

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par :

Aiache Nassima

Zouaoui Sarra

---

---

**Thème : matériaux innovants : propriétés et utilisation**

---

---

Sous la direction de : Benmalek ML

---

**Juin 2017**

---

---

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier grandement Monsieur Ben Malek pour sa grande disponibilité et ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier chaleureusement les membres du jury.

Je voudrais remercier aussi toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier du tout mon cœur mes parents ainsi que mon frère et mes amis pour m'avoir soutenue et encouragée tout le trajet de mes études. Je leur dédie ce mémoire.

**Je dédie ce mémoire aux personnes que j'ai les plus cher au monde, mes parents, sans eux je ne serai pas là**

**ZOUAOUI SARRA**

---

## Remerciements

Je tiens à remercier, mon promoteur Monsieur Ben Malek de m'avoir soutenue, encouragée et de s'être montré si disponible malgré son travail.

Je remercie aussi les enseignants de l'université 08 Mai 1945 de Guelma qui effectuent un travail énorme afin de créer des conditions favorables au déroulement de nos études. J'adresse aussi ces remerciements à mes anciens enseignants de l'université Abderrahmane Mira de Bejaïa.

Ces remerciements ne sauraient être complets sans une pensée aux membres du jury, qui m'accordent de l'attention et me consacrent de leur temps. Puissent-ils donc recevoir mes plus sincères remerciements.

## Dédicaces

Les moments d'éveil ou l'on se rend compte qu'un travail aussi petit soit-il n'a rien de personnel mais reviens à un entourage solide et encourageant.

Ainsi en témoignage de toute l'aide que j'ai reçu durant mon parcours je tiens à dédier ce travail à mon père Omar ma source d'énergie et d'idées qui a œuvré afin d'éveiller mon intérêt pour les sciences, à ma mère Hassiba qui a su m'envelopper de sa douceur durant les moments difficiles.

A mes deux frères Ahmed et Islem et à mes deux sœurs Amina et Nesrine pour leur soutien.

Je le dédie aussi à ma belle-famille : les Malek , Mon beau père et ma belle mère pour leur soutien et encouragement à leur tête mon mari Housseem pour avoir été un pilier pour moi durant ce travail.

Sans oublier mon fils Ilyes pour être ma source de bonheur quotidienne et mes nièces Aya, Iméne et Ryned.

A toute la famille Aiache et mes amis qui sont loin des yeux mais près du cœur; Liza, Lynda, Amira...

*Aiache Nassima*

---

## Liste des figures :

### Chapitre I

Figure I.1: Les huttes de la préhistoire-habitat nomade.....	02
Figure I.2: un abri plus sur -habitat sédentaire.....	03
Figure I.3 : résidences romaines.....	04
Figure I.4: la maison gauloise.....	04
Figure I.5:maisons paysannes.....	05
Figure I.6: habitation urbaine au moyen âge.....	05
Figure I.7: Château de Chambord.....	06
Figure I.8: habitations en vertical -monde contemporain.....	07
Figure I.9: habitations temps moderne.....	07

### Chapitre II

Figure II.1: Cannabis plante du chanvre .....	12
Figure II.2: Vues transversale et longitudinale .....	13
d'un granulats de chanvre	
Figure II.3: unité de transformation de l'entreprise .....	15
agro-chanvre, crédit photo pierre foulon	
Figure II.4 : Granulats obtenus par broyage des .....	16
tiges de chanvre et de tournesol	
Figure II.5 : Béton de chanvre et maison à ossature .....	16
bois et enveloppe en béton de chanvre	
Figure II.6 : les principales utilisations de béton de chanvre.....	18
Figure II.7 : Projection mécanique par machine sur une banche.....	19
Figure II.8 : déversement manuel entre deux banches.....	19
Figure II.9 : Isolation de sols en béton de chanvre .....	20
Figure II.10: isolation de toiture en béton de chanvre.....	20
Figure II.11: plante de <i>Linum usitatissimum</i> .....	25
Figure II.12 : Plante de <i>Cannabis sativa</i> .....	26
Figure II.13 : Les pailles de céréales.....	27
Figure II.14: paille de colza.....	28
Figure II.15 : plante de colza.....	28
Figure II.16: plante de lin oléagineux.....	29

---

Figure II.17 : Bloc de terre crue « Argio », Belgique.....	32
Figure II.18: Mur en pisé au Musée Source O Rama à Chaudfontaine, Belgique.....	32
Figure II.19: Façade en restauration en colombage et torchis.....	33
Figure II.20 : Un mélange « terre-paille ».....	34
en remplissage d'une ossature bois.	
Figure II.21 : des blocs de « terre-paille ».....	34
en remplissage d'une ossature.	
Figure II.22 : un enduit terre sur ballot de paille.....	35
qui peut même être préfabriqué sous forme de panneaux en atelier.	
Figure II.23 : Enduit de finition contenant des fibres de lin.....	35
Figure II.24: Panneaux d'argile Claytec.....	36
Figure II.25 : Produit Sol de finition à l'argile Argilus.....	36
Figure II.26 : la pouzzolane naturelle.....	54
Figure II.27 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane.....	56
Figure II.28 : composition chimique de la pouzzolane naturelle en %.....	57
<b><u>Chapitre III :</u></b>	
Figure III.1 : Principe de fonctionnement d'un MCP.....	62
Figure III.2: Schéma comparatif des inerties thermiques.....	62
en fonction de l'épaisseur et de la nature des matériaux	
Figure III.3: Microbilles de paraffine dans une plaque de plâtre.....	65
Figure III.4: Des microcapsules de MCP dans les plaques de plâtre.....	70
Figure III.5: L'enduit à base de MCP.....	70
Figure III.6: Bloc béton-MCP.....	71
Figure III.7: Principe du mécanisme de dégradation photocatalytique.....	75
Figure III.8: Schéma résumant les réactions au niveau du catalyseur.....	77
Figure III.9: phénomène dégradation des polluants sur les verres.....	80
Figure III.10: Pyramide de Louvre à Paris.....	81
Figure III.11: Stade cowboy stadium au Texas.....	82
Figure III.12: L'argile, résultat d'une désagrégation.....	84
Figure III.13 : Epuisement des ressources et .....	86
conséquences environnementaux	
Figure III.14: Schéma qui résume le processus.....	88
de fabrication d'un ciment portland.	
Figure III.15: La poudre d'argile durcit à température.....	89

---

ambiante grâce à une réaction moléculaire	
Figure III.16: Le tût de consommation des ressources ..... 91	91
naturelles HP2A/Ciment portland	
Figure III.17: HP2A réduit les émissions de CO <sub>2</sub> ..... 91	91
Figure III.18: Granulats utilisés pour formulation d'un béton..... 96	96
Figure III.19: Composition d'un béton ordinaire ..... 99	99
(BO) et d'un BAP Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BA	
Figure III.20: classification des sols selon leur affaissement..... 100	100
Figure III.21: Essai de la boîte en L..... 101	101
Figure III.22: Essai de stabilité au tamis..... 102	102
Figure III.23 : Exemples de mise en œuvre des BAP ..... 102	102
Figure III.24: Agence Rudy Ricciotti..... 103	103
Figure III.25: Les fibres métalliques..... 105	105
Figure III.26: Les fibres organiques..... 105	105
Figure III.27 : Les fibres minérales (fibres de verre)..... 106	106
Figure 28 : caractéristiques et familles des fibres..... 106	106
Figure III.29 : La fibre optique..... 114	114
Figure III.30: La fibre optique dans le béton..... 114	114
Figure III.31: Méthode de fabrication..... 115	115
Figure III.32 : Une grotte artificielle couvrant une..... 117	117
piscine en béton translucide en Allemagne.	
Figure III.33: Escaliers en béton translucide ..... 118	118
Figure III.34: Cloison en béton translucide..... 118	118
Figure III.35: Le pavillon italien de Shanghai ..... 118	118
Figure III.36: La photo catalyse sur un mur en béton..... 120	120
Figure III.37 : Bloc de béton et un mortier à base ..... 121	121
d'un ciment photo-catalytique.	
Figure III.38 : L'église du Jubilé à Rome..... 122	122
Figure III.39 : Hôtel de Police à Bordeaux..... 123	123
Figure III.40 : Un béton en coquillage ..... 123	123
Figure III.41: Une image qui montre le caractère drainant de ce béton..... 125	125
Figure III.42 : Pavés en coquillages..... 126	126

---

## Sommaire :

Remercîments	
Résumé	
Introduction général	
Chapitre I : pourquoi innover dans les matériaux de construction	
I.1.Introduction.....	1
I.2.Pourquoi innover dans les matériaux de la construction ? .....	1
Répondre aux demandes de plus en plus complexes des clien.....	1
limiter l'impact environnemental .....	1
Des solutions innovantes et compétitives .....	1
I.3.L'évolution des matériaux au cours des siècles .....	2
Préhistoire .....	2
Antiquité .....	3
Moyen âge .....	4
Le temps moderne.....	6
Le monde contemporain .....	7
I.4.Quel est le moteur de l'innovation ? .....	8
La recherche au service de l'innovation future .....	8
Chapitre II : Matériaux innovants pour l'éco-construction	
II.1 Introduction .....	9
Mais au fond, que sont les « matériaux écologiques » ? .....	9
Pourquoi l'éco-construction? .....	9
Les enjeux autour de l'éco-construction .....	10
L'objectif de l'éco-construction .....	10
II.2.Matériaux naturels et bio-sourcés .....	10
II.2.1.Définition des matériaux bio-sourcés.....	10
L'intérêt des matériaux biosourcés .....	11
II.2.2.Béton de chanvre .....	11
Béton et mortiers de chanvre .....	12
Le granulats chanvre.....	13
Les liants .....	13

---

II.2.2.1. Transformation de la plante aux matériaux de construction .....	14
II.2.2.2. Ou, pourquoi et comment utiliser le chanvre dans les travaux de construction et de rénovation ? .....	15
II.2.2.3. Réglementation incendie dans les erp (établissements recevant du public).....	16
II.2.2.4. Caractéristiques des bétons et mortiers de chanvre .....	16
Confort hydrique .....	16
Caractéristiques mécaniques.....	16
Absorption acoustique .....	17
Comportement au feu : réaction au feu .....	17
Impacts environnementaux .....	17
II.2.2.5. Les principales utilisations.....	18
Isolation de sols en béton de chanvre .....	19
Isolation de toiture en béton de chanvre .....	20
Éléments préfabriqués en béton de chanvre .....	20
II.2.2.6. Propriétés de béton de chanvre .....	21
II.2.2.7. Avantages et inconvénients de béton de chanvre .....	21
Avantages .....	21
Inconvénients.....	22
II.2.3. fibres et granulats végétaux .....	22
II.2.3.1. Qu'est-ce qu'une fibre végétale technique ?.....	23
Des morphologies pour des usages .....	24
Rendement matière (paille et fibres) .....	24
Périmètre Ressource.....	24
II.2.3.2. Quelques exemples sur les fibres et les granulats végétaux .....	25
Le Lin fibres.....	25
Le chanvre industriel.....	25
Les pailles de céréales .....	26
Les pailles de colza.....	27
Les pailles de lin oléagineux .....	28
II.2.3.3. Propriétés différenciantes des fibres végétales techniques.....	29
II.2.4. Maçonnerie en pierre ou en terre crue .....	30
II.2.4.1. La construction en terre crue : entre tradition et innovation ! .....	30
II.2.4.2. Les avantages de la terre crue .....	30
La terre a des avantages techniques .....	30



---

La construction en terre crue présente un bilan environnemental très intéressant .....	31
La terre dans la maison améliore le confort des habitants .....	31
La mise en œuvre de techniques de construction en terre nécessite .....	31
Toutefois de l'attention .....	31
II.2.4.3.Quels usages pour la terre crue ?.....	31
a) Pour le gros œuvre .....	31
Les blocs de terre crue sont moulés et compressés .....	31
Le pisé.....	32
Le torchis en colombage.....	32
b) Pour l'isolation.....	33
c) Pour les revêtements muraux, plafonds et sols .....	35
II.2.4.4.La construction en terre en Belgique.....	36
II.3.Granulats éco-liants alternatifs .....	37
II.3.1.Matériau alternatif .....	37
II.3.2. Liants organiques .....	37
II.3.2.1.Types des liants organiques.....	38
Liants noirs .....	38
a) Définition .....	38
b) Les différents types des produits noirs.....	38
Les goudrons .....	38
Les Bitumes .....	38
La structure chimique des bitumes.....	38
Les caractéristiques physico-chimiques des bitumes.....	39
Applications hydrauliques .....	39
L'asphalte .....	39
c) La différence entre le goudron et le bitume .....	39
Résines .....	40
a) Définition .....	40
Naturelles.....	40
Artificielles.....	40
II.3.3.Sous produits industriels et déchets.....	40
II.3.3.1.Définition des sous produits industriels et Déchets.....	41
II.3.3.2.Pourquoi valoriser .....	41

---

II.3.3.3.Origine de la production de sous produits industriels et déchets .....	42
II.3.3.4.Constitution chimique du déchet .....	42
II.3.3.5.Différents types de déchets .....	43
Déchets ultimes .....	43
Déchets inertes .....	43
Déchets assimilés .....	43
Déchets verts .....	43
Déchets organiques.....	43
Déchets industriels banals (DIB) .....	44
Déchets dangereux .....	44
a) Déchets industriels spéciaux (DIS).....	44
b) Déchets ménagers spéciaux (DMS).....	44
II.3.3.6.Recyclage des déchets .....	44
a) Définition .....	44
b) Déchets de la construction/démolition .....	45
c) Impact du recyclage dans l'industrie : Source d'approvisionnement alternative .....	46
d) Conséquences sur les produits issus du recyclage .....	46
e) Impacts du recyclage sur l'environnement .....	47
II.3.3.7.Déchets utilisés comme granulats du béton.....	47
a. Laitiers.....	47
a.1. Laitier de haut fourneau .....	47
a.2 .Laitier d'acier.....	48
b . Sous-produits provenant des centrales thermiques.....	48
b.1. Mâchefer .....	48
b.2 .Scories .....	49
b.3.Cendres volantes .....	49
c .Béton récupéré .....	49
d. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières .....	50
e. Déchets divers .....	50
e.1.Déchets de mines de charbon .....	50
e.2.Verre de récupération .....	51
e.3.Pneus usages .....	51
e.4.Résidus d'incinérateurs.....	52
e.5. Boues rouges .....	52

e.6. Argile cuite.....	52
e.7. Sciure de bois .....	52
II.3.3.8. Principaux avantages et inconvénients de sous produits industriels et déchets .....	53
Les avantages .....	53
Les inconvénients .....	53
II.3.4. Pouzzolanes naturelles et artificielles .....	54
II.3.4.1. Définition de la pouzzolane .....	54
II.3.4.2. Types de pouzzolanes .....	54
Pouzzolanes naturelles.....	55
Verre volcanique.....	55
volcaniques compacts.....	55
Pouzzolanes artificielles.....	55
Cendres volantes.....	55
Laitier granulé de haut fourneau (LGHF).....	55
Argiles calcinées.....	56
Fumée de silice .....	56
II.3.4.3. Caractéristiques de la pouzzolane.....	56
Physiques.....	56
Chimiques.....	57
II.3.4.4. L'utilisation de la pouzzolane .....	57
En jardinerie .....	57
Sur les routes .....	58
En construction .....	58
II.3.4.5. Les avantages multiples de l'utilisation de la pouzzolane .....	58
II.3.4.6. Cas de l'excès de pouzzolane .....	59
II.4. Conclusion .....	59
Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités	
III.1. Introduction.....	60
III.2. Les matériaux à changement de phase.....	61
III.2.1. Introduction .....	61
III.2.2. Généralités sur les matériaux a changement de phase .....	61
III.2.2.1. Définition .....	61
III.2.2.2. Historique et évolution .....	63

III.2.2.3. Différents types de MCP.....	63
a- MCP inorganiques.....	63
b-MCP organiques.....	64
c-MCP eutectiques.....	64
Les paraffines.....	64
Les sels hydratés.....	66
III.2.3. Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage.....	66
thermique	
III.2.3.1. L'incorporation directe.....	66
III.2.3.2. L'immersion.....	67
III.2.3.3. L'encapsulation.....	67
La micro-encapsulation.....	67
La macro-encapsulation.....	68
III.2.4. Différentes utilisation des MCP dans le bâtiment.....	68
III.2.4.1. Utilisation passive des MCP en bâtiment .....	68
III.2.4.1.a. Intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment.....	69
les plaques de plâtres-MCP.....	69
Les enduits à base de	70
MCP.....	
Les blocs de béton-MCP .....	70
Les MCP dans les fenêtres.....	71
Les MCP dans le plafond et dans le plancher.....	71
III.2.4.2. Utilisation active des MCP en bâtiment .....	72
a -assistance au rafraichissement des bâtiments	72
b-Assistance au chauffage des.....	73
bâtiment.....	
III.3. Matériaux autonettoyant.....	73
III.3.1. Introduction.....	73
III.3.2. Pourquoi la photo catalyse ? .....	74
III.3.3. Les caractéristiques de toute photocatalyse sont les suivantes : .....	74
III.3.4. Quel est le photo catalyseur qui permet de réduire les impacts de la pollution atmosphérique ?	75
III.3.5. la photocatalyse UV/ TiO2 .....	76

III.3.5.1. Principe .....	77
III.3.6. Dans quels matériaux peut-on trouver ce photocatalyseur? .....	79
III.3.7. Les avantages des du revêtement photo catalytique sur les verres : .....	80
III.3.8. Domaine d'utilisations et quelques réalisations : .....	81
III.4. Une nouvelle formulation pour un matériau audacieux , le HP2A.....	82
III.4.1. Introduction.....	82
III.4.2. Le HP2A répond aux besoins actuels et futurs .....	82
III.4.3. L'argile, un matériau d'hier et de demain .....	84
a)-Qu'est ce qu'une argile ? .....	84
b)-Où la trouve- t-on? .....	84
III.4.3.1. HP2A et Argile.....	85
III.4.4. L'empreinte écologique des liants HP2A répond aux besoins et aux attentes actuels	85
III.4.5. Comparaison technologique ciment portland /HP2A .....	86
1-Ciment portland.....	86
2-Le HP2A .....	88
III.4.6. Avantages techniques face au ciment portland. ....	89
III.4.7. Un enjeu économique mondial.....	91
Le sable marin est surexploité .....	92
Le HP2A, un liant multi-granulats.....	93
III.5. Les nouveaux bétons.....	93
III.5.1. Introduction.....	93
III.5.2. Présentation du béton classique.....	94
a- Définition et histoire.....	94
b-Quelle est la différence entre le béton et le mortier? .....	94
c- Les composants du béton .....	94
III.5.3. Béton Auto-plaçant.....	97
III.5.3.A. Définition.....	97
III.5.3.B. Histoire des BAP.....	97
III.5.3.C. Propriétés des BAP .....	98
III.5.3.D. Formulation des bétons autoplaçants.....	98
III.5.3.E. Contrôle des Bétons Auto -plaçant.....	100
La mesure d'étalement au cône d'Abrams.....	100
L'essai de la boîte en L, écoulement en milieu confi.....	101

L'essai de stabilité au tam.....	101
III.5.3.F. Avantages des caractéristiques du BAP.....	102
III.5.4. Les bétons fibrés à ultra hautes performances .....	104
III.5.4.A. Définition.....	104
• Les fibres métalliques.....	104
• Les fibres organiques: .....	105
• Les fibres minérales.....	105
Familles des fibres et leur caractéristiques .....	106
Le rôle des fibres: .....	106
III.5.4.B. Principe de formulation des BFUP.....	107
III.5.4.C. Domaines d'applications potentiels des BFUP.....	109
III.5.4.D. Microstructure des BFUP et potentiel de cicatrisation.....	109
Avantages et inconvénients du BFHP.....	110
III.5.4.E. Le béton fibré peut être une alternative au béton armé.....	111
Quelques exemples d'ouvrages construits en béton de fibres .....	111
III.5.5. Béton translucide.....	111
III.5.5.A. Introduction.....	111
III.5.5.B. Définition.....	112
III.5.5.C. Histoire d'un béton de nouvelle génération .....	112
III.5.5.D. Béton translucide en fibres optiques.....	113
Fibre optique.....	113
La fibre optique dans le béton.....	114
Principe.....	115
Méthode de fabrication.....	115
III.5.5.E. Béton translucide avec résine polymère.....	116
Principe.....	116
Le béton avec résine polymère est jugé .....	117
Avantages du béton translucide.....	117
Domaines d'utilisations et exemples d'applications.....	117
III.5.6. Béton autonettoyant.....	119
III.5.6.A. Introduction.....	119
III.5.6.B. Définition.....	119
III.5.6.C. Création du ciment à effet photo-catalytique.....	119

---

III.5.6.D. Particularité.....	120
Domaines d'utilisations et exemples d'applications .....	121
III.5.7. Béton fabriqué à partir de coquillage.....	123
III.5.7.A. Introduction.....	123
III.5.7.B. Définition.....	123
III.5.7.C. Histoire d'un béton qui lutte contre l'appauvrissement des sols.....	124
III.5.7.E. Domaine d'utilisation.....	125

Conclusion général

---

## Résumé

La communauté scientifique spécialisée dans les matériaux de construction ne cesse d'améliorer ses technologies afin de percer le secret de plusieurs matériaux méconnus et d'améliorer les plus renommés d'entre eux. Ainsi chaque année un lot de connaissances innovantes, ambitieuses, prometteuses et intelligentes viennent améliorer ces technologies d'un point de vue écologique et économique mais aussi du côté du design et de la résistance afin de nous octroyer un meilleur cadre de vie.

Le travail présenté vise à une meilleure compréhension de certains matériaux innovants précisément leurs caractéristiques particulières et leurs domaines d'application. Ces matériaux innovants sont d'une source biologique du fait que notre monde regorge de matériaux prodigieux tels que terre crue, chanvre et pouzzolanes. Cette recherche est consacrée aussi à l'étude de matériaux à fonctionnalités nouvelles ; matériaux à changement de phase, matériaux autonettoyants. D'autre part à des matériaux existants avec de nouvelles formulations tels que les nouvelles améliorations apportés au matériau béton à l'échelle microscopique, des fibres optiques et des résine qui lui confèrent l'aspect translucide ou bien d'un ajout cimentaire  $TiO_2$  qui le rend auto nettoyant jusqu'au coquillage pour un effet drainant.

**Mots clefs:** technologie, matériaux innovants, caractéristiques, fonctionnalités nouvelles



---

## **Abstract :**

The scientific community specialized in building's materials, continually improving these technologies.

In order to break through the secret of several unknown materials and improve the most renowned of them. Thus every year a batch of knowledge innovative, ambitious, promising and intelligent come up improve these technologies from an ecological and economic point of view, but also from the design side and from the resistance in order to give us a better living environment.

The work presented aims of a better understanding of some materials innovative precisely their characteristic feature and their field of application, these innovative materials are from a biological source of the fact that our world is full of prodigious materials that raw earth, hemp and pozzolanes.

This research is also devoted to the study newly functioning materials and existing materials with new formulations such as improvements to concrete materials on a microscopic, despotoc and resins which gives it a translucent appearance or a  $\text{TIO}_2$  cement additive that makes it self-cleaning.

Keywords : Technology, Innovative materials, characteristics, new features.

## ملخص

يوصل المجتمع المتخصص في مجال مواد البناء التحسين من هذه التقنيات للكشف عن سر العديد من المواد غير المعروفة و تطوير الاكثر شهرة بينها.

كذلك كل عام الكثير من المعارف المبتكرة تسعى لتطوير هذه التقنيات من وجهه نظر بيئيه و اقتصاديه و ايضا من جانب التصميم و المقاومة لتحقيق لذ

يهدف هذا العمل الى الفهم الافضل لبعض المواد المبتكرة بالتحديد خصائصها و مجالات استخدامها.

هذه المواد المبتكرة ذات اصل بيولوجي في حين ان عالمنا مليء بالمواد ذات الخصائص المميزة منها

و يخصص هذا ابحت لدراسة المواد من ميزات متطورة مثال التحسينات الجديدة التي ادخلت على المواد الخرسانية على النطاق المجهرى.

---

## Introduction générale

L'homme d'autrefois se contentait d'un abri simple qui assure son intimité et le protège des intempéries et pour bâtir cette demeure l'ancien n'avait d'autre choix que d'utiliser les ressources locales comme matériaux de construction, peaux d'animaux, bois, argile... De cette pratique est née la diversité de nos styles régionaux et de l'habitat traditionnel.

Aujourd'hui, les matériaux de construction conjuguent innovation et tradition, du temps des huttes au gratte-ciel l'architecture a considérablement évolué autant de ces formes et fonctions, que dans les technologies de construction pour proposer des maisons plus belles esthétiquement, confortables, saines et économiques. Elle obéit ainsi à l'apparition de nouveaux besoins et profite de l'avancée spectaculaire des techniques et matériaux de construction.

Chaque année apporte son lot de nouveautés et d'améliorations dans le secteur de la construction, bâtiment, travaux publics, nouveaux produits, nouveaux matériaux; la construction se tourne vers le futur. Mais d'autre part les besoins en infrastructure ne cessent d'augmenter et notre planète la terre est mise à forte contribution, croissance démographique, réchauffement climatique, épuisement des ressources naturelles ... La limite est proche.

L'homme moderne non rassasié a commencé à comprendre. S'il veut préserver sa vie et son environnement sur terre, il doit s'adapter, faire face aux catastrophes qui lui sont propres ou naturelles et prouver de nouvelles façons de produire en respectant mère nature.

Les piliers de l'innovation dans les matériaux de construction sont: écologie, économie, résistance, esthétique, confort luxueux. Ces derniers visent l'obtention d'une ville propre, saine, avec un coût et temps réduits.

L'objectif de cette présente recherche est de se familiariser avec certains matériaux innovants et avoir une idée sur le monde de la recherche et leurs évolutions. Notre travail est présenté en trois chapitres comme suit:

Le premier chapitre consiste à comprendre le besoin d'innover dans les matériaux et leurs évolutions au cours des siècles ainsi le moteur qui booste de plus en plus cette évolution

Le deuxième chapitre regroupe des matériaux prodigieux biosourcés tels chanvre, fibres et granulats végétaux, pouzzolanes ... afin d'arriver à des constructions écologiques.

---

---

Le troisième chapitre s'est penché vers des matériaux innovants à fonctionnalités nouvelles tels les matériaux à changement de phase, autonettoyants. en plus des nouvelles formulations du matériau béton qui à considérablement évolué.

Une conclusion générale clôture ce mémoire en constatant l'absence de l'Algérie dans le monde des recherches et innovations. en effet l'Algérie a toujours eu recours à une main d'œuvre étrangère pour les œuvres d'art.

---

**Chapitre I :**  
**Pourquoi innover**  
**dans les matériaux de**  
**construction ?**

## **I.1.Introduction:**

Les matériaux de construction, en apparence sont des matériaux simples mais sont en réalité très complexes, avec des milliers d'applications et de formulations différentes. Ces dernières années ont vu une révolution dans le domaine des matériaux de construction avec l'apparition des matériaux innovants pour l'éco-construction, nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités, plus ductiles, plus durables, plus résistants, et autres matériaux qui améliorent considérablement l'esthétique et la mise en œuvre sur chantier. Ces innovations n'auraient pu voir le jour sans un important travail de recherche, qui a permis de développer une connaissance à l'échelle nanométrique des mécanismes de comportement de ces matériaux.

## **I.2.Pourquoi innover dans les matériaux de la construction ?**

### **- Répondre aux demandes de plus en plus complexes des clients :**

Ces matériaux aux qualités exceptionnelles répondent aux demandes de plus en plus complexes des architectes, bureaux d'études, maîtres d'œuvre et constructeurs. Ceux qui conçoivent et construisent avec les matériaux cherchent à faire des structures plus légères, des formes plus sophistiquées, à mettre en œuvre des matériaux plus esthétiques. Ils recherchent des matériaux plus durables, plus résistants, avec des performances thermiques et acoustiques accrues.

### **- Limiter l'impact environnemental :**

Le secteur du bâtiment est à l'origine de 40% des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Il faut donc trouver de nouvelles solutions pour réduire l'empreinte écologique des bâtiments. Cela passe évidemment par une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production des matériaux de construction. Des chercheurs et des ingénieurs du domaine y travaillent déjà depuis plusieurs années, avec notamment un engagement volontaire de réduire ses émissions mondiales de 20% par tonne de ciment entre 1990 et 2010.

Mais environ 80% des émissions de CO<sub>2</sub> d'un bâtiment viennent de son exploitation tout au long de sa durée de vie. Il est donc nécessaire de repenser les systèmes constructifs pour concevoir des bâtiments moins consommateurs d'énergie.

### **- Des solutions innovantes et compétitives :**

Les équipes apportent aux opérations des expertises pointues qui participent quotidiennement à la maîtrise des risques techniques et à la valorisation des ouvrages. Elles travaillent

## *Chapitre I: pourquoi innover dans les matériaux de construction?*

également en interface avec les scientifiques et les équipes commerciales afin de mettre au point des solutions à la fois innovantes et compétitives dans quatre domaines clés : les matériaux, la construction numérique, la construction durable et les énergies.

La construction numérique Source de précieux gains de temps et d'efficacité, les outils numériques sont porteurs de nombreuses innovations pour bâtir des ouvrages répondant aux critères de performance durable. Et comme un exemple : VINCI Construction France compte parmi les entreprises pionnières dans cette mutation technologique et industrielle. [1]

### **I.3.L'évolution des matériaux au cours des siècles**

préhistoire ⇔ Antiquité ⇔ Moyen âge ⇔ temps moderne ⇔ monde contemporain

❖ **Préhistoire:** il y a environ 3 ou 5 (millions d'années)

Au début de la préhistoire, les hommes étaient nomades.

Ils se déplaçaient en fonction des saisons, des migrations du gibier. Il s'abrite à l'entrée des grottes ou habite des huttes.

\* matériaux utilisés:

- ✓ branchages,
- ✓ ossements et peaux d'animaux .

\* besoin :

- ✓ Un abri vite installé pour se protéger des intempéries et des animaux sauvages.



Figure I.1: Les huttes de la préhistoire-habitat nomade-

puis Il y a environ 12 000 ans, l'Homme devient sédentaire; il invente l'élevage et l'agriculture. N'ayant plus besoin de se déplacer pour trouver sa nourriture il se regroupe et habite des villages aux maisons rondes. L'intérieur de la maison est très sombre car il n'y a pas de fenêtres. Un feu installé au centre de la pièce éclaire l'intérieur autant qu'il la réchauffe.

\* matériaux utilisés:

## *Chapitre I: pourquoi innover dans les matériaux de construction?*

---

- ✓ bois, terre, feuillage.

\*besoin:

- ✓ Un abri durable (qui dure dans le temps) et Se regrouper (village)



Figure I.2: un abri plus sur -habitat sédentaire-

❖ **Antiquité:** (3500 av. J.-C., 3000 av. J.-C.)

L'évolution de l'habitat est forte dans certains pays qui bordent la Méditerranée (Egypte, Mésopotamie). Les maisons deviennent carrées et sont disposées les unes contre les autres pour former des rues. C'est la naissance des villes.

La maison romaine :

A la campagne comme en ville, les maisons des riches sont vastes et confortables. Elles ont plusieurs pièces (thermes, wc) disposées autour d'espaces à ciel ouvert . Des techniques améliorant le confort sont inventées (chauffage par le sol ou hypocauste).

\* matériaux utilisés:

- ✓ pierre, brique, tuile ,marbres, fresques, mosaïque.

