

Chapitre II. Liants alternatifs et produits de substitution

II.1. Introduction

Le béton est le matériau de construction existant le moins cher et par conséquent le plus utilisé dans l'industrie de la construction. Cependant, la production du béton émet une importante quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et, avec environ une moyenne de $1,5 \text{ m}^3$ par habitant et par an, contribue à plus de 6-7% des émissions mondiales de GES (émissions de Gaz à Effet de Serre).

La quantité de gaz à effet de serre émise par la fabrication du ciment Portland était plus de 3 milliards de tonnes/an.

Ces chiffres révèlent la nécessité et l'urgence d'agir sur ce matériau de construction tant utilisé et dont l'empreinte écologique pèse dans la balance mondiale.



Figure II.1. Les émissions de CO_2 atteignent un niveau record

Actuellement, de nombreux projets sont développés pour continuer à faire baisser cette empreinte. Deux solutions se développent actuellement :

La première vise à réduire la quantité de béton fabriqué par la production d'un béton de meilleure qualité. Pour une même résistance recherchée, ces bétons plus performants permettraient de réduire le volume de matière nécessaire. Le béton fibré ultra haute performance (BFUP) en est le meilleur exemple.



Figure II.2. Exemple de Passerelle des Anges (France) en BFUP

La deuxième solution s'avère être plus réaliste dans le sens où elle propose de limiter au maximum l'usage de clinker tandis que la première propose plutôt une augmentation de la résistance des bétons, ce qui correspondrait à une hausse du taux de ciment dans le mélange, qui semblerait engendrer une production plus importante du clinker.

Les recherches actuelles s'intéressent donc au ciment puisqu'il est l'élément responsable des émissions de gaz à effet de serre liées à la production de béton. De nombreuses études sont menées pour développer des liants susceptibles de substituer partiellement ou totalement le clinker.



Figure II.3. Exemples de produits de substitution
(Fumée de silice, Pouzzolane, Laitier, Cendres volantes, Métakaolin, Calcaire)

la recherche de liants alternatifs au ciment Portland en effectuant une classification des principaux liants alternatifs et qui s'effectuera sur une étude des impacts environnementaux des ciments, par l'élaboration d'analyses de cycles de vies (ACV) pour chacun des liants.

Cette classification révélera si les nouveaux liants développés sont réellement intéressants tant sur le plan écologique que sur le plan constructif.

II.2. Vers des bétons plus performants

Les derniers nés des bétons sont les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances (BFUP) qui sont pour le moment les bétons les plus résistants qui existent.

Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP) sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres et offrant des résistances en compression comprises entre 150 et 250 MPa.

Les progrès dans le domaine des adjuvants, des méthodes de formulation et de l'utilisation des ultrafines ont conduit à une évolution spectaculaire des bétons.

La gamme s'est élargie : des bétons courants, de résistance en compression de 30 MPa, on est passé aux bétons à hautes performances (BHP : plus de 50 MPa) et à très hautes performances (BTHP : plus de 80 MPa). Une rupture technologique est intervenue au début des années 90 avec la mise au point de bétons dont la résistance dépasse les 150 MPa.

Les BFUP présentent une très faible porosité capillaire. Les ultrafines utilisées dans les BFUP sont en général des fumées de silice qui remplissent les espaces intergranulaires, optimisant la compacité du matériau, et qui réagissent grâce à leur pouvoir pouzzolanique avec la chaux issue de l'hydratation du ciment. Elles améliorent la rhéologie du béton frais, participent activement à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz. D'autres ultrafines peuvent être également utilisées telles que les microfillers calcaires ou siliceux et les pouzzolanes naturelles ou artificielles.

Leur formulation fait appel à des adjuvants superplastifiants et des compositions granulaires spécifiques ainsi qu'à des fibres (fibres métalliques ou organiques). Pour les BFUP structuraux la présence de fibres et les performances en traction conduisent à un comportement pseudo-ductile permettant de s'affranchir de tout ou partie des armatures passives.

Les fibres, composant clé des BFUP confèrent au matériau sa ductilité. Ces fibres ont une longueur adaptée à la taille du plus gros grain et une section faible. Elles ont en général un diamètre de 0,1 à 0,3 mm et une longueur de 10 à 20 mm.

Les fibres métalliques sont utilisées pour des applications structurelles nécessitant des résistances mécaniques importantes, les fibres polymères et organiques plutôt pour des applications esthétiques et des parties d'ouvrages non structurelles. Les fibres polypropylène sont ajoutées pour éviter l'écaillage du béton en cas d'exposition au feu.

Ces bétons révolutionnent les techniques et méthodes de construction et permettent la conception de nouvelles structures.

