

## 5. Réticulation Géopolymérique (LTGS) et Matériaux de Construction

Claude Bouterin et Joseph Davidovits

**Version actualisée de:** "Utilisation des terres latéritiques dans les techniques de géopolymérisation", publié dans: Actualité de la Construction de Terre en France, Plan Construction, Ministère du Logement, Paris, 1982.

### Résumé:

Après une présentation succincte des principes chimiques régissant la réticulation géopolymérique (LTGS) des principaux constituants minéralogiques des sols, terres et argiles, les auteurs, présentent leur expérience quant à l'utilisation rationnelle des matériaux de type latéritique. Les différents essais ont porté sur des terres africaines d'origine diverses mais la standardisation de plusieurs procédés a été faite en utilisant un matériau extrait en Provence, en France, sur le site d'Ollière.

Les techniques de géopolymérisation permettent d'obtenir des matériaux de construction couvrant tous les besoins architecturaux:

- briques stables à l'eau, durcies à température ambiante.
- briques céramiques par cuisson de 85°C à 450°C maximum (solaire et simple feu de bois)
- ciment et mortier hydraulique à partir de latérites.
- revêtements de sols et de mur
- toiture

### 5.1 Introduction

La conférence précédente, présentée par Monsieur Hubert Penicaud sur les caractéristiques hygrothermiques du matériau terre, constitue une excellente introduction à ma présentation des techniques de géopolymérisation. En effet, la qualité de confort climatique du matériau terre est reconnue.

Mais M.Penicaud a souligné que le degré de confort était fonction de la cinétique de migration de l'eau au travers du matériau. Ainsi, si le matériau terre est capable d'absorber une grande quantité d'humidité, la désorption s'effectue relativement lentement. Théoriquement, le matériau assurant le maximum de confort climatique doit être capable d'absorber rapidement l'humidité et de la désorber tout aussi rapidement, de préférence en suivant les cycles diurnes et nocturnes. Les techniques de géopolymérisation permettent au matériau terre de remplir cette fonction.

La réticulation géopolymérique (LTGS) est l'application de la recherche fondamentale effectuée ces 20 dernières années en minéralogie et en géologie.

On sait que la nature est constituée de 3 règnes distincts: le règne animal, le règne végétal, et le règne minéral. Depuis 150 ans, l'objectif de la science chimique était la compréhension et la réplique de différents matériaux caractérisant le règne animal et le règne végétal. Cette recherche biochimique aboutit à la création des matières plastiques, des fibres synthétiques, de la biochimie, et de la médecine moderne.

Mais ce n'est que depuis 1970 que les sciences chimiques, minéralogiques, géologiques sont parvenus à élaborer des matériaux pouvant répliquer le règne minéral.

On sait maintenant fabriquer en laboratoire pratiquement tous les types de matériaux minéralogiques, mais les résultats les plus spectaculaires sont obtenus avec les géopolymères de type alumino-silicate ou polysialate. On obtient ainsi des structures minérales équivalentes à de nombreux constituants naturels comme les feldspathoïdes, les zéolites, les amphiboles. Il faut savoir que la fabrication de ces minéraux est aisée, elle se fait à basse température c'est à dire dans de simples conditions climatiques normales, ou si nécessaire à des températures

relativement modérées comprises entre 45° et 100°C.

Revenons maintenant au sujet de ce colloque c'est-à-dire l'utilisation des matériaux terre. Chacun sait que la terre est constituée de matériaux argileux et que ces matériaux argileux sont le résultat de l'érosion climatique des roches comme les granits. En d'autres termes, l'érosion naturelle, la dégradation due au climat, transforment les roches feldspathiques en minéraux sédimentaires tels que les argiles.

Les nouvelles recherches en minéralogie et en géologie ont montré les différentes cinétiques de réaction qui permettaient de d'inverser l'évolution minéralogique, c'est à dire de transformer le sédiment argileux en une roche, en un mot de faire l'inverse de ce qui avait été fait par la nature. La réticulation géopolymérique à basse température (LTGS) applique ces principes réactionnels.