\* besoin:

- ✓ Loger beaucoup d'habitants en un même lieu.
- ✓ Améliorer grandement le confort grâce aux évolutions techniques



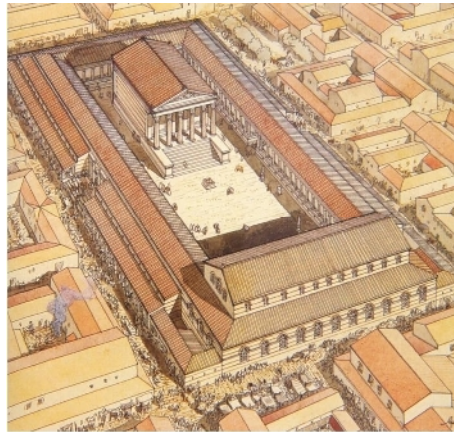


Figure I.3 : résidences romaines

A la même époque, en gaule l'évolution de l'habitat est moindre. La maison gauloise est faite de matériaux disponibles à proximité .

\* matériaux utilisés:

- ✓ Structure et charpente en bois,
- ✓ murs en torchis,
- ✓ toit de paille qui descend presque jusqu'au sol.

Hommes et bêtes vivent ensemble (pour avoir chaud), un grenier protège les récoltes de l'humidité et des prédateurs et offre parfois un lieu plus chaud pour dormir.



Figure I.4: la maison gauloise

### ❖ Moyen âge : (du V<sup>e</sup> siècle au XV<sup>e</sup> siècle)

première forme du château fort probablement apparue à la fin du IX<sup>e</sup> siècle, la motte, souvent artificielle, est surmontée d'une tour carrée en bois, ayant comme principal rôle la défense du territoire. En contrebas de cette tour ou donjon se trouve la basse-cour...

L'habitation paysanne :

La structure de la maison est en bois, complétée de torchis, avec un toit en chaume. Chez les plus riches un soubassement en pierre protège bois et torchis de l'humidité.

## Chapitre I: pourquoi innover dans les matériaux de construction?

Les ouvertures sont peu nombreuses et étroites, il n'y a pas de vitres, mais des volets.



Reconstitution d'une maison paysanne du XI<sup>e</sup> siècle.  
Charavines dans l'Isère ( extrait du manuel Nathan 2003 p.94)

Figure I.5:maisons paysannes

L'habitat urbain :

Dans les villes les maisons sont étroites et bâties en hauteur pour gagner de la place. **La pierre** est au début du Moyen âge réservée aux édifices publics, religieux et à quelques maisons de «riche». Chaque étage déborde au-dessus de l'étage inférieur, selon la technique de l'encorbellement. Cette technique permet de gagner quelques mètres carrés de surface habitable supplémentaire à chaque niveau, de protéger les façades à pans de bois de la pluie...

La maison se composait d'un rez-de-chaussée en pierre de taille, et de poutres de **bois**, avec **une charpente** de poteaux de bois dite à *colombage*. Les interstices étaient comblés soit avec des moellons recouverts de **plâtre**, des **briques** jointées ou encore du torchis. Le rez-de-chaussée de l'immeuble est occupé par un artisan ou un commerçant. Les vitres (croisillons de petits vitraux aux fenêtres, sont réservées aux églises, palais et maisons de riches. seuls les riches peuvent s'offrir maison individuelle, en pierre, bien meublée et décorée, mais sans réel confort.



Figure I.6: habitation urbaine au moyen âge

## *Chapitre I: pourquoi innover dans les matériaux de construction?*

---

### ❖ **Le temps moderne: La renaissance** ( XIII<sup>e</sup> et XIV<sup>e</sup> siècles)

Au XVI<sup>e</sup> siècle l'architecture Renaissance venue d'Italie se propage en Europe. Les châteaux perdent leur fonction militaire pour n'être plus que résidences d'agrément et de prestige. Les riches demeures rappellent l'architecture romaine l'antiquité par leur formes, leurs colonnes, leurs proportions. Les façades sont symétriques et pourvues de fenêtres en verre. A partir du XVIII<sup>e</sup> L'habitat évolue lentement, mais avec un décalage : d'abord dans les villes, d'abord chez les riches ! On construit davantage en dur . Les vitres se généralisent, le mobilier est plus diversifié, il y a encore peu de confort. Les équipements sanitaires quasi-inexistants (même chez les riches, le cabinet d'aisance à l'intérieur de la maison est exceptionnel).

Grace à la révolution industrielle et la maîtrise de **l'acier** et **ciment** de nouveaux matériaux vont participer à l'évolution des bâtiments .

\* matériaux utilisés :

- ✓ verre, tuiles, ciment , acier , briques

\* besoin:

- ✓ Bâtir des bâtiments plus importants avec plus de confort.
- ✓ Montrer son pouvoir, sa richesse...
- ✓ Suivre la mode de l'époque influencée par l'architecture Renaissance venue d'Italie



Figure I.7: Château de Chambord

### ❖ **Le monde contemporain:**

## *Chapitre I: pourquoi innover dans les matériaux de construction?*

Le XXe siècle est marqué par l'**exode rural** et le **développement** de la **ville**. Pour faire face au manque de place on construit à la **verticale** des **immeubles** avec des matériaux nouveaux et un temps réduit. Les immeubles construits en béton forment de nouvelles cités. Les progrès sont nombreux au niveau du **confort** domestique ( **eau courante, gaz** ou **électricité, WC**), avec décalage entre villes et campagne.

\* matériaux utilisés:

- ✓ béton, acier, verre, aluminium,

\* besoin:

- ✓ Loger rapidement et en grand nombre des milliers de familles en périphéries les villes
- ✓ Améliorer le confort, viser la modernité



Figure I.8: habitations en vertical -monde contemporain-

Aujourd'hui, nous protégeons notre environnement en construisant avec des matériaux sains. Des villes esthétiquement belles et écologiques.



figure I.9: habitations temps moderne

### **I.4. Quel est le moteur de l'innovation ?**

Les nouvelles technologies et l'évolution des marchés et des réglementations ont toujours affecté l'industrie de la construction, mais elles peuvent également fournir une raison aux entreprises de construction d'innover. Dans les cas où les spécifications et législations favorisent l'adoption de nouvelles technologies, le processus réglementaire facilite l'innovation. Les évolutions perpétuelles de l'environnement peuvent également créer des nouvelles opportunités de marché, pour preuve la tendance mondiale à considérer les impacts environnementaux.

#### **- La recherche au service de l'innovation future**

La recherche est très généralement à l'amont du processus qui conduit à la mise au point et à la concrétisation d'une innovation dans la réalisation d'un ouvrage.

Cette recherche peut avoir pour objectif de valider une solution technique innovante permettant de répondre à un défi venant d'une situation non courante ; mais plus généralement, elle a vocation à élargir la gamme des solutions techniques d'usage courant en améliorant leurs performances (techniques, économiques, environnementales, ...).

L'innovation s'inscrit aujourd'hui dans une politique globale de développement durable.

Les thématiques porteuses d'innovation concernent généralement :

- L'amélioration des performances des matériaux
- L'amélioration de la connaissance du comportement des structures, grâce notamment à la modélisation numérique
- L'amélioration des procédés de construction
- L'adaptation des procédés de fabrication aux nouvelles exigences environnementales ou du développement durable (économies d'énergie et de ressources non renouvelables, limitation des émissions).

**L'innovation une obligation pour préparer l'avenir. satisfaire les demandes émergentes et se différencier de la concurrence.**

**Chapitre II :**  
**Matériaux innovants**  
**pour l'éco-**  
**construction**

### **II.1 Introduction**

Un éco matériau dit « *matériau écologique* » ou « *matériau biosourcé* » et parfois aussi qualifié de « matériau sain ») est un matériau de construction qui répond aux critères techniques habituellement exigés des matériaux de construction : performances techniques et fonctionnelles, qualité architecturales, durabilité, sécurité, facilité d'entretien, résistance au feu, à la chaleur, etc);mais aussi à des critères environnementaux ou socio-environnementaux, tout au long de son cycle de vie (c'est-à-dire de sa production à son élimination ou recyclage) ;Ces matériaux répondent aux critères et principes du développement durable.[5]

#### **Mais au fond, que sont les « matériaux écologiques » ?**

« Ecologiques », « naturels », « bio-construction », « sains », les qualificatifs pour caractériser ces matériaux ne manquent pas. On peut cependant dire que leurs caractéristiques convergent vers la minimisation des impacts sur la santé et l'environnement. Et ce tout au long du processus de leur fabrication, à leur élimination, en passant par leur utilisation. [6]

#### **Pourquoi l'éco-construction?**

« Eco-construire » équivaut aujourd'hui à atteindre une haute performance qui correspond à la demande du marché. Les différents pays ont développés les systèmes et les critères différents pour mettre en valeur le concept. Ecologiquement, elle correspond au besoin à la tendance du développement durable qui impact l'environnement, la préservation des ressources énergétiques (les matières premières, l'eau par exemple), la lutte contre le changement climatique, la réduction des déchets et de la pollution, la qualité de l'air intérieur et extérieur. Economiquement, l'éco-construction permet les investisseurs de contrôler le coût de construction, les constructeurs bénéficient de la réduction des impôts du sellons les pays. Pour le publique, les occupants cherchent le confort (acoustique, visuel), la qualité environnementale et le sanitaire des produits de construction. [7]

Les matériaux écologiques viseront par exemple à respecter les critères suivants :

- ✓ Minimiser l'énergie nécessaire à la fabrication et présenter un écobilan favorable
- ✓ réduire les émanations de composés organiques volatils issus des solvants des colles et peintures;
- ✓ utiliser un maximum d'ingrédients ou de composants d'origine naturelle ;
- ✓ améliorer les propriétés thermiques et réduire les consommations d'énergie ;

## **Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction**

---

- ✓ améliorer les propriétés acoustiques et hygrométriques des parois ;
- ✓ réduire l'utilisation de produits pétrochimiques ;
- ✓ réduire l'utilisation de substances nocives ;
- ✓ réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à la production ;

Tout ceci afin de limiter notre impact sur l'environnement et de créer une atmosphère intérieure saine. [6]

### **Les enjeux autour de l'éco-construction**

- ✓ L'innovation et sa maîtrise par les différents acteurs ;
- ✓ L'émergence de nouveaux critères qualité ;
- ✓ L'accès à un habitat de qualité ;
- ✓ La maîtrise des coûts globaux (investissement + fonctionnement) ;
- ✓ Le développement des cohérences entre habitat et urbanisme.

### **L'objectif de l'éco-construction**

- ✓ La durabilité ;
- ✓ La réduction des émissions de gaz à effet de serre tant pour la construction que pour l'exploitation ;
- ✓ La diminution de la proportion de matières premières non renouvelables Des espaces de vies qui intègrent des espaces communs (locaux, espaces de jeux et loisirs, espaces verts .....). [8]

Au rayon « construction » Parmi les nouveautés :

## **II.2. Matériaux naturels et bio-sourcés**

### **II.2.1. Définition des matériaux bio-sourcés**

Les matériaux biosourcés sont, par définition, des matériaux issus de la biomasse d'origine végétale ou animale.

Ils couvrent aujourd'hui une large gamme de produits et trouvent de multiples applications dans le domaine du bâtiment et de la construction, en tant qu'isolants (laines de fibres végétales ou animales, de textile recyclé, ouate de cellulose, chènevotte, anas, bottes de paille, etc.), mortiers et bétons (béton de chanvre, de bois, de lin, etc.), panneaux (particules ou fibres



## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

végétales, paille compressée, etc.), matériaux composites plastiques (matrices, renforts, charges) ou encore dans la chimie du bâtiment (colles, adjuvants, peintures, etc.).[9] La spécificité des matériaux bio-sourcés, produits localement (cycle court) ou en faible quantité rend difficile et parfois impossible la certification. Il faut donc décliner des référentiels tels que les règles professionnelles de la paille ou du chanvre, afin de permettre une utilisation normée, mais il reste encore à développer d'autres outils pour faciliter l'emploi et l'assurabilité de ces matériaux.

### **L'intérêt des matériaux biosourcés**

L'intérêt des matériaux biosourcés tant d'un point de vue environnemental (stockage de carbone, renouvelabilité de la matière première, faibles besoins en énergie grise non renouvelable) que d'un point de vue économique, en contribuant au maintien, voire à la création, d'emplois non délocalisables et de valeur ajoutée dans les territoires n'est plus à démontrer.

Les matériaux de construction biosourcés doivent répondre, comme tout matériau de construction, aux exigences réglementaires de la construction et aux exigences de qualité attendues par les acteurs de la construction. Les fabricants doivent ainsi être en mesure de garantir les propriétés des matériaux, de définir les règles de mise en œuvre et de s'engager dans une démarche qualité. L'évaluation technique est à la base de cette démarche et peut prendre différentes formes (Pass'Innovation, Avis Techniques, certification, etc.). [10]

### **II.2.2.Béton de chanvre**

Le béton de chanvre est réputé pour ses caractéristiques robustes. Il n'est utilisé que depuis les années 1980, contrairement à d'autres matériaux naturels (bois, terre crue...).

Une fois récoltée, la filasse du chanvre est séparée de la structure rigide de la tige (chènevotte). Grâce à son faible coût de fabrication et à ses qualités dans le domaine de l'isolation, le chanvre est de plus en plus utilisé dans l'éco-construction. En effet, sa production ne nécessite ni cuisson, ni extraction. De plus le chanvre n'a pas besoin de beaucoup d'eau pour pousser.

Ainsi, il répond à des qualités techniques, environnementales et économiques. Les bétons sont obtenus en mélangeant trois produits : de l'eau, un liant (chaux aérienne exclusivement) et

## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

des granulats de chanvre (chènevotte). Les blocs sont fabriqués par moulage à froid. Le séchage s'effectue à l'air libre. [11]



Figure II.1: Cannabis plante du chanvre

### **BETON ET MORTIERS DE CHANVRE**

Utilisés depuis plus de 20 ans dans la construction, les bétons et mortiers de chanvre sont des conglomérats constitués d'un granulat végétal issu de la plante de chanvre et d'un liant minéral. Il s'agit d'un matériau ayant des caractéristiques spécifiques lui permettant de répondre aux enjeux et aux exigences actuelles et futures de la construction.

Les caractéristiques microstructurales de ces bétons, notamment leur importante porosité (environ 80 % en volume), leur confèrent des propriétés thermiques, acoustiques et mécaniques particulières.

Il est aujourd'hui possible d'adapter et de dimensionner les propriétés des bétons et mortiers de chanvre par le choix des matières premières (liant et granulat) et des dosages de ces matières premières afin qu'ils assurent des fonctions spécifiques de haut niveau telles que l'isolation thermique, la régulation hygrothermique ou encore l'absorption acoustique. Par conséquent, les bétons de chanvre vont jouer un rôle clé dans le confort intérieur des bâtiments.

Les bétons et mortiers sont aujourd'hui principalement utilisés pour réaliser, en travaux neufs ou en rénovation :

- ✓ Des murs et des doublages de murs ;
- ✓ Des isolations de sol ;
- ✓ Des isolations de toiture ;
- ✓ Des enduits.

### **LE GRANULAT CHANVRE**

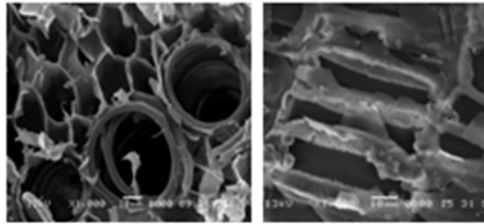


Figure II.2: Vues transversale et longitudinale d'un granulats de chanvre

Le granulats chanvre est issu de la transformation de la paille de chanvre. Il est principalement constitué de particules de chènevotte (partie interne de la tige de la plante de chanvre), de fibres (partie externe de la tige) et de poussières ou fines.

Sur le plan chimique, la chènevotte et les fibres sont constituées de cellulose, d'hémicellulose, de pectines, de lignines, de cendres, de cires et de protéines.

Les fines sont d'origines minérales et organiques. Sur le plan morphologique, les particules de granulats peuvent être assimilées à des parallépipèdes rectangles de 1 à 2 mm de largeur environ et de 1 à 20 mm de longueur environ.

À l'échelle macroscopique, le granulats chanvre peut être caractérisé par sa répartition granulométrique.

À l'échelle microscopique, les particules de granulats chanvre ont une structure poreuse.

Les pores sont des tubes qui traversent la tige dans le sens de la longueur et dont les diamètres peuvent varier entre 10  $\mu\text{m}$  et 400  $\mu\text{m}$ .

Cette porosité varie de 60 % à 80 %. La porosité du granulats chanvre induit une forte sensibilité du matériau à l'eau liquide et à la vapeur. Ainsi, en 10 minutes, un granulats chanvre en milieu aqueux absorbe plus de 300 % de son poids en eau.

### **LES LIANTS**

Les liants utilisés pour confectionner les bétons de chanvre sont des liants minéraux à base de chaux aérienne, de chaux hydraulique ou de ciment naturel prompt. Ces liants sont utilisés seuls avec le granulats chanvre, en mélange, ou peuvent servir de base à la formulation de liants spécifiques pouvant aussi être adjuvants.

Tous ces liants peuvent se différencier par leur composition minéralogique.

## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

Les chaux aériennes sont produites à partir de calcaire pur. Sur le plan minéralogique, elles sont constituées de di-hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) aussi appelé portlandite.

Les chaux hydrauliques naturelles sont obtenues à partir de calcaire argileux et de marnes, elles contiennent donc de la silice et de l'alumine. Elles sont constituées de di hydroxyde de calcium ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), de silicates di calciques ( $\text{C}_2\text{S}$  en notation des cimentiers), de silicates tricalciques ( $\text{C}_3\text{S}$  en notation des cimentiers) et d'aluminates mono-calciques. Les proportions de ces différents constituants dépendent des quantités d'argiles initiales.

Quant au ciment naturel prompt, il est obtenu à partir d'un calcaire argileux de qualité constante. Ils sont constitués principalement de silicates di calciques et d'aluminates mono calciques. On notera que tout liant doit avoir fait l'objet de tests pour valider la compatibilité avec le granulat chanvre afin de garantir les performances des bétons.

### **II.2.2.1. Transformation de la plante aux matériaux de construction**

Lors de la récolte, ou parfois avant, on commencera par séparer le chènevis (graines) de la paille de chanvre. Ces graines seront ensuite revalorisées en huile de chanvre, ou d'autres coproduits. Une fois la paille séparée de ses graines, on va séparer les fibres de la plante (filasse) de la partie structurelle (chènevotte). Cette opération va générer des poussières de chanvre, qui elles aussi, pourront être revalorisées en pellets (source Agro chanvre) ou autre. Les particules qui constituent la chènevotte seront ensuite dépoussiérées, tamisées et triées en fonction des applications recherchées.

Dans le bâtiment, on l'utilisera en tant qu'isolant en vrac, ou en mélange avec un liant comme la chaux pour réaliser des bétons de chanvre, briques de chanvre ou des enduits. La filasse quand à elle, sera affinée et calibrée, pour donner une laine utilisée en vrac ou, dans le cadre d'une seconde transformation et avec des adjuvants, conditionnée en panneaux et rouleaux. En plus de son utilisation en tant qu'isolant bio-sourcé, on retrouve la fibre de chanvre dans beaucoup d'autres applications comme le papier, les géotextiles et la plasturgie.



Figure II.3: unité de transformation de l'entreprise agro-chanvre, crédit photo pierre foulon

### **II.2.2.2. Ou, pourquoi et comment utiliser le chanvre dans les travaux de construction et de rénovation ?**

Le chanvre fournit deux coproduits utilisés en construction : les fibres et la chènevotte (le bois). Les fibres servent à la confection de complexes isolants présentés en panneaux ou en rouleaux dans lesquelles les traditionnelles fibres minérales sont remplacées par des fibres de chanvre.

Concernant la chènevotte, les utilisations dans le bâtiment valorisent essentiellement la Porosité de ces particules, porosité qui lui confère sa faible masse volumique et son pouvoir isolant. Aujourd'hui, ces particules servent essentiellement à la confection de mortiers et bétons, légers ou extra légers, dont les performances sont directement liées à leurs compositions.

Enfin, bien que ces applications soient actuellement peu développées, la chènevotte peut également être utilisée comme isolant par déversement ou comme sous-couche nivelante ainsi que pour la fabrication de panneaux de particules.

Dans leurs différentes applications, les matériaux de construction à base de chanvre, compte tenu de leurs caractéristiques et de leurs performances (thermique, hygrothermique, acoustique...), contribuent de façon importante au confort intérieur des bâtiments.



Figure II.4 : Granulats obtenus par broyage des tiges de chanvre et de tournesol

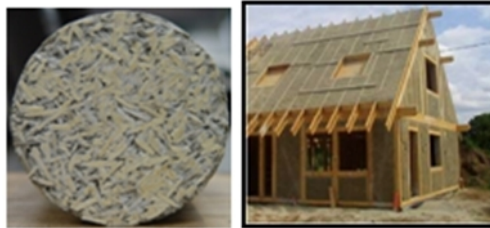


Figure II.5 : Béton de chanvre et maison à ossature bois et enveloppe en béton de chanvre

### II.2.2.3. Réglementation incendie dans les ERP (établissements recevant du public)

Tous les matériaux de construction à base de chanvre ne présentent pas les mêmes caractéristiques en termes de réaction au feu. Par conséquent, dans le cas des matériaux chanvre utilisés pour l'isolation, on se référera à l'arrêté du 6 octobre 2004. Il conviendra par exemple, dans certains cas, de protéger le matériau par un écran thermique sur la face susceptible d'être exposée à un feu intérieur au bâtiment.

### II.2.2.4. caractéristiques des bétons et mortiers de chanvre

- **CONFORT HYDRIQUE**

Compte tenu de la forte porosité naturelle de la chènevotte, le béton de chanvre est perméable à la vapeur d'eau (facteur de résistance à la vapeur d'eau  $\mu=5$ ). Il va donc assurer des transferts de vapeur d'eau entre milieu intérieur et extérieur et ainsi contribuer au confort intérieur des bâtiments.

- **CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES**

Le béton de chanvre présente un comportement élastoplastique, qui lui confère souplesse et déformabilité, lui permet de s'adapter à des sollicitations sans rupture fragile,

## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

limitant ainsi l'apparition de fissurations. Les ordres de grandeur de la résistance à la compression, du module d'élasticité, ainsi que de la déformation maximum à la rupture de bétons et mortiers de chanvre, en fonction de leur masse volumique, sont les suivants : à 28 jours de séchage.

- **ABSORPTION ACOUSTIQUE**

Les mortiers et bétons de chanvre sont des matériaux poreux, cette porosité leur confère des propriétés d'absorption acoustique élevées. Ils permettent donc de limiter la résonance des parois et d'améliorer sensiblement l'acoustique des locaux. Ils peuvent également contribuer de façon significative à l'isolation phonique des locaux en étant associés à d'autres matériaux qui apportent par ailleurs une masse. Le coefficient d'absorption acoustique (  $\alpha$  ) d'un béton de chanvre de 20 cm est supérieur à 0,5 et peut atteindre 0,9 entre 100 Hz et 200 Hz. Par ailleurs, l'indice d'affaiblissement acoustique pondéré est d'environ 35 dB pour une paroi d'environ 25 cm de béton de chanvre d'une masse volumique de 500 kg/m<sup>3</sup>.

- **COMPORTEMENT AU FEU : RÉACTION AU FEU**

Euro classe B pour un béton de chanvre utilisé pour réaliser les murs. (Euro classes : classement européen de la réaction au feu des produits de construction, classement de A à F avec A produit peu ou très peu combustible, F produit combustible dont la contribution à l'embrasement généralisé est très important).

- **IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX**

Les impacts environnementaux de 1 m<sup>2</sup> de mur en béton de chanvre de 26 cm d'épaisseur ont été évalués dans le cadre d'une analyse du cycle de vie (ACV).

1m<sup>2</sup> de mur en béton et mortier de chanvre «absorbe » 75,7 kg de CO<sub>2</sub> équivalent et en émet 40,2 kg soit au final un bilan favorable de 35,5 kg de CO<sub>2</sub> équivalent.

### II.2.2.5. Les principales utilisations

Les bétons et mortiers de chanvre sont utilisés pour réaliser des murs (avec ossature), des doublages de murs, des isolations de sol, des isolations de toiture ou encore des enduits.

Ils peuvent être mis en œuvre manuellement, auquel cas ils sont confectionnés à la bétonnière ou au malaxeur directement sur chantier puis sont déversés entre des banches (cas des murs), sur les surfaces à isoler (cas des sols ou des toitures) ou encore projetés à la truelle (cas des enduits).

Ils peuvent aussi être mis en œuvre mécaniquement à l'aide de machines qui permettent de projeter sous pression le béton de chanvre sur une surface verticale ou de déverser le béton de chanvre sur des surfaces horizontales, obliques ou entre des banches.

Les bétons et mortiers de chanvre sont utilisés en construction neuve et en rénovation, notamment comme matériau de doublage à caractère isolant sur mur ancien.

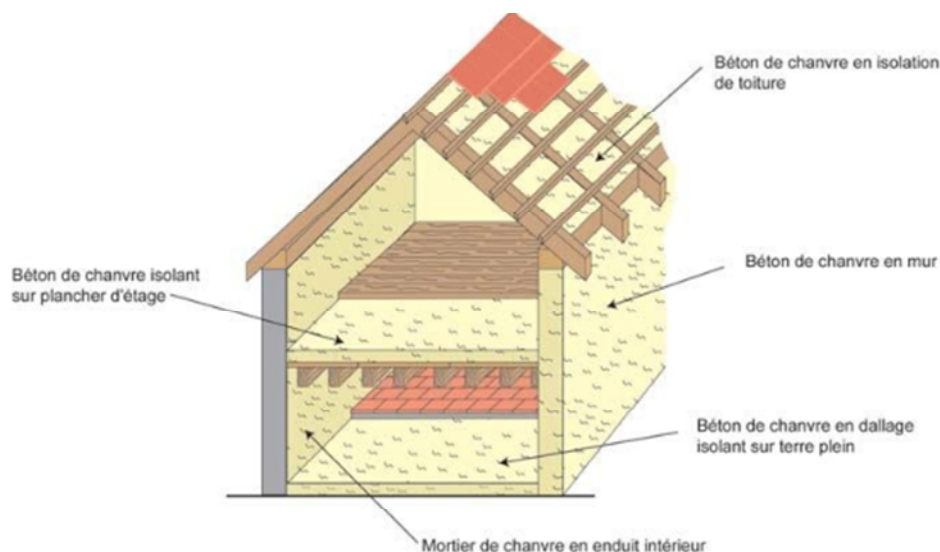


Figure II.6 : les principales utilisations de béton de chanvre

Murs, cloisons et doublage en béton de chanvre : Le béton de chanvre peut être utilisé pour réaliser des murs, des cloisons ou des doublages pour des travaux neufs ou en rénovation. Le béton de chanvre n'étant pas porteur, il est généralement associé à une ossature et peut être mis en œuvre soit mécaniquement par projection machine sur une banche, ou manuellement par déversement entre deux banches.

Les murs, cloisons ou doublages en béton de chanvre sont revêtus d'un enduit ou d'un parement (bardage).





Figure II.7 : Projection mécanique par machine sur une banche



Figure II.8 : déversement manuel entre deux banches

- **Isolation de sols en béton de chanvre**

Le béton de chanvre, préparé à la bétonnière ou au malaxeur, est déversé sur la surface à isoler, étalé au râteau, dressé à la règle puis taloché.

En isolation de sol, les bétons de chanvre sont mis en œuvre sur des épaisseurs minimum de 15 cm. Après séchage (supérieur à 30 jours), les bétons de chanvre en isolation de sol peuvent recevoir les revêtements suivants :

- ✓ revêtements souples ;
- ✓ carrelages (céramiques, terre cuite) ;
- ✓ parquets.

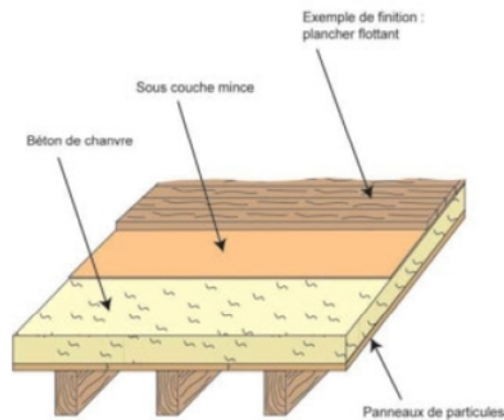


Figure II.9 : Isolation de sols en béton de chanvre

- **Isolation de toiture en béton de chanvre**

La mise en œuvre du béton de chanvre est réalisée avant la mise en place de la couverture. Le béton de chanvre est déversé sur un plafond coffrant fixé sur la charpente.

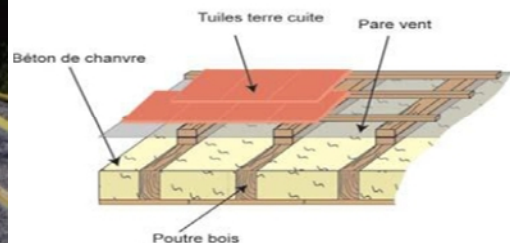
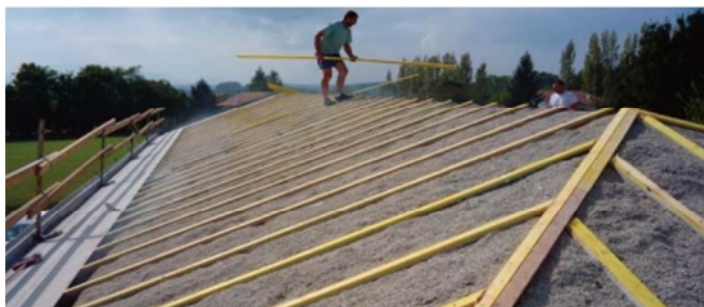


Figure II.10: isolation de toiture en béton de chanvre

- **Éléments préfabriqués en béton de chanvre**

Les éléments préfabriqués en béton de chanvre sont des éléments de petites dimensions de type « bloc » ou des éléments de grandes dimensions de type « panneau de mur ». Ils sont fabriqués dans le cadre de process industriels ou en atelier.

Ces éléments sont assemblés sur le chantier, s'ils sont de grandes dimensions, ou maçonnés, s'ils sont de petites dimensions. Ils peuvent être tout aussi bien utilisés pour la construction ou la rénovation de bâtiments, qu'il soit tertiaires, industriels ou d'habitations collectives ou

## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

individuelles. Compte tenu des caractéristiques des bétons de chanvre qui les constituent, les éléments préfabriqués présentent des performances hygrothermiques et acoustiques de haut niveau.[12]

### **II.2.2.6. Propriétés de béton de chanvre**

- ✓ Isolation thermique et phonique,
- ✓ Matériau non toxique et biodégradable,
- ✓ Matériau ductile,
- ✓ Repousse les insectes et les microbes,
- ✓ Régulation hygrométrique,
- ✓ Résiste à l'attaque des rongeurs,
- ✓ Ne se tasse pas,
- ✓ Régule l'humidité ambiante,
- ✓ Matériau stockeur de CO<sub>2</sub>

### **II.2.2.7 Avantages et inconvénients de béton de chanvre**

#### **Avantages**

- ✓ Pas de dégagements toxiques en cours d'utilisation ou en cas d'incendie ;
- ✓ Bon régulateur hygrothermique ;
- ✓ Confort acoustique ;
- ✓ le chanvre constituant le béton participe à la régénération des sols et nécessite peu d'intrants ;
- ✓ Produit adapté à la rénovation ;
- ✓ Produit peu transformé, utilisant donc peu d'énergie grise ;
- ✓ Coût global peu élevé,
- ✓ recyclable et biodégradable après destruction,
- ✓ Protection de la structure bois en cas d'incendie,
- ✓ Durabilité du matériau.

