroupe tous les sables, des plus fins (> 1/16 mm) aux plus grossiers (< 2 mm).

DES ARÉNITES DANS LES ARÈNES

Dans les arènes, du sang était souvent répandu, absorbé ou masqué par le sable. C'est justement le sable qui a donné le nom à ces lieux de combat puisque en latin *arena* = sable. De la même façon, l'arène granitique désigne le sable qui résulte de l'altération du granite. Finalement les arènes sont de grands bacs à sables.

De quoi sont constitués les sables ?

Nous avons vu qu'ils sont le produit de l'érosion, de la fragmentation des roches. Ces dernières sont composées d'un assemblage de minéraux, qui en constituent en quelque sorte les grains élémentaires. Certaines, comme le calcaire, sont formées d'un seul minéral, la calcite. D'autres, comme les roches plutoniques, sont formées d'un assemblage de minéraux comme le quartz, le feldspath, les micas... Chaque minéral possède une composition chimique précise. Le quartz est du dioxyde de silicium et sa formule chimique s'écrit SiO_2 . La calcite est du carbonate de calcium, de formule chimique CaCO_3 . D'une façon générale, les minéraux se présentent sous la forme de solides cristallins : ce sont des cristaux, même s'ils ne possèdent pas, dans la plupart des cas, les belles formes caractéristiques que l'on peut observer dans les vitrines des musées. Les sables sont ainsi constitués de minéraux de nature variée, parfois aussi de tous petits morceaux de roches. Leur diversité est extraordinaire et parfois très surprenante (*Fig. 15, 16 et 17*).



Fig 15 • Un sable bien humain.

La plage de *Glass beach*, près de Fort Bragg en Californie contient un sable très particulier. Pendant des décennies, elle a servi de dépotoir. Les vagues et le mouvement incessant de la mer ont cassé les bouteilles de verre qu'elle refermait, créant ainsi un sable de verre tout à fait particulier, issu des activités humaines. Les fragments sont millimétriques.



Fig 16 • Quelques sables sédimentaires.

Ces sables marins comportent des restes d'organismes unicellulaires (foraminifères) mais aussi des morceaux de coquilles de mollusques associés à du quartz. Certains, comme celui de La Chapelle-en-Serval, témoignent d'une époque durant laquelle le Bassin parisien était recouvert par une mer chaude, peu profonde. Les plus grands fragments de fossiles sont de l'ordre du centimètre. Le sable d'Okinawa n'est constitué que de petits foraminifères (*Baculogypsina*, encore appelé « étoile des sables »), ils font quelques millimètres. © Musée du Sable.





Fig 17 • Quelques sables volcaniques.

Ces sables sont tous d'origine volcanique. On y distingue diverses roches comme de la pouzzolane (sommets du Stromboli) ou des grains de basalte (en sombre, Maui) mais aussi de beaux minéraux verts (Hawaï), des olivines, minéral caractéristique des basaltes dans lesquels il est le premier à se former lors du refroidissement de la lave. © Musée du Sable.

Est-ce que tous les minéraux se retrouvent dans le sable ?

Tout va dépendre du degré de l'altération, ce que l'on appelle la « maturité » d'un sable. Au départ, lorsqu'une roche se désagrège, les premiers grains de sable représentent toute la diversité des minéraux qui composent la roche. Pourtant, très rapidement, le pouvoir de solvant de l'eau va jouer et avec lui toute une série de processus chimiques

d'altération. Ainsi, dans un granite, les minéraux comme les feldspaths par exemple seront très vite dégradés pour former des argiles comme la kaolinite. Cette altération chimique, avec destruction des feldspaths, est beaucoup plus importante en climat tropical que dans les zones tempérées. En effet, lorsque les eaux de pluie traversent les couches d'humus provenant de la végétation, elles se chargent en acide carbonique qui accélère le processus de dissolution. Le granite s'altère en formant des sables grossiers, connus sous le nom d'arènes. Ces dépôts peuvent atteindre en Chine des épaisseurs considérables de plu-



Fig 18 • Sable de l'île de Groix.

Le sable de cette plage est de couleur grenat car il est constitué... de grenats, minéraux très résistants et abondants dans les roches métamorphiques de l'île de Groix (Bretagne).

sieurs centaines de mètres. Le cœur du massif de granite, non érodé, peut rester isolé dans le paysage en formant des dômes, comme le célèbre « pain de sucre » qui surplombe la ville brésilienne de Rio de Janeiro. Mais de manière générale, plus on s'éloigne de la source du sable, de la roche mère comme disent les géologues, moins la diversité minéralogique est importante. Seuls survivent dans un sable, les minéraux les plus durs et les moins solubles (*Fig. 18*). Si l'on s'amuse à faire le total, plus de 180 minéraux différents ont été découverts dans les sables sur les **4 900 espèces connues** et décrites par les minéralogistes.

Qu'appelle-t-on l'altération ?

L'altération a des sens différents suivant que l'on parle d'écologie, de musique, de matériau... En géologie, l'altération (*Fig. 19, 20 et 21*) est la modification chimique et physique des roches. Elle est principalement due à l'eau et aux variations de températures et de pressions. Il s'agit, le plus souvent, d'une incorporation d'eau dans la structure cristalline.

Celle-ci est alors modifiée. Généralement, d'une structure compacte en trois dimensions on passe à une structure en feuillets : celle des argiles. Pour les calcaires, c'est le gaz carbonique contenu dans l'eau qui, la rendant acide, attaque le calcaire, ce qui conduit à avoir d'immenses poches de dissolution, celles qui nous offrent les magnifiques grottes souterraines.

Le quartz est très stable et peu soluble, il a donc tendance à rester sous cette forme et constitue la majorité des sables.



Fig 19 • Grès altéré en feuillets à Wadi Hitan, Égypte.

Le bloc de grès initial a été altéré. Les argiles qui le composaient ont été décomposées et évacuées. Il ne reste plus que les lits de sable, qui forment des feuillets qui s'effritent très facilement.



Fig 20 • Altération en pelure d'oignon d'un granite.

Granite hercynien à grands cristaux d'orthose (300 millions d'années) du massif de Montselgues (Ardèche).



Fig 21 • Altération d'un béton.

L'altération d'une roche se produit quand les conditions où elle se trouve ne sont pas celles de sa formation. Elle se réalise souvent en présence d'eau par l'incorporation de ses ions O et OH . Le fer, par exemple, rouille et augmente de volume. Il fait alors éclater le béton qui l'entoure (bâtiment de l'UNESCO, place de Fontenoy, Paris).

L'échelle de dureté des minéraux

Tous les minéraux qui composent les roches ne sont pas aussi durs les uns que les autres. Certains, comme le talc ou le gypse peuvent se rayer avec l'ongle, tandis que d'autres comme le corindon ou le diamant sont très durs et utilisés comme abrasifs. Le minéralogiste allemand Friedrich Mohs a bâti en 1812, une échelle de dureté encore utilisée aujourd'hui. Elle se compose de dix niveaux, basés sur des minéraux communs (*Fig. 22*). C'est une échelle dite ordinale et dans laquelle on doit procéder par comparaison entre deux minéraux en observant la capacité de l'un à rayer l'autre. Il n'y a en effet aucune relation mathématique entre les différents degrés de l'échelle. Dix minéraux connus, assez communs, ont été classés pour former les degrés de l'échelle. Le plus dur a, par convention, une dureté de 10, le moins dur, une dureté de 1. De 1 à 10, on retrouve les minéraux suivants : talc, gypse, calcite, fluorine, apatite, orthose, quartz, topaze, corindon, diamant.

Dureté	Minéral	Composition chimique
1	Talc, friable sous l'ongle	$Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$
2	Gypse, rayable avec l'ongle	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3	Calcite, rayable avec une pièce en cuivre	$CaCO_3$
4	Fluorine, rayable (facilement) avec un couteau	CaF_2
5	Apatite, rayable au couteau	$Ca_5(PO_4)_3(OH-, Cl-, F-)$
6	Orthose, rayable à la lime, par le sable	$KAlSi_3O_8$
7	Quartz, raye une vitre	SiO_2
8	Topaze, rayable par le carbure de tungstène	$Al_2SiO_4(OH-, F-)_2$
9	Corindon, rayable au carbure de silicium	Al_2O_3
10	Diamant, rayable avec un autre diamant	C

Fig 22 • Échelle de dureté des minéraux.

De 1 à 10, les minéraux sont classés par dureté croissante.

LES SABLES ÉVOLUÉS : SABLES ET QUARTZ



Fig 23 • Forêt de Fontainebleau.

Ce sable blanc est très pur, composé uniquement de grains de quartz.

Les sables les plus évolués sont constitués uniquement de quartz (*Fig. 23*). Tous les autres minéraux le composant initialement ont été altérés et ont disparu, en faisant un matériau particulièrement recherché, notamment pour la fabrication de verres spéciaux ou pour des analyses chimiques (colonnes de chromatographie).

Qu'est-ce que le quartz ?

Le quartz est une espèce minérale appartenant au groupe des silicates. Sa formule chimique globale, SiO_2 , montre qu'il est composé de deux atomes d'oxygène pour un atome de silicium (mais de fait, sa structure en tétraèdre associe un Si à 4O, partagés avec les voisins). Il se présente sous forme de cristaux incolores (*Fig. 24, 25*) ou colorés et il cristallise dans le système hexagonal. Il en existe plusieurs variétés comme l'améthyste, la citrine, le quartz fumé ou morion, le quartz rose...



© D. Descouens CC BY 3.0

Fig 24 • Groupe de cristaux de quartz.
Cristaux de quartz translucides, « cristal de roche », mine de Gerais, Brésil.



© D. Descouens CC BY 3.0

Fig 25 • Améthyste (de fait un quartz avec des traces de fer)
Mun. Las Vigas de Ramírez, Veracruz, Mexique.

QUARTZ ET COÉSITE

Quartz et coésite sont deux minéraux de composition chimique identique, SiO_2 , mais aux propriétés physiques différentes. On dit que ces deux minéraux sont des polymorphes (formes variées) du dioxyde de silicium (et il en existe d'autres : tridymite, cristobalite, stishovite...).

On sait que la masse volumique (ou la densité) des roches augmente depuis la surface vers le centre du globe. Cette hausse de la densité implique que le volume d'une roche diminue lors de son enfouissement en profondeur (puisque la pression augmente) et inversement lors de son exhumation. Une roche, composée de cristaux appartenant à une ou plusieurs espèces minérales, est comprimée lors de son enfouissement. Or, les minéraux sont très peu compressibles. En conséquence, les minéraux peu denses, de gros volume, stables en surface, sont remplacés en profondeur par des minéraux plus denses, de petit volume. Le quartz a une structure cristalline moins compacte que la coésite. Ainsi, au-delà de 100 km d'enfouissement, la structure du quartz change pour se transformer en coésite. La transformation se réalise dans l'autre sens au cours de la remontée.

Ce même phénomène de réaction à la pression explique aussi la formation de deux formes cristallines du carbone : le graphite en surface ou des diamants en profondeur... On comprend mieux pourquoi le diamant est le symbole d'un amour profond !!!

N'y a-t-il que des minéraux dans le sable ?

La réponse à cette question est négative.

Les sables sont constitués de minéraux, tous types de minéraux un peu durs, mais certains sables ne contiennent que des minéraux issus du monde organique. C'est le cas des sables coquillers (*Fig. 26*) que l'on retrouve aussi bien dans les dépôts sédimentaires que sur le bord de certaines plages. Ils sont constitués de morceaux de coquilles de différents organismes marins, bivalves, brachiopodes, gastéropodes, des morceaux de test d'oursin, ou de leurs radioles (les piquants) ou contiennent des microorganismes marins (foraminifères, radiolaires...). Ce sont alors des sables nommés sables biogènes. Tous les sables ne sont pas du même tonneau !!!



Fig 26 • Sable à Miliolites du Lutétien.

Certains sédiments fins et meubles ne sont constitués que de coquilles ou débris de coquilles millimétriques, tel le sable à Miliolites du bassin de Paris (ferme de l'Orme, Lutétien). Les organismes ont une taille légèrement inférieure au millimètre.

LA COQUILLE, UN MINÉRAL COMME UN AUTRE ?

Les coquilles des animaux marins sont composées de minéraux. Certaines sont composées de carbonate de calcium, sous forme de calcite ou d'aragonite, d'autres sont composées de silice, d'autres encore de phosphate. À la mort des organismes, tandis que les parties molles se décomposent, les coquilles se conservent et, entières ou sous forme de fragments, peuvent entrer dans la composition de sables. C'est aussi le cas d'autres éléments du squelette comme les spicules des éponges, les radioles (= piquants) ou le test des oursins...

La coquille des mollusques est constituée de carbonate de calcium et de matière organique. Elle est secrétée par le manteau de l'organisme. C'est donc un biominéral, connu aussi sous le nom de biocarbonate. La coquille est formée de trois couches différentes. Les deux premières couches assurent la croissance en longueur et en surface de la coquille, la troisième, interne, se dépose à partir de toute la surface du manteau et assure sa croissance en épaisseur.

De quand date le plus ancien sable qui se soit répandu à la surface de la Terre ?

Quand la Terre s'est formée, il y a 4,5 milliards d'années, elle était une boule incandescente. Tout n'était que magma. Petit à petit, la Terre se refroidit et la croûte terrestre se forme autour de petits éléments à la surface. La vapeur d'eau commence à se condenser dans l'atmosphère et les premières pluies irriguent les vastes étendues désolées des continents. Elles s'écoulent, donnant naissance aux rivières, s'accumulent dans les points bas tandis que les premiers océans se forment. Le travail incessant de l'eau commence. Elle désagrège les premières roches. Le sable est ainsi né de ces premières pluies, il y a donc quelques 4,3 milliards d'années.

2 Transport et sédimentation du sable

La sédimentologie du sable

Le sable est un matériau meuble qui peut très facilement être mobilisé et déplacé, parfois sur de grandes distances, avant d'être abandonné dans les dépôts sédimentaires. La sédimentologie est une branche particulière de la géologie qui étudie les processus de formation de ces dépôts.

Deux éléments concourent au déplacement du sable. Le premier, le plus important est l'eau. Le second, plus surprenant à première vue, est le vent, c'est-à-dire l'air en mouvement. Les sables se déposent dans des environnements variés. L'examen de la morphologie des grains qui les composent permet d'identifier l'origine des dépôts.

Le transport par l'eau

L'eau se présente dans la nature sous différents états : solide, liquide ou gazeux. Les deux premiers lui confèrent une capacité de transport qui va conduire à des dépôts sédimentaires particuliers, dans lesquels le sable se rencontre fréquemment (*Fig. 27*).

En fonction de la vitesse du courant de l'eau dans lequel il se trouve, et de sa taille, un grain peut être soit arraché, soit transporté, soit se déposer quand la force du courant devient insuffisante.

Les glaciers

Les glaciers (*Fig. 28*) sont constitués d'eau à l'état solide qui se forme par le tassement de couches de neiges expulsant progressivement l'air qu'elles contiennent pour se transformer en glace. Sous l'influence de la gravité, ces masses se mettent en mouvement et descendent progressivement dans les vallées, érodant au passage les flancs de la montagne en charriant des quantités importantes de matériaux. Les sables glaciaires sont en général très anguleux. Ils ont un aspect de roche broyée, sans calibrage, en éclats et en poussières.

Voyage d'un grain de sable

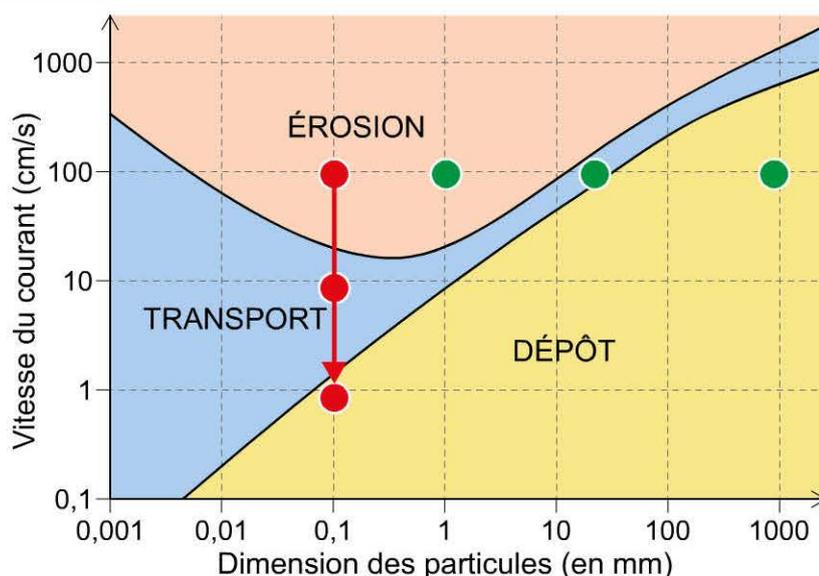


Fig • 27 : Activité d'un grain en fonction de la vitesse du courant et de sa taille.

Ce diagramme, dit de Hjulström, montre qu'un grain de sable de 0,1 mm de diamètre sera arraché au « substrat » lorsque la vitesse du courant est de 100 cm/s (point rouge dans la zone beige). Si la vitesse du courant diminue vers 10 cm/s, les grains de sable de cette taille continuent leur chemin (point rouge dans la zone bleue). Si la vitesse tombe vers 1 cm/s, les grains se déposent (point rouge dans la zone jaune). Autre manière de regarder ce diagramme : pour une vitesse donnée d'un courant de 100 cm/s, un grain de 1 mm est arraché au substrat, alors qu'un grain centimétrique (un peu plus de 10 mm) est seulement transporté, et qu'un bloc métrique (grain de 1 000 mm) est trop gros pour être transporté, il se dépose.



Fig 28 • Front de glacier en Islande.

Le glacier, recouvert de sable noir volcanique montre sur la droite de la photo et au premier plan des débris de galets et sable, ceux de moraines latérale et frontale. Les petits points colorés et ceux encore plus petits, plus lointains sont des personnages qui donnent l'échelle : le glacier fait environ 25 mètres d'épaisseur dans la partie frontale.

Ils sont un des constituants des moraines, des roches caractéristiques des dépôts glaciaires que l'on retrouve à l'avant, sur le fond ou sur les côtés des glaciers. Ils sont généralement mélangés à des blocs plus gros arrachés à la montagne par le mouvement du glacier.

Ruisseaux, fleuves et rivières

Depuis des millénaires, ruisseaux, rivières et fleuves sculptent et façonnent les paysages, érodant les chaînes de montagne, modelant les collines et creusant des vallées (*Fig. 29*). Au cours de cet incessant travail, des milliers de tonnes de matériaux sous forme de sable sont déplacées, transportées sur des distances importantes. Pour mémoire, les plus longs fleuves du monde, le Nil et l'Amazone, ont un cours qui s'étire sur 6 700 kilomètres.

Les sables de rivière sont caractérisés par des éléments de forme anguleuse, non usés, d'aspect peu luisant. Ils sont souvent mal classés, constitués d'un mélange de grains de tailles différentes. Près des sources, les grains sont très anguleux, d'aspect très fruste, tandis que plus près de l'embouchure ils sont progressivement plus émoussés.

Très souvent, les sables s'accumulent à l'intérieur des méandres, à l'endroit où le courant des rivières est moins important. Les minéraux les plus denses s'y déposent préférentiellement, constituant parfois de véritables gisements de matière première (or, uranium, étain, platine...).



Fig 29 • Dépôts de sables fluviaux – Massif du Makay, Madagascar.

La rivière coule ici dans un grès qui a un peu plus de 250 millions d'années (d'âge permien). Elle le désagrège, l'érode, libérant les grains de sable qui le composent. Ces grains se redéposent et s'accumulent principalement au creux des méandres de la rivière où s'abreuve l'oiseau.

LES SABLES AURIFÈRES

Les placers aurifères sont des dépôts de sables fluviatiles très riches en or qui ont été exploités depuis l'Antiquité pour en extraire le métal précieux.

Dans les montagnes du Nord de la Géorgie, une ethnie, les Svanes, pratique l'orpaillage dans les rivières du Caucase. Depuis toujours, ils utilisent des toisons de moutons qu'ils fixent dans les cours d'eau pour récolter les paillettes d'or qui s'y trouvent en abondance. Les paillettes se fixent dans la laine tandis que le reste des minéraux poursuit son chemin dans la rivière. Selon certains, cette pratique est à l'origine du mythe de Jason et de la toison d'or.

L'exploitation des placers aurifères est très importante. Elle représente ainsi 5 % de l'or extrait au Canada. C'est la découverte d'un placer aurifère dans le Klondike, un affluent du Yukon au Canada, qui a provoqué une ruée vers l'or, immortalisée par Charlie Chaplin dans son film « The gold rush ». Entre 1896 et 1900, 75 tonnes d'or y ont ainsi été extraites tandis que 100 autres tonnes y ont été récoltées depuis.