La LTGS permet de transformer tout matériau argileux en un ensemble de produits minéraux qui possèdent les caractéristiques des roches, c'est à dire insensibilité à l'eau, tenue en température, dureté, etc.

Les éléments suivant ont été établis avec un matériau argileux contenant environ 50% d'argile de type kaolinite, ce qui est légèrement différent des simples matériaux terre employés généralement dans le pisé, adobe, ou dans les terres stabilisées qui, parfois, ne contiennent que 10 à 15% de matériaux argileux. Il est évident que en fonction des quantités de matériaux argileux présents ou non dans la terre, il faudra adapter les formules. Par exemple, avec un matériau terre ne contenant que 25% ou moins de matériau argileux, les quantités de réactifs devront être diminuées d'environ 50%.

## 5.2 Stabilisation des terres latéritiques

Les sols qui sont généralement désignés sous le terme très vague de latérite sont riches en sesquioxides de Fer et d'Aluminium tels que goethite, hématite, gibbsite, et boehmite.

La matrice argileuse est en général à base d'alumino-silicates hydratés du type  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=2$  (type kaolinitique) ou  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=4$  (type montmorionnitique) ou plus. Dans les régions du globe où l'on rencontre ces sols, il est en général assez difficile de fabriquer des briques par les procédés de cuisson traditionnels, à haute température vers 900°-1100°C.

Le procédé le plus simple consiste à prendre ces sols et à les sécher à l'air. C'est la technique du pisé, de l'adobe et de la brique séchée au soleil, fortement utilisée dans la majorité des pays d'Afrique. Un procédé plus élaboré consiste à mélanger ces sols avec du ciment ordinaire de type Portland, et de réaliser des blocs ou briques avec un liant hydraulique. Les résultats commencent à être satisfaisants, en terme de résistance mécanique et la stabilité à l'eau, quand au moins 150-250 kg par m<sup>3</sup> de ciment, généralement 300 kg par m<sup>3</sup>, sont utilisés.

D'autres personnes ont proposé de faire réagir les sols "latéritiques" avec de la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , soit en utilisant la réaction silico-calcaire en autoclave, par exemple en extrapolant le procédé décrit dans le brevet français n°1.501.753 et son certificat d'addition n°2.092.936, soit à 97°C, telle que décrite par T. RINGSHOLT et T.C. HANSEN dans la revue "Ceramic Bulletin" Vol.57, n°5 (1978), page 150: "Lateritic soil as a raw material for Building Blocks".

Dans les brevets français cités, on utilise un matériau contenant moins de 50% en poids de matrice argileuse, et on ajoute en poids 30% de chaux, c'est à dire environ 60% en poids par rapport à la matrice argileuse. Dans le procédé à 97°C, pour un sol latérite contenant environ 30% en poids d'argile kaolinitique, on ajoute 17% en poids de chaux, soit également environ 60% en poids par rapport à la matrice argileuse. Les produits fabriqués en autoclave sont des silico-aluminates du type CSH, alors que la cuisson en étuve humide à 97°C aboutirait à la formation d'un aluminate tricalcique hydraté du type  $\text{C}_3\text{AH}_6$ . Les résultats obtenus varient pour la résistance à la compression de 25Mpa pour le  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , à 90 Mpa pour le CSH.