#### **Inconvénients**

- ✓ séchage des mortiers parfois long ;

## **Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction**

---

- ✓ Difficulté pour réaliser des chantiers en période de froid, à cause de l'important taux d'humidité ;
- ✓ Performance thermique très variable en fonction du dosage ;
- ✓ matériau non porteur ;
- ✓ Demande insuffisante ;
- ✓ ensemble de qualités non prises en compte par les calculs. [11]

### **II.2.3.fibres et granulats végétaux**

Les matériaux à base des fibres végétales techniques sont une réalité depuis plusieurs années. Une étude récente montre que leur développement est une réalité tout particulièrement dans le domaine du bâtiment (isolation, panneaux de particules, bétons). Ces développements permettent de valoriser les propriétés différenciantes du lin fibre et du chanvre en matière de performance mécanique, de légèreté, d'amortissement des vibrations, d'isolation thermique ou phonique, d'absorption/désorption ou de bilan écologique.[13]

La valorisation des fibres végétales en matériaux est aujourd'hui une réalité sur l'ensemble des domaines d'applications : panneaux, isolants, bétons, plasturgie, composites à fibres continues.

Ces valorisations sont liées aux performances différenciantes de ces matières (renforcement, allègement, isolation thermique et phonique, amortissement...), mais aussi à la capacité d'entreprises visionnaires à mettre au point des innovations clés et à des filières à s'organiser, à investir et à prendre des risques.

Depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle, la société cherche à limiter le réchauffement climatique et ses effets en essayant de trouver de nouvelles solutions de production et de consommation plus respectueuses de l'environnement. Les ressources végétales sont une solution plausible et intéressante, car elles répondent à deux impératifs : étant renouvelables elles limitent l'utilisation de ressources d'origines fossiles et étant des puits de carbone elles permettent de stocker le dioxyde de carbone. Produites pour la grande majorité en Europe, elles constituent en outre une ressource locale de proximité.

### II.2.3.1. Qu'est-ce qu'une fibre végétale technique ?

Une fibre végétale est la paroi d'une cellule végétale morte qui est principalement composée de cellulose, d'hémicellulose, de lignine et de pectine. Elle est soit isolée et c'est une « fibre unitaire », soit regroupée avec d'autres et c'est un « faisceau ».

Afin de pouvoir utiliser les fibres végétales au niveau industriel (sauf dans le cas spécifique des pailles de céréales), il est nécessaire de les extraire de la plante (**c'est le défibrage**) et de les préparer pour leur donner une « morphologie » adaptée aux besoins applicatifs spécifiques. On parle alors de fibres végétales techniques.

Actuellement, le terme « fibres végétales » regroupe une hétérogénéité très importante de fractions végétales et chacune de ces fractions possède une sémantique propre à sa filière.

Les fibres végétales techniques issues des processus de défibrage et de préparation de ces fibres peuvent être divisées en cinq sous-classes :

- ✓ **Fibres décimétriques ou Fibres [dm]** : Fibres végétales, obtenues à la fin du processus de défibrage et/ou d'affinage, ayant une longueur moyenne de l'ordre du décimètre (exemple : fibre longue de lin).
- ✓ **Fibres centimétriques ou Fibres [cm]** : Fibres végétales, obtenues à la fin du processus de défibrage et ou d'affinage, ayant une longueur moyenne de l'ordre du centimètre (exemple : fibres courtes de lin, fibres de chanvre).
- ✓ **Fibres millimétriques ou Fibres [mm]** : Fibres végétales, obtenues à la fin du processus de défibrage et/ ou d'affinage, ayant une longueur moyenne de l'ordre du millimètre (exemple : fibres courtes de lin, fibres de chanvre).
- ✓ **Granulats** : Les granulats, issus de la séparation post-décortication ou post-affinage, correspondent aux parties ligneuses de la tige (ou moelle). Leur granulométrie (millimétrique à centimétrique) varie en fonction de la plante défibrée et de sa qualité, du processus utilisé, de la demande des clients, etc.
- ✓ **Farines** : Les farines correspondent à des broyats de granulats végétaux ou de fibres végétales qui sont homogènes et de faible granulométrie ( $\mu\text{m}$ ).
- ✓ **Poudres** : Les poudres sont l'ensemble des résidus issus de la 1<sup>ère</sup> transformation des pailles qui correspondent aux liants végétaux qui assurent la cohésion (pectines) et aux particules de fibre et de granulats issus du défibrage.

### ❖ **Des morphologies pour des usages**

La morphologie de chaque type de fraction issue du défibrage des pailles de biomasse conditionne ses utilisations applicatives actuelles et potentielles. Ainsi chaque secteur industriel valorise un ou plusieurs types de fibres végétales techniques.

### ❖ **Rendement matière (paille et fibres)**

Ce sont les pailles réellement récoltables techniquement sans nuire à la qualité agronomique des sols (afin de maintenir leur fertilité et les taux de matière organique) mais sans tenir compte des usages actuels. Une fréquence d'exportation acceptable a ainsi été prise en compte.

Les différents constituants des pailles (fibres, granulats, poudres) sont séparés lors des opérations de défibrage, sauf dans le cas des pailles de céréales qui sont directement utilisées sous forme de bottes en tant qu'isolant de remplissage.

### ❖ **Périmètre Ressource**

Parmi les espèces végétales cultivées, un certain nombre sont ou peuvent être utilisées à des fins matériaux : lin fibres, chanvre, paille de céréales ou de colza, miscanthus... Cependant, toutes ces espèces ne font pas l'objet du même degré de connaissance et de recherche ni du même degré d'utilisation.

3 groupes de plantes à fibres se distinguent :

- ✓ **Les fibres disponibles** : elles sont produites en grande quantité avec la présence d'outils industriels de production, s'appuient sur des filières structurées et un potentiel de valorisations matériaux qui est avéré (de nombreuses utilisations matériaux existent) : chanvre, lin fibres.
- ✓ **les fibres en devenir** : le potentiel est intéressant, les implantations et les utilisations matériaux commencent à se développer, les filières ne sont pas structurées ou en voie de structuration : paille de céréales, paille de lin oléagineux, paille de colza.
- ✓ **les fibres potentielles** : l'effort de R&D est important, les usages matériaux ne sont pas encore validés industriellement ou commercialement, les chaînes logistiques et de récoltes restent à organiser pour un usage matériaux : miscanthus, sorgho, ortie, ceps et

sarments de vignes, cane de tournesol, pailles de lavande... sans que cette liste soit limitative

### II.2.3.2. Quelques exemples sur les fibres et les granulats végétaux

- **Le Lin fibres**

Le lin fibres (*Linum usitatissimum* .) est une plante herbacée annuelle des régions tempérées septentrionales de la famille des Linacées. Cette plante peut atteindre 0,8 à 1,2 mètres de hauteur et a un diamètre de 1 à 2 millimètres.

Le lin fibres s'implante généralement au printemps. Afin d'éviter tout risque d'épuisement des sols et de prolifération des maladies, le lin est implanté en rotation tous les 6 à 7 ans. C'est une bonne tête de rotation permettant une hausse du rendement de la culture suivante, un allongement et une diversification des rotations.



Figure II.11: plante de *Linum usitatissimum*

#### Produits obtenus

Le teillage de la paille de lin fibres aboutit à l'extraction des graines, des poudres (poussières : paillettes et épiderme des tiges) et des granulats (anas). Cette opération génère également des fibres [dm] et fibres [cm]. Toutes les composantes de la plante sont valorisées, ne générant ainsi aucun déchet au sens de la réglementation européenne.

- **Le chanvre industriel**

Le chanvre (*Cannabis sativa* L.) est une plante à croissance rapide (jusqu'à 3 mètres en quelques mois) de la famille des Cannabacées. Cette culture trouve facilement sa place au sein d'un assolement en tant que tête de rotation. L'absence de produits phytosanitaires dans l'itinéraire technique fait du chanvre une plante écologique et permet indirectement de

régénérer la structure du sol et sa fertilité. Le chanvre a la particularité de favoriser la biodiversité, son couvert se rapprochant de celui d'une forêt.



Figure II.12 : Plante de Cannabis sativa

### **Produits obtenus**

A l'issue de cette 1<sup>ère</sup> transformation de la paille de chanvre, différentes fractions végétales sont obtenues : des fibres [cm], des granulats (chènevotte) et de la poudre. Comme le lin fibres, toutes les composantes de la plante sont valorisées, ne générant ainsi aucun déchet au sens de la réglementation européenne.

- **Les pailles de céréales**

Ces pailles sont les résidus de la culture des céréales, dont la partie noble, le grain, est valorisée majoritairement en alimentation humaine et animale. Elles sont constituées de la tige rigide de la plante récoltée à maturité. Ne seront abordées dans le memento que les céréales à paille pouvant être valorisées en matériaux, à savoir : blé tendre, blé dur, orge, escourgeon, seigle, avoine, triticale, riz.





Figure II.13 : Les pailles de céréales

### Produits obtenus

Après récolte du grain lors de la moisson, la paille est soit enfouie, soit laissée au champ, soit mise en andains (petits amas de paille) pour être ensuite pressée pour former des balles de paille (rondes ou rectangulaires). Elle peut alors servir de litière aux animaux ou plus occasionnellement d'alimentation animale, de combustible ou de matériaux. Les pailles ou brins de paille obtenus seront assimilés à des granulats.

- **Les pailles de colza**

Ces pailles sont les résidus de la culture du colza, dont la partie noble, la graine, est valorisée tout particulièrement dans l'alimentation humaine et animale. Elles sont constituées de la tige rigide de la plante récoltée à maturité.



Figure II.14: paille de colza



Figure II.15 : plante de colza

### Produits obtenus

Après récolte de la graine lors de la moisson, la paille est généralement laissée au champ. Ponctuellement elle est pressée pour former des balles de paille (rondes ou rectangulaires). Elle peut alors servir très occasionnellement d'alimentation animale, de litières ou de matériaux. Les pailles ou brins de paille obtenus seront assimilés à des granulats.

- **Les pailles de lin oléagineux**

Le lin oléagineux est un type de lin (*Linum usitatissimum L.*) sélectionné pour sa production de graines riches en huile et non pour sa richesse en fibres. Le lin oléagineux est présent principalement dans les régions du Nord, Nord-Ouest et Nord-Est où les précipitations sont abondantes. Concernant le lin oléagineux d'hiver, il est majoritairement cultivé au sud de la Loire, notamment dans le Sud-Ouest. C'est une très bonne tête de rotation, adaptée aux implantations sans labour pour le lin oléagineux d'hiver et pouvant jouer un rôle de protection contre l'érosion durant l'hiver. Son utilisation permet une diversification des cultures dans les exploitations céréalières. Les producteurs privilégient l'implantation au printemps pour des raisons agronomiques et pour des questions de répartition de charge de travail.



Figure II.16: plante de lin oléagineux

### Produits obtenus

La paille de lin oléagineux est le résidu de la culture de la graine. Elle est soit directement broyée et ré-enfouie, soit laissée au champ. Ponctuellement elle est mise en andains (petits amas de paille) pour être ensuite travaillée par pressage pour former des balles de paille (surpressées ou rectangulaires). Elle peut alors servir de litière aux animaux, de paillage ou pour la fabrication d'isolants souples ou de non-tissés. Pour ce faire elle doit être défibrée, ce qui permet d'obtenir 3 types de fractions : des fibres [cm], des granulats (anas) et des poudres (poussières).

### II.2.3.3. Propriétés différenciantes des fibres végétales techniques

L'utilisation de fibres végétales techniques dans le domaine des matériaux est conditionnée par leur capacité à amener des fonctions différenciantes, dans le respect du cahier des charges des industriels d'application.

Leurs principaux avantages clés sont :

- ✓ Leur légèreté ;
- ✓ Leurs performances mécaniques ;
- ✓ Leur propriété d'isolation thermique et phonique Leur capacité à amortir les vibrations ;
- ✓ Leur comportement en matière d'absorption/désorption ;
- ✓ Leur origine en tant que matière renouvelable, dotée d'un Bilan CO faible ;

Ces avantages varient selon les secteurs d'application. [14]

### **II.2.4. Maçonnerie en pierre ou en terre crue**

#### **II.2.4.1. La construction en terre crue : entre tradition et innovation !**

Construire avec de la terre ? « Une drôle d'idée », « C'est du passé ! » ou « C'est solide ? ». Voilà pour les préjugés. Et pourtant... Les constructions en terre abritent aujourd'hui encore 1/3 de la population mondiale ! Et c'est bien normal, la terre est disponible partout localement. On trouve en Irak ou au Yémen des bâtiments en terre de plusieurs centaines d'années, voire milliers d'années, parfois sur plusieurs étages. Chez nous, la terre était très présente en construction jusqu'au 19<sup>e</sup> siècle, notamment par son utilisation dans le « torchis ». Aujourd'hui, des fabricants, des entrepreneurs, des architectes et des chercheurs proposent de redonner à l'architecture en terre ses lettres de noblesse en adaptant les techniques traditionnelles aux exigences actuelles.

Entre tradition et innovation, nous verrons dans ce dossier les avantages de l'utilisation de la terre crue dans le bâtiment et quelques techniques de mise en œuvre.

#### **II.2.4.2. Les avantages de la terre crue**

La « terre » utilisée en construction est en réalité un mélange variable d'argile, de limon, de sable et parfois même de gravier qui se distinguent entre eux par la taille de leur grain (granulométrie). Dans ce mélange, l'argile joue le rôle de « liant », au même titre que le ciment dans un béton.

Nous parlerons dans ce dossier exclusivement de la terre « crue » qui, comme son nom l'indique, se distingue de la terre « cuite » par le fait qu'elle n'est pas soumise à un processus de cuisson. Cette cuisson permet par exemple de transformer la terre crue en brique de terre cuite (celle que le Belge a dans le ventre !).

#### **❖ La terre a des avantages techniques**

Grâce à l'argile (liant) qu'elle contient, elle permet de nombreuses utilisations : mortier, enduit, brique de remplissage, brique porteuse, moulée, compactée, empilée, etc. L'utilisation de la terre est compatible avec d'autres matériaux et techniques (ossature bois, construction en bloc, etc.). Enfin, la terre est résistante au feu.

## **Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction**

---

### **❖ La construction en terre crue présente un bilan environnemental très intéressant**

Il s'agit d'une matière première largement disponible, renouvelable, et même recyclable, puisque non transformée. L'énergie nécessaire à sa fabrication est très faible puisqu'aucune cuisson n'est nécessaire. Lorsque les filières locales existent, l'impact lié au transport est quasi nul.

### **❖ La terre dans la maison améliore le confort des habitants**

En contact avec l'air intérieur, elle joue un rôle de régulation de l'humidité relative de l'habitation. La terre dispose en effet de cette capacité de stocker des molécules d'eau lorsque l'air est humide et de les restituer lorsque l'air est plus sec. La densité de la terre étant élevée, elle contribue à l'inertie thermique de la maison, en jouant un rôle tampon (stockage et déstockage de la chaleur). Elle est respirante, saine et sans aucune émanation nocive. Elle peut aussi contribuer au confort acoustique et esthétique de l'habitat.

### **❖ La mise en œuvre de techniques de construction en terre nécessite toutefois de l'attention**

La terre n'étant pas étanche, elle est sensible à l'humidité et au gel. Il conviendra donc de doter la maison de bonnes fondations et d'une bonne toiture : ce seront ses bottes et son chapeau ! Notons aussi que la terre n'est pas un matériau d'isolation en soi. Il devra donc être combiné à un isolant pour améliorer les performances énergétiques du bâtiment. Quant au prix : la matière première est très concurrentielle mais sa mise en œuvre peut être fastidieuse et donc onéreuse.

#### **II.2.4.3. Quels usages pour la terre crue ?**

En fonction des capacités, envies, moyens et temps dont on dispose, plusieurs approches sont possibles pour l'utilisation de la terre crue : de l'auto-construction en valorisant la terre présente dans le jardin à la préfabrication en atelier, en passant par le travail réalisé par des artisans ou des entreprises spécialisées.

##### **a) Pour le gros œuvre**

### **❖ Les blocs de terre crue sont moulés et compressés**

## *Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction*

Ils peuvent s'utiliser en remplissage de cloison intérieure en ossature bois pour apporter de l'inertie thermique à la maison (adobe simple) ou pour participer à l'isolation lorsque l'on ajoute un isolant (paille par ex.) au mélange (adobe allégé).

Certains blocs de terre comprimée permettent aussi de les utiliser pour la réalisation de murs porteurs intérieurs ou extérieurs. En murs extérieurs, ils sont utilement combinés avec la pose d'une isolation extérieure.

Artisans ou des entreprises spécialisées.



Figure II.17 : Bloc de terre crue « Argio », Belgique.

### ❖ **Le pisé**

C'est une technique de construction ancienne qui consiste à comprimer la terre entre des panneaux de coffrages. Aujourd'hui, on l'utilise lorsque l'on cherche à augmenter l'inertie thermique de la maison, grâce à la densité élevée de la terre. La variation dans les teintes de la terre utilisée pour chaque couche permet des jeux esthétiques remarquables.



Figure II.18: Mur en pisé au Musée Source O Rama à Chaudfontaine, Belgique

### ❖ Le torchis en colombage

Le torchis est un mélange « argile-paille » utilisé en remplissage d'anciens colombages ou d'ossature poteau poutre, et armé d'un lattis en bois (clayonnage). C'est une technique qui a été très utilisée en Belgique. On l'utilise donc encore pour la rénovation du patrimoine. Pour de nouvelles constructions, le mélange sera amélioré pour satisfaire aux performances énergétiques recherchées (voir plus bas).



Figure II.19: Façade en restauration en colombage et torchis

### **b) Pour l'isolation**

La terre seule ne suffit pas pour isoler une maison. Elle peut toutefois l'utiliser avec une fibre végétale isolante pour constituer un mélange plus ou moins isolant selon les proportions et selon l'usage que l'on en fera. Au final, les mélanges contenant plus de fibres que de terre peuvent contribuer à l'isolation.

Exemples : Un mélange « terre-paille », en remplissage d'une ossature bois.



Figure II.20 : Un mélange « terre-paille », en remplissage d'une ossature bois.

- ✓ Un mélange « paille-terre » ou « copeaux de bois-terre » déversé dans un clayonnage (lattis de bois), lui-même enduit de terre. Dans le mélange « paille-terre », c'est la paille qui est dominante.
- ✓ Des blocs de « terre-paille », en remplissage d'une ossature.



Figure II.21 : des blocs de « terre-paille », en remplissage d'une ossature.

Au final, les exigences thermiques recherchées tendent à séparer les fonctions d'isolation de l'enveloppe et d'inertie thermique à l'intérieur de la maison. Ce qui plaide pour une séparation des matériaux isolants à l'extérieur de l'enveloppe et de la terre du côté intérieur de l'isolant. Exemple : un enduit terre sur ballot de paille, qui peut même être préfabriqué sous forme de panneaux en atelier.





Figure II.22 : un enduit terre sur ballot de paille, qui peut même être préfabriqué sous forme de panneaux en atelier.

### c) Pour les revêtements muraux, plafonds et sols

Des enduits pour tous les goûts et les couleurs. La gamme de produits de plafonnage à l'argile s'est aujourd'hui largement étoffée, tant dans les couleurs que dans les textures. Il en est de même pour les peintures à l'argile d'ailleurs. Les enduits s'utilisent comme des plafonnages classiques pour recouvrir et finir des murs intérieurs.



Figure II.23 : Enduit de finition contenant des fibres de lin

Variantes. Les enduits de terre peuvent aussi être projetés à la machine. Il existe également des panneaux d'argile pour permettre une construction « sèche ».



Figure II.24: Panneaux d'argile Claytec

Enfin, les plus téméraires peuvent aussi se lancer dans des revêtements en terre « damée ». Une couche de mortier de terre est compactée et protégée par une huile/cire de finition.

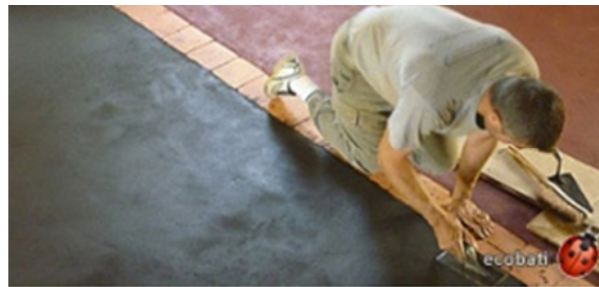


Figure II.25 : Produit Sol de finition à l'argile Argilus.

### II.2.4.4. La construction en terre en Belgique

Il existe un patrimoine formidable - mais menacé - de construction en terre en Belgique, en particulier en torchis. De nombreux acteurs (auto constructeurs expérimentés, architectes, entreprises, artisans, fabricants, chercheurs) tentent de préserver ce patrimoine tout en voulant proposer de nouvelles possibilités techniques pour une utilisation de la terre avec les exigences actuelles, en particulier thermiques. Certaines filières de fabrication belge se mettent aussi en place, notamment une filière d'enduits de plafonnage ainsi qu'une filière de blocs de terre crue porteur. À noter aussi : les normes de mise en œuvre de ces techniques sont en cours de développement. De quoi rassurer les architectes et les entrepreneurs !

Enfin, de nombreux maîtres d'ouvrage ont déjà opté pour l'une ou l'autre technique de valorisation de la terre dans leur bâtiment. Certains, d'ailleurs, ouvriront leur porte lors des

Portes Ouvertes Éco bâtisseurs les deux premiers week-ends de novembre et partageront leur expérience avec les visiteurs. [15]

### **II.3.Granulats éco-liants alternatifs**

#### **II.3.1.Matériau alternatif**

Tout matériau élaboré à partir d'un même lot périodique de MIDND (Mâchefer d'incinération de déchets non dangereux) et destiné à être utilisé, seul ou en mélange avec d'autres matériaux, alternatifs ou non, au sein d'un matériau routier. Le matériau alternatif est donc un constituant, éventuellement unique, d'un matériau routier.

#### **II.3.2. Liants organiques**

Les liants organiques utilisés en génie civil, dont la rédaction est assurée par M. mouton chef de la section de chimie organique du LCPC et responsable depuis 1972 du groupe de travail Matières plastiques fonctionnant dans le cadre des laboratoires des ponts et chaussées.

En génie civil, on utilise les liants organiques dans trois domaines principaux:

Pour la réalisation de revêtements routiers (enrobés pour bétons bitumineux, enduits superficiels, couches de base du type grave-bitume); pour la réparation d'ouvrage en béton hydraulique fissurés, le ragréage des surfaces, pour l'assemblage par collage de pièces en béton hydraulique manufacturé, voire même pour la réalisation d'éléments de construction en béton de résine

Pour la protection des aciers par peintures, le marquage routier (signalisation horizontale) et la réalisation d'étanchéité (de tabliers d'ouvrage ou de cuvelages), ou les propriétés hydrophobes du liant sont utilisées conjointement a ses propriétés agglomérantes.

L'utilisation rationnelle de ces produits suppose un minimum de connaissances sur leur nature, leur chimie et leur technologie.

- ✓ Les liants organiques se présentent rarement sous forme de produits purs : en plus du liant proprement dit, ils comportent généralement des adjuvants organiques tels que des plastifiants, des flexibilisants, des diluants (réactifs ou non), des accélérateurs, éventuellement des charges minérales, pré mélangés avec le ou les constituants de

base pour donner ce que l'on appelle des produits formulés (ou liants organiques formulés) prêts à l'emploi ;

- ✓ les liants organiques couvrant les produits hydrocarbonés et les résines synthétiques. Les produits n'ont pas besoin d'eau pour développer leurs propriétés d'adhérence vis-à-vis des matières inertes.

### **II.3.2.1. Types des liants organiques**

❖ **LIANTS NOIRS** : Bitume, goudron, revêtements routiers et étanchéités ...

#### **a) Définition**

Les produits noirs sont des liants hydrocarbures, de couleur noire (ou brun foncé), qui diffèrent essentiellement des liants hydrauliques (ciment, chaux, plâtre).

Ce sont des liquides fortement visqueux qui peuvent se présenter aussi sous forme de solides demi-mots, leurs compositions chimiques varient avec leurs origines brutes dont ils sont issus, ils sont composés sur tout de carbone d'hydrogène.

#### **b) Les différents types des produits noirs**

❖ **Les goudrons :**

Ils proviennent de la distillation rapide (1100c°) ou lente (800c°) de diverses variétés de la houille de charbon. C'est un liquide noir brillant plus ou moins visqueux de densité supérieure à 1. Il faut 20 tonnes de houilles pour donner une tonne de goudrons brutes. Les goudrons ne sont plus utilisés fréquemment, mais ils le sont en Grande Bretagne où la houille demeure encore une source majeure de ce liant.

❖ **Les Bitumes**

La plus grosse source de bitumes est actuellement la distillation directe suivie ou non d'un léger soufflage, de pétrole brute d'origine très diverses dont ils constituent la fraction la plus lourde le bitume, qui se présente sous l'aspect d'un corps de couleur noir, composé d'hydrocarbures saturés de poids moléculaire élevé.

### **La structure chimique des bitumes**

La composition chimique des bitumes varie avec l'origine des pétroles bruts dont ils sont issus. Composés d'hydrocarbures saturés de poids moléculaire élevé appartenant en majorité aux

## **Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction**

---

groupes aliphatiques à chaînes droites. Ils contiennent en moyenne 80 à 85% de carbone 10 à 15% d'hydrogène 2 à 3% d'oxygène.

### **Les caractéristiques physico-chimiques des bitumes**

Le bitume possède un grand pouvoir agglomérant, car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, bétons, bois, métal, verre.

C'est un excellent isolant thermique. Il est léger, ductile et souple. De point de vue mécanique, il se comporte comme matériau plastique ou élastique. Il est insoluble dans l'eau, mais l'on peut en obtenir des solutions dans de nombreux solvants organiques. Il est pratiquement inerte vis à vis de la Plupart des agents chimiques usuels.

### **Applications hydrauliques**

Imperméables, durables, cohérent, excellents, se comportant selon les conditions de température et de change comme des martiaux plastiques ou élastiques. Les bitumes possèdent évidemment une aptitude exceptionnelle à résoudre certains problèmes hydrauliques. Ils permettent seuls la construction d'ouvrages résistants à l'érosion. Enfin l'entretien et la réparation des structures bitumineuses sont en général, relativement aisés.[16]

#### **❖ L'asphalte**

Depuis la haute antiquité le bitume a été connu sous forme naturelle on le rencontrait sous forme d'asphalte, roche calcaire imprégnée de bitume, dans la proportion de 8 à 10%. Nous signalions également que ces asphaltes ne sont rien que du pétrole brut montait en surface, les fractions les plus légères s'évaporaient dans la nature, le résidu visqueux sextant n'est que le bitume.

#### **c) La différence entre le goudron et le bitume**

Les principales différences entre le goudron et le bitume sont :

- ✓ Leur constitution chimique : le bitume comprend surtout des hydrocarbures saturés, alors que les goudrons certain surtout des hydrocarbures non saturés.
- ✓ Les bitumes vieillissent plus vite que les goudrons.
- ✓ Les bitumes sont plus adhérents que les goudrons et plus stable.

### ❖ **RESINES**

#### **a) Définition**

les résines servant de liant de renforcement métallique, minéral ou organique sont dites macros molécules synthétiques thermodurcissables.

Ces sont de enchainements de molécules organiques élémentaires appelées (monomères). Pour constituer un réseau tridimensionnel rigide appelé (polymère).

**Naturelles** : latex

Dans les résines naturelles, on peut parler de baume (une sécrétion qui est utilisée comme un épurateur ou un déodorant), de gomme-résine (qui émulsionne lorsqu'elle est mélangée avec de l'eau) et de résine latex (provenant du latex coagulé), parmi d'autres types. L'acrylique, à son tour, est parmi les résines synthétiques les plus populaires. Il est utilisé dans de nombreuses industries, notamment l'automobile, la construction et l'optique. L'acrylique, qui présente une haute résistance aux intempéries et aux impacts, est le plus transparent des plastiques et sert d'isolant acoustique et thermique.

**Artificielles**: Polymères, résines acryliques, résines vinyliques, polyesters, époxydes ....

La résine époxy est utilisée pour durcir d'autres produits. Les peintures et les vernis peuvent inclure cette résine pour obtenir de la consistance. Dans l'électronique, la résine époxy permet de protéger les circuits et les transformateurs tout en évitant d'éventuels dommages causés par la poussière ou l'humidité.

Le polyester (utilisé comme matrice dans la fabrication de tuyaux ou dans la fabrication de fibres) et le polyuréthane (qui est produit sous forme de mousse ou sous forme solide, destiné à être utilisé comme agent d'étanchéité, pour isoler ou pour remplir) sont d'autres résines synthétiques (artificielles). [17]

### **II.3.3.Sous produits industriels et déchets**

Avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, caractériser son état actuel et son comportement dans le temps et évaluer sa traitabilité. Il s'agit donc de «mesurer pour connaître et connaître pour agir».

L'approche globale du déchet permettra d'en définir son devenir, à savoir quel type de valorisation choisir.

### **II.3.3.1. Définition des sous produits industriels et Déchets**

Tout résidu d'une production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné.

### **II.3.3.2. Pourquoi valoriser**

L'intérêt qui est porté de plus en plus à la valorisation des déchets et des sous produits industriels est lié à la fois à la crise de l'énergie, à la diminution des ressources mondiales en matières premières et enfin la législation qui devient très sévère concernant la protection de la nature et l'environnement. Les arguments peuvent être résumés en :

- ✓ Augmentation de la production.
- ✓ Le coût de stockage ou de traitement est de plus en plus élevé.
- ✓ Une législation de plus en plus sévère.
- ✓ Une meilleure gestion de la recherche. [18]

Une saine politique des déchets s'articule autour de trois axes fondamentaux :

- ✓ réduire le flux des déchets à la source, par la mise au point de procédés de fabrication nouveaux, appelés technologies propres, qui engendrent moins de flux polluants, et par l'action menée au niveau de la consommation, en favorisant l'utilisation minimale de produits jetables et maximale d'éco-produits ;
- ✓ accroître la récupération et la valorisation : la récupération consiste à sortir un produit du circuit production-évacuation conduisant à la mise en décharge, et la valorisation procède de plusieurs manières :
- ✓ le recyclage, qui consiste à refaire le même produit que le produit initial (bouteilles en verre) ;
- ✓ la réutilisation, qui consiste à fabriquer un autre produit que celui qui a donné naissance au déchet (bouteilles en PVC pour la fabrication de jouets) ;
- ✓ le réemploi, qui consiste à prolonger la durée de vie d'un produit (bouteilles consignées) ;
- ✓ la régénération, qui consiste à redonner au déchet les qualités et propriétés du produit initial par un ou plusieurs procédés adaptés (purification des huiles de vidange) ;

## **Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction**

---

- ✓ la valorisation énergétique, par incinération.
- ✓ éliminer et traiter proprement les déchets, c'est-à-dire transformer le déchet pour qu'il n'ait plus d'impact négatif sur l'environnement (procédés d'inertification, mise en Centre d'Enfouissement Technique).

Cette troisième étape est l'étape ultime et n'intervient que si toutes les autres possibilités ont été envisagées. [19]

### **II.3.3.3. Origine de la production de sous produits industriels et déchets**

La production des déchets est inéluctable pour les raisons suivantes :

- ✓ biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- ✓ chimiques : toute réaction chimique est régie par le principe de la conservation de la matière et dès que veut obtenir un produit à partir de deux autres on en produira un quatrième ;
- ✓ technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchet
- ✓ économiques : les produits en une durée de vie limitée ;
- ✓ écologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessiteront une gestion spécifique ;
- ✓ accidentelles : les inévitables dysfonctionnements des systèmes de production et de Consommation sont eux aussi à l'origine de déchets.

### **II.3.3.4. Constitution chimique du déchet**

Les déchets sont pour la plupart constitués des mêmes molécules chimiques que celles des produits. Ce qui différencie les déchets des autres produits provient d'un certain nombre de particularités. Certains déchets résultent du traitement involontaire de molécules usuelles avec production de sous produits de composition, a priori inconnu. Par ailleurs, le déchet peut se retrouver dans un milieu dont il n'est pas issu en tant que produit et de ce fait auquel il n'est pas destiné. Enfin, le mélange au hasard des déchets peut conduire à la formation de produits nouveaux.



### **II.3.3.5. Différents types de déchets**

#### **❖ Déchets ultimes**

Tout déchet ménager et assimilé brut issu du ramassage parallèle à la collecte sélective, le refus de tri, le déchet industriel banal issu des ménages et des déchetteries ainsi que les boues de stations d'épuration.

#### **❖ Déchets inertes**

Déchet qui ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante ; ne se décompose pas, ne brûle pas, et ne produit aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradable et ne détériore pas d'autres matières avec lesquelles il entre en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets sont admissibles dans les installations de stockage et proviennent essentiellement des chantiers de bâtiment et de travaux publics ou d'industries de fabrication des matériaux de construction.

Ce sont notamment les déchets suivants :

Les bétons, les tuiles et les céramiques, les briques, les déchets de verre, les terres, les enrobés bitumeux.

#### **❖ Déchets assimilés**

Les déchets ménagers et assimilés recouvrent les ordures ménagères (OM) qui proviennent des ménages et tous les déchets gérés comme tels par les collectivités locales (déchets des artisans ou commerçants)

#### **❖ Déchets verts**

Déchets végétaux des parcs et jardins (gazon, branchages...)

#### **❖ Déchets organiques**

Les termes suivants recouvrent la même notion : biodéchets ou déchets fermentescibles ou FFOM (fraction fermentescible des ordures ménagères). Il s'agit de :

## **Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction**

---

- déchets végétaux des parcs et jardins (déchets verts) déchets organiques de la cuisine (restes de repas, épluchures, papiers essuie-tout, papier journal, fleurs coupées, marc de café, filtres à café, sachets de thé, coquilles d'œufs, etc....
- boues

### **❖ Déchets industriels banals (DIB)**

Ils regroupent l'ensemble des déchets non dangereux produits par les industriels et par les entreprises du commerce, de l'artisanat, des services et de l'administration, de la métallurgie, la peinture, la chimie et la pétrochimie. Ce sont des déchets d'emballage, des déchets d'entretien et les matériels en fin de vie.

### **❖ Déchets dangereux**

#### **a) Déchets industriels spéciaux (DIS)**

Ces déchets figurent en raison de leurs propriétés dangereuses, exemple : déchets contenant de l'arsenic, du plomb ; constitués de boues de peinture, d'hydrocarbures ; provenant de l'industrie pétrolière, etc....

#### **b) Déchets ménagers spéciaux (DMS)**

Ce sont les déchets à risque contenus dans les déchets ménagers, tels que les aérosols, colles, détergents, détachants insecticides, peintures, piles, tubes néon, produits de nettoyage. Il peut s'agir de ce qu'on appelle également les DTQS : déchets toxiques en quantité dispersé.

### **II.3.3.6. Recyclage des déchets**

#### **a) Définition**

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets industriels et des déchets ménagers qui permet de réintroduire, dans le cycle de production d'un produit, des matériaux qui le composent. Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures : la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation. Certains procédés sont simples et bon marché mais, à l'inverse, d'autres sont complexes, coûteux et peu rentables. Dans ce domaine, les objectifs de l'écologie et ceux des consommateurs se rejoignent mais parfois divergent ; c'est alors le législateur qui intervient. Ainsi, en particulier depuis les années 70, le recyclage est

## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

une activité importante de l'économie et des conditions de vie des pays développés. Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des trois R :

- ✓ Réduire, qui regroupe tout ce qui concerne la réduction de la production de déchets,
- ✓ Réutiliser, qui regroupe les procédés permettant de donner à un produit usagé un nouvel usage.
- ✓ Recycler, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Le recyclage apporte une contribution importante à la baisse des quantités de déchets à éliminer par enfouissement et par incinération, mais il n'est pas suffisant pour contrer l'augmentation de la production des déchets ou y suffit à peine. Ainsi, dans le cas du Québec, l'importante hausse du taux de recyclage, passant de 18 % à 42 % entre 1988 et 2002, est allée de paire avec une augmentation de la quantité de déchets à éliminer par habitant, passant de 640 kg/an/personne à 870 kg du fait d'une augmentation de 50 % de la production par habitant durant cette même période. En France, le volume de déchets a doublé entre 1980 et 2005, pour atteindre 360 kg/an/personne.

Pour lutter contre l'augmentation des déchets, le recyclage est donc nécessaire, mais il doit être inclus dans une démarche plus large.

### **b) Déchets de la construction/démolition**

La démolition des ouvrages en béton et l'industrie des matériaux de construction sont toujours accompagnées par des produits secondaires ou des déchets ; le stockage de tels déchets solides dans des dépôts favorise la pollution de l'environnement et puisque les réserves engranulats alluvionnaires vont s'épuiser, il est donc nécessaire de trouver un moyen pour valoriser ces produits et les réutiliser de nouveau comme granulats dans les bétons et les mortiers.

Le béton recyclé est simplement du vieux béton broyé pour produire des granulats. Il peut être utilisé dans les couches de fondation comme dans du béton maigre et comme seule source de granulats ou remplacement partiel des granulats dans du béton neuf.

Les granulats de béton recyclé sont généralement plus absorbants et moins denses que les granulats ordinaires. La forme des particules est semblable à celle de la pierre concassée. Le béton fabriqué avec des granulats provenant du recyclage, présente généralement de bonnes qualités du maniabilité, durabilité et résistance à l'action du gel-dégel. La résistance en

## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

compression varie selon la résistance du béton initial et le rapport eau/liants du nouveau béton.

Le mortier fabriqué avec des sables provenant de déchets de briques, présente généralement de bonnes résistances à l'action du gel-dégel, à l'action du séchage et aux eaux usées.

### **c) Impact du recyclage dans l'industrie : Source d'approvisionnement alternative**

Le recyclage des déchets offre une source d'approvisionnement en matières premières alternatives aux autres sources. Par exemple, le recyclage de fil de cuivre permet d'obtenir du cuivre auprès des entreprises de recyclage et non des entreprises d'extraction. Le recyclage offre aux entreprises les bénéfices de la multiplicité des sources d'approvisionnements telles que la facilité de négociation des prix d'achat ou la sécurité des approvisionnements.

### **d) Conséquences sur les produits issus du recyclage**

Pour certains types de produits, la qualité de la matière première est altérée par l'opération de récupération de celle-ci dans les produits recyclés. Par exemple, le recyclage du papier donne des fibres de papier plus courtes et un papier de moins bonne qualité (ce qui ne permet qu'une dizaine de recyclages successifs). Autre exemple, le recyclage de certaines matières plastiques contaminées par des polluants ne permet plus de les utiliser pour en faire des emballages alimentaires. Un des problèmes du recyclage du verre est le dépôt, au fond des fours, des verres de type Pyrex qui ont un point de fusion différent du verre ordinaire. Ces dépôts abîment les fours. Cependant, pour la plupart des matières premières contenues dans les déchets (métaux, verre, certains plastiques), les qualités sont conservées au travers du processus de recyclage, permettant un recyclage quasi illimité de celles-ci.

Néanmoins, la chimie intervient de plus en plus dans la fabrication de matériaux issus du recyclage. Les produits qui en résultent ont des caractéristiques de durabilité et de résistance qui peuvent même être supérieures à celles de certains matériaux naturels. Ainsi, on voit des maisons bâties avec des dérivés du recyclage du bois, mélangés ou recouverts par des résines polyuréthanes ou autres. Le résultat est surprenant, donnant une résistance aux intempéries et aux U.V. supérieure à celle du bois. Il en va de même pour le papier recyclé, dont la pâte désencrée et mélangée à certains produits chimiques donne un matériau très résistant, utilisé par exemple dans la fabrication de mobilier urbain.

### **e) Impacts du recyclage sur l'environnement**

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables : il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières.

Le recyclage permet de réduire l'extraction de matières premières :

- l'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
- le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- l'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1 kg d'aluminium (après avoir été fondu).
- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
- chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 l d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15g de bois.

### **II.3.3.7. Déchets utilisés comme granulats du béton**

#### **a. Laitiers**

##### ***a.1. Laitier de haut fourneau***

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de «laitier refroidi à l'air» ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom de «laitier expansé».

Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulats pour le béton. La comparaison entre la résistance à la compression du béton constitué de granulats de laitier de haut fourneau et celle du béton constitué de gravier et de calcaire concassé indique que le béton de laitier est plus résistant.

Les fines du laitier peuvent être utilisées pour remplacer sans inconvénient le sable. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications. La quantité

## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

de laitier expansé produit est bien plus faible que celle de laitier refroidi à l'air. Le laitier expansé est utilisé pour la fabrication du béton léger ayant une masse volumique apparente comprise entre 800 et 950 kg/ m<sup>3</sup>.

Les blocs de béton de laitier expansé sont utilisés pour la construction de murs porteurs et de murs non porteurs. Le béton de laitier expansé a une excellente résistance au feu et une conductivité thermique d'environ 75% de celle des autres bétons légers.

Le laitier expansé réduit en boulettes a été mis au point au Canada. On prétend que ce procédé de fabrication pollue moins l'air que le procédé normal de fabrication.

### ***a.2 .Laitier d'acier***

Ce laitier est formé par l'élimination des impuretés contenues dans la fonte brute. Il est riche en phosphate ou en calcium et contient du silicate bicalcique métastable; il est donc utilisé uniquement comme matériau de remblai pour les routes. Normalement, ce laitier est stocké en piles pendant une période allant jusqu'à un an avant d'être utilisé.

### **b. Sous-produits provenant des centrales thermiques**

La combustion du charbon aux fins de la production d'électricité donne plusieurs sous-produits. Dans les centrales électriques anciennes, les résidus de la combustion de la houille sont désignés sous le nom de «mâchefer». Dans les centrales modernes, on utilise du charbon broyé ou pulvérisé pour la production de vapeur. Les petites particules qui sont transportées par les gaz de combustion sont recueillies par précipitation électrostatique ou par un autre moyen quelconque. Ces particules sont appelées «cendres volantes». Certaines des particules de cendres forment des scories qui tombent au fond du four. Dans les fourneaux à température élevée, il se produit également des résidus fondus appelés laitier de charbon.

#### ***b.1. Mâchefer***

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Étant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé.

### ***b.2 .Scories***

Ces résidus constituent environ 2.5% de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers pour la fabrication de blocs de béton.

### ***b.3.Cendres volantes***

Les cendres volantes pourraient constituer de très bons granules légers, mais elles ne sont pas beaucoup utilisées. Elles sont préférables à beaucoup d'autres granules légers étant donné qu'elles donnent une combustion plus efficace du fait que le carbone contenu dans les cendres produit la quantité de chaleur nécessaire pour éliminer l'humidité des boulettes et pour amener les boulettes à la température de frittage.

À l'origine, les cendres volantes étaient mélangées avec de l'eau et transformées en boulettes soit dans un tambour ou un cône rotatif, soit par extrusion. L'addition d'une faible quantité d'alcalis permet d'obtenir des boulettes ayant une meilleure résistance aux chocs thermiques et mécaniques. Lorsque le frittage se fait dans des fours à grille mobile, la température atteint environ 1150 à 1200°C et par conséquent, les petites particules de cendres volantes se fusionnent et forment un aggloméré. Cet aggloméré est ensuite brisé en boulettes. Les bétons qui contiennent de tels granules ont une résistance à la compression à 28 jours de l'ordre de 40 MN/m<sup>2</sup> et une masse volumique d'environ 1100 à 1800 kg/m<sup>3</sup>. Puisque ces granulats ont une forme adéquate et une bonne résistance, ainsi qu'une absorption d'eau modérée, ils conviennent à la fabrication de blocs de béton léger.

### **c. Béton récupéré**

Le béton constitue presque 75%, en poids, de tous les matériaux de construction. Il s'ensuit donc que la plus grande partie des rebuts de démolition soit du béton. Par ailleurs, les sinistres fournissent des millions de tonnes de débris de béton. L'épuisement des sources courantes de granulats, les lois plus strictes relatives à la protection de l'environnement et les problèmes posés par la destruction des déchets sont tous des facteurs qui favorisent l'usage du

## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

béton récupéré. Les débris de chaussées en béton sont déjà utilisés pour la construction de la couche de fondation de nouvelles chaussées.

La résistance à la compression et le module d'élasticité du béton renfermant des granules recyclés est inférieure à ceux du béton ne contenant que des granulats ordinaires. Les différences sont encore plus grandes à des rapports eau-ciment inférieurs. Le fait de remplacer les fines du béton recyclé par du sable n'améliore pas pour autant la résistance du béton. Le béton qui contient des fines provenant de béton récupéré doit avoir un rapport eau: ciment plus élevé étant donné qu'il contient une plus grande proportion de particules de ciment hydraté.

L'addition de réducteurs d'eau et une teneur en ciment plus élevée augmentent la résistance du béton. Le retrait au séchage du béton constitué de béton récupéré est supérieur de 10 à 30% à celui du béton de référence. L'importance du retrait est fonction de la superficie totale; dans le cas des granulats recyclés, on s'attend à ce que la superficie soit plus élevée à cause de la présence de pâte de ciment.

La tenue au gel et au dégel du béton contenant des granulats de béton récupéré est semblable à celle d'une éprouvette de béton de référence contenant des granules ordinaires.

### **d. Déchets provenant de l'exploitation de mines et de carrières**

L'exploitation des mines et des carrières produit de grandes quantités de déchets. Les déchets de minerais ne sont pas encore très utilisés étant donné qu'ils proviennent d'endroits très éloignés des régions peuplées. Ils pourraient cependant être utilisés pour la fabrication de briques, et de blocs de béton auto-clavé ou à granules légers. Un des problèmes relatifs à l'usage de ces déchets découle de la diversité de leur composition.

### **e. Déchets divers**

#### ***e.1. Déchets de mines de charbon***

Dans les opérations d'extraction du charbon, environ la moitié du matériau est rejetée sous forme de déchets. Ceux-ci servent principalement de matériau de remblai pour les routes et peuvent aussi être utilisés comme granulats pour le béton léger. La température de chauffe de ces déchets susceptible de produire le gonflement ou la dilatation doit être contrôlée pour que les gaz s'échappant de l'argile ou de tout autre matériau soient bien emprisonnés dans les



## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

granules ramollies. Tous les déchets ne vont pas nécessairement gonfler. Il est donc important de faire des essais préliminaires pour évaluer la capacité de gonflement des types particuliers de déchets.

### ***e.2. Verre de récupération***

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année. En général, la résistance du béton contenant du verre est inférieure à celle du béton contenant du gravier. La résistance est particulièrement faible lorsque du ciment à teneur alcaline élevée est utilisé. Le verre de récupération réagit en présence de granules alcalins. Une dilatation élevée est produite lorsqu'il est en contact avec du ciment à teneur alcaline élevée, ce qui explique la faible résistance des bétons à base de verre. Par exemple, pour une période de 12 mois, la dilatation du béton contenant du gravier est de 0,018%, alors que celle du béton contenant du verre est d'environ 0,3%.

Le verre de récupération peut aussi servir à la fabrication de granulats légers. La production des granules légers expansés d'une masse volumique de 528 kg/m<sup>3</sup> par pelletisation d'un mélange de verre de récupération broyé, d'argile et de silicate de sodium chauffé à une température de 850°C. Le béton ainsi obtenu présente une résistance à la compression d'environ 17 MPa après une période de cure à la vapeur de 28 jours .

Le verre récupéré est de composition variée et est souvent contaminé par de la saleté ou d'autres substances qui doivent être éliminées. Une fois broyé, le verre se présente sous forme de particules allongées et sa surface, tant des points de vue chimique que physique, le rend impropre à être utilisé comme granulat pour le béton.

### ***e.3. Pneus usages***

L'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la microfissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration de retrait malgré une amplitude plus élevée de ses variations dimensionnelles de retrait. Malgré les limites en termes de résistance en compression, le composite incorporant des granulats en caoutchouc est donc d'un intérêt évident dans toutes les applications où la lutte contre la fissuration due aux déformations est une priorité

### ***e.4. Résidus d'incinérateurs***

L'incinération des déchets domestiques et industriels entraîne la production de grandes quantités de résidus solides. Ces résidus comportent toutefois certaines matières délétères, ce qui compromet leur utilisation en tant que composants du béton. Ainsi, l'aluminium entraîne la dilatation par suite de l'évolution de l'hydrogène, les métaux ferreux font tacher le béton et les sels de plomb et de zinc solubles nuisent à la prise du ciment. La présence de verre entraîne aussi la dilatation des granulats alcalins

### ***e.5. Boues rouges***

Les boues rouges proviennent de l'extraction de l'alumine de la bauxite. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules. Chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.

La production de granules légers synthétiques à partir de boues rouges peut poser certaines difficultés parce que les boues rouges fondent seulement à des températures élevées et se ramollissent dans une gamme de températures assez restreinte. De plus, les gaz émis pendant le ramollissement ne sont pas toujours suffisants pour produire le gonflement. Dans certains cas, des granulats légers ont été fabriqués avec des additifs tels les cendres volantes, le laitier de haut fourneau et la pierre ponce.

### ***e.6. Argile cuite***

Selon la méthode utilisée pour la fabrication et la manipulation des briques, il y a toujours un certain pourcentage de briques cassées, trop cuites ou mal cuites. Les briques concassées et bien cuites conviennent bien à la fabrication des blocs de béton. Le béton contenant de tels granulats est plus perméable et si les briques contiennent des sels solubles, il peut y avoir corrosion et efflorescence dans le béton. Le béton contenant de l'argile cuite comporte une résistance au feu beaucoup plus élevée que celle du béton à base de gravier naturel

### **e.7. Sciure de bois**

Le béton à base de sciure de bois est très peu utilisé à cause de sa faible résistance. Le béton contenant beaucoup de sciure de bois est inflammable. La sciure provenant du chêne rouge, du sapin de Douglas, du peuplier du Canada, de l'érable, du bouleau ou du cèdre rouge donne des bétons à faible résistance alors que la sciure d'épinette ou de pin rouge donne des bétons dont les propriétés sont acceptables.[20]

### **II.3.3.8. Principaux avantages et inconvénients de sous produits industriels et déchets**

#### **Les avantages**

- ✓ une importante réduction du volume, si le déchet est auto-vitrifiable
- ✓ un produit final réputé stable voire pérenne
- ✓ des polluants oxydés et intégrés ou dissous dans le réseau vitreux.
- ✓ une bonne résistance chimique en milieu aqueux

#### **Les inconvénients**

- ✓ la volatilisation de certains métaux lourds et sels
- ✓ incompatibilité avec les déchets riche en sels.
- ✓ des déchets de deuxième génération
- ✓ un prix de revient élevé. [21]

Les déchets constituent un réel problème, inhérent à toute vie biologique et à toute activité industrielle, agricole ou urbaine, et à ce titre, la recherche de solutions est une vraie nécessité pour les collectivités. Le déchet est par définition «matière» et à ce titre la biophysicochimie, la mécanique et la thermique sont au premier chef sollicitées pour le traiter. Cette matière n'est pas banale. Elle a une vie, elle a souvent muté au cours de son existence pour se retrouver dans les poubelles et les décharges. Avec une telle diversité moléculaire, qu'il est nécessaire de trouver les moyens pour en extraire les fractions valorisables ou pour atténuer les capacités de nuisances.

## **Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction**

Plusieurs types de déchets et de sous-produits peuvent être utilisés comme granulats. Le laitier de haut fourneau et les cendres volantes sont déjà exploités commercialement. L'utilisation des divers déchets est fonction de leur rentabilité d'exploitation et de leurs propriétés. De nombreux types de déchets ne pourront peut-être pas être utilisés à une grande échelle étant donné la diversité de leurs caractéristiques physiques et chimiques. [20]

### **II.3.4. Pouzzolanes naturelles et artificielles**

Les ajouts pouzzolaniques peuvent être naturels comme les pouzzolanes, ou artificiels comme les cendres volantes et la fumée de silice.

Dans une première phase de l'hydratation, ces ajouts sont inactifs et retardent plus ou moins la montée en résistance du béton. Dans une deuxième phase, ils réagissent lentement avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés insolubles, analogues aux hydrates de ciment.

#### **II.3.4.1. Définition de la pouzzolane**

Le terme pouzzolane vient de pouzzole, port italien riche en sable volcanique, cette dernière 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.



Figure II.26 : la pouzzolane naturelle

#### **II.3.4.2. Types de pouzzolanes**

Les matériaux pouzzolaniques sont divisés en deux grandes catégories : les matériaux naturels

et les artificiels.

### **Pouzzolanes naturelles**

Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux d'origine naturelle qui peuvent avoir été calcinées dans un four ou transformées, puis broyées pour obtenir une fine poudre. Les variétés de Pouzzolanes naturelles les plus fréquemment utilisées en Algérie coté ouest du Nord à l'heure actuelle comprennent l'argile calcinée, le schiste calciné et le métakaolin. De la terre de diatomées est également utilisée en Californie. Les pouzzolanes naturelles, y compris le métakaolin, doivent satisfaire aux exigences de la norme CSA A 3001, Liants utilisés dans le béton (ASTM C 618).

#### **❖ Verre volcanique**

Ce type de roche se trouve dans un état vitreux ou du moins sous une forme d'instabilité ou de réactivité qui les rend sensibles à l'attaque par l'hydroxyde de calcium. On mentionne à titre d'exemples : pouzzolane de SANTORIN, de BALCOL en Italie et de SHIRASHU au Japon.

#### **❖ Tufs volcaniques compacts**

Elles sont différentes des pouzzolanes de type verre volcanique. Ce sont les mêmes roches, mais ayant subi des transformations chimiques.

### **Pouzzolanes artificielles**

#### **❖ Cendres volantes**

Les cendres volantes sont le résidu finement divisé résultant de la combustion de houille pulvérisée, dans les centrales thermiques. Comme matériau pouzzolanique à débuté aux USA en 1937.

On définit trois types de cendres volantes, calcium (CaO). Les cendres volantes celles allant de 8 % à 20 % et celles supérieures à 20 %. En général, plus la teneur en CaO est élevée, plus les propriétés d'auto phase vitreuse formée de silice et d'alumine de 50 à 90%.

#### **❖ Laitier granulé de haut fourneau (LGHF)**

Le laitier granulé de haut fourneau (LGHF) est un produit composé essentiellement de silicates, d'aluminosilicates de calcium et d'autres bases, dans un haut fourneau, et qui est particules vitreuses granulées, puis broyé à une finesse égale ou inférieure à celle du ciment.

### ❖ Argiles calcinées

Obtenues par cuisson d'argiles à une température variant de 600° à 900° C, puis elle est moulue à la finesse du ciment. L'argile de base utilisée est en grande partie constituée de silicate d'aluminium. Le traitement thermique transforme la silice et l'alumine dans un état amorphe qui favorise l'activité pouzzolanique. Un autre type d'argile crue peut être traité de la même manière d'origine sédimentaire contenant de l'argile et riche en silice .

### ❖ Fumée de silice

Les fumées de silice sont des particules de très petite taille (environ 0,1µm) issues de l'industrie de l'acier. Ces particules sont principalement composées de silice amorphe (>85%) et présentent des propriétés pouzzolaniques. Elles permettent de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique.

#### II.3.4.3. Caractéristiques de la pouzzolane

##### Physiques

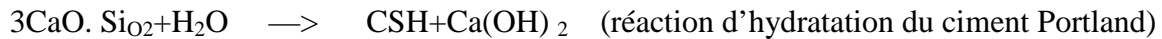
Caractéristiques physiques	Valeurs
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0.98
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	2.75
Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3560
Pouzzolanité (%)	85
Absorption (%)	58.70
Porosité (%)	57.10
Humidité (%)	2.50
Perte au feu (%)	5.60

Figure II.27 : Caractéristiques physiques de la pouzzolane

## Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction

Les pouzzolanes naturelles contiennent de 60 à 85% de silice ( $\text{SiO}_2$ ) et d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). En présence d'eau et de chaux, à des températures ordinaires, comme dit la norme, elles vont former des silicates de calcium hydratés, semblables à ceux produits par l'hydratation du silicate tricalcique ( $\text{C}_3\text{S}$ ) ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{SiO}_2$ ), composé principal du ciment Portland.

Les réactions pouzzolaniques et hydraulique peuvent s'écrire globalement comme suit :



On constate donc que la réaction pouzzolanique consomme de l'hydroxyde de calcium ou Portlandite,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , contrairement à l'hydratation du clinker qui en libère.

Remarque que l'écriture simplifiée de la réaction pouzzolanique pourrait faire penser que des formes à haute cristallinité, le quartz par exemple, serait susceptible de réagir avec la chaux. Massazza a montré que la réaction pouzzolanique ne se produit que lorsque la silice et l'alumine sont constitutives de phases vitreuses ou amorphes, à la seule exception des zéolites qui sont des minéraux cristallisés.

### Chimiques

Composants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PAF
Les teneurs %	45.90	17.10	10.60	10.20	3.40	1.50	1.80	4.05	4.20

Figure II.28 : composition chimique de la pouzzolane naturelle en %

#### II.3.4.4.L'utilisation de la pouzzolane

La pouzzolane est utilisée dans un grand nombre de situations :

- **En jardinerie**

Ses application dans les jardins sont multiples : Décoration (paillage), cultures, l'hydroponie et pour lagunage des piscines biologiques.

- **Sur les routes**

La pouzzolane est aussi répandue en hiver sur les routes où le froid est tel que le sel est

## **Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction**

---

inefficace. Elle est très utile pour le déneigement des routes, ça sert à maintenir d'assez bonnes conditions d'adhérence pour les véhicules.

### **- En construction**

La pouzzolane est à la base de la fabrication de certains ciments. Le tuf constituant le sous-sol de Rome se compose de deux types de roches volcaniques :

- ✓ le pépérin, solide et comparable à la pierre,
- ✓ la pouzzolane, friable et sablonneuse, propre à composer un ciment tenace, cause principale de la durée des monuments romains.

Utilisée dans les parpaings, elle a aussi été utilisée lors de la conception du terrain du Stade de France : la pouzzolane, particulièrement poreuse, autorise l'eau de s'écouler et d'évacuer particulièrement rapidement la pelouse.

D'une manière générale, ce matériaux de construction est plus léger que les matériaux autres, type silico calcaire : dans les travaux publics, cela sert à mettre en œuvre des remblais allégés : terrain trop faible pour recevoir une route, remblaiement sur ouvrage souterrains... Dans l'habitat, elle sert essentiellement d'**ajout cimentaire** et peut servir de granulat pour la confection de béton léger.

### **II.3.4.5. Les avantages multiples de l'utilisation de la pouzzolane**

Il est généralement admis que les pouzzolanes ont besoin de moins d'énergie pour leur broyage que le clinker et que l'utilisation de matériaux pouzzolaniques dans le ciment ou dans le béton entraîne de nombreuses propriétés bénéfiques, comme la faible chaleur d'hydratation, la résistance à la compression élevée, la faible perméabilité, la haute résistance aux sulfates et la faible activité de l'alcali-silice. la réaction pouzzolanique est totalement écologique puisqu'elle ne nécessite pas de cuisson et ne dégage pas de CO<sub>2</sub>.

La pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliorent la résistance à la compression à long terme, car elles donnent naissance à un second C-S-H qui améliore le remplissage des pores, puis augmente la résistance mécanique. L'addition de la pouzzolane naturelle et la pouzzolane artificielle améliore le comportement des mortiers soumis aux attaques des acides HCl et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Nous préconisons : 20 % de la pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane



## ***Chapitre II : matériaux innovants pour l'éco-construction***

---

naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide chlorhydrique. 30 % de pouzzolane artificielle ou de la pouzzolane naturelle pour les solutions d'attaque contenant l'acide sulfurique.

### **II.3.4.6. Cas de l'excès de pouzzolane**

La solution devient insaturée en hydroxyde de calcium, ce qui diminue le pH rapidement en bloquant la dissolution de la pouzzolane. En effet, la dissolution de la pouzzolane engendre une consommation des ions hydroxydes. La précipitation des hydrates consomme également des ions hydroxydes et des ions de calcium. Les produits néoformés seront donc des gels de silicates et d'aluminates de calcium hydratés avec des stœchiométries très variables, contenant moins de calcium que les produits formés en excès d'hydroxyde de calcium.

années 1980. La croissance de son utilisation est due aux avantages techniques qu'il confère au béton. [22]

## **II.4. Conclusion**

Les enjeux de l'éco-construction sont de créer des conceptions saines et confortables dont l'impact sur l'environnement, sur l'ensemble de son cycle de vie, est durablement minimisé. De nombreux matériaux bio-sourcés ont été créés ou réutilisés et ont été pensés de manière innovante dans l'optique de toujours améliorer ce gain d'énergie, de leur création à leur recyclage. C'est dans le but de consommer le moins d'énergie possible que les maisons passives ont vu le jour en se basant uniquement sur des conceptions bioclimatique et l'utilisation de nouveaux matériaux et pour pousser la démarche encore plus loin il existe des conceptions qui créent plus d'énergie qu'elles n'en consomment.

Une conception à énergie positive est une conception qui produit plus d'énergie qu'elle n'en consomme.

Autrement dit, c'est des conceptions passives, en version plus performante. Évidemment, profite au maximum des énergies renouvelables et gratuites.

**Chapitre III :**  
**Nouvelles**  
**formulations pour de**  
**nouvelles**  
**fonctionnalités**

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

### III.1.Introduction

Créer de nouveaux matériaux, déterminer leur structure, étudier et optimiser leurs propriétés constituent le fondement de l'activité de l'ingénieur. La créativité est primordiale; c'est par elle que les chercheurs parviennent à faire émerger de nouvelles perspectives. En effet, qu'ils explorent la chimie du solide et de la métallurgie ou qu'ils se tournent vers la découverte de nouvelles voies de synthèse comme la chimie douce; les chimistes dégagent de nouvelles formules, de nouvelles textures, de nouvelles structures, qui elles-mêmes conduisent à des matériaux auparavant inimaginables.

Ainsi donc, le chercheur s'appuie sur l'observation et la manipulation de la nature des relations chimiques créées lors de la synthèse et de la mise en forme des matériaux. Les matériaux sont également incontournables pour l'amélioration de la qualité de vie dans l'habitat. Les recherches sur les nouveaux matériaux destinés à l'habitat s'intensifient d'année en année tout en étant sensibilisées aux problématiques écologiques, environnementales et technologiques.

Ainsi de nombreux matériaux sont à l'étude et permettent d'enrichir les connaissances des chercheurs. Citons entre autres, les matériaux à changement de phase, les matériaux actifs en photo catalyse et de nouvelles formulations du matériau béton ... Les chimistes du solide travaillent sur la science des matériaux, la thermodynamique, l'ingénierie.

## III.2. Les matériaux à changement de phase

### III.2.1. Introduction

La surconsommation de l'énergie dans les différents secteurs à l'échelle mondiale a causé un dérèglement climatique majeur. La nécessité de réduire cette consommation ainsi que son coût et l'émission du gaz à effet de serre sont devenus l'un des plus grands enjeux de notre époque.

Le bâtiment est l'un des secteurs qui consomment le plus d'énergie, en effet le besoin d'assurer un confort climatique dans le secteur de l'habitat conduit à une forte consommation d'énergie et de ce fait, à une augmentation des émissions des gaz à effet de serre. Un fait souligné par le président du WBCSD (World Business Council for Sustainable Development): "Les bâtiments consomment plus d'énergie que tout autre secteur et contribuent donc dans une large mesure au changement climatique "

- Quel est le moyen qui pourrait répondre simultanément à une baisse de consommation tout en offrant le confort thermique voulu ?
- Quel est le principe de son fonctionnement ?
- Quel sont les avantages qu'il procure ?

Certaines études, au cœur de l'innovation, se sont intéressées à la recherche de matériaux intelligents permettant de réguler les échanges thermiques dans les différents compartiments du bâtiment, de réduire, voire d'éviter parfois le recours aux systèmes de chauffage et de climatisation conventionnels.

Connus sous le nom des MCP, les Matériaux à Changement de Phase constituent une solution de plus en plus attractive pour les constructeurs du bâtiment.

La gestion intelligente de la température sous sa forme la plus légère.

### III.2.2. Généralités sur les matériaux à changement de phase

#### III.2.2.1. Définition:

Les matériaux à changement de phase, appelés communément <<MCP>>, sont des matériaux intelligents qui reposent sur l'application d'un principe physique simple: ils se liquéfient en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixée par leur formulation )

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieur à celle ci.

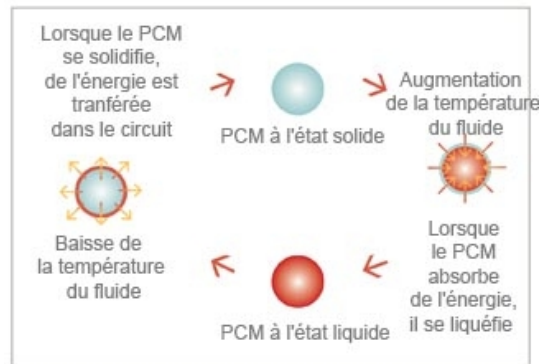


Figure III.1 : Principe de fonctionnement d'un MCP

Les matériaux à changement de phase ont la capacité de stocker de la chaleur sous forme de chaleur latente avant de la restituer. Dans le cadre du bâtiment, ils absorbent et libèrent la chaleur en fonction des variations de température, en période de surchauffe, le MCP fond et la chaleur est emmagasinée. Lorsque le bâtiment se refroidit, le MCP se solidifie et l'énergie stockée est restituée. Ce nouveau matériau donne donc la possibilité d'accroître l'inertie thermique et de réduire les besoins en climatisation. Une solution écologique et économique qui repose sur l'application d'un principe simple.

L'utilisation des MCP par intégration de ceux-ci dans les enveloppes légères permet de leur d'attribuer une inertie identique à celle des parois lourdes. D'après le fabricant de MCP, BASF micronal, une paroi contenant 2 cm de MCP fabriqué par BASF a la même performance en terme d'inertie thermique qu'une brique d'épaisseur de 36 cm ou un mur en béton de 24 cm ou du bois massif d'épaisseur 38cm.[24]

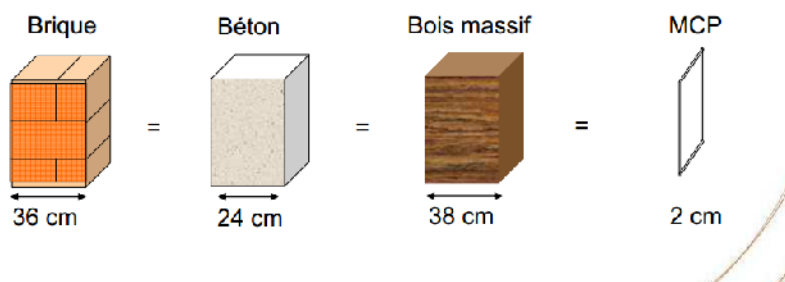


Figure III.2: Schéma comparatif des inerties thermiques en fonction de l'épaisseur et de la nature des matériaux

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

### III.2.2.2. Historique et évolution

L'utilisation des MCP pour augmenter l'inertie thermique des bâtiments est une idée relativement ancienne puisque cette application apparaît dès 1940, où Talkes a étudié l'utilisation de sulfate de sodium décahydraté ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) pour stocker l'énergie solaire pendant la nuit et les jours nuageux. Ses travaux n'ont pas suscité au début beaucoup d'intérêts et ce jusqu'à la crise des années 70 et le début des années 80.

Les premiers panneaux de construction de bâtiment contenant des MCP ont été réalisés au Mexique par Wright et Balcomb. Dans les années 1970, ils fabriquaient des maisons passives avec des systèmes dits à gains directs (matériaux de construction intégrant des paraffines dans le béton). Dans la même année en France on réalisa le premier panneau plâtre-paraffine pour améliorer l'inertie des parois minces [25]

### III.2.2.3. Différents types de MCP

Parmi les MCP subissant cette transformation, nous avons trois groupes de matériaux:

les inorganiques, les organiques et les eutectiques.

#### a- MCP inorganiques:

Les matériaux ou les substances inorganiques ont une plage de températures de fusion comprise entre  $100\text{ }^\circ\text{C}$  et  $+1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Les plus utilisés sont: l'eau (température de fusion  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ), les solutions aqueuses de sel (température de fusion inférieure à  $0$ ), des sels hydratés (température de fusion comprise entre  $5\text{ }^\circ\text{C}$  et  $130\text{ }^\circ\text{C}$ ), des mélanges de sels, des mélanges de métaux (température de fusion supérieure à  $150\text{ }^\circ\text{C}$ ).

Ils ont plusieurs avantages: ils ont une chaleur latente importante et une haute conductivité thermique. Ils ont une fusion nette (c'est-à-dire une plage de fusion étroite). Ils sont non-inflammables et ils ont un coût d'investissement abordable. Ils sont en général facilement disponibles. Les problèmes majeurs rencontrés lors de leurs utilisations sont en rapport avec

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

la ségrégation, la corrosion et la surfusion nécessitant ainsi l'utilisation d'agent de nucléation afin d'être fiables

### **b-MCP organiques**

Les matériaux ou les substances organiques ont une plage de température comprise entre 0 et 150 °C. Les plus utilisés sont essentiellement à base de paraffine, des acides gras et des alcools de sucre. Ils ont des avantages majeurs: ils sont disponibles dans une large gamme de températures et sont compatibles avec les matériaux conventionnels de construction, ils sont chimiquement et thermiquement stables et ne nécessitent pas l'utilisation d'agents de nucléation, ils sont non corrosifs et non réactifs la plus part du temps et ils sont recyclables, par contre ils comportent certains inconvénients, comparés aux avantages des MCP inorganiques: ils ont une plus faible conductivité à l'état solide et à l'état liquide, ils ont une chaleur latente de fusion plus faible, ils sont inflammable.

### **c-MCP eutectiques**

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organiques/organiques, organiques/inorganiques et inorganiques/inorganiques). Ils ont deux principaux avantages; ils ont un point de fusion net similaire à une substance pure et leur chaleurs latentes volumétriques sont légèrement supérieures à celle des composés organiques purs. Leurs deux principaux inconvénients sont que l'on a peu de données disponibles sur les propriétés thermiques de ces matériaux et ils sont peu utilisés au niveau des systèmes industriels.[26]

Dans les bâtiments, les MCP les plus utilisés sont à base de paraffines et de sels hydratés;

#### ❖ Les paraffines

Les paraffines sont des matériaux organiques, constitués par des mélanges d'hydrocarbures saturés qui eux-mêmes sont des alcanes de formule générale  $C_nH_{2n+2}$ .

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

elles sont fabriquées à partir du pétrole brut, après raffinage, elle sont inodores, non toxiques et sans saveur. Leur cristallisations libèrent une grande quantité de chaleur latente.

Les paraffines intéressantes pour le stockage thermique sont celles qui sont sous forme solide aux températures usuelles et elles sont qualifiées de cires paraffiniques [27].

Propriétés des cires paraffiniques:

- ✓ L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230kj/kg.
- ✓ La surfusion est négligeable. La pression de vapeur de fusion est faible même à des températures relativement hautes.
- ✓ Elles sont stables chimiquement mais il faut les protéger de l'air pour éviter l'oxydation.

En particulier quand elles sont chaudes leur dégradation est similaire à celle des acides organiques.

- ✓ Les cires paraffiniques ne présentent aucun danger écologique. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes. Elles sont non toxiques et 100% recyclables.
- ✓ La masse volumique de la phase liquide des paraffines varie de 750 à 850kg/m<sup>3</sup>, et celle de la phase solide est de 800 à 900kg/m<sup>3</sup>.
- ✓ Les paraffines ordinaires sont souvent des mélanges d'hydrocarbures et ont un prix raisonnables. En fonction de leur composition, elles présentent des points de fusion variés. par contre les cires paraffiniques pures sont très couteuses [28].

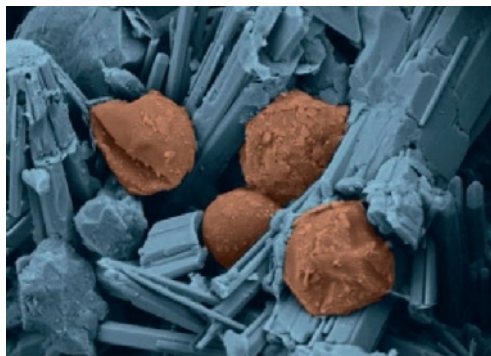


Figure III.3: Microbilles de paraffine dans une plaque de plâtre

- ❖ Les sels hydratés



## **Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités**

---

Les sels hydrates sont des composés obtenus par mélange d'un sel et d'une quantité d'eau en principe parfaitement définie. Un des plus connus est celui obtenu par mélange de chlorure de sodium et d'eau et qui forme l'hydrate  $\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ils représentent un groupe important de MCP et sans doute le plus étudié. Ils ont les caractères suivants [29]

- ✓ Une grande chaleur de fusion par unité de volume,
- ✓ Une grande conductivité thermique (environ le double de celle des paraffines organiques),
- ✓ Une faible variation de volume pendant le changement de phase,
- ✓ Une bonne compatibilité avec le plastique,
- ✓ Une certaine corrosivité,
- ✓ Une certaine toxicité,
- ✓ Trois comportements lors de la fusion : fusion congruente, semi congruente et non congruente.

### **III.2.3. Méthodes de conditionnement des MCP dans les applications de stockage thermique**

Il existe trois (03) méthodes d'intégration des MCP dans le bâtiment [27]:

- ✓ L'incorporation directe .
- ✓ L'immersion( ou imprégnation)
- ✓ L'insertion de capsules

#### **III.2.3.1.L'incorporation directe**

On incorpore directement le MCP au mélange lors de la fabrication du béton. C'est le procédé le plus pratique et le moins cher. Le succès de ce procédé dépend de deux conditions essentielles:

L'introduction du MCP dans le mélange:

- ✓ Ne doit pas interférer avec le processus d'hydratation.
- ✓ Ne doit pas affecter la résistance du liant dans le béton ni provoquer de réaction entre les composants du mélange et /ou avec le MCP.[30]

## **Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités**

---

### **III.2.3.2.L'immersion**

Le procédé consiste à plonger les blocs de béton dans le MCP liquide. C'est un procédé flexible qui permet une production en série et qui permet d'utiliser des blocs usuels. Néanmoins cette technique est plus onéreuse que l'incorporation directe.

Dans ce procédé, les échantillons de béton et de MCP ont été portés à 80°C avant immersion pendant 12 minutes. Les échantillons ont ensuite été immergés à différents intervalles de temps (1, 8, 30 et 60 minutes ) après la coulée.

### **III.2.3.3. L'encapsulation**

Cette méthode est une variante du procédé d'incorporation directe. Les capsules doivent posséder de bonnes propriétés de transfert de chaleur, doivent résister au procédé de fabrication, au transport, à la construction et à l'utilisation. On distingue la micro-encapsulation .[31]

#### **❖ La micro-encapsulation**

La micro-encapsulation regroupe l'ensemble des techniques permettant l'obtention de particules dont la taille s'échelonne entre 10nm et 1000um contenant une substance active solide, liquide ou gazeuse [32].

La micro-encapsulation est un dispositif où les MCP sont enfermés dans des coquilles de petites tailles prenant différentes formes. L'avantage de MCP micro-encapsulés est qu'elle offre une grande surface d'échange. D'autre part, la faible conductivité thermique n'est pas un facteur limitant des transferts du fait des petites dimensions des microparticules. Par contre il peut arriver que des cycles de fusion-consolidation répétés induisent l'apparition d'un décollement entre le MCP et sa vésicule contenant et ainsi une augmentation forte et fortement préjudiciable de la résistance thermique vésicule-MCP. L'autre avantage des MCP micro-encapsulés est qu'ils sont aisés à manipuler et que leur intégration est adaptable aisément à tout système passif tels que des matériaux de construction de type béton, plâtre, panneau bois reconstitué ou système actif [33].

#### **❖ La macro-encapsulation**

## **Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités**

---

La macro-encapsulation est un dispositif où le MCP est emballé dans des contenants aux dimensions décimétriques à métriques ( tubes, sachets, plaques, cylindres, sphères,...). Ces MCP macro-encapsulés peuvent être utilisés comme parties constituantes d'échangeur de chaleur. Ils sont généralement fabriqués pour chaque application visée.

La faible conductivité thermique des MCP peut devenir dans le cas d'une macro-encapsulation, un élément imitateur des transferts. De plus une attention particulière est à apporter au décollement entre le MCP et son contenant qui peut apparaître après plusieurs cycles de fusion-consolidation[34].

### **III.2.4. Différentes utilisation des MCP dans le bâtiment**

Les MCP ont l'avantage supplémentaire de maintenir le confort thermique des bâtiments si une température de changement de phase appropriée est choisie. Ainsi les MCP utilisés dans l'habitat auraient une durée de vie égale ou supérieure à celle des bâtiments actuels. L'utilisation des MCP dans les bâtiments est ancestrale. Elle a pris un regain de plus en plus important au cours de ses dernières années du fait des éléments suivant[34]:

- ✓ La grande différence de consommation d'énergie entre les heures de pointe et les heures creuses, pour le rafraichissement (été) et pour le chauffage des bâtiments (hiver et saisons intermédiaire);
- ✓ L'utilisation croissante de l'énergie solaire: l'énergie solaire thermique est disponible à des moments qui ne coïncident pas nécessairement au besoin. Le stockage d'énergie thermique devient un moyen d'adapter la production et la consommation de cette énergie thermique solaire.

les MCP sont utilisés dans le bâtiment soit d'une manière passive, ou d'une manière active.

#### **III.2.4.1. Utilisation passive des MCP en bâtiment**

Il s'agit ici de l'utilisation des MCP par intégration de ceux-ci dans les divers éléments constituant un bâtiment: enveloppe du bâtiment, plafonds, plancher, parois, mobiliers,....etc. Le stockage et le déstockage d'énergie s'effectue au gré des

## **Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités**

---

échanges de chaleur avec l'air intérieur du bâtiment et l'environnement (air extérieur, rayonnement nocturne, etc...). Ces échanges sont passifs, c'est-à-dire non actionnés par un système mécanique, à l'exception parfois d'une ventilation nocturne forcée du bâtiment.[35]

La répartition des MCP dans les parois dépend des objectifs fixés[36]:

- Si l'on désire éviter les surchauffes de la surface extérieure des mur, on placera les MCP proche de la surface extérieur . la solution convient pour réduire la consommation d'énergie de refroidissement et pour maintenir le confort thermique conditionnez à l'intérieur du bâtiment dans les pays chauds pendant la période d'été.
- Si l'on désire réguler la température intérieure, on placera le MCP près de la surface intérieure.

### **III.2.4.1.a. Intégration des MCP dans l'enveloppe du bâtiment**

Ils sont en général installés dans les bâtiments pour contribuer à l'amélioration du rafraîchissement des résidences. Les structures les plus fabriquées sont:

Les plaques de plâtres, les enduits, les murs trombes à base de MCP et les bloc de béton.[37]

#### **❖ Les plaques de plâtres-MCP**

Les plaques de plâtres-MCP sont constituées en général d'un matériau de construction léger et du MCP. Les plaques de plâtres-MCP sont fabriquées en général soit par immersion de la plaque de plâtre dans le MCP, soit pas ajout du MCP lors de la fabrication de la plaque de plâtre. Ces plaques de plâtres-MCP sont fixées sur les murs sous la forme d'un sandwich composés d'isolant, de polystyrène et du plâtre-MCP.[33]

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

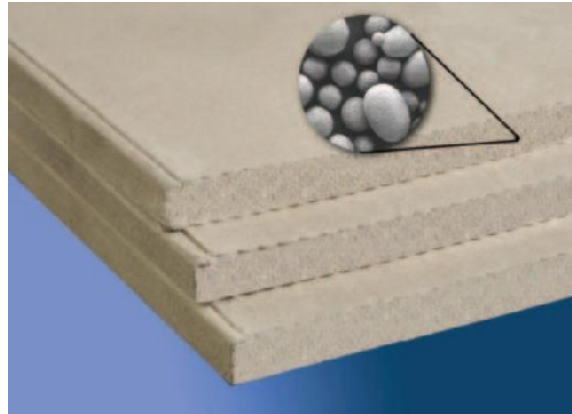


Figure III.4: Des microcapsules de MCP dans les plaques de plâtre.

### ❖ Les enduits à base de MCP

Le CSTC ( centre scientifique et technique de la construction) en Belgique dans le cadre du projet en collaboration avec trois autres centres de recherche(CRM, CENTEXBEL, CERTECH) a mis au point un enduit contenant 30% en masse de MCP.



figure III.5: L'enduit à base de MCP

Une couche de 3cm de cet enduit correspond à la capacité thermique de 8cm de béton, de 13cm de plâtre ordinaire ou de 29 cm de briques creuses[38].

### ❖ Les blocs de béton-MCP

Kondo et al[39] ont développé un mur contenant le MCP , qu'ils ont testé et ont étudié des cellules test. Ils ont également développé un programme de simulation pour calculer les variations de température, en particulier la température de la surface intérieure du mur, ainsi que la charge thermique pour étudier la possibilité de contrôler les fluctuations de température. Les murs contenant des le MCP présentent des fluctuations de températures les plus faible; un mur avec MCP de 24mm

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

d'épaisseur est comparable de point de vue thermique à un mur en béton de 160mm d'épaisseur.

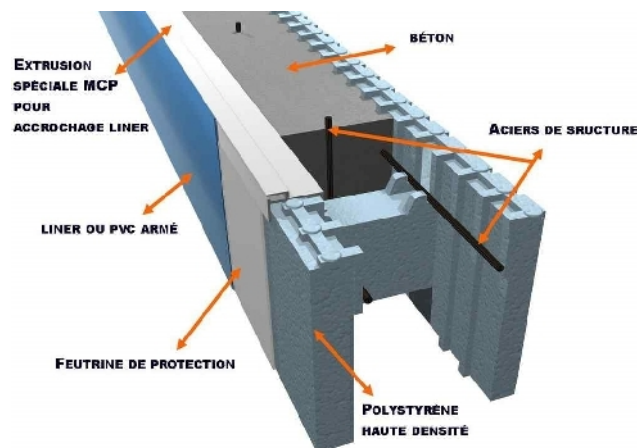


Figure III.6: Bloc béton-MCP

D'autres compartiments du bâtiment sont utilisés pour incorporer les MCP dans les bâtiments. La plupart sont encore au stade expérimental. Les travaux les plus avancés sont l'intégration des MCP dans les fenêtres, le plancher et le plafond[40].

### ❖ Les MCP dans les fenêtres

Les travaux sur les fenêtres à base de MCP les plus connus sont ceux du cabinet architectural Glass X fondé par Dietrich Schwarz. Il a mis au point les fenêtres Glass X. Ces dernières sont composées de quatre éléments au sein d'un seul ensemble fonctionnel: une isolation translucide, une protection contre les surchauffes estivales, un matériau à changement de phase intégré dans des conteneurs hermétiquement scellés en polycarbonate peints en gris pour favoriser l'efficacité de l'absorption. En général, c'est un MCP à base de sel hydraté avec une température de fusion aux alentours de 27°C qui est utilisé. Cette paroi est scellée par un verre de sécurité trempé de 6 mm qui peut être agrémenté d'une sérigraphie .

La capacité de stockage de l'énergie des fenêtres-MCP est dix fois plus importante que le béton ordinaire[40].

### ❖ Les MCP dans le plafond et dans le plancher

Les produits à base de MCP installés dans les plafonds et les planchers pour améliorer le confort du bâtiment sont en général des panneaux à base de MCP.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

Le panneau le plus connu se présente sous forme de panneaux avec 2 faces en aluminium dont les extrémités sont recouvertes de ruban adhésif en aluminium . Le matériau central est un mélange de copolymère et de cire de paraffine à 60% qui confère au panneau sa fonctionnalité. Il a une chaleur latente de stockage de  $315\text{kJ/m}^2$  et une température de fusion de  $22^\circ\text{C}$ . Ces plaques ont la même capacité de stockage de calories qu'un mur de béton de 5 à 7 cm. Ces panneaux peuvent se poser au plafond, dans les plancher et aux mur.

### III.2.4.2.Utilisation active des MCP en bâtiment

Les systèmes actifs sont des systèmes où la circulation du fluide dans les composants est actionné par un système mécanique (ventilateur, pompe, etc.). Ce caractère actif permet d'utiliser la capacité de stockage et /ou déstockage d'énergie à la demande, c'est-à-dire de façon non subie. Les systèmes actifs sont composés en général de trois éléments[24]:

- L'échangeur de stockage de l'énergie thermique de chaleur latente: LTHES ( latent heat thermale Energy Storage) contenant les MCP. C'est l'élément central du dispositif de stockage;
- Le circuit de circulation du fluide (souvent de l'air parfois de l'eau) caloporteur;
- Un ventilateur ou une pompe qui détermine le débit de fluide dans les LTHES.

Les systèmes actifs de types échangeurs de chaleur permettent d'améliorer le confort des bâtiment en faisant circuler de l'air frais (rafraichissement ) ou de l'air chaud (chauffage) dans les bâtiments en fonction de la demande.

Ils fonctionnent de la manière suivante:

#### a -Assistance au rafraichissement des bâtiments

Pendant la journée, on fait circuler l'air chaud du bâtiment dans un système actif. Ce dernier contient des MCP solidifiés. Ces derniers soumis à une température supérieure à leur température de fusion vont fondre en absorbant la chaleur de l'air. Ensuite, on réinjecte cet air rafraichi dans le bâtiment. pour solidifier le MCP, durant la nuit on fait circuler l'air extérieur au bâtiment "frais" qui a une température inférieure à la température fusion du MCP.

## **Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités**

---

### **b-Assistance au chauffage des bâtiment**

Le principe est le même mai le fonctionnement est inverse la journée, on fait circuler l'air chaud du bâtiment (ou issu d'un système de chauffage, à source d'énergie solaire ou électrique par exemple) ce qui permet de stocker la chaleur. On réchauffe le bâtiment en faisant circuler l'air frais de ce dernier dans ces échangeurs quand c'est nécessaire pendant la nuit (généralement).

Au cours de ses vingt dernières années, différents auteurs ont menés des travaux pour avoir les meilleurs systèmes actifs de type d'échangeur de chaleur Air-MCP. Parmi ses travaux, il ressort deux familles dont les travaux ont bien avancés. Il s'agit des systèmes d'échangeurs à Air-MCP avec des MCP en plaques et ceux contenant des MCP disposés en amas[24].

### **III.3. Matériaux autonettoyant**

#### **III.3.1.Introduction**

Le début du XXIe siècle est marqué par des constats préoccupants : émissions polluantes, raréfaction des ressources naturelles ...Les progrès de la science quant aux nanotechnologies offrent de nombreuses perspectives pour y remédier. Certains envisagent même une révolution technologique. Les nanotechnologies sont donc un enjeu majeur dans la recherche et le développement.

On utilise aujourd'hui plusieurs méthodes pour décontaminer et dépolluer l'air environnant : l'absorption, l'adsorption, l'incinération, la biofiltration, et la photocatalyse. Cependant, la méthode ne consommant pas d'énergie et ne produisant aucun sous-produit nocif pour l'environnement est la méthode la meilleure. L'efficacité de ces différentes techniques de dégradation des polluants organiques dépend de leur débit et de leur concentration[41].

C'est dans ce contexte que les scientifique ont pensé à donné naissance aux matériaux autonettoyant, un concept qui en laisse plus d'un rêveur .Les matériaux autonettoyant utilisent le principe de la photocatalyse; La photocatalyse est un phénomène naturel dans lequel une substance, appelée photocatalyseur initie une réaction chimique sous l'action de la lumière.

Le photocatalyseur en utilisant l'énergie lumineuse, l'eau et l'oxygène de l'air, engendre la formation de molécules très réactives capables de décomposer par



## **Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités**

---

oxydoréduction certaines substances organiques et inorganiques présentes dans l'atmosphère en composés inertes.

### **III.3.2. Pourquoi la photo catalyse ?**

Etymologiquement, le terme photocatalyse est issu de trois mots grecs : **Photos** (lumière), **kata** (vers le bas ou l'arrière) **et lysis** (dissolution ou décomposition).

La photocatalyse , à priori beaucoup d'avantage : son faible coût, son efficacité de minéralisation des polluants, la faible consommation en énergie qu'elle nécessite ,et la variété des polluants qu'elle peut dégrader; l'efficacité des procédés de dépollution dépend du débit et de la concentration des polluants et par propriété, la photocatalyse est plus appropriée au traitement de l'air dans des volumes réduits (faible charge et faible débit), c'est-à-dire à des échelles qui ne dépassent pas celles des dégagements d'effluents par les automobiles et transports en commun ce qui est déjà considérable.[41]

### **III.3.3. Les caractéristiques de toute photocatalyse sont les suivantes :**

- ✓ Transfert des molécules réactives dispersées dans le fluide vers la surface du catalyseur
- ✓ Adsorption des molécules réactives sur la surface du catalyseur
- ✓ Réaction sur la surface de la phase adsorbée
- ✓ Désorption des produits
- ✓ Eloignement des produits de l'interface fluide/catalyseur

Pour éviter de long discours un schéma explicatif résume de façon simplifiée ces différentes étapes.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

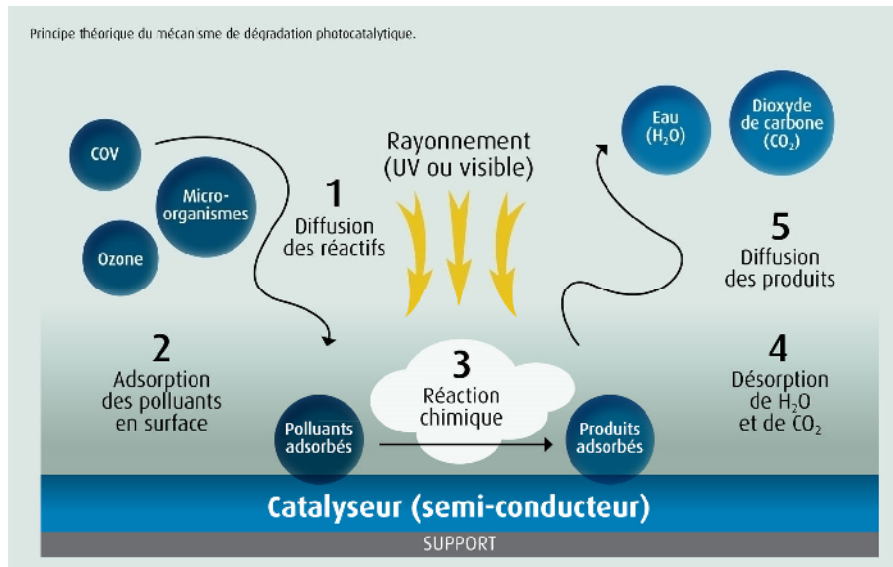


Figure III.7: Principe du mécanisme de dégradation photocatalytique

### III.3.4. Quel est le photo catalyseur qui permet de réduire les impacts de la pollution atmosphérique ?

C'est en 1967, que le Professeur Honda-Fujishima, alors encore étudiant au Japon, découvre la capacité photocatalytique du dioxyde de titane. En exposant à une lumière forte une électrode en dioxyde de titane plongée dans une solution aqueuse, il a remarqué la présence sur la surface de l'électrode de bulles qui disparaissaient avec la lumière... Il a constaté que les bulles étaient constituées de dioxygène sur l'électrode en titane et constituées de dihydrogène sur l'électrode en platine. L'eau s'était décomposée en dihydrogène et dioxygène ! Ce phénomène a été plus tard appelé photocatalyse ou "effet Honda-Fujishima".

Mais le simple fait d'utiliser la lumière comme source d'énergie n'a pas convaincu tout les chimistes de l'époque. Heureusement, Professeur Kazuhito Hashimoto et Docteur Toshiya Watanabe ont rejoint le groupe de recherche de Fujishima en 1989. Leur contribution a été considérable. Convaincus par la capacité oxydante du dioxyde de titane, ils ont couvert les murs et le plafond d'une salle d'opération d'un hôpital japonais, La concentration en bactérie de la salle d'opération avait clairement chuté...

Enfin, en 1995, ce même groupe de recherche baptisé "Toto" a exposé à la lumière une plaque de verre refourrée avec du dioxyde de titane et déposé ensuite des gouttelettes d'eau à sa surface pour constater que ces gouttelettes ne gardaient pas

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

leur forme sphérique mais s'aplatissaient. En effet, les zones les plus exposées au dioxygène étaient hydrophobes, tandis que les autres étaient hydrophiles. Ils constatèrent donc la formation d'un film uniforme d'eau à tête hydrophobe (c'est-à-dire à l'inverse des molécules d'huile à la surface de l'eau. Si, par exemple, de l'huile était sur cette surface de verre, l'eau se glisserait sous l'huile et la chasserait facilement, c'est exactement le principe des rétroviseurs auto-nettoyants !

Le dioxyde de titane - sous un éclairage ultraviolet comme celui émis par le soleil et dans des conditions atmosphériques - forme du dioxygène actif et des radicaux hydroxyles ( $\text{OH}^\circ$ ) en abondance et qui, par exemple peuvent réduire les oxydes d'azotes ( $\text{NO}_x$ ) et les oxydes de soufres ( $\text{SO}_x$ ) en solutions d'acide nitrique ( $\text{HNO}_3$ ) et sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Lors de cette réaction, le catalyseur n'est ni consommé ni altéré. Cette réaction présente beaucoup de similitude avec la synthèse chlorophyllienne. Ainsi ces deux types de gaz connus pour leur nocivité et notamment dégagés par les pots d'échappement sont rendus acides par l'action catalysatrice du  $\text{TiO}_2$ . [41]

### III.3.5. la photocatalyse UV/ $\text{TiO}_2$

#### III.3.5.1. Principe

La photo-catalyse consiste à irradier un semi-conducteur, généralement du dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ), à l'aide d'un rayonnement ultraviolet (UV) produit naturellement via la lumière solaire ou artificiellement à l'aide d'une lampe UV. Electro - chimiquement parlant, la méthode repose sur un processus électronique qui se produit à la surface du catalyseur, le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ). [42]

On peut, de manière succincte, schématiser le processus en quatre étapes successives :

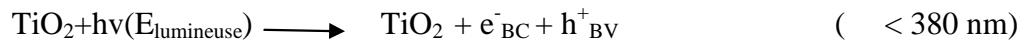
a) Production de paires électron / trou :

le dioxyde de titane est un semi-conducteur qui possède une structure électronique à bande interdite. Le processus photo -catalytique repose sur l'excitation du  $\text{TiO}_2$  par des photons de toutes longueurs d'onde de la région des ultraviolet (  $< 380 \text{ nm}$ ). Ainsi, s'il est soumis à un rayonnement de photons d'énergie au moins égale à celle de la bande interdite, un électron du semi-conducteur peut passer de la bande de valence (BV) à une orbitale vacante de la bande de conduction (BC). Il y a alors

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

création d'un site d'oxydation (trou  $h^+$ ) au niveau de la bande de valence, et d'un site de réduction (un électron  $e^-$ )

dans la bande de conduction.



b) Séparation des électrons et des trous :

La durée de vie des paires ( $e^-/h^+$ ) est de quelques nanosecondes et leur recombinaison s'accompagne d'un dégagement de chaleur. Dès lors, en l'absence d'accepteur et de donneur d'électrons appropriés, une réaction de recombinaison trou/électron très rapide a lieu. Pour que l'oxydation photocatalytique soit efficace, il faut bien entendu éviter cette recombinaison. Ceci est rendu possible par le transfert et le piégeage des charges libres vers des niveaux d'énergie intermédiaires grâce à des irrégularités de structure ou via des molécules adsorbées. Ainsi, le piégeage des électrons peut intervenir au niveau de sites défectueux du catalyseur ( $\text{Ti}^{3+}$  au lieu de  $\text{Ti}^{4+}$ ) ou des molécules d'oxygène adsorbées. Dans ce dernier cas, les molécules d'oxygène forment des espèces  $\text{O}_2^-$  très réactives. Le schéma résume les différentes réactions au niveau du catalyseur ( $\text{TiO}_2$ ) tout en expliquant la dégradation des polluants.

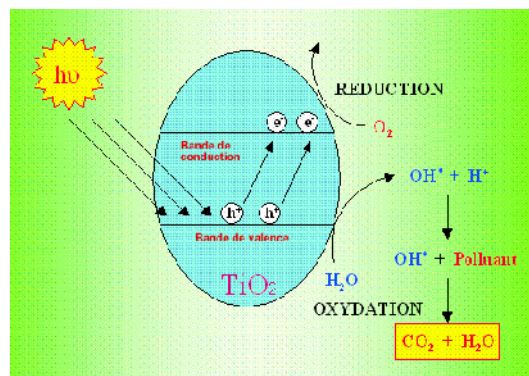


Figure III.8: Schéma résumant les réactions au niveau du catalyseur

c) Réactions d'oxydation et de réduction :

Les charges créées migrent à la surface du catalyseur et réagissent avec des substances adsorbées susceptibles d'accepter ou de donner des électrons. Ce sont ces réactions d'oxydation ou de réduction qui sont intéressantes pour la dépollution.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

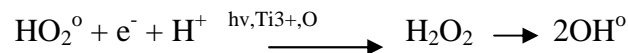
D'un côté, les électrons réagissent avec des accepteurs d'électrons tels que l'oxygène adsorbé pour former des radicaux super- oxydes :



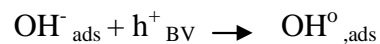
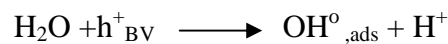
En présence de protons adsorbés, le radical superoxyde peut mener à la formation d'un radical hydroperoxyde puis de peroxyde d'hydrogène décomposé à la surface du catalyseur en radical hydroxyle sous l'action des radiations, ou par réaction avec  $\text{Ti}^{3+}$  ou  $\text{O}_2^{\circ-}$ :



et



D'autre part, les trous  $h^+$  réagissent avec certaines espèces susceptibles de donner des électrons. Ainsi, ils forment des radicaux hydroxyles et  $\text{R}^{\circ}$  en oxydant ces donneurs d'électrons tels que l'eau, les anions  $\text{OH}^-$  et les produits organiques  $\text{R}$  adsorbés à la surface du semi-conducteur :

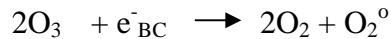
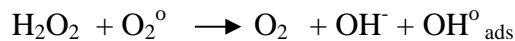
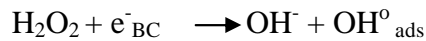


d) Dégradation des molécules organiques :

A leur tour, les radicaux générés ( $\text{OH}^{\circ}$ ,  $\text{O}_2^{\circ}$ ,  $\text{R}^{\circ}$ ) sont très oxydants et peuvent décomposer des composés (polluants réfractaires, pesticides, herbicides, colorants, etc.) adsorbés sur la surface du semi-conducteur, jusqu'à les minéraliser. Les produits finaux de ce mécanisme sont principalement de l'eau et du dioxyde de carbone. Comme signalé plus haut, la réaction de recombinaison trou/électron est un facteur qui limite l'efficacité de cette méthode. C'est pourquoi de nombreuses recherches sont effectuées pour augmenter l'efficacité photo-catalytique. Dans cette optique, on peut envisager le dopage du semi-conducteur par d'autres métaux (pour élargir la gamme d'adsorption vers le visible) ou encore l'addition au milieu réactionnel d'accepteurs d'électrons (ozone, peroxyde d'hydrogène,  $\text{Fe}^{3+}$ , ...) limitant la recombinaison des charges et renforçant considérablement la formation de radicaux  $\text{OH}^{\circ}$ .

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---



### III.3.6. Dans quels matériaux peut-on trouver ce photocatalyseur?

Grâce à la photo-catalyse du dioxyde de titane, on a pu fabriquer disant des structures auto-nettoyantes "**des vitres** et , **des bétons** « mange-pollutions » et aux propriétés non-salissantes ce qui allongerait le délai entre les opérations de ravalement, de maintenance et de nettoyage des bâtiments.

#### III.3.6.1. Les vitres autonettoyantes

*"Et si la corvée de nettoyage des vitres disparaissait et que vous confiez le nettoyage de vos fenêtres à mère nature!"* Le rôle des vitres est de laisser pénétrer la lumière du jour dans la maison, il faut donc les nettoyer régulièrement. En effet, les vitres sales assombrissent les pièces et poussent à solliciter davantage l'éclairage artificiel, ce qui n'est pas économique ainsi que la corvée de lavage des vitres s'avère fastidieuse, d'autant qu'elles ne sont pas toutes accessibles aisément. A cela, s'ajoute l'achat de ces produits d'entretien, qu'en outre, on supporte plus ou moins bien lorsqu'on les vaporise. Le vitrage autonettoyant est donc une solution intéressante surtout quand on a beaucoup de surface vitrée.[43]

##### III.3.6.1.a. Le concept du vitrage autonettoyant

Le verre autonettoyant est un verre « float » ,procédé « float » désigne le procédé moderne de fabrication du verre plat ordinaire sur lequel on dépose lors de sa fabrication une couche photocatalytique spéciale à base de dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) sur sa face extérieure. La fonction autonettoyante des verres du même nom repose sur la conjugaison de deux propriétés des couches microscopiques de  $\text{TiO}_2$  déposées sur du verre : la photocatalyse et la super-hydrophilie.[44]

- ❖ La photocatalyse: Les matières organiques qui reposent sur la vitre sont décomposées par la lumière du soleil.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

- ❖ L'hydrophilie: Ce type de verre a de plus des propriétés hydrophiles qui font que l'eau tombant sur la plaque de verre se répartit de manière homogène sur la vitre, lave le verre, au lieu de le laisser sale comme un verre ordinaire. En effet, au lieu de tomber en gouttes sur le verre, l'eau constitue progressivement un film qui, gravité oblige, finit par glisser le long du verre en le lavant. Ainsi, toute l'eau s'écoule, il n'y a pas évaporation et donc pas de traces.[44]

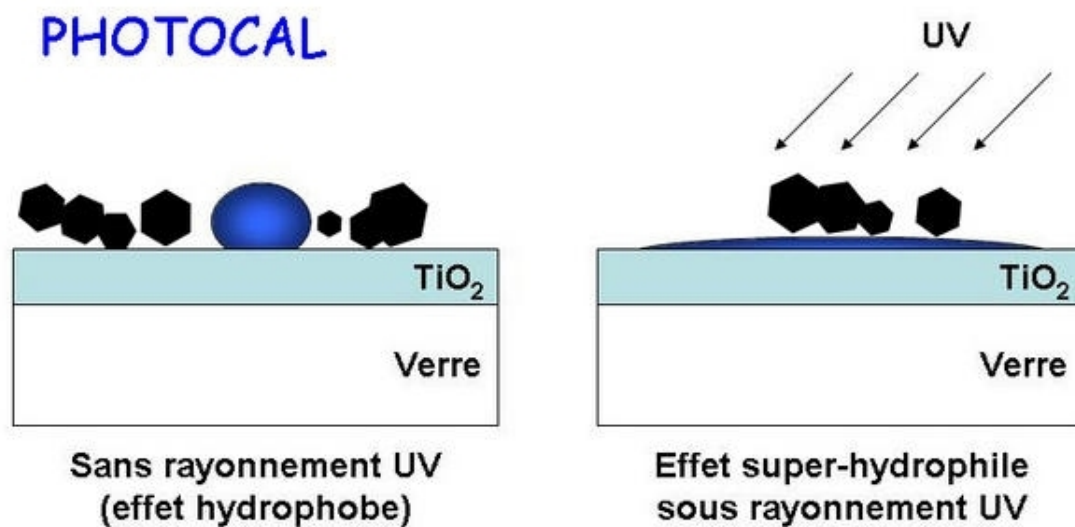


Figure III.9: phénomène dégradation des polluants sur les verres

### III.3.7. Les avantages des du revêtement photo catalytique sur les verres :

- ✓ Rend les matériaux en verre des bâtiments et constructions **"autonettoyants"**,
- ✓ Préserve leur aspect neuf en absorbant les rayons UV du soleil et en protégeant les surfaces contre leurs agressions,
- ✓ Protège les surfaces des dommages causés par la pollution, les pluies acides, le calcaire,
- ✓ Décompose les polluants organiques sur les surfaces ( huiles, graisses, dioxines, pesticides, ammoniacques, fumées d'échappement des véhicules et usines,...),
- ✓ Dépollue l'air ambiant par la destruction des COV, NO<sub>x</sub>,

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

- ✓ Empêche les tâches sur les vitrages provoquées par les gouttes d'eau de pluie après séchage,
- ✓ Empêche l'adhérence électrostatique des poussières,
- ✓ Empêche la formation de buée
- ✓ Idéale pour les toits et vérandas (endroits difficilement accessibles)

### III.3.8. Domaine d'utilisations et quelques réalisations :

Il s'utilise notamment dans des lieux où l'environnement est pollué, comme les zones industrielles, urbaines, aéroportuaires, etc., et surtout exposé au soleil dans les applications suivantes :

- ✓ façades vitrées
- ✓ vérandas et verrières
- ✓ portes d'entrée
- ✓ toitures
- ✓ panneaux solaires
- ✓ matériaux d'éclairage
- ✓ abris de piscine



Figure III.10: Pyramide de Louvre à Paris



## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---



Figure III.11: Stade cowboy stadium au Texas.

### III.4. Une nouvelle formulation pour un matériau audacieux , le HP2A

#### III.4.1. Introduction

Le terme Géopolymère faisant parfois débat dans la communauté scientifique sur la nature « géopolymérique », ou pas, de telle invention, il a été décidé d'utiliser le terme plus générique d'activation alcaline et l'invention a donc été nommée « HP2A » « High Performance Alkaline Activation ». Le terme « HP2A » a été déposé à l'INPI. L'histoire de cette technologie, capable de recréer de la pierre à partir de l'argile est surtout celle d'une rencontre. Entre David Hoffmann, ingénieur spécialisé dans la chimie des liants minéraux et Julien Blanchard, directeur d'Argilus, une entreprise fabriquant de l'enduit et des matériaux écologiques, ils sont partis d'un constat simple : le secteur de la construction représente 20% de la production de CO<sub>2</sub> dans le monde et épuise le sable marin dans la mesure où le sable est nécessaire pour créer le béton. En d'autres termes, avoir une empreinte environnementale allégée dans un monde où l'un des enjeux fondamentaux est la lutte contre le réchauffement climatique. Le HP2A est une innovation majeure, une rupture technologique qui représente une formidable opportunité pour la mutation économique nécessaire au regard des enjeux bioclimatiques mondiaux.

#### III.4.2. Le HP2A répond aux besoins actuels et futurs

Il existe des alternatives aux matériaux de construction classiques mais elles ne répondent que partiellement aux exigences de performances nécessaires. De plus, leur coût économique élevé se révèle souvent une limite à une large utilisation. Pourtant, malgré les limitations techniques et économiques, de plus en plus de

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

personnes font l'effort d'essayer de construire en intégrant un maximum de matériaux à faible empreinte écologique. Cette tendance récente est de plus en plus marquée et montre le renforcement des préoccupations modernes en faveur de la protection de l'environnement. Cependant, pour que l'impact en soit suffisamment important pour être mesurable, il faudrait que cette démarche soit accessible au plus grand nombre. Ainsi, pour qu'un produit de construction puisse véritablement permettre un développement durable de notre société, il faudrait qu'il réponde favorablement aux trois critères suivants :

- ✓ Un coût économique réaliste
- ✓ Des performances techniques élevées
- ✓ Une empreinte écologique faible

Ces trois grands axes ont formé la base du cahier des charges lorsque David Hoffmann et Julien Blanchard, ont décidé de mettre en commun leur expérience pour développer des liants à basse empreinte carbone compatibles avec les besoins actuels. A ces objectifs de départ a été ajoutée l'applicabilité industrielle car le réalisme économique fait qu'un projet ne peut s'inscrire durablement sans une application à grande échelle.

Une période de plusieurs mois a suivi pendant laquelle de très nombreuses recherches en laboratoire et d'essais industriels ont été effectués. Un système de formulations a progressivement été mis au point pour aboutir à la technologie HP2A. Ce système de formulations respecte les trois objectifs qui avaient été fixés au départ et constitue donc, en quelque sorte, les fondations à partir desquelles les applications pratiques futures pourront être réalisées.

Cette culture de formulation est très bien relayée par une grande connaissance des ressources minérales valorisables. Ceci permet de proposer le développement de liants adaptés dont la formulation peut être ajustée au grès du cahier des charges d'exploitation tout en recourant à l'utilisation de ressources économiquement pertinentes.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

### III.4.3.L'argile, un matériau d'hier et de demain

Depuis des millénaires, les argiles, richesses indispensables des grandes plaines alluviales, ont accompagné le développement de l'habitat, de l'outillage et des instruments, des matériaux, de l'art et de la communication, de la santé et de l'hygiène. L'argile est le matériau de construction le plus ancien du monde mais aussi le plus moderne. Depuis des milliers d'années, l'humanité se sert de l'argile comme matériau de construction. La raison est simple : la terre s'utilise sans avoir à y ajouter beaucoup d'énergie ou de processus chimique, elle est tout naturellement un bon matériau de construction. C'est le matériau le plus expérimenté dans l'histoire de l'humanité qui mérite d'être encore étudié et surtout valorisé. **La technologie HP2A remonte le temps en recréant une pierre à partir de l'argile.**

#### a)-Qu'est ce qu'une argile ?

L'argile est une matière première naturelle. Elle naît de la désagrégation pendant des millions d'années des roches. Historiquement, en géologie et sciences du sol, le terme argile correspond à l'ensemble des minéraux présentant une taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$  dans une roche.



Figure III.12: L'argile, résultat d'une désagrégation

#### b)-Où la trouve - t -on?

Sur le plan géologique, nous trouvons de l'argile partout sur la planète. Une importante partie du sous-sol français et du monde est composé de terre argileuse. Il s'agit d'un des meilleurs matériaux de construction, durable et naturel. L'argile recouvre plus de 75 % de la surface du globe.

## **Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités**

---

### **III.4.3.1. HP2A et Argile**

L'argile représente une des matières premières qui composent les liants HP2A. Les sources d'approvisionnement sont multiples et variées. En effet, l'argile n'est pas disponible uniquement dans des carrières d'argile qui nécessitent, pour leur exploitation, des autorisations préfectorales sur le territoire national. L'argile est aussi un coproduit généré dans beaucoup de carrières de sable (lors du lavage) par exemple, ou dans des centres de recyclage pour matériaux issus de la déconstruction et de la démolition.

À ce jour, cette argile n'est pas valorisée ou sert à quelques travaux secondaires pour étanchéifier des étangs ou des digues par exemple. Cette situation est similaire à l'échelle européenne voire mondiale[45].

La construction représente une fraction non négligeable de la production de gaz à effet de serre dans le monde notamment du fait de l'utilisation de ciment Portland. En effet, ce type de ciment, bien que performant et ayant rendu de nombreux services, nécessite, pour sa fabrication, d'une part, la consommation de nombreuses ressources et, d'autre part, produit une quantité non négligeable de polluants responsables, entre autres, du réchauffement climatique et des pluies acides. De plus, dans le mix combustible utilisé pour sa fabrication, il y a une part très importante de déchets dangereux. Enfin, sa durée de vie, bien que longue, est limitée par les multiples dégradations, notamment liées à la pollution atmosphérique, qu'il peut subir au cours du temps. Toutes ces particularités font que le ciment Portland s'inscrit de moins en moins dans une démarche de développement durable.

### **III.4.4.L'empreinte écologique des liants HP2A répond aux besoins et aux attentes actuels:**

Cependant, sans doute pour la première fois dans son Histoire, l'Humanité est confrontée de manière globale à la fois à un épuisement générale des ressources et aux conséquences des impacts environnementaux de l'utilisation et de la transformation de ces ressources (réchauffement climatique, pluies acides, déforestation, bioaccumulation de micropolluants, etc...). La nécessité d'intégrer ces

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

impacts dans le calcul des coûts économiques d'un projet se fera donc de plus en plus pressante.



Figure III.13 : Epuisement des ressources et conséquences environnementaux

### III.4.5. Comparaison technologique ciment portland /HP2A

#### 1-Ciment portland

le ciment Portland a été inventé au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle par les Européens. Le principe de fonctionnement de ce ciment est de type « hydraulique » ce qui signifie qu'il nécessite la présence d'eau pour que la réaction de durcissement ait lieu. Le ciment Portland de base est une poudre composée principalement de clinker Portland et d'un peu de régulateur. Le clinker Portland est obtenu par cuisson vers 1450°C pendant plusieurs heures d'un mélange de calcaire et d'argile dont la composition doit répondre à un cahier des charges précis et est éventuellement ajustée à l'aide d'additifs minéraux. Pendant la cuisson plusieurs phénomènes réactionnels se produisent qui aboutissent à la clinkerisation du mélange. Après refroidissement, le produit intermédiaire est ensuite broyé finement et additionné d'un ou plusieurs éléments pour lui donner ses propriétés finales.

Le ciment Portland contient ainsi plusieurs « phases » principales dont:

- Le silicate tricalcique anhydre, composant majoritaire, de formule brute  $(\text{CaO})_3.\text{SiO}_2$ , abrégée en notation cimentière C3S.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

- Le silicate di calcique anhydre, de formule brute  $(\text{CaO})_2.\text{SiO}_2$ , de notation cimentière C2S
- L'aluminate tricalcique anhydre, de formule brute  $(\text{CaO})_3.\text{Al}_2\text{O}_3$ , de notation cimentière C3A
- L'aluminoferrate tetracalcique anhydre, de formule brute  $(\text{CaO})_4.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ , de notation cimentière C4AF

Ces composés anhydres ont une solubilité plus grande que leur formes hydratées. Les réactions d'hydratation qui se produisent donc pour chacun de ces composés en présence d'eau aboutissent alors à une recristallisation ordonnée et forment ainsi un bloc. La nature exacte de ces réactions est très complexe mais il est admis que le principal composé structurant est le di silicate de calcium hydraté, communément appelé CSH. Pour le silicate tricalcique anhydre on a donc l'équation bilan suivante :

$$(\text{CaO})_3.\text{SiO}_2 + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}_3\text{SiO}_3.\text{H}_2\text{O} + 2 \text{Ca}(\text{OH})_2$$

En plus du silicate de calcium hydraté, on voit donc que l'on forme de la chaux hydratée, nommée Portlandite. La chaux donne au ciment son caractère alcalin (pH de 12.5), elle catalyse la réaction d'hydratation et stabilise l'hydrate de silicate de calcium formé.

Les bétons et les mortiers sont, à la base, un mélange de ciment Portland et de fines, sables et gravillons, globalement nommés « granulats ». Les hydrates structurants produits pendant les réactions d'hydratation « collent » ainsi les particules de granulats les unes aux autres pour former le bloc final.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités



Figure III.14: Schéma qui résume le processus de fabrication d'un ciment portland.

### 2-Le HP2A " des performances supérieures pour un impact réduit au dixième"

HP2A, un géo polymère avec une « Haute performance activation alcaline », est un procédé qui vise à reconstituer la pierre à partir de l'argile. Contrairement au ciment traditionnel, ce procédé n'a pas besoin de cuire la matière première (calcaire brûlé pour le ciment, argile non cuite pour le HP2A). Ainsi, les émissions de CO<sub>2</sub> provoquées par la cuisson sont évitées. On estime à des émissions de l'ordre de 50-100 kg pour le HP2A alors qu'elles oscillent entre 900 et 1000 kg pour le ciment Portland.[46].

Les géo polymères ont été inventés vers la fin des années 70 par le professeur Davidovits. Leurs propriétés en termes de durabilité, de performances mécaniques et de développement durable ont récemment mis ces liants de nouvelle génération sur le devant de la scène.

M. David HOFFMANN, a développé sur la base des géo- polymères, la technologie HP2A qui permet de réaliser industriellement ce type de liants à des coûts en accord avec la logique économique. La réaction de géo polymérisation est similaire dans son principe à la fabrication de polymères minéraux. En effet, pour fabriquer un plastique, on utilise souvent un copolymère, composé de grandes molécules contenant des sites réactionnels, sur lesquels on fait réagir un agent qui va provoquer

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

la réaction des molécules de copolymères entre elles selon un mécanisme appelé réticulation.

*"La technologie que nous proposons repose sur une réaction chimique qui permet de reconstituer un bloc dur à partir d'une matière argileuse. Nous l'avons appelé "HP2A", il s'agit de l'acronyme de "Haute Performance d'Activation Alcaline". Les argiles sont créées naturellement à partir de la pierre. Nous proposons une réaction moléculaire grâce à ce qu'on appelle des réactifs alcalins qui permettent de "remonter le temps". [Les métaux alcalins sont des éléments chimiques, il s'agit du lithium, du sodium, du potassium, du rubidium, du césium et du francium NDLR.] Ces réactifs permettent de durcir l'argile sableux pour en refaire une "pierre". Et cela à température ambiante grâce à une réaction moléculaire."* témoignage de M. David HOFFMANN pour Fance24.

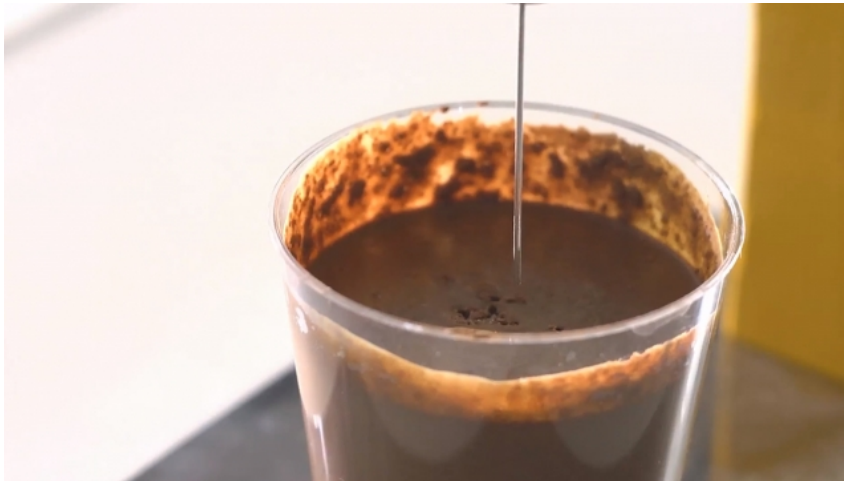


Figure III.15: La poudre d'argile durcit à température ambiante grâce à une réaction moléculaire

### III.4.6. Avantages techniques face au ciment portland.

- ✓ Au niveau de la vitesse de prise :

Un ciment Portland commence à durcir au bout de quelques heures mais le développement de résistances mécaniques importantes sont très progressives et se font sur plusieurs jours. Un béton HP2A commence à durcir après 15 à 120 minutes



## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

et les résistances mécaniques apparaissent beaucoup plus rapidement. Ainsi, en fonction des formulations, on considère que plus de 50% de la résistance à 28 jours d'un béton HP2A est obtenue dès la 1ère journée. Cette propriété permet un démoulage beaucoup plus rapide. Ce procédé breveté à l'échelle mondiale permet d'obtenir des performances mécaniques aussi satisfaisantes que le ciment Portland, mais dans un laps de temps réduit. Ainsi, le « ciment argileux HP2A » affiche une résistance à la compression supérieure à 35 MPa 5 jours seulement après que le béton soit coulé, contre moins de 20 MPa pour le ciment classique. 28 jours après leur formation, les deux bétons dépassent le seuil des 45 MPa.[46]

- ✓ Tenue au feu : on considère qu'un béton à base de ciment Portland se désagrège très rapidement dès 650°C. Les bétons à base HP2A, si tant est que les granulats soient adaptés, peuvent supporter plus de 850°C et jusqu'à 1200°C. De plus, la présence d'eau dite, zéolithique, confère aux produits réalisés à partir de la technologie HP2A des propriétés ignifuges.
- ✓ Résistance aux agents chimiques : la résistance aux agents chimiques est aussi un avantage bien connu de la technologie HP2A. Ainsi, contrairement au cas d'un ciment Portland, les ions sulfate et chlorure n'ont aucun effets destructeurs significatifs. On observe aussi une résistance bien plus importante aux attaques acides. Cette particularité est un avantage important en milieu marin ou dans l'industrie chimique.
- ✓ Passivation des aciers : le pH alcalin d'un ciment Portland qui protège les armatures métalliques a une durée limitée dans le temps. En effet, la chaux présente dans le béton Portland finit par se carbonater ce qui, à plus ou moins long terme, conduit à la corrosion des armatures et à la déstabilisation des édifices. Ce phénomène bien connu n'a pas lieu dans un béton à base HP2A puisque le pH alcalin se stabilise vers 11 ce qui est suffisant pour assurer la passivation des aciers.
- ✓ Perméabilité à la vapeur d'eau : la capacité importante d'échange en vapeur d'eau d'un béton à base HP2A permet de créer un décalage thermique qui améliore le confort intérieur. Ce phénomène n'est pas observé sur des bétons Portland.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

- ✓ Retrait au séchage : Le retrait d'un béton à base HP2A est bien plus faible que celui observé sur une base Portland. Cet avantage permet, par exemple, de réaliser des formes précises à l'aide de moules.

La technologie HP2A utilise des matériaux naturels, abondants, non issus de la pétrochimie. Sa consommation en ressources naturelles, calculée à l'aide de l'indice ADP, est très faible.[45]

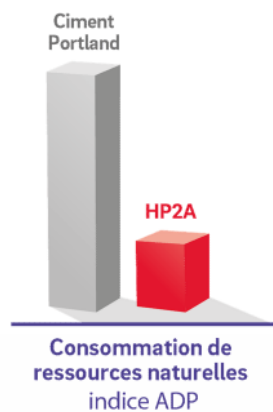


Figure III.16: Le tût de consommation des ressources naturelles HP2A/Ciment portland

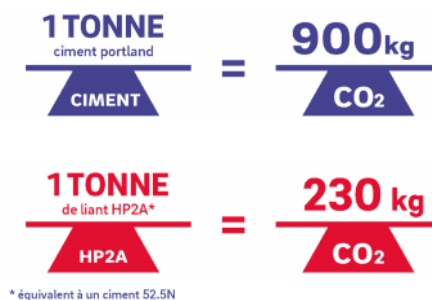


Figure III.17: HP2A réduit les émissions de CO<sub>2</sub>

### III.4.7. Un enjeu économique mondial

Pour fabriquer du béton, il suffit de mélanger ce HP2A avec de l'eau et du sable. Mais là encore, le "ciment argileux" présente un énorme avantage sur le "ciment calcaire" : il peut être utilisé **avec n'importe quel type de sable**, voire avec

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

des agrégats de construction ou des matières végétales comme le chanvre. A l'inverse, le "ciment calcaire" ne peut produire du béton que s'il est mélangé avec du sable dit noble, issu de rivières, de plages ou de carrières. C'est ce qui amène aujourd'hui des pays comme **l'Arabie Saoudite à importer du sable** pour produire le béton nécessaire aux constructions immobilières. Avec le HP2A, les Saoudiens n'auront plus qu'à **piocher dans leur désert** pour obtenir un béton aussi solide que celui que l'on connaît aujourd'hui. Et quand on sait qu'il se coule **100 tonnes de ciment à la seconde à travers le monde**, on mesure bien l'enjeu économique que représente cette innovation. [49] Le HP2A est aussi une technologie qui permet l'utilisation d'agrégats "non nobles" mais également des matières premières issues de l'économie circulaire et la suppression de la cuisson dans le domaine de la terre cuite est un atout remarquable de la technologie sur les plans économiques et environnementaux ainsi que la valorisation des argiles, non issues de carrières, permet d'envisager des implantations industrielles sur l'ensemble des territoires.

Le sable joue un rôle essentiel dans la protection des côtes pour limiter l'érosion, mais également dans l'équilibre des écosystèmes marins. Petit à petit, les appétits économiques ont grignoté au moins 75 % des plages du monde, englouti des îles entières en Indonésie (25) et aux Maldives (120). En Floride, 9 plages sur 10 sont en voie de disparition.

### ❖ Le sable marin est surexploité

Chaque seconde, 2400 kilos de sable marin sont extraits, soit 75 millions de tonnes par an, essentiellement pour la construction. Le sable et les granulats sont la 3ème ressource la plus utilisée après l'air et l'eau. Selon Denis Delestrac, réalisateur du documentaire SAND WARS, la disparition des plages aura lieu dès 2100 si nous ne changeons pas nos modes de construction.

Le sable est une ressource qui met des milliers et parfois des centaines de milliers d'années à se renouveler. C'est une ressource qui à l'échelle géologique est renouvelable, mais à l'échelle humaine ne l'est pas car on la consomme dans de très grandes quantités et à un rythme soutenu. En effet, pour fabriquer du béton, il faut 2 à 2.5 volumes de sable pour un volume de ciment. Et lorsque l'on sait que 100 tonnes

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

de ciment sont consommées chaque seconde à travers le monde, on imagine la quantité considérable de sable nécessaire pour la construction. [48]

L'alternative vient là encore du HP2A. Car l'autre avantage de cette technologie innovante est qu'elle ne nécessite pas de sable particulier. Du sable issu de démolition ou du sable de désert peut tout à fait convenir pour fabriquer du béton, contrairement au béton issu du ciment Portland qui nécessite du sable « noble » (de plage ou de rivière). Et pour rendre encore plus attractif ce nouveau procédé, ce ciment argileux peut être recyclé jusqu'à 40 ans après son utilisation : il peut servir de liant pour fabriquer à nouveau du béton, d'où un besoin en sable encore plus réduit. [46]

### ❖ Le HP2A, un liant multi-granulat

#### On peut obtenir des granulats

- ✓ En exploitant directement les alluvions détritiques non consolidés, que sont les sables et graviers des rivières
- ✓ Par concassage des roches massives : granites, diorites, basaltes, calcaires, quartzites
- ✓ En recyclant du béton pour les granulats de recyclage et artificiels.

Dans le monde, le commerce du sable et des granulats représente 54 milliards d'euros. Ils sont plus consommés que le pétrole dans le secteur du bâtiment. Les propriétés adhésives des liants HP2A permettent l'utilisation de nombreux granulats comme les sables de roche, les graviers, les matériaux de déconstruction recyclés mais également les sables des déserts.[50]

### III.5. Les nouveaux bétons

#### III.5.1. Introduction

Le béton a subi à travers le temps des innovations impressionnantes, les recherches sur les nouveaux bétons se sont considérablement accélérées depuis 20 ans et fournissent aujourd'hui des solutions innovantes tant en termes de conception que de mise en œuvre. Les bétons s'adaptent désormais à toutes les exigences des

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

concepteurs, aux contraintes des chantiers et aux agressions de l'environnement. Au fil des années, les caractéristiques du béton se sont diversifiées pour répondre à des utilisations de plus en plus complexes, à des besoins de résistance et de durabilité toujours plus importants.

### III.5.2. Présentation du béton classique

#### a- Définition et histoire

Le béton est un assemblage de matériaux de nature généralement minérale avec un dosage qui change en fonction des nécessités. Il met en présence des matières inertes, appelées granulats ou agrégats (graviers, sables, etc.), et un liant (ciment, bitume, argile), c'est-à-dire une matière susceptible d'en agglomérer d'autres ainsi que des adjuvants qui modifient les propriétés physiques et chimiques du mélange. Mêlés à de l'eau, on obtient une pâte, à l'homogénéité variable, qui peut selon le matériau, être moulée en atelier (pierre artificielle), ou coulée sur chantier. Le béton fait alors « prise », c'est-à-dire qu'il se solidifie

#### b-Quelle est la différence entre le béton et le mortier?

La recette est en fait presque la même ! Mais contrairement au béton, le mortier est **dépourvu de graviers**. Ils ne jouent donc pas le même rôle. Le mortier est plus souvent utilisé comme matériau de liaison mais on peut également faire appel à lui pour réparer ou enduire.

#### c- Les composants du béton

**Le ciment** : Le ciment est le liant hydraulique par excellence. Ce dernier est généralement composé de calcaire et d'argile. Il fait partie des principaux composants du béton, liant ses constituants entre eux, et lui confère certaines caractéristiques essentielles telles que sa résistance. La composition du ciment peut varier en fonction des différents types de besoins, ce qui le divise en plusieurs catégories :

- ✓ Les CEM I (ciment Portland) est un ciment adapté pour la conception de béton armé ou précontraint car il offre un niveau de résistance élevé.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

- ✓ Les CEM II A ou B (ciment Portland composé) ont pour particularité d'être très maniables. Ils sont donc utilisés dans les travaux d'usage courant tels que pour les chapes traditionnelles ou bien pour les enduits simples.
- ✓ Les CEM III A, B ou C (ciment de haut-fourneau) sont adaptés à des environnements difficiles, ils sont réputés pour être durables.
- ✓ Les CEM IV A ou B (ciment de type pouzlanique) sont également adaptés à un milieu agressif, idéals pour des structures hydrauliques.
- ✓ Les CEM V A ou B (ciment composé) ont les mêmes propriétés physiques que les CEM III mais pas les mêmes constituants.

**L'eau de gâchage** : L'eau de gâchage est un élément indispensable lors de la conception du béton. Elle permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et rend également plus facile l'application du béton. L'eau utilisée doit être propre ! (Évitez d'utiliser de l'eau de mer) et prenez garde à ne pas l'ajouter avec excès sous risque d'altérer les performances de votre béton. En effet, cela pourrait diminuer sa résistance et sa durabilité.

**Les granulats** : Les granulats, d'origine naturelle ou artificielle, sont des grains minéraux de dimensions variables. En tant que principaux composants du béton, ils lui transmettent certaines caractéristiques techniques et esthétiques, notamment sa résistance. Le choix du type de granulats utilisé ne doit donc pas être fait à la légère car il aura une influence sur la durabilité de votre béton. On distingue alors différentes sortes de granulats : les fillers, les sables, les graves, les gravillons et les ballasts.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---



Figure III.18: Granulats utilisés pour formulation d'un béton

On classe les différents types de granulats en fonction de leurs dimensions, exprimées par la formule  $d/D$ .

$d$  = diamètre le plus petit du granulat.

$D$  = diamètre le plus grand du granulat.

**Les adjuvants :** Les adjuvants sont des produits chimiques ajoutés lors du malaxage du béton et faiblement dosés lors de la préparation (moins de 5% de la masse du béton). Ces produits offrent la possibilité d'améliorer certaines caractéristiques du béton telles que son temps de prise ou son étanchéité. Très répandus aujourd'hui, il existe différents types d'adjuvants qui vous permettront d'obtenir le béton de vos rêves.

La technologie du béton a ensuite peu évolué jusqu'à ce qu'en 1756, **John Smeaton**, dans le cadre de la reconstruction du phare d'Eddystone Rock, s'intéresse aux origines des chaux utilisées en association avec différents types de pouzzolanes. En 1818, **Louis Vicat** développe les premières chaux hydrauliques artificielles à partir d'argiles et de calcaires calcinés. Puis, en 1824 **Joseph Aspdin** produit le premier ciment Portland fait d'un mélange de chaux fine pulvérisée et d'argiles, porté à hautes températures. Même si l'association entre matériau cimentaire et acier apparaît en 1850 grâce à **J. Monier** qui a développé un mortier armé, elle ne sera utilisée avec succès que lors de la construction du premier pont en béton armé en 1889 (le Lake Alvord Bridge). Au début du 20<sup>ème</sup> siècle, en parallèle à la mise au

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

point du béton précontraint (1929), *Eugene Freyssinet* met en avant l'effet bénéfique de la vibration pour la mise en place des bétons fermes à l'état frais.[51]

Le béton a alors connu une évolution rapide pour devenir le matériau que nous connaissons aujourd'hui. La famille des bétons s'enrichit régulièrement avec des bétons aux nouvelles performances, ces nouveaux bétons répondent à tous les enjeux actuels en matière de mise en œuvre, de sécurité, de santé, de confort et d'esthétique, en alliant compétitivité économique, durabilité, et respect de l'environnement.

La nouvelle gamme des bétons comprend en particulier:

- ✓ Les bétons auto-plaçant.
- ✓ Les bétons fibrés.
- ✓ Les bétons autonettoyants.
- ✓ les béton translucides.

### III.5.3. Béton Auto-plaçant:

#### III.5.3.A. Définition

Obtenir un parement esthétique de qualité nécessite un matériau facile à mettre en œuvre, homogène et stable et garantissant un bon remplissage du coffrage. Les travaux de recherche menés sur l'ouvrabilité des bétons ont permis la mise au point de bétons dits autoplaçants (BAP), répondant à ces critères.

Cette nouvelle famille de bétons a été développée afin d'obtenir un matériau se mettant en œuvre sans faire appel à la vibration, ce qui présente de nombreux avantages sur les chantiers, tant au niveau de la diminution des nuisances sonores que de l'amélioration des conditions de travail du personnel de chantier.

Les BAP sont particulièrement adaptés pour les ouvrages de grande hauteur ou de formes complexes et pour les structures très ferrillées. Ces bétons permettent d'obtenir des gains de productivité considérables sur chantier et, bien évidemment, offrent de très bons résultats en matière de qualité esthétique des parements.[52]

#### III.5.3.B. Histoire des BAP

Le concept des bétons autoplaçants est élaboré vers le milieu des années 80



## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

par des chercheurs de l'Université de Tokyo au Japon par le professeur OKAMURA. Cette découverte en matière technologique du béton suscita un énorme intérêt au niveau mondial. A la fin des années 90 on vit apparaître les premières applications en Suède, en France, aux Pays bas et en Suisse... Depuis son utilisation ne cesse de croître.

### III.5.3.C. Propriétés des BAP :

- ✓ Très fluides
  - ✓ Absolument homogènes,
  - ✓ Mis en œuvre sans vibration,
  - ✓ Ils présentent des résistances et des durabilités analogues à celles des bétons traditionnels ou à celles des Bétons à Hautes Performances mis en œuvre par vibration.
  - ✓ Hyper fluidité facilite ainsi le remplissage des coffrages et l'enrobage des éventuelles armatures, tout en conservant une homogénéité.
  - ✓ Une grande stabilité vis-à-vis de la ségrégation dynamique (en phase de coulage) mais aussi une fois en place (ségrégation "statique") afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement.
  - ✓ C'est un béton pompable.
  - ✓ Pour être utilisés en structure, ils doivent être conformes à la norme NF EN 206-1.
- [52]

### III.5.3.D. Formulation des bétons autoplaçants

La formulation des BAP fait appel à :

- ✓ **Des superplastifiants:** pour obtenir la fluidité souhaitée et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation. Les superplastifiants permettent d'obtenir une meilleure répartition des grains de ciment et assurent le maintien de la fluidité;
- ✓ **Un volume de pâte élevé:** Les frottements entre les granulats limitent l'étalement au remplissage des bétons. C'est pourquoi, les bétons auto-plaçant contiennent un volume de pâte (ciment + additions + eau efficace + air) important, typiquement de 330 à 400 litres/m<sup>3</sup>, dont le rôle est d'écartier les granulats les uns des autres;

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

- ✓ **Les agents de viscosité** empêchent le ressuage et limitent la ségrégation en rendant la pâte plus épaisse;
- ✓ **Une quantité de fines** (ciments, fillers calcaires, cendres volantes) élevée ( $\pm 500 \text{ kg/m}^3$ ) pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage;
- ✓ **Un faible volume de gravillons** afin d'éviter le "blocage du béton" dans les zones confinées (rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 voire inférieur). Les granulats ont en général un D max compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement;
- ✓ **Un ciment** (dosage à optimiser pour obtenir les performances souhaitées);
- ✓ **Un rapport E/C faible** et un dosage en eau limité,[52]

Ainsi en terme de constituants, la aussi on constate une différence entre le béton traditionnel (BO) et le BAP, en effet celui contient plus comme le montre la figure suivante :

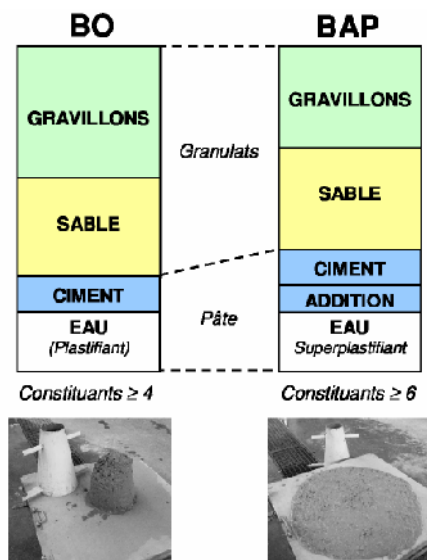


Figure III.19: Composition d'un béton ordinaire (BO) et d'un BAP  
Aspect à l'état frais d'un BO plastique et d'un BA

### III.5.3.E. Contrôle des Bétons Auto-plaçant

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP :

### ✓ La mesure d'étalement au cône d'Abrams

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow).

Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre.

Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné. Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.

Le matériel utilisé pour pratiquer cet essai est constitué d'un cône d'Abrams posé sur une plaque métallique. L'essai consiste à remplir le cône d'Abrams en une fois, puis à le soulever et à mesurer le diamètre moyen de la galette d'étalement obtenue.



Essai au cône d'Abrams

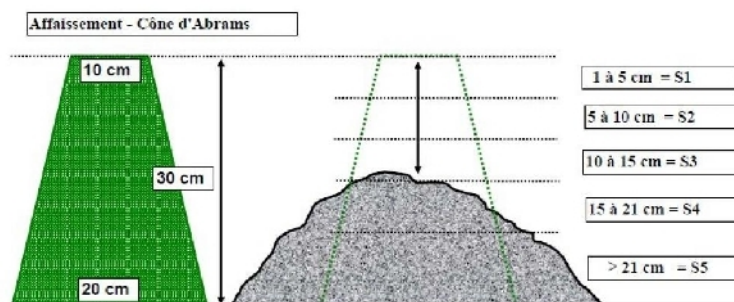


Figure III.20: classification des sols selon leur affaissement

### ✓ L'essai de la boîte en L, écoulement en milieu confiné

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée peuvent se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures.

La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe, à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure, ferrailage complexe ou simple). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H1) et horizontales (H2)

Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage  $H2/H1$  qui traduit la capacité à circuler en milieu confiné. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.

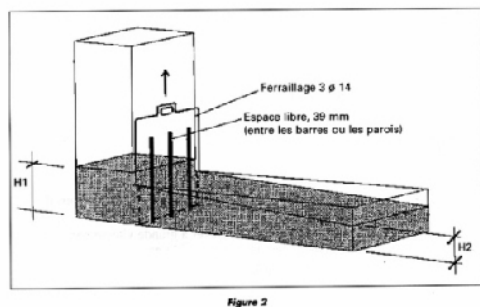


Figure III.21: Essai de la boîte en L

### ✓ L'essai de stabilité au tamis

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

Puis au bout de 2 minutes, on pèse le volume de laitance qui a traversé le tamis. Le pourcentage en poids de laitance par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 et 20 %.

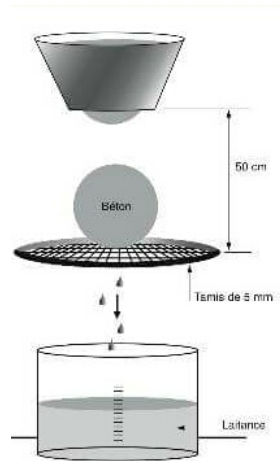


Figure III.22: Essai de stabilité au tamis

### III.5.3.F. Avantages des caractéristiques du BAP:

- ✓ Absence de vibration pour sa mise en place;
- ✓ Facilité et rapidité de la mise en œuvre;
- ✓ Amélioration des conditions de travail suite à l'absence de nuisances sonores ;
- ✓ Excellent remplissage des coffrages ;
- ✓ Béton de qualité et surface plane, régulière ;
- ✓ Possibilité de bétonner des formes complexes;
- ✓ Réduction/suppression des travaux de ragréage;
- ✓ Diminution des nuisances sonores.[53]



Figure III.23 : Exemples de mise en œuvre des BAP

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

Le BAP est majoritairement retrouvé dans les constructions au sol. Il est employé dans de nombreuses applications :

- Dalles
- Radiers
- Plancher chauffant
- Poteaux, poutres, voiles
- Fondations superficielles

Le BAP est régulièrement utilisé dans ces applications car il se met en place aisément et sans vibration, tout en ayant une excellente qualité

- **Précautions lors des utilisations courantes :**

- ✓ La vitesse de coulage du béton ne doit pas être excessive afin d'éliminer les excédents en air
- ✓ Ne pas ajouter d'eau
- ✓ Prévoir des coffrages étanches et qui résisteront à la poussée du BAP
- ✓ Limiter la hauteur de chute du béton lors du coulage
- ✓ Protéger le béton lorsqu'il est encore frais à l'aide de cures. Cela permettra d'empêcher l'eau de s'évaporer trop rapidement et de créer des fissures.[53]

- **réalisation:**



Figure III.24: Agence Rudy Ricciotti

## **Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités**

---

### **III.5.4. Les bétons fibrés à ultra hautes performances**

#### **III.5.4.A. Définition**

Derniers nés de cette génération de bétons, sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres. Leurs formulations font appel à des adjuvants superplastifiants et des compositions granulaires spécifiques ainsi qu'à des fibres (fibres métalliques, polymères ou minérales). Lors de la formulation de ce béton, des fibres sont ajoutées aux divers matériaux qui le composent. Pour obtenir un béton fibré à la hauteur des performances recherchées, vous devez obtenir un mélange dans lequel les fibres sont réparties de manière homogène. Ces fibres, de composition diverse, permettent d'obtenir un béton amélioré qui peut convenir à de nombreux usages. [53]

Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives. Les bétons fibrés à ultra hautes performances font l'objet de méthodes spécifiques de dimensionnement pour des applications structurelles (dalles, dallages industriels, voussoirs, pieux, etc.). Des méthodes d'optimisation de leur formulation ont été spécialement développées. Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques, différentes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques.

On distingue trois grandes familles de fibres:

- **Les fibres métalliques:**

acier; inox; fonte (amorphe).

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---



Figure III.25: Les fibres métalliques

- **Les fibres organiques:**

polypropylène; polyamide; acrylique.

mélange polypropylène/polyéthylène; kevlar; aramide; carbone.



Figure III.26: Les fibres organiques

- **Les fibres minérales:**

verre; wollastonite; basalte; mica.



## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

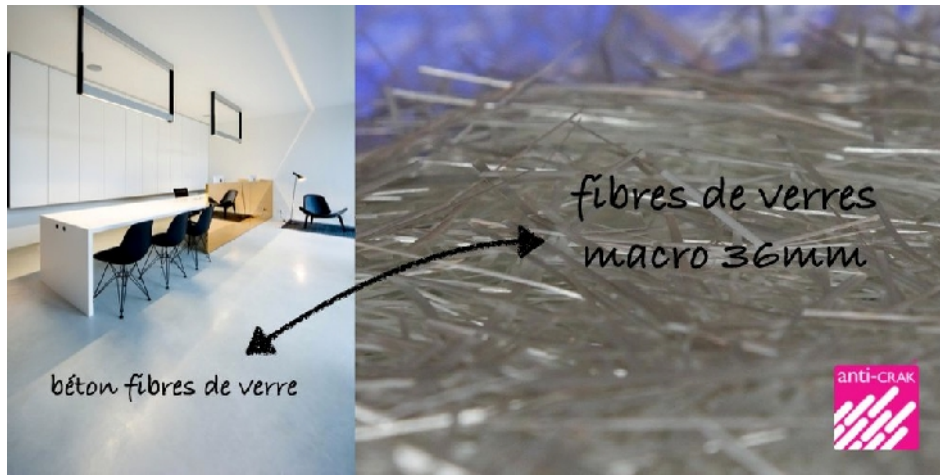


Figure III.27 : Les fibres minérales( fibres de verre)

- **Familles des fibres et leur caractéristiques [53]**

Familles de fibres	Matériaux	Caractéristiques
Fibres métalliques	Acier, Fonte, Inox	Bonne résistance à la flexion, à la traction et à la rupture. Réduction de la dimension des fissures.
Fibres organiques	Acrylique, Aramide, Carbone, Kevlar, Polyamide Polypropylène/Polyéthylène, Polypropylène	Réduction de la fissuration au jeune âge (retraits plastiques). Fibres souples, ce qui améliore leur ouvrabilité. Peu résistantes aux températures élevées (140-170°C maximum).
Fibres minérales	Basalte, Mica, Verre, Wollastonite	Excellente tenue au feu (800°C maximum). Bonne isolation thermique. Permet la fabrication de parois très minces.

Figure 28:caractéristiques et familles des fibres

- **Le rôle des fibres:**

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures. Grâce à leurs propriétés mécaniques, les fibres, permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et d'offrir au concepteur une plus grande liberté architecturale. Elles, améliorent le comportement du béton au jeune âge. Le treillis anti-fissuration devient inutile, le béton est plus homogène et les retraits de dessiccation pendant la phase de prise sont limités. Elles confèrent aux bétons de nombreux atouts et caractéristiques. [54]

### III.5.4.B. Principe de formulation des BFUP

L'obtention de résistances élevées et de faibles perméabilités aux agents agressifs passe par une réduction très importante de la porosité et plus précisément du réseau des pores connectés, en jouant sur deux paramètres:

- ✓ Une teneur en eau extrêmement faible (rapport eau/ciment  $< 0,25$  voire  $0,20$ ) grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants qui déflocculent les particules fines.
- ✓ Une compacité maximale, obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulaires (classiquement quatre, qui incluent ciment, ultrafines, fillers et sable). La taille et la quantité des plus gros grains sont considérablement réduites (diamètre maximal variant de 1 à 7 mm). L'optimisation de l'empilement granulaire permet de diminuer le volume des vides. Les BFUP présentent donc une très faible porosité capillaire. Les ultrafines utilisées dans les BFUP sont en général des fumées de silice qui remplissent les espaces inter-granulaires optimisant la compacité du matériau, et qui réagissent grâce à leur pouvoir pouzzolamique avec la chaux issue de l'hydratation du ciment. Elles participent activement à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz. D'autres ultrafines peuvent être également utilisées telles que les microfillers calcaires ou siliceux et les pouzzolanes naturelles ou artificielles (métakaolins).

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

L'emploi d'adjuvants tels que les plastifiants réducteurs d'eau et les super-plastifiants fluidifiants permet de formuler les BFUP avec un très faible rapport Eau/Liant équivalent

Ces bétons offrent des performances exceptionnelles :[54]

- ✓ une très grande ouvrabilité ;
- ✓ des résistances caractéristiques à la compression à 28 jours très élevées comprises entre 130 et 250 MPa, ainsi qu'à la traction (valeur comprise entre 5 et 12 MPa) ;
- ✓ de hautes résistances à court terme (24 heures) ;
- ✓ une compacité très importante ;
- ✓ une durabilité exceptionnelle (ce qui permet de les utiliser dans des environnements très agressifs);
- ✓ une ductilité (déformabilité sous charge sans rupture fragile) importante ;
- ✓ une ténacité (résistance à la micro-fissuration) élevée ;
- ✓ un retrait et un fluage très faible ;
- ✓ une grande résistance à l'abrasion et aux chocs,
- ✓ une faible perméabilité ;
- ✓ des aspects de parements particulièrement esthétiques et une texture de parement très fine;
- ✓ une optimisation des frais de maintenance et d'entretien des ouvrages ;de nouvelles perspectives constructives.
- ✓ leurs très grandes résistances en compression mais aussi en traction ;
- ✓ leur fort dosage en ciment (700 à 1 000 kg/m<sup>3</sup>) et en adjuvants ;
- ✓ leur squelette granulaire spécifique (4 à 5 échelles de grains) et l'optimisation de leur empilement granulaire ;
- ✓ l'utilisation de granulats de faibles dimensions ;
- ✓ la présence de fibres (à un taux élevé de l'ordre de 2 à 3 % en volume).
- ✓ une résistance au Feu.

Les BFUP peuvent aussi être associés à de la précontrainte par pré-tension ou par post tension, ce qui permet d'accroître les performances mécaniques. Les diverses

## **Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités**

---

formulations des BFUP permettent de leur conférer des propriétés adaptées aux exigences spécifiques des projets

### **III.5.4.C. Domaines d'applications potentiels des BFUP:**

Les nombreuses qualités des BFUP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post tension, canalisations, conteneurs, ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, tours de refroidissement, murs de soutènement, dalles, structures triangulées, voussoirs de tunnels, etc.) ,qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée, etc.) et leur utilisation dans des applications innovantes jusque-là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux.

En règle générale les BFUP à base de fibres métalliques sont destinées à des applications structurelles, ceux à base de fibres organiques à des applications architectoniques (éléments architecturaux, panneaux de façade, corniches, parements d'ouvrage, lames pare-soleil, mobiliers urbains, panneaux acoustiques, sculptures, etc.).

Les BFUP sont utilisés aussi bien par l'industrie du béton pour constituer des produits préfabriqués que directement sur chantier. Ils sont en général autoplaçants et parfaitement pompables.

Résumons:

- ✓ Il peut être préfabriqué ;
- ✓ Il peut être projeté;
- ✓ Il peut être coulé en place à partir d'une benne ou d'un camion-toupie ;

### **III.5.4.D. Microstructure des BFUP et potentiel de cicatrisation**

Les BFUP sont des matériaux à structure micrométrique. La microstructure des BFUP est la clé de leurs performances. Elle leur confère une très faible porosité. Les composants des BFUP varient du millimètre au nanomètre

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

À grossissement relativement faible (200 fois), la pâte d'un BFUP laisse apparaître en clair des particules de clinker non hydraté qui jouent le rôle de micro granulats à surface très active et de haut module d'élasticité (120 000 Mpa). La phase grise interstitielle représente le mélange des silicates de calcium hydratés et de fumée de silice.

Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour l'hydratation complète du ciment. Les BFUP

possèdent ainsi une réserve de ciment anhydre qui leur procure un potentiel d'auto-cicatrisation en cas de fissuration. L'eau pénétrant éventuellement par les fissures va permettre la formation d'hydrates au sein des microfissures en réagissant avec les grains de clinker résiduel. Ce phénomène constitue un atout particulièrement intéressant en termes de durabilité pour ce matériau.

### Avantages et inconvénients du BFHP: [53]

Avantages:

- ✓ Facile à mettre en œuvre;
- ✓ Béton plus léger que le béton ordinaire;
- ✓ Béton plus durable;
- ✓ Remplacement total ou partiel des armatures traditionnelles passives (fibres métalliques);
- ✓ Diminution du risque de fissuration;
- ✓ Résistance au feu, à l'abrasion, aux chocs, à la traction et à la flexion;

Inconvénients:

- ✓ Le BEUP est plus cher que le béton ordinaire
- ✓ L'incorporation de fibres diminue l'ouvrabilité du béton, l'ajout de superplastifiant est alors recommandé.
- ✓ Il est interdit d'utiliser des fibres structurelles en zone de risque sismique modéré et plus.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

### III.5.4.E. Le béton fibré peut être une alternative au béton armé

Finalement, le béton fibré est un béton amélioré, renforcé par les fibres qui le composent. Pour la réalisation de dalles sur terre-pleins, de dallages industriels ou de fondations superficielles, il peut donc s'imposer comme un réel concurrent du béton armé. Ce dernier présente certains inconvénients, notamment au niveau de sa mise en œuvre qui est plus fastidieuse que celle du béton fibré. Le béton fibré parvient à séduire de nombreux utilisateurs car il s'avère être plus homogène et présente moins de microfissures en surface que le béton armé.[53]

- **Quelques exemples d'ouvrages construits en béton de fibres**

- ✓ Réalisation de 52700m<sup>2</sup> de chaussées de parking à l'aéroport de LAS – VEGAS (USA), avec 2% de fibres métalliques. L'épaisseur des chaussées était de 15cm, au lieu de 37,5cm pour un béton traditionnel.
- ✓ Réalisation de 33400m<sup>2</sup> de dalle flottante sur piste existante de la station aéronavale de TAMPA – NEVADA (USA), avec 2% de fibres métalliques.
- ✓ Réalisation de la piste de l'aéroport de TAMPA (USA), avec 1,5% de fibres métalliques.
- ✓ Consolidation de voûtes en briques des tunnels ferroviaires près de BIRMINGHAM (Angleterre).
- ✓

### III.5.5.Béton translucide:

#### III.5.5.A. Introduction:

De nouvelles histoires s'apprêtent à sortir des palettes des créateurs industriels et architectes se rejoignent à la lumière d'un matériau innovant, unique sur le marché, afin d'exprimer de nouvelles variations du béton, Pour zébrer les murs de traits de soleil, les idées se font plus captivantes et éclatantes, stimulées par la toute nouvelle transparence du béton... à la recherche d'un design sans précédent. Le nouveau béton translucide design constitue une invention inédite : une révolution. Pas de magie dans cette prouesse technologique, mais une savante formulation du ciment obtenue en incorporant des additifs à la matrice cimentaire. De l'obscurité

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

aux lueurs, du gris au scintillant, toutes les libertés esthétiques s'emparent du béton, à l'abri des ossatures. Les réalisations de prestige s'en inspirent déjà.

### III.5.5.B. Définition:

Le béton translucide est un matériau de construction en béton ayant la propriété de transmettre la lumière due à des aditifs intégrés. La lumière est conduite à travers le béton d'une extrémité à l'autre. Ceci résulte en un motif de lumière sur l'autre surface en fonction de la structure des fibres. Les ombres projetées sur un côté apparaissent comme des silhouettes à travers le matériau. Le béton translucide est utilisé dans l'architecture fine comme un matériau de façade et comme parement des murs intérieurs. Le béton transmettant la lumière a également été utilisé dans divers produits de conception. [55]

-Techniquement, comment est-il possible de faire passer de la lumière à travers du béton et Comment concilier la robustesse du ciment et la transparence du verre en un seul matériau ?

Diverses solutions ont été proposées ces dernières années conduisant au développement de ciments conduisant la lumière. Des innovations qui ouvrent la porte à des créations architecturales nouvelles tel que les bétons translucides. Les bétons translucides font appel à deux solutions:

La première consiste à modifier les formulations du béton au niveau des liants et des granulats, L'insertion de morceaux de verre ou encore l'injection de résine dans la matrice cimentaire permet de rendre le matériau translucide tout en conservant une résistance satisfaisante.

La deuxième technologie porte sur l'utilisation de fibres ou de guides optiques dans la matrice afin de laisser passer la lumière de part en part. [56]

### III.5.5.C. Histoire d'un béton de nouvelle génération

Le béton translucide a été inventé en 2001 par un architecte hongrois nommé Aron Losonczy, qui a eu l'idée d'y intégrer des fibres optiques (de 2 micromètres à 2 mm de diamètre), invisibles à l'œil mais parfaitement alignées parallèlement les unes aux

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

autres. Ces fibres attirent et transmettent la lumière (naturelle ou artificielle) d'un côté à l'autre des faces du béton, créant dans le béton un effet de jeu d'ombres et de lumière. [56]

Italcementi a, de son côté, poursuivi une autre voie pour amener la lumière au cœur du ciment, après un programme de recherche de 3.000 heures, n'intègre pas de fibres optiques, mais une résine polymère.

Cette matière plastique, plus résistante que les fibres optiques, ne crée pas de fissures et ne fragilise pas la structure. La résine, qui peut adopter différentes couleurs, amène donc sa propriété de transparence au matériau, avec un taux de translucidité de 10 à 20 %, selon la formulation externe.[57]

### III.5.5.D. Béton translucide en fibres optiques

- **Fibre optique**

Une fibre optique est un fil en verre ou en plastique très fin qui a la propriété d'être un conducteur de lumière et sert dans la transmission de données par la lumière. Le principe de la fibre optique a été développé au cours des années 1970 dans les laboratoires de l'entreprise américaine Corning Glass Works (actuelle Corning Incorporated). Entourée d'une gaine protectrice, la fibre optique peut être utilisée pour conduire de la lumière entre deux lieux distants de plusieurs centaines, voire milliers, de kilomètres. Le signal lumineux codé par une variation d'intensité est capable de transmettre une grande quantité d'information. De plus La fibre optique est un guide d'onde qui exploite les propriétés réfractrices de la lumière. Elle est habituellement constituée d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur de la fibre a un indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la gaine et peut donc confiner la lumière qui se trouve entièrement réfléchi de multiples fois à l'interface entre les deux matériaux (en raison du phénomène de réflexion totale interne). L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine plastique de protection. Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique sans perte, en empruntant un parcours en zigzag.[58]



## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

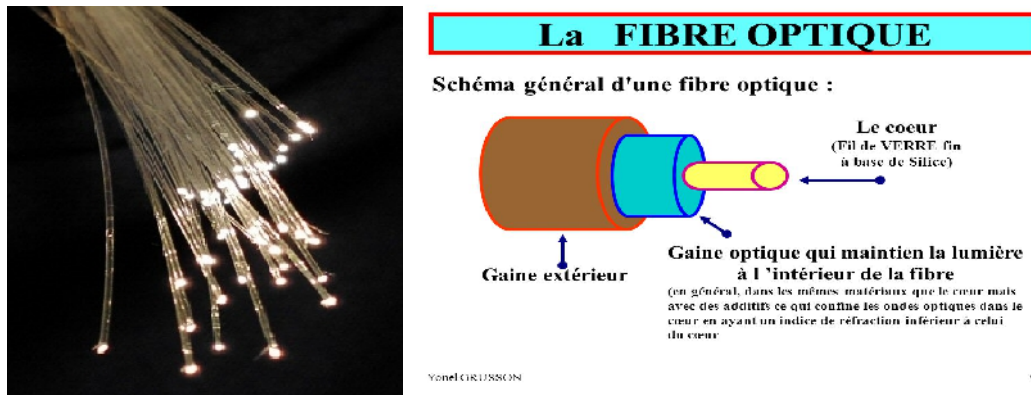


Figure III.29 : La fibre optique

- **La fibre optique dans le béton**

La société austro-hongroise, spécialisée dans les matériaux de construction, a inventé des blocs de béton translucides ! Ces blocs de bétons possèdent exactement les mêmes qualités mécaniques qu'un béton classique. La solidité, l'isolation sont identiques.

Cette prouesse technique repose pourtant sur une idée simple. Elle consiste à insérer des fibres optiques dans le béton même. Les fibres sont introduites entre les grains (extrêmement fins) du béton. Cela permet d'obtenir une structure homogène et cristalline, et donc de laisser passer la lumière.[57]



Figure III.30: La fibre optique dans le béton

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

- **Principe:**

L'idée principale du béton transparent est que les fibres optiques à grande ouverture numérique sont directement disposées dans le béton et la fibre optique est utilisée comme élément de détection et élément de transmission optique. Des milliers de fibres optiques sont organisées en couches minces et se déroulent parallèlement l'une à l'autre entre les deux surfaces principales de chaque bloc. - en raison de leur position parallèle, les informations lumineuses sur le côté plus brillant d'un tel mur semblent inchangées sur le côté plus sombre, des ombres et des silhouettes se dessinent de manière précise sur la face par laquelle la lumière est transmise.

- **Méthode de fabrication:**

Le béton transmetteur «léger» est produit en ajoutant 4% à 6% de fibres optiques dans le volume du mélange d'un béton fin sans granulats grossiers. Ces fibres se mêlent au béton en raison de leur petite taille, et elles deviennent une composante structurelle comme une sorte d'agrégat modeste, elle est un excellent média pour transmettre de la lumière à des longueurs spécifiques. Les fibres optiques sont forés à travers les trous de deux feuilles plastiques qui sont fixées sur les fentes de coffrage représentées en figure! [60]

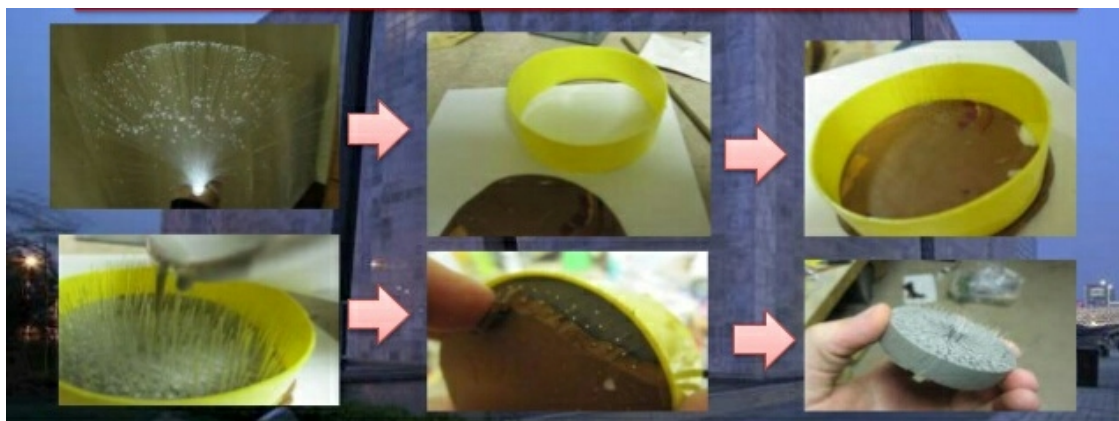


Figure III.31: Méthode de fabrication

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

Le tissu en fibres et le béton sont alternativement insérés dans des moules soumis à une pression ou vibrations de tel sorte que les fibres sont autorisées à s'enfoncer dans le matériau coulé. Chaque couche constitue d'une pluralité de fibres parallèles, l'épaisseur de la couche peut être de 2 mm à 6 mm et le nombre de couche peut être 20 ou plus . Enfin, une argile est utilisée pour supporter les fibres optiques de soutien.( voir la figure ci-dessus).

La densité des fibres optiques peut être estimée en fonction des exigences particulières de la transmission de la lumière suite à la coulée, le matériau est coupé en panneaux ou en blocs de l'épaisseur spécifiée et la surface est ensuite généralement polie. Des couches plus petites ou plus minces permettent une augmentation de la quantité de lumière à traverser le béton.

### III.5.5.E. Béton translucide avec résine polymère

Sous forme de panneau en béton préfabriqué qui laisse filtrer la lumière. Obtenu grâce au mélange d'une matrice cimentaire de pointe et de résines spéciales, une fois le panneau réalisé, une translucidité avoisinant les 20 %, sans influencer sur la résistance du matériau. L'effet d'optique est immédiat, laissant entrer la luminosité à l'intérieur durant la journée sous des effets d'ombre et de lumière, et offrant une esthétique unique le soir, depuis l'extérieur, en laissant transparaître chaque point lumineux intérieur. Les performances mécaniques sont, elles, élevées, que ce soit au niveau thermique, de perméabilité à l'air ou de résistance au feu. béton translucide avec résine polymère fait partie des nombreux produits développés par Italcementi Group dans le cadre de son engagement à trouver des solutions novatrices pour le secteur de l'architecture et du bâtiment. [61]

- **Principe:** [60]

#### Insertion de résine polymère a la matrice cimentaire



**ciment translucide**



## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

### Béton translucide

- **Le béton avec résine polymère est jugé**

- ✓ Plus efficace et moins chère.
- ✓ Le cône d'angle sous lequel doit entrer la lumière est plus grand que celui des fibres obliques

- **Avantages du béton translucide:**

- ✓ Une résistance finale supérieure à celle du béton classique
- ✓ Imperméable
- ✓ Anti corrosif.
- ✓ Etanche.
- ✓ Haute adhérence (presque toutes les surfaces)
- ✓ Indéformable, ne fait pas de recule, ne se fissure pas.
- ✓ Conserve son volume après durcissement.
- ✓ Consistance lors de l'application similaire à celle de l'argile ou de la boue ce qui permet le travail sur des surface verticale

Toutes les opérations communes pour le traitement du béton sont possibles : sciage, meulage, ponçage, perçage, forage, polissage, permettant ainsi plusieurs types de finitions.[59]

- **Domaines d'utilisations et exemples d'applications**



## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

Figure III.32 : Une grotte artificielle couvrant une piscine en béton translucide en Allemagne.



Figure III.33: Escaliers en béton translucide

Figure III.34: Cloison en béton

translucide

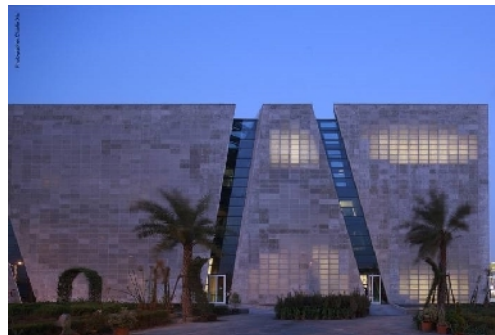


Figure III.35: Le pavillon italien de Shanghai

L'architecte italien Giampaolo Imbrighi a choisi ce ciment pour réaliser, en 2010, le pavillon italien de l'exposition universelle de Shanghai. Au total, 3.774 panneaux transparents ont été posés sur les façades du bâtiment, pour une surface de près de 1.900 m<sup>2</sup>, soit 40 % de la surface totale de l'édifice et un poids de 189 tonnes. L'effet obtenu à l'intérieur permet un jeu d'ombre et de lumière tout au long de la journée, jouant avec la luminosité.

### III.5.6. Béton autonettoyant

#### III.5.6.A. Introduction

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

Des façades qui portent les stigmates de la pollution et qui noircissent... principalement accusés les gaz d'échappement des véhicules qui ne sont pas uniquement dangereux pour nos santé.. le béton autonettoyant est l'un des matériaux autonettoyant dont la promesse majeure est de réduire les salissures d'origine biologique et combattre la pollution atmosphérique.

### III.5.6.B. Définition

Le béton autonettoyant et dépolluant , un sceau technologique qui fait appel au procédé de la photocatalyse est composé d'un ciment à effet photo catalytique . Ce dernier est obtenu grâce à l'addition d'un ciment classique et des nanoparticules de  $TiO_2$  .

### III.5.6.C. Création du ciment à effet photocatalytique

Calcia - et italiens - Italcementi Group - , le ciment à effet photocatalytique appartient à une nouvelle génération de ciment pour bétons autonettoyants. Son principe de photocatalyse repose sur l'action combinée des U.V. et d'un catalyseur au sein du matériau, permettant d'accélérer la destruction des salissures d'origines organiques au fur et à mesure de leur dépôt sur les façades en béton.

Un effet qui confère au matériau une activité autonettoyante permanente sur l'ensemble de sa surface, quelle que soit son orientation et son aspect (brut, lisse, poli, acidé, sablé, gommé, bouchardé). Favorisant la préservation du cadre de vie en gardant de façon pérenne son esthétique initiale, le ciment autonettoyant s'inscrit dans la logique de la démarche HQE, notamment par l'optimisation des besoins de maintenances des constructions. [62]

- Les bétons autonettoyants fonctionnent selon ce principe :

- ✓ action combinée de la lumière et du catalyseur( $TiO_2$ ),
- ✓ dégradation par oxydation des composés organiques,
- ✓ décollement des salissures organiques au contact du parement. Ils offrent une solution particulièrement adaptée pour maîtriser la pérennité esthétique des parements architectoniques en béton.

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

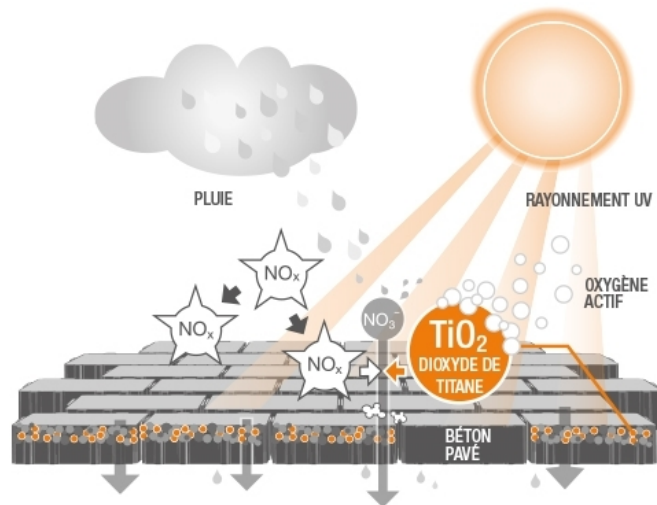


Figure III.36: La photo catalyse sur un mur en béton

### III.5.6.D. Particularité

Par son action photocatalytique, le ciment autonettoyant confère au béton une propriété :

- ✓ «dépolluante» par action directe sur les substances gazeuses nocives [oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les composés organiques volatils (COV : benzène, toluène...)] produites par l'activité humaine (industrie, automobile, chauffage domestique...).
- ✓ «dépolluante» par action indirecte sur la formation d'ozone (O<sub>3</sub>), en détruisant les polluants précurseurs de l'ozone qui sont essentiellement les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les composés organiques volatils (COV).
- ✓ «autonettoyante», limitant le dépôt de salissures d'origine organique. Le ciment autonettoyant permet ainsi de préserver la qualité initiale des façades bétons.
- ✓ « antibactérienne » :Des tests effectués en laboratoire, conformément à la norme UNI 11021 : 2002, ont certifié que les produits composés à partir du ciment autonettoyant empêchent le développement des microorganismes et créent un environnement plus sain ,particulièrement approprié aux établissements de santé. [63]

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

- **Domaines d'utilisations et exemples d'applications**

le ciment à effet photo-catalytique est principalement destiné aux éléments d'ouvrage architectonique permettant de garder inaltérée l'esthétique des façades grâce à son action autonettoyante. Il permet aussi de réaliser des constructions et ouvrages capables de contribuer de manière active, à la réduction de la pollution atmosphérique (NO<sub>x</sub> et COV), grâce à son action dépolluante et antibactérienne.

Il s'adapte parfaitement aux domaines suivants :

- Panneaux architectoniques préfabriqués.
- Ouvrages coulés en place brut de décoffrage.
- Structures horizontales : dallages en béton ou avec pavés autobloquants, carreaux de ciment, revêtements minéraux base ciment pour signalisation routière, terre-pleins en béton, routes en béton.
- Structures verticales : enduits extérieurs, revêtements minéraux base ciment, éléments de revêtement, murs antibruit, glissières.
- Tunnels (application nécessitant une source de lumière artificielle) : revêtements minéraux base ciment, panneaux en béton. [63]



Figure III.37 : Bloc de béton et un mortier à base d'un ciment photo-catalytique.

Le phénomène de la photocatalyse prend actuellement en Italie une réelle ampleur ; Utilisation de matériaux photocatalytiques pour :

- des chantiers de constructions neuves (ponts, pistes cyclables, portion d'autoroute, parking, habitations, etc.),



## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

- des chantiers de réhabilitation (églises, cites classés, tunnels).  
Les administrations publiques italiennes, municipales et régionales prescrivent l'adoption généralisée des produits photocatalytiques :

- Comme la Région des Pouilles et son Plan régionale de la qualité de l'air.
- Prescription de la Région des Marches pour la réalisation de la 3ème voie de l'autoroute A14.

L'administration nationale en date du 1er avril 2004 préconise également l'utilisation de ce type de produits dans son Décret du Ministère de l'Environnement et de la Tutelle du Territoire.

Mais la demande et l'intérêt pour une meilleure qualité de l'air vient également de l'étranger.

En Suisse, la proposition de motion n°1741, recommandant l'utilisation de produits photo- catalytiques dans le secteur du bâtiment, a été votée au Grand Conseil de Genève et a été dernièrement proposée sur un plan national. :



Figure III.38 : L'église du Jubilé à Rome

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---



Figure III.39 : Hôtel de Police à Bordeaux

### III.5.7. Béton fabriqué à partir de coquillage

#### III.5.7.A. Introduction

Le béton confectionné à partir de coquilles Saint-Jacques. Cette invention c'est à l'École Supérieure d'Ingénieurs des Travaux de la Construction de Caen, en Normandie, qu'on la doit. Une innovation écologique et économique.

#### III.5.7.B. Définition:

Un béton fabriqué à partir de coquilles saint-jaques, est un béton drainant où le granulat, qu'il est normalement nécessaire d'extraire, est remplacé par des éclats de coquilles Saint-Jacques et d'autres coquillages. Ce qui lui permet de lutter contre l'artificialisation des sols. grâce à son caractère drainant, il laisse l'eau de pluie s'infiltrer dans le sol et non s'écouler vers les égouts. Il permet également à la terre située en dessous, de conserver toutes ses propriétés naturelles.[64]



Figure III.40 : Un béton en coquillage

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

### III.5.7.C. Histoire d'un béton qui lutte contre l'appauvrissement des sols

une équipe d'ingénieurs s'est lancée depuis 2011 dans ce projet, " *Nous nous sommes intéressés au recyclage et à la valorisation des déchets de la conchyliculture et de la pêche. Tout en cherchant un moyen de réaliser des économies de ressources naturelles telles que les graviers utilisés dans le béton* " témoignage de Mohamed Boutouil, directeur de la recherche La formule actuelle a été breveté après trois années de recherches. Ces dernières ont permis à l'équipe d'en savoir davantage sur les propriétés du granulats de coquilles et leur compatibilité avec le reste des ingrédients. Ainsi, les coquilles de coquilles Saint-Jacques, pétoncles et crépidules connaissent une nouvelle vie, plutôt que de finir à l'incinérateur. L'équipe d'ingénieurs songe par ailleurs à une commercialisation, "*fort des retours d'expérience sur les chantiers en cours, nous pourrions commercialiser les éco-pavés dans la foulée*", indique le professeur.[65]

- **360 kilos de coquilles pour une tonne de béton et 30% à 50% d'économie de granulats et de sable**

pour obtenir une tonne de ce fameux béton, il faut environ 360 kilos de coquilles. Ces dernières sont concassés et incorporées au béton.[64]

ce béton aéré, alvéolé, léger, poreux, filtrant... se fabrique avec une formulation allégée de 30% à 50% en granulats, issus d'un procédé extractif lourd et gourmand en énergie. Il est aussi plus économe en sable... à un moment où la pression sur cette dernière ressource devient préoccupante. La bétonisation imperméabilise les villes avec deux effets destructeurs, rappelle le chercheur. "*L'effet parapluie perturbe le cycle naturel de l'eau, l'empêche d'entrer dans le sol et de remplir les nappes phréatiques. L'effet entonnoir provoque un déversement vers les stations d'épurations... qui en cas de saturation sont délestées dans les rivières, (eaux usées comprises).*" Au delà du parking de l'école, les villes de Caen et de Saint Malo s'apprêtent à tester les capacités d'infiltration du matériau sur de plus grandes surfaces. "*Les performances de notre éco pavé –qui absorbe 120l par minute et m<sup>2</sup> peuvent être optimisées en fonction des besoins. Nous pouvons fabriquer un écopavé*

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---

*un écopavé allant jusqu'à absorber 500 l par minute et par mètre carré", détaille Mohammed Boutuil, le directeur de recherche. [65]*

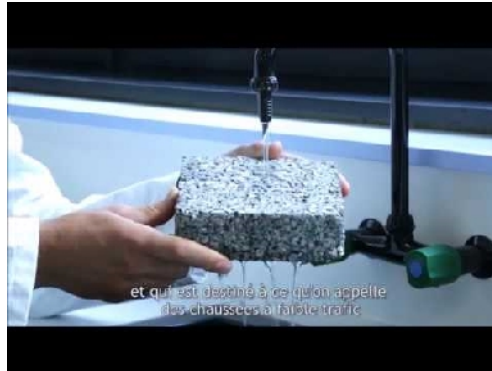


Figure III.41: Une image qui montre le caractère drainant de ce béton

### III.5.7.E. Domaine d'utilisation

Ce béton d'un genre nouveau est conçu pour un usage sur des zones à faible trafic ,son côté absorbant, participerait à l'imperméabilisation des villes : il favoriserait un remplissage régulier et naturel de la nappe phréatique et stopperait le phénomène de saturation des stations d'épuration en cas de fortes pluies, par ses qualités absorbantes.

- ✓ les trottoirs
- ✓ les rues piétonnes ou parkings
- ✓ aménagement de terrasse
- ✓ les plages de piscines ou allées de jardin [65]

## Chapitre III : nouvelles formulations pour de nouvelles fonctionnalités

---



Figure III.42 : Pavés en coquillages.

---

## Conclusion générale

Les matériaux de construction, un secteur perméable aux innovations.

Le temps moderne est marqué par des constructions majestueuses voire vertigineuses, des édifices qui reposent sur des matériaux innovants.

A travers notre recherche bibliographique, nous avons pu suivre l'évolution de certains matériaux. L'innovation en ces derniers apporte un souffle nouveau dans le domaine social, économique et sécuritaire.

Des matériaux bio-sourcés qui n'ont pas dit leur dernier mot, bruts ou additionnés, ces matériaux visent villes vertes et écologiques avec un impact réduit et sans détériorer l'environnement, nous avons touché certains d'entre eux, tels: Chanvres, fibres végétaux...

De même, d'autres matériaux ont progressé et ont engendré des fonctionnalités nouvelles:

- Economie d'énergie "matériaux à changement de phase".
- Ecologie "matériaux autonettoyants", Hp2a".

Des bétons innovants viennent remplacer le sens du mot "béton traditionnel", communément connu par sa lourdeur et sa difficulté de mise en place.

En Algérie, les sujets d'études sont nombreux, mais les progrès des sciences technologies traînent toujours et sont en attente du fameux déclic de motivation et d'intérêts de la part de toute la société (gouvernement et spécialistes). Aucune innovation n'est envisageable sans une pensée révolutionnaire qui brisera les barrières de certains concepts. Nous devons nous investir dans les sciences et technologies et suivre l'avancée des innovations dans les matériaux.

Notre pays touristique possède une richesse naturelle inestimable, mérite bien un aspect nouveau avec des matériaux intelligents, économiques et écologiques. De plus le potentiel humain remarquable qui a fait ces preuves ailleurs, alors pourquoi avoir peur d'affronter ce qui paraît impossible.

---

---

## Les références

- [1] : [affaires.lapresse.ca/portfolio/universites-et-entreprises/201502/03/01-4840823-universites-et-entreprises-cinq-innovations-en-genie-civil.php](http://affaires.lapresse.ca/portfolio/universites-et-entreprises/201502/03/01-4840823-universites-et-entreprises-cinq-innovations-en-genie-civil.php)
- [2] : Cours de Technologie 5e - L'évolution des besoins, [maurois-col.spip.ac-rouen.fr/IMG/pdf/evolutionhabitat.pdf](http://maurois-col.spip.ac-rouen.fr/IMG/pdf/evolutionhabitat.pdf)
- [3] : construction magazine, [innov2b.com/2015/04/innover-dans-le-domaine-de-la-construction/?v=fa3c7f2b5dae](http://innov2b.com/2015/04/innover-dans-le-domaine-de-la-construction/?v=fa3c7f2b5dae)
- [4] : Comment valoriser l'innovation dans le secteur des travaux publics  
<https://fr.linkedin.com/pulse/comment-valoriser-linnovation-dans-le-secteur-des-ulrich-adjanohoun>
- [5] : <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89comat%C3%A9riau>
- [6] : <http://www.ecoconso.be/fr/Vers-de-nouveaux-materiaux-et>
- [7] : <http://www.afcdud.com/fr/genie-civils/417-ecoconstruction-histoire-et-pourquoi.html>
- [8] : [www.agglo-paysdaix.fr/?eID=tx\\_atolcmislist\\_download&oID...6650](http://www.agglo-paysdaix.fr/?eID=tx_atolcmislist_download&oID...6650)
- [9] : <http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/produits-de-construction-et-materiaux-bio-sources>
- [10] : [http://www.vegetal-e.com/fr/introduction\\_222.html](http://www.vegetal-e.com/fr/introduction_222.html)
- [11] : [http://www.ecoconstructionlimousin.com/IMG/pdf/BETON\\_DE\\_CHANVRE.pdf](http://www.ecoconstructionlimousin.com/IMG/pdf/BETON_DE_CHANVRE.pdf)
- [12] : [http://www.asma.fr/sauvegarde-maison-alsacienne/telechargements/liste-fichiers/Fiches/Materiaux\\_de\\_construction\\_a\\_base\\_de\\_chanvre\\_-\\_DRIEA-IdF.pdf](http://www.asma.fr/sauvegarde-maison-alsacienne/telechargements/liste-fichiers/Fiches/Materiaux_de_construction_a_base_de_chanvre_-_DRIEA-IdF.pdf)
- [13] : <https://www.ocl-journal.org/articles/oclpdf/2015/06/oclpdf150041-s.pdf>
- [14] : [http://www.agrobiobase.com/sites/default/files/dossiers/fichiers/memento\\_2016\\_\\_panorama\\_des\\_marches\\_fibres\\_vegetales\\_techniques\\_materiaux\\_hors\\_bois.pdf](http://www.agrobiobase.com/sites/default/files/dossiers/fichiers/memento_2016__panorama_des_marches_fibres_vegetales_techniques_materiaux_hors_bois.pdf)

- 
- [15] : <http://www.ecoconso.be/fr/La-construction-en-terre-crue>.
- [16] : [http://www.memoireonline.com/12/07/783/m\\_rapport-de-stage-ETRHB17.html](http://www.memoireonline.com/12/07/783/m_rapport-de-stage-ETRHB17.html).
- [17] : <http://lesdefinitions.fr/resine>.
- [18] : <http://thesis.univ-biskra.dz/1000/3/chapitre%2001.pdf>.
- [19] : <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/150407>.
- [20] : <http://bu.umc.edu.dz/theses/gcivil/SAA5286.pdf>.
- [21] : [http://www.record-net.org/storage/etudes/94-0308-1A/rapport/Rapport\\_record94-0308\\_1A.pdf](http://www.record-net.org/storage/etudes/94-0308-1A/rapport/Rapport_record94-0308_1A.pdf) .
- [22] : Projet de recherche bibliographique Master 2 2016-2017 présenté par haddadi lynda.
- [24] : S.B.Akomy Ango, contribution au stockage d'énergie thermique dans le bâtiment : développement d'un système actif à matériau a changement de phase ,09 Décembre 2011.
- [25] : P.Riedere, O.Catarina, Comparaison international bâtiment et énergie C7,stockage de chaleur ,ADEME-PUCA-CSTBC151,2007.
- [26] : J.Noel,S.Leperes,J.Virgone,Amélioration du confort d'été sur des bâtiments à ossatures légères par des matériaux à changement de phase, Centre Thermique de Lyon ,INSA de Lyon, avril 2007.
- [27] : MAHA Ahmed, Nouveaux composant actif pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des batiments, Université Joseph FOURIER .Grenoble, le 23 Novembre 2004
- [28] : K.Peippo,P.Kauranen , et P.D.Land, A multicomponent phase change matériels wall optimized for solar heating energy and buildings, Vol 17,PP 259-270.1991.
- [29] : D.W.Hawes, D.Feldman and D.Banu, Energy concervation through latent heat thermal storage in buildings matériels, Proc.5 Jacques Cartier Conf. Montreal 1992.
- [30] : D.W.Hawes, D.Banu and D.Feldman-latent heat storage in concrete. II -solar energy matériels. Vol.21.PP.61-80.1990



- 
- [31] : D. H .Hawes and D.Feldmen, absorption of phase change materials in concrete, solar energy materials and solar cells. Vol.27,pp.91-101,1992.
- [32] : S.GIRAUD, Micro encapsulation d'un dus-cyanate et d'un phosphate d'ammonium. application élaboration d'un système polyuréthane mono composant approprié retardatrice de flamme pour l'enduction textile -Thèse de doctorat ,Chimie organique et macromoléculaire, université des sciences et technologie de lille ,2002.
- [33] : C.Y.Zhao et G.H.Zhang. Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs).fabrication characterisation and applications, Renewable and sustainable energy Reviews, Vol.15,pp.3813-3832,2011
- [34] : A. Castell A.D. Gracia , A.I.Fernandez , C. Barrenche et LF. Cabeza , Material used as PCM in thermal energy storage m buildings , a review Vol 15, pp. 1675-1695.2011.
- [35] : R. Parameshwarana, S. Kalaiselvamb, S.Harikrishanamb et A.Elayaperumala, Sustainable thermal energy storage technologies for buildings , A reviews , Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 16,pp. 2394-2433,2012.
- [36] : Q.Ashehoug, N.M. Perino et P.D. Toring, Expert Guide-Part 2 Responsive Building Elements-IEA ECBCS, ITALY 2009.
- [37] : Farid et Al , Vineet Veet , PCM thermal storage in buildings : a state of art-renewable and sustainable, energy reviews , 2005.
- [38] : J Venstenans, des enduits pour une climatisation douce- revue d'information générale du centre scientifique et technique de la construction , N °3,2010
- [39] : T.Kondo,T.Lbamoto et T.Yaiyi, research on the thermal storage of PCM wallboard, department of architecture ,faculty of engineering Kanagawa ,Japan
- [40] : A.Sharma, VV.Tyagi, CR. Chen et D.Buddhi , A review thermal energy storagewith PCM and application renewable and sustainable energy reviews, Vol 13,pp.318-345,2009
- [41] : applications concrètes et macroscopiques du dioxyde de titane , et ses propriétés vis-à-vis de la lumière. dioxydedetitanetpe.blogspot.com/2009/12/partie-ii.html)

- 
- [42] : institus supérieurs industriels libres Francophone, Revue Scientifique des ISILF n°22, 2008.
- [43] : [http://www.batirecover.com/articles/le-vitrage-autonettoyant-les-avantages-et-inconvenients\\_3328.htm](http://www.batirecover.com/articles/le-vitrage-autonettoyant-les-avantages-et-inconvenients_3328.htm)
- [44] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre\\_autonettoyant](https://fr.wikipedia.org/wiki/Verre_autonettoyant)
- [45] : [over-blog.com/article-13165381.htm](http://over-blog.com/article-13165381.htm). Publié le 18 octobre 2007 par Photocal
- [46] : <http://www.hp2a-technologies.fr/hp2a-argile/>
- [47] : [observers.france24.com/fr/20160505-polluer-moins-deux-francais-remplacent-ciment-argile-argilus-hp2a-climat-ecologie](http://observers.france24.com/fr/20160505-polluer-moins-deux-francais-remplacent-ciment-argile-argilus-hp2a-climat-ecologie)
- [48] : <http://www.ab-engineering.fr/construction-ecologique-grace-au-procede-revolutionnaire-hp2a>
- [49] : <https://www.francebleu.fr/infos/economie-social/vendee-une-pme-invente-le-beton-de-demain-1461230664>
- [50] : <http://www.hp2a-technologies.fr/hp2a-vs-granulats/>
- [51] : BOUKEZZOULA .A. contribution a la modélisation du fluage des bétons. application aux bétons autoplaçant. juillet 2014
- [52] : Chelouah.N. cour les matériaux innovant .master1 université abd rahmane mira. béjaia. année 2016
- [53] : <http://www.guidebeton.com>
- [54] : [www.infociments.fr/CT-G11.118-123.pdf](http://www.infociments.fr/CT-G11.118-123.pdf) Chapitre 1 .Chapitre3
- [55] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton\\_translucide](https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton_translucide)
- [56] : <http://bybeton.fr/betons-translucides-jouer-lumiere>

---

[57] : <http://www.batiactu.com/edito/des-ciments-translucides-pour-de-nouveaux-effets-a-35011.php>

[58] : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre\\_optique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fibre_optique)

[59] : <https://hungarian-success-stories.com/2013/03/10/seeing-through-concrete/>

[60] : Sakri.s.Fatmi.refka.projet d'architecture -materiaux de construction-Béton translucide le 27/05/2015

[61] : <http://www.italcementigroup.com/ENG/Research+and+Innovation/Innovative+Products/i.light/>

[62] : <http://www.batiactu.com/edito/ciment-a-effet-photocatalytique-16099.php>

[63] : <https://fr.i-nova.net/documents/23975/2902483>

[64] : <http://www.18h39.fr/articles/un-beton-fabrique-a-partir-de-coquilles-saint-jacques.html>

[66] : [https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/developpement-durable/des-paves-passoires-en-beton-coquillage-pour-drainer-l-eau-des-villes\\_104940](https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/developpement-durable/des-paves-passoires-en-beton-coquillage-pour-drainer-l-eau-des-villes_104940)

---