

Géopolymères : Des hypothèses concluantes

[Accueil](#) [Chroniques](#) [Nouveautés](#)

PIERRE ARTIFICIELLE ou REAGGLOMEREES selon le professeur Joseph Davidovits

"Ils ont bâti les pyramides" (2002), "La nouvelle histoire des pyramides" (2004), "Bâtir les Pyramides sans pierres ni esclaves ?" (2017).

DOMAINE	HISTOIRE
Vaisselle de 1 à 2mm d'épaisseur	<p>Le chimiste et métallurgiste français Henri Le Châtelier (1850-1936) est le premier à postuler l'existence de la Pierre artificielle.</p> <p>Il existe 30 000 ustensiles égyptiens (vases, gobelets & assiettes) dont certains ont une épaisseur de 1mm à 2mm d'épaisseur, lesquels sont impossibles à sculpter.</p> <p>Il existe au musée du Caire (Egypte) et au musée du Louvre (France) de la vaisselle (en basalte, calcaire, diorite, gneiss) faisant moins de 2mm d'épaisseur.</p> <p>La célèbre statue du pharaon Khafra (ou Khefren), pourtant faite en diorite (une des pierres les plus dures), ne présente aucun signe de marque d'outils.</p>
Pierre artificielle geopolymer.org	<p>1 979 : Joseph Davidovits suggère l'usage des blocs de carrière en guise de fondation.</p> <p>Les pierres déjà érodées ou délitées (désagrégées) ont servi à la construction de la base (les fondations) des pyramides.</p>
Blocs de la pyramide de Khéops	<p>22 juin 1 982 : Procédé de fabrication de Davidovits & analyse par spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN)</p> <p>Présence de fibres végétales, dents d'animaux et bulles d'air; inexistantes en temps normal dans un calcaire de l'ère éocène de 60 millions d'années !</p> <p>Le spectre RMN aluminosilicate révèle que la pierre de Khéops (silicate amorphe, non cristallisé) contiendrait 15% de ciment géopolymère artificiel.</p> <p>Le béton de calcaire ré-aggloméré se compose de 90% d'agrégats minéraux naturels (dont des coquillages fossiles) et 5 à 10% de liant géopolymère synthétique.</p>
Technique universelle	<p>02 octobre 1 987 : Procédé de stabilisation / solidification de Davidovits & les pyramides d'Egypte sur une durée de 250 ans</p> <p>Depuis la pyramide de Doser jusqu'à celles en briques crues, le professeur Joseph Davidovits postule que les Egyptiens ont utilisé la chimie de la pierre réagglomérée.</p> <p>La pierre artificielle est d'usage religieux (temple, tombe et statue), les briques crues sont destinées à un usage profane (maison, palais, garnison).</p> <p>Le calcaire contient naturellement de l'argile kaolinique, une colle géologique (ou ciment de liaison), le géopolymère réactif des temps modernes.</p>
Sédimentation ou solidification	<p>De nature friable, le calcaire argileux s'adapte très bien à l'agglomération (géochimiste allemand D. D. Klemm, l'égyptologue Mark Lehner & le géologue L. Gauri).</p> <p>Calcaire naturel : Dépôt de restes fossiles (coquillages nummulites) uniquement en position horizontale dans les couches sédimentaires séculaires.</p> <p>Calcaire artificiel : Dépôt dans toutes les directions de ces mêmes coquillages, car soumis à une solidification artificielle (ciment, béton) éclair.</p> <p>Le calcaire naturel se désagrège rapidement en 24h avec de l'eau, raison pour laquelle les coquillages ne sont pas abîmés (pierre désagrégée et non concassée).</p>

Géopolymères : Vestiges & textes probants

[Accueil](#) [Chroniques](#) [Nouveautés](#)

PIERRE ARTIFICIELLE ou REAGGLOMEREES selon le professeur Joseph Davidovits

"Ils ont bâti les pyramides" (2002), "La nouvelle histoire des pyramides" (2004), "Bâtir les Pyramides sans pierres ni esclaves ?" (2017).

