

CHAPITRE II

LIANTS ALTERNATIFS

ET PRODUITS DE

SUBSTITUTION

Chapitre II : Liants alternatifs et produits de substitution

II-1-Définition

II-2-Les types de liants

II-2-1-Liants minéraux

II-2-1-1-Les ciments

*Liants bélitiques

II-2-1-2-Les chaux

II-2-1-3-Géopolymères : polymères inorganiques

II-2-1-3-A-Géopolymérisation

II-2-1-3-B-Ciment géopolymère

II-2-1-3-C-Production des géopolymères : Liants de verre

II-2-1-3-D-Applications des géopolymères

II-2-1-4-Pouzzolanes

II-2-1-4-A- Pouzzolanes naturelles

II-2-1-4-B- Pouzzolanes artificielles

II-2-1-5-Autres liants minéraux

II-2-2-Liants organiques

II-2-2-1-Les polymères organiques naturels

II-2-2-2-Les polysaccharides

II-2-2-2-A- Les amidons

II-2-2-2-B- Les extraits d'algues

II-2-2-2-C- La cellulose et la lignine

II-2-2-2-D- Autres liants polysaccharides

II-2-2-3-Les protéines

II-2-2-3-A- La caséine

II-2-2-3-B- L'ovalbumine et l'albumine du sang

II-2-2-3-C- Les protéines végétales

II-2-2-4-Les lipides

II-2-2-5- Les autres molécules complexes : les tanins

II-2-2-6-Les polymères organiques industriels

II-2-2-6-1-Élaboration des quatre plus importants polymères industriels**II-2-2-6-2-Domaine d'application des polymères****II-2-2-6-3-Les trois grandes familles de polymères**

II-2-2-6-3-A- Les polymères linéaires thermoplastiques.

II-2-2-6-3-B- Les élastomères

II-2-2-6-3-C- Les polymères thermodurcissables.

II-2-3--Stabilisants d'argiles

Chapitre II : Liants alternatifs et produits de substitution

II-1-Définition

Un liant est une matière ajoutée à une autre, qui, en se solidifiant en agglomère les parties composantes. C'est aussi un matériau qui sert à agglomérer des matières inertes (sables, graviers, ...ect). C'est aussi un constituant non volatil des vernis et des peintures, qui assure une bonne dispersion des pigments [28].

II-2-Les types de liants

II-2-1-Liants minéraux

On regroupe sous le terme «liants minéraux» toutes les substances, généralement sous forme de poudre, composées de matière minérale et qui, en présence de solvant (en l'occurrence l'eau), réagissent pour former une pâte qui durcit par divers mécanismes en agglomérant des grains afin de former un bloc solide et pérenne. Les liants minéraux sont pour la plupart artificiels (seules les pouzzolanes naturelles échappent à cela mais n'ont un effet liant qu'en présence de chaux, elle même artificielle). Les liants les plus couramment utilisés dans la construction en terre crue sont les ciments et les chaux. Quelques sous-produits industriels peuvent aussi être utilisés en addition ou en substitution partielle dans ces deux types de liants [29].

II-2-1-1-Les ciments

Il existe plusieurs types de ciment selon leur composition. Les ciments Portland normalisés sont à base de clinker, d'autres constituants (d'origine naturelle ou de sous-produits industriels) et de sulfate de calcium ajouté pour réguler la prise du ciment. Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange d'argile et de calcaire. Il contient des minéraux anhydres hydrauliques qui, en présence d'eau, produisent des hydrates responsables de la prise et du durcissement de ce liant. Le durcissement pouvant se faire sous l'eau, on parle de liant hydraulique [30].

*Liants bélitiques

Belite est un minéral industriel important dans la fabrication du ciment de Portland. Son constituant principal est le silicate dicalcique, Ca_2SiO_4 , parfois formulé comme $2 \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_2S en notation chimiste du ciment).

Il s'agit en quelque sorte et à première vue d'un retour en arrière, puisque les premiers ciments de l'ère moderne, il y a plus de cent cinquante ans, étaient de par leur fabrication dans des fours à chaux, donc à des températures ne dépassant guère les 1200°C, essentiellement composés de C_2S [3].

Actuellement le but recherché est une limitation des rejets de CO_2 , en complément de l'utilisation d'ajouts. L'avantage supplémentaire est une réduction non négligeable de la consommation énergétique par diminution de la température de cuisson, ce qui permet aussi de diminuer quelque peu les rejets de CO_2 (en fonction de l'énergie utilisée).

Le principal problème réside dans le fait que les ciments béliques à base de C_2S sont moins réactifs que les ciments alitiques à base de C_3S . Ceci est dû essentiellement à une vitesse de dissolution plus lente et à des sursaturations ioniques plus faibles en solution.

II-2-1-2-Les chaux

A l'instar du ciment, on distingue plusieurs types de chaux. La chaux est obtenue par calcination de certains minéraux comme la calcite ($CaCO_3$), la dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) et la magnésite ou carbonate de magnésium ($MgCO_3$) plus ou moins pure. La température nécessaire à la calcination complète est respectivement de 898°C pour les carbonates de calcium et de 402°C à 480°C pour les carbonates de magnésium [31].

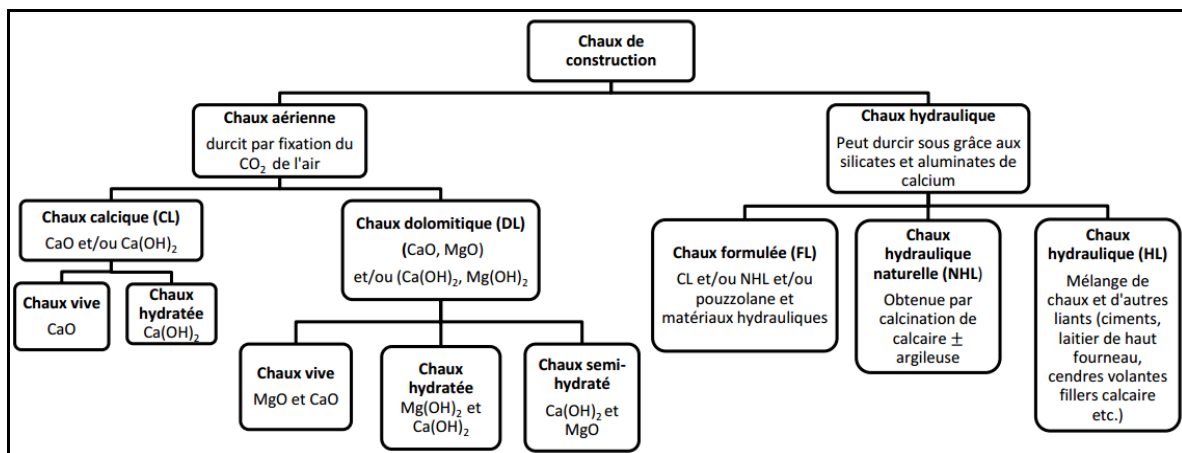


Fig.II.1. Les différents types de chaux utilisés dans la construction

II-2-1-3-Géopolymères : polymères inorganiques

Les géopolymères sont la réciproque des polymères organiques, soit des polymères inorganiques. A 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 a des propriétés similaires aux plastiques, mais ils n'ont aucun solvant dangereux, ne brûlent pas 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.

Les matières premières utilisées sont principalement des minéraux d'origine géologique, d'où le nom « géopolymère » [32].

Les géopolymères seraient l'une des technologies antiques perdues et « redécouvertes » récemment [33]. Des études y voient la technique utilisée pour la fabrication des blocs constitutifs de monuments de l'antiquité dont les pyramides égyptiennes [34], [35]. Ces théories ont été – et sont toujours – débattues avec ferveur dans les milieux archéologiques [36]. Le premier à avoir émis cette hypothèse, le professeur français Joseph Davidovits, est également le premier à avoir mis en place le mot géopolymère, dans les années 1970. Il l'utilise pour distinguer une classe de matériaux fabriqués en utilisant une solution alcaline et une source aluminosilicate [37], [38]. Ils ont été développés comme une alternative aux polymères organiques classiques, afin de mieux résister au feu et éviter les dangers associés aux incendies et aux fumées toxiques. Cependant, les géopolymères ont vite suscité l'intérêt en tant que liants alternatifs au ciment pour les matériaux de construction. Au début, les géopolymères étaient trop coûteux pour une telle application, nécessitant des matériaux de choix et une procédure de fabrication soignée. Il y a eu un changement après les travaux de Wastiels et al. qui ont démontré la possibilité d'obtenir des matériaux performants à partir de l'activation alcaline des cendres volantes, un déchet des centrales thermiques [39]. Ceci a eu pour effet de donner un nouvel élan aux géopolymères, les rendant économiquement et écologiquement attractifs [33].

II-2-1-3-A-Géopolymérisation

Quand Davidovits a, pour la première fois, parlé de « géopolymère », le processus concerné était celui de l'activation du métakaolin par un hydroxyde alcalin et/ou silicate alcalin [38], [40]. Ce processus a été étendu ensuite pour couvrir des matériaux produits à partir d'autres aluminosilicates comme les cendres volantes. Le géopolymère au métakaolin demeure en effet, jusqu'à aujourd'hui, un système modèle, permettant de comprendre les mécanismes de formation de ces matériaux, et de les transposer ensuite vers des aluminosilicates plus complexes.

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.

II-2-1-3-B-Ciment géopolymère

Les ciments géopolymères ont aussi la réputation d'être des ciments « verts », écologiques, en particulier pour leur faible émission de gaz à effet de serre CO_2 . On compare donc les besoins énergétiques et les émissions de CO_2 pour le ciment Portland ordinaire, avec les ciments géopolymères à base de roches et ceux à base de cendres volantes. Cette comparaison se fait pour des mortiers ayant des résistances à la compression similaires, à savoir en moyenne 42 MPa à 28 j [41].

II-2-1-3-C-Production des géopolymères : Liants de verre

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 [42].

Le verre est un matériau amorphe, de ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance dans un verre.

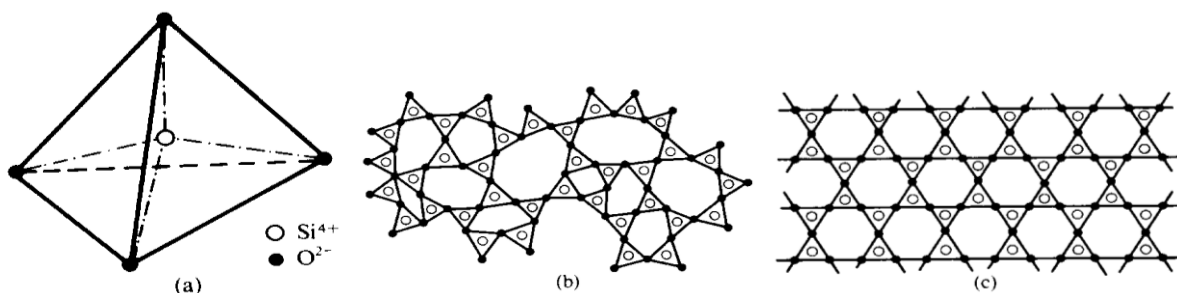


Fig.II.2. Structure de verre. (a) tétraèdre de silice (ex. pyrex), (b) silice amorphe (ex. verre), (c) silice cristallisée (ex. quartz)

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 [43].

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 [44] et [45] 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 [46] et [47] ont montré que le verre finement broyé contribue à limiter les expansions dues à la RAS à long terme. Des géopolymères ont été élaborés à base de poudre de verre utilisant comme activateurs alcalins le NaOH et le KOH avec des concentrations de 1,5 et 10M. Ils ont montré qu'une activation thermique de 40-60°C était nécessaire pour développer des propriétés mécaniques et des résistances en compression allant jusqu'à 60 MPa ont pu être obtenues pour des géopolymères activés avec KOH 5M et une température d'activation thermique de 40°C [48].

II-2-1-3-D-Applications des géopolymères

Le béton géopolymère est un matériau innovateur et se présente comme une alternative potentielle au béton à base du ciment Portland ordinaire pour son utilisation dans le domaine de la construction. Les matériaux activés sont connus depuis les années 40, mais ce n'est que dans ces dernières qu'ils ont connu un regain d'intérêt sans doute parce qu'on est à la recherche d'un liant moins énergivore et plus écologique que le ciment Portland [42].

Ces matériaux trouvent leurs applications dans l'industrie de l'automobile, dans la décoration [49]. (Fig.II.3).



Fig.II.3. Application des géopolymères dans l'industrie du fusible et dans la décoration

Ils sont également utilisés dans la rénovation structurelle sous forme de composites en fibre à base de géopolymère [49]. Les géopolymères trouvent leurs applications dans l'industrie de la préfabrication, notamment en Australie, où l'université De Queensland a élaboré des poutres en béton géopolymère préfabriqué (Fig.II.4).



Fig.II.4. Poutres en béton géopolymère préfabriqué

II-2-1-4-Pouzzolanes

La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire et une variété de couleur en passant du rouge au noir et englobant toutes les nuances intermédiaires exceptionnellement le gris (Voir chapitre I. Eco-matériaux. Pouzzolanes naturelles).

A l'époque romaine antique, la pouzzolane est mélangée à la chaux aérienne, permettant aux mortiers la prise hydraulique, durcir en présence d'eau.

Au XIX^e siècle, on donnera le nom de pouzzolane à toutes substances (naturelles ou artificielles) capables de conférer à une chaux ou un ciment, son hydraulicité. Autrement dit, la « propriété pouzzolanique » est l'aptitude d'un matériau à se combiner à température ambiante et en présence d'eau avec la chaux ou la portlandite pour donner des hydrates très peu solubles [50].

Les pouzzolanes peuvent être d'origine naturelle, ou être produites artificiellement :

II-2-1-4-A- Les pouzzolanes naturelles

Elles sont toujours d'origine volcanique, expulsées sous formes de cendres ou de poussières dans l'atmosphère, et donc refroidies brutalement. Elles forment des bancs de roches «pyroclastiques» meubles, de faible cohésion ou parfois compactes, et doivent être réduites à l'état de poudre fine.



Fig.II.5. Pouzzolanes naturelles

II-2-1-4-B- Les pouzzolanes artificielles

- Les cendres volantes : ce sont des cendres très fine, formées des résidus de la combustion de la houille pulvérisée ou de la lignite dans les centrales thermiques.
- Les argiles et les schistes calcinés : elles sont cuites à des températures variant entre 600°C et 900°C, et leur qualité dépend de la composition de la matière de base, des conditions de calcination et des conditions de refroidissement.



Fig.II.6. Pouzzolanes artificielles

II-2-1-5-Autres liants minéraux

Ces derniers sont en général des liants alternatifs (gypse, cendres volcaniques) ou des sous-produits de diverses industries (laitier de haut fourneau, cendres volantes, cendres de bagasse de canne à sucre ou cendres de bagasse de riz).

II-2-2-Liants organiques

Il existe deux catégories de liants organiques, celle des liants organiques naturels où les liants sont d'origines animale et végétale, et sont des sous-produits des activités agro-alimentaires de l'homme et celle des polymères organiques synthétiques et aux résidus du pétrole, qu'on peut nommer liants organiques industriels.

II-2-2-1-Les polymères organiques naturels

Les polymères sont de grosses chaînes de molécules constituées de maillons élémentaires appelés monomères. Les polymères organiques ont un certain nombre de propriétés caractéristiques. Ils ont des masses molaires pouvant atteindre plusieurs millions de g/mol. Leur conformation, qui est leur configuration spatiale, varie selon les conditions du milieu (température, pH, potentiel ionique). La longueur de persistance (L_p), fonction du degré de polymérisation (D_p), est la longueur au-delà de laquelle la rigidité d'un maillon ne détermine pas l'orientation des maillons voisins. Les polymères ioniques sont dits polyélectrolytes car ils comportent à la fois des charges négatives et positives à cause des diverses fonctions présentes sur leur chaîne.

Le pH auquel les charges s'équilibrent est dit potentiel isoélectrique (PIE). Ces caractéristiques vont définir la nature des interactions des différents types de polymères avec les autres particules [29].

Les liants organiques sont des polymères organiques naturels pouvant être répartis en quatre grandes familles de molécules (Les polysaccharides, les protéines, les lipides, les tanins).

II-2-2-2-Les polysaccharides

Les polysaccharides sont des polymères de sucres dont les monomères sont des monosaccharides ou oses (glucose, galactose...). Les sucres ou glucides sont des molécules polyhydroxylées (-OH) ayant une fonction carbonyle ($C=O$). On distingue les aldoses et les cétooses qui sont schématiquement présentés dans la Fig.II.7 [51].

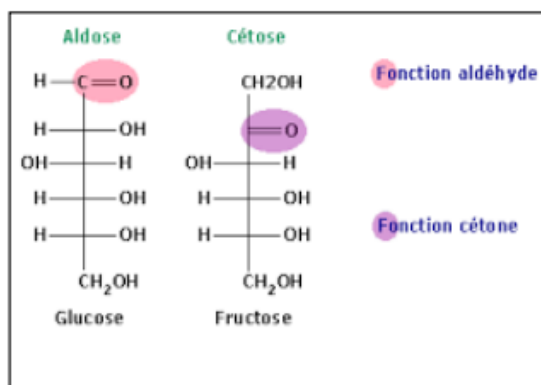


Fig.II.7. Représentation schématique de deux chaînes de molécules d'aldose et de cétose

Il existe une très grande variété de polysaccharides qui peuvent être regroupés en sous familles selon leur source.

II-2-2-2-A- Les amidons

Les amidons sont l'une des plus importantes matières organiques disponibles dans le monde végétal et ils constituent une réserve nutritionnelle des organismes. L'amylose et l'amylopectine sont les deux chaînes de molécules constitutives des amidons.

En milieu hydraté, les amidons gélifient à des températures > 60°C. L'empois obtenu à l'issue de ce processus irréversible présente des propriétés fortement modifiées. La gélification dépend de la teneur en eau et des proportions respectives d'amylose et d'amylopectine [29].

Les proportions respectives d'amylose et d'amylopectine dépendent des espèces végétales comme le montre le tableau II.1.

Tableau II-1 : Pourcentages d'amylose et d'amylopectine des amidons de différentes plantes

Plantes	Amylose (%)	Amylopectine (%)	Point de gélification (°C)
Maïs standard	28	72	72-73
Mais waxy	1	99	72-73
Amylomaïs	52-80	48-20	Indéterminé
Blé	26	74	68-70
Pomme de terre	23	77	64-66
Manioc	17	83	64-66

II-2-2-2-B- Les extraits d'algues

Les algues sont des végétaux inférieurs pourvus de chlorophylle et essentiellement aquatiques. Elles font parties de la famille des thallophytes car dépourvues de tissus conducteurs.

Selon leurs pigments surnuméraires, on distingue les algues bleues (ou cyanophycées), les algues vertes (ou chlorophycées), les algues rouges (ou rhodophycées) et les algues brunes (ou phéophycées) [52].

Grâce à leurs propriétés spécifiques, certains extraits de ces algues trouvent des applications industrielles dans divers secteurs d'activités. Entre autres, on s'en sert en médecine pour le moulage des prothèses dentaires, ou en art pour le moulage des formes.

L'alginate est un polysaccharide extrait des algues brunes sous forme d'acide alginique par dilution dans un acide. On le retrouve aussi sous forme de sel d'alginate le plus souvent en sodium d'alginate.

L'alginate connaît plusieurs applications notamment en tant qu'épaississant dans l'agroalimentaire, comme support d'empreintes pour la fabrication de prothèses dentaires ou comme dispersant dans l'industrie de la céramique.

L'agar agar et le carraghénane sont d'autres biopolymères extraits des algues rouges. Leur propriété de gélification est également utilisée dans divers domaines d'application dont l'agroalimentaire et le traitement des eaux [53].

II-2-2-2-C- La cellulose et la lignine

La cellulose et la lignine sont les constituants principaux du bois et représentent 70% de la biomasse. Contrairement à la cellulose, la lignine n'est pas un polysaccharide mais sa présence quasi systématique avec la cellulose dans les végétaux supérieurs conduit à la considérer. A l'état naturel, les macromolécules de cellulose se rassemblent en un amas de fibres, enveloppées par une couche d'hémicellulose puis de lignine, la lignine assurant la rigidité des fibres. La cellulose est donc indisponible pour interagir avec d'autres particules sauf en cas de décomposition en l'occurrence par fermentation.

L'utilisation de la cellulose pour la stabilisation de la terre se fait soit par l'ajout de paille ou de balle de riz, soit par l'ajout d'excréments d'animaux domestiques notamment la bouse de vache que l'on laisse fermenter en milieu humide avant la mise en œuvre. Dans ce cas, on y retrouve les différentes phases telles que les fibres de cellulose liées, la lignine et les sucres produits par la fermentation [54].

Il est à noter également la présence dans les déjections animales d'autres substances non végétales : des traces de fourrure animales, des microorganismes (champignons, levures, bactéries) et quelques éléments chimiques.

La présence de toutes ces substances présage un milieu complexe et divers modes d'actions dans le cadre de la stabilisation aux excréments d'animaux [29].

II-2-2-2-D- Autres liants polysaccharides

L'utilisation de ces produits pour la stabilisation des sols est peu courante ou spécifique à une région.

Les gommages naturelles sont pour la plupart des sécrétions des plantes pour cicatrifier leurs plaies à l'exception de la gomme Xanthane qui est produite par la bactérie *Xanthomonas Campestris*. Riches en polysaccharides, ces gommages ont une propriété épaississante qui est exploitée pour la stabilisation des enduits en terre crue et aussi dans diverses applications. La gomme arabe produite par les fabacées (acacias) est très répandue en Afrique de l'Ouest.

Les jus de végétaux gélifères sont des liquides visqueux obtenus en trempant les parties de certaines plantes dans l'eau. Ainsi, les feuilles et tiges de bananier, les agaves, le cactus, l'aloès trouvent une utilisation plus répandue sur le continent américain tandis que les eaux gluantes produites par la trempe de tiges écorces ou racines de certaines plantes (liane) sont plus employées en Afrique de l'Ouest (en particulier au Ghana). Le liquide épais ainsi obtenu améliore la résistance au retrait des enduits en terre [54].

Enfin, on note l'utilisation de certains polysaccharides d'origine animale. Le chitosane (ou chitosane) est un dérivé de la chitine qui constitue le deuxième biopolymère le plus abondant dans la nature après la cellulose [55]. Coproduit de l'industrie des crustacés et céphalopodes, le chitosane est obtenu par désacétylation de la chitine issue des carapaces des crevettes et autres crustacés (Fig.II.8).

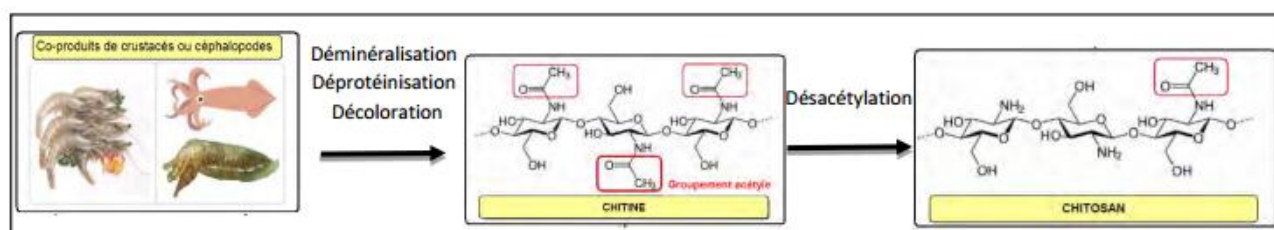


Fig.II.8: Processus d'extraction du chitosan

Contrairement à la chitine, le chitosane est soluble dans l'eau pour des $\text{pH} < 6,5$. Le chitosane trouve beaucoup d'applications notamment dans le traitement des eaux, en cosmétique, en médecine, en papeterie, etc... Toutefois, sa production est plutôt répandue en Asie (Inde, Chine) où l'activité de transformation des crustacés est importante.

II-2-2-3-Les protéines

Les protéines sont des molécules biologiques dont les activités peuvent être très variées.

Se sont de grosses molécules complexes d'acides aminés, constituants essentiels des matières organiques et des êtres vivants [56].

En effet, les protéines sont des chaînes complexes de peptides qui sont une association d'acides aminés reliés entre eux par des liaisons caractéristiques dites peptidiques (ou amides). Les acides aminés qui sont au nombre de 20 à 25 se caractérisent par la présence d'un groupe carboxylique ($-\text{COOH}$), d'un groupe amine (NH_3^+), d'un atome d'hydrogène (H) et d'un groupe distinct (R) (Fig.II.9).

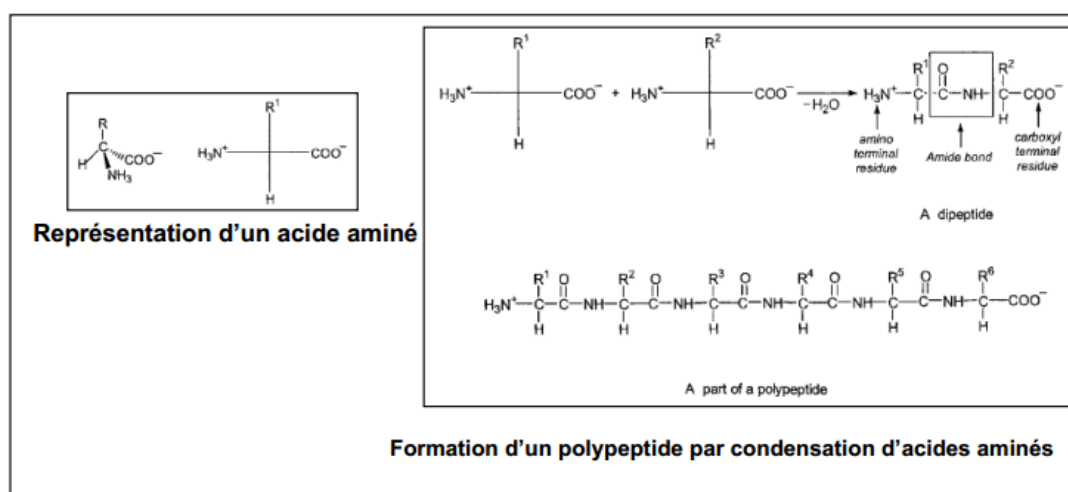


Fig.II.9. Représentation des unités élémentaires d'une chaîne de protéine

En raison des deux fonctions $-\text{NH}_2$ et $-\text{COOH}$, les molécules de protéine ont un comportement amphotère, c'est-à-dire que les charges à leur surface dépendent du pH du milieu [29].

Selon la forme des particules, on distingue les protéines fibreuses (collagène, myosine, kératine etc.) et celles globulaires (enzymes, hormones, ovalbumine, hémoglobine, etc...). Les protéines fibreuses ne sont pas solubles dans l'eau tandis que celles globulaires le sont [57].

Dans le cadre de la stabilisation de la terre crue, on retrouve l'utilisation de la caséine, de l'ovalbumine, de l'albumine du sang d'animaux ou du gluten.

II-2-2-3-A- La caséine

La caséine est une protéine lente, dont l'assimilation se fait pendant plusieurs heures. La diffusion des acides aminés est donc graduelle. Cette propriété fait de la caséine une protéine anti-catabolique très puissante : elle fournit au corps des acides aminés sur une longue durée et préserve donc les fibres musculaires. La caséine vous accompagne dans la réalisation de tous vos objectifs musculaires, de la prise de masse à la perte de poids. La caséine est une protéine issue du lait. Dans notre alimentation, on trouve la caséine sous sa forme naturelle dans tous les produits issus du lait tels que le fromage, les yaourts ou encore le fromage blanc. On la trouve aussi dans beaucoup de suppléments nutritionnels comme les poudres pour bébés, les substituts de repas de régimes hyperprotéinés ou les compléments protéinés pour sportifs et pratiquants de musculation [58].

Protéine principale du lait, la caséine fait partie des phosphoprotéines à cause de son rôle biologique qui est le transport du phosphate pour la croissance des os. Elle est extraite du lait par précipitation. Selon le mode d'extraction, on distingue la caséine acide et la caséine présure.

La caséine, dans le lait, est une protéine en suspension dans l'eau. Elle forme des micelles, c'est-à-dire des structures en forme de sphère ; l'extérieur de ces structures étant hydrophile (qui aime l'eau), et l'intérieur étant hydrophobe (qui n'aime pas l'eau). Elles sont reliées entre elles par des ponts de phosphate de calcium, sels d'un acide phosphorique. Ces micelles portent des charges négatives, d'où leur répulsion mutuelle. C'est d'ailleurs la caséine k qui est responsable de la stabilité de la micelle (Fig.II.10). Celle-ci joue le rôle d'interface entre la partie hydrophobe et hydrophile [59].

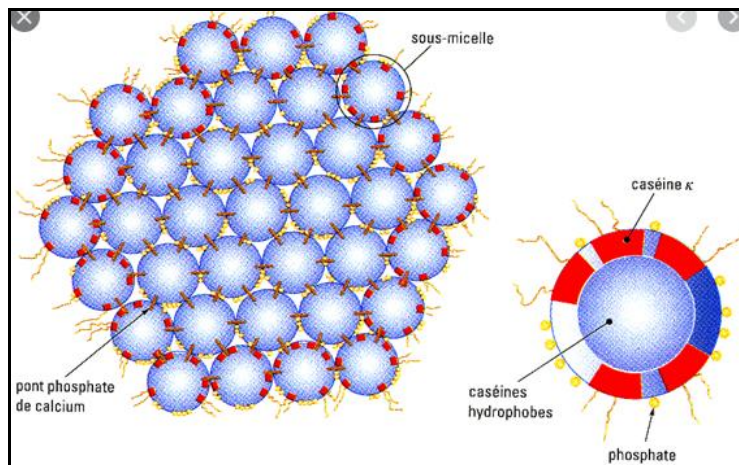


Fig.II.10. Représentation de micelles de caséines

Lorsque le pH du lait atteint 4,7 (PIE de la caséine), soit par fermentation lactique ou soit par ajout d'un acide quelconque, la caséine précipite. Il s'agit de la caséine acide qui est soluble dans les acides et les alcalis, mais gonfle seulement dans l'eau sans s'y dissoudre. L'ajout dans le lait de la présure (enzyme gastrique des jeunes mammifères) permet l'obtention de la paracaseinate de calcium et des phosphates de calcium. Cette caséine, dite caséine présure, n'est soluble que dans les acides [60].

La caséine est utilisée pour la fabrication de peintures à eau, de papier couché, de plastiques ininflammables, de fibres textiles, de produits pharmaceutiques, etc...[61]. La colle industrielle à base de caséine s'obtient en ajoutant un alcali dans de la caséine préalablement délayée dans l'eau [62].

II-2-2-3-B- L'ovalbumine et l'albumine du sang

L'ovalbumine est une protéine soluble dans l'eau, présente dans le blanc d'œuf.

Elle est constituée de 4 chaînes polypeptidiques identiques.

Lorsque la température dépasse 60°C, les chaînes se « déroulent » et se désorganisent. Cette dénaturation a des conséquences sur les propriétés optiques (l'ovalbumine devient opaque), sur la solubilité et sur la fluidité (coagulation) de l'ovalbumine.

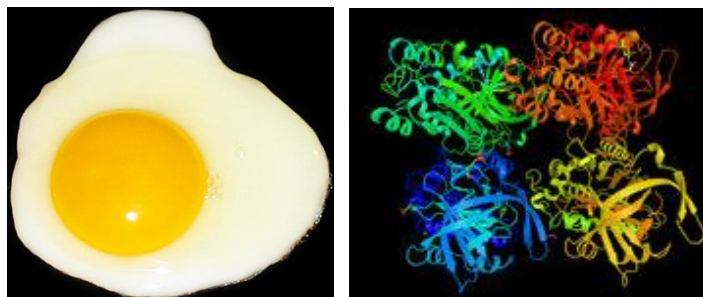


Fig.II.11. Le blanc d'œuf, principale source d'ovalbumine (à gauche: coagulation, à droite: rendu en 3D)

En effet, des parties normalement enfouies se retrouvent à l'extérieur et établissent des liaisons avec les autres molécules d'ovalbumine ce qui crée un réseau plus ou moins rigide [63].

L'albumine est la protéine la plus présente en quantité dans le sang, c'est une protéine soluble dans l'eau que l'on retrouve dans le sérum du sang animal ou dans le blanc d'œuf.

On retrouve également dans le blanc d'œuf, d'autres protéines comme l'ovotransferrine (13% des protéines du blanc d'œuf) et l'ovomucoïde. Les protéines du blanc d'œuf, dont l'ovalbumine, sont réputées être très tensioactives et sont de ce fait utilisées dans diverses industries pour la formation de mousses stables [64].

II-2-2-3-C- Les protéines végétales

Les protéines végétales sont très variées et on les retrouve essentiellement dans les graines légumes (petit pois, soja, arachide, etc...), les céréales (blé, maïs, avoine, etc...) et les graines oléagineuses (graines de cotonnier, graines de tournesol, etc...). A titre indicatif, les céréales contiennent environ 7-13% de protéines. Les graines de blés peuvent en contenir entre 8% et 18% dont 80% de gluten et 20% d'albumine et de globuline [29].

II-2-2-4-Les lipides

Ce sont des molécules organiques insolubles dans l'eau (lipos) et solubles dans les solvants organiques apolaires comme benzène, chloroforme, éther, ... Ils sont caractérisés par la présence dans la molécule d'au moins un acide gras ou chaîne grasse [65].

Les acides gras sont des polymères de carbone non ramifiés et comportant à une de leurs extrémités une fonction carboxylique. Le nombre de carbone est pair. Les acides gras comportant des doubles liaisons entre un ou plusieurs atomes de carbone sont dit mono (ou poly) insaturés [54].

La Fig.II.12 présente un exemple de formules chimiques développées de molécules d'acides gras.

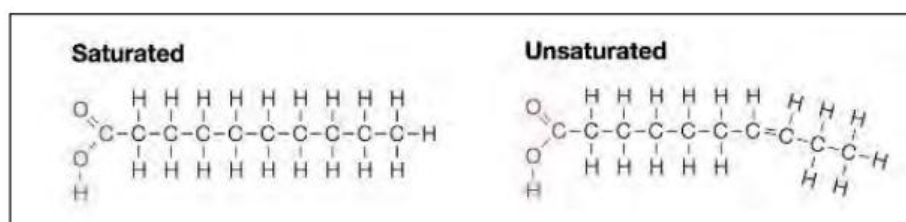


Fig.II.12. Formules développées de molécules d'acides gras saturés (gauche) et insaturés (droite)

Les lipides proviennent en générale des graisses animales et des graines de certaines plantes. L'huile de lin (*Linum usitatissimum*) et le beurre de karité (*Vitellaria paradoxa*) sont des exemples parmi tant d'autres qui trouvent plusieurs applications industrielles.

L'huile de lin est utilisée dans des peintures à huile. Les acides gras insaturés, dont elle est constituée, s'oxydent très lentement par un processus dit de siccation et améliorent ainsi la résistance de la peinture à l'abrasion et à l'érosion par les solvants [54].

L'introduction de bases fortes (NaOH ou KOH) dans les lipides permet de fabriquer du savon par saponification.

II-2-2-5- Les autres molécules complexes : les tanins

Le mot « tanin » vient du terme celtique « tan » qui désigne le chêne dont il était autrefois extrait pour le tannage du cuir. Les tanins sont des composés végétaux présents sur quasiment toutes les parties de la plante. Leur rôle physiologique est essentiellement de pigmentation et de protection contre les agressions biologiques (herbivores).

Il existe une très grande variété de tanins mais ils sont tous dérivés de la molécule de phénol. La molécule de phénol est constituée d'un noyau aromatique lié à un groupement hydroxyle.

La concentration spatiale des groupements hydroxyles (-OH) est à l'origine des propriétés des acides taniques à chélater les ions métalliques et précipiter les protéines. Cette dernière propriété est celle utilisée depuis fort longtemps pour le traitement du cuir pour empêcher la putrescence des protéines fibreuses des peaux d'animaux.

Les principales sources de tannin sont le châtaignier (*Castanea sativa*), le chêne (*Quercus robur*, *Quercus petraea*) et le mimosa (*acacia meamsii*). La solubilité du tanin dans l'eau diminue pour des masses molaires grandes (D_p élevé). De ce fait, certains tanins commercialisés sont sulfités afin d'augmenter leur solubilité dans l'eau.

Dans certains pays en Afrique de l'Ouest (Burkina Faso, Ghana), le tanin extrait des cosses de fruits du néré (*Parkia biglobosa*) est utilisé comme pigment décoratif et stabilisant des enduits et sols des constructions en terre crue [29].

II-2-2-6-Les polymères organiques industriels

Les matériaux polymères organiques ont cent cinquante ans environ [66].

Le 19ème siècle a vu la maîtrise de la polymérisation et c'est l'électrotechnique naissante qui a dopé la mise au point des premiers grands polymères (polychlorure de vinyle, nitrate et acétate de cellulose, résines phénoliques) et favorisé leurs premières applications (matériaux isolants).

A la fin du deuxième conflit mondial, l'industrie pétrolière produit des carburants en immenses quantités et raffine le pétrole à tour de bras.

Elle oriente alors pour très longtemps la production des polymères vers des procédés pétrochimiques qui ont comme avantage de consommer le naphta, principal sous-produit du raffinage. On voit alors apparaître les polyoléfines, qui constituent toujours les polymères industriels les plus consommés.

Depuis, l'industrie pétrochimique a inventé de très nombreuses molécules polymérisables, et mis au point les copolymères (mélanges de monomères différents liés le long de la même chaîne polymère, ou branchés sous forme de ramifications), qui permettent de moduler à l'infini les propriétés mécaniques et physiques des matières plastiques.

Elle a amélioré le comportement thermomécanique par adjonction de renforts (polymères armés) et développé les très nombreuses technologies de la plasturgie (mise en forme).

II-2-2-6-1-Élaboration des quatre plus importants polymères industriels

A partir du pétrole brut, après son raffinage et l'extraction des coupes légères fournissant les carburants, on récupère le naphta et les bitumes.

Le naphta est transformé essentiellement en éthylène, en propylène et en benzène par vapocraquage, et ce sont ces gaz qui sont à l'origine de la polymérisation des quatre grandes familles de polymères suivants :

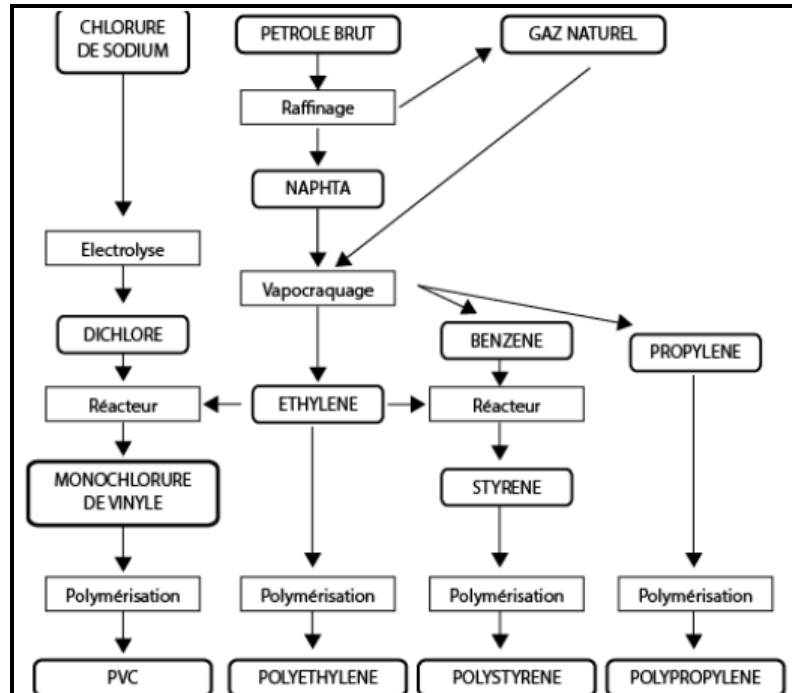


Fig.II.13. Elaboration de quatre polymères industriels

II-2-2-6-2-Domaine d'application des polymères

Les polymères sont utilisés dans plusieurs domaines tels que l'emballage, le bâtiment, le transport, l'électricité et autres.

II-2-2-6-3-Les trois grandes familles de polymères

II-2-2-6-3-A- Les polymères linéaires thermoplastiques.

85% des polymères. Polymères linéaires très nombreux.

Ils possèdent 3 états physiques suivant la température : solide, caoutchoutique et liquide.

Ils sont mis en forme par de nombreux procédés d'injection ou d'extrusion à chaud.

Possibilités de variation des propriétés par cristallisation partielle ou formation de copolymères. Il existe quelques rares alliages de polymères thermoplastiques (ABS).

II-2-2-6-3-B- Les polymères thermodurcissables.

Polymères réticulés (résines). Ils ne possèdent pas d'état liquide. Non recyclables.

Ils sont mis en forme par polymérisation définitive.

Performances thermomécaniques plus élevées que celles des thermoplastiques.

Grandes possibilité de mélanges permettant l'élaboration de matériaux composites.

II-2-2-6-3-C- Les élastomères

Polymères spéciaux utilisés pour leur comportement élastique particulier.

Les élastomères peuvent être des thermoplastiques ou des thermodurcissables.

Ils sont constitués de très longues chaînes faiblement réticulées (1 pontage / 1000 atomes) [66].

II-2-3-Stabilisants d'argiles

Les matériaux organiques tirent leurs propriétés de la coexistence de deux types de liaisons atomiques : les liaisons covalentes d'une part, fortes et rigides, qui constituent des macromolécules dont le squelette est en général une chaîne carbonée; d'autre part, à plus longue distance, flexibles et facilement rompues, qui assurent la cohésion entre chaînes macromoléculaires.

Outre les polymères et élastomères obtenus par synthèse chimique à partir des hydrocarbures ou de la biomasse, on y retrouve les protéines et les matériaux d'origine biologique.

Qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, tous ces matériaux sont générés par polymérisation (assemblage en grandes chaînes linéaires ou tridimensionnelles) de centaines ou milliers de molécules de base, les monomères.

Ceux-ci sont des protéines biologiques dans les matériaux d'origine naturelle, ou des molécules organiques dans les polymères de synthèse.

La terre est un matériau de construction prêt à l'emploi et n'a pas besoin que de peu de traitement. En règle générale, un mélange assez humide avec des proportions plus élevées d'argile est utilisé pour le moulage et la propagation des applications, tandis qu'un mélange avec moins d'argile est mieux adapté à la compaction dans un état moite ou humide.

Afin de réduire ou d'éliminer complètement la réversibilité de sa cohésion et le gonflement, la terre peut être stabilisée par un large éventail de stabilisateurs physico-chimiques.

Des stabilisateurs traditionnels, qui sont généralement obtenus ou dérivés de substances naturellement présentes, sont principalement utilisés avec les techniques traditionnelles de construction. Elles sont de trois types différents: les colles (gomme arabique...), produits huileux (beurre de karité, huile de lin ...) et des tanins (l'urine de cheval...).

Les stabilisateurs industriels principaux sont le ciment, la chaux et le bitume [67].