

# LES FIBRES DE BASALTE

## le matériau de construction du futur ?

Les matériaux composites connaissent une croissance importante, pour la fabrication de divers produits. Ils sont utilisés dans divers secteurs industriels et branches technologiques. Ils réussissent de plus en plus à compléter et à remplacer les matériaux de construction traditionnels et permettent, dans une certaine mesure, de remplacer des matériaux primaires tels que l'acier. Les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont utilisées depuis un certain temps pour produire des matériaux composites. Les fibres de verre sont utilisées pour les charges élevées. Cependant, la production de fibres de verre nécessite l'ajout de trioxyde de bore (B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), qui n'est pas présent en grande quantité et est considéré comme dangereux pour la santé. En raison du coût élevé des fibres de carbone et d'aramide, elles ont peu de chances d'être appliquées en masse. **Ces dernières années, la recherche, la production et l'utilisation des fibres de basalte ont considérablement augmenté. En raison de la production industrielle de fibres de basalte basée sur les dernières technologies, les coûts de production sont comparables à ceux des fibres de verre.**

### Production de la fibre de basalte

Le basalte provient du magma volcanique solidifié et des éruptions volcaniques. Le basalte est un terme courant pour désigner une variété de roches volcaniques, de couleur gris foncé à vert-or. Des couches de basalte d'une épaisseur allant jusqu'à 200 m se trouvent dans les régions d'Asie de l'Est et en Russie. Les premières tentatives de production de fibres de basalte remontent au Français Paul DHÉ de Paris, qui a déposé un brevet à cet effet en Amérique [1]. Par rapport aux fibres de carbone, les besoins énergétiques pour la production de fibres de basalte sont inférieurs d'environ 80 %. Par rapport à la production de fibres de verre, il faut 30 % d'énergie en moins. Le basalte présente également un bilan énergétique nettement meilleur et des émissions de CO<sub>2</sub> plus faibles que

l'acier. Les produits à base de basalte ont également tendance à se situer dans la tranche inférieure des prix (Fig. 1).

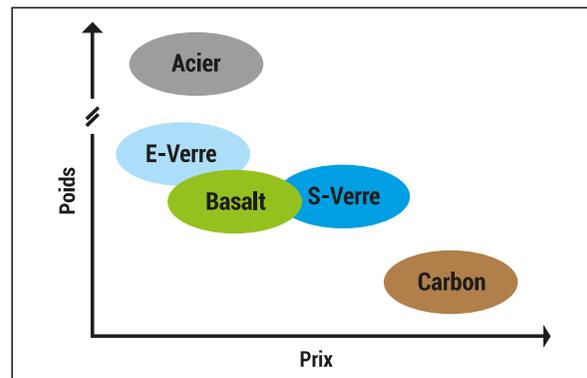


Figure 1 - Comparaison schématique du poids et du prix.

### Propriétés comparatives des fibres de basalte

Les produits en basalte peuvent être comparés à des matériaux utilisés aux mêmes fins dans la construction (tableau 1). Le tableau 1 montre que le basalte est environ 3 fois plus léger que l'acier. À l'exception de l'acier et du polypropylène, ils présentent tous une résistance élevée à la traction. En ce qui concerne le module d'élasticité, il existe deux groupes différents. Le carbone et l'acier sont supérieurs à 200 GPa. Les autres sont en dessous de 140 GPa. L'allongement à la rupture est - sauf pour l'acier

et le polypropylène - de 5 % maximum. Le basalte possède les meilleures propriétés en ce qui concerne les différentes charges de recuit.

### Les alternatives au renforcement de l'acier

Au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, des éléments en béton ont été renforcés avec des inserts en acier pour la première fois en France. Depuis lors, le béton armé est devenu indispensable dans le secteur de la construction. L'utilisation du béton armé est couverte de manière exhaus-

sive par des normes et des lignes directrices. D'innombrables structures ne pouvaient être construites que grâce au béton armé. Cependant, la corrosion des armatures en acier est le plus grand problème du béton. De nombreuses structures en béton, qui devaient avoir une durée de vie utile de 70 ans ou plus, doivent être réparées après seulement 30 ans. Cela entraîne d'énormes coûts supplémentaires pour la maintenance des infrastructures. Le tableau 2 ci-dessous montre les principales différences entre le basalte et l'acier en ce qui concerne leur comportement dans l'environnement du béton.