DOMAINE	HISTOIRE
Plusieurs moules	<p>Les remparts des temples de Khasekhemwy (2 730 av. J.-C.), construits en briques d'argile crues, étaient fabriqués à partir de cinq moules différents.</p> <p>L'hétérogénéité des moules donne aux monuments la capacité de résister aux tremblements de terre, en évitant l'amplification des ondes sismiques.</p>
Stèle de la Famine (île de Séhel, près d'Éléphantine)	<p>Cette stèle (2 650 av. J.-C.) met en scène le dieu Khnoum, le pharaon Djoser & son architecte Imhotep (constructeur de la première pyramide de Saqqarah).</p> <p>Colonne 12 : " Avec ces produits (minéraux) ils ont bâti (...) la tombe royale (la pyramide)".</p> <p>Colonne 18 à 20 : Le dieu Khnoum donne à Djoser les minéraux nécessaires à la construction de ces monuments sacrés.</p> <p>Aucune mention des traditionnelles pierres dures et compactes comme le mot calcaire (ainr-hedj) ou encore le mot granit (mat).</p>
Khnoum, dieu pétrisseur	<p>Il est représenté sous la forme d'un homme à tête de bélier aux cornes horizontales.</p> <p>Dans son acte de création, il "pétrit" l'humanité sur son tour de potier avec le limon du Nil et d'autres minéraux comme le mafkat (sel natron).</p> <p>Son symbole hiéroglyphique est un vase de pierre dure comme ceux des époques nagadéennes (3 500 à 3 000 av. J.-C.).</p>
Fresque de Ti	<p>Sous la Ve dynastie (2 450 av. J.-C.)</p> <p>Elle illustre le travail de sculpteurs d'une statue en bois, la confection d'une statue en pierre et le mélange dans des vases en céramiques.</p> <p>Taille d'une statue, façonnage d'une statue (en pierre synthétique), l'action de synthétiser ("faite de main d'homme") & mélange des produits chimiques caustiques.</p>
Stèle d'Irtysen (musée du Louvre, Paris)	<p>Autobiographie du sculpteur Irtysen sous un des pharaons Mentouhotep, XIe dynastie (2 000 av. J.-C.)</p> <p>Elle présente la technique de fabrication des statues en pierres synthétiques ("pierre coulée").</p> <p>Irtysen indique posséder "une connaissance secrète" pour fabriquer des statues en pierre, pas en les taillant mais en les formant dans des moules.</p> <p>Il affirme également que même le feu ne peut consumer ce matériau, ni l'eau le diluer.</p>

Géopolymères : Des formules cohérentes

[Accueil](#) [Chroniques](#) [Nouveautés](#)

DOSAGE (rôle et intérêt)	FACONNAGE (rôle et intérêt)	SECHAGE (rôle et intérêt)	CUISSON (rôle et intérêt)
ARGILE (matière plastique) Grès, terre grasse et molle	Plus de plasticité, de malléabilité Plus de cohésion	Cohésion & retrait (8% de volume en moins)	Solidité A 23°C (2h-40MPa à 48h-70MPa)
KAOLIN (matière plastique) Argile blanche (90% de kaolonite) (dérivé des roches granitiques)	Vitesse de prise au coulage	Cohésion & retrait (8% de volume en moins) Diminue la translucidité	Blancheur
REFRACTAIRES (matière dégraissante) Silice	Moins de plasticité – Plus de rigidité	Plus de fluidité de l'eau, de capillarité, plus de porosité Moins de retrait, de perte de volume, de déformation Améliore le séchage	Résistance à la chaleur Fome le squelette de la pâte Caoutchouc (100°C – 10 MPa) Polymère (100°C – 50 MPa) Composite (100°C - 500 MPa) Mousse (100°C – 1 MPa)
Granulat (sable, gravier, gravillon)			
FONDANTS (matière dégraissante) Feldspath ou granite	Moins de plasticité – Plus de rigidité Feldspath sodique ou albite (NaAlSi ₃ O ₈) à 20°C	Plus de fluidité de l'eau, de capillarité, plus de porosité Moins de retrait, de perte de volume, de déformation Améliore le séchage	Vitrification sans attendre le point de fusion Solidité & rigidité Allonge le palier de vitrification Porcelaine (700°C – 1000 MPa) Verre (300°C – 500 MPa) Céramique (600°C – 5000 MPa) Brique (800°C – 500 MPa) Terre cuite (900°C)
(roche ignée, magmatique, volcanique) (Ba,Ca,Na,K,NH4)(Al,B,Si)4O8 Chaux vive	Feldspath potassique ou orthose (KAlSi ₃ O ₈) à 20°C	NHL 2 (10-25 jours & 20-70 kg/m ²) si enduit NHL 3,5 (10-15 jours & 35-100 kg/m ²) si mur NHL 5 (2-4 jours & 50-150 kg/m ²) si mur	
(oxyde de calcium ou CaO) Dérivé du calcaire CaCO ₃ (carbonate de calcium, calcaire, craie) Poudre blanche			

Géopolymères : Des formules cohérentes

[Accueil](#) [Chroniques](#) [Nouveautés](#)

PIERRE ARTIFICIELLE ou REAGGLOMEREES selon le professeur Joseph Davidovits

"Ils ont bâti les pyramides" (2002), "La nouvelle histoire des pyramides" (2004), "Bâtir les Pyramides sans pierres ni esclaves ?" (2017).

