

Chapitre II: Liants alternatifs et produits de substitution

II.1. Liants organiques :

La fonction principale d'un liant est de rassembler et de maintenir réunies des particules généralement solides (granulats). Il existe plusieurs manières de lier entre eux des granulats pour assurer la cohésion d'un matériau composite, la première consiste à utiliser des produits d'origine minérale qui réagissent avec de l'eau pour donner lieu à des réseaux cristallins enchevêtrés. On appelle ces produits liants hydrauliques parce qu'ils font pris en présence de l'eau (ciments, laitiers, pouzzolane, cendre volante). La deuxième méthode est basée sur l'utilisation des liants organiques qui peuvent être classés en deux grandes familles :

a. Les liants hydrocarbonés : bitumes, goudrons ;

b. Les résines et surtout polymères : les aminoplastes, par exemple, sont des polymères largement utilisés dans l'industrie du bois et de ses dérivés.

II.1.1. Polymères organiques

II.1.1.1. Définition du polymère

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères et préparée à partir de molécules appelées monomère.

II.1.1.2. Classifications des bétons à base de polymères

Il existe trois catégories principales de béton contenant des polymères:

II.1.1.2.1. Béton polymère (Polymer concrete):

- Le béton polymère est un matériau composite dont le liant est constitué entièrement d'un polymère organique synthétique.
- Le béton polymère et le béton additionné de polymères ont été commercialisés depuis 1950; le béton imprégné de polymères a été développé et mis en utilisation depuis 1970.
- Dépendant des matériaux employés, le béton polymère peut développer des résistances à la compression de l'ordre de 140 MPa au cours de quelques heures ou même minutes et cependant convenable pour des urgences de bétonnage tels que les mines, les tunnels et les autoroutes.
- Il est constitué d'une charge minérale (granulat) et d'un liant de polymère, parfois thermoplastique, mais généralement thermodurcissable. Parmi les autres matériaux de charge, on trouve la pierre concassée, le gravier, le calcaire, la craie, le condensat de silice (poudre de silice, poussière de silice), le granit, le quartz, l'argile, le verre expansé et les fines métalliques. De façon générale, n'importe quel matériau solide, non absorbant et sec peut servir de matériau de remplissage.

- Il est important d'utiliser des granulats secs parce que la présence de l'humidité cause une sérieuse détérioration aux propriétés des bétons polymères
- Une matière thermoplastique désigne une matière qui se ramollit (rendre mou) d'une façon répétée lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température, mais qui,

au-dessous, redevient dure. Cette qualité rend le matériau thermoplastique potentiellement recyclable. C'est le cas du verre, des métaux

- Les polymères thermodurcissables deviennent solides irréversiblement, le plus souvent après chauffage. La transformation s'effectue avec réaction chimique (polymérisation). Ils ne sont pas recyclables.

II.1.1.2.2. Béton additionné de polymère (Polymer cement concrete) :

- Le béton additionné de polymère est un béton modifié dans lequel une partie du ciment est remplacée par un polymère organique.
- Le béton additionné de polymères possède d'excellentes propriétés liantes et une durabilité élevée aux agressions chimiques; il est alors utilisé principalement pour la superposition des étages industriels et la réhabilitation des tabliers de ponts.
- C'est un béton modifié dans lequel une partie du ciment (10 à 25 % en poids) est remplacée par un polymère organique synthétique. On le fabrique en incorporant au mélange à béton de ciment un polymère dispersé (latex).
- La modification du béton au moyen d'un latex de polymère (dispersion colloïdale de particules de polymère dans l'eau) donne des caractéristiques grandement améliorées pour un coût raisonnable.

Applications

Surfaçage des dalles de plancher, car il ne produit pratiquement pas de poussière et son coût est abordable. Réalisation de chapes minces (25mm) pour planchers, de recouvrements de tabliers de ponts en béton et de revêtements anticorrosifs, ainsi qu'aux travaux de réparation d'ouvrages en béton.

II.1.1.2.3. Béton imprégné de polymère (Polymer-impregnated concrete)

- Béton imprégné de polymères est obtenu en imprégnant du béton de ciment Portland préfabriqué et durci avec un monomère à faible viscosité. Le béton imprégné de polymères est employé pour fermer ou sceller les microfissures et les pores capillaires. Il est possible de produire un produit imperméable ayant une résistance similaire à celle du béton polymère. Ce béton a été utilisé pour la production de béton préfabriqué et pour améliorer la durabilité des tabliers de pont.