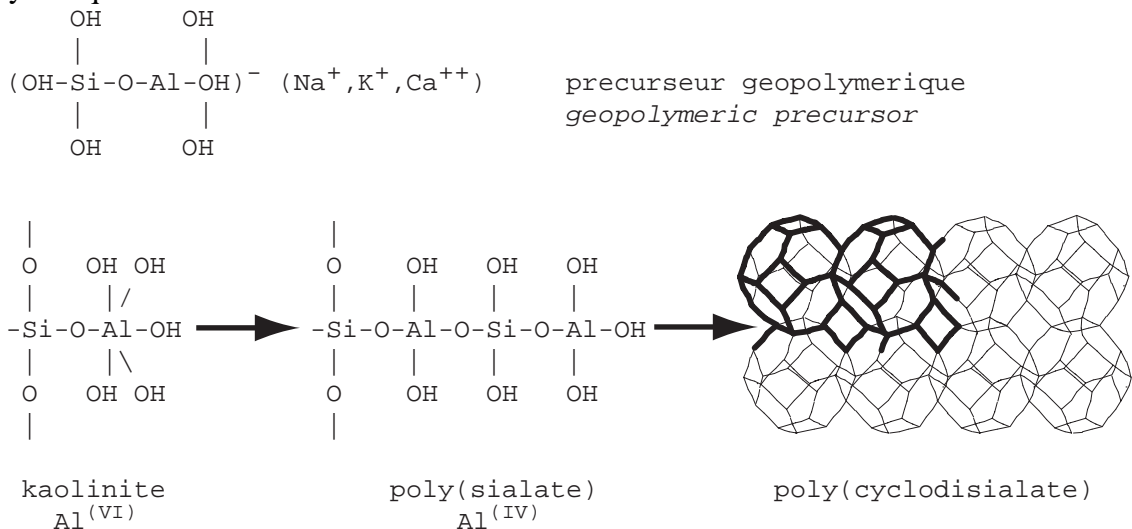
Enfin, on utilise des liants organiques comme l'asphalte dans des proportions comprises entre 10% et 20% en poids par rapport à la terre.

### 5.3 Réticulation géopolymérique a basse température (LTGS)

Dans les procédés décrits ci-dessus, le matériau terre est enrobé par un liant (chaux, ciment, asphalte). Lorsque les quantités de liant sont faibles (de 5 à 10% en poids par exemple), le matériau obtenu est de la terre stabilisée. Les caractéristiques mécaniques sont faibles, mais le matériau terre garde ses propriétés bioclimatiques. Au contraire, lorsque la quantité de liant augmente pour fournir une bonne propriété mécanique, la caractéristique bioclimatique du matériau disparaît.

La réticulation géopolymérique à basse température (Low Temperature Geopolymeric Setting, LTGS) assure la cohésion de la matière terre selon un principe totalement différent. Il n'y a pas d'ajout de liant mais de catalyseurs permettant aux constituants minéralogiques de réagir entre eux, de réticuler. C'est la matière argileuse elle-même qui fabrique, *in situ*, le liant d'agglomération. Il s'agit d'un processus comparable à celui qui a lieu pendant la cuisson céramique à 900°C-1100°C, à la différence que, dans le cas du LTGS, la réticulation peut commencer déjà à température ambiante.

La réticulation géopolymérique (LTGS) a lieu par l'intermédiaire d'un précurseur géopolymérique:



La kaolinite présente dans les argiles est transformée par cet oligosialate en un composé tridimensionnel, stable à l'eau, ayant une forte résistance mécanique. Le précurseur géopolymérique oligosialate contient 50% en poids d'équivalent NaOH, KOH.

Selon la quantité d'oligosialate ajoutée à la matière argileuse, la réticulation géopolymérique est plus ou moins complète. Pour une terre latéritique, nous pouvons dire que:

