

CHAPITRE I

ECO-MATERIAUX

Chapitre I : Eco-matériaux

Introduction

***Valorisation des matériaux en Génie-Civil**

I-1- Matériaux naturels :

I-1-1-Pierre

I-1-1-1-Définition

I-1-1-2-Les différents types de roches mères de la pierre naturelle

I-1-1-3-Les atouts de la pierre naturelle

I-1-1-4-Les ordres de grandeurs des principales caractéristiques

I-1-1-5-Les caractéristiques des pierres naturelles

I-1-2-Argile pour les briques en terre crue stabilisée

I-1-2-1-Définition de l'argile

I-1-2-2-Caractéristiques d'argiles

I-1-2-3-Description et formulation d'une brique en terre crue

I-1-3-Pouzzolanes naturelles

I-1-3-1-Définition des pouzzolanes

I-1-3-2-Propriétés liantes des pouzzolanes

I-2- Matériaux activés :

I-2-1-Argiles calcinées

I-2-1-1-Calcination des argiles

I-2-1-2-Evaluation de l'activité pouzzolanique des argiles calcinées

I-2-2-Métakaolin

I-2-3-Cendres de balles de riz

I-2-3-1-Balle de riz

I-2-3-2-La combustion de la balle de riz et la composition des cendres

I-2-3-3-Utilisation en remplacement du ciment

I-3- Sous-produits industriels et déchets :

I-3-1-Granulats de caoutchouc

I-3-1-1-Origines des granulats de caoutchouc

I-3-1-2-Domains d'utilisation des granulats de caoutchouc

I-3-1-3-Caractéristiques générales

I-3-2-Laitiers

I-3-2-1-Laitiers HF

I-3-2-2-Laitiers LD

*Usages du laitier d'aciérie

I-3-3-Sédiments

I-3-3-1-Définition

I-3-3-2-Origine et types de sédiments

I-3-3-3-Utilisation des sédiments dans le domaine du Génie-Civil

I-3-4- Cendres de biomasse

I-3-4-1-Définition

I-3-4-2-Exemple de cendres de la biomasse forestière

I-3-4-3-Un béton à partir de cendres provenant de la combustion de biomasse

I-3-5- Farines animales

I-3-5-1-Définition

I-3-5-2-La crise de la “vache folle”

I-3-5-3-Les différents types de farines animales

I-3-5-4-Utilisation Des farines animales en Génie-Civil

I-3-6-Verres recyclés

I-3-6-1-Utilisation du verre dans différents secteurs d'activité

I-3-6-2-Utilisation des déchets verriers dans le secteur du bâtiment et de la construction

A-Revêtement de route (ciment/béton/gravier)

B-Tuiles/dalles/carrelages

C-Peintures

D-Isolation

Chapitre I : Eco-matériaux

Introduction :

Les matériaux innovants, développés par les chercheurs et produits par les usines de fabrication ont surgi sur le marché afin de répondre aux nouvelles exigences de la construction en comblant les lacunes et compensant les manques marqués par les anciens matériaux, car ils présentent des performances supérieures.

Ces matériaux innovants sont dotés de qualités indispensables : résistance, durabilité, respect de l'environnement et économie en ressources, en énergie et en coût.

Définitions :

* **Matériaux de construction** sont des matériaux utilisés dans les secteurs de la construction : Bâtiments et Travaux Publics BTP.

La gamme des matériaux utilisés dans la construction est relativement vaste. Elle inclut principalement le bois, le verre, l'acier, l'aluminium, les matières plastiques (isolants notamment) et les matériaux issus de la transformation de produits de carrières, qui peuvent être plus ou moins élaborés. On trouve ainsi les dérivés de l'argile, les briques, les tuiles, les carrelages.

* **Matériaux innovants**, c'est des matériaux auxquels on a introduit de nouveaux produits (adjuvants, liants, déchets, additions,ect) pour les rendre plus performants.

* Le béton par exemple, est un matériau économique, facile à utiliser mais non dénué d'inconvénients :

-Il peut se casser

-Ne résiste pas à certains climats

-La combustion du ciment entraîne d'importants rejets de CO₂ c'est pourquoi des recherches sont menées pour le rendre plus performant.

D'où l'apparition du béton auto-plaçant, béton auto-réparant, béton de chanvre, béton de fibre.

* **Matériaux écologiques :**

Les matériaux écologiques sont des matériaux naturels, sains et recyclables, non toxiques, ils sont étudiés de façon intelligente, ils proviennent de sources qui ne sont pas néfastes pour l'environnement et ils entraînent une réduction des déchets lors de leur fabrication. Ils assurent le confort avec une bonne isolation, qui permet de faire des réductions importantes de chauffage en hiver et de gagner en fraîcheur l'été.

***Valorisation des matériaux en Génie-Civil :**

Les sous-produits (laitiers, pneus usagés, bois, verre,...ect) proviennent des déchets de divers secteurs d'activités professionnelles. Leur valorisation dans les bétons et les structures du bâtiment et travaux publics offre une voie de la gestion des déchets industriels et urbains différente de celles conventionnelles (énergétique par incinération, ...) et une réponse au déficit entre production et consommation de certains matériaux naturels.

I-1-Matériaux naturels :**I-1-1-Pierre:****I-1-1-1-Définition :**

La pierre est une matière minérale dure et solide [1].

Autrefois appelée pierre à bâtir, elle est un matériau de construction constitué de la roche d'où elle est extraite. Elle se distingue des produits manufacturés tels les blocs de béton ou les briques d'argiles, qui sont appelés pierre artificielle.



Fig.I.1. La pierre naturelle

La pierre est depuis très longtemps employée dans la construction et dans la conception d'objet d'art.

Ce n'est pas un hasard si la période la plus reculée de l'histoire de l'humanité s'appelle âge de la pierre qui est la période de la préhistoire durant laquelle les humains créèrent des premiers outils en pierre.

Les pierres utilisées en construction doivent avoir une résistance mécanique suffisante, ainsi qu'une durabilité en rapport avec leur prix de mise en œuvre, celui-ci cumulant les coûts : d'extraction du matériau en carrière, d'acheminement du matériau (brut ou taillé) jusqu'au lieu de construction, de préparation du matériau (par exemple, taille des pierres en blocs parallélépipédiques et l'appareillage).



Fig.I.2. Appareillage d'un mur en pierre

Les principales roches utilisées en construction sont le granite, le calcaire, le grès, la pierre meulière, la marne, l'ardoise, le marbre.

La pierre naturelle est un matériau présent dans le domaine de la construction depuis toujours et qui se prête aux utilisations les plus diverses. En effet, ses coloris variés, ses différentes finitions ainsi que la plage étendue de ses caractéristiques physico-chimiques font qu'elle s'intègre harmonieusement quel que soit le style [2].



Fig.I.3. Pierre naturelle avec diverses colorations et utilisations

I-1-1-2-Les différents types de roches mères de la pierre naturelle :

Il existe trois différents types de pierres naturelles, les roches magmatiques, les roches sédimentaires et les roches métamorphiques.

Les roches magmatiques : sont formées par le refroidissement et la solidification du magma comme le granite, le basalte, la diorite, etc.

Les roches sédimentaires : sont formées par dépôt et solidification de sédiments organiques ou minéraux comme le calcaire, le grès, le travertin, etc.

Les roches métamorphiques : sont des roches provenant de masse de roche préexistantes transformées par l'action de la température et de la pression comme le marbre, le schiste, le gneiss, ect.

I-1-1-3-Les atouts de la pierre naturelle :

La pierre naturelle possède de nombreux atouts qui font d'elle un matériau de construction et de décoration polyvalent.

D'un point de vue esthétique, la pierre naturelle possède une palette de couleur très étendue entre le blanc et le noir en passant par le vert, le rose, le beige, le gris, etc. La taille des grains plus ou moins fins ainsi que des textures originales font que chaque pierre est unique. En plus de son aspect, la pierre naturelle permet la réalisation d'éléments de construction de toutes formes grâce aux progrès dans le domaine de l'usinage.

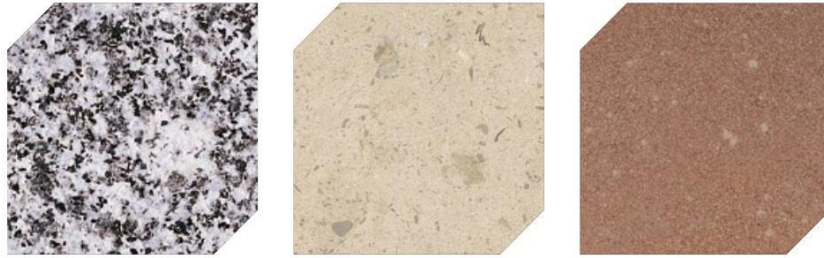


Fig.I.4. Différents coloris de la pierre naturelle

D'un point de vue environnemental, la pierre est un matériau de haute qualité car c'est un matériau naturel, sans émission de COV (Composés Organique Volatils). De l'eau claire et du savon neutre suffisent très souvent à son entretien. Elle est durable lorsque les prescriptions sur le choix, la mise en œuvre et l'entretien sont respectés. De plus, la pierre naturelle peut être recyclée quasi indéfiniment aussi bien dans son emploi initial comme pour un autre usage [2].

En plus de ces qualités esthétiques et environnementales, la pierre naturelle possède des caractéristiques physico-chimiques indéniables.

En effet, la structure de la pierre naturelle lui permet d'être incombustible, d'avoir un bon isolement acoustique, une bonne inertie thermique, ainsi qu'une bonne régulation hygrothermique : ces caractéristiques augmentent le confort intérieur des bâtiments. D'un point de vue mécanique, la pierre naturelle possède des résistances à la compression qui peuvent atteindre près de 300 MPa et des résistances à la flexion de plus de 20 MPa.

Toutes ces caractéristiques font que la pierre naturelle peut être utilisée notamment dans les domaines suivants :

- Bâtiment (construction en pierre massive, revêtements minces de sol ou de murs) ;
- Voirie, mobilier urbains ;
- Décoration ;
- Funéraire.



Fig.I.5. Mobilier urbain, revêtements de sol et objets décoratifs en pierre naturelle

I-1-1-4-Les ordres de grandeurs des principales caractéristiques :

En voici les principaux ordres de grandeurs pour les essais les plus courants présentés par le tableau ci-dessous, qui sont donnés à titre indicatif, car pour chaque affaire, seuls les résultats d'essais à jour sont à prendre en considération.

Tab.I.1. Principaux ordres de grandeurs pour différents types de pierre

	Masse volumique (Kg/m ³)	Porosité (%)	Flexion (MPa)	Compression (MPa)
Calcaire	1300-2700	0.3-48	2-17	5-275
Granite	2400-3000	0.1-2	8-25	150-225
Grès	1900-2700	0.4-25	3-14	30-250
Marbre	2600-2900	0.1-2	8-22	80-210

Selon leur résistance à la compression (R_c), les pierres naturelles sont classées en trois catégories :

Tab.I.2. Classement des pierres naturelles selon la résistance à la compression

Les pierres tendres	Les pierres fermes	Les pierres dures
$R_c \leq 10 \text{ MPa}$ (utilisées principalement en maçonnerie et ouvrage de taille)	$10 < R_c \leq 40 \text{ MPa}$ (utilisées principalement en revêtements de façade)	$R_c > 40 \text{ MPa}$ (utilisées principalement en revêtements de sol)

I-1-1-5-Les caractéristiques des pierres naturelles :

La masse volumique apparente : Elle reflète le degré de compacité du matériau et permet d'évaluer la masse pour un volume donné.

La porosité ouverte : Elle est déterminée par la proportion de vide (pores) dans la pierre, reliés entre eux et donc accessible à l'eau.

La résistance à la flexion : Elle permet de déterminer le niveau de sollicitation admissible en flexion pour une pierre dans un ouvrage, compte tenu de coefficients de sécurité adaptés (caractéristique indispensable pour le dimensionnement des revêtements en pierre attachée à des revêtements de sols notamment).

La résistance à la compression : Elle permet de déterminer le niveau de sollicitation admissible en compression pour une pierre dans un ouvrage, compte tenu de coefficients de sécurité adaptés (caractéristique indispensable pour les applications structurelles).

I-1-2-Argile pour les briques en terre crue stabilisée :**I-1-2-1-Définition de l'argile :**

L'argile est une roche composée principalement de silicate d'aluminium plus ou moins hydratés, qui présentent une structure feuilletée (construit par un empilement de couches tétraédriques) qui explique leur plasticité, ou bien une structure fibreuse qui explique leurs qualités d'absorption.

I-1-2-2-Caractéristiques d'argiles :

En général les grains individuels des minéraux argileux sont de taille microscopique et semblable à des plaquettes. Cette structure en feuillets dont la surface est bien plus importante que l'épaisseur, leur permet d'absorber de grandes quantités d'eau par adhésion, ce qui leur donne leur plasticité et fait gonfler certaines variétés. Le degré de plasticité des argiles varie : mélangées à l'eau, elles se prêtent plus ou moins bien au moulage ou au façonnage. Pour avoir une meilleure résistance le matériau argileux est stabilisé avec de la chaux par exemple ou d'autres matériaux (ciment, laitier,...).



Fig.I.6. Structure en feuillets de l'argile

I-1-2-3-Description et formulation d'une brique en terre crue :

La brique en terre crue constitue un des matériaux de base pour la construction de murs et de voûtes. En principe, les briques sont fabriquées à base de terre (environ 75%), de paille (environ 20%) et d'eau (environ 5%). Le mélange est coulé dans des moules en bois, pour obtenir des briques de 40x20x10 cm. Les briques sont séchées à l'air pendant plusieurs jours, avant de pouvoir être utilisées.



Fig.I.7. Briques en terre crue

Le montage des murs se fait en assemblant les briques les unes à côté des autres; un décalage des joints (environ 20 cm, soit une demi brique) doit être assuré d'un rang à l'autre pour obtenir la solidité requise.



Fig.I.8. Montage des murs en briques de terre crue

Le montage des coupoles se réalise de la même façon, les briques des assises annulaires sont légèrement calées d'un rang à l'autre de façon à donner une inclinaison aux rangs successifs, afin d'obtenir la forme demandée de la coupole (l'inclinaison et la hauteur). L'écartement des joints est rempli avec du mortier de terre (terre fine et eau).



Fig.I.9. Coupole en terre crue

Exposée aux intempéries, au ruissellement d'eau et à la pousse de végétation, la construction en terre crue demande un entretien permanent pour conserver en bon état les éléments de structure (murs et coupoles). Les briques en terre crue sont essentielles pour les travaux de réparation et/ou de rénovation. Cependant, l'introduction du béton dans la construction a conduit à la disparition graduelle des constructions en terre et par conséquent à l'arrêt dans la fabrication des briques en terre crue. L'emploi des briques en terre crue a pourtant l'avantage de répondre aux besoins climatiques (isolation/sécheresse). En outre, l'emploi des matériaux naturels disponibles localement (terre et paille) facilite la fabrication des briques et en réduit les coûts de construction.

I-1-3-Les pouzzolanes naturelles :

I-1-3-1-Définition des pouzzolanes :

Le nom « pouzzolane » découle du nom de la ville portuaire « Pouzzoles » près du Vésuve (Italie), où historiquement on attribue la première exploitation industrielle des cendres volcaniques pour leur utilisation comme matériaux liants en présence de la chaux. Ce sable volcanique était déjà remarqué par Vitruve au 1er siècle avant J.-C. pour la fabrication de béton romain résistant à l'eau. La découverte de ce type de matériaux, de propriétés remarquables, dans d'autres pays européens tels que l'Allemagne (dans la région d'Eifel) et la France (dans le Massif Central), a permis d'utiliser cette dénomination « pouzzolane » pour l'ensemble des pyroclastes (débris de roches magmatiques éjectés par les volcans) ayant la capacité de faire prise en présence de chaux [3].



Fig.I.10. Les volcans produisent les cendres riches en verre de silice et alumine

*La pouzzolane donc est une roche naturelle constituée par des scories (projections) volcaniques basaltiques ou de composition proche. Elle possède une structure alvéolaire. La pouzzolane est généralement rouge ou noire, avec toutes les teintes intermédiaires, exceptionnellement grise, comme l'illustre clairement la Fig.I.11.



Fig.I.11. La pouzzolane avec une variété de couleurs

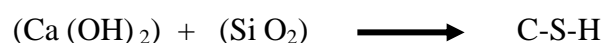
I-1-3-2-Propriétés liantes des pouzzolanes :

La définition donnée par Lea's énonce que : les pouzzolanes sont des matériaux n'ayant pas des propriétés liantes en eux-mêmes mais, en se combinant avec de la chaux à température ordinaire et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes.

Selon la norme ASTM (American Society for Testing and Materials) C 340-58 T, la définition est particulièrement identique : les pouzzolanes se définissent comme étant des matériaux siliceux ou silico-alumineux, qui ne possèdent pas de propriétés liantes, mais qui sous forme de poudre fine et en présence d'humidité, réagissent chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) à température ordinaire pour former des composés possédant des propriétés liantes [3].

Selon la réaction suivante :

La portlandite, qui est l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), en addition avec la silice hydratée (SiO_2), nous donne le silicate de calcium hydraté (C-S-H)



Le silicate de calcium hydraté (en anglais, calcium silicate hydrate ou CSH) est le principal produit de l'hydratation du ciment Portland et est principalement responsable de la résistance des matériaux à base de ciment. Le CSH possède des propriétés liantes.

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la portlandite produite lors de l'hydratation du ciment et la silice (SiO_2) ou l'alumine (Al_2O_3) de la pouzzolane, ce qui permet de réduire la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et d'augmenter la résistance mécanique du mélange. En même temps que l'on mélange le clinker Portland et la pouzzolane, une petite réaction immédiate se produit et libère les ions de calcium et d'aluminium dans la solution. Par la suite, la pouzzolane réagit avec les hydroxydes alcalins puis avec l'hydroxyde de calcium libéré par le clinker Portland pour former alors les C-S-H et C-A-H [4].

Les mécanismes de cette réaction sont toutefois très divers mais sont représentés d'une manière très simplifiée. Au cours de l'hydratation du ciment Portland il se forme sur chacun des grains une couche de produits d'hydratation, principalement du C-S-H, qui devient de plus en plus épais, alors que l'hydroxyde de calcium également formé se sépare partiellement de la solution interstitielle sous forme de cristaux hexagonaux en paillettes. Ces derniers réagissent à leur tour avec la silice et/ou l'alumine de la pouzzolane pour former des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et/ou d'aluminates de calcium hydratés (C-A-H). Les C-S-H et les C-A-H sont des produits insolubles possédant des propriétés liantes [5].

I-2-Matériaux activés

I-2-1-Argiles calcinées :

I-2-1-1-Calcination des argiles :

Des projets de recherche notamment entre 2005 et 2009, ont mis en évidence que l'une des pistes les plus prometteuses réside dans l'utilisation d'argiles calcinées. Les argiles sont de fines particules (< 2 microns) qui résultent de l'érosion des roches. Elles sont constituées de plusieurs centaines de feuilles empilées les unes sur les autres. (Chaque feuille est à son tour composée de différentes couches entre 2 et 5), qui varient d'un type d'argile à l'autre mais qui sont souvent une combinaison de couches de silicate et d'aluminates.

Leur composition chimique et leur taille leur confèrent un réel potentiel pour une utilisation en tant que pouzzolane dans le ciment.

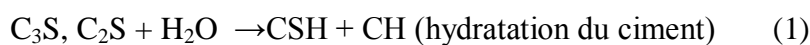
La calcination est une étape essentielle dans le développement d'une pouzzolane artificielle à partir d'une argile, car elle permet le passage d'une structure cristalline (un arrangement ordonné des atomes) à une structure amorphe (une structure désordonnée des atomes). Sans cette calcination ou activation thermique, les cristaux d'argiles seraient dans un état trop stable qui empêcherait toute réaction avec l'hydroxyde de calcium provenant du ciment [6].



Fig.I.12. L'argile est une combinaison de couches de silicate et d'aluminate

I-2-1-2-Evaluation de l'activité pouzzolanique des argiles calcinées :

Après l'élaboration de la pouzzolane artificielle à partir de la calcination d'un phyllosilicate par exemple sous un cycle thermique (température et temps de maintien) approprié, le matériau, plus ou moins amorphe et totalement déshydroxylé, est prêt à l'emploi. Peu importe son mode d'incorporation dans la matrice (ajout ou adjuvant), la pouzzolane participe dans le processus chimique de durcissement selon l'une des réactions 2 à 4. Le taux de cette participation, mesuré par la quantité de Portlandite consommée et les hydrates formés, désigne le degré de pouzzolanité, qui varie d'une pouzzolane à l'autre. En matière de pouzzolanité, la distinction entre les différentes pouzzolanes se fait par deux méthodes, chimique et physico-mécanique. [7]



($S_{\text{Pouzzolane}}$, $A_{\text{Pouzzolane}}$: SiO_2 et Al_2O_3 réactifs de la pouzzolane, CH: $Ca(OH)_2$, H: H_2O).

I-2-2-Métakaolin :

Le métakaolin est un exemple d'argile calcinée déjà utilisée par les cimentiers. Il est produit par calcination du kaolin, une argile qu'on trouve partout dans la croûte terrestre.

Les **kaolins** sont des argiles blanches, friables et réfractaires, composées principalement de kaolinite, soit des silicates d'alumine. Découverts à l'origine en Chine, ils sont à la base de la fabrication de la porcelaine, mais sont aussi utilisés dans l'industrie du papier, la médecine et la cosmétique.



Fig.I.13. Le Kaolin

La **kaolinite** est une espèce minérale composée de aluminosilicate hydraté, de formule brute $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ du groupe des silicates, sous-groupe des phyllosilicate.



Fig.I.14. La Kaolinite

Cette pouzzolane est très réactive ; la substitution de 5 % à 10% de ciment par du métakaolin peut augmenter sensiblement les propriétés mécaniques du béton. Le problème est que le kaolin dispose de propriétés recherchées pour d'autres types d'applications, comme les cosmétiques, l'alimentaire (comestible) ou encore la porcelaine, ce qui renchérit sensiblement son prix et diminue fortement sa disponibilité pour l'industrie de la construction. Par conséquent, le métakaolin n'est aujourd'hui employé dans le béton qu'à de très faibles taux de substitution de ciment et pour des applications très spécifiques.

I-2-3-Cendres de balles de riz :

I-2-3-1-La balle de riz :

La **balle** de **riz** est un coproduit dérivé de la transformation du **riz**. Elle est constituée de l'ensemble des bractées ou glumelles qui renferment le grain. Après avoir protégé la graine pendant sa croissance, la **balle** peut être utilisée comme matériau de construction (isolation thermique), engrais ou carburant.



Fig.I.15. La balle de riz

I-2-3-2-La combustion de la balle de riz et la composition des cendres :

La balle de riz peut être vendue sous forme de cendres. Les cendres de balle de riz se présentent sous une forme très fine, ce qui les rend très actives.

Lorsque la balle de riz est brûlée, le taux de cendre est de 17 à 26%, beaucoup plus que le bois 0,2 à 2%, 12.2% pour le charbon et 19.2 % pour la paille de riz.



Fig.I.16. Combustion de balle de riz

Si la combustion est complète, on obtient de la RHA « Rice Husk Ash ».



Fig.I.17. Cendre de balle de riz RHA

La température de fusion de la cendre de balle de riz (RHA) est de 1439°C.

Si la combustion est incomplète, on obtient du CRH « Carbonized Rice Husk ».



Fig.I.18. Balle de riz carbonisée (CRH)

En brûlant 100 kg de riz paddy, on obtient environ 4 kg de cendres RHA. La cendre de balle de riz possède une teneur élevée en silice, d'autant plus élevée que la combustion est complète et qu'elle se fait à haute température. La RHA possède de bonnes propriétés pouzzolaniques. Elle se présente sous forme « amorphe ». Elle s'obtient au travers d'une combustion contrôlée à haute température [8].

Par contre, la cendre obtenue par une combustion non contrôlée (CRH) possède de faibles propriétés pouzzolaniques et est par conséquent moins intéressante. Elle se présente sous la forme de « cristallite ».

La silice cristalline est connue pour poser des problèmes de santé, puisqu'elle est à l'origine de la silicose.

*Le taux de silice dans les cendres dépend de la température de combustion et de la bonne maîtrise de la combustion. Le taux de silice des RHA est le plus important en comparaison des autres cendres de végétaux.

Cette teneur rend intéressante leur utilisation comme ajout pouzzolanique dans les bétons au ciment pour remplacer une partie du ciment et réduire la perméabilité du béton.

*Les RHA affectent les performances de la pâte, du mortier et du béton en raison d'effets physiques et pouzzolaniques. Les effets physiques sont principalement associés à leur influence sur les caractéristiques de garnissage du mélange. D'autre part, les effets pouzzolaniques sont liés à leur capacité à fournir des composés amorphes siliceux / alumineux qui réagiront chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ ou CH ou portlandite) en présence d'eau. L'étude de la réaction pouzzolanique à travers le système $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -pouzzolane-eau est une voie utile pour l'interprétation de l'hydratation des matériaux [9].

I-2-3-3-Utilisation en remplacement du ciment :

Au cours des dernières décennies, l'utilisation de sous-produits agricoles, tels que les cendres de riz, comme adjuvants minéraux pouzzolaniques dans les matériaux à base de ciment, a suscité une préoccupation croissante. La cendre de balle de riz (RHA) est un matériau à haute teneur en silice et sa haute activité pouzzolanique est reconnue depuis les années 1970.

- Les cendres de balle de riz (tamisées) peuvent être mélangées dans des proportions 1 pour 1 avec du ciment pour diminuer le coût de fabrication et pour assurer la stabilisation (sol, talus....ect) [10].
- L' « Indian Standard Code of practice for plain and reinforced concrete » (IS 456-2000) recommande l'utilisation de RHA dans le béton mais n'en spécifie pas la quantité. L'ajout de RHA au ciment améliore sa consistance, sa stabilité, son imperméabilité, sa durabilité, réduit sa sensibilité à la température, modifie la structure interne du béton, évite la formation de bulles d'air, ... Le taux de remplacement optimal de ciment par des cendres RHA est situé autour de 10% [11].
- Une autre solution est de se passer de ciment et de stabiliser (sols et talus) uniquement avec des cendres de balle de riz, ce qui est encore plus économique [12].

I-3-Sous-produits industriels et déchets :

I-3-1-Granulats de caoutchouc :

I-3-1-1-Origines des granulats de caoutchouc :

Les granulats de caoutchouc sont issus du recyclage de pneumatiques usagés non réutilisables provenant de différentes catégories (VL, PL, TP, Agraires, Moto,...).

Les granulats de caoutchouc, peuvent avoir une granulométrie qui varie de 0,5 mm à 6 mm (Fig.I.19), et peuvent avoir une palette de couleur très riche donnant un aspect esthétique très agréable (Fig.I.20).



Fig.I.19. Granulats de caoutchouc avec différents diamètres



Fig.I.20. Granulats de caoutchouc en couleur

Granulats en caoutchouc servant de matière première pour réaliser des produits amortissants ou isolants.

Ce produit est proposé par des sociétés qui développent une activité de recyclage des rebuts industriels en EPDM (essuie glace, tapis de sol, joints de portières), élastomère utilisé dans tous les domaines de l'industrie des caoutchoucs, homogène, ce qui autorise une meilleure régénération.

I-3-1-2-Domains d'utilisation des granulats de caoutchouc :

Les granulats en caoutchouc recyclés peuvent servir ensuite dans de nombreux domaines:

- Sols amortissants pour aires de jeux ou terrains de tennis (Sous couche).
- Sols amortissants pour terrains équestres.
- Panneaux anti-bruits.
- Sols sportifs.
- Adjuvants pour le béton.
- Dalles.



Fig.I.21. Utilisations diverses des granulats de caoutchouc

I-3-1-3-Caractéristiques générales :

- Destiné au domaine de l'amortissement et de l'isolation.
- Recyclage des caoutchoucs et des pneumatiques évite les coûts de mise en décharge ou d'incinération.
- Produit sous analyses laboratoire
- Excellents résultats aux tests HIC
- Permet un gain de matière minimum de 30%.
- Type EPDM : (Les caoutchoucs **EPDM** (sigle de éthylène-propylène-diène monomère) sont des élastomères spéciaux, caractérisés par :
 - * Longévité.
 - * Flexibilité sur le long terme.
 - * Capacité amortissante optimale.
 - * Sans odeur [13].

I-3-2-Laitiers:

En sidérurgie, le **laitier** correspond aux scories qui sont formées en cours de fusion ou d'élaboration de fusion de métaux. Il s'agit d'un mélange composé essentiellement de silicate, d'aluminates et de chaux, ainsi que d'oxydes métalliques. Ses rôles dans la métallurgie des métaux en fusion sont multiples [14].

Cette matière est un important coproduit de la sidérurgie ; ils sont appréciés comme remblai et comme matière première dans la fabrication du ciment.



Fig.I.22. Haut fourneau N° V de ROGESA Dillingen, Allemagne

I-3-2-1-Laitiers HF :

C'est un coproduit issu de la fabrication de la fonte dans un haut fourneau, où il correspond à la gangue stérile du minerai de fer à laquelle s'ajoutent les cendres du coke. Il se sépare de la fonte liquide par différence de densité.

La quantité de laitier produite correspond directement à la richesse du minerai de fer utilisé. Pour un haut fourneau fonctionnant avec des minerais riches en fer, on atteint généralement une proportion 180 à 350 kg de laitier pour 1 tonne de fonte produite.



Fig.I.23. Laitier en fusion coulant dans une installation de bouletage

Les laitiers de haut fourneau sont des co-produits formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Selon le processus de refroidissement du laitier en fusion, on distingue deux familles :

* Le laitier vitrifié obtenu par un refroidissement brutal à l'eau, lui confère une structure vitreuse. Cela lui permet de développer des propriétés hydrauliques. Ce laitier refroidi à l'eau est appelé 'laitier granulé'.



Fig.I.24. Laitier de haut fourneau vitrifié (ou granulé)

* Le laitier cristallisé, obtenu par un refroidissement lent à l'air, est une roche dure artificielle et chimiquement stable, elle est alors destinée aux travaux publics (Ballast, enrobé bitumé...). S'il satisfait à de sévères conditions qualité, il peut aussi entrer dans la fabrication de laine de verre, etc.



Fig.I.25. Bloc de laitier cristallisé utilisé dans du remblai

I-3-2-2-Laitiers LD :

Un co-produit issu de la conversion de la fonte en acier dans un convertisseur à oxygène de type Linz-Donavit (LD).



Fig.I.26. Ancien convertisseur LD de la Henrichshütte à Hattingen.



Fig.I.27. Le 1^{er} convertisseur commercial LD à oxygène commercial

Le **procédé LD** ou **procédé Linz-Donawitz** est un procédé d'affinage des métaux de la fonte brute en fusion en acier. Il s'agit d'un convertisseur à l'oxygène pur, où ce dernier est violemment insufflé par une lance thermique dans le métal en fusion.

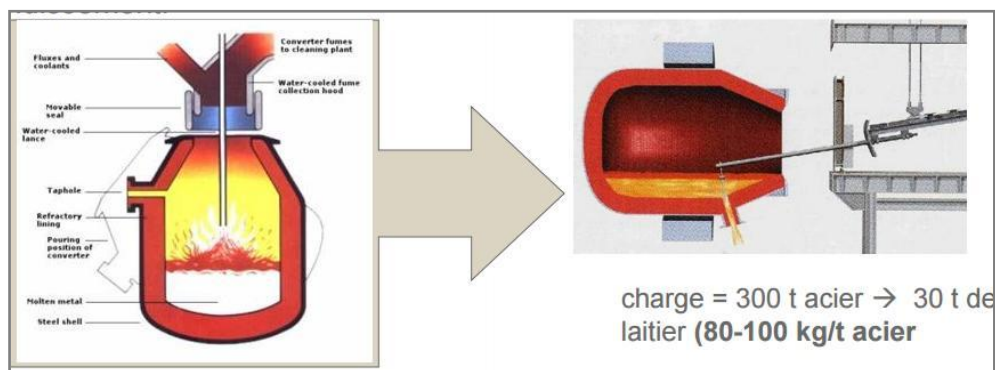


Fig.I.28. Schéma du procédé LD

Après décarburation de la fonte par soufflage d'oxygène, le laitier qui surnage est séparé de l'acier liquide à l'aide d'un bol nageur, qui a une densité intermédiaire entre le laitier et l'acier et qui bloque le passage de laitier pendant la coulée en poche. Le laitier récupéré dans des cuiviers est vidé dans les fosses de refroidissement [15].



Fig.I.29. La coulée en poche

En 2014, 73.6 % de la production d'acier est réalisée par ce procédé.



Fig.I.30. Stock de laitier LD de l'usine Arcelor de Dunkerque

***Usages du laitier d'aciérie :**

- revêtements routiers et autoroutiers.
- traitements de sol argileux, remblais, merlons, colonnes ballastées, plate-formes, pistes, GNT (Graves Non Traitées), GNT mixte (avec ajout de laitier de haut fourneaux, enrochements terrestres).
- Réalisation des gabions (après études spécifiques).



Fig.I.31. Utilisation du laitier LD dans le revêtement des routes

I-3-3-Sédiments :

I-3-3-1-Définition :

Un **sédiment** est un ensemble de particules en suspension dans, l'atmosphère terrestre ou la glace et qui a fini par se déposer sous l'effet de la gravité, souvent en couches ou strate successives. Un sédiment est caractérisé par sa nature (composition physicochimique), son origine, sa granulométrie, les espèces qu'il contient et son éventuelle toxicité... La consolidation des sédiments est à l'origine de la formation des sédimentaires rocheuses.



Fig.I.32. Phénomène de sédimentation qui dépend du contexte géomorphologique, climatique, écologique et de la vitesse de l'eau.

I-3-3-2-Origine et types de sédiments :

Des particules physiques, des êtres vivants et leurs excréta sédimentent en permanence dans les eaux douces, saumâtres et salées, ou se déposent dans les glaciers. Elles peuvent être remobilisées et transportées ailleurs.

- La sédimentation d'origine éolienne augmente avec l'aridification et la désertification. Les sédiments transportés par le vent, sont des minéraux issus de l'érosion des sols et des roches, des volcans, des embruns, des incendies.
- Les périodes de crue des rivières et des fleuves entraînent une plus grande quantité de sédiments, car les débits, plus forts, ont une plus importante force érosive et une plus grande énergie de transport.
- L'érosion des sols dégradés par l'agriculture et le lessivage des sols urbains sont une source croissante de sédiments dans les canaux.
- Les dunes et les lœss sont des résultats d'un transport sédimentaire éolien.
- Les moraines et tills sont des dépôts de sédiments ayant été transportés par la glace. Les effondrements gravitaires créent aussi des sédiments comme les talus et les glissements ainsi que les éléments de karstologie.

- Les lacs, mers et océans accumulent des sédiments pendant de longues périodes (transgression marine). Le matériau peut être *terrigène* (venant des terres) ou *marin* (dont l'origine est marine [16]).

Un **delta** est un type d'embouchure qu'un cours d'eau peut former à l'endroit où il se jette dans un océan, une mer ou un lac.

Dans certaines conditions liées à la turbulence de la mer et à la quantité de sédiments charriés par le cours d'eau, il peut se former un amas de dépôts. Ceux-ci divisent le cours d'eau en plusieurs bras dont le tracé avec la géographie est souvent triangle, ressemblant à la lettre Δ (delta), d'où son nom [17].



Fig.I.33. Exemples de deltas

I-3-3-Utilisation des sédiments dans le domaine du Génie-Civil :

Beaucoup de recherches se sont penchées sur la possibilité de valoriser les sédiments en vue de leur utilisation en Génie-Civil.

Entre autres, une étude menée en Belgique [18], et qui a comme objectif la possibilité de valoriser, après traitement, des sédiments fluviaux pollués, prélevés de la région de Dampremy en Belgique, pour pouvoir les utiliser dans les matériaux de Génie-Civil.

Les chercheurs ont d'abord procédé par un traitement pour détruire les polluants organiques et stabiliser les polluants inorganiques contenus dans les sédiments, puis la valorisation des sédiments traités dans les matériaux de Génie-Civil. La formulation retenue se compose de 75% de sédiments traités, de sable, de ciment et de la chaux vive. Deux voies de valorisation possibles: en matériaux autocompactants et en couche de forme (construction routière).

Une autre recherche [19] dans le même contexte, menée dans le cadre d'une thèse de doctorat, étudie la caractérisation et la valorisation des sédiments fluviaux pollués et traités dans les matériaux routiers. Une première étape de caractérisation physico-chimique et géotechnique des sédiments traités Novosol (STN) a établi la faisabilité de leur valorisation en couche de forme.

Il a également été mis en évidence qu'ils présentaient une réactivité hydrique et pouzzolanique. L'influence de la nature du liant sur le traitement des STN a ensuite été abordée. D'après les résultats des essais mis en œuvre, deux liants testés se distinguent particulièrement et présentent un niveau de performance de classe 3 selon le Guide du Traitement des Sols. Il s'agit du Roc Sol et la chaux vive.

Enfin, une étude complémentaire a montré qu'il était également possible de valoriser les STN en remblais autocompactant.

I-3-4-Cendres de biomasse :

I-3-4-1-Définition :

La biomasse représente l'ensemble de la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Elle peut être issue de forêts, milieux marins et aquatiques, haies, parcs et jardins, industries générant des co-produits, des déchets organiques ou des effluents d'élevage [20].



Fig.I.34. Exemple de biomasse

I-3-4-2-Exemple de cendres de la biomasse forestière :

La biomasse peut être utilisée comme combustible sous forme de copeaux, mais également sous forme densifiée (granules, etc.). Les granules sont généralement fabriqués à partir des produits conjoints du sciage, comme les sciures ou les rabotures.



Fig.I.35. Copeaux de biomasse forestière

La biomasse forestière peut être placée dans des entrepôts extérieurs, préférablement couverts et bien aérés, afin de la protéger de la détérioration causée par l'humidité et les moisissures. L'étape de combustion de la biomasse forestière consiste à la brûler dans une chaudière spécialisée afin de produire de la chaleur.



Fig.I.36. Etape de combustion

Les cendres se déposent sur des grilles fixes ou mobiles dans la chaudière et vont être acheminées et récupérées dans un conteneur.



Fig.I.37. Rampe de déchargement

Les cendres de combustion peuvent être valorisées de différentes manières, notamment comme amendement calcique dans les champs ou en milieu forestier. Cependant, en raison de leur composition chimique variable et des spécificités de chaque sol, un agronome devrait toujours être consulté avant tout épandage de cendres. D'autres utilisations sont également possibles. Les cendres peuvent ainsi agir comme molluscicide pour les cultures maraîchères, comme matériau de construction pour les routes ou encore comme matériau de terrassement [21].

I-3-4-3-Un béton à partir de cendres provenant de la combustion de biomasse :

Des chercheurs de l'Université de Grenade sont arrivés à fabriquer un béton auto-compactant à partir de cendres provenant de la combustion en chaudière de pellets fabriqués avec des restes d'émondage d'olivier (Fig.I.38).

Ce genre de béton, de par sa plasticité et sa cohésion, ne requiert pas de compactage lors de son utilisation dans le bâtiment et présente d'énormes avantages par rapport aux bétons conventionnels, qui se traduisent en une considérable épargne temporelle et économique [22].

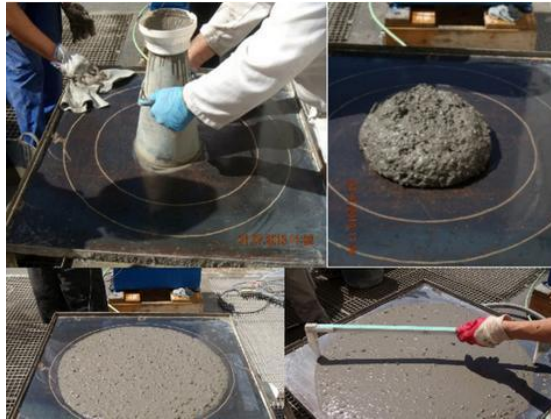


Fig.I.38. Le processus de fabrication du béton à base des restes d'émondage d'olivier

I-3-5-Farines animales :

I-3-5-1-Définition :

La **farine** est une poudre obtenue en broyant et en moulant des céréales ou d'autres produits alimentaires solides, souvent des graines. La farine issue de céréales contenant du gluten, comme le blé, est l'un des principaux éléments de l'alimentation de certains peuples du monde [23]. Elle est à la base de la fabrication des pains, des pâtes alimentaires, des crêpes, des pâtisseries et de plusieurs nourritures préparés.

Farine de blé, de sarrasin, d'épeautre, d'avoine, d'orge, de riz, de fève....ect



Fig.I.39. Deux types de farines végétales

Une **farine animale** est produite à partir de produits non consommables par les hommes et récoltée par la filière de l'élevage **animal** et de l'industrie de la pêche (**farines** de poissons et huiles de poissons).

Une **farine animale** est produite à partir de produits non consommables par les hommes et récoltée par la filière de l'élevage **animal** et de l'industrie de la pêche (**farines** de poissons et huiles de poissons).



Fig.I.40. Types de farines animales

I-3-5-2-La crise de la “vache folle” :

L'Europe a pourtant suffisamment souffert des dérives de l'élevage. Le scandale a éclaté dans les années 90, une crise sanitaire sans précédent ayant conduit à l'interdiction pure et simple des farines animales. Des milliers de vaches ont ainsi été contaminées par une maladie, l'**encéphalopathie spongiforme bovine** (ESB), et des troupeaux entiers ont été abattus. Cette maladie est une infection dégénérative du système nerveux central des bovins. C'est une maladie mortelle, La raison ? Les animaux étaient nourris avec des farines de viandes et d'os. Outre les animaux, les humains ont été touchés et ont ainsi développé la **maladie de Creutzfeld-Jacob**, dégénérative et à issue fatale [24].



Fig.I.41. Maladie de la vache folle

Les farines animales suite à ça, ont été exploitées dans le domaine du Génie-Civil.

I-3-5-3-Les différents types de farines animales :

- **Farine de viande** : Poudre obtenue par cuisson, dégraissage, stérilisation, broyage et tamisage de sous-produits d'animaux terrestres. Cette dénomination inclut à la fois les farines de viande et d'os (FVO) et les farines de viande au sens strict, moins riches en matières minérales que les FVO ; on la dénomme souvent « protéine animale transformée ».

- **Farine d'os** : Elle est produite avec des os (d'animaux terrestres) de seconde qualité. Les autres os peuvent préalablement être utilisés pour la fabrication de gélatine et/ou traités pour fabriquer du phosphate dicalcique ou de la poudre d'osséine; la farine est produite par chauffage, dégraissage, séchage, broyage et tamisage d'os d'animaux terrestres.
- **Farines de phanère** : Les cornes, sabots et ongles sont valorisés par exemple en engrais agricoles ou jardinerie pour leurs teneurs en soufre, azote et phosphore, ou utilisés dans la composition de farines de viandes (« Les grosses cornes de qualité servent à confectionner des peignes et des manches de couteaux »).
- **Farine de sang** : (sang frais et entier collecté auprès des abattoirs, coagulé et séché à la vapeur maintenant souvent dénommé « protéine animale transformée de sang »).
- **Farine de plumes** : (Plumes fraîches provenant d'abattoirs, traitées par hydrolyse thermique (décomposition chimique en présence d'eau sous pression), séchées et broyées).
- **Farine de poisson** :
- **Farine de creton** : le mot creton désigne les graisses (résidu de la fonte du suif, du lard gras ou d'autres graisses animales), mais quand on parle de farine de creton, il s'agit de « fractions protéiques récupérées lors de la fonte des gras de bovins, porcins ou volailles après extraction mécanique des graisses. Les cretons sont ensuite broyés et tamisés ».
- **Farines SPE** ; ce sont des farines produites à partir de déchets de transformation de sous-produits animaux relevant du Service public de l'équarrissage (animaux trouvés morts, saisies sanitaires) [25].

I-3-5-4-Utilisation des farines animales en Génie-Civil :

D'ordre général, dans le domaine du Génie-Civil, les farines animales, étaient exploitées dans l'industrie cimentaire.

En effet, suite à la crise d' l'**encéphalopathie spongiforme bovine** (ESB) dans les années 1990, la voie de la valorisation des farines animales dans l'alimentation des animaux a été restreinte puis interdite en Europe. Le fort pouvoir calorifique des farines animales donne à l'incinération une voie de valorisation intéressante en terme de récupération d'énergie et assure la destruction de tous les protéines dont le prion. Les cendres issues de cette incinération sont principalement composées de phosphates de calcium (hydroxyapatite etv whitlockite) connus pour immobiliser les métaux lourds dans l'eau et dans le sol.

Dans cet esprit, une étude menée à l'université de Toulouse [26] a exploré deux stratégies de valorisation :

-La valorisation des résidus d'incinération de farines animales, comme sous-produit, dans les matériaux cimentaires, donnant lieu à une étude des impacts technologiques et environnementaux des cendres sur les propriétés de la matrice.

-La valorisation des résidus d'incinération de farines animales comme matériau pour immobiliser le plomb et le cadmium (sous forme non biodisponible pour les organismes vivants), avec une application de ce piégeage dans les matériaux cimentaires.

D'autres recherches sont consacrées à la possibilité de valorisation des cendres de farines animales dans les matériaux à base cimentaire. Depuis avril 1997, les farines animales sont utilisées par exemple comme combustible pour alimenter les fours de la cimenterie Lafarge de Martres-Tolosane.

I-3-6-Verre recyclé :

I-3-6-1-Utilisation du verre dans différents secteurs d'activité :

Le verre a des vertus qui lui permettent désormais d'être utilisé dans d'autres voies que celles connues traditionnellement, c'est-à-dire celles qui consistent à le réemployer comme matière première pour la fabrication des mêmes produits que ceux dont il est issu. Ainsi, nombre de secteurs d'activité l'utilisent dans la fabrication de différents matériaux [27]. On note plus particulièrement une forte utilisation de déchets verriers qui sont recyclés ou réutilisés dans les secteurs suivants :

- construction/bâtiment/industrie
- électronique
- automobile
- art/décoration/loisir
- matière première
- contenant en verre
- optique



Fig.I.42. Forme et couleurs de verres recyclés

I-3-6-2-Utilisation des déchets verriers dans le secteur du bâtiment et de la construction :

On s'intéressera ici de façon plus précise au secteur "construction/bâtiment/industrie", dans lequel les déchets verriers sont désormais utilisés en grande quantité et déclinés en un nombre assez conséquent de produits.

*Les différentes applications possibles de recyclage et /ou valorisation de déchets verriers dans ce secteur d'activité sont :

A- Revêtement de route (ciment/béton/gravier)

Les déchets verriers y sont utilisés en tant qu'additifs : ils peuvent par exemple être intégrés sous forme de granulés à des matrices de béton ou de silicate destinés à la production de blocs de construction. Les blocs ainsi obtenus présentent des qualités d'isolation thermique et sonore élevées, une résistance accrue à l'écrasement et même des capacités ignifuges (se dit d'une substance qui rend difficilement inflammables les matériaux naturellement combustibles).

Le verre recyclé peut également servir dans des procédés visant à stabiliser des sols naturels et des terrains de sport, à mettre en place des sous-couches routières...

Le verre a ainsi des impacts écologique et économique significatifs, et les différents matériaux qui les intègrent offrent des produits de qualité supérieure : plus haute résistance aux chocs et aux variances de température, meilleure adhérence et meilleure imperméabilité.

B-Tuiles/dalles/carrelages

Les déchets verriers sont le constituant de base de ces produits. On note là aussi des avantages économiques et écologiques. Par ailleurs, le verre y est apprécié pour ses qualités esthétiques : aspect brillant, poli et coloré.

L'utilisation de verre recyclé confère (accorde) nombre de qualités aux produits : une meilleure imperméabilité, plus de résistance aux températures (chaud et froid), meilleure résistance aux chocs (rayures, écaillures, trous, impacts...), meilleure adhérence. L'incorporation de verre recyclé permet en outre une économie d'énergie certaine par rapport aux procédés n'en faisant pas usage.

C- Peintures

Les peintures intégrant du verre recyclé dans leur composition sont de deux types :

- Peintures utilisées pour les signalisations routières par incorporation de microbilles de verre : signalisation horizontale (peinture sur route), signalisation verticale (panneaux routiers) et vêtements de travail de nuit. En effet, les microbilles confèrent à la peinture un fort pouvoir réfléchissant qui permet aux automobilistes de la voir la nuit, à la lumière des phares.



Fig.I.43. Utilisation des peintures avec verre recyclé pour la signalisation routière

- Peintures acryliques modifiées renforcées avec du mica ou du verre recyclé. Ces peintures lient, réparent et revêtent le béton, la maçonnerie et les surfaces en stuc. Leur élasticité leur permet de se tendre sans se fendre lorsque les bâtiments bougent. Elles comblent les légères fissures de surface et préviennent ainsi les infiltrations d'eau, elles lissent les irrégularités de surface. Elles ne sont pas caustiques (surface enveloppe des rayons réfléchis d'un faisceau de lumière) et ne contiennent pas de matériaux dangereux.

D- Isolation :

Il s'agit principalement de mousse de verre et de fibres de verre utilisées en isolation.

La mousse de verre est un très bon isolant thermique et phonique, très résistant chimiquement, imputrescible (qui ne peut se putréfier, pourrir, se décomposer), résistant au feu et non absorbant. Très légère, elle peut être comparée à la pierre ponce ou au polystyrène, pour lesquels elle est une alternative. Elle peut également remplacer l'amiante.

L'isolation par la fibre de verre joue un rôle clé pour les économies d'énergie dans le bâtiment et l'industrie. Les fabricants de fibre de verre peuvent remplacer environ 50% de leur matière première par du verre recyclé.

La fibre de verre isolante est le deuxième plus grand marché pour le verre d'emballage recyclé [27].



Fig.I.44. Fibre de verre



Fig.I.45. Mousse de verre