

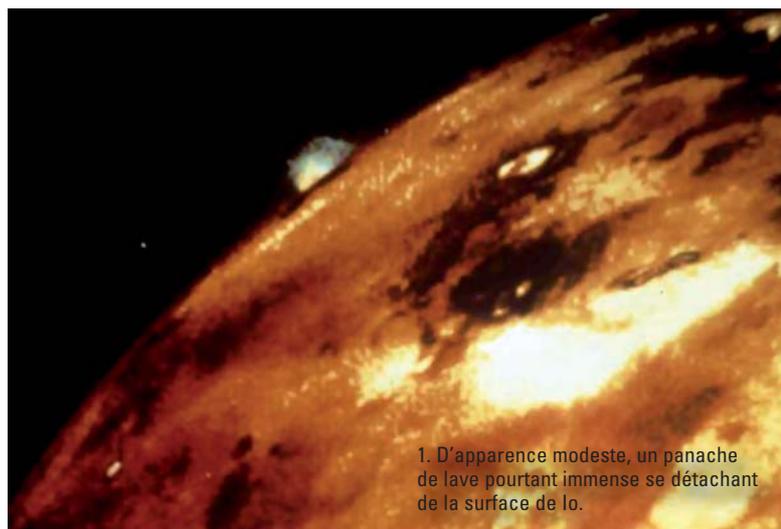


Pascal Richet

Les verres naturels

UNE PRODUCTION IMMÉMORIALE

Depuis 45 siècles, l'homme fabrique des verres en refroidissant rapidement des silicates fondus à haute température. Son inventivité est en l'occurrence moins remarquable qu'on pourrait le croire. La nature, en effet, est un grand producteur depuis au moins 4 500 millions d'années ! Non seulement les verriers n'ont de ce point de vue rien inventé, mais leurs principaux procédés de mise en forme existent également de toute éternité, ou presque : coulage, étirement de fibres ou soufflage sont aussi vieux que l'activité magmatique. Partageant avec la Terre une composition chimique où prédominent les silicates, les autres planètes telluriques (Lune, Mars, Vénus et Mercure) et les grands satellites de Jupiter ou de Saturne sont ou ont été aussi le siège d'un intense volcanisme de sorte que la présence de verre n'a pas dû leur être étrangère. Sur Io, une des lunes de Jupiter, ont par exemple été observés des jets de lave hauts de 300 km, expulsés de



1. D'apparence modeste, un panache de lave pourtant immense se détachant de la surface de Io.

© Jet Propulsion Laboratory

leur fournaise à des vitesses de 1 000 m/s, dont une partie au moins devrait vitrifier au cours de son parcours dans l'espace (Fig.1). Les plus anciens verres connus ont en fait été découverts sur la Lune lors des missions Apollo. Ils datent de 4 milliards d'années, soit assez peu après la formation du système solaire. En l'absence d'atmosphère, et surtout d'eau, ils ont échappé à toute altération chimique. Leur composition est variée, certains

comportant des teneurs inhabituellement fortes en oxyde de titane (Tableau). Sur terre, l'activité magmatique est également ancienne. Il est même probable que, peu après sa formation, notre planète ait été entièrement couverte d'un océan magmatique, profond de 1 000 km et d'une température de l'ordre de 2000°C. Si du verre fut produit à cette époque reculée, nul ne le sait. L'activité géologique tendant naturellement

Tableau 1. Compositions de verres mentionnés dans cet article et compositions moyennes de quelques roches volcaniques (pourcentages massiques)*.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂
Verre lunaire Ti	39	6	6,7	15	22	9			
Basalte lunaire	51,7	15,1	1,1	1,1	10,6	6,7	0,2	9,8	1,7
Figeac	67,9	12,8	1,6	4,0	1,1	0,6		2,7	1,5
Basalte	49,2	15,7	2,9	1,1	9,5	6,7	3,8	7,3	1,8
Andésite	57,9	17,0	3,5	1,6	6,8	3,3	3,3	4,0	0,9
Phonolite	56,2	19,0	7,8	5,2	2,7	1,1	2,8	2,0	0,6
Rhyolite	72,8	13,3	3,6	4,3	1,1	0,4	1,5	1,1	0,3
Verre lybique	99,4		0,3						
Rochechouart	65,1	14,8	0,2	10,9	0,2	1,2	3,5	0,6	
Fulgurite	98		2						
Impactite	87,0	8,0	0,1	1,0		0,8	0,2	1,9	0,5

*Fer exprimé comme FeO ou Fe₂O₃ ; totaux pouvant différer de 100 % à cause de teneurs en autres oxydes non cités, comme P₂O₅, BaO, MnO et, surtout, H₂O.