Géopolymérisation	Matériau chimiquement et structurellement comparable à de la roche naturelle , obtenu dans une large gamme de température de fabrication.				
Température de cuisson	Température ambiante De 24°C ± 3 °C	Très basse cuisson De 60°C à 100°C	Basse cuisson De 150°C à 200°C	Moyenne cuisson De 500°C à 800°C	Haute cuisson De 1000°C à 1500°C
Ciment	Mélange (poudre + liquide) formant une pâte plastique liante, durcissant rapidement et atteignant en peu de jours (4h à 28 jours) son maximum de résistance (20 à 70-100 MPa). Pour la synthèse des géopolymères, l'on utilise essentiellement deux types de matière première : les matériaux aluminosilicates et les solutions alcalines .				
Aluminosilicates	Origine naturelle (kaolin , micas, andalousite, spinelle, illite, scories volcaniques) ou synthétique (metakaolin, cendres volantes, sous-produit calciné ou résidu d'exploitation industrielle).				
Solutions alcalines	La plus courante étant la solution aqueuse de sodium (NaOH) ou de potassium hydroxyde (KOH), le silicate de sodium (Na ₂ SiO ₃), silicate de potassium (K ₂ SiO ₅).				
Adjuvants	Ingrédients qui augmentent la résistance du matériau. Il existe deux types d'adjuvants: les particules (matrices métalliques) et les fibres. Ces renforts peuvent être inorganiques (verre, silice, céramiques, l'alumine amorphe) ou organiques (aramide, polyester, polyamide, fibres végétales, fibres animales, le carbone).				
La fabrication d'un ciment géopolymère de bonne qualité nécessite de bons outils .					
Broyeur	Les particules idéales ont un diamètre compris entre 50 µm (farine, craie) et 200 µm (sucre, sable). Tout au plus la taille millimétrique (grain de semoule).				
Malaxeur	Le mélange (poudre + liquide) doit être rigoureusement homogène (hélice au bout d'une perceuse dans un bidon, ou bétonnière).				
Vibreux	Une fois le mélange dans son coffrage, le vibreur permet d'expulser l' air emprisonné par les particules, lors du malaxage.				
Durée	Un délai d'au moins 10 minutes est souvent recommandé pour chacune de ces opérations.				
Recouvrement	Recouvrir d'un fin film de polyéthylène (éviter l' évaporation d'eau au cours de la prise et du durcissement de la pâte de ciment), surtout si la température extérieure dépasse les 25°C.				
séchage	Plus le temps de séchage s'accroît (120 à 490 minutes = 7 à 50 MPa) meilleure sera la résistance (10 à 100 h = 60 à 100 MPa). Réussir une recette c'est connaître tous les " ingrédients " que l'on y met, mais c'est surtout comprendre ce qui peut influencer (et donc changer) le résultat final.				
Climat	La variation de température (voire du taux d'humidité) joue un rôle important. Une température constante (tout au plus ± 3 °C) est préconisée.				
Agrégat	Tant la poudre que le mélange, la taille des particules et l' homogénéité doivent être respectées rigoureusement.				
Actions	Les opérations (concassage, malaxage, vibrage, séchage) qui se font à des vitesse s spécifiques, jouent pour beaucoup au succès du produit.				
L'obtention d'un ciment géopolymère de très bonne qualité requiert surtout un bon dosage des constituants.					
"Rien ne se crée, rien ne se perd..."	Selon le vieil adage d'Antoine de Lavoisier : "Tout se transforme !". Exemple : l'équation stoechiométrique H ₂ O = H ₂ + O, une masse d'eau de 18g donnerait 2g d'hydrogène et 16g d'oxygène (d'après leur masse molaire respective de 1g/mol et de 16g/mol).				
Masse molaire	A partir du tableau de classification périodique des éléments de Mendeleiev (ou Mendelieff), on peut retrouver le poids de chaque constituant utilisé				
	Eau H ₂ O = 18 g/mol		Solution aqueuse de sodium NaOH = 40 g/mol	Solution aqueuse de potassium hydroxyde KOH= 56 g/mol	
	Chaux vive CaO = 56 g/mol	Chaux éteinte Ca(OH) ₂ = 74 g/mol			
	Kaolinite Al ₂ O ₃ = 101 g/mol				
	Feldspath potassique KAlSi ₃ O ₈ = 281 g/mol	Sable de quartz SiO ₂ = 60 g/mol			
	Carbonate de sodium Na ₂ CO ₃ = 106 g/mol	Na ₂ O = 62 g/mol			
Rapport molaire	Ration SiO ₂ / Al ₂ O ₃ 3,4 à 3,8 (1,7 < Si/Al < 1,9)		Ratio Na ₂ O /SiO ₂ de 0,25	Ratio H ₂ O /Na ₂ O de 10	Ration Na ₂ O/Al ₂ O ₃ proche de 1