Le BFUP est caractérisé par un fort dosage de ciment dans sa composition (700 à 1000 kg/m³) une quantité importante d'adjuvant, la présence de fibres (2 à 3% du volume), l'utilisation de granulats de faibles dimensions et d'une teneur en eau très faible.

Tableau II.1. Voici deux exemples de formulation de BFUP pour 1 m³

Ciment	Sable fin	Quartz broyé	Fumée de silice	Fibres métalliques	Adjuvant (extrait sec)	Eau totale
710 kg	1 020 kg	215 kg	230 kg	160 kg	10 kg	1 401
1 075 kg	1 030 kg	-	160 kg	220 kg	35 kg	2 001

Le BFUP est un matériau qui présente de très bonnes performances, une très bonne durabilité et qui ne nécessite pas d'entretien.

Cependant, il est très énergivore puisqu'il consomme 8,23 GJ/m³ pour sa fabrication, soit trois fois plus d'énergie qu'un béton classique. Sa fabrication émet également 1,1 t éq. CO₂/m³ pour 0,8 t éq. CO₂/m³ pour un béton ordinaire.

Mais, son excellente durabilité fait que sur 1000 ans, l'utilisation du BFUP utilise 3 à 6 fois moins de matières qu'un béton classique, rentabilisant ainsi l'impact environnemental lié à sa fabrication.

II.3. Vers des liants avec ajouts minéraux en substitution au clinker

Une grande partie des bétons utilisés dans la construction contiennent dans leur ciment une quantité plus ou moins importante de matériaux de substitution au clinker.

L'intérêt de cette substitution est un intérêt environnemental puisque ces additions nécessitent peu d'énergies pour être produites et sont le plus souvent des sous-produits d'industries (des

déchets), comme par exemple les laitiers issus de hauts fourneaux ou les cendres volantes issues de la combustion de charbon.

II.4. Liants de verre

II.4.1. Généralité

Le verre est un corps solide, non cristallin, homogène, provenant de la trempe de la silice après fusion. Il est fabriqué à l'aide des matières premières telles que le sable, la soude, la dolomie et le calcaire auxquelles on ajoute parfois le calcin pour abaisser la température de fusion.

Le verre représente une part importante des déchets solides totaux disponibles chaque année. Le recyclage des déchets de verre est problématique dans les zones urbaines des pays développés, ce qui a suscité beaucoup d'intérêt pour son utilisation dans le béton ces dernières années.

Le déchet de verre étant un sous-produit, son utilisation comme matériau source pour la production de géopolymères n'entraîne pas une consommation importante d'énergie, à l'exception du broyage. Ce qui représente une alternative intéressante pour valoriser plus la poudre de verre dans les matériaux de construction.

Le verre est un matériau qui est déjà utilisé dans les matériaux de construction. En effet, le verre pilé s'utilise comme agrégat dans le béton, comme matériau de déchets siliceux dans la production de ciment Portland et comme remplissage pour améliorer l'hydratation. Cependant, le meilleur rendement de l'addition de verre dans le béton s'obtient lors de son utilisation sous forme de poudre fine (taille de particules inférieure ou égale à 75 μm) comme remplacement du ciment. Le verre est amorphe et a une forte teneur en silice lui conférant d'intéressantes propriétés pouzzolaniques. Cependant, du fait de la présence d'alcali en quantité élevée (10-16%), le béton incorporant du verre pourrait être facilement sujet aux réactions alcali-silice (RAS).

En effet, certaines phases siliceuses provenant des granulats étant instables dans les milieux à fort pH, comme c'est le cas dans les bétons avec une teneur élevée en alcalis dans la solution interstitielle, réagiront en produisant un gel expansif à l'origine du gonflement et de la fissuration du béton, contribuant ainsi à réduire la durée de vie utile du béton. Toutefois des

études ont montré que le verre finement broyé contribue à limiter les expansions dues à la RAS à long terme.

II.4.2. Poudre de verre

La poudre de verre est du verre finement broyé. Le verre le plus courant est le verre sodocalcique, qui est principalement composé de dioxyde de silicium, d'oxydes de sodium, d'oxyde de calcium et d'alumine. D'autres ingrédients peuvent être ajoutés en fonction de l'application à laquelle le verre est destiné.

En général, le verre recyclé ne convient pas aux fabricants de verre car il contient déjà des colorants et d'autres composés qui peuvent affecter la stabilité, la couleur et d'autres propriétés du nouveau produit. Par conséquent, les déchets municipaux et le recyclage constituent une source écologique à grande échelle pour les fabricants de verre broyé. Cela contribue à faire de la poudre de verre un matériau rentable pour les applications industrielles.