© D. Velde

Fig 2

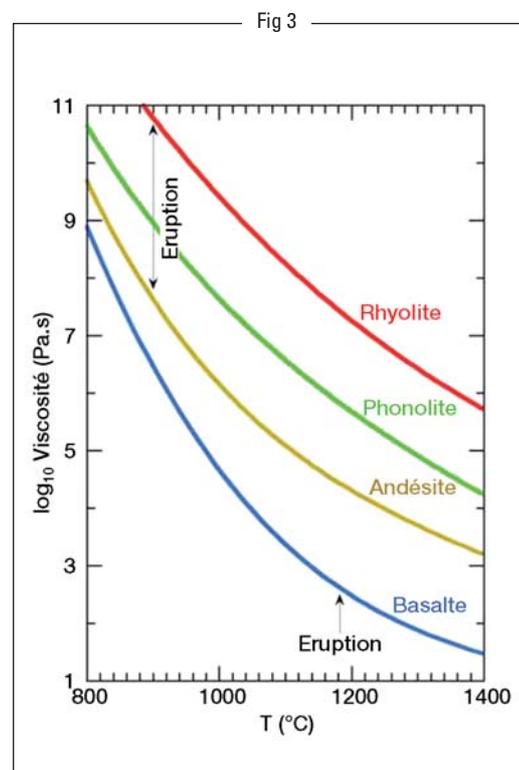
à faire disparaître les témoignages des périodes les plus anciennes, il n'en reste en tout cas nul vestige et il faut avancer considérablement dans le temps pour trouver d'authentiques verres. En France, ce sont peut-être des roches permien- nes des environs de Figeac (Lot) qui renferment les plus anciens verres bien conservés. Apparentées à des laves appelées boninites, ces roches en comportent une fraction importante (Fig. 2). Avec leur âge d'environ 280 millions d'années, elles illustrent la manière dont des verres peuvent résister à l'altération pendant de très longues durées dans des conditions naturelles.

La présence de verre dans des roches volcaniques n'a rien d'étonnant. Un refroidissement assez rapide étant nécessaire pour éviter la cristallisation, c'est avant tout dans ces roches que la condition est satisfaite. Il est cependant rare que toute cristallisation soit évitée à la fois pendant la montée du magma de sa source vers la surface et pendant son refroidissement sur les flancs d'un volcan. Les roches volcaniques sont donc plutôt des vitrocéramiques où les cristaux se trouvent dispersés dans une pâte vitreuse. Quant à la proportion de verre, elle dépend de deux facteurs, la vitrifiabilité intrinsèque du magma et la vitesse de refroidissement. La vitrifiabilité est la plus forte quand la viscosité du liquide est élevée (Fig. 3), c'est-à-dire quand l'abondance des éléments formateurs de réseau (silicium et aluminium) est la plus grande et

quand la structure du liquide est la plus fortement polymérisée. Dans la nature, le domaine de composition des verres d'origine magmatique est ainsi borné par les basaltes aux plus faibles teneurs en silice, et par les obsidiennes aux plus fortes.

LA DIVERSITÉ DES VERRS BASALTIQUES

De loin les plus abondants à la surface du globe, les magmas basaltiques sont a priori les moins facilement vitrifiables ; le grand chimiste Chaptal en fit l'expérience malheureuse quand il tenta de fabriquer des bouteilles avec cette lave à la fin du XVIII^e siècle. Mais cette médiocre vitrifiabilité intrinsèque peut être compensée par des vitesses de refroidissement très rapides. Particulièrement en début d'éruption quand un dégazage énergétique conduit le débit à être maximum, la brutale fragmentation d'une lave très fluide dans le jet d'une fontaine (Fig. 4a) cause



2. Le verre (brun) d'une lave permienne des environs de Figeac, formant une pâte englobant de grands cristaux de pyroxènes et des baguettes de plagioclases. Au centre, le verre est inclus au sein d'un pyroxène. Lame mince observée en lumière naturelle.