Géopolymères : Des formules cohérentes

[Accueil](#) [Chroniques](#) [Nouveautés](#)

PIERRE ARTIFICIELLE ou REAGGLOMEREESelon le professeur Joseph Davidovits

"Ils ont bâti les pyramides" (2002), "La nouvelle histoire des pyramides" (2004), "Bâtir les Pyramides sans pierres ni esclaves ?" (2017).

DOMAINE	HISTOIRE
Ciment des Egyptiens	<p>Calcaire argileux + Eau du Nil + Mafkat (silicate hydraté de cuivre et d'alumine) + Sel natron égyptien (carbonate de soude) + Chaux (cendres de plantes & bois)</p> <p>4,5 kilos de calcaire (l'ajouter en dernier!) + 2 litres d'eau + 160 grammes d'argile kaolinite + 60 grammes de carbonate de soude + 80 grammes de cendres</p> <p>Le site de Tracy-le-Val (sud de Saint-Quentin, France) possède du calcaire de coquillage nummulites, mais pas d'argile kaolinite (comme celui du plateau de Gizeh).</p> <p>Prévoir un moule ou un coffrage dans un matériau qui n'absorbe pas l'eau (en bois recouvert d'une résine, silicone, polystyrène ou en mousse polyuréthane).</p>
Pierres naturelles	<p>Argile kaolinite + Carbonate de sodium (natron égyptien) + Chaux éteinte (cendres) = Calcaire (hydrosodalite) + Granit (feldspath hydraté)</p> <p>$Si_2O_5, Al_2(OH)_4 + Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 = > CaCO_3 + Na_2O.2SiO_2Al_2O_3.nH_2O$</p> <p>argile + natron + chaux => calcaire + feldspathoïde (c'est-à-dire une Pierre naturelle)</p>
Ciment d'aujourd'hui	<p>85 à 90 % calcaire + 10 à 15% argile kaolinique (éventuellement calciné) + 1/3 poids d'argile en soude caustique (titré à 9ppm) + Eau = réaction chimique</p> <p>Un superplastifiant (argile, kaolinite) serait le bienvenu.</p> <p>La chaleur estivale accélère la réaction chimique, cependant le mélange a besoin d'eau pour une plus grande efficacité.</p> <p>9 ppm ou 9 parties par million. La soude caustique est le catalyseur qui produit la dissolution rapide de la silice et de l'alumine.</p>
Pierre moulée	<p>Le type de liant dépend de l'endroit où vous souhaitez positionner la pierre artificielle.</p> <p>Liant d'agglomération (géopolymère organique) : La matrice en résine organique ne résiste pas aux rayonnements UV (ultraviolets) et IR (infrarouge). Pierre d'intérieur.</p> <p>Liant d'agglomération (géopolymère hydraulique) : Chaux & ciment Portland. La matrice est stable aux UV et IR. Pierre d'extérieur, sensible aux acides atmosphériques.</p> <p>Liant d'agglomération (géopolymère minéral) : Alumino-silicates alcalins ou poly(sialate, sialate-siloxo, sialate-disiloxo). Stable aux UV et IR, résistant aux acides.</p>
Alumino-silicates	<p>Brevets français FR 2.489.290, 2.489.291, 2.528.818, 2.621.260, 2.659.319, 2.666.253, 2.758.323.</p> <p>Désigne principalement le taux des géopolymères en potassium (K), calcium (Ca), sodium (Na), eau (H₂O), silicium (Si), aluminium (Al)</p> <p>484 parties de granit broyé (granulométrie entre 0,05mm et 7mm) + 90 parties de ciment géopolymérique (K, Ca poly sialate-siloxo) + 30 parties d'eau</p> <p>Une journée à température ambiante puis démoulage. Une semaine dans un sac plastique fermé (il permet de garder l'humidité).</p>