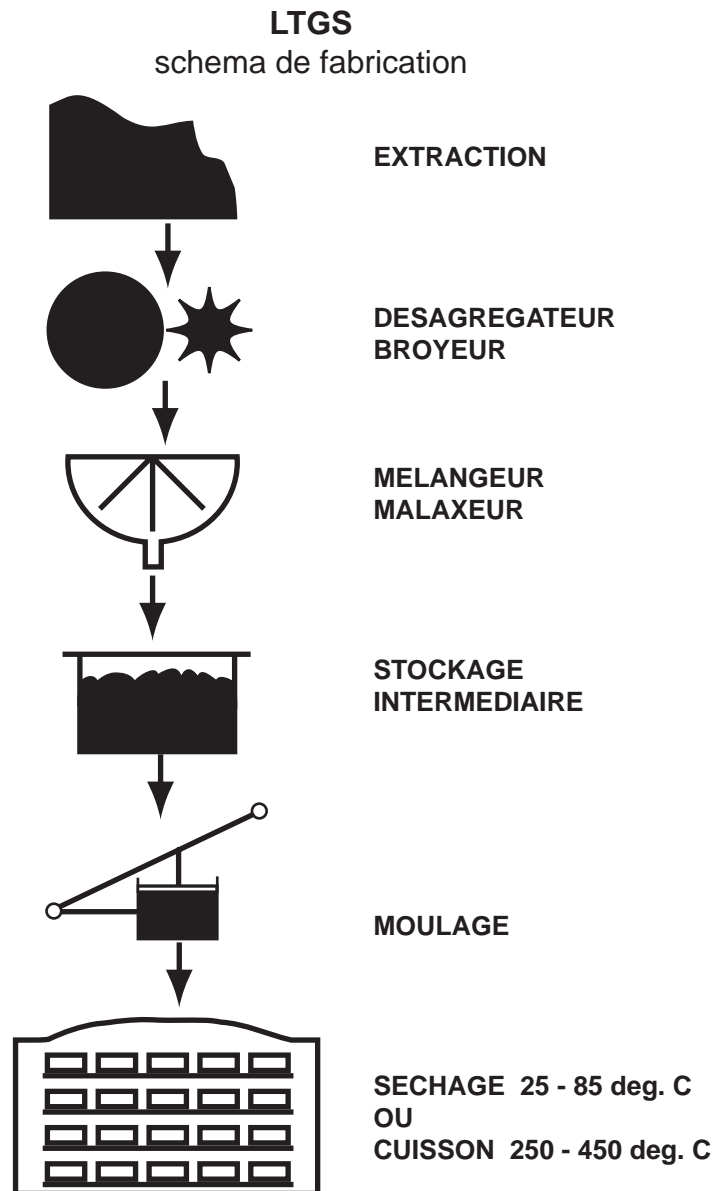
- de 0,5% à 2% en poids, la terre est stabilisée avec une bonne résistance à l'eau.
- de 2% à 5%, les blocs sont stables à l'eau, avec une résistance à la compression comprise entre 4Mpa et 6Mpa.
- de 5% à 10%, les blocs sont comparables à la brique cuite, avec des résistances comprises entre 8Mpa et 60Mpa.

Ces caractéristiques mécaniques dépendent de la température de réticulation. Chaque gamme de température correspond à un produit fini particulier.

#### 5.3.1 Réticulation géopolymérique à température ambiante: Température au plus égale à 65°C.

On l'utilise pour fabriquer des blocs ou briques, stables à l'eau, de résistance mécanique moyenne.

Le réactif oligosialate est ajouté à l'état de poudre, généralement accompagné d'un additif minéral permettant de corriger la nature argileuse du sol, et le mélange "sol + réactif" est broyé par exemple dans un broyeur à marteaux. Ce mélange peut être stocké pendant une longue période si nécessaire. Il est ensuite hydraté dans un malaxeur, afin d'obtenir une pâte semi plastique, les quantités d'eau ajoutées dépendant exclusivement de la nature de chaque sol. Ce mélange semi plastique va mûrir pendant au moins 24 heures (Fig. 5.1).



**Figure 5.1:** Fabrication de brique par réticulation géopolymérique LTGS

#### 5.3.1.1 Température ambiante

On mesure la progression dans le temps de la résistance à la compression. Dans le cas de 6% de réactif oligosialate de type GEOPOLY\* KNA (3% équivalent NaOH, KOH), les valeurs obtenues sont les suivantes:

au bout de 3 jours	4,1 Mpa
au bout de 15 jours	7,9 Mpa
au bout de 45 jours	7,7 Mpa

### 5.3.1.2 Température égale à 60°-65°C

Une brique mise dans une étuve à 60°C pendant 3 à 5 heures donne une résistance à la compression égale à 7,0 Mpa.