		Basalt	E-Verre	S-Verre	Polypropylène	Aramid	Carbon	Acier
Densité	g/cm <sup>3</sup>	2,63	2,54	2,54	0,91	1,45	1,78	7,8
Résistance à la traction	MPa	3200-3850	3100-3200	3200-4100	420	2900-3430	3500-6000	600-900
Module d'élasticité	GPa	93	73	86	4	70-140	230-430	250
Allongement à la rupture	%	3	5	5	10	2	2	-
Température de ramollissement	°C	1050	850	850	100	270	-	800
Température de fonctionnement	°C	-260-650	-50-380	-50-380	?-60	-50-250	-50-500	?-500
Température de travail maximale	°C	1100	1000	950	120	500	800	950

Tableau 1 - Propriétés mécaniques en comparaison [ajouté après 2].

Verre E (E = électrique) : verre borosilicate d'aluminium contenant moins de 2 % d'oxydes alcalins ; est considéré comme la fibre standard pour le renforcement général des plastiques et pour les applications électriques, est attaqué en milieu basique et acide.  
Verre S (S = résistance) : verre de silicate d'aluminium avec des ajouts d'oxyde de magnésium ; exigences mécaniques élevées même à des températures élevées.

Basalte	Acier
Forte résistance à la corrosion (Amorphe, inerte aux acides forts, aux alcalis, aux acides, résistant aux alcalis, aux UV et aux effets biologiques)	Faible résistance à la corrosion profonde (Vulnérable aux attaques chimiques) Principale raison de la plupart des dommages
Besoin en ciment plus faible car la résistance à la corrosion n'est pas un problème (conséquence : jusqu'à 20 % de ciment en moins)	Besoin en ciment plus élevé pour un revêtement suffisant
Aucun test de résistance à la corrosion n'est nécessaire	Tests de résistance à la corrosion nécessaires
Faible poids (3 x plus léger, moins de véhicules, moins de personnel)	Poids élevé
Haute résistance à la traction (jusqu'à 4 x plus élevée)	Plus faible
Module d'élasticité inférieur	Jusqu'à 2,5 fois plus élevé
Haute résistance au feu	Basse résistance au feu
Non conducteur d'électricité	Conducteur d'électricité
Production plus écologique	Demande énergétique élevée, fortes émissions de CO <sub>2</sub>
Sans danger pour la santé (non respirable)	Sans danger pour la santé (non respirable)
Le basalte à l'infini (Dans les dimensions du temps humain)	Les ressources en acier sont plus petites
Très longue durée de vie en service	Durée de vie en service plus courte que prévue
Bon potentiel de recyclage (peut être laissé dans le béton)	Il faut également retirer les armatures du béton, les problèmes avec les fibres d'acier
Les fibres de basalte peuvent être facilement traitées dans le béton frais (en raison de leur densité similaire)	Les fibres d'acier ont tendance à se séparer et formation de grumeaux (due à une densité différente)
Quantités optimales de fibres dans le béton 4 à 6 kg/m <sup>3</sup>	Quantité requise de fibres dans le béton 30 à 40 kg/m <sup>3</sup>
Résistance élevée à l'abrasion	Résistance moindre à l'abrasion

Tableau 2 - Comparaison des produits de basalte avec l'acier.