A cause du coût élevé des matériaux et la technologie difficile de production, l'utilisation du béton à base polymères est très limitée.

II.2. Liants béliques

- C'est à un liant hydraulique comprenant un clinker sulfoalumineux bélique.
- Les clinkers sulfoalumineux béliques sont des clinkers ayant une faible teneur en alite (C3S)

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

- Le procédé de fabrication des clinkers sulfoalumineuxbélitiques est tel que ces clinkers présentent comme avantage de réduire significativement les émissions de CO₂ comparativement à la fabrication des clinkers connus du type Portland
- L'acquisition des résistances mécaniques, notamment au-delà de 1 jour après le gâchage, dépend de la cinétique d'hydratation des phases présentes dans le clinker ou le liant hydraulique, notamment de la phase bélite.

II.3. Liants de verre

- Une des solutions est de remplacer totalement le Ciment Portland par une nouvelle génération de liants minéraux connus sous le nom de géopolymères qui possèdent des propriétés similaires au Ciment Portland.
- Ces liants sont obtenus par l'activation alcaline de matériaux siliceux ou aluminosilicates.

II.3.1. Poudre de verre

- Il s'agit donc dans cette étude d'optimiser une formulation de poudre de verre activé pour la conception de béton écologique.
- la poudre de verre étant un silicate alcalin, le liant issu de son activation est instable du fait de la teneur élevée en alcalis qui ont tendance à lixivier.
- Pour stabiliser les alcalis, il a été nécessaire d'ajouter du métakaolin qui a une bonne aptitude de fixation des alcalis. En raison de la grande finesse du métakaolin.
- la teneur élevée en alcalis permet l'utilisation de solution de NaOH modérément concentrée ([NaOH] ≤ 8M).
- ce système nécessite une activation thermique à 60°C pendant au moins 2 jours suivie de la maturation des échantillons à 20°C et 50% d'humidité relative.

Les conditions qui influencent le système de géopolymérisation:

- Le temps et la température de l'activation thermique ainsi que les conditions de cure (température et humidité) qui sont indispensables pour contrôler la cinétique de la réaction de géopolymérisation et donc des performances mécaniques des mortiers.
- La teneur en métakaolin, matériau qui permet de fixer les alcalis à l'intérieur de la matrice géopolymère en empêchant leur lixiviation avec une amélioration progressive des performances mécaniques du mortier.
- La concentration en NaOH est une des variables les plus importantes affectant le processus de géopolymérisation. Du fait de la présence d'une teneur élevée en alcalis dans le verre, son activation nécessite une concentration modérée en NaOH.
- Les conditions optimales d'essais ainsi définies ont permis d'élaborer des bétons à base de poudre de verre présentant des performances mécaniques satisfaisantes (20 MPa à 28 jours).

- Les matrices géo-polymères sont des matrices minérales liantes obtenues à base de la poudre de verre qui ont des propriétés mécaniques similaires à celles des matrices à base de ciment Portland mais avec un plus faible impact environnemental.
- Les analyses minéralogiques, microstructurales et thermiques ont permis l'identification de deux types de gels lorsque la poudre de verre est activée en présence de métakaolin : du gel C-S-H et du gel N-A-S-H. Le processus de géopolymérisation qui se déroule en plusieurs étapes, dont la dissolution, la polymérisation et la condensation-réorganisation.

II.4.Géopolymères, polymères inorganiques N N

- Les matières premières utilisées sont principalement des minéraux d'origine géologique, d'où le nom « géopolymère ». Joseph Davidovits a inventé le terme en 1978 dans le cadre de recherches qu'il a commencé en 1972 et qui ont notamment conduit à la création en France d'un « Institut Géopolymère » (association loi de 1901).
- Les géopolymères sont la réciproque des polymères organiques, soit des polymères inorganiques. À la place de dérivés du pétrole et de la chaîne carbonée, on utilise de la matière minérale par exemple composée de silice et d'alumine (voire des déchets industriels) et un liant minéral. Leur polymérisation peut s'effectuer à température ambiante ou peu élevée (20 à 120°C selon Davidovitz).
- Cette géosynthèse produit des matériaux aux propriétés pour partie similaires aux plastiques (moulables, plus ou moins extrudables), mais sans utilisation de solvant dangereux, naturellement incombustibles, voire très résistant au feu¹, et ne dégagent pas de gaz ni fumées toxiques. Comme une pierre, ils résistent aux agressions chimiques, à l'érosion du temps et permettent une production non polluante. Comme les polymères organiques, ils peuvent être renforcés, par exemple par des fibres de carbone².