Figure II.4. Poudre de verre.

II.4.3. Application de la poudre de verre dans le béton

Le béton est fabriqué en combinant du ciment, des agrégats et de l'eau avec tous les additifs nécessaires pour obtenir les propriétés requises, comme les colorants ou les plastifiants. La poudre de verre peut être utilisée comme pouzzolane, un type de matériau siliceux qui réagit dans l'eau et l'hydroxyde de calcium. L'ajout de pouzzolane à un mélange de béton offre des avantages tels que l'augmentation de la durabilité, de la longévité, de la force et de la résistance, ainsi qu'une réduction de la quantité nécessaire de ciment Portland, dont la production crée une charge environnementale.

Le verre dans le béton a été étudié pendant des décennies, mais le récent désir de réduire les coûts de production et l'impact environnemental a suscité un regain d'intérêt et de recherche. Les études modernes révèlent que la poudre de verre constituée de particules de moins de 10

microns peut être ajoutée au béton sans en diminuer la résistance ou la durabilité. Certaines études ont même révélé une augmentation de la résistance du béton avec l'ajout de poudre de verre, même lorsque le contenu du béton a été réduit de 30 %.

La poudre de verre peut remplacer une fraction de la teneur en ciment et en agrégats d'un mélange de béton sans effet néfaste. Le béton autonivelant nécessite un certain ajustement du rapport eau-poudre lorsque de la poudre de verre est incorporée. En général, une granulométrie plus fine est préférable, car l'activité pouzzolanique de la poudre est basée sur l'hydratation de la poudre, qui dépend de sa surface.

L'utilisation d'une taille de broyage appropriée de la poudre de verre et l'étanchéification du béton contre l'humidité atmosphérique doivent être effectuées pour éviter une réaction alcali-silice, qui se produit lorsque les ions hydroxyle du ciment réagissent avec la silice du verre en présence d'eau. Lorsque cette réaction se produit, elle a tendance à produire un gel, qui gonfle avec l'humidité et provoque des fissures dans le béton. Il convient toutefois de noter que cette réaction alcali-silice se produit également dans les bétons traditionnels et ne doit pas être considérée comme une raison d'éviter les avantages de la poudre de verre.



Figure II.5. Exemples d'utilisation de la poudre de verre dans les milieux industriels

II.5. Liants bélitiques

II.5.1. Définition

C'est à un liant hydraulique comprenant un clinker sulfoalumineux bélitique.

Crystalline Phase	Composition	Abbreviated notation	Poids volumique (kg/m ³)
Tricalcium silicate	3CaO SiO ₂	C ₃ S (alite)	3210
Dicalcium silicate	2CaO SiO ₂	C ₂ S (belite)	3280
Tricalcium aluminate	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A (celite)	3030
Tetracalcium ferroaluminate	4CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF (ferrite)	3730

Les liants à base de sulfoaluminate de calcium ou ciment sulfoalumineux sont des liants hydrauliques relativement récents, développés en Chine dans les années 1970, et dont le produit principal d'hydratation est l'ettringite. Grace à leur processus de fabrication qui nécessite moins d'énergie, et émet donc moins de CO₂, les ciments sulfoalumineux réduisent l'impact environnemental du ciment de 25 à 30 % par rapport au ciment Portland. Leurs propriétés mécaniques telles que le durcissement rapide et la résistance très élevée à jeune âge pourraient permettre une utilisation dans l'Industrie du Béton.

II.5.2. Types de ciment sulfoalumineux

Plusieurs types de ciments sulfoalumineux existent, leurs propriétés dépendent de leur composition, le point commun entre ces ciments est la présence de la ye'elinite (C₄A₃Š). Voici une liste des différents types de ciment sulfoalumineux :

- **Le ciment sulfoalumineux alitique** : se caractérise par la présence de ye'elinite et d'alite et l'absence de bélite. Ce ciment serait plus résistant à la carbonatation que le ciment Portland.
- **Le ciment Portland modifié à la ye'elinite** : c'est un mélange de 5 à 20 % de ye'elinite avec un clinker Portland séparément fabriqué. À court terme, ce ciment possède de meilleures résistances qu'un ciment Portland et des temps de prise plus courts.
- **Le ciment ye'elimitique** : c'est un mélange de 15 à 50 % de ye'elinite, du sulfosilicate de calcium ou sulfopurrite (C₅S₂Š, 25 – 77 %) et d'anhydrite, mais il ne contient pas de silicates de calcium. La résistance mécanique de ce ciment est très élevée au jeune âge, mais ne s'améliore pas sur le long terme.