Mer et océans

Il n'échappe à personne que le sable se récolte très souvent en bord de mer. Amené là pour partie par les rivières, il est aussi le résultat de l'action incessante des vagues sur les côtes rocheuses mais également sur les récifs coralliens. C'est ainsi que les plages des atolls polynésiens sont pour certaines quasi exclusivement constituées d'un sable blanc corallien, comme celle de Ranguiroa.

Les sables marins sont généralement caractérisés par des grains de forme anguleuse et subanguleuse, parfois subarrondie (*Fig. 30*). Ils ont généralement un aspect luisant et sont très calibrés, les grains étant tous sensiblement de la même taille. Selon la nature de la roche qui a été érodée, les plages de sable peuvent prendre des couleurs très variées, des plages de sable blanc des Seychelles à celles de sable noir de l'île volcanique d'Hawaï ou encore grenat (*Fig. 18*).

Les dunes hydrauliques

Sous l'action des courants et en particulier des courants liés aux marées, de véritables dunes sous aquatiques, dites dunes hydrauliques, se forment. Elles se déplacent en suivant le sens de l'écoulement de l'eau. Comme les dunes aériennes, elles présentent des formes variées, liées à la vitesse du courant (*Fig. 31*).



Fig 30 • Sable marin du Cap de Bonne-Espérance.

Ce sable est essentiellement constitué de fragments millimétriques roulés de coquilles d'organismes marins.

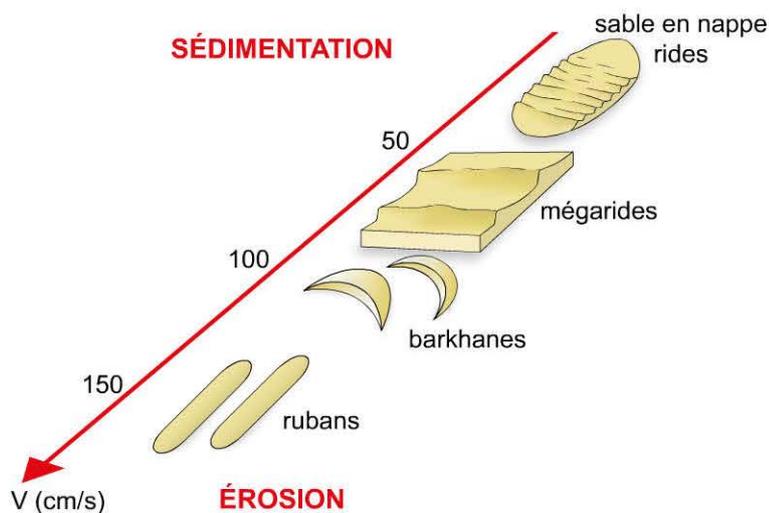


Fig 31 • Séquence type de corps sableux observée sur les plates-formes continentales dominées par la marée.

Notez les ressemblances de formes avec les dunes aériennes, notamment les barkhanes.

Dans le Nord de la France, dans les eaux du Pas-de-Calais, ces dunes qui peuvent mesurer une vingtaine de mètres de hauteur sont composées essentiellement de sable coquillier. Elles constituent un habitat privilégié pour les poissons plats et les organismes fouisseurs. Protégées au titre d'une directive européenne, les dunes peuvent se déplacer de 40 à 70 m par an sous l'action des courants.

Ces dunes hydrauliques se développent tant en milieu marin qu'en milieu lacustre.

DUNE LACUSTRE D'EXCENEVEX LAC LÉMAN (HAUTE-SAVOIE)

Les dunes en bordure de mer ou dans les déserts sont communes. En revanche, celles qui se forment dans des lacs, ou à proximité sont rares. Elles ont occupé une grande partie du bassin de Paris et ont laissé le très blanc sable de Fontainebleau (*Fig. 23*), mais il y a de cela 30 millions d'années.

Aujourd'hui, de telles dunes lacustres n'existent plus en Europe qu'en deux endroits : sur le Lac Balaton, en Hongrie et sur la partie sud du lac Léman (*Fig. 32*).

Les dunes du Léman se sont formées il y a quelques 12 à 15 000 ans et forment une vingtaine d'ondulations sur 600 m de large. Elles ont été fixées par le développement de végétations spécifiques allant d'une renouée unique jusqu'à des pins, en passant par des roseaux aujourd'hui supprimés pour offrir une plage aux vacanciers. Lorsque les sables sont à nu, le vent les entraîne à l'intérieur des terres, constituant entre l'embouchure du Foron et Excenevex, un système de dunes exceptionnelles en Europe. Ce phénomène se poursuit encore de nos jours obligeant la municipalité à mettre, en hiver, sur la plage, des filets pare-sable pour limiter le déplacement du sable.



Fig 32 • Les dunes lacustres d'Excenevex (sud du Lac Léman, Chablais).

Le transport par le vent

Le vent est un autre agent de transport très important du sable qu'il peut déplacer sur des distances tout à fait considérables.

Tempêtes de sable

Les tempêtes de sable sont un phénomène météorologique fréquent dans les zones désertiques. Des vents violents soulèvent le sable, emportant parfois très haut dans l'atmosphère des particules qui se redéposent ensuite. De telles tempêtes sont régulièrement observées par les satellites. L'exemple suivant concerne la France.

Régulièrement, la météo fait état de pluie de sable saharien sur la France ou ses pays voisins (Suisse, Belgique, Allemagne...). Ces chutes sont parfois abondantes, pouvant atteindre une dizaine de centimètres au pied des Pyrénées. Les voitures, les zones enneigées sont alors recouvertes d'une pellicule rougeâtre composée de sable saharien. L'explication du phénomène est assez simple.

Au départ, par un jeu de balancier Est-Ouest, l'air froid de l'Atlantique plonge vers le Maroc ou la péninsule ibérique. Une dépression se crée alors au-dessus du Sahara. Comme il s'agit d'une région sèche, quelques nuages peuvent se former mais ils ne donnent pas ou très peu de pluie ! En revanche, les différences thermiques engendrent des vents violents et provoquent des tempêtes de sable. Ce sont de fines particules visibles sur les photos satellites qui peuvent rester longtemps en suspension dans l'atmosphère vu leur faible poids et sont transportées à des altitudes élevées. Si le vent du Sud est puissant, les masses d'air se déplacent vers nos régions. Elles passent au-dessus de la mer Méditerranée. Cette mer chaude connaît une évaporation très importante. L'air chaud et humide monte et se refroidit en altitude. Le sable en suspension joue alors un rôle de noyau de condensation qui favorise le passage de l'eau de l'état vapeur à l'état liquide. Des nuages se forment. Selon leur mode de déplacement et selon la quantité d'humidité, ils atteignent la France ou d'autres régions européennes comme l'Allemagne, voire la Scandinavie (*Fig. 33, 34*). Lorsqu'elles sont au-dessus de notre pays, on peut connaître trois situations.

Tout d'abord, le nuage ne contient pas assez d'eau et il continue vers d'autres régions.

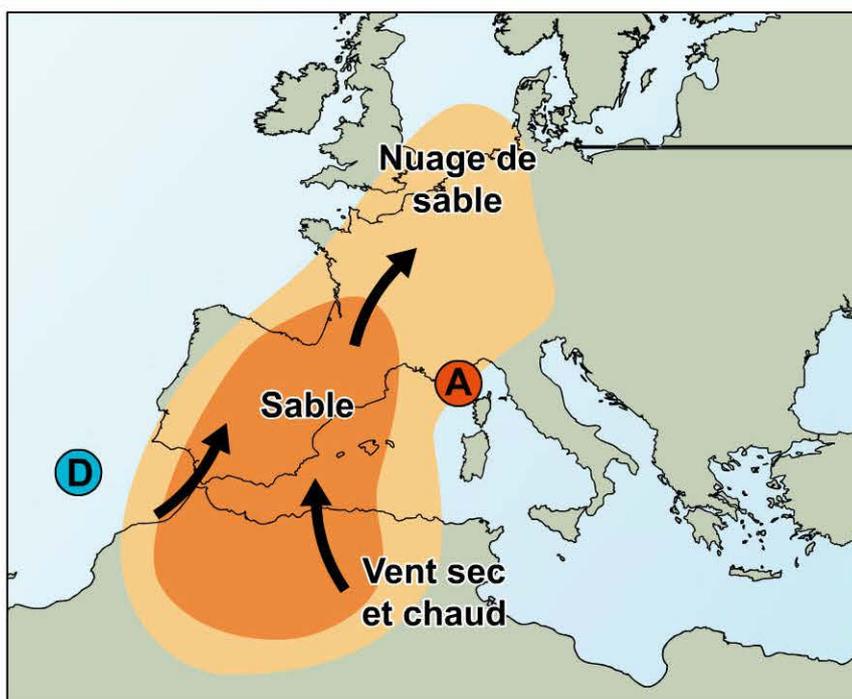


Fig 33 • Tempête de sable sur la France d'avril 2011 (image de la Chaîne météo).
A : anticyclone ; D : dépression. Il y eut jusqu'à 10 cm de sable au pied des Pyrénées, et plus de 3 cm en région parisienne.

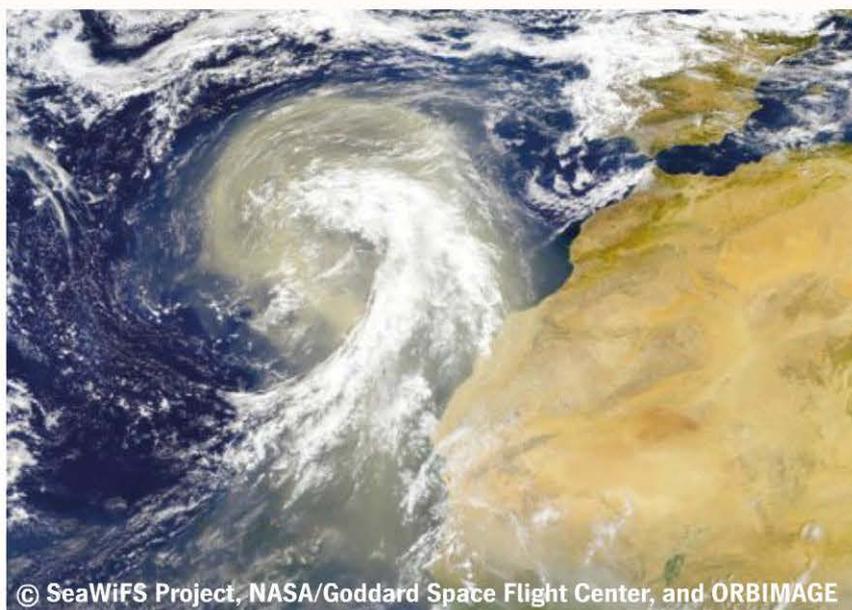


Fig 34 • Nuages de sable du Sahara.
Le nuage va vers le centre de l'Atlantique et même jusqu'aux côtes de Floride où il impactera le plancton. (Voir Sable et vie). Sur la photo satellite on distingue les côtes du Nord-Ouest de l'Afrique et le Sud de l'Europe (Espagne).

La deuxième situation est la plus favorable pour observer ce sable : le nuage est saturé en eau mais les précipitations sont faibles. L'eau se dépose sur le sol, les voitures, les vitres... Comme la quantité d'eau est faible, la pluie s'arrête vite ne laissant que quelques gouttes sur

ces voitures. L'eau, en s'évaporant, abandonne les particules de sable sur les objets où elle s'est déposée. Ce sable devient alors bien visible. Selon leur origine, ces particules peuvent être jaunes, beiges ou rouges.

Enfin, dans le cas de fortes pluies, l'eau s'écoule sur les véhicules, le sol et puis vers les égouts. Elle emporte avec elle les particules de sable et à la fin de la pluie, après l'évaporation de l'eau, on ne voit plus rien.

Ce phénomène est plus fréquent dans les zones méditerranéennes que dans le Nord de l'Europe mais il montre combien le sable voyage...

Les poussières de sable peuvent rester en l'air plusieurs semaines, voire mois, et être emmenées à plusieurs centaines ou milliers de kilomètres, sur l'Europe ou vers les Caraïbes, vers l'Amérique du Nord. Les organismes vivants sont parfois affectés par ces retombées, que ce soient les humains ou les algues (voir Sable et vie).

L'ARMÉE DISPARUE DE CAMBYSE

Hérodote raconte que vers 525 avant J.-C., après avoir conquis l'Égypte, l'armée perse de Cambyse II se dirigea à travers le désert libyque vers l'oasis de Siwa dans le but d'y détruire l'oracle d'Ammon. Cette armée, partie de l'oasis de Kharga dans l'Est de l'Égypte, fut ensevelie par une tempête de sable.

« En effet, les Perses n'atteignirent point Ammon et ne revinrent point en arrière ; voici ce que rapportent les ammoniens. Au sortir d'Oasis, ils rentrèrent dans le désert ; à mi-chemin d'Oasis à Ammon, comme ils venaient de déjeuner, un coup de vent du sud-est souffla sur eux avec une violence inaccoutumée ; il souleva de tels monceaux de sable qu'il les en couvrit, et de cette manière ils disparurent tous ».

Des 50 000 hommes qui la composaient, aucun n'a survécu et pendant des siècles, cette armée est restée introuvable. Récemment, deux archéologues italiens ont annoncé avoir découvert en plein désert, à proximité de l'oasis de Siwa, des restes humains, des outils et des armes appartenant à cette armée perdue.

Très souvent, le sable s'accumule en formant des dunes. Ce terme d'origine flamande (*duin* = colline en flamand) est utilisé par les géologues pour désigner des reliefs ou des modelés constitués par une accumulation de sable.

Les ensembles dunaires aériens sont relativement récents à l'échelle géologique. Le sable y est mis en mouvement par le vent, lorsque celui-ci souffle à plus de 10 m/s (36 km/h). Puis, les grains de sable se déplacent par saltation, c'est-à-dire par sauts successifs au ras du sol (*Fig. 35*). Ils vont s'accumuler dans l'arrière-dune lorsque la capacité de transport du vent va diminuer.

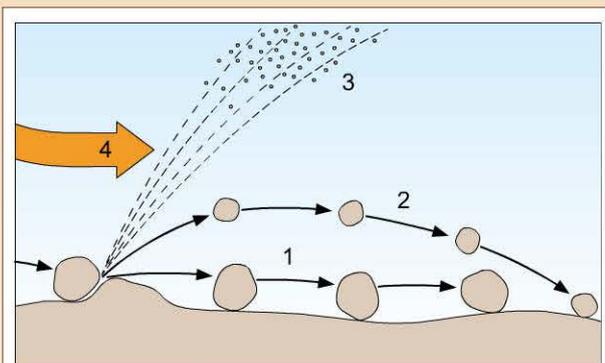


Fig 35 • Modalités de prise en charge des grains de sable par le vent.

1 : Roulage ; 2 : saltation ; 3 : suspension ; 4 : sens du vent.

L'évocation des dunes de sable fait instantanément penser au désert, même si tous les déserts, loin de là, ne sont pas recouverts par les dunes. Pourtant, au-delà des déserts, il existe d'autres types de dunes : les dunes littorales, comme la dune du Pilat en France (Fig. 36), la plus haute d'Europe mais aussi des dunes sous-aquatiques.

Les dunes littorales

Dans le monde entier, les dunes littorales se forment le long des côtes basses. Les vents et l'apport de sédiments par les houles et les courants (dérive littorale) y permettent l'accumulation de sable sur les plages (Fig. 36). À marée basse, le sable du haut de plage est asséché par le vent. Les grains qui le composent peuvent alors être mobilisés et transférés vers l'intérieur des terres, essentiellement par roulement et saltation. Plus la zone d'estran est large, plus la quantité de sédiments soufflés est importante. Progressivement, ils forment alors des dunes. Dans le processus de formation, les premières plantes à s'installer (dites pionnières) jouent un rôle fondamental, assurant le dépôt, la fixation et

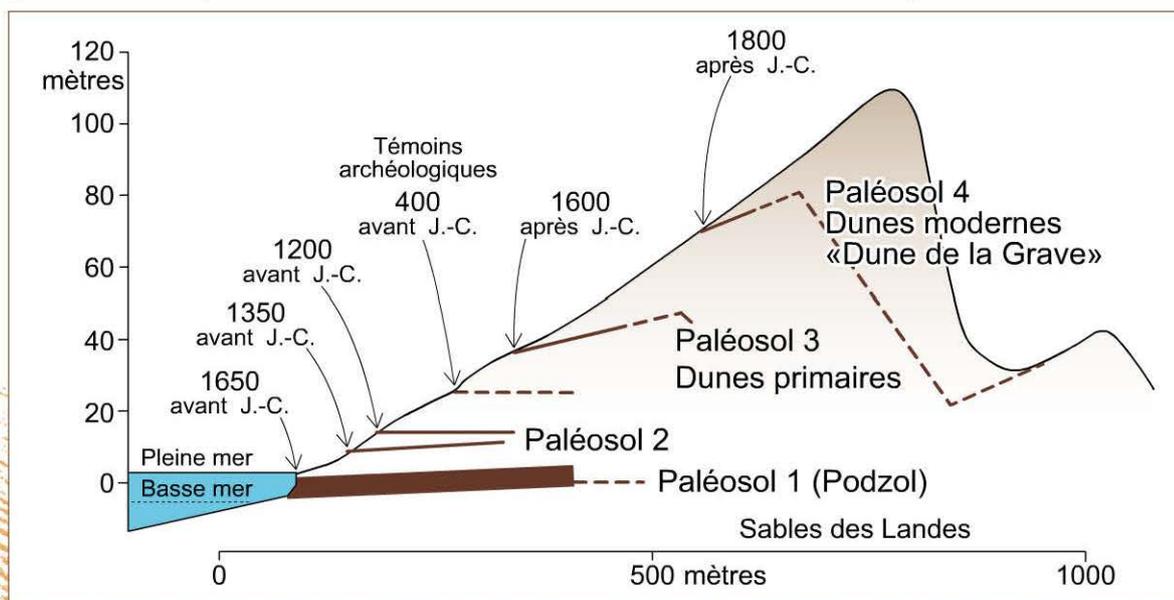


Fig 36 • Coupe de la dune du Pilat. Principales étapes d'édification.

La dune du Pilat s'est édifiée progressivement. Les niveaux des anciens sols (paléosols) marquent l'installation de plantes pionnières qui ont fixé la dune, lui permettant de se développer au fil des millénaires.

la stabilisation de l'accumulation dunaire. Ces plantes adaptées à l'instabilité du substrat présentent de longues racines traçantes. La dune littorale est donc une forme d'accumulation sédimentaire fixée par une végétation qui « aime le sable » (on le dit psammophile, *psammos* = sable, *philos* = ami). Il s'agit d'une construction biogéomorphologique.

Poussées par les vents, les dunes littorales peuvent envahir graduellement les terres si la topographie de l'arrière-côte le permet. Ce fut ce phénomène qui conduisit à l'ensevelissement de l'église de Soulac-sur-Mer en Gironde au XVIII^e siècle. Pour éviter cela, au XIX^e siècle, une forêt de pins maritimes fut plantée tout le long de la côte landaise. Malgré ça, le mouvement des dunes continue. La dune du Pilat se déplace actuellement vers l'est de deux à six mètres par an, ensevelissant progressivement la forêt de pins maritimes des Landes.

Ces dunes littorales forment une véritable barrière qui protège les côtes des assauts de la mer notamment lors des violentes tempêtes ou des grandes marées d'équinoxe.

L'ÉROSION DES DUNES LITTORALES

Ce phénomène est général sur toutes les côtes européennes (Fig. 37, 38). Lors des tempêtes, les dunes constituent une réserve de sable face à l'érosion des vagues : l'attaque directe des vagues entaille la dune et le sable prélevé est transféré dans les petits fonds. Il remonte normalement lors des périodes de calme sous l'action des houles.

Ce sont ainsi 45 ha de plages et de dunes qui ont été rendus à la mer entre 1954 et 2000 sur le cordon littoral qui relie Sète à Marseillan dans l'Hérault.



© B. Clavé-Papion

Fig 37 • Érosion de la dune littorale à Soulac-sur-Mer.

L'érosion de la dune littorale, lors des tempêtes de 2014, a conduit à l'effondrement des bâtiments qui étaient construits en bordure de l'océan.



© P. De Wever

Fig 38 • Blockhaus du Hourdel (Baie de Somme).

Le sable a été dégagé par l'érosion (photo prise en 2001). L'érosion ayant continué, le blockhaus est aujourd'hui couché sur un flanc.

Les dunes du désert

Comme les dunes littorales, elles sont formées par l'action du vent. Comme pour les dunes littorales, le sable y est mis en mouvement et se déplace au ras du sol par charriage et saltation. Lorsque les grains arrivent au sommet de la dune, ils se déposent sur le versant opposé dont la pente, toujours plus raide à un angle qui correspond au profil d'équilibre des tas de sables (*Fig. 39*). Les grains de sable y sont en général très arrondis et leur surface est dépolie.