II.4.1.Classification des géopolymère

Les géopolymères peuvent être classés en deux grands groupes :

- **les géopolymères entièrement inorganiques ;**
- **les géopolymères contenant une certaine quantité** d'organique et qui sont les analogues synthétiques de macromolécules naturelles.

Un géopolymère est essentiellement un composé chimique minéral ou un mélange de composés constitués de motifs, par exemple silico-oxyde (-Si-O-Si-O-), silico-aluminate (-Si-O-Al-O-), le ferro-silico-aluminate (-Fe-O-Si-O-Al-O-) ou aluminophosphate (-Al-O-P-O-), créés par un processus de géopolymérisation⁵.

Ces nanomatériaux géopolymères sont maintenant utilisés dans des céramiques, des matériaux composites de haute technicité pour l'industrie automobile, aéronautique et la défense, dans des peintures anti-feu, thermodurcissables, sans solvant organique pour le bois

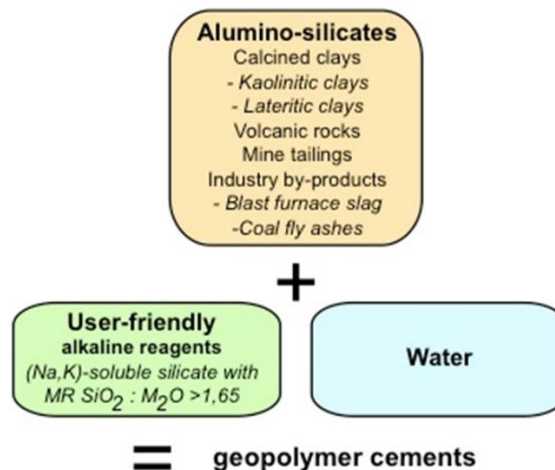
et le métal, des biomatériaux pour prothèses osseuses, des membranes de piles à combustible et des nouveaux ciments écologiques sans dégagement de gaz à effet de serre, aux caractéristiques proches d'une pierre naturelle.

II.4.2.Principales applications

II.4.2.1.Résines et liants géopolymères.

a)Ciments géopolymères.

- D'un point de vue terminologique, le ciment géopolymère¹ est un liant qui durcit à la température ambiante, à l'instar du ciment Portland. Si un composé géopolymère nécessite l'action de la chaleur, il ne peut être appelé ciment géopolymère, mais plutôt liant géopolymère.
- Le ciment géopolymère est un matériau innovant et une véritable alternative au ciment Portland classique pour une utilisation dans des applications en génie civil, en construction et en off shore. Il nécessite une transformation minimale de certains matériaux géologiques naturels ou sous-produits industriels, tout en réduisant considérablement son empreinte carbone. Il est en plus très résistant à la plupart des agressions chimiques qui sont la plaie des bétons conventionnels.
- Pour fabriquer un ciment géopolymère on emploie un silicate d'alumine, un réactif alcalin inoffensif d'emploi (user-friendly)² (silicates solubles de sodium ou de potassium avec un rapport molaire $\text{SiO}_2:\text{M}_2\text{O} > 1,65$, M étant Na ou K) et de l'eau (voir la définition de réactif inoffensif user-friendly ci-dessous). C'est l'addition du cation calcium, essentiellement le laitier de haut fourneau, qui assure le durcissement à la température ambiante.



Ingrédients nécessaires pour fabriquer un ciment géopolymère.

- Les ciments géopolymères durcissent plus rapidement que les ciments Portland. Ils acquièrent l'essentiel de leur résistance dans les 24 heures. Cependant, ils ont un temps de prise suffisamment long pour qu'ils puissent être mélangés dans une centrale à béton et livrés dans une bétonnière. Le ciment géopolymère possède également la

capacité de former une forte liaison chimique avec tous les types de granulats à base de roches de toutes sortes.

II.4.2.2. Polymère inorganique

- Les polymères inorganiques sont des polymères dont le squelette ne comporte pas d'atomes de carbone¹. Les polymères, tels les polymères modifiés silane, comprenant des composants organiques et inorganiques sont nommés des polymères hybrides² ou polymères organo-minéraux^{3,4}. Un des exemples les mieux connus est le polydiméthylsiloxane. Il a un motif de répétition basé sur le silicium et l'oxygène : —[O-Si(CH₃)₂]_n—
- Le polythiazyle (polymère de nitrure de soufre), de formule (SN)_x, est, ce qui est hautement inhabituel, un polymère métallique supraconducteur à -272,89 °C⁵