- **Le ciment sulfoalumineux bélitique** : la ye'elinite et la bélite sont les principaux constitutifs, et il ne contient pas d'alite. C'est ce dernier type qui est fabriqué et commercialisé en France. De ce fait, la suite de cette synthèse bibliographique sur les ciments sulfoalumineux porte uniquement sur les ciments sulfoalumineux bélitiques.

II.5.3. Fabrication du ciment sulfoalumineux bélitique

Le ciment sulfoalumineux est constitué d'un mélange de clinker sulfoalumineux et de sulfate de calcium (hydraté : gypse ou non hydraté : anhydrite).

II.5.3.1. Clinker sulfoalumineux :

Le clinker sulfoalumineux est obtenu par la calcination à 1 250 – 1 350 °C dans des fours rotatifs d'un mélange de bauxite, de calcaire et de sulfate de calcium préalablement broyé. Cependant, d'autres sources d'alumine ont été utilisées, par exemple la boue rouge qui est un résidu industriel du traitement de la bauxite lors de la fabrication d'alumine par le procédé Bayer.

Le clinker résultant est très poreux et particulièrement friable, sa texture se caractérise par la présence de cristaux bien développés de 1 à 10 µm de ye'elinite, ces cristaux sont inclus dans une matrice de C₂S et de ferrite.

Il est ensuite co-broyé avec 15 à 25 % de CaSO₄ (gypse ou anhydrite) pour obtenir un ciment Sulfoalumineux bélitique.

La composition chimique moyenne, ainsi que les différentes phases qui peuvent constitué le clinker sulfoalumineux sont présentées dans les tableaux suivants :

Tableau II.2. Composition chimique du clinker sulfoalumineux.

Clinker	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃
Proportion (%)	3 - 13	25 - 40	1 - 3	36 - 45	8 - 15

Tableau II.3. Composition minéralogique du clinker sulfoalumineux.

Phase	Notation cimentaire	Proportions (%)
Silicate bicalcique (bélite)	C_2S	10 – 60
Ye'elinite	$C_4A_3\check{S}$	10 – 55
Sulfate de calcium	$C\check{S}$	0 – 25
Chaux libre	C	0 – 25
Aluminoferrite tétracalcique	C_4AF	0 – 40
Mono aluminat de calcium	CA	0 – 10
Aluminat de calcium (mayenite)	$C_{12}A_7$	0 - 10

II.5.3.2. Sulfate de calcium

Le sulfate de calcium utilisé dans la fabrication du ciment sulfoalumineux existe sous la forme hydratée (gypse : $C\check{S}H_2$) ou anhydre (anhydrite : $C\check{S}$) à l'état naturel. Il existe plusieurs sources de sulfate de calcium :

A. Origine naturelle : c'est la principale source de sulfate de calcium. À l'état naturel, il s'agit d'une roche sédimentaire, il est extrait en carrières à ciel ouvert ou par l'exploitation minière en profondeur.

B. Origine synthétique : Diverses industries donnent comme co-produit du sulfate de calcium sous forme de gypse, telles que l'industrie des engrais phosphatés (ce gypse ne peut pas être utilisé directement, car il contient beaucoup d'impuretés), ou lors des traitements chimiques de désulfuration des gaz de combustion (le gypse résultant est non pollué, et peut être utilisé directement comme matière première). D'autres industries produisent également du gypse, mais les quantités restent limitées, comme la fabrication de l'acide borique, des acides citrique et tartrique, du dioxyde de titane, du sucre, etc.

II.5.4. Intérêt et utilisation des ciments sulfo-alumineux bélitiques

Les formulations de ciments sulfo-alumineux basées sur les CSA et les CFA sont utilisées en Chine pour une large gamme d'applications, notamment en génie civil. Ils présentent en effet plusieurs avantages par rapport au ciment Portland:

- Un durcissement rapide et une résistance au jeune âge très élevée,
- Une bonne résistance mécanique à long terme,
- Des propriétés expansives ou non,
- Une faible alcalinité,
- Une faible perméabilité,

- Une bonne durabilité en environnement agressif, en milieu marin ou en milieu sulfaté notamment.

Ces propriétés sont obtenues à l'aide d'une gamme variée de formulations et à condition de prendre des précautions vis-à-vis des inconvénients potentiels de ces matériaux :

- *Le fort dégagement de chaleur* qui accompagne l'hydratation de ces ciments est susceptible d'engendrer une fissuration des structures massives et ainsi de réduire leurs performances mécaniques et leur durabilité,
- *Le temps de prise est très rapide*, ce qui peut poser des problèmes de maniabilité sur les chantiers, notamment quand le béton doit être pompé,
- *Une expansion à moyen et long termes* peut générer de la fissuration et conduire à une forte dégradation de la résistance mécanique et de la durabilité de ces matériaux.