### 5.3.2 Réticulation géopolymérique à température comprise entre 80°C et 450°C:

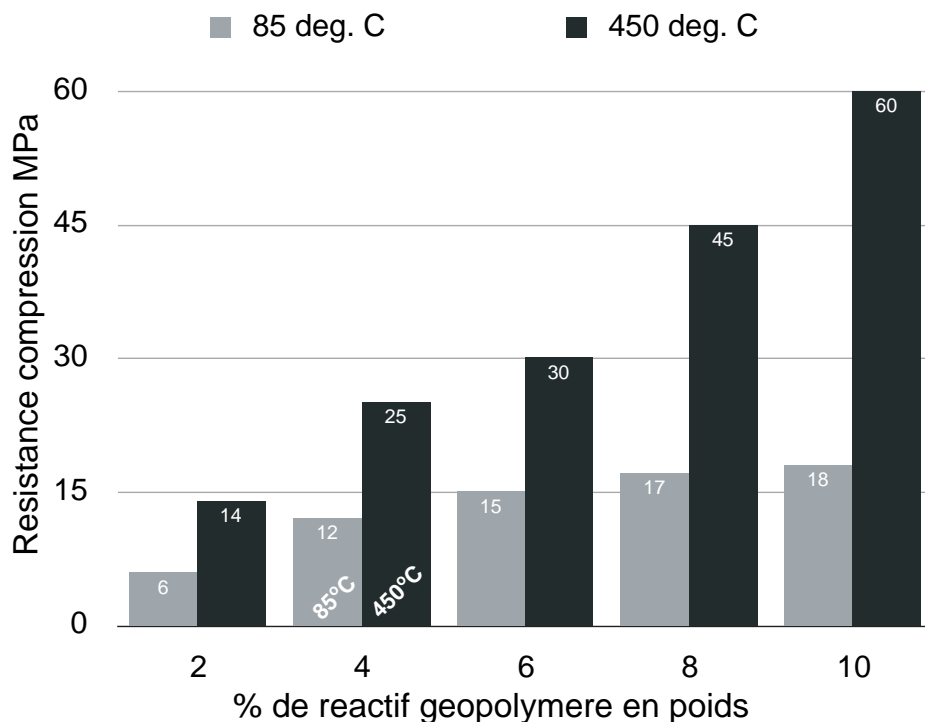
Les matériaux obtenus sont équivalents aux briques céramiques. Le tableau 5.1 (Fig. 5.2) donne la relation entre le pourcentage de réactif GEOPOLY\* KNA sur la résistance à la compression.

**Tableau 5.1:** Résistance à la compression en fonction de la quantité de réactif GEOPOLY KNA®, son équivalent NaOH, KOH et de la température de réticulation géopolymérique LTGS.

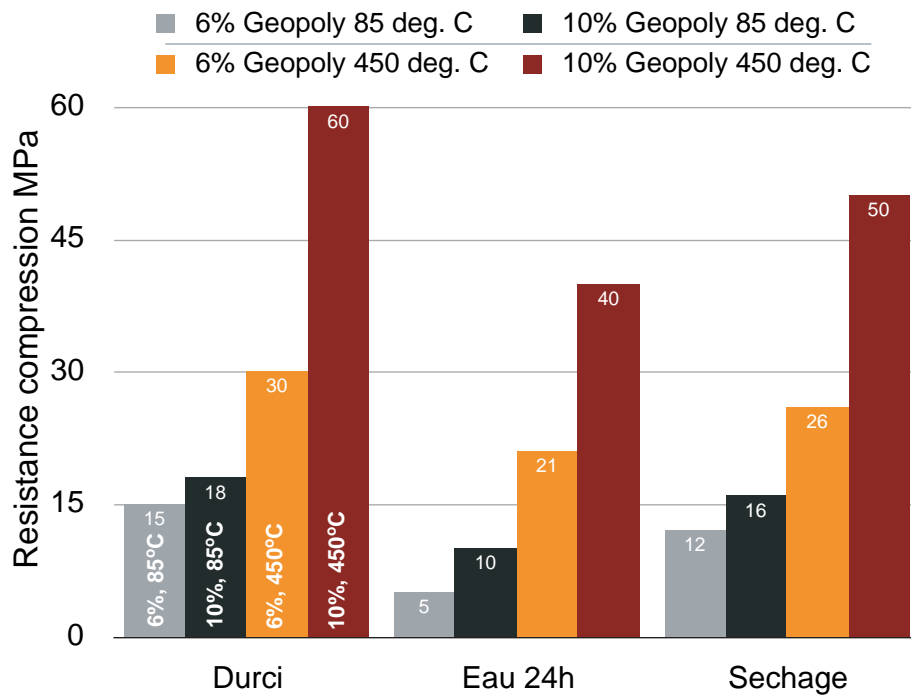
% réactif géopolymère	% équivalent NaOH, KOH	Température de Géopolymérisation	
		85°C	450°C
2	1	6 Mpa	14 Mpa
4	2	12 Mpa	25 Mpa
6	3	15 Mpa	30 Mpa
8	4	17 Mpa	45 Mpa
10	5	18 Mpa	60 Mpa