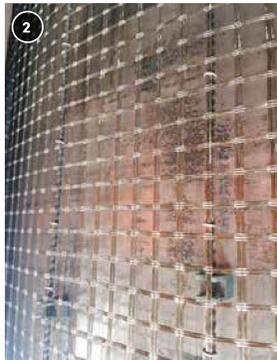
Comme protection contre la corrosion, nous essayons de protéger ou de remplacer l'armature en acier par une galvanisation à chaud, des revêtements avec un vernis époxy, de l'acier inoxydable, un revêtement inox, une hydrophobisation de la surface du béton, etc. Toutefois, le succès de ces mesures de protection est limité. De plus, ces alternatives augmentent considérablement le prix du béton. Une façon de remplacer l'acier est d'utiliser des matériaux composites comme indiqué dans le tableau 1. Les principales différences de ces nouveaux matériaux sont le module d'élasticité et l'allongement à la rupture. Cela signifie que les normes connues pour le béton armé ne peuvent pas être adoptées individuellement. Divers pays sont en train de rédiger leurs propres normes et lignes directrices pour les renforcements non métalliques. Il existe des normes aux États-Unis [3 - 7], au Royaume-Uni [8], en Italie [9], au Canada [10], au Japon [11] et à l'ISO [12].

**Produits à base de basalte pour la production de béton - exemples pratiques**

En Suisse, des nouveaux matériaux et méthodes de construction peuvent être mis en pratique relativement facilement. En principe, les normes de construction permettent de contourner les spécifications si des essais et des calculs préliminaires montrent que les exigences peuvent également être satisfaites par d'autres produits ou procédés.

**• Tube en béton de basalte pour le train à grande vitesse**

La Suisse prévoit un train à grande vitesse basé sur la technologie du vide. Afin d'éviter une éventuelle corrosion de l'acier d'armature, des filets de renforcement en basalte sont testés pour la production des tubes en béton. Le filet d'armature léger est monté sur le coffrage ouvert en peu de temps et sans grand effort (Fig. 1 et 2). Le béton est ensuite placé dans le coffrage (Fig. 3).



Figures 1 à 3 - Filets de renforcement en basalte pour la production des tubes en béton (Usine d'éléments de béton Creabeton).

**• Rénovation d'un plafond en béton voûté à l'aide de lamelles de basalte**

Le plafond en béton d'un abri pour vélos présentait une courbure visible (Fig. 4) suivie de nombreuses fissures (Fig. 5). La dalle de béton a été redressée et stabilisée avec succès au moyen de lamelles de basalte (Fig. 6).

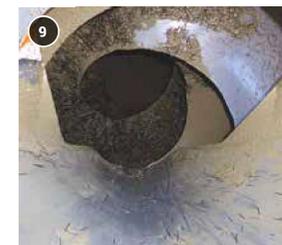


Figures 4 à 6 - Redressement d'un plafond en béton au moyen de lamelles de basalte (Abri pour vélos à Lyss).

**• Prévention du rétrécissement d'une dalle au moyen de fibres de basalte**

Pour éviter autant que possible un retrait précoce de la dalle de base (Fig. 7) pendant un mois d'été chaud, environ 5 kg de fibres de basalte ont été ajoutés

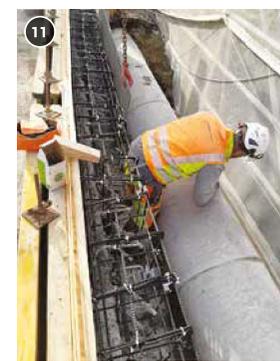
par m<sup>3</sup> de béton (Fig. 8). Les fibres ont été ajoutées directement dans le camion malaxeur (Fig. 9).



Figures 7 à 9 - Utilisation de fibres de basalte pour éviter le retrait du béton (Propriété privée, Genferstrasse 24, Zürich).

**• Réparation d'une bordure de pont à l'aide de renforts et d'étriers en basalte**

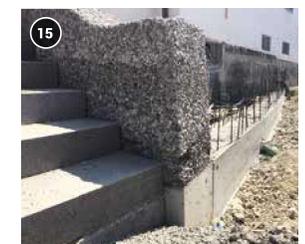
Les bordures des ponts souffrent souvent de la corrosion de l'acier due au salage en hiver. Afin d'éviter une nouvelle destruction des nouvelles bornes, l'ingénieur responsable, en collaboration avec l'ingénieur cantonal de Berne, ont décidé d'utiliser des renforts et des étriers en basalte (Fig. 10 à 12).



Figures 10 à 12 - Utilisation de renforts et d'étriers pour la réparation des bordures de pont (Pont de la route principale à Lützelflüh, 11<sup>e</sup> arrondissement d'ingénieur en chef, Service pour le Jura bernois ; Ingénieur responsable Hartenbach & Wenger AG.