II.5.5. Impact environnemental

Le processus de fabrication des ciments sulfoalumineux bélitiques nécessite un apport d'énergie plus faible et émet moins de CO₂ que celui du ciment Portland, ce qui constitue une caractéristique favorable vis-à-vis de l'environnement.

Tout d'abord, réduire la température de clinkérisation de 100 à 200 °C (1 250 à 1 350 °C pour le ciment sulfoalumineux et 1 450 °C pour le ciment Portland), permet de diminuer l'énergie nécessaire à la fabrication de 3 845 kJ/kg pour un clinker Portland à 3 305 kJ/kg pour un clinker sulfoalumineux.

De plus, la réduction de la quantité de calcaire nécessaire pour la fabrication du clinker sulfoalumineux (environ 40 %) par rapport à celle nécessaire pour un clinker Portland (80 %), permet de réduire l'émission de CO₂, due à la décarbonatation du calcaire.

Le tableau 4 permet de comparer l'enthalpie de formation et l'émission de CO₂ des principales phases du ciment sulfoalumineux et du ciment Portland.

Le clinker sulfoalumineux bélitique se caractérise par la présence de la phase ye'elinite (C₄A₃Š) et l'absence de la phase alite (C₃S), cette dernière est la phase principale du ciment Portland. La demande en énergie pour la formation de l'alite et son émission de CO₂ est plus du double de celui de la phase ye'elinite.

L'énergie nécessaire au broyage est plus faible, elle est estimée de 72 à 108 MJ/t contre 162 à 180 MJ/t pour le clinker Portland.

Tableau II.4. Quantité de CO₂ émise lors de la formation des constituants du clinker

Phases	Enthalpie (kJ/kg de clinker)	CO ₂ émis (kg/kg de clinker)
C ₃ S	1 848,1	0,578
β-C ₂ S	1 336,8	0,511
CA	1 030,2	0,278
C ₄ A ₃ S̄	-800	0,216

La consommation d'énergie électrique nécessaire pour une tonne de ciment Portland est de 45 à 50 kWh, et de 20 à 30 kWh par tonne de ciment sulfoalumineux.

Le ciment sulfoalumineux permet de réduire l'impact environnemental de 25 à 30 % par rapport au ciment Portland.

II.5.6. Propriétés mécaniques

Les ciments sulfoalumineux sont caractérisés par un durcissement rapide et des résistances à court terme très élevées. Les différents hydrates du ciment sulfoalumineux contribuent à ses propriétés mécaniques. L'ettringite issue de l'hydratation rapide de la ye'elinite contribue à la résistance en compression du matériau au jeune âge, ces résistances élevées à jeune âge ne semblent pas se dégrader avec le temps.

Cette hydratation rapide de la ye'elinite accélère la prise ce qui peut parfois poser des problèmes de maniabilité.

Plusieurs aspects de durabilité sont à prendre en considération : la porosité, le pH du matériau, et son comportement vis-à-vis des attaques chimiques, corrosion et du gel.

La faible porosité des matériaux sulfoalumineux confèrerait au matériau une faible perméabilité, 2 à 3 fois inférieure à celle des matériaux fabriqués à partir du ciment Portland, ainsi qu'une bonne résistance au gel.

Il présente une bonne résistance aux attaques sulfatiques, grâce à la nature sulfatée des hydrates qui le constituent. Les ciments sulfoalumineux présentent aussi une bonne résistance aux attaques par l'eau de mer, ce qui facilite son utilisation dans les milieux marins.

L'hydratation des ciments sulfoalumineux ne produit pas de Portlandite ce qui leur confère une faible alcalinité (pH inférieur à 11,5). Ils ne produisent donc pas d'efflorescence. Cette faible alcalinité les rend intéressants pour la production des bétons renforcés par des fibres de verre. Cependant, la résistance à la corrosion des aciers par carbonatation est encore peu documentée.

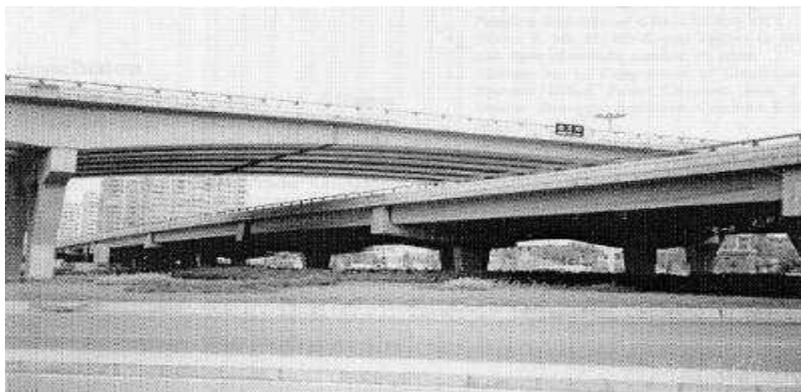
II.5.7. Applications

La production industrielle des ciments sulfoalumineux a été commencée au milieu des années 1970 en Chine. En 1981, une norme chinoise sur cette série de ciment a été développée.