La résistance à la compression, après 4 jours d'immersion dans l'eau, baisse d'environ 30%, par rapport à la valeur à sec. Ainsi une brique cuite à 85°C obtient une résistance à la compression de 12,6 Mpa, la résistance passe à 8,0 Mpa après 4 jours d'immersion dans l'eau (P.V. n°134 du CEMEREX, 1982) (Fig. 5.3).

Pour une brique ayant subi un traitement thermique à 400°C, la résistance à la compression de 36 Mpa atteint 28 Mpa après 4 jours d'immersion dans l'eau.



**Figure 5.2:** Résistance à la compression en fonction de la quantité de réactif GEOPOLY KNA® et de la température de réticulation géopolymérique LTGS.



**Figure 5.3:** Résistance à la compression, pour différentes quantités de réactif GEOPOLY KNA®, à 85°C et 450°C, après immersion 24 heures dans l'eau, après sèche.

#### 5.4 Qualité de confort:

Tous les matériaux fabriqués par réticulation géopolymérique (LTGS) conservent la qualité de confort propre aux matériaux terres. Cette qualité demeure et n'est pas perturbée ni par les traitements à température moyenne (85-450°C), ni par les quantités de réactif GEOPOLY\* ajoutées.

Cette qualité de "confort intérieur", qui est celle du pisé, de l'adobe, de la terre, est une caractéristique physico-chimique essentielle des géopolymères obtenus par LTGS donnant un rôle de "climatiseur". Ces géopolymères qui constituent la matrice de la brique, ont des propriétés dites zéolithiques, c'est à dire la propriété de "respirer", d'être en équilibre hygrométrique constant avec l'intérieur de l'habitation et de plus de constituer un excellent matériau d'isolation contre le chaud.

En effet, contrairement à l'idée généralement propagée, l'isolation thermique des habitations contre le chaud ne suit pas les mêmes règles et lois que l'isolation thermique contre le froid. On sait que, dans les régions chaudes et sèches, le matériau traditionnel en terre, procure un confort bien supérieur au matériau isolant moderne, utilisé dans les pays industrialisés du Nord. Les briques fabriquées par la réticulation géopolymérique (LTGS) absorbent la vapeur d'eau. La nuit elles emmagasinent l'humidité de condensation de l'air extérieur. Le jour elles relâchent cette humidité, soit à l'intérieur s'il faut compenser le degré hygrométrique, soit vers l'extérieur. Il y a donc évaporation, donc abaissement de la température du matériau, donc refroidissement de l'habitation, et isolation contre le chaud.

## **5.5 Matériaux de construction utilisant le concept de la géopolymérisation:**

La réticulation géopolymérique (LTGS) est une innovation dans l'utilisation des matériaux terres. Dans chaque pays, en changeant seulement certains paramètres, avec la même technique il est possible de fabriquer la totalité des matériaux utilisés dans le bâtiment:

- pisé résistant à l'eau
- adobe
- briques
- linteaux
- fondations
- enduits
- revêtement de mur
- revêtement de sol, pavement
- toiture

Les études actuellement en cours, ont déjà démontré qu'il était également facile de concevoir la fabrication de certains types de mortiers et liants hydrauliques dans le cadre de cette technologie.

La réticulation géopolymérique (L.T.G.S) appliquée à la filière terre, a fait l'objet d'un contrat ANVAR d'aide à l'innovation, entre la Société CORDI-GEOPOLYMERE SA, 02100 SAINT-QUENTIN, France et l'Entreprise GARDIOL, 04200 SISTERON.

GEOPOLY est une marque déposée par Cordi-Géopolymère SA.