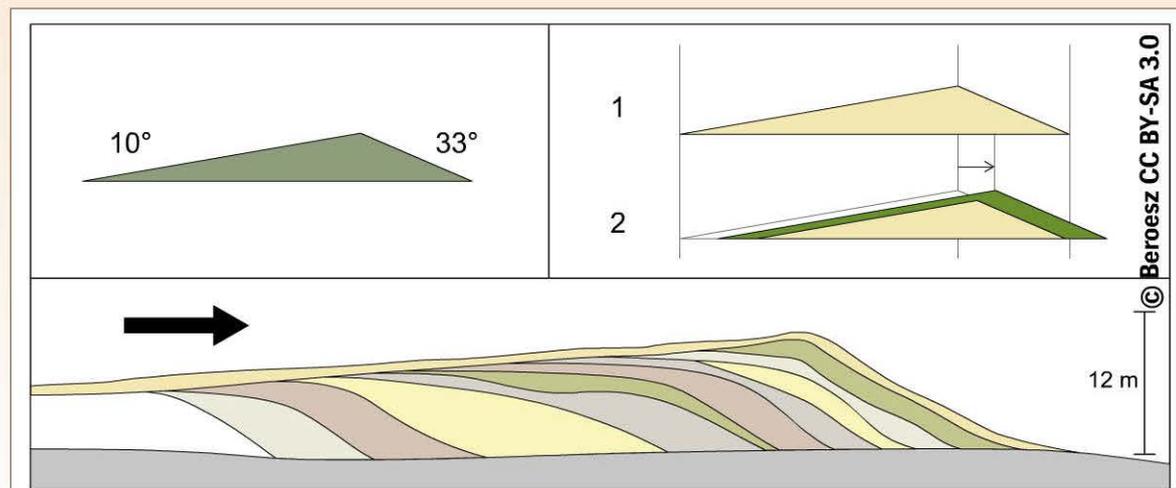


Fig 39 • Formation d'une dune sous l'action du vent.

Notez que sur le versant opposé au vent, la pente forme un angle compris entre 30 et 35°, ce qui correspond au profil d'équilibre des tas de sable.

Morphologie des dunes

Dans les déserts, les dunes de sable prennent des formes variées. La forme la plus courante est en forme de croissant, ou demi-lune, appelée barkhane. Formées par des vents qui soufflent toujours dans la même direction, elles sont en général plus larges que longues. La partie face au vent est convexe, en pente douce (une dizaine de degrés) alors que la partie à l'abri du vent est concave et plus raide (une trentaine de degrés). Les « cornes » des barkhanes adoptent un profil plus symétrique. Leur partie antérieure est le côté concave, les extrémités de la dune se déplaçant plus rapidement que leur centre. Les croissants dunaires peuvent atteindre généralement de l'ordre de 400 m de long et 30 m de hauteur. Mais certaines atteignent 300 m de haut, les plus hautes connues étant dans le désert de Namibie (Sud de l'Afrique) (*Fig. 40*).

CHANT DES DUNES

La littérature abonde en témoignages. Marco Polo, de passage à Lop, en parle : « *les sables qui chantent parfois remplissent l'air avec les sons de toutes sortes d'instruments de musique, et aussi le bruit des tambours et du choc des armes* ». Charles Darwin, de passage au Chili en témoigne aussi. Guy de Maupassant en a fait un récit pour ses « Contes de la Bécasse ». Le désert, qu'il soit chinois, américain ou saharien, est instrument de musique. Il produit en toute liberté des sons extraordinaires et inhumains qui ont nourri bien des imaginaires.

Le **chant des dunes** est le nom donné au bruit émis par certaines dunes lorsque les grains de sable entrent en résonance. Ces dunes sont nommées **dunes mugissantes ou dunes musicantes**. Une trentaine de dunes ont été recensées dans le monde, toutes les dunes n'étant pas sujettes à pareil phénomène.

Le son est émis lorsqu'une avalanche se déclenche sur la face la plus pentue de la dune. Une des théories tentant de décrire de manière plus complète le phénomène, notamment en essayant d'identifier le mécanisme à l'origine du son, précise que le son est émis en raison du chevauchement périodique des différentes couches de grains de sable. La fréquence fondamentale varie entre 60 et 105 Hz selon la taille des grains. La puissance sonore semble être de l'ordre de 110 dB à la surface de la dune (équivalent à une discothèque).

Selon des chercheurs du CNRS, la coulée de sable fonctionne comme une membrane de haut-parleur. Les grains de sable se déplaceraient de façon parfaitement synchrone, produisant chacun les mêmes vibrations sur l'air qui seraient à l'origine du *chant*. Si les grains ne bougeaient pas en cadence, les dunes sonneraient faux ou seraient muettes. Reste à découvrir l'origine d'une telle synchronisation et les conditions précises qui permettent aux dunes cantatrices de donner de la voix. Composition des grains, taux d'humidité du sable sont deux pistes étudiées par les scientifiques.

Pour les Bédouins, le bruit trahit la présence des djinns, esprits qui rôdent dans le désert, phénomène raconté dans la nouvelle *La Peur* de Guy de Maupassant (1882).



© USGS Landsat, août 2000

Fig 40 • Les plus hautes dunes du monde.

Le Parc national de Naukluft est une réserve de nature dans le désert de Namibie. Les vents côtiers créent les plus hautes dunes du monde. Vue satellite.



© NASA/JPL/University of Arizona

Fig 41 • Barchanes à la surface de la planète Mars.

Vues avec le satellite Hirise.

La vitesse de déplacement des barchanes peut atteindre 50 mètres par an. Lorsque différentes barchanes s'associent, on obtient une structure en dunes transversales dont les lignes de crêtes s'orientent perpendiculairement au vent et semblent dessiner, à grande échelle, une houle figée. Des barchanes ont été observées à la surface de la planète Mars (Fig. 41).

À l'échelle de quelques centimètres se surimposent de petites rides de même orientation (*ripplemarks* des géologues), analogues à celles que l'on peut trouver sur les plages sous l'action des courants marins.

Il arrive aussi que les cornes des barkhanes, freinées dans leur déplacement par un relief ou par la végétation, avancent moins rapidement que la partie centrale, dans laquelle l'effet du vent va jouer au maximum. Il en résulte des « barkhanes inversées », appelées dune parabolique. Les dunes en parabole sont caractéristiques des déserts côtiers, où le vent souffle dans une seule direction dominante. D'autres phénomènes peuvent modifier la forme générale et il s'ensuit toute une variété de dunes illustrées sur la *figure 42*.

Un autre type de dune correspond aux dunes linéaires, provoquées lorsque le vent souffle dans deux directions. Elles sont plus longues que larges et leurs crêtes linéaires ou sinueuses peuvent atteindre jusqu'à 400 km de longueur. Elles sont en général disposées parallèlement mais peuvent s'unir en formant des Y.

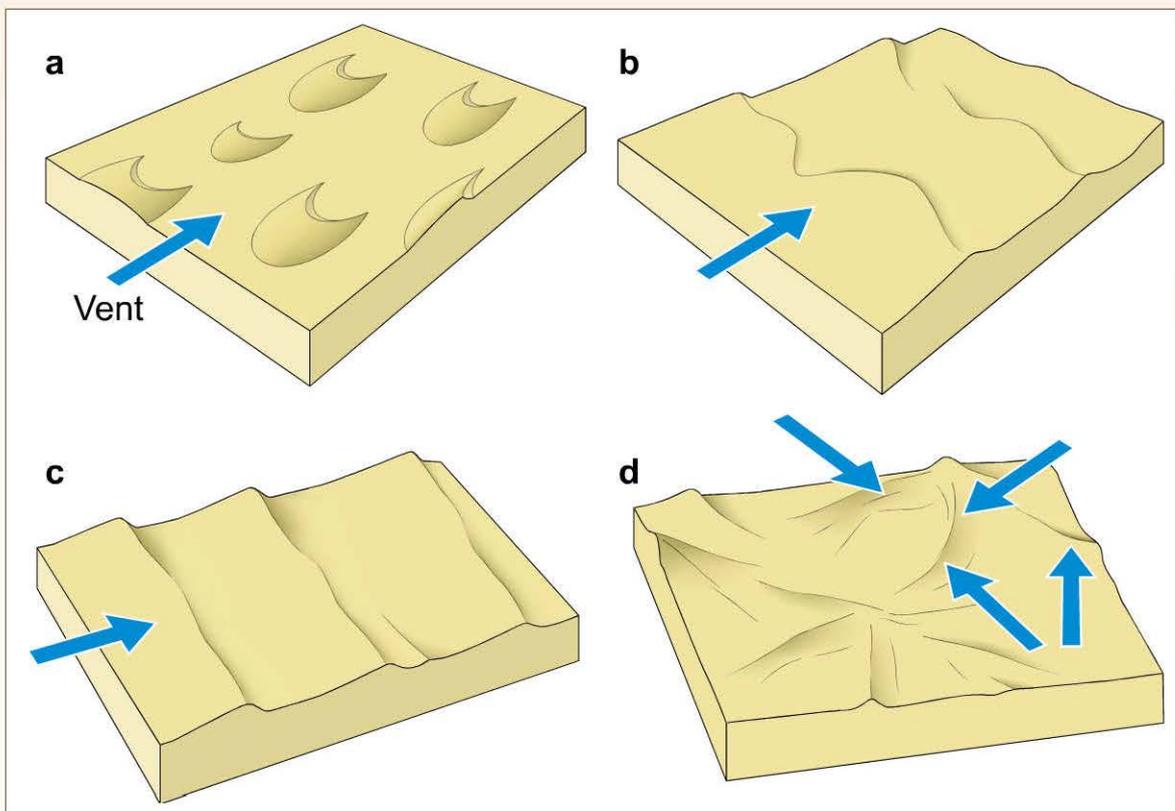


Fig 42 • Principaux types de dunes éoliennes.

a. Barkhanes ; **b.** dunes paraboliques ; **c.** dunes transversales à crêtes rectilignes ; **d.** dunes d'interférence.

Les dunes d'interférence ont plusieurs côtés qui partent de leur sommet. Elles se forment dans les régions où les vents sont multidirectionnels et sont assez caractéristiques du Sahara oriental.

DUNES EXTRATERRESTRES

Plusieurs planètes du système solaire, comme Mars et Titan montrent des dunes à leur surface. Titan est le plus gros satellite de Saturne. En 2006, la sonde Cassini y a révélé la présence de dunes de sable parallèles, de plus de 100 m de haut et pouvant s'étendre sur 1 500 km de long. La disposition de ces dunes de sable, localisées dans sa partie équatoriale, de façon linéaire et longitudinale, est caractéristique de structures formées par des vents soufflant dans différentes directions (Fig. 43). Un effet qui résulte vraisemblablement en grande partie de la proximité de Saturne et des forces de marée qu'exerce la géante gazeuse sur l'atmosphère de son satellite, 400 fois supérieures aux effets de la Lune sur la Terre.

La présence de dunes sur Titan est étonnante car les conditions d'environnement y sont cependant fort différentes de celles de la Terre. Son atmosphère est plus épaisse que celle de la Terre, la gravité y est plus faible, la vitesse des vents peu intense (moins de 2 km/h) et la composition du sable, mélange de matériaux organiques et de grains de glace, diffère des silicates que nous connaissons.

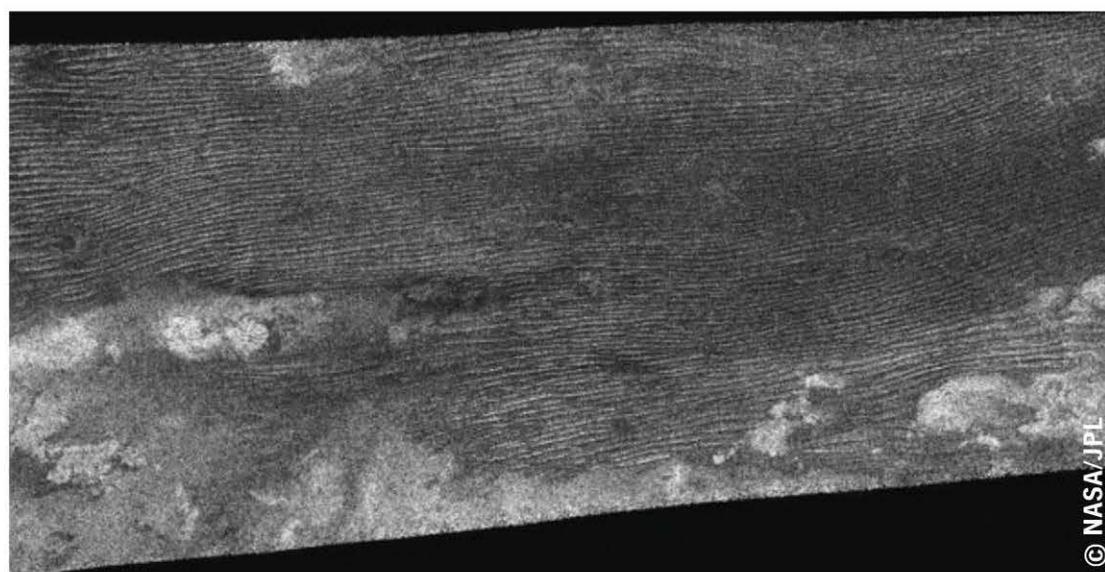


Fig 43 • Dunes linéaires à la surface de Titan – Mission Cassini.

Si la compréhension du processus de formation des dunes sur Titan semble bien maîtrisée, reste à définir comment s'est formé le sable. La présence de ravins et de canyons observée par la sonde Huygens durant sa descente dans l'atmosphère de Titan en janvier 2005, semble démontrer l'existence de phénomènes érosifs puissants à la surface du satellite. De violents orages et des pluies intenses de méthane liquide pourraient expliquer la formation de ce sable.

LE LÆSS, ROCHE DES VENTS

Dans les environnements désertiques et périglaciaires, le vent violent a arraché et transporté de grandes quantités de poussières qui se sont déposées bien plus loin, à l'origine d'une roche sédimentaire caractéristique appelées « limon de plateau », ou lœss, contenant 10 % de sable fin, 75 % de limons (ou silt, voir *Fig. 14*) et 15 % d'argile. Son épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres et même jusqu'à 200 mètres en Chine. Ces terrains forment les sols des riches terres à blé de la Beauce, du Nord de la France et de la grande plaine de l'Allemagne du Nord. Les lœss s'y sont en effet accumulés lors des périodes glaciaires du Quaternaire (Pléistocène).

Le terme « lœss » ou « loess » est issu de l'allemand « Löss », à partir de l'alémanique (dialecte suisse) *lösch* = peu compact, meuble.

Le granoclassement

Les géologues appellent ainsi le classement progressif des grains suivant la verticale dans un dépôt sédimentaire. On distingue deux types principaux : granoclassement normal (particules les plus grossières à la base devenant progressivement plus fines vers le haut ; le type le plus courant) et granoclassement inverse (particules les plus fines à la base devenant progressivement plus grosses vers le haut). Ce classement est intimement lié à la vitesse du courant. Lorsqu'il est rapide, les gros grains se déposent, lorsqu'il ralentit, ce sont les particules les plus fines qui sédimentent.

3 Les usages du sable

Le sable des constructions

Depuis la plus haute antiquité, le sable est un matériau particulièrement recherché et exploité par les hommes. C'est la troisième ressource naturelle que nous utilisons après l'air et l'eau. Nos activités quotidiennes en consomment à l'échelle mondiale la quantité phénoménale de 15 milliards de tonnes. Cette masse représente celle d'une piscine de cinq kilomètres de long, trois kilomètres de large et un kilomètre de profondeur. Le seul sable utilisé pour la réalisation de béton pour l'année

CONSOMMATION MOYENNE DE SABLE POUR QUELQUES RÉALISATIONS HUMAINES

Maison de taille moyenne : 200 tonnes.

Hôpital : 3 000 tonnes.

Kilomètre d'autoroute : 30 000 tonnes.

Centrale nucléaire : 12 millions de tonnes.

Projet Palm à Dubaï : 150 millions de tonnes (Fig. 44).



Fig 44 • Vue aérienne du Palm Jumeirah, Golfe persique (Émirats arabes unis).

Photo prise de la station spatiale en 2005. L'ensemble, alors en construction affiche son ambition : être visible de la Lune. Une barrière de 12 km le protège de la mer. Prévue pour 2 000 villas, 40 hôtels de luxe, etc. pour une population de 500 000 personnes.

2012 aurait permis de construire un mur de 27 mètres de haut et 27 mètres de large sur tout le tour de l'équateur.

La taille, la nature et la forme plus ou moins arrondie de ses grains en font un matériau de qualité recherché pour la construction.

En maçonnerie, le sable est utilisé comme agrégat mélangé à un liant comme la chaux ou le ciment. Il est particulièrement employé pour la fabrication du béton, et spécialement du béton de ciment que l'on utilise dans les constructions. Généralement, les artisans utilisent la règle du 1-2-3, qui va de la granulométrie la plus fine à la plus grossière. En pratique, cela signifie une pelle de ciment pour deux pelles de sable et trois pelles de gravier. L'ensemble est gâché avec de l'eau. Pour renforcer sa résistance, le béton peut être armé par des barres d'acier. Des techniques plus élaborées, comme celles du béton précontraint permettent de renforcer la résistance de ces bétons de ciment.

Une autre catégorie est celle des bétons bitumineux. C'est celle qui est utilisée pour fabriquer les bandes de roulement des routes. Ce procédé, mis en œuvre à chaud, utilise le bitume comme liant entre les différents constituants du béton, où le sable, grossier ou fin, joue un rôle déterminant.

En fonderie de métaux ferreux ou alliages légers, les moules peuvent être réalisés en sable aggloméré par des résines ou des argiles, pour couler les pièces.

En cuisine, il a été utilisé au XIX^e siècle pour la conservation de la viande mais sert encore actuellement pour conserver les pommes de terre, les carottes, l'ail...

POURQUOI LE SABLE DU DÉSERT N'EST PAS TRÈS UTILISÉ EN CONSTRUCTION ?

Le sable du désert a été accumulé par les vents. De forme arrondie et très lisse, les grains ne s'imbriquent pas parfaitement les uns dans les autres lors du mélange avec les autres constituants du béton. Les grains arrondis forment un peu comme des roulements à billes et par conséquent, le béton se fissure et offre une moindre résistance au cisaillement. De ce fait, même dans le désert, il est préférable de faire venir un sable de rivière, dont les grains sont anguleux, même s'il est bien plus onéreux.

Le sable du verre

Le sable est utilisé comme matière première du verre. Si les premières traces de verre apparaissent en Mésopotamie, en Syrie et en Égypte dès 3000 avant J.-C. avec des verres colorés, ce sont les Romains qui ont affiné les techniques de fabrication leur permettant d'obtenir des verres transparents.

Pour fabriquer du verre, il faut trois ingrédients principaux : du sable, de la soude et du calcaire. Le mélange est chauffé à 1 300 °C pour former une pâte liquide qui en se refroidissant va donner le verre. Par moulage ou soufflage de la pâte en fusion, on peut la modeler et fabriquer ainsi de nombreux objets de la vie quotidienne, des vitres de nos fenêtres... à nos verres à boire.

UN OXYMORE : « LE VERRE EN CRISTAL » ?

Le verre, la matière, n'est pas un cristal. C'est une matière amorphe, une sorte de « liquide figé ». Dans la nature, généralement, la silice domine. Une coulée de lave par exemple refroidit trop vite pour que sa matière puisse cristalliser, elle se fige alors sous forme de verre. Le plus bel exemple en est sans doute l'obsidienne (Fig. 6). Un fragment d'obsidienne est facilement confondu avec un cul de bouteille sombre parce que, tout simplement, ils sont de même nature. Toutefois, l'un est naturel tandis que l'autre est manufacturé.

Le verre industriel est obtenu par fusion d'une roche siliceuse, généralement du sable. Très souvent, des éléments sont ajoutés pour en modifier les propriétés : le pyrex, plus résistant aux chocs thermiques qu'un verre ordinaire, est enrichi en bore par exemple.

Les princes du monde ont longtemps possédé des objets d'une grande rareté et donc précieux. Parmi ces objets, on trouvait des coupes, ou verres, en « cristal de roche », c'est-à-dire en quartz (un oxyde de silicium cristallisé) (Fig. 45). Ces objets avaient un magnifique éclat lumineux et un son... cristallin ! On a donc tenté d'imiter ces objets de faste, ne serait-ce que pour... l'apparat. Et on a trouvé ! Pour avoir un verre en « cristal » (cristal de Bohême ou de Sèvres...) on ajoute un oxyde de plomb (PbO) qui apporte l'éclat et le son... cristallin (Fig. 46). ➤



Fig 45 • Coupe en cristal de roche (en quartz).
Trésor du MNHN.



Fig 46 • Verre en cristal.
Ce verre (objet) est un vrai verre (matière) : les faces taillées permettent de mieux jouer avec la lumière.

Plus il y a de plomb plus le verre semble cristallin. Dans sa définition moderne, le cristal comporte au moins 25 % de plomb, mais il va jusqu'à 30 %. La densité s'en ressent : elle passe de 2,5 pour le verre à 3 pour le cristal. Et c'est justement la forte densité apportée par le plomb qui offre au cristal son éclat. En effet, la vitesse de la lumière est fonction du milieu dans lequel elle se propage. Plus le milieu est dense, plus la vitesse sera faible. Ainsi, la lumière est fortement déviée, elle peut aller jusqu'à la réflexion complète si le cristal est taillé en facettes, qui jouent alors le rôle de miroirs.

Un verre n'a donc aucune structure à la différence du cristal. Voilà pourquoi un verre (objet) en cristal, peut sembler une contradiction.

Les géologues connaissent généralement la composition de ces verres « en cristal », ils savent aussi que le plomb passe dans le liquide qui y séjourne trop longtemps... voilà pourquoi ils ont tendance à rapidement vider leur verre de vin !

Les objets en verre sont parfois colorés grâce à des oxydes métalliques : le fer, pour le rouge ou le jaune, le cuivre et le cobalt pour le bleu, le nickel ou le manganèse pour le violet... La verrerie de Baccarat tire son succès d'une couleur particulière qui remporte un grand succès : un jaune vert, fluorescent aux rayons ultra-violets (*Fig. 47*). Cette couleur est obtenue en ajoutant un minéral, l'autunite, dont le nom est tiré de la région d'Autun, d'où il provient. Un détail cependant... ce minéral est un phosphate d'uranium et de calcium, il s'appelle aussi l'urane : on dit que ces objets sont en « ouraline ». C'est le même minerai qui fournit le matériau des chiffres luminescents des réveils ou des montres. Tous ces objets sont donc radioactifs !



Fig 47 • Gobelet en verre de baccarat coloré à l'autunite.

POURQUOI PARLE-T-ON ANGLAIS PLUTÔT QUE MANDARIN ?

L'empire du milieu, les empires chinois, ont dominé le monde pendant des siècles. On leur doit la connaissance du papier, de la poudre, de l'imprimerie, de la boussole, le thé, la soie, la porcelaine... mais ils ne maîtrisaient pas la fabrication du verre si bien que leurs habitations étaient sombres, avaient peu d'ouvertures étaient protégées par du papier... Leurs expériences se faisaient dans des récipients de céramique opaques. Ils ne disposaient ni de lentilles, ni de miroirs pour observer le ciel ou le monde microscopique. Cette absence de verre ne semblait pas leur manquer, tant leurs sophistications traditionnelles leur convenaient. Ils n'ont de ce fait pas pris les grands virages amorcés avec la Renaissance. >

Selon certains historiens, si la Chine a perdu de son avance entre la Renaissance et les temps modernes c'est à cause de son faible intérêt pour les possibilités offertes par le verre.

Mais depuis la Chine s'est réveillée, pour reprendre une allusion des années 1980¹.

Le sable des filtres

Le sable peut être utilisé pour filtrer les liquides (comme l'eau de piscine, les eaux usées...), des gaz ou de l'air. La filtration permet de séparer les constituants liquides et solides d'un mélange en le faisant circuler au travers d'un milieu poreux (Fig. 48). La filtration sur sable est une technologie qui est utilisée dans les installations de traitement des eaux du monde entier depuis le XIX^e siècle. Par la façon dont les grains s'empilent naturellement les uns sur les autres, le sable permet

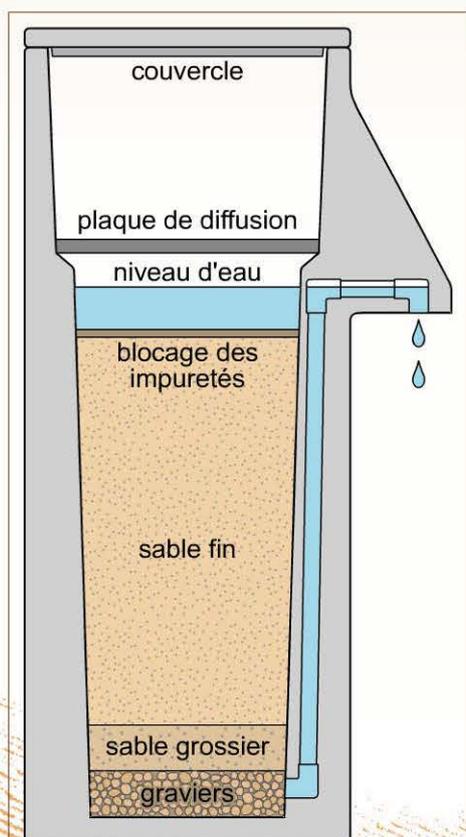


Fig 48 • Schéma d'un filtre à sable.

en effet de fabriquer des filtres relativement simples et peu onéreux. Schématiquement, les grains de sable forment une couche qui est traversée par le mélange qui contient donc une phase liquide et une phase solide. Cette couche arrête par simple effet de tamisage, les particules plus grosses que les intervalles entre les grains. Des particules plus petites sont également retenues par effet de paroi sur la surface des grains si, au cours du cheminement dans le filtre, elles touchent un grain. L'eau présente à la sortie du filtre sera ainsi débarrassée des éléments solides qu'elle contenait au départ.

C'est la raison pour laquelle, très souvent, les populations des cultures traditionnelles installées à proximité d'une rivière ne prélèvent pas directement dans la rivière de l'eau pour leur alimentation mais creusent des puits sur les berges. Elles

1. Peyrefitte A. (1980). *Quand la Chine s'éveillera... le monde tremblera*, Fayard.

bénéficient ainsi d'une eau plus claire, filtrée naturellement par les dépôts de sédiments sableux. L'eau y est de meilleure qualité et moins trouble.

Le sable peut aussi être utilisé pour filtrer l'air. On l'utilise par exemple pour filtrer les vapeurs d'un four à plomb. Plus récemment, on a aussi utilisé le sable pour filtrer un air susceptible de contenir des radionucléides accidentellement émis dans l'air d'une installation nucléaire ; « *Après l'accident de Three Mile Island, les centrales françaises ont été équipées de filtres à sable pour dépressuriser l'enceinte en cas d'accident grave* », mais ce type de filtre reste inefficace pour certains éléments comme l'iode organique. De plus, selon les expertises faites après la catastrophe de Fukushima « Les filtres à sable ne tiennent pas face aux séismes ».

Le sable est également un élément important dans le domaine touristique, lorsqu'il est présent sur les plages. La plus grande plage de sable du monde se trouverait dans l'extrême Sud-Est du Bangladesh. Nommée Cox's bazar, elle s'étire sur 120 kilomètres de long, de l'embouchure du fleuve Bakkhali jusqu'à Teknaf.

CHÂTEAUX ET PÂTÉS

Nous savons depuis que nous sommes enfants, qu'il est impossible de faire un château avec du sable sec. Le sable, en effet, n'acquiert une cohésion qu'à partir d'une certaine teneur en eau. C'est aussi la raison pour laquelle, pour construire un château de sable, il faut attendre d'abord... que la marée descende pour avoir du sable humide ou alors l'humecter en versant de l'eau dans son seau !

Pourquoi ? Parce que lorsqu'on ajoute de l'eau dans un milieu granulaire, des ponts capillaires se forment entre les grains qui constituent ce milieu. Les liaisons hydrogènes fournissent aux molécules d'eau une grande cohésion et des propriétés

remarquables au nombre desquelles une forte tension superficielle. C'est cette tension qui permet aux ponts capillaires d'associer les grains entre eux. À l'aide de notre seau, continuons d'ajouter de l'eau à notre tas de sable. Le nombre de ponts augmente et la cohésion du sable aussi... jusqu'à un certain seuil : si les ponts capillaires s'étendent et que les grains s'éloignent, l'intensité de la liaison capillaire décroît.



Fig 49 • Château de sable.



Si la force de la liaison capillaire est inversement proportionnelle à la distance des grains, la compaction du sable humide sera un facteur supplémentaire de résistance de notre château... d'où l'intérêt de bien tasser notre seau à coups de pelle !

Enfin, puisque nous sommes à la plage, notre eau est chargée en sel, du chlorure de sodium de formule chimique NaCl. L'eau de notre château s'évapore progressivement et le sel transporté vers la surface cristallise. Il remplace superficiellement les ponts d'eau, donnant à notre construction une dureté de surface qui ressemble à une croûte (*Fig. 49*).

Autres usages

Du fait de sa facilité de manipulation, le sable est également employé lorsque l'on a besoin d'acheminer de la matière (peu importe sa nature) dans un endroit, par exemple pour servir de lest ou pour protéger (sac de sable contre les éclats d'explosion et les balles, sacs de sable pour conforter les digues lors des inondations...).

Il est utilisé comme abrasif dans des usines pour nettoyer des pièces métalliques : ce procédé est le sablage.

Le sable est également utilisé dans l'industrie textile en jet à haute pression pour donner l'effet délavé aux jeans.

Il sert à amender les terres agricoles pour à la fois augmenter le pH d'un sol trop acide (ex. : culture maraîchère) et améliorer la texture des terres et bien sûr il constitue un apport minéral (carbonate de calcium, pour ce qui est du sable coquillier) pour certaines cultures (ex. : choux).

Avec les dunes, il est également un élément indispensable à la protection de la côte. On l'utilise en défense côtière, pour le rechargement des plages qui vise à contrecarrer l'érosion, ou pour la création de certaines îles artificielles en particulier celles du golfe Persique (*Fig. 44*).

4 Le Quartz et l'Homme

Le quartz est le constituant essentiel de la majeure partie des sables de la planète. Ce minéral a été particulièrement utilisé pour ses propriétés physiques mais a aussi nourri une grande quantité de mythes et de croyances.

La montre à quartz

En 1880, deux physiciens français Pierre et François Curie (le futur Prix Nobel et son frère) découvrent les propriétés piézoélectriques du quartz. Concrètement, cela signifie que le cristal de quartz se polarise électriquement lorsqu'il est soumis à une pression mécanique ou se déforme lorsqu'il est soumis à un champ électrique.

Tout choc sur un cristal engendre des vibrations mécaniques, d'amplitude maximale selon des directions particulières liées à la structure atomique du cristal de quartz. Ces dernières causent des charges électriques variables. Ces vibrations, mises en forme et associées à un moteur synchrone, sont à l'origine du mouvement des aiguilles d'une montre. C'est cette même propriété piézoélectrique qui est mise à profit dans les allume-gaz où la pression exercée dégage une étincelle qui permet d'allumer le feu sous nos casseroles.

Production de feu

Le quartz peut être employé, tout comme le silex, pour démarquer un feu, en percutant un morceau de quartz aiguisé contre une lame en acier (*Fig. 50*). Lors de ce frottement, des particules d'acier sont arrachées et se consomment au contact de l'oxygène de l'air. L'étincelle ainsi produite permet d'enflammer un matériau combustible



© CC-BY-SA-3.0, S. Moreau

Fig 50 • Fusil avec allumage par un silex. Vue du mécanisme (modèle India Pattern, utilisé au milieu du XIX^e siècle).

tel l'amadou ou la paille. C'est aussi ce principe qui été utilisé dans les fusils à silex.

LE SABLE ET L'HÉRALDIQUE

En héraldique (Fig. 51), le sable représente le noir avec lequel il partage la symbolique. Du latin médiéval *sabellum*, emprunté au polonais *sabol* ou au russe *sobol*, il désigne la zibeline dont une variété possède une fourrure d'un noir intense. Selon Vulson de La Colombière, le noir aurait été nommé sable par les anciens hérauts « pour ce qu'il vient de la terre, et de sa qualité froide et sèche, étant la première des couleurs en la nature, et la dernière en l'art ». D'autres auteurs prétendent que cette acception provient d'un sable noir dont on se servait pour dérouiller les armes. Le noir est la contre-couleur du blanc.

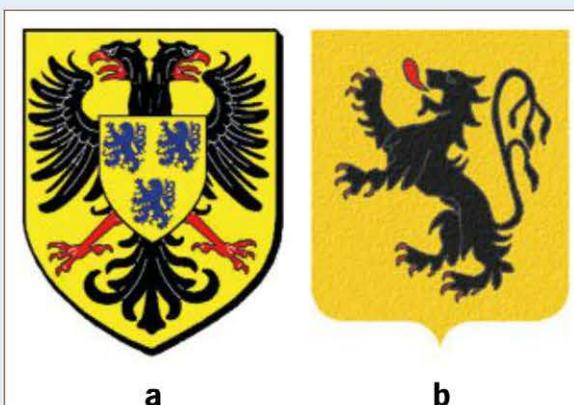


Fig 51 • Blasons.

a. Blason de Cambrai : d'or (jaune) à l'aigle bicéphale de sable (noir), becquée, lampassée et membrée de gueules, chargée sur le poitrail d'un écusson d'or à trois lions d'azur.

b. Blason de la région Nord : d'or (jaune) au lion de sable (noir) armé et lampassé de gueules.

Le quartz dans les légendes traditionnelles

Le cristal de roche (quartz hyalin) joue depuis longtemps un rôle important dans les croyances et les pratiques magiques, ou chamaniques, de nombreux peuples. Chez les Romains par exemple, les riches praticiens, qui croyaient que le quartz était de la glace qui ne fond jamais, conservaient des blocs de quartz hyalin pour se rafraîchir pendant les périodes de canicule. Les Égyptiens l'utilisaient comme troisième œil et le déposaient sur le front des défunts pour aider l'âme à trouver son chemin. Dans certaines cultures traditionnelles (Aborigènes d'Australie, Négritos de la péninsule Malaise, Amérindiens...), le quartz hyalin est considéré comme d'origine céleste, parfois même comme de la « lumière solidifiée ». Il confère leur pouvoir aux chamans et *medicine-men* ; lors des rites d'initiation, des morceaux de quartz peuvent être introduits dans le corps du néophyte, par exemple en lui faisant boire une eau contenant des cristaux. Divers mythes font référence à

des lieux surnaturels tapissés de cristaux, ou à un trône de cristal utilisé par l'Être suprême. D'autres traditions, notamment dans les cultures de l'océan Pacifique ou amérindiennes, évoquent le pouvoir magique de voler, conféré par le cristal de roche.

Une trace de ces croyances, avec le quartz, s'est maintenue dans certains contes traditionnels européens, évoquant une « montagne de verre » ou de cristal. Il s'agit d'un lieu où l'on se rend pour obtenir le pouvoir sur les animaux, sur la vie, la mort et la maladie. On la retrouve dans un conte russe intitulé *La Montagne de cristal* et dans certains contes de Grimm comme *Le vieux corbeau*, *Le corbeau*, *Le tambour* ou *Le vieux Cricrac*.

LES TABLEAUX DE SABLE DES NAVAJOS

Chez les indiens Navajo de l'Arizona, du Nouveau Mexique et de l'Utah, lorsqu'un membre de la tribu est souffrant, on fait appel à un chamane ou *medecine-man* pour le soigner. Les peintures de sable (Fig. 52) sont l'un des éléments les plus importants de la cérémonie de guérison. Les Navajos les nomment *iikààh*, ce qui signifie « l'endroit par lequel les dieux viennent et vont ». Elles sont réalisées par le chamane ou ses assistants durant les quatre derniers matins de la cérémonie. À travers des motifs, élaborés et colorés, dont les teintes noire, rouge, jaune, blanche et turquoise sont sacrées aux yeux des Navajo, les Êtres sacrés sont contactés afin de guérir le patient. Le grand-père de tous les dieux, qu'on appelle également « Dieu qui parle » vient ainsi durant la nuit guérir le malade. Dès la fin de la cérémonie, les peintures sont détruites.



Fig 52 • Tapis copiant un tableau de sable des indiens Navajos.

Pour réaliser ces peintures, les Navajos utilisent des sables de couleurs variées de la région mais aussi de la farine de maïs, des grains de pollen, des pétales de fleurs pulvérisés et du charbon de bois.

LE MARCHAND DE SABLE

Le marchand de sable était, dans les années 1960, l'employeur de Nou-nours, dans l'émission télévisée *Bonne nuit les petits*. Personnage fabuleux, il laisse tomber du sable sur les yeux des gens pour les endormir. En effet, les yeux se ferment par réflexe à cause du picotement provoqué par le sable. Du coup, dans certaines versions et plus particulièrement les versions germaniques, le personnage n'est pas forcément bienveillant !!!

De supposées légendes mayas prétendaient que tout le savoir du monde était enfermé dans 13 crânes en cristal de roche. Certains auraient d'ailleurs été découverts au cours de campagnes de fouilles en Amérique du Sud et ont ensuite été exposés dans des musées. La réalité est moins excitante : ces crânes auraient en fait été sculptés au XIX^e siècle dans du quartz brésilien par un antiquaire allemand amateur d'ésotérisme... ce qui n'a pas empêché Steven Spielberg d'en faire l'une des aventures de son héros Indiana Jones !

Quartz modifié - mysticisme

À la suite de l'héraldique (*Fig. 51*), le symbolisme du sable est à rapprocher de celui des déesses du monde souterrain, telles Cybèle, Déméter, Artémis d'Éphèse, Isis, toutes prototypes de nos mystérieuses Vierges noires. Contrairement aux Vierges blanches qui donnent naissance, ces Vierges noires redonnent la vie après la mort du dieu (Attis, Adonis, Osiris, etc.) et symbolisent la résurrection.

On trouve souvent dans le commerce des pierres sous la dénomination de « quartz mystique ». Ces pierres ont une base naturelle en quartz hyalin. Pour convertir ce quartz incolore de qualité parfaite à l'œil en un quartz mystique, on utilise quelques procédés de hautes technologies. Le quartz taillé et poli est enduit avec un film d'oxyde de titane extrêmement mince qui se lie à chaud avec le quartz au niveau moléculaire. Ce traitement artificiel est également appliqué à d'autres pierres fines ou précieuses quand leur coloris est trop diaphane afin de rehausser leur coloris et leur valeur marchande. Il s'agit donc d'une dénomination purement commerciale, qui ne modifie absolument pas la nature de la pierre et ne lui attribue aucun « pouvoir », même si les voyants et sorciers pratiquent la divination en regardant dans des boules de cristal !!

Croyance sur l'absorption des « ondes néfastes »

Certaines personnes utilisent des pierres de quartz (majoritairement rose ou fumé) afin de se prémunir des « mauvaises ondes électromagnétiques » émises par les équipements électroniques. Il s'agit là de spiritualisme : en effet si le quartz est lui-même légèrement opaque à certaines ondes qui le traversent, il n'« aspire » en aucun cas les rayon-

nements passant autour de lui et ne constitue donc pas un blindage électromagnétique... et encore moins un amplificateur pour les ondes positives ou une protection contre les ondes négatives que d'autres individus peuvent émettre !

Le quartz et les technologies de pointe

Les nouvelles technologies exigent une pureté absolue du sable de quartz, et même la grande qualité du sable de Fontainebleau n'est plus suffisante. La silice la plus pure est obtenue en fondant de gros cristaux de quartz (oxyde de silicium) pour en faire des tubes, des creusets dans lesquels on produit une nouvelle substance que l'on ne trouve pas à l'état naturel. Le silicium est isolé à haute température. On obtient alors des blocs constitués de multiples cristaux. Ce silicium est fondu puis cristallisé en un seul cristal à partir d'une particule, que l'on appelle germe. Ces gros monocristaux sont découpés précisément suivant l'un des plans du réseau cristallin (*Fig. 53*). Sur les fines tranches polies, on grave les circuits intégrés.

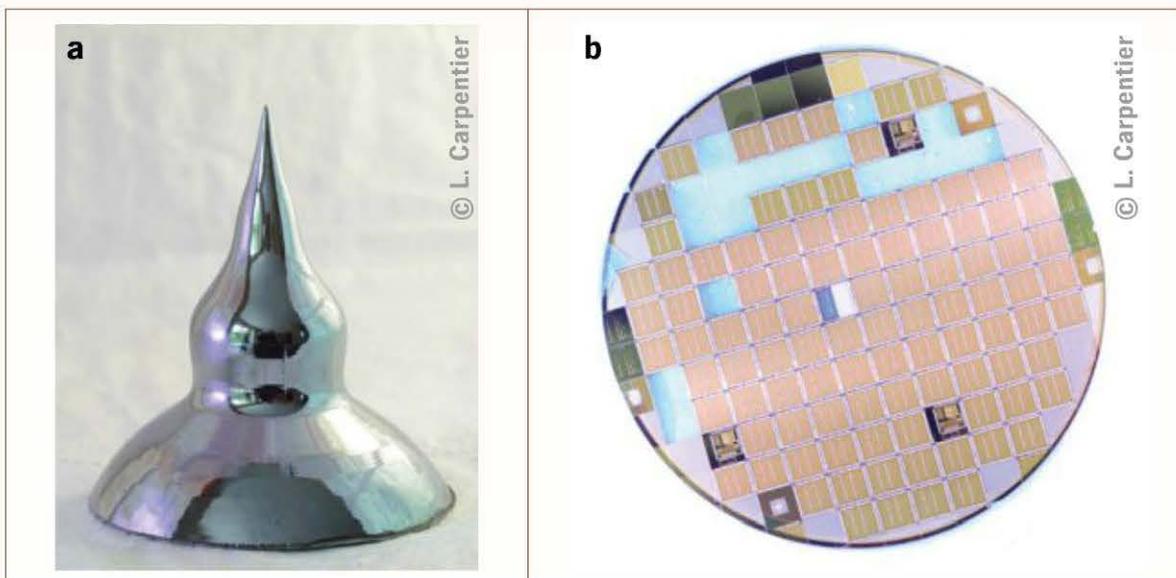


Fig 53 • Le silicium des puces.

a. Un monocristal de silicium réalisé à partir de sable (de quartz) très pur, tel le sable de Fontainebleau (plus grand diamètre 12 cm).

b. Tout un ensemble de puces est élaboré avec une tranche de ce cristal, certaines puces ont été enlevées pour souligner leur disposition (diamètre : 15 cm).

Sur une seule tranche de silicium de 10 à 20 cm de diamètre, on dessine une centaine de micro-processeurs comprenant chacun des millions de processeurs ! L'apport de cette maîtrise du silicium a été si important qu'il a marqué la fin du xx^e siècle, à tel point que le futur semblait

marqué par le silicium : raison pour laquelle on trouve des bâtiments en forme de cristaux de quartz au Futuroscope de Poitiers (*Fig. 54*).

Une autre petite révolution apportée par le silicium fut les silicones aux multiples usages. La métallurgie du silicium a aussi envahi l'automobile, de la culasse aux pneumatiques en passant par les ordinateurs de bord.

La haute technologie ne peut plus se passer du quartz, qui peut scanner le temps.



Fig 54 • Cristal de quartz au Futuroscope.

Magnifique image montrant les bâtiments du Futuroscope ; ils dominent le paysage comme le quartz, le silicium domine aujourd'hui nos activités.

5 Le sable réservoir

Les grains de sable ne sont jamais totalement jointifs. Entre eux, il y a des vides qui en font un matériau poreux. Les pores sont de forme plus ou moins sphérique, de petites dimensions (ordre de grandeur millimétrique), ménagés entre les particules solides ou grains, qui constituent le réservoir. Les dimensions des vides sont étroitement liées à celles des grains, dont la mesure est plus directement accessible. Les diamètres des grains des roches meubles perméables s'étalent dans une gamme de 0,06 à 16 mm. Ils sont plus petits, de 0,1 à 0,001 mm, soit d'ordre de grandeur micrométrique, dans les argiles, milieu dit imperméable.

Le sable se caractérise par une porosité importante. Selon son histoire, il est parfois un véritable réservoir de substances utiles aux activités humaines. On exploite ainsi des sables bitumineux, riches en hydrocarbure et des sables aquifères, qui constituent d'importants réservoirs d'eau.

La porosité

La porosité (*Fig. 55*) dépend de la forme, de l'agencement des grains de sable, mais aussi de leur degré de classement, de compaction, de cimentation.

Les ingénieurs spécialistes de génie civil distinguent deux types de porosité. La première, la porosité totale d'un sol ou d'une roche est le rapport du volume des vides et des interstices (V_v) de cette roche par rapport au volume total de l'échantillon (V_t). Elle s'exprime en pourcentage.

$$n = V_v/V_t (\%).$$

La seconde définition de la porosité est celle de la porosité efficace (n_e). Elle correspond au volume de l'eau qui s'écoule dans un échantillon. Elle se mesure par le rapport entre le volume d'eau libre ($V_{\text{eau-libre}}$) sur le volume total (V_t) de l'échantillon.

$$n_e = V_{\text{eau-libre}}/V_t (\%).$$

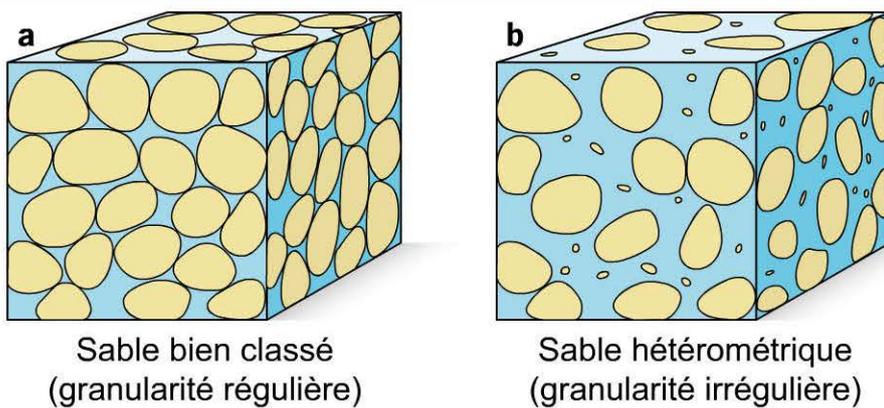


Fig 55 • Porosité dans deux sables bien et mal classés.

- a. Sable bien classé (granularité régulière).
- b. Sable hétérométrique (granularité irrégulière).

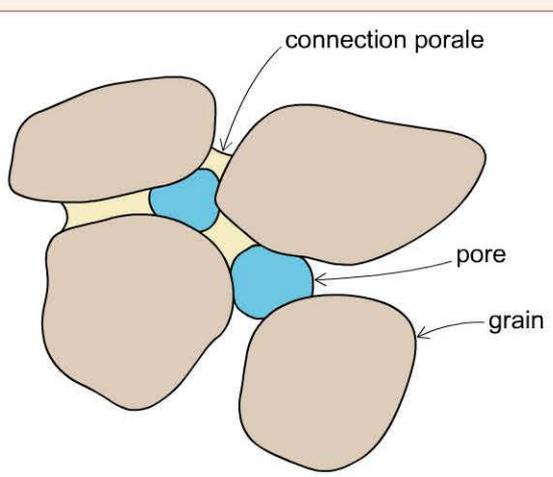


Fig 56 • Sable réservoir.

Les zones indiquées « connection porale » permettent aux fluides de circuler entre les différents grains qui constituent la roche.

Dans un sable réservoir, les pores communiquent entre eux (*Fig. 56*). Sans connexion entre les pores, pas de circulation de fluide. Ainsi, la pierre ponce, une roche volcanique qui renferme un grand nombre de vides sans interconnexions, est imperméable. Si la porosité est la propriété du réservoir de stocker ou de libérer un fluide, la perméabilité est ainsi son aptitude à conduire son écoulement.

Sables bitumineux

Le sable bitumineux (ou *bitumeux*) est un mélange de bitume brut (une forme semi-solide de pétrole brut), de sable, d'argile et d'eau. En d'autres mots, c'est un sable enrobé d'une couche d'eau sur laquelle se dépose une pellicule de bitume. Plus la pellicule de bitume est épaisse, plus les sables bitumineux sont riches en quantité de pétrole extractible. Après extraction et transformation des sables bitumineux, on obtient le bitume, qui est un mélange d'hydrocarbures sous forme solide, ou d'un liquide dense, épais et visqueux. Ces gisements de sables bitumineux sont exploités notamment en Alberta, au Canada (*Fig. 57*). Ils sont aussi connus au Venezuela, dans le bassin de l'Orénoque mais également dans

quelques autres endroits de la planète. Les gisements connus se trouvent à faible profondeur, voire carrément à la surface.

Le bitume est constitué de la fraction la plus lourde du pétrole. Son origine est incertaine mais il semble possible qu'au départ, il s'agissait d'un pétrole classique qui, conservé dans des réservoirs trop proches de la surface, a perdu ses composés légers par dégradation microbienne, évaporation et aussi lavage par l'eau d'infiltration. Cette hypothèse ne fait cependant pas l'unanimité des spécialistes.



Fig 57 • Sables bitumineux d'Athabasca (Canada).

La forêt a laissé la place à de gigantesques carrières d'exploitation.

Sables aquifères

L'eau y circule grâce à la connexion entre les pores qui communiquent dans le sens de l'écoulement de l'eau souterraine, permettant ainsi son déplacement. L'eau suit donc des trajets plus ou moins complexes, identifiant des lignes de courant.

Les plus connus des sables aquifères sont représentés par les nappes alluviales. Contenue dans les grands épandages de sables, graviers et galets des fleuves et des rivières, la nappe alluviale est le lieu privilégié des échanges avec les cours d'eau et les zones humides. Ce type de nappe est souvent réalimenté par les crues et, à l'inverse, restitue de l'eau dans le cours d'eau en période de sécheresse. Elles fournissent 60 % des eaux souterraines captées en France, en particulier grâce à leur facilité d'accès et leur bonne productivité.

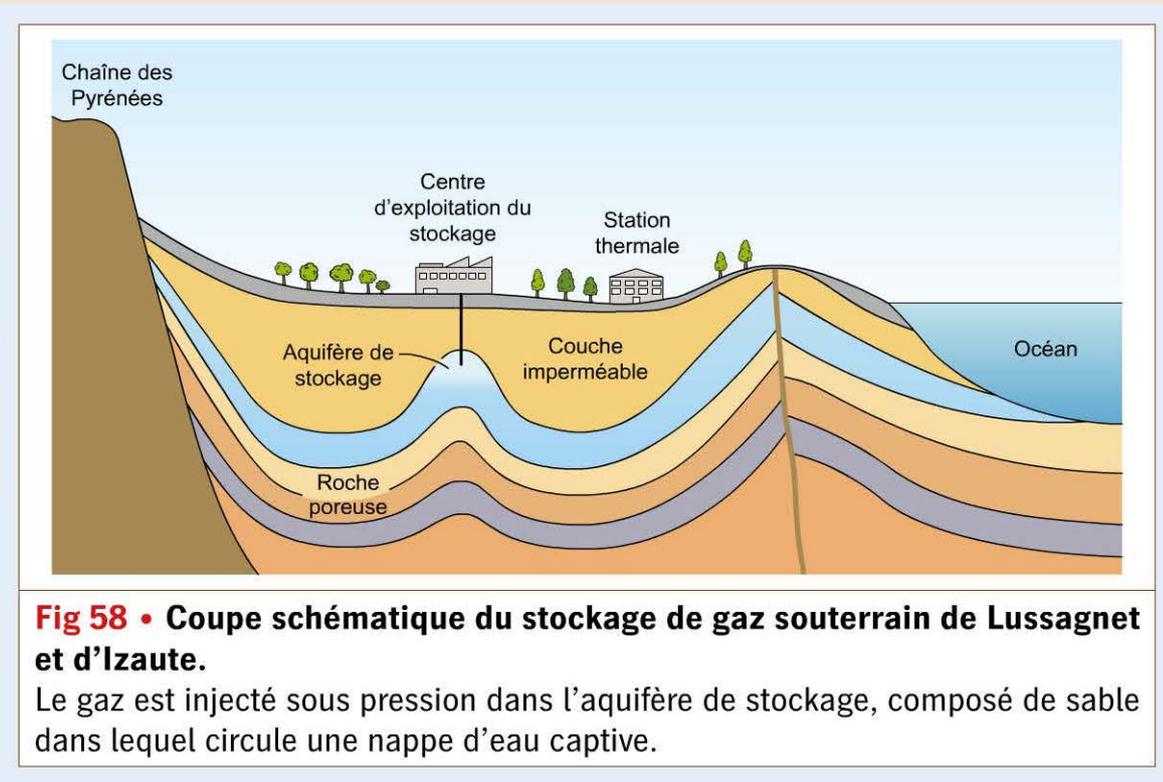
Dans d'autres cas, si le sable est enfoui profondément et séparé de la surface par une couche géologique imperméable (d'argile par exemple), il forme ce que l'on appelle un aquifère captif. L'eau y est sous pression et peut jaillir dans des forages dits artésiens lorsque la configuration s'y prête. L'alimentation en eau de ces aquifères ne peut se faire que par des zones d'affleurement limitées ou par des communications souterraines. Les nappes captives sont souvent profondes.

LE SABLE, LA GRANDE RÉSERVE D'EAU DU BASSIN DE PARIS

L'aquifère le plus important du bassin de Paris se trouve dans des sables verts qui ont environ 110 millions d'années (Albien). Elle est la plus profonde dans la région de Melun. Cette réserve d'eau de bonne qualité, estimée à 700 milliards de m³, n'est cependant pas inépuisable si bien qu'un quota de prélèvement a été imposé aux départements et cette eau est réservée à l'alimentation. Dans le centre du bassin, il s'agit d'une eau tombée il y a 30 000 ans, le temps de la nature n'étant pas un temps humain.

LE STOCKAGE DU GAZ DANS LES SABLES

Si les sables sont des réservoirs naturels de substances utiles, ils sont parfois employés comme des réservoirs artificiels. Dans le bassin d'Aquitaine, il y a 40 millions d'années, les petits villages de Lussagnet et d'Izaute étaient situés en bord de mer. Celle-ci a laissé d'importants dépôts de sable. Les sables de l'une de ces couches renferment un aquifère qui s'étend sur le Sud-Ouest de la France, des Pyrénées jusqu'au nord de la région bordelaise et aux contreforts du Massif central. Au fil des années, l'émergence des Pyrénées a façonné des plissements au sein de cette couche tandis que l'érosion de la chaîne de montagne a recouvert ces dépôts marins d'une couche géologique étanche, formée principalement de graviers, sables argiles indurés sur plus de 500 mètres d'épaisseur. La couche sableuse de deux de ces plissements est aujourd'hui utilisée comme stockage (*Fig. 58*). Les stockages de Lussagnet et d'Izaute, qui représentent le quart des capacités de stockage françaises, se situent entre 500 et 900 mètres de profondeur. Le gaz y est injecté sous pression de 64,4 bars (ce qui signifie qu'il occupe 64,4 fois moins de place au fond qu'en surface), abaissant le niveau de la nappe captive. Lorsqu'en surface, on réouvre les vannes pour récupérer le gaz, la nappe qui n'est plus comprimée récupère son volume initial, chassant le gaz vers la surface. La capacité de ce stockage est de 3,5 milliards de m³. >



6 La physique du sable

À l'heure où nous pilotons dix ans à l'avance des sondes qui vont se poser sur des comètes à 500 millions de kilomètres, les milieux granulaires, comme le sable, défient encore la compréhension des physiciens par leurs comportements. L'observation de quelques expériences permet d'aborder certains aspects. L'observation fait partie de la démarche scientifique et apporte un moyen de développer la curiosité.

Pente d'équilibre

Si l'on verse, de façon constante, du sable sec sur une surface plane, la base du tas s'élargit au fur et à mesure que sa hauteur augmente. Pourtant, quelle que soit sa hauteur, la pente ne dépasse jamais un angle donné, formant ce que l'on appelle la pente d'équilibre. Il se forme ainsi un cône parfait (*Fig. 59*). Si l'on observe attentivement ce qui se passe, on note que les grains ruissellent en avalanches depuis le sommet vers la base, dès que cet angle est atteint, de manière à retrouver naturellement la pente d'équilibre. La valeur limite de cet angle dépend de la granulométrie du sable. Elle se situe autour de 33° . Ceci explique que lorsqu'une voiture est ensablée dans le désert, il faut évacuer des quantités considérables de sable sous les roues avant de pouvoir la dégager... à moins d'avoir pris soin d'emporter avec soi des plaques de désensablage !!!

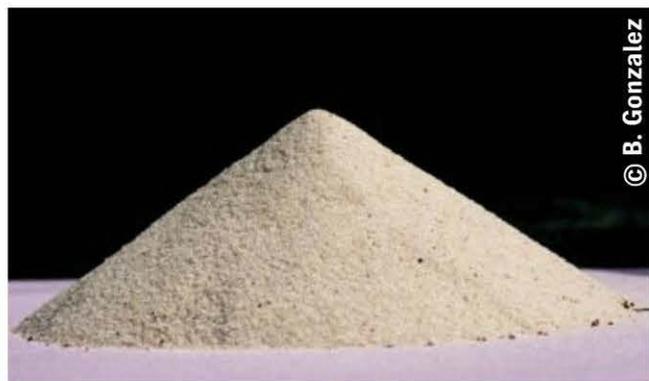


Fig 59 • Tas de sable : un cône.

Un petit tas de sable (celui de Fontainebleau) fait un cône dont la pente naturelle est d'environ 33° .

UNE PYRAMIDE PARFAITE

Faites couler doucement du sable sec sur un cube. Le tas de sable va progressivement s'élever jusqu'à ce que sa base recouvre exactement celle du cube. Les faces du tas seront alors complètement planes et le tas formera donc une pyramide parfaite (Fig. 60) dont la pente de tous les côtés formera un angle d'environ 33° avec la base.



Fig 60 • Pyramide de sable.

Tas de sable sur un cube : il dessine une pyramide dont les angles font environ 30° .

Sable contre éponge

Quand on presse une éponge, l'eau coule. Et avec le sable ? Lorsque l'on marche sur du sable humide, on a l'impression que le sable devient sec sous nos pas alors qu'il reste plus humide alentour. Le sable se comporte différemment de l'éponge.

À marée basse, le sable est compacté par le va-et-vient des vagues qui redistribue les grains. Ils sont ainsi parfaitement bien rangés, bien empilés les uns sur les autres (Fig. 61). Lorsque l'on marche sur ce sable, les grains ne peuvent se déplacer relativement les uns aux autres qu'en s'écartant. Le sable alors se dilate. Contrairement à notre intuition, le sable compressé occupe plus de volume que le sable tassé (Fig. 62). Le

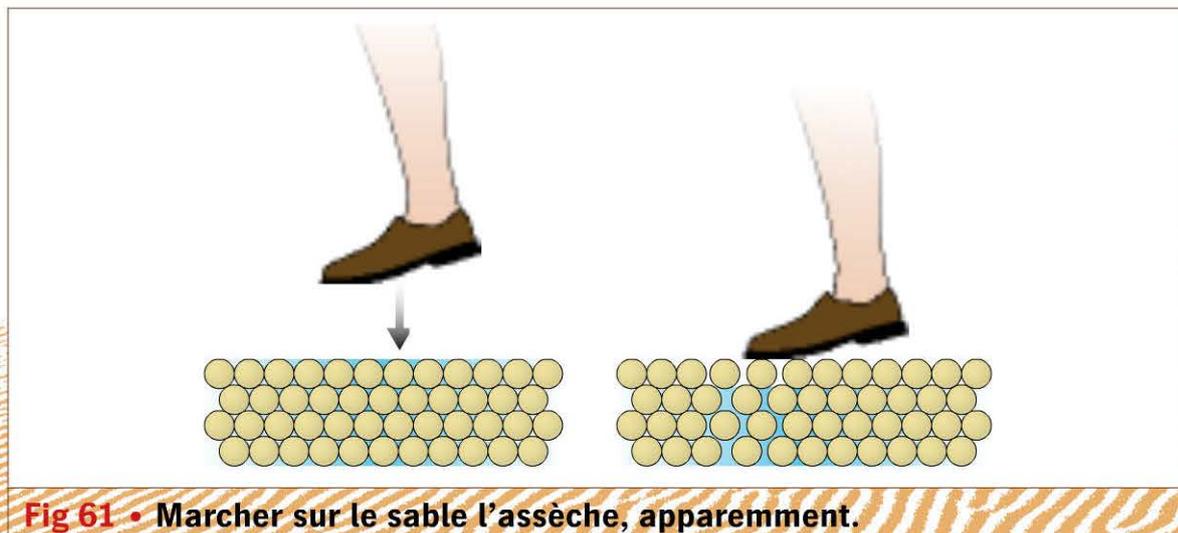


Fig 61 • Marcher sur le sable l'assèche, apparemment.

volume des grains est invariable ; c'est donc le volume interstitiel, l'espace entre les grains qui croît. L'eau migre dans le volume créé par l'écartement des grains entre eux, s'infiltré entre les grains et la surface s'assèche, alors qu'elle reste humide alentour.

UN SABLE COMPRESSÉ COMPREND PLUS D'EAU

Pour expliquer ce phénomène, Reynolds monta un dispositif (Fig. 62) qui consiste en un ballon souple rempli de sable, surmonté d'un tube. Tube et ballon sont remplis d'eau. Si l'on presse le ballon, contrairement à ce que l'on attend, l'eau descend dans le tube : la contrainte exercée sur le sable tassé crée des pores que l'eau va remplir.

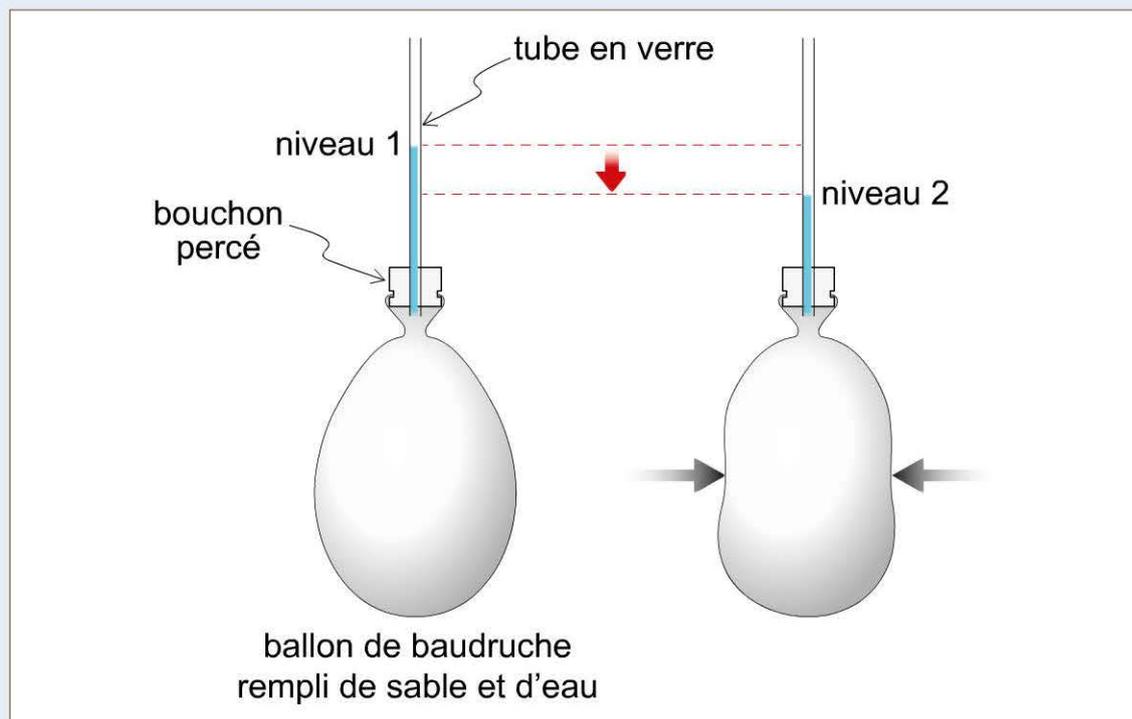


Fig 62 • Dispositif expérimental de Reynolds.

Lorsque l'on presse un ballon rempli de sable saturé en eau, le niveau de l'eau s'abaisse dans le tube.

Pour visualiser ce qui se passe entre les grains, on peut utiliser un système plus facilement visible de quatre billes maintenues par un élastique (Fig. 63). Si l'on exerce une pression, les billes se déplacent les unes contre les autres en maintenant un contact entre elles mais l'espace interstitiel augmente.

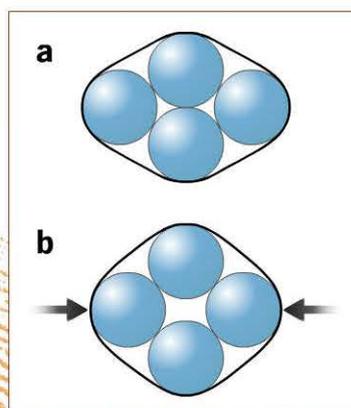


Fig 63 • L'espace entre des billes varie selon leur agencement.

a. Un élastique maintient quatre billes en contact.
b. Quand on presse l'ensemble (flèches noires), l'espace interstitiel central augmente.

Un « grain » de place !

Parler du volume d'un tas de sable invite à être prudent : parle-t-on du volume global ou du volume du matériau ?

Petite expérience encore : si on verse 0,2 litre d'eau sur 0,3 litre de sable dans un récipient, le volume final n'est pas 0,5 litre mais reste 0,3 litre parce que l'eau s'est introduite entre les grains. L'expérience est encore plus spectaculaire si on associe deux solides : mettons 0,2 litre de billes dans un récipient et la même quantité de sable fin dans un autre récipient (*Fig. 64*). Si on verse doucement le sable sur les billes, les grains s'insèrent dans les espaces entre les billes et le volume final sera toujours de 0,2 litre. Il semble y avoir un gain de place.

Cette observation est appliquée aux bétons : la partie la plus fragile d'un béton est le ciment, il convient donc de mélanger des composants de taille variable : graviers et sable.

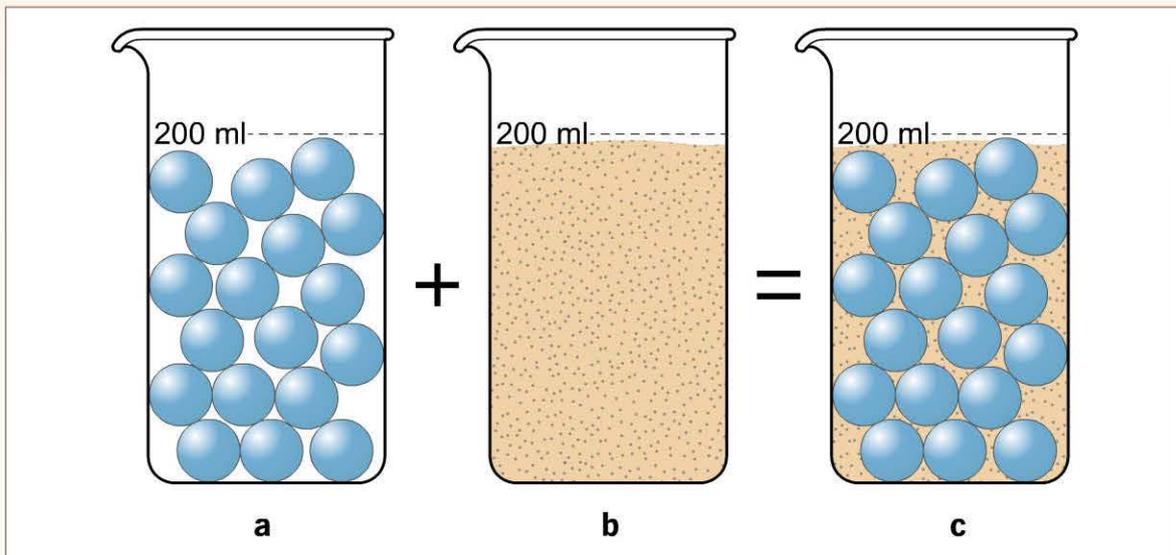


Fig 64 • Le comblement des lacunes.

a. Le volume des billes seules ; **b.** le volume du sable seul ; **c.** le sable versés sur les billes... occupe le même volume !

Effet de voûte

Remplissons à moitié un tube avec du sable sec. Compactons le sable en tapant doucement le tube sur le sol puis retournons-le d'un seul coup. Tout le sable ne tombe pas sur le sol mais une partie reste coincée dans le tube. C'est ce que l'on appelle l'effet de voûte. Ce phénomène s'explique par la formation aléatoire de véritables voûtes, constituées par des grains qui soutiennent ainsi tous ceux qui sont coincés au-dessus d'eux,

les empêchant de tomber en suivant les lois de la gravité. En fait, les grains frottent les uns contre les autres et se coincent en s'appuyant sur les parois du tube, comme les voûtes d'un pont ou celles des églises. Les autres grains, qui ne sont pas comprimés, sont alors enfermés au-dessus de ces voûtes qui supportent les efforts (*Fig. 65*).

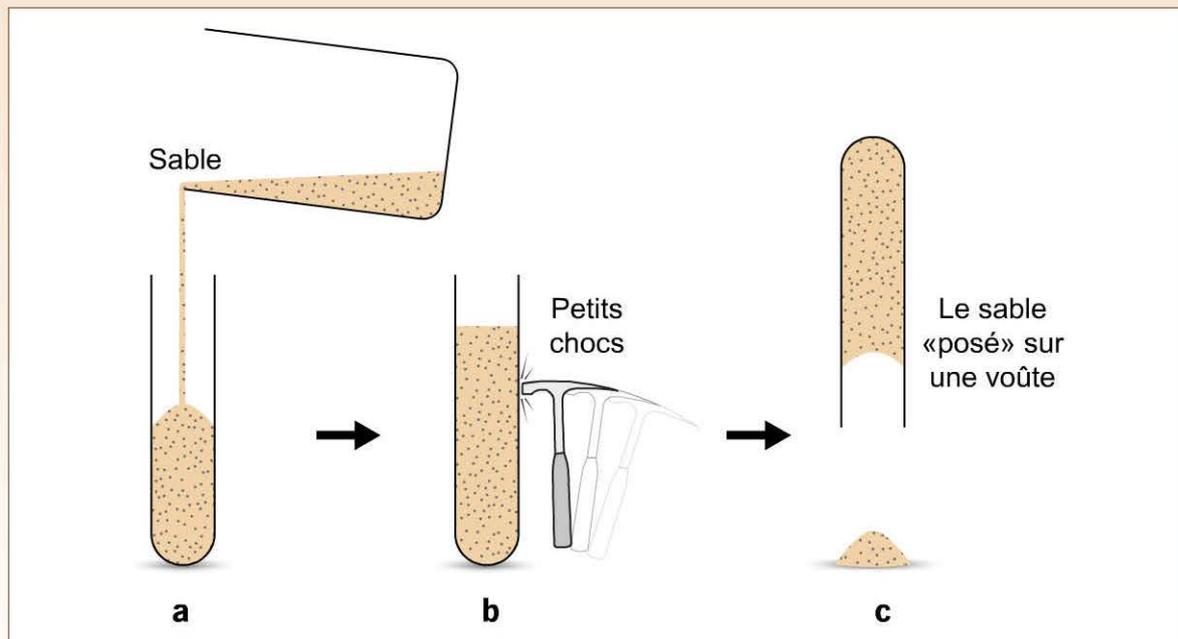


Fig 65 • Effet de voûte dans un tube.

a. On remplit le tube ; **b.** on donne quelques chocs au contenant pour tasser le sable, le tube est désormais plein, il sera retourné rapidement ; **c.** du tube retourné, seule une petite partie de sable s'est écoulée, le reste est bloqué par des grains disposés en voûte.

Sable dur comme du béton

Si l'on met un bâton dans un récipient plus haut que large et que l'on verse du sable doucement, en tapotant régulièrement pour le tasser, le bâton finit bien sûr par tenir tout seul. Rien de spectaculaire jusque-là. Mais si on veut retirer le bâton en le soulevant, ... c'est l'ensemble bâton + sable + contenant qui se soulève ! (*Fig. 66*). Le sable est devenu dur, suffisamment pour que le bâton ne puisse sortir du sable. Pourquoi ? De fait, les petits chocs ont permis au sable de se tasser, de faire en sorte que les grains soient bien disposés de manière compacte. Ce phénomène se retrouve avec les paquets de café moulu. Quand ils sont bien tassés, on ne peut les déformer.

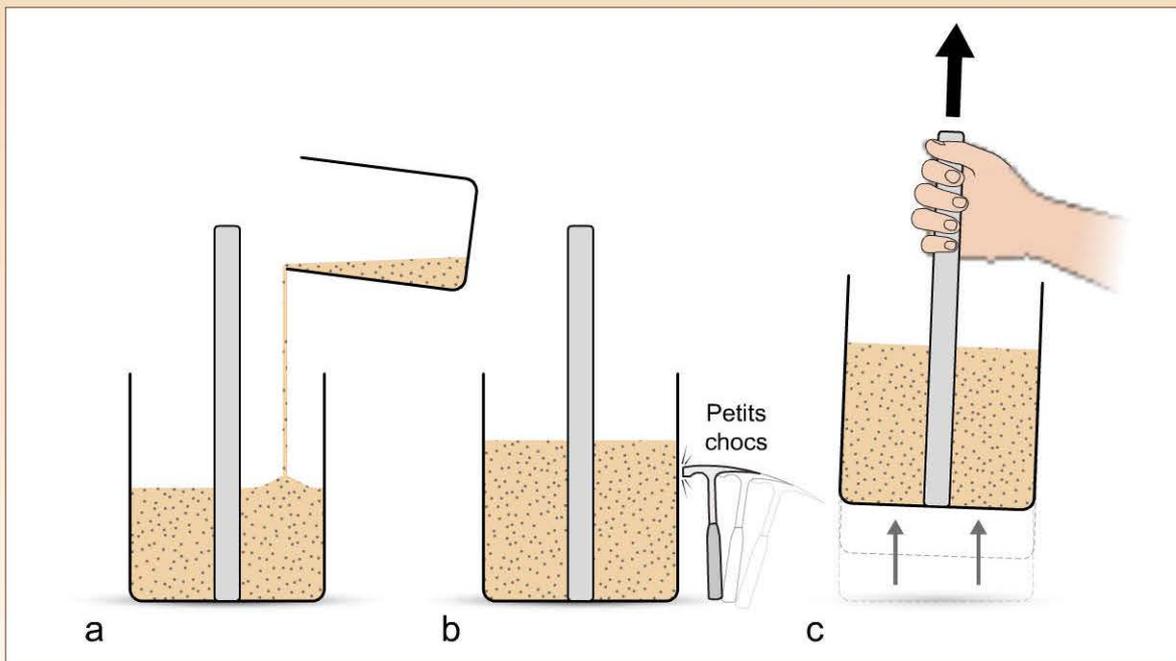


Fig 66 • Arches de sable.

a. On remplit de sable le récipient dans lequel on a mis le bâton ; **b.** on donne quelques chocs pour tasser ; **c.** le bâton ne veut plus sortir du sable si on le tire verticalement car les grains forment des arches naturelles.

La ségrégation des grains

Si l'on agite un sac de sable hétérogène, les particules plus fines vont, par gravité, se glisser entre les plus grosses, puis les faire remonter progressivement, en comblant les espaces vides situés en bas. Pour expliquer les mécanismes de séparation des petits et des gros grains, les physiciens ont proposé plusieurs mécanismes possibles qui dépendent de la force avec laquelle on agite.

Un des mécanismes invoqués est de considérer que lors des vibrations, les gros grains et les petits ne se déplacent pas en bloc (*Fig. 67*). Sous les gros fragments, se forme un espace vide que remplissent les petits grains. La séquence lacune-remplissage se produit jusqu'à ce que les gros éléments se retrouvent en surface. C'est le mécanisme retenu pour les pierres des champs (*Fig. 68*).

Un autre mécanisme se passe à grande amplitude de vibration. Dans ce cas-là, les vibrations mettent l'ensemble des grains en mouvement (on parle de convection). Ce mouvement de convection est la même chose que ce que l'on observe quand on fait bouillir de l'eau dans une casserole : l'eau se met en mouvement sous l'effet de la chaleur. Ici, le mouvement de convection est dû à l'agitation. Dans ce mouvement de convection, les gros grains et les petits grains bougent ensemble. En revanche, une fois qu'ils sont arrivés en

haut, les gros grains sont bloqués alors que les petits grains peuvent redescendre. La raison de ce blocage est que dans cette convection, la zone de montée et la zone de descente n'ont pas la même forme et qu'ainsi les gros grains ne peuvent pas suivre le chemin de la descente.

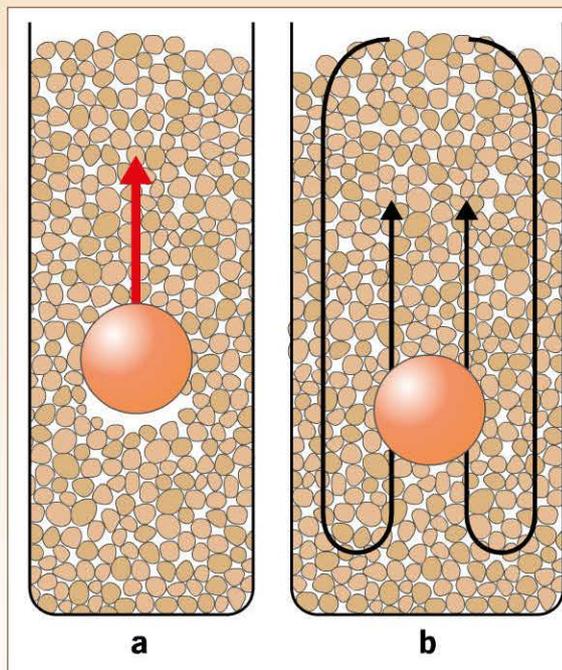


Fig 67 • Ségrégation granulaire d'une bille dans un sable.

- a.** La grosse bille remonte par le remplissage des lacunes sous elle ;
- b.** l'ensemble des grains suit un mouvement convectif (flèches noires). La grosse bille est entraînée par ce mouvement d'ensemble.

POURQUOI LES CAILLOUX REMONTENT-ILS DANS LES CHAMPS ?

Nos ancêtres qui étaient pour la plupart des paysans le savaient bien : il faut régulièrement ramasser les pierres apparues dans les champs ou les pâturages afin de faciliter les semailles et de préserver les animaux. Et il faut recommencer chaque année. C'est pourquoi on dit communément que les pierres enfouies dans les sols remontent spontanément à la surface. Les paysans disent, pour leur part, que « les cailloux poussent » et, dans beaucoup de régions calcaires (Quercy, Beauce, Bourgogne), ces cailloux ont servi à construire des murets en bordure des champs (les murgers). En fait, le sol fait la transition entre la surface de la terre et la roche dure. Plus ou moins épais, il est composé en moyenne de 50 % d'éléments solides, comme les pierres, les limons et l'humus, et de 50 % d'espaces creux, des pores remplis d'eau et d'air.

L'érosion due au vent ou au ruissellement de l'eau est l'une des causes de l'apparente remontée des pierres. Elle fait simplement apparaître les pierres qui se trouvaient là, et qui, trop lourdes pour être emportées, sont mises à découvert.

Mais l'action de l'Homme est prépondérante puisqu'une autre cause de la pousse des cailloux dans les champs est... le labourage. Selon la profondeur à laquelle le soc de la charrue descend, il ramène en surface les pierres et cailloux enfouis par le labour de l'année précédente. Aujourd'hui, l'usage de sous-soleuses qui peuvent descendre à 1,20 de profondeur contribue grandement à ce phénomène. >

Enfin, tout ce qui se promène à la surface du sol joue également un rôle dans la remontée des cailloux ; en particulier, les troupeaux de bétail. Et ce, pour deux raisons. Tout d'abord, leur piétinement compacte le sol, faisant apparaître les pierres sous-jacentes. Ensuite, les vibrations engendrées par leurs déplacements font bouger les pierres, les petites particules ainsi « secouées » passant le long des flancs des grosses, contribuant à les « pousser » vers la surface en fonction du principe de ségrégation des grains (voir supra).

Pour terminer, l'alternance des périodes de gel et de dégel compacte et décompacte les sols, produisant les mêmes effets. Cette alternance favorise également l'apparition de pierres en surface. Ce phénomène est répandu dans les zones où les hivers sont très rudes et très longs (Fig. 68) mais rare dans nos pays tempérés.



Fig 68 • En Mongolie, les alternances de gel et de dégel font naturellement remonter les pierres à la surface.

La liquéfaction des sols sableux

En piétinant sur la plage du sable mouillé, nos pieds se retrouvent submergés par l'eau sous-jacente et nous nous enfonçons. De même, des sédiments traversés par les ondes sismiques se « liquéfient ». Ce type de sol est de faible densité. Il y a donc de l'espace, rempli par l'eau, entre les grains de sable. Lorsque la pression de l'eau est faible, les forces de contact qui s'exercent entre les particules sont suffisamment fortes pour tenir les grains en place et donner à l'ensemble une bonne portance, capable de soutenir le poids des bâtiments. Sous leur poids, la structure granulaire du sable se densifie. Lors du séisme, les ondes de choc compriment le sol plus vite que l'eau

qui ne peut s'échapper faisant ainsi grimper la pression de cette dernière. Plus la pression de l'eau augmente, plus l'eau supporte la charge et moins le sable la soutient. C'est alors que le sol perd sa cohésion et commence à couler comme un liquide. De ce fait, parfois lors de séismes, se produisent des éjections de sable vers le haut, avec des figures d'échappement caractéristiques (Fig. 69). Pour la même raison, des bâtiments penchent ou s'enfoncent (Fig. 70). Parfois, on peut voir le sol bouillonner (à cause de la perte de contacts entre particules) et l'eau jaillir. Ce phénomène s'est produit par exemple lors des tremblements de Terre de Niigata au Japon en 1964, de celui de Sendai en 1978 ou de Christchurch en Nouvelle-Zélande en 2011.



Fig 69 • Illustration d'une figure d'échappement liée à un séisme.

Le tremblement de terre a liquéfié le sable, alors un fluide sableux, qui était enfoui, sous pression, en a « profité » pour s'échapper vers le haut en traversant des sables éoliens. Sommet des sables de Fontainebleau, carrière du Déluge, Marcoussis (Essonne).

Les constructions qui reposent sur de tels sols sont donc plus affectées que celles qui reposent sur de la roche (les maisons des villages de Kabylie construites sur la roche sont encore debout, celles construites sur les sols argilo-sableux, à côté, sont toutes détruites). Ces différences de réactions aux séismes sont appelés « effet de sites ». Le phénomène, souvent observé par les géologues sismologues, n'est cependant compris que dans ses grandes lignes. À tel point que des expériences sont menées dans une navette spatiale pour observer le comportement du sable mouillé sujet à des ondes en apesanteur.



Fig 70 • Phénomène de liquéfaction des sols sableux lors du séisme de Niigata. Quand le sol devient mou, il ne soutient plus les bâtiments, qui peuvent se mettre à pencher, se coucher ou se disloquer. Photo tirée de : <http://hommelibre.blog.tdg.ch/archive/2011/04/19/japon-maintenant-le-sol-se-liquefie.html>

EXPÉRIENCE

Remplissez un seau de sable, sans tasser, et saturez-le en eau jusqu'à ce que celle-ci fasse une petite pellicule à la surface. Posez sur le tout, un gros galet. Il reste en surface. Puis tapez sur le côté du seau avec un bâton à intervalles rapprochés et réguliers. Vous simulez ainsi les ondes d'un séisme. Le galet qui jusque-là restait en surface va s'enfoncer sous l'effet de la liquéfaction du sable. L'effet est inverse avec un sable sec (*Fig. 67*).

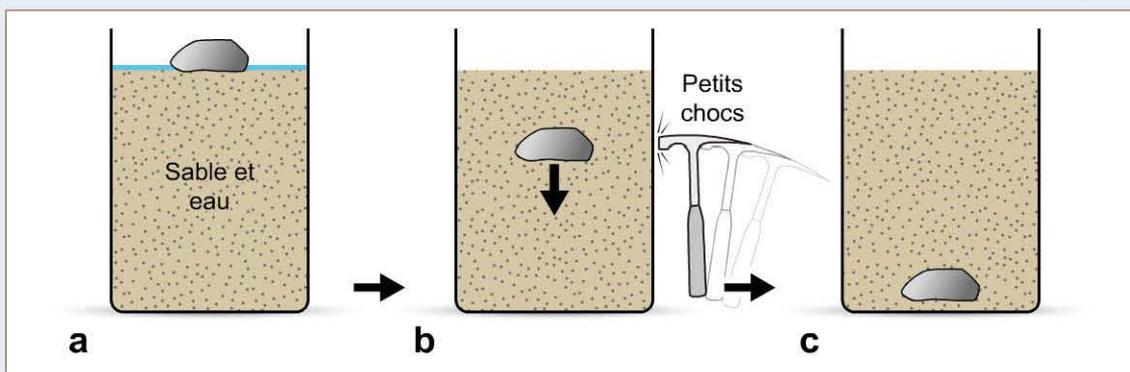


Fig 71 • Effet d'un séisme sur un sol gorgé d'eau.

a. Un caillou posé sur un sable gorgé d'eau ne s'enfonce pas ; **b.** des petites secousses appliquées à l'ensemble voit le caillou sombrer tout doucement ; **c.** le caillou a atteint le fond.

Sable mouvant

Les sables mouvants peuvent être constitués différemment. En effet, il existe deux grandes catégories de sables mouvants :

- les premiers se rencontrent dans les étendues désertiques, qui ne contiennent pas d'eau ! Ces sables mouvants sont uniquement constitués d'air et de sable fin. En effet, le sable adopte parfois une structure aérée et des poches d'air se forment alors sous la surface. Sous une certaine pression, en marchant dessus par exemple, la structure se brise et s'effondre. Le sol s'affaisse et l'écoulement du sable alentour va engloutir éventuellement le malheureux qui a provoqué la déstructuration de l'ensemble ;
- les seconds font appel à l'eau. Ils sont beaucoup plus répandus que les premiers. Classiquement, ils sont composés d'argile, de sable et d'eau. On en connaît par exemple dans de la baie du Mont-Saint-Michel. Ce sont des matières dites thixotropes en général composées de 10 % d'argile, 40 % de sable et 50 % d'eau salée (le sel empêche les grains de se repousser et favorise la formation d'une pâte visqueuse). Au repos, le mélange thixotrope se restructure jusqu'à avoir l'aspect d'un solide (viscosité infinie). En revanche, sous l'effet d'une contrainte constante suffisamment élevée pour casser la structure formée au repos, le fluide déstructure jusqu'à reprendre son état liquide (viscosité faible). C'est un peu ce qui se passe avec du yaourt. Dans son pot, il semble « solide ». Si on le secoue, il devient liquide et perd sa viscosité initiale.

La viscosité est un des facteurs importants des sables mouvants. En fait, pour un volume donné, plus la solution contient de grains, moins elle est liquide et donc plus visqueuse.

Concrètement, dans les sables mouvants plus un mélange est visqueux, plus il est difficile d'en sortir. Cependant, le fait de bouger fait baisser la viscosité et on s'enfonce plus rapidement ! La viscosité peut varier de façon subite dans les matières thixotropes. À la moindre contrainte ou au moindre geste, la viscosité diminue fortement.

SORTIR D'UN SABLE MOUVANT

Du fait que la densité de son corps est proche de 1, un animal ne pourra s'enfoncer qu'à moitié dans un sable mouvant. Contrairement à une idée répandue (popularisée par certains films de genre), un corps pris dans un sable mouvant n'est donc pas aspiré par le fond, mais flotte (deux fois mieux que dans de l'eau). C'est l'augmentation de la viscosité qui le maintiendra immobilisé. De plus, la plupart des zones de sables mouvants ne sont pas très profondes (*Fig. 72*).

Pris dans un sable mouvant, il vaut donc mieux n'utiliser que de gestes doux, afin d'éviter toute nouvelle liquéfaction, et tenter de ramener de l'eau autour de ses membres, en se laissant flotter. Par ailleurs, il vaut mieux s'allonger pour ralentir le processus.



© F. Duranthon



© F. Duranthon

Fig 72 • Membre d'une équipe scientifique coincé dans un sable mouvant dans une rivière malgache.

Il est souriant car les collègues sont là pour le sortir pour la énième fois.

7 La vie dans le sable



Fig 73 • Vigne sur sable à Châteauneuf-du-Pape.

LE SABLE CONTRE LE PHYLLOXERA

Le phylloxera qui a fait tant de dégâts dans les vignes françaises, au tout début du xx^e siècle, est dû à un insecte qui se manifeste sous deux formes successives dans son cycle reproductif. L'insecte vit un moment sur les feuilles sur lesquelles il crée des galles (des boursouflures), puis il vit dans le sol où il creuse des galeries pour aller d'une plante à l'autre et se nourrir des racines. Mais voilà, avez-vous déjà essayé de creuser une galerie dans le sable ? Ça ne tient pas ! Elle s'effondre. Le phylloxera sous sa forme radicicole n'est pas plus malin. Il ne sait pas aller d'une plante à l'autre. Ainsi, il ne peut vivre et se développer dans les sols sableux (*Fig. 73*). C'est ce qui explique que le « vin de sable », le Listel par exemple, n'a pas été touché par le phylloxera. C'est ce qui explique aussi que des viticulteurs ennoient leur vigne chaque année pendant un moment, pour se protéger.

Dans le sable de nos plages

Dans nos régions, entre les grains de sable subsistent de nombreux débris d'organismes sous forme de matière minérale ou organique. Celle-ci sert de nourriture à toute une cohorte de récupérateurs : bactéries, vers, insectes... le milieu sableux n'est donc pas un désert, même

s'il est parfois assimilé au sable saharien. La faune y est discrète car elle vie enfouie. Même au Sahara, il suffit d'attendre que le soleil se couche et la surface du sable s'anime, des arthropodes sortent pour se livrer à leur activité (*Fig. 74*).



© P. De Wever



© P. De Wever

Fig 74 • Dans les dunes de Merzouga (Maroc).

a. Dès que le soleil se couche ; **b.** le sable s'anime, ici un coléoptère émerge du sable.

Sur nos plages, le pêcheur à pied sait découvrir cette faune qui varie selon les endroits (les coques marinières ou autres persillades de coques de nos vacances en attestent). Et pourtant, ce sont surtout les espèces microscopiques qui sont légion. Les minuscules crustacés, mangeurs de détritiques, constituent l'essentiel de la nourriture des plies et rougets grondins.

D'autres vers plats sont verdâtres car ils abritent toute une flore algale. À marée basse, ces vers sortent du sable et s'exposent en surface au soleil, ce qui permet aux algues de produire, par photosynthèse, des sucres, utiles autant à l'algue qu'au ver. Cette association est dite symbiotique (à bénéfice réciproque).

Dans le sable des déserts

Le Sahara (= désert en arabe) n'est couvert de sable que sur 20 % de sa superficie, et c'est pourtant l'image qui domine (*Fig. 75*). L'eau est rare et le soleil brûlant. Les végétaux ne développent donc qu'une partie aérienne très réduite (*Fig. 76*) alors que les racines sont très longues pour aller chercher l'eau, ce qui leur évite aussi d'être déchaussées quand le sable est emporté par le vent.

L'acacia, par exemple, envoie des racines jusque 30 mètres de profondeur. Le réseau de racines dense maintient le sable et permet alors à des petits animaux d'y creuser, sans risque, des terriers pour se mettre à l'abri des fortes chaleurs. En effet, la température du sable peut atteindre 65 °C dans la journée alors qu'elle n'est plus qu'à 30 °C à 1,5 m de profondeur où se terrent les fourmis, lézards ou petits mammifères. De fait, la chaleur est la plus intense à la surface du sable, la tête du dromadaire par exemple qui se trouve à environ 2 m du sol n'est qu'à 40 °C et ses larges pattes qui lui évitent de s'enfoncer dans le sable sont munies d'une épaisse sole (semelle) qui l'isole – relativement – de la fournaise du sable.

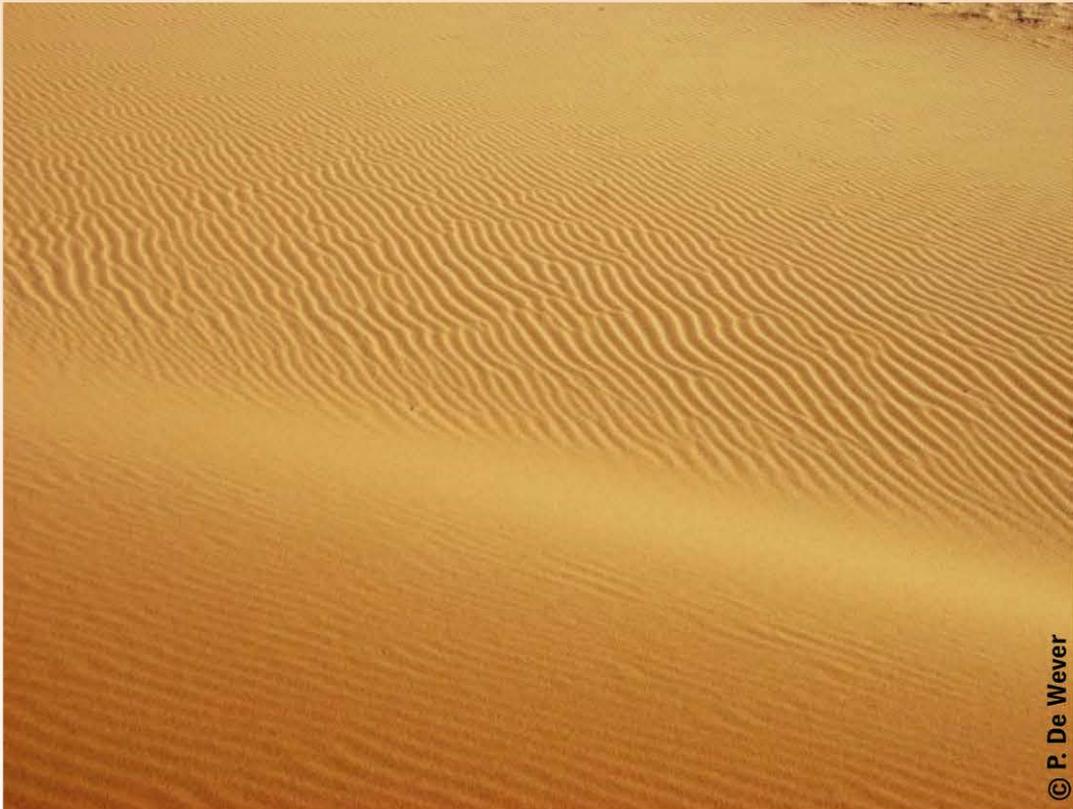


Fig 75 • Rides dues au vent dans les dunes (dunes de Merzouga, Maroc).



Fig 76 • Végétation des dunes des confins du Sahara (Merzouga, Maroc).

Certains insectes ont élaboré une technique spécifique pour récupérer de l'eau dans le sable : ils creusent des tranchées perpendiculaires au vent dans lesquelles l'humidité de l'air condense. L'insecte boit alors

cette eau, augmentant jusqu'à plus d'un tiers, son poids. Certains reptiles (vipères, geckos, lézards) ont une autre technique : ils sortent « à la fraîche », l'eau condense sur les irrégularités des écailles, et... cette eau est léchée tout simplement ! Des graminées déploient un réseau de racines qui, au lieu de s'enfoncer dans le sable, rayonnent à 20 m autour sous la surface du sable, environ 10 cm, captant l'eau issue de la condensation du brouillard sur le sable plus froid.

Marcher sur le sable

Le sable : une roche qui coule entre les doigts

Le sable se comporte un peu comme un fluide. Des animaux ont donc développé des organes particuliers pour s'y déplacer (Fig. 77). Certains ont le bout des pattes élargi en guise de raquette pour ne pas s'enfoncer. La gerboise, petit rongeur muni de longues pattes qui lui permettent de grands sauts, vit enfouie la journée. La nuit, les longs cils raides qu'elle a sous les doigts lui permettent de ne pas s'enfoncer. Des geckos possèdent des palmures entre les doigts et un lézard (*Aporosaura*) a développé de longues écailles autour de ses doigts. Ce même lézard est aussi connu pour ses « danses ». Quand il sort du sable, il commence par s'allonger sur le sable, « les quatre fers en l'air ». Puis, il se met en quête de nourriture, mais quand la température de la surface du sable dépasse son goût, il limite ses points de contact avec le sol en se reposant sur deux pattes, une avant, une arrière, en opposition. Comme il doit alterner ses appuis, il semble effectuer une danse assez cocasse.



Fig 77 • Marcher sur le sable brûlant.

Les longues pattes de l'Eremiaphile, petite mante religieuse, lui permettent de se déplacer très vite sur le sable brûlant dont la température peut atteindre 60 °C.

Le grillon clown du désert du Namib peut bondir sans problème : son appui au sol est garanti par des excroissances rayonnantes aux pattes, comme on en voit au bout d'un bâton de ski.

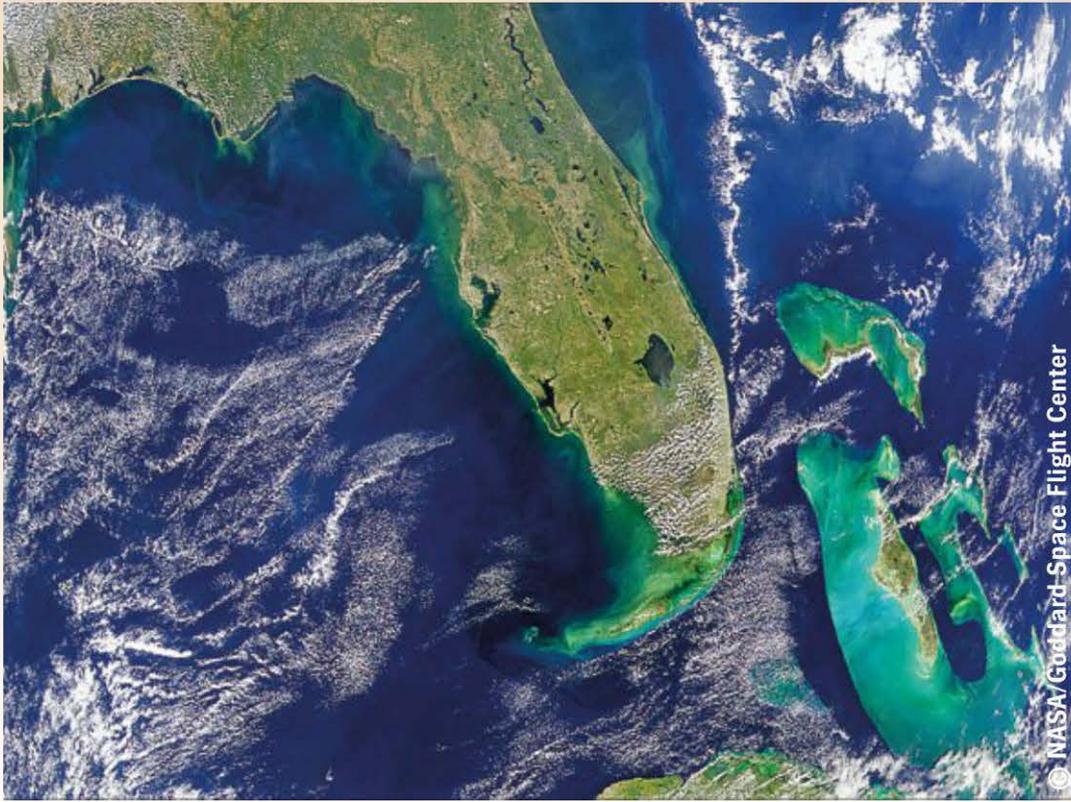
Nager dans le sable

Le sable est tellement semblable à un fluide que certains lézards (les scinques) s'y déplacent avec des pattes réduites, certaines espèces en sont même totalement dépourvues, ressemblant à de véritables « poissons des sables ». La taupe du Namib, elle, a renoncé à se creuser des galeries qui ne tiennent pas ! Pour se déplacer, elle ondule son corps, se hissant des pattes avant et repoussant le sable derrière elle avec les pattes arrières. Le lézard oscille latéralement, la taupe ondule verticalement.

Le sable apparaît donc comme un milieu riche en milieu aquatique et extrême en milieu terrestre aride. En milieu aquatique, il produit plus de biomasse qu'il n'en consomme et sert donc de garde-manger pour de nombreuses espèces des alentours. En milieu terrestre aride, sa faible capacité de rétention d'eau ne permet que l'installation d'une maigre végétation qui ne profite donc que faiblement aux végétariens. Une chaîne alimentaire s'installe pourtant, des insectes au chacal en passant par les lézards.

Le sable, dangereux pour la santé ?

Une relation existe entre le sable et la vie comme en attestent les tempêtes de sable. Le sable du Sahara est parfois apporté en Europe (*Fig. 33, 34*) ou en Amérique (Floride). Les grains transportés sont exposés aux rayons ultraviolets stérilisants. Néanmoins, des microbes (bactéries, virus) et des spores installés dans les microcavités survivent au voyage. On les soupçonne d'être la cause de maladies respiratoires et de la dégradation des coraux des Caraïbes car leur régression, due à la maladie, coïncide avec les grandes tempêtes de sable africain (*Fig. 78*).



© NASA/Goddard Space Flight Center

Fig 78 • Sable générateur d'efflorescences algaires.

Les tempêtes de sable d'Afrique conduisent à des efflorescences d'algues toxiques au large des côtes de Floride du fait de l'apport de fer (zones vertes sur la photo).

8 Le sable demain

Va-t-on manquer de sable ?

L'appétit des Hommes pour cette ressource semble inextinguible. Par exemple, les îles artificielles de Dubaï (*Fig. 44*) ont nécessité un apport colossal de sable d'origine marine. Paradoxalement en effet, dans ce pays désertique, le sable du désert, trop fin, trop rond, ne convient pas. À elles seules, les îles The Palm et The World ont ainsi nécessité près de 600 millions de tonnes soit davantage que la production totale française en un an.

Comme toutes les réserves faciles, que sont les carrières ou les lits des rivières, ont été aujourd'hui exploitées ou sont soumises à des réglementations contraignantes dans les pays développés, les industriels se tournent de plus en plus vers les sables marins, les extrayant sur les plages ou directement en mer à l'aide de grosses dragueuses pouvant traiter jusqu'à 400 000 m³ de mélange d'eau et de sable par jour. C'est ainsi que les dunes des plages marocaines de Tanger ou Casablanca ont disparu, vidées nuit après nuit par des escouades de camions pour fournir l'industrie du bâtiment florissante dans ce pays touristique. Partout dans le monde, on observe ce phénomène de surexploitation de sable, des îles Maldives aux Caraïbes et à travers tous les océans. Par voie de conséquences, les plages reculent de plus en plus.

LA CONSOMMATION DE SABLE EN FRANCE

Pour l'ensemble de ses activités, la France a consommé 365 millions de tonnes en 2012. Sur cet ensemble, le sable marin ne représente que 2 %, selon l'Union nationale des producteurs de granulats. L'extraction, réglementée, ne donne pas lieu à une exploitation sauvage, mais la pression augmente. Le sable marin approvisionne déjà amplement la bande côtière ouest où la population augmente au galop. Il entre déjà dans 70 % des constructions de Seine-Maritime.

Cette ponction du rivage ou de l'avant plage sur les zones côtières a des conséquences catastrophiques : fort impact des tempêtes, inondations, arrivée de l'eau salée dans les nappes d'eau douce, recul du trait de côte pouvant aller jusqu'à la disparition complète de certaines îles. C'est

le cas de 25 îles indonésiennes qui ont ainsi disparu pour permettre à Singapour de gagner 130 km² sur la mer. Comme les 830 000 barrages répartis dans le monde piègent en amont le sable qui aurait pu participer à l'édification des plages, le phénomène va aller en s'amplifiant. Cette raréfaction entraîne une véritable spéculation, des trafics et la mise en place de réseaux mafieux dans les régions du monde très consommatrices.

A contrario, on ramène parfois du sable en mer lorsqu'on drague un port ensablé... déplaçant alors aussi la pollution...

S'il fallait une preuve de l'inquiétude grandissante, les Nations unies viennent de publier une note sur l'exploitation du sable qui appelle à la mise en place de discussions internationales à ce sujet.

LA COLÈRE DU PEUPLE DES DUNES

Dans la baie de Lannion, en Bretagne, un collectif de 31 associations, nommé le Peuple des dunes, milite activement contre l'exploitation d'une dune sous-marine à un kilomètre à peine de la très touristique Côte de granite rose. Située entre deux réserves naturelles, cette dune, âgée de plus de 10 000 ans, a fait l'objet d'une demande d'exploitation par la Compagnie armoricaine de navigation qui souhaite prélever les huit millions de mètres cubes de sable coquiller sous-marin à la vitesse de 400 000 m³ par an pour amender les terres agricoles.

9 Proverbes, dictons et citations

Apprends à écrire tes blessures dans le sable et à graver tes joies dans la pierre. *Anonyme*

Écris les choses néfastes que l'on t'a fait subir dans le sable, mais grave les bonnes dans le marbre. *Proverbe arabe*

Les injures s'écrivent sur l'airain et les bienfaits sur le sable. *Proverbe français*

Le voleur qui ne trouve rien à voler emporte une poignée de sable. *Proverbe berbère*

Les eaux ont beau couler dans tous les sens le sable restera toujours au fond. *Proverbe géorgien*

Si vous voulez laisser vos empreintes dans le sable du temps, ne traînez pas les pieds. *Anonyme*

Il y a du sable mouvant en la cervelle. *Proverbe français*

Une fausse amitié est comme un banc de sable. *Proverbe indien*

Beaucoup de grains de sable réunis, ça finit par faire un gros tas de sable. Beaucoup de petites intelligences rassemblées, ça ne fera jamais un gros tas d'intelligence. *Philippe Geluc (1954-)*

On ne peut bâtir sur du sable. *Moses Isegawa (1963-)*

Les châteaux bâtis sur le sable ne résistent jamais à une grande tempête. *Moses Isegawa (1963-)*

Le vrai sage est celui qui fonde sur le sable. *Henri de Régnier (1864-1936)*

Je crois que si l'on veut construire sur du sable, autant que ce soient des forteresses plutôt que des châteaux de cartes. *Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799)*

Ce qu'il y a de plus réel pour moi, ce sont les illusions que je crée avec ma peinture. Le reste est un sable mouvant. *Eugène Delacroix (1798-1863)*

Aucun péché n'est anodin. Il est commis contre un dieu infini, et peut avoir de graves conséquences. Aucun grain de sable n'est insignifiant dans le mécanisme d'une montre. *Jeremy Taylor (1613-1667)*

Nos fautes sont comme des grains de sable en face de la grande montagne des miséricordes de Dieu. *Le Curé D'Ars* (1786-1859)

La vertu des femmes, c'est du sable mouvant. *Laure d'Abrantès* (1784-1838)

J'ai toujours aimé le désert. On s'assoit sur une dune de sable. On ne voit rien. On n'entend rien. Et cependant quelque chose rayonne en silence... *Antoine de Saint-Exupéry* (1900-1944)

Les pieds sur le sable, la tête aux nues, voilà l'étirement maximal de l'homme rêveur. *Roland Delisle*.

Voir un univers dans un grain de sable, et le Paradis dans une fleur des champs. *William Blake* (1757-1827)

L'homme écrit sur le sable. Moi ça me convient bien ainsi ; l'effacement ne me contrarie pas ; à marée descendante, je recommence. *Jean Dubuffet, Artiste* (1901-1985)

Chausse tes sandales, et foule le sable qu'aucun esclave n'a piétiné ! *Hawad* (1950-)

L'impuissance du pouvoir contre l'individu réellement libre est une des grandes chances de libération de l'homme, c'est le grain de sable de son destin, sa grandeur. *Jean-Marie Adiaffi* (1941-1999)

C'est donc cela, la vie d'adulte : construire des châteaux de sable, puis sauter dessus à pieds joints. *Frédéric Beigbeder* (1965-)

Avec les seringues hypodermiques planquées sous le sable, la tong c'est le préservatif du pied. *Guy Bedos* (1934-)

La gloire, c'est d'abord une belle plage. On se roule dans son sable fin, puis, bientôt, on sent une odeur mauvaise, celle des poissons que les femmes viennent vider sur le bord. *Jules Renard* (1864-1910)

Sur mes cahiers d'écolier, sur mon pupitre et les arbres, sur le sable et la neige, j'écris ton nom, Liberté. *Paul Éluard* (1895-1952)

C'est bon de mourir pour quelque chose. De se dire qu'on est un petit grain de sable, c'est tout, mais qu'à force de mettre des grains de sable dans la machine, un jour, elle grincera et elle s'arrêtera. *Jean Anouilh* (1910-1987)

N'importe quel imbécile peut fermer l'œil, mais qui sait ce que voit l'autruche dans le sable. *Samuel Beckett* (1906-1989)

Aimable souvent est sable mouvant. *Robert Desnos* (1900-1945)

Le désert n'ayant pas donné de concurrent au sable, grande est la

paix du désert. *Henri Michaux* (1899-1984)

La musique, ce qu'elle est : respiration. Marée, longue caresse d'une main de sable. *Christian Bobin* (1951-)

Au tamis de la vie, je n'ai gardé que les paillettes et tout le sable est parti au fil de l'eau. *Yvan Audouard* (1914-2004)

Le bien de la fortune est un bien périssable ; quand on bâtit sur elle, on bâtit sur le sable. *Honorat de Buel, Seigneur de Racan* (1589-1670)

Le marchand de sable ne fait pas fortune dans le désert. *Alexandre Vialatte* (1901-1979)

La graine déposée au milieu du sable sec dort malgré elle et ne peut que rêver de se retrouver un jour entourée d'une vivifiante terre humide. *Daniel Desbiens* (1954-)

Certains êtres sont comme des sables mouvants ; n'entrez pas dans leur intimité de peur d'être engloutis. *Andrée Maillet* (1921-1995)

Ne laisse pas les grains de sable s'accumuler dans un engrenage ; ils pourraient en détruire tous les rouages. *Daniel Desbiens* (1954-)

La vie des grands hommes nous rappelle que nous aussi nous pouvons rendre notre vie sublime, et laisser derrière nous, après la mort, des empreintes sur le sable du temps. *Henri Longfellow* (1807-1882)

Un à un, les grains de sable s'écoulent, un à un les moments passent ; certains vont, certains viennent : ne tentez point de tous les saisir. *Adelaide A. Procter* (1825-1864)

Avec les insomnies, on peut faire des bouquets noirs de grandes fleurs friables et crissantes comme le sable sous les dents. *Jean-Claude Pirotte* (1939-2014)

Pour la chasse aux lions : vous achetez un tamis et vous allez dans le désert. Là, vous passez tout le désert au tamis. Quand le sable est passé, il reste les lions. *Alphonse Allais* (1854-1905)

Les politiques parlent une langue morte, sèche et menteuse comme le sable. *Régis Jauffret* (1955-)

Nous ne sommes que des grains de sable mais nous sommes ensemble. Nous sommes comme les grains de sable sur la plage, mais sans les grains de sable la plage n'existerait pas. *Bernard Werber* (1961-)

Les bateaux enfouis dans le sable peuvent-ils se vanter d'une certaine stabilité ? *Faya Dequoy*

La plage est une étendue de sable où les enfants font des pâtés et

où les mères font des boulettes. *Georges-Armand Masson* (1892-1977)

Et la surface de l'eau n'est que lumière, mais au-dessous ? Troncs d'arbres sans couleur, rameaux enchevêtrés comme le rêve, pierres dont le courant rapide a clos les yeux et qui sourient dans l'étreinte du sable. *Yves Bonnefoy* (1923-)

Savez-vous ce qui arriverait au Sahara si on y installait le communisme ? Pendant cinquante ans rien. Au bout de cinquante ans, pénurie de sable. *Georges Courteline* (1858-1929)

L'humanité masculine se répartit en deux groupes : sable ou falaise. La femme est toujours l'océan. *Claude Aveline* (1901-1992)

C'est décourageant le sable. Rien n'y pousse. Tout s'y efface. *James Joyce* (1882-1941)

Pour peu qu'on tâche de se perfectionner, on voit les autres rapetisser, comme s'ils s'enfonçaient dans le sable. *Jules Renard* (1864-1910)

La Loire, un grand fleuve de sable quelque fois mouillé. *Jules Renard* (1864-1910)

Il faut croire aux étoiles, tes angoisses et tes tourments ne sont qu'un grain de sable, qu'une larme dans l'océan. *Richard Anthony* (1938-)

La politique de l'autruche est respectable : tout dépend de ce qu'il y a dans le sable. *Didier van Cauwelaert* (1960-)

Quand la marée monte, il n'est plus important de savoir à qui appartient le château de sable. *José Artur* (1927-2015)

À Honolulu, il y a tout ce qu'il faut : du sable pour les enfants, du soleil pour les épouses, des requins pour les belles-mères. *Ken Dodd* (1927-)

L'autruche qui enfouit sa tête dans le sable veut, en tout cas, vous donner le sentiment que cette tête est la partie la plus importante de sa personne. *Katherine Mansfield* (1888-1923)

Le bien de la fortune est un bien périssable ; quand on bâtit sur elle, on bâtit sur le sable. *Honorat de Racan* (1589-1670)

La connaissance de la vie est comme le sable : elle ne salit pas. *Elsa Triolet* (1896-1970)

Que sait du désert celui qui ne regarde qu'un grain de sable ? *Erik Orsenna* (1947-)

Glossaire

ACCRÉTION : processus d'agglomération de matière qui aboutit à l'augmentation de la masse d'un corps, par exemple d'un continent par accotement.

AMPHIBOLITE : roche métamorphique, solide et résistante, souvent utilisée pour la construction et résultant généralement de la transformation d'un basalte par la chaleur et la pression.

AQUIFÈRE : un aquifère est une formation géologique, suffisamment poreuse et/ou fissurée (qui peut stocker de l'eau) et perméable (où l'eau circule librement), pour contenir une nappe d'eau souterraine mobilisable. La nappe phréatique ou nappe libre, est la nappe contenue dans l'aquifère de surface, son sommet correspond au niveau des sources ou de la rivière.

ARGILE : groupe de minéraux issus de la dégradation des feldspaths et des micas, caractérisés par leur structure en feuillets et présentant une taille inférieure à deux micromètres dans les roches. Roche sédimentaire silicatée présentant une structure en feuillets. Les minéraux caractéristiques des argiles sont : chlorite, illite, kaolinite, montmorillonite...

BASALTE : roche volcanique due à la consolidation de laves issues de la fusion partielle du manteau. Un des constituants de la croûte océanique.

DÉTRITIQUE : se dit d'une roche qui est issue de la dégradation d'autres roches.

ÉVENT : ouverture par laquelle s'échappent des gaz.

FELDSPATH : groupe de minéraux très importants en volume à la surface de la terre et dont l'altération donne des argiles.

FORAMINIFÈRES : groupe d'organismes marins unicellulaires, très nombreux dans le plancton, caractérisés par un squelette minéral calcaire perforé. Les formes fossiles sont utilisées pour dater les terrains.

GNEISS : roche métamorphique, résultant de la transformation d'un granite par la chaleur et la pression. On distingue les orthogneiss qui résultent de la transformation de roches magmatiques (d'anciens granites ou basaltes) des métagneiss qui sont d'anciennes roches sédimentaires (argiles, calcaires ...).

HALITE : autre nom du chlorure de sodium, connu aussi sous le nom de sel gemme ou sel de cuisine.

HYALIN : qui a l'allure du verre, transparent.

KAOLINITE : nom d'une argile, issue de la dégradation du feldspath plagioclase et qui est très recherchée pour la fabrication de la porcelaine.

LITHOSPHERE : désigne l'une des enveloppes concentriques du globe terrestre. La lithosphère, ou sphère rocheuse, correspond à l'ensemble rigide le plus externe de la planète. Elle intègre la croûte et la partie solide du manteau supérieur qui sont séparées par le Moho. La lithosphère est divisée en plaques tectoniques.

MICA : famille de minéraux caractérisés par leur structure en feuillets superposés les uns aux autres.

OBSIDIENNE : verre volcanique, il s'agit d'une lave qui a refroidi rapidement.

RADIOLAIRES : groupe d'organismes marins unicellulaires, caractérisés par un squelette siliceux. Les formes fossiles sont utilisées pour dater les terrains.

ROCHE INTRUSIVE : synonyme de roche plutonique. Ces roches résultent de la montée en surface d'un magma qui traverse les autres couches de roches en cristallisant lentement sous la surface.

Bibliographie

- Duran J. (2003). *Sables Émouvants - La Physique Du Sable Au Quotidien*, éd. Belin, 192 p.
- Duran J. (2005). Secrets des tas *in* Découverte, revue du Palais de la Découverte, *Histoire et destins d'un grain de sable* (2005), pp. 72-81.
- Lefranc Y. (2005). La vie dans le sable. *In* Découverte, revue du Palais de la Découverte, *Histoire et destins d'un grain de sable* (2005), pp. 26-35.
- Varichon A. et Rocella C. (2006). *Être sable*, Paris, Seuil, 191 p.
- Un site dédié : <http://www.museedusable.com>.
Musée du Sable **Association Musée du Sable** 127 rue des Plesses, 85180 Le Château-d'Olonne, Tél. : **02 51 22 04 94** –
e-mail : museedusable@gmail.com



Index

A

altération 12, 14-18, 21, 22-24, 89
aquifère 59, 61-63, 89
arène 17, 18, 22
aurifère 32
autunite 49

B

Baccarat 49
béton 24, 46, 47, 67, 68
bitumineux 47, 59, 60, 61

C

Cailleux 17
calcaire 12, 14, 19, 23, 48, 70
calcite 19, 24, 25, 28
coésite 26
cristal 26, 48, 49, 53-58

D

désert 7, 10, 12, 34, 35, 37, 38, 40-43,
45, 47, 64, 76, 78, 81, 83
dune 7, 10, 32-44, 52, 77, 79, 83, 84
dureté 24, 25, 52

E

Égypte 9, 23, 37, 47
éolien 10, 12, 43, 72
érosion 15, 19, 33, 39, 52, 62, 70

F

feldspath 12, 14, 22, 89, 90
filtre 50, 51
Fontainebleau 13, 25, 34, 57, 64, 72
foraminifère 20, 27, 89

G

glacier 16, 29-31
granite 10-12, 14, 16, 17, 18, 22, 23, 84, 90

granoclasement 45
grenat 22
grès 9-14, 18, 23, 31
Groix 22

H

halite 15, 90
héraldique 54, 56
Hjulström 30

I

Islande 30

L

Léman (lac) 34
liquéfaction 71, 73, 75
lœss 45

M

Madagascar 31, 75
Mars 42, 44
meulière 14, 15
micas 12, 19, 89
Musée du Sable 20, 21

N

Namibie 40, 42

O

obsidienne 12, 48, 90
Okinawa 20

P

pavé 13
pelure d'oignon 23
Pilat 38, 39
porosité 13, 59, 60
pyramide 9, 65

Q

Quartz 12-14, 16, 19, 20, 23-26, 48, 53-58

R

radiolaire 27, 90

réservoir 59-63

Reynolds 66

rivière 8-10, 16, 28, 31, 32, 47, 50, 61, 75, 83, 89

S

sablier 7

Sahara 35, 36, 43, 77-79, 81

sédimentologie 29

sel 15, 52, 74, 90

silice 14, 28, 48, 57, 90

silicium 19, 25, 26, 48, 57, 58

Strakhov 17

T

tempête 35-39, 81-83

Titan 44

transport 9, 16, 29, 35, 37, 45, 52, 81

V

vague 9, 15, 19, 32, 39, 65

vent 10, 15, 29, 34-45, 70, 78-79

verre 7, 12, 19, 25, 47-50, 55, 90

vie 7, 55, 76-81

W

Wentworth 17

Livres des mêmes auteurs

- **DE WEVER P., DE WEVER M.-J. & DUCLOS J.-L.** (1990). *Ormoy-la-Rivière. Un village de l'Étamptois*. CAHOR, Ormoy-la-Rivière, 408 pages.
- **DURANTHON F.** (1998). *Minéraux du monde*. Éditions Milan, 48 pages.
- **AUBOURG C., DANIEL J.-Y., DE WEVER P. et al.** (2000). *Problèmes résolus des Sciences de la Terre et de l'Univers*. Vuibert, 360 pages.
- **DE WEVER P., DUMITRICA P., CAULET J.-P., NIGRINI C. & CARIDROIT M.** (2001). *Radiolarians in the sedimentary record*. Gordon & Breach Science Publ., 534 pages.
- **AVOUAC J.-PH. & DE WEVER P.** (2002). *Himalaya-Tibet : Le choc des continents*. CNRS-MNHN Ed., 192 pages.
- **DE WEVER P.** coord. (2002). *Le temps mesuré par les sciences, l'homme à l'échelle géologique*. Vuibert/MNHN Ed., 130 pages.
- **DE WEVER P. et al.** (2003). *Le volcanisme, cause de mort & source de vie*. Vuibert/MNHN Ed., 344 pages.
- **DURANTHON F.** (2003). *Roches et minéraux*. Éditions Milan, 32 pages.
- **DURANTHON F.** (2004). *Histoires de Dinosaures*. Éditions Bréal, 192 pages.
- **DURANTHON F.** (2004). *Les dinosaures et leurs cousins*. Éditions Milan, 32 pages.
- **DE WEVER P., GUIRAUD M. & CORNEE A.** (2004). *Des collections en sciences de la Terre, pour quoi faire ?* OCIM-MNHN Ed., 166 pages.
- **DURANTHON F.** (2005). *Fossiles d'Europe*. Éditions Milan, 40 pages.
- **DURANTHON F.** (2005). *CD Histoires de Dinosaures*. Éditions De vive Voix.
- **DURANTHON F.** (2006). *Histoires de Mammifères*. Éditions Bréal, 224 pages.
- **DE WEVER P., LABROUSSE L., RAYMOND D. & SCHAAF A.** (2006). *La mesure du temps dans l'histoire de la Terre*. SGF-Vuibert Ed., 132 pages.

- **DE WEVER P., LE NECHET Y. & CORNEE A. (2006).** *Vade-Mecum pour l'inventaire du patrimoine géologique.* SGF, mém. HS n°12, 162 pages.
- **BILLET G., BONNEFOY B., DE WEVER P., HOUSSAYE A. & MERLE D. (2008).** *Promenade géologique à Étampes.* MNHN-Biotope-BRGM Ed., 28 pages.
- **DURANTHON F. (2009).** *Minéraux, roches et fossiles.* Éditions Milan, 64 pages.
- **DE WEVER P., DAVID B. & NERAUDEAU D. (2010).** *Paléobiosphère : regards croisés des sciences de la vie et de la Terre.* MNHN-Vuibert-SGF Ed., 816 pages.
- **DE WEVER P., MERLE D., BONNEFOY B. & BILLET G. (2010).** *Promenade géologique à Milly-la-Forêt.* MNHN-Biotope-BRGM Ed., 28 pages.
- **EGOROFF G., DE WEVER P., MERLE D. & MÉTIVIER B. (2011).** *Promenade géologique à Dourdan.* MNHN-Biotope-BRGM Ed. , 28 pages.
- **DE WEVER P. (2012).** *Carnet de curiosité d'un géologue.* Ellipses, 360 pages.
- **DE WEVER P. (2012).** *Temps de la Terre, temps de l'Homme.* Albin Michel, 216 pages.
- **MAURIAUD P., BRETON P. & DE WEVER P. (2012).** *Faim de pétrole.* EDP Science, 224 pages.
- **DE WEVER P. (2013).** *Carnet de curiosité d'un géologue et autres brèves de laboratoire.* Ellipses, 354 pages.
- **DE WEVER P. (2014).** *Le beau livre de la Terre.* Dunod, 416 pages.
- **DE WEVER P., DURANTHON F. (2015).** *La valse des continents.* EDP Sciences, coll. Terre à portée de main, 88 pages.
- **DE WEVER P. (2015).** *L'eau de la vie.* EDP Sciences, coll. Terre à portée de main, 80 pages.
- **DE WEVER P. & DAVID B. (2015).** *La biodiversité de crise en crise.* Albin Michel, 310 pages.