Le ciment sulfoalumineux a été utilisé dans différentes applications : préfabrication (exemple : production des tuyaux), en béton précontraint ainsi que pour des immeubles de grande hauteur (la construction de la tour « Shenyang Long Distance Telecommunication Hub » haute de 103 mètres).....



*Tour des télécommunications
longues distances de Shenyang*



*Pont de Hangtian sur le 3ème
périphérique de Pékin*

Figure II.6. Exemples d'utilisation chinoise des ciments sulfoalumineux.

II.6. Géopolymères

II.6.1. Généralité

Les géopolymères sont la réciproque des polymères organiques. À la place de dérivés du pétrole et de la chaîne carbonée, on utilise de la matière minérale composée de silice et d'alumine. Cette géosynthèse permet de réaliser des matériaux pouvant remplacer certains plastiques, mais ils n'ont aucun solvant dangereux, ne brûlent pas et ne dégagent pas de gaz ni fumées toxiques. Comme une roche, ils résistent aux agressions chimiques et à l'érosion du temps. Les matières premières sont principalement des minéraux d'origine géologique, d'où le nom « **géopolymère** ».

Le terme géopolymère est très récent, il a été inventé il y a près de quatre décennies par le professeur Joseph Davidovits pour les liants alumino-silicate formés dans un environnement alcalin, ceux-ci ont également été appelés géo-ciment, polymère inorganique, céramique liée aux alcalis ou verre synthétisé à basse température ; leur utilisation pratique à grande échelle s'est réellement concrétisée depuis 1989.

Les géopolymères apparaissent comme une solution adéquate pour remplacer les matériaux traditionnels vu leurs stabilités, durabilité et résistance aux différents milieux et conditions climatiques.

La synthèse des géopolymères dépend de nombreux paramètres dont le plus important est le type des matières premières utilisées. Les matériaux à base de silicium et d'aluminium tels que le kaolin, le métakaolin et les cendres volantes peuvent être utilisés.

Certains s'obtiennent par copolymérisation d'éléments aluminosilicates qui proviennent en général des produits de dissolution de minéraux silicoalumineux, sous fort pH et en présence de silicates alcalins solubles.

- **Les cendres volantes :**

Elles sont recueillies dans les centrales thermiques fonctionnant au charbon et sont généralement utilisées du fait de la finesse de leurs particules, ce qui accroît la réactivité. Il existe deux types de cendres volantes : les cendres volantes de classes F dont la quantité de CaO est faible et les cendres volantes de classe C dont le taux en CaO est élevé.

- **Laitier granulé de haut fourneau :**

C'est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion

du minerai de fer dans le haut fourneau. Il est composé principalement de silicates et d'aluminosilicates. Il existe différents types de scories dont la production dépend de la méthode utilisée.

- **Les Metakaolins :**

Le métakaolin résulte de la calcination d'une argile, la kaolinite, associée à différents minéraux (phyllosilicates, quartz, oxydes de fer) en proportions variables suivant les gisements. Il est obtenu soit par calcination broyage soit broyage calcination dans des unités de production à fours rotatifs, à plateaux ou par calcination dite "flash", par exemples. Il est essentiellement composé de particules de silicate d'alumine amorphe.

Le métakaolin est généralement utilisé dans les bétons en association avec un plastifiant et/ou un superplastifiant. La kaolinite est l'élément essentiel du kaolin qui est la matière première des métakaolins artificiels. Les plus grands gisements de kaolin connus sont d'origine sédimentaire et répartis sur la totalité de la planète, comme en Georgie (Etats-Unis), en Amazonie (Brésil) ou dans le bassin Charentais (France). La thermo-activation de la kaolinite par calcination conduit à la production de métakaolin qui présente une activité pouzzolanique (c'est-à-dire qu'il réagit en présence de chaux).

Le métakaolin est donc un bon candidat pour être utilisé comme addition de type 2 dans les bétons en substitution du ciment.