3. Viscosité de quelques types de laves (voir compositions dans le Tableau 1).

4a. Une fontaine de lave du du Piton de la Fournaise (La Réunion), projetant à des dizaines de mètres de hauteur une lave basaltique très fluide.



Fig 4a

© N. Villeneuve

par exemple un étirement hydrodynamique en cheveux de Pelé (Fig. 4b). Longues de 10 cm au plus et de diamètre compris entre 10 et 20 microns, ces fibres disparaissent cependant assez vite sous l'effet de l'altération. Des films de verre peuvent par ailleurs être soufflés quand le dégazage conduit à la formation d'une bulle de magma qui finit par exploser (Fig. 5). En raison de leur minceur, ces films sont encore plus fragiles que les cheveux de Pelé. Le dégazage peut enfin conduire à la formation d'une mousse de verre aux parois extrêmement minces, appelée réticulite (Fig. 6), dont la légèreté et la fragilité sont également extrêmes.

Des verres sont surtout produits systématiquement lors des éruptions sous-marines grâce à la trempe très efficace assurée localement par le contact du magma avec l'eau. La lave se débite alors en coussins de taille inférieure à 1 m dont la croûte est essentiellement vitrifiée (Fig. 7). Comme l'essentiel des basaltes s'épanche le long des dorsales médio-



Fig 4b

© P. Richet

océaniques, les très longues chaînes de montagnes où se fabrique lentement la croûte océanique, les quantités de verre ainsi produites sont énormes. Sans chercher à estimer le tonnage, on se bornera à noter qu'environ 300 milliards de tonnes de basalte parviennent chaque année à la surface du globe. Même lors de refroidissements pas trop rapides, comme ceux des grandes coulées de laves à l'air libre, la proportion de verre dans un basalte reste significative (Fig. 8), valant typique-

4b. Une pelotte de cheveux de Pelé comportant des gouttelettes de verre non étirées (Piton de la Fournaise). Ces cheveux sont en fait très semblables aux fibres de laine de roche qu'on fabrique longtemps à partir de basalte.

5. Le soufflage explosif d'une bulle de lave d'environ 10 mètres de diamètre (Piton de la Fournaise, la Réunion, éruption de 2004).

6. La très fine dentelle à trois dimensions d'une réticulite. Taille de la zone montrée : 15 mm.

7. Un coussin de basalte se formant sur les flancs sous-marins du Piton de la Fournaise.

8. La pâte vitreuse (noire) englobant des cristaux fortement biréfringents d'olivine et des baguettes de pyroxènes dans la pâte vitreuse d'un basalte de Hawaii.

© A. Pitrou



Fig 6

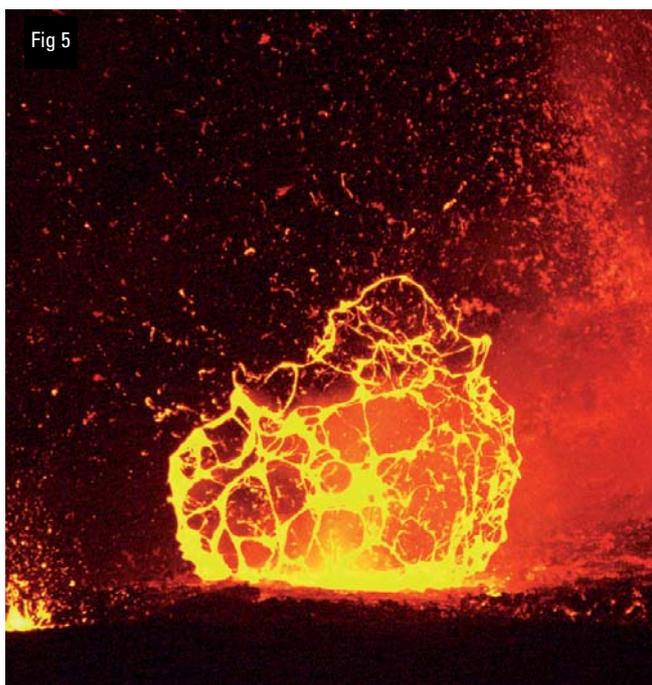


Fig 5

© Ph. Mairne



Fig 7

© J.-M. Bou

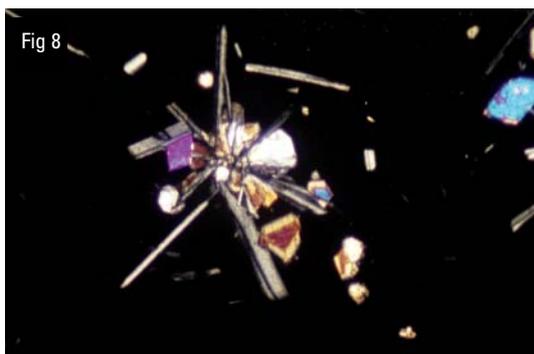


Fig 8

© Photo en lumière polarisée analysée : D. Veld

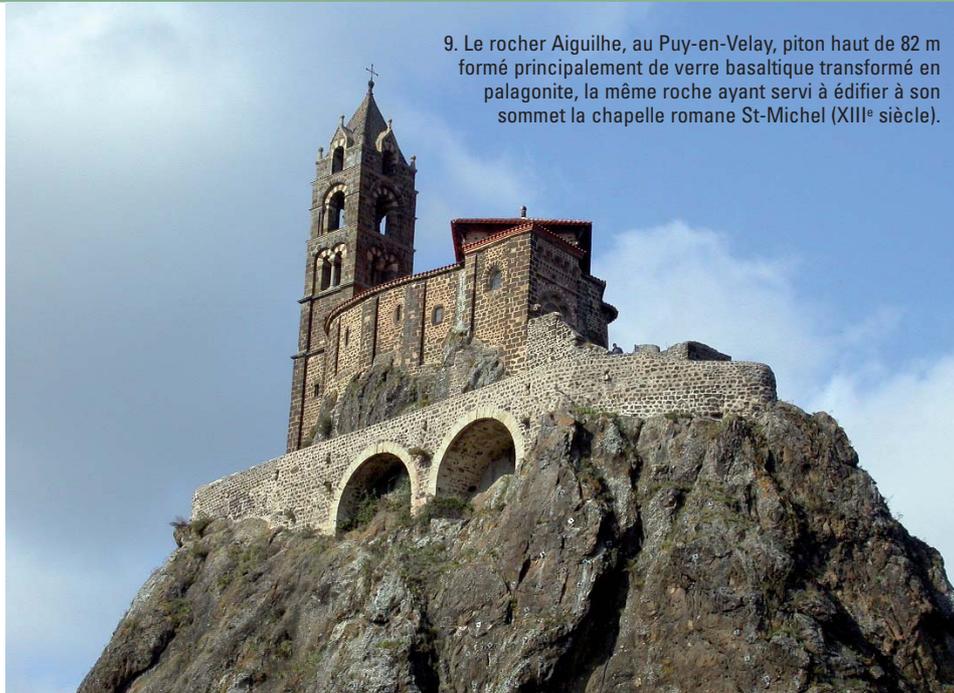
ment de l'ordre de 10 à 20 %. Une simple règle de trois indique donc que le tonnage de verre de basalte produit chaque année se compte par dizaines de milliards de tonnes, soit plusieurs milliers de fois la production mondiale de verres industriels.

Si des coussins se forment assez paisiblement à grande profondeur, c'est que la pression de l'eau s'oppose à un dégazage explosif des magmas. À des profondeurs de quelques dizaines de mètres, un dégazage violent peut en revanche se produire et fragmenter la lave en petits blocs dont le refroidissement très rapide en retombant dans l'eau assure la vitrification. Les proportions de verre les plus élevées sont ainsi obtenues lors de ce type d'éruption. Mais ces verres réagissent assez rapidement avec l'eau pour se transformer en une roche appelée palagonite, un mélange complexe de minéraux argileux et zéolitiques, qui assure en fait la pérennité de l'édifice volcanique. Prenant des teintes allant de jaune à vert ou brun, la palagonite donne lieu à de très beaux effets quand elle est employée en architecture. En France, le Velay en montre de nombreux exemples (Fig. 9).

DE L'IMPORTANCE DES PONCES ET OBSIDIENNES

La diversité de composition, et donc de vitrifiabilité, des laves résulte principalement d'un processus appelé différenciation magmatique. En cristallisant en profondeur dans des chambres magmatiques, les magmas primaires, en général basaltiques, précipitent d'abord les minéraux les plus réfractaires, olivines ($Mg, Fe)_2SiO_4$ et pyroxènes ($Ca, Mg, Fe)_SiO_3$. Le liquide résiduel donne ainsi naissance à des magmas de plus en plus visqueux, car plus riches en Si, Al et alcalins, dont les éruptions sont donc plus explosi-

© P. Richet



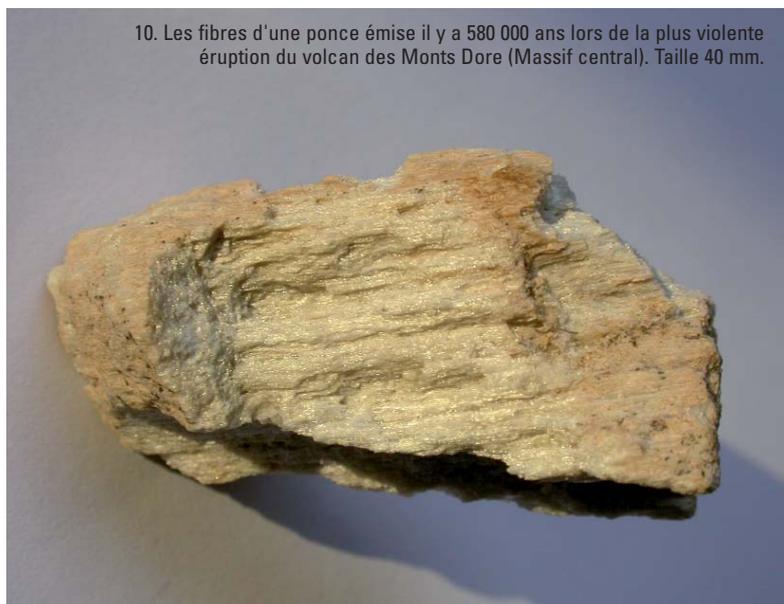
9. Le rocher Aiguilhe, au Puy-en-Velay, piton haut de 82 m formé principalement de verre basaltique transformé en palagonite, la même roche ayant servi à édifier à son sommet la chapelle romane St-Michel (XIII^e siècle).

ves. Comme cela se produit lors de la célèbre éruption du Vésuve qui détruisit Pompéi en l'an 79 de notre ère, des produits essentiellement vitreux, les ponces, peuvent alors être émis en quantités considérables. Cette nature vitreuse, les ponces la doivent au fait d'être étirées par un flux gazeux s'écoulant à une vitesse supersonique dans un conduit volcanique. La vitesse est donc beaucoup plus grande que celle qui préside à l'étirement (à l'air libre) des cheveux de Pelé. Et comme la viscosité du magma est beaucoup plus forte, les ponces s'étirent en fibres qui s'accrochent étroitement (Fig. 10). Cette texture leur donne de très intéressantes pro-

priétés qui sont exploitées industriellement pour la fabrication d'abrasifs. À Nescher (Puy de Dôme), c'est par centaines de milliers de tonnes que des ponces émises par le volcan des Monts Dore ont par exemple été transformées en poudres abrasives...

Le terme de la différenciation magmatique est souvent représenté par les rhyolites (Tableau). En raison de leur viscosité extrême, ces laves s'épanchent très mal et forment au plus de très courtes coulées (Fig. 11). Dans certains cas, la proportion de cristaux est très faible, voire presque nulle. Les roches obtenues se distinguent en ce cas par un bel aspect vitreux et une

10. Les fibres d'une ponce émise il y a 580 000 ans lors de la plus violente éruption du volcan des Monts Dore (Massif central). Taille 40 mm.



© P. Richet

cassure coupante qui leur a conféré une importance domestique et guerrière considérable dans les civilisations néolithiques. Assez peu nombreux dans les diverses parties du monde, les gisements d'obsidiennes ont fait l'objet d'une exploitation précoce et d'un commerce à grande distance –le premier, sans doute, puisqu'il y a plus de 50 000 ans, les pierres étaient déjà exportées, brutes ou taillées. Il est aujourd'hui possible d'identifier la provenance d'une obsidienne par sa teneur en éléments chimiques contenus à l'état de traces, qui est caractéristique de chaque gisement. L'étude de la distribution des obsidiennes est donc devenue une source de renseignements très précieuse sur les routes commerciales de la fin de la préhistoire. L'usage d'obsidiennes pour faire des couteaux ou des pointes de flèches (Fig. 12) est bien connu. On sait moins que ces verres ont servi à faire des coupes ou les premiers miroirs, appelés miroirs des Incas en Amérique du sud. Sans qu'il soit possible de les distinguer à l'œil nu, de petits cristaux présents avaient des effets assez néfastes sur la qualité des obsidiennes qui en comportaient

11. Le front d'une coulée d'obsidienne de l'Obsidian Dome (Californie). Noter minces lits de cristaux blancs généralement présents au sein des blocs noirs.



12. Trouvée dans le désert de l'Arizona, une pointe de flèche en obsidienne du Mexique.

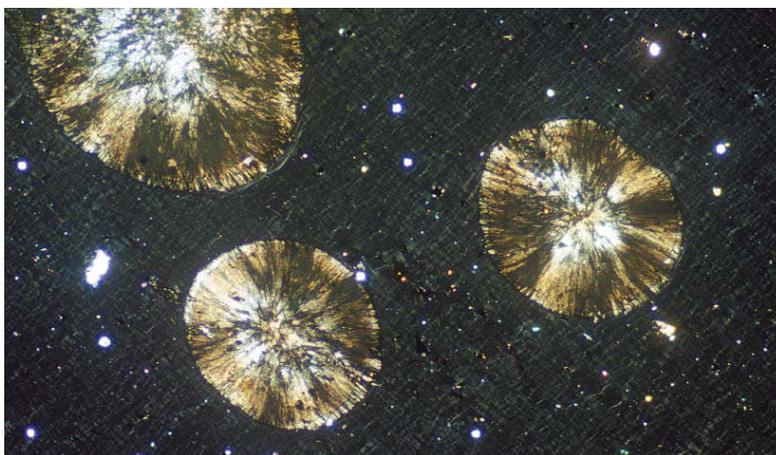
pour que celles-ci ne soient pas exploitées (Fig. 13). Les obsidiennes ont ensuite incité les tout premiers verriers à les imiter en Mésopotamie pour leurs qualités ornementales. Aujourd'hui encore, *l'obsidienne de feu*, une variété trouvée au Mexique, se distingue par son intérêt esthétique. Ses irisations parfois étonnantes (Fig. 14) sont dues à des interférences lumineuses par des microcristaux de magnétite disposés en lits régulièrement orientés (de moins d'un micron d'épaisseur et d'indice de réfraction plus élevé que celui du verre), qu'une taille et un polissage appropriés permettent de mettre en valeur.

DES VERRES SPÉCIAUX

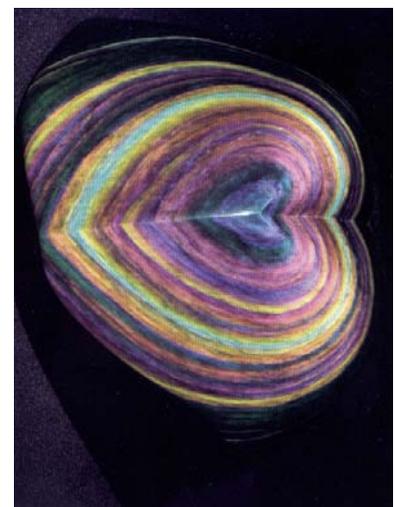
Pour le grand public, la quantité est bien entendu moins importante que la qualité. Les obsidiennes suscitent ainsi plus d'intérêt

que les verres de basalte ! En quantités plus petites encore, la nature a en outre produit des verres spéciaux par des procédés originaux. Depuis toujours, la forme ou l'aspect de ces verres a suscité l'intérêt à la fois d'artisans désireux de travailler des matières rares et d'un public curieux de substances originales. Pour mémoire, les fulgurites doivent d'abord être mentionnées. Comme l'indique leur nom, ces verres sont formés par impact de la foudre sur des sables siliceux. Leur apparence n'est cependant pas vitreuse, car leur aspect de tubes hérissés d'innombrables aspérités reflète l'irrégularité des élévations de température causées au sol par la foudre.

Du point de vue du verrier, les verres trouvés dans la partie égyptienne du désert lybique sont les plus intéressants (Fig 15). Leur composition étant très proche de



13. Des cristaux dans une obsidienne de Lipari (Italie) vus dans une lame mince examinée en lumière analysée-polarisée. Leur aspect sphérolitique est typique d'une cristallisation à très fort taux de surfusion.



14. Une obsidienne *de feu* du Mexique.



◀ 15. Un fragment de verre lybique.

© J. Dyon

▶ 16. Dans les murs de l'église de Rochechouart, une lave bulleuse rougeâtre produite par un impact de météorite il y a 200 millions d'années.

17. Une tectite de Chine.



© P. Richet

celle de la silice pure, ils seraient en effet difficiles à produire artificiellement sous une forme chimiquement homogène. Cette composition particulière fait d'eux les seuls verres naturels à être vraiment transparents, et non seulement translucides. Leur origine a longtemps été controversée. Il apparaît désormais qu'ils se sont formés quand une grande

météorite a explosé en frappant la Terre il y a 29 millions d'années, la chaleur dégagée ayant conduit à fondre par endroits les grès siliceux des lieux. L'explication s'appuie sur le fait que ces verres comportent à l'état de traces les mêmes proportions d'éléments rares, comme l'iridium et le cobalt, que les chondrites, une classe de météorites pierreuses.

Le véritable choc d'une grosse météorite produit des effets considérablement plus importants. En France, les vestiges du cratère d'impact de Rochechouart, dans le Limousin, en témoignent encore plus de 200 millions d'années après la catastrophe. L'échauffement a été tel que certaines roches ressemblent à s'y méprendre à des laves en comportant une proportion importante de verre (Fig. 16), une ressemblance telle qu'on a cru pendant près de 200 ans que ces roches provenaient d'un volcan dont toute autre trace avait disparu...

La chute d'une météorite produit des verres de deux autres façons.

Avant même que l'impact ait lieu, l'air que repousse la météorite s'échauffe au point de faire fondre au sol des fragments de roche et de les disperser autour du cratère créé par la chute. Ce sont les impactites. La pression de l'air peut par ailleurs devenir telle que les fragments fondus sont envoyés dans la haute atmosphère avant de retomber loin sous forme de petits blocs vitreux de formes variées, plus ou moins translucides et de poids dépassant rarement le kg. Ce sont les tectites (Fig. 17).



© A. Pitrou

Fig 17

Comme celle des impactites, leurs compositions sont évidemment très variables.

DE LA NATURE À L'INDUSTRIE

Verres naturels et industriels possèdent évidemment beaucoup de points communs. Si les silicates ont acquis leur actuelle importance industrielle, c'est tout d'abord en raison du fait qu'ils constituent l'essentiel de la croûte terrestre et que leur coût très bas a rendu possible les merveilleux usages auxquels ils se prêtent. De ce point de vue, une Terre faite principalement de borates se serait mal prêtée à tous ces usages ! Passer des matériaux naturels aux verres artificiels a néanmoins soulevé nombre de difficultés. Éliminer le fer et les autres éléments colorants spontanément présents dans tous les

matériaux géologiques pour obtenir des verres transparents fut ainsi une évolution qui s'est étalée sur deux millénaires. En conclusion, il convient enfin de mentionner que l'étude des laves par les naturalistes a aussi contribué aux progrès de l'industrie verrière. Pour ne citer qu'une découverte importante, rappelons que ce fut en étudiant des basaltes fondus (dans un four de verrier) que l'Écossais James Hall (1761-1832) découvrit que la vitesse de refroidissement jouait un rôle crucial dans la formation des verres : en passant d'un lent refroidissement à une trempe, il observa en effet que la roche qu'il obtenait faisait place à un verre. ■

Remerciements

Pour les illustrations et autres concours apportés lors de la préparation de cet article, l'auteur remercie vivement J.-M. Bou, J.-C. Boulliard, A. Carion, J. Dyon, Ph. Mairine, A. Navrotsky, D.R. Neuville, A. Pitrou, J. Roux, N. Santarelli, N. Villeneuve et, tout particulièrement, D. Velde.

RÉFÉRENCES

Carion A., Galois L., Boulliard J.-C. et de la Tullaye R., Fulgurites et verres naturels. Pierres de foudre, de feu et de choc. Collection de Minéraux de l'université Pierre et Marie Curie, Paris, 2007.

Cox K.G., Bell J.D. et Pankhurst R.J., The Interpretation of Igneous Rocks, George Allen & Unwin, Londres, 1979.

Richet P., L'âge du verre, Gallimard, Paris, 2000.

Richet P., Guide des volcans de France, Belin, Paris, 2003.