Géopolymères : Des formules cohérentes

[Accueil](#) [Chroniques](#) [Nouveautés](#)

PIERRE ARTIFICIELLE ou REAGGLOMEREES selon le professeur Joseph Davidovits

"Ils ont bâti les pyramides" (2002), "La nouvelle histoire des pyramides" (2004), "Bâtir les Pyramides sans pierres ni esclaves ?" (2017).

DOMAINE	HISTOIRE
Mortier de ciment	<p>En usage pour les façades intérieures</p> <p>1 volume de ciment + 3 ou 4 volumes d'agrégat calcaire + 1/2 volume d'eau</p> <p>Ajout d'un hydrofuge, pour une utilisation extérieure.</p> <p>Les pigments de couleur sont à mélanger à sec (avant d'y ajouter l'eau).</p>
Mortier bâtard	<p>En usage pour les façades extérieures</p> <p>1/2 volume de ciment + 1/2 volume de chaux + 3 ou 4 volumes d'agrégat calcaire + 1/2 volume d'eau</p> <p>Laissez sécher le mortier dans les moules dans un endroit sec, à l'abri de la chaleur et du froid</p> <p>Ne laissez pas vos moules en plein soleil pour faire sécher plus rapidement le mortier. Démoulage au bout de 12 heures (à 20°C) à 24 heures (à 10°C ?).</p>
Technique de démolage	<p>Conseils pratiques</p> <p>Si le bloc se fissure au démolage (car pas totalement sec), n'hésitez pas, soit à le remouiller (tant qu'il est encore humide), soit à reconstituer le moule.</p> <p>S'il se fissure, c'est que la proportion de silice (silicate ou argile kaolinite) est trop importante par rapport au reste du mélange. Réduire sa part ultérieurement.</p> <p>Fourniture chez le grossiste en poterie ou chez le grossiste en produits agricoles (argile blanc, silicate de soude, soude en perle, ...).</p>
Ingrédients	<p>Argile kaolin ou argical 1200s.</p> <p>Hydroxyde de potassium (KOH), hydroxyde de sodium (NaOH)</p> <p>Silicate de sodium (Na₂SiO₃), silicate de potassium (K₂Si₂O₅)</p>
Facteurs prépondérant	<p>Rapport Silicium/aluminium (Si/Al), rapport hydroxyde /eau (OH/H₂O)</p> <p>Temps de malaxage, temps de repos (pause entre chaque opération)</p>
Gâchage	<p>100g de calcaire (poudre 0/2) + 30g d'argile kaolin (argical 1200s) + 9g de silicate + 10 à 20 ml d'eau</p> <p>600g de KOH ou NaOH à 10m/l (1mole de NaOH = 40g et 1 mol de KOH = 56g) soit 900 g de silicate.</p> <p>Pensez aux EPI (Equipement de Protection Individuelle) : Lunettes de protection et gants ! Le mélange est chaud et très agressif.</p> <p>Argile kaolin + eau (EPI) – Laissez refroidir – Rajoutez le silicate (le superplastifiant) – Attendre 15 minutes – Ajoutez le calcaire (malaxeur ou mélangeur + perceuse)</p>
Archivage	<p>Tableau récapitulatif des opérations (l'étude des conditions initiales est PRIMORDIALE)</p> <p>Pour chacune des étapes (opérations + pauses), pensez à noter les valeurs spécifiques nécessaires afin de comprendre pourquoi la recette fonctionne (ou pas).</p> <p>Tout est important : volume, poids, granulométrie, vitesse de malaxage, outil utilisé, température, hydrométrie, vitesse du vent, temps à l'orage, jour de l'année)</p>
Quelques astuces	<p>Plus tôt vous serez précis et rigoureux, plus vite vous obtiendrez de bons résultats (balance au milligramme & cahier de notes).</p> <p>Commencez petit, car certaines étapes sont très caloriques à grande échelle (énergie explosive du mélange kaolin+eau & travail énergivore du malaxage).</p> <p>Gardez à l'abri du soleil dans des fioles (idem que les dons de sang) les échantillons de chaque ingrédient.</p>