Des métakaolins ou des mélanges ciment-métakaolin sont déjà sur le marché dans certains pays comme les Etats-Unis, le Canada, l'Australie, l'Angleterre ou encore la Chine sous des noms commerciaux tels que Super-Pozz® ou Cem-Pozz®. Ces produits ont le plus souvent été utilisés pour des ouvrages d'arts.



Figure II.7. Pont Benicia-Martinez avec du métakaolin dans la formulation du béton (Californie, USA, 2007)

Solution activatrice :

Le choix de la solution activatrice est très important car les propriétés du produit obtenu en dépendent fortement.

Les solutions pouvant être utilisés pour activer les matériaux silico-alumineux en six groupes :

- Alcalis, MOH
- Sels d'acides faibles, M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF
- Les silicates, $M_2O.nSiO_3$
- Aluminates, $M_2O.nAl_2O_3$
- Aluminosilicates, $M_2O.Al_2O_3.(2-6)SiO_2$
- Sels d'acides fort, M_2SO_4

M est un cation alcalin généralement K^+ ou Na^+ .

La solution alcaline activatrice consiste en un mélange de solution aqueuse de soude ou de potasse et du silicate de sodium ou potassium. Le type de solution alcaline joue un rôle très important dans la synthèse des géopolymères.

La réaction est plus rapide lorsque la solution alcaline contient le silicate de sodium ou de potassium comparée à celle ne contenant que l'hydroxyde alcalin. De même l'utilisation d'une solution d'hydroxyde de sodium par rapport à celle d'hydroxyde de potassium favorise la géopolymérisation tout en améliorant les propriétés mécaniques des produits de synthèse.

Aujourd'hui, les géopolymères sont intégrés comme un «matériau» écologique dans les différents ouvrages de construction et des travaux publics en raison de ses avantages environnementaux et des performances par rapport au béton de ciment Portland conventionnel, cette technologie qui économise beaucoup d'énergie, elle est maintenant passée du domaine des études universitaires à des projets de construction de taille commerciale ; En effet, il est possible de remplacer le béton ordinaire par des géopolymères.

II.6.2. Applications récentes des géopolymères

L'aéroport de « Brisbane West Wellcamp » en Australie a été inauguré en 2014 (figure 8), marquant une étape très importante dans l'ingénierie, c'est le plus grand projet de béton géopolymère moderne au monde, il s'agit de la construction des chaussées d'avions à usage intensif, d'une superficie de $50.500 m^2$ et d'une épaisseur de 435 mm ; En plus des chaussées, $15.000 m^3$ supplémentaires de béton géopolymère ont été utilisés dans diverses applications, notamment un pont d'entrée à l'aéroport, des barrières de trottoir et de route, des éléments préfabriqués, des panneaux d'inclinaison moulés sur le site, des semelles et des réservoirs d'égout.

Dans ce projet, une réduction de 6600 tonnes de CO₂ qui auraient dégagées en cas d'utilisation de béton ordinaire.



Figure II.8. Le nouvel aéroport « Brisbane West Wellcamp » en Australieréalisé avec un béton géopolymère.

Actuellement, les matériaux innovants de type géopolymères peuvent remplacer les bétons et les ciments portland, les matériaux de base sont largement disponibles et ils diffèrent d'une région à une autre.

II.7. La pouzzolane

II.7.1. Définition

La pouzzolane est une roche d'origine volcanique, friable et peu dense, de composition essentiellement basaltique. Le terme provient de Pouzzoles, une ville italienne de la région de Naples où ce matériau a beaucoup été utilisé comme ciment naturel lors de l'Antiquité. C'est elle qui a notamment fait la réputation du fameux « béton romain ».



Figure II.9. La pouzzolane est utilisée comme liant dans la fabrication du ciment.

La découverte de ce type de matériau aux propriétés remarquables dans d'autres reliefs européens comme en Allemagne dans la région d'Eifel ou encore en France dans le Massif

Central a permis d'étendre l'utilisation de ce nom propre à l'ensemble des pyroclastes ayant la capacité de faire prise en présence de chaux.

Les constructions utilisant des mortiers à base de pouzzolane et chaux datant de l'époque antique et encore en état de nos jours démontrent les propriétés pérennes de ce type de matériau en génie civil :

- réservoir d'eau de la ville de Caminos (-700 à 600 avant JC),
- Panthéon à Rome (mortier de pouzzolane/chaux pour les murs épais de 7 m, et grand dôme coulé avec du béton pouzzolanique) (2ème siècle après JC),
- le pont du Gard (1er siècle après JC).

Les pouzzolanes ont été pendant des siècles un matériau privilégié pour la construction notamment pour les édifices servant à l'alimentation en eau des villes. Cette période de « gloire » a cessé lors de l'invention du ciment portland au XIXème siècle, produit aux qualités incomparables en termes de temps de prise et de durcissement.