**• Béton d'infiltration avec renforcement en basalte pour remplacer le mur de l'église**

Selon le cahier des charges, le mur de l'église devait être fait de béton suintant pour des raisons esthétiques. Des renforts de basalte ont été utilisés pour empêcher la corrosion prématurée des armatures en acier (Fig. 13 à 15).



Figures 13 à 15 - Remplacement d'un mur d'église à l'aide d'un béton d'infiltration composé d'armatures de basalte. Église réformée à Muri Bern ; Ingénieur responsable Hartenbach & Wenger AG.

**• Béton projeté fabriqué à partir de treillis de basalte et de fibres de basalte**

La performance des filets de basalte et des fibres de basalte dans le béton projeté a été testée dans des tests souterrains (Fig. 16 à 18). Les renforts en basalte sont environ 4 fois plus légers que les renforts en acier. Ils peuvent également être facilement découpés et ajustés avec des ciseaux (Fig. 17).

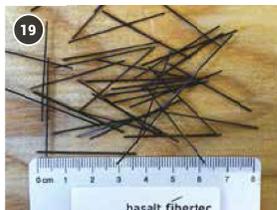


Figures 16 à 18 - Essais de béton projeté avec des grilles et des fibres de basalte (Strabag AG).

1 tex = 1 gramme par 1000 mètres.

**• Performance du béton avec des bâtonnets de basalte torsadé et ondulés**

Sur la base d'essais sur béton, deux types de bâtonnets de basalte différents ont été testés : Type droit (Fig. 19), type torsadé (Fig. 20) et type ondulé (Fig. 21). Les fibres ont été déversées directement dans le camion malaxeur de béton (Fig. 22). Les tiges sont clairement visibles dans le béton frais (Fig. 23). Les surfaces de fracture fraîches sur le béton montrent que les bâtonnets sont bien ancrés dans le béton et ne sont pas arrachées à la charge de rupture (Fig. 24).



Figures 19 à 24 - Essais de bétons à l'aide de divers bâtonnets de basalte.

Les types de bâtonnets ont une longueur comprise entre 35 et 50 mm, le bâtonnet droit à une épaisseur de 0,5 mm, le bâtonnet torsadé à une épaisseur de 0,65 mm et le bâtonnet ondulé à une épaisseur de 0,9 mm. Le tableau



3 montre les résultats des résistances à la traction des bâtonnets de basalte. La résistance alcaline des bâtonnets (de 800-tex<sup>1</sup>) et ont été testées dans une imprégnation alcaline.

	Force maximale N	Résistance à la traction MPa	Module d'élasticité GPa	Allongement à la rupture %
<b>Forces initiales</b>	707.44	2343.39	78.86	3.15
<b>Résistance après imprégnation alcaline</b>	649.41	2151.16	81.01	2.90

Tableau 3 - Résistance à la traction des bâtonnets en basalte. L'imprégnation se fait ensuite dans une solution alcaline à pH13-14, dure 24h à 60°C (EN 13496).

Les résultats du tableau 3 montrent que les bâtonnets de basalte ont une résistance aux alcalis suffisamment élevée car les différences entre les valeurs sont faibles.

Le mélange de béton utilisé est composé comme suit :

Produit	Kg/m <sup>3</sup>
<b>Agrégats fin</b>	567
<b>Agrégats grossier (D<sub>max</sub> : 10mm)</b>	1261
<b>Ciment (Cem I, 42,5)</b>	400
<b>Eau</b>	168
<b>Bâtonnets</b>	4

Tableau 4 - Composition du béton.

La résistance à la flexion (essai de flexion en 4 points) a été déterminée sur les échantillons de béton. Le diagramme 1 montre que, comme prévu, que le béton zéro (sans fibres) a la plus faible énergie de rupture et que l'absorption de charge diminue rapidement après la rupture. Les bétons avec les bâtonnets de basalte ont une résistance plus élevée. Elles sont de 9 % supérieures pour le béton avec les bâtonnets ondulés et de 20 % supérieures pour le béton avec les bâtonnet torsadé (tableau 5). Les deux bétons avec des bâtonnets de basalte ont encore des résistances résiduelles élevées après rupture par rapport au béton zéro.

Type de fibre	Résistance à la flexion à la formation initiale de la fissure MPa	Différence de résistance %	Résistance équivalente à la flexion Mpa	Différence de résistance %
<b>Torsadé</b>	2,99	20	3,42	950
<b>Ondulé</b>	2,70	9	4,24	1178
<b>Béton zéro</b>	2,48	-	0,36	-

Tableau 5 - Valeurs caractéristiques de la résistance à la flexion.

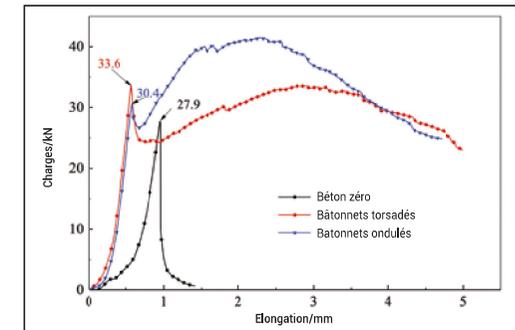


Diagram 1 - Résistance à la flexion sur des éprouvettes de 150 x 150 x 550 mm, après 28 jours. Essais de charge sur des bâtonnets de basalte torsadé et ondulés par comparaison au béton zéro sans tiges.

**Perspectives**

Les premières expériences avec les produits à base de basalte en Suisse et dans les pays voisins sont très positives. Au cours des deux dernières années, des bétons avec des armatures et des bâtonnets de basalte ont été utilisés dans plusieurs projets. L'intérêt des maîtres d'ouvrage est également grand, car les dégâts causés par la corrosion de l'acier dans le béton armé génèrent des coûts énormes et occuperont longtemps les générations futures. La tendance à la construction de structures en béton plus fines et plus légères favorisera

également l'utilisation de produits à base de basalte. De plus en plus d'ingénieurs civils sont prêts à adopter ce nouveau matériau de construction afin de réaliser les premiers ouvrages. Dans l'avenir prévisible, les premières normes et recommandations européennes pour ces matériaux composites seront disponibles, de sorte que l'utilisation des matériaux de construction en basalte connaîtra à nouveau un essor.

Cédric THALMANN  
Dr. sc. nat. Ingénieur-geologue ETH/SIA/CHGeoL

[1] United States Patent Office, Application Number US46164121A, United States Patent Nr. 1,438,428, Dec. 12, 1922.  
 [2] Kunal Sing, A Short Review on Basalt Fiber, International Journal of Textile Science 2012, 1(4): 19-28.  
 [3] ASTM D3171 - 15 :2015 Standard test method for constituent content of composite materials.  
 [4] ASTM D 7205/D7205M: 2006 TEST METHOD FOR TENSILE PROPERTIES OF FIBER REINFORCED POLYMER MATRIX COMPOSITE BARS.  
 [5] ASTM D7913 / D7913M-14: 2014, Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pull-out Testing.  
 [6] ASTM D7914 / D7914M-14: 2014, Standard Test Method for Strength of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bent Bars in Bend Locations.  
 [7] ACI 440.3R: 2012 GUIDE TEST METHODS FOR FIBER-REINFORCED POLYMERS (FRFP) FOR REINFORCING OR STRENGTHENING CONCRETE STRUCTURES  
 [8] CIRIA, Fibre-reinforced polymer bridges – guidance for designers, CIRIA C779, 2018.  
 [9] CNR-DT 204/2006, Guide for the design and construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures, 2006.  
 [10] CSA S806: 2012 DESIGN AND CONSTRUCTION OF BUILDING STRUCTURES WITH FIBRE-REINFORCED POLYMERS, CSA S807: 2010, Specification for fibre reinforced polymers.  
 [11] JSCE, Quality specifications for continuous fiber reinforcing materials (JSCE-E-131-1995), 1995.  
 [12] ISO 10406-1 :2014, Fibre reinforced polymer (FRP) reinforcement of concrete – test methods – Part 1: FRP bars and grids. ISO 10640:2011.