Toutefois, les mélanges pouzzolane/ciment présentent de telles qualités techniques mais aussi économiques que les ciments pouzzolaniques sont de nos jours produits industriellement et que l'introduction de pouzzolane dans les ciments fait l'objet des normes NF EN 197-1 et ASTM-C-618.

La capacité d'un matériau à faire prise en présence de chaux est depuis définie comme étant une propriété pouzzolanique.

De nos jours, le terme pouzzolane est étendu à tous les matériaux inorganiques, naturels ou artificiels qui ont des propriétés pouzzolaniques.

II.7.2. Types de pouzzolane

II.7.2.1. Pouzzolane naturelle :

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Algérie côté ouest du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin.

De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618).

II.7.2.2. Pouzzolane artificielle :

Les pouzzolanes artificielles sont toute matière essentiellement composées de silice, d'alumine et d'oxyde de fer ayant subi un traitement thermique pour lui assurer des propriétés pouzzolaniques. Elles sont des déchets des efférentes industries. On distingue. Soit des résidus de fabrication industrielle tel que. le mach fers , cendre de bois ou d'houille , soit des débris de brique et de tuile fabriquées avec des argile pures des températures modérées . On distingue aussi le schiste cuite, et les déchets de l'industrie à base de méta kaolinite.

L'extraction de la pouzzolane en carrière se fait au moyen de pelles mécaniques ou au bouteur. Le matériau brut, toutes granulométries confondues, est ensuite acheminé à l'usine de traitement, où il subit une série d'opérations de criblage (dont le pré-criblage des gros blocs), concassage et broyage.

Pour des applications spécifiques, qui nécessitent une humidité très réduite des matériaux et l'absence de fines, les matériaux pouzzolaniques sont soumis à un séchage et à un dépoussiérage.

L'élaboration des produits pouzzolaniques pose quelques problèmes particuliers :

- Leur teneur élevée en eau naturelle (10 à 15 % dans les sables 0/3 mm broyés) occasionne un colmatage des toiles criblantes ;
- Leur abrasivité conduit à une usure importante des appareils de réduction.

II.7.3. Réactivité

L'activité pouzzolanique englobe les réactions qui se produisent entre les pouzzolanes broyées, la chaux et l'eau.

Avant d'être remplacés par les mélanges pouzzolanes-clinker au XIX^{ème} siècle, les ciments pouzzolane-chaux étaient l'un des matériaux de construction les plus utilisés. Ils ont pour particularité d'avoir des temps de prise et de développement de résistance longs mais aussi de résister aux attaques d'eau agressives comme l'eau de mer.

Suivant le type d'application, la lenteur des réactions peut être considérée comme un inconvénient ou un avantage. La manière la plus simple de qualifier la pouzzolanité d'un matériau est d'évaluer la diminution en chaux libre du système mais aussi la cinétique de la réaction.

De manière générale, les paramètres influençant les réactions pouzzolaniques sont la nature des phases actives et leurs proportions :

- la teneur en SiO_2 ;
- le rapport chaux/pouzzolane dans le mélange ;
- la durée de cure ;
- la finesse de la pouzzolane ;
- le rapport E/C du mélange ;
- la température.

II.7.4. Applications

Les pouzzolanes trouvent des applications dans des domaines variés :

- Dans l'agriculture et le jardinage pour ses propriétés drainantes,
- Pour des terrains de sport (hippodrome, piste d'athlétisme...),
- En matériaux de construction car elles présentent d'excellentes qualités d'isolation thermique et phonique,
- En sablage hivernal pour l'entretien des routes, ce type de traitement est efficace et ne crée pas de dommage pour l'environnement,
- En génie civil : les applications sont nombreuses. En plus d'être un composant normalisé des ciments et des bétons, elles présentent toutes les caractéristiques pour être utilisées en tant que granulats pour bétons légers.

Par rapport à l'utilisation d'un ciment portland classique, les ciments pouzzolaniques dans les bétons augmentent le temps de prise, diminuent les performances mécaniques à court terme mais permettent des gains notables en terme de durabilité. En effet, l'addition de pouzzolanes à du clinker diminue la chaleur d'hydratation qui, quand elle est trop importante, provoque une fissuration précoce des ouvrages. De plus, les mortiers et les bétons qui contiennent des pouzzolanes présentent aussi de meilleures résistances aux attaques sulfatiques et à l'expansion alcali-silice

En Algérie, il y a une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique le long de 160 Km entre la frontière Algéro - Marocaine et le Sahel d'Oran. L'utilisation de la pouzzolane se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire, qui l'utilise comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés.