



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Des Frères Mentouri – Constantine
Faculté des Sciences de la Technologie
Département de Génie Civil



Polycopié de cours :

MATERIAUX RECYCLES

Cours destiné aux étudiants de Master 2 : Matériaux en Génie civil

Réalisé par :

Dr, KHOUADJIA Mohamed Lyes Kamel

Année universitaire : 2021/2022

PREAMBULE

Public cible :

Ce cours intitulé « Matériaux Recyclés » présente des notions de base matériaux recycles, leurs utilisation, leurs effet sur les matériaux cimentaire ainsi que les différents procédés de valorisation quels que soit leurs origines ou formes. Il est destiné aux étudiants en formation de Master 2 Matériaux en Génie civil .

Pré-requis : Matériaux de construction, durabilité, pathologie, vieillissement et dégradation des matériaux.

Contenu :

Le contenu de ce polycopié vise à sensibiliser les étudiants sur l'importance de la valorisation et le recyclage des déchets et matériaux. En effet, de nos jours, parmi les préoccupations majeures des chercheurs et des pouvoirs publics consistent à limiter l'impact négatif des activités de l'homme sur l'environnement. Le domaine du génie civil s'invite de plus en plus dans cela par une dynamique internationale visant la valorisation de matériaux et déchet qui peuvent être injectés directement dans le secteur de la construction.

Ainsi, à l'heure où la préservation de l'environnement est devenue une exigence et vu le manque de réglementations claires adaptables à l'utilisation des déchets et sous-produits industriels, notre cours a pour objectif d'encourager la valorisation de déchet et différent matériaux pour une utilisation quotidienne dans le génie civil.

Objectifs de l'enseignement :

- 1- Connaissance de l'origine d'un matériau recyclable
- 2- Connaître l'adaptation de la réglementation au vu du recyclage des matériaux
- 3- Déterminer les critères de choix de matériaux recyclable
- 4- Connaître les techniques d'utilisation des matériaux recyclable
- 5- Connaître les techniques de fabrication de nouveaux matériaux à partir des matériaux recyclable

Le premier chapitre « **Gestion des déchets** » : donne des identifications sur les différents types de déchet et les méthodes de traitement ainsi qu'une estimation du coût de gestion de déchets.

Le deuxième chapitre « **Évaluation des impacts environnementaux** » : présente l'axe du développement durable ainsi que les différents sous-produits industriels existants.

Le troisième Chapitre « **Recyclage des déchets** » : présente les différents enjeux du recyclage, les matériaux alternatifs ainsi que le recyclage dans différents domaines tel que la fabrication du béton, ciment et les chaussées.

Enfin le quatrième chapitre « **Valorisation de déchets** » présente des différents exemples de valorisation des déchets (sédiment, bout de dragage, etc) dans plusieurs domaines.

PREAMBULE	2
TABLE DES MATIERES	4
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX	12

CHAPITRE I. GESTION DES DECHETS

I.1 Introduction	14
I.2 Définition et origine de production des déchets	14
I.2.1 Définition d'un déchet	14
I.2.2 Origine de production des déchets	15
I.3 Différentes classes de déchets (Article 5, loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 J.O.A. N°77)	16
I.3.1 Les déchets ménagers et assimilés (DMA)	16
I.3.2 Les déchets spéciaux	19
I.3.3 Les déchets inertes	23
I.4 Gestion des déchets selon la réglementation en vigueur en Algérie	23
I.4.1 Collecte, transport et stockage des déchets	24
I.4.1.1 Collecte	
I.4.1.2 Transport et stockage	24
I.4.2 Traitement des déchets	25
I.4.2.1 Valorisation des déchets	25
I.4.2.1.1. Recyclage	25
I.4.2.1.2. Compostage	25
I.4.2.2 Elimination des déchets	26
I.4.2.2.1 Incinération	26
I.4.2.2.2 Enfouissement des déchets	27
I.4.2.2.3 Immersion des déchets	27

I.4.2.2.4. Procédés de stabilisation /solidification (S/S)	28
I.5 Les coûts de gestion des déchets et amendes	29
I.6 Conclusion	30

CHAPITRE II. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

II.1 Introduction	32
II.2 Cycle de vie d'un matériau	32
II.2.1 Définition du cycle de vie d'un matériau dans le génie civil	32
II.2.2 Avantages de la connaissance du cycle de vie d'un produit	32
II.3 Evaluation des impacts environnementaux / Analyse de l'impact	34
II.4 Développement durable dans le Génie civil	35
II.4.1 Définition	35
II.4.2 Sous-produits industriels et additions minérales	36
II.4.2.1 Laitier de haut fourneau	36
II.4.2.2 Les scories d'aciérie	38
II.4.2.2.1 Définition	38
II.4.2.2.2 Élaboration des scories	38
II.4.2.2.3 Compositions chimiques et minéralogiques des scories	39
II.4.2.2.4 Utilisation des scories en Génie Civil	39
II.4.2.3 La pouzzolane	41
II.4.2.4 Les Cendres Volantes	42
II.5 Conclusion	43

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

III.1 Introduction	45
III.2 Types de recyclage	45

III.3 Recyclage des déchets	46
III.3.1 Eaux usées	46
III.3.2 Déchets usuels inertes	47
III.3.3 Déchets usuels non inertes	48
III.3.4 Déchets industriels dangereux	49
III.3.5 Déchets toxiques en quantités dispersées	51
III.3.6 Impact du recyclage dans l'industrie	52
III.3.7 Impacts du recyclage sur l'environnement	53
III.4 .Exemples de recyclages des déchets en nouveaux matériaux	54
III.4.1 Déchets de démolition comme granulats pour bétons	54
III.4.1.1 Définition des granulats recyclés	55
III.4.1.2 Domaine d'application	56
III.4.1.3 Propriétés du granulat recyclé et approche environnementale dans la production du béton	57
III.4.1.4 Formulation des bétons contenant des granulats recyclés	66
III.4.2 Recyclage et valorisation des enrobés	67
III.4.3 Matériaux alternatifs, gisement et gestion	70
III.4.3.1 Définition des matériaux alternatifs (MA)	70
III.4.3.2 Identification des gisements	71
III.4.3.3 Utilisation des matériaux alternatifs	73
III.5 Conclusion	73

Chapitre IV. VALORISATION DE DECHETS

IV.1 Introduction	75
IV.2 Valorisation des sédiments de dragages	75
IV.2.1 Origine des sédiments marins	76
IV.2.2 Technique de dragage	76
IV.2.2.1. Les dragues mécaniques	76
IV.2.2.2. Les dragues hydrauliques	77
IV.2.2.3. La drague pneumatique	78
IV.2.3 Procédés de traitement des sédiments	78
IV.2.3.1. Les prétraitements	78
IV.2.3.2. Les traitements biologiques ou la bioremédiation	79
IV.2.3.3. Les traitements physico-chimiques	79
IV.2.3.4. Le traitement thermique	79
IV.2.4 Valorisation de sédiments dans le béton	79
IV.2.4.1 Influence des sédiments marins sur l'affaissement des bétons	79
IV.2.4.2 Influence des sédiments marins sur la résistance à la compression	80
IV.3 Valorisation des argiles expansées	81
IV.3.1 Procèdes de fabrication de l'argile expansée	82
IV.3.2 Influence des agrégats d'argile expansée sur les bétons	83
IV.3.2.1 Rapport E/C	83
IV.3.2.2 Maniabilité	83

IV.3.2.3 Matériau cimentaire	83
IV.3.2.4 Influence sur l'état durci	83
IV.3.2.5 Durabilité	84
IV.4 Valorisation des pneumatiques usagés non réutilisables (caoutchouc)	84
IV.4.1 La réutilisation par rechapage	85
IV.4.2 Valorisation de la matière : exemple le caoutchouc des pneus usagés	86
IV.4.3 Effets des granulats en caoutchouc (rubber aggregates) sur les propriétés des bétons à l'état frais	87
IV.4.4 Effets des granulats en caoutchouc sur la masse volumique, la teneur en air et l'absorption d'eau des bétons	88
IV.4.5 Propriétés à l'état durci (résistance à la compression, traction et flexion) du béton incorporant des granulats en caoutchouc	89
IV.4.6 Durabilité des bétons contenant des granulats en caoutchouc	91
IV.4.3 Valorisation énergétique	92
IV.5 Les boues des stations d'épuration	93
IV.5.1 Définition	93
IV.5.2 Différents types de boues et traitement	93
IV.5.3 Valorisation des boues de station d'épuration pour un enjeu économique et environnemental	95
IV.5 Conclusion	96
Reference bibliographique	97

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 Composition des déchets ménagers en Algérie (2014)

Figure I.2. Déchets issus des ménages urbains individuels ou collectifs

Figure I.3. Déchets banals issus des activités industrielles

Figure I.4. Déchets issus des activités commerciales, artisanales

Figure I.5 Différents secteurs générateurs des déchets

Figure. I.6. Cycle de vie d'un déchet

Figure I.7. Exemple de déchet ultime dangereux

Figure I.8. Exemple des déchets de soin

Figure I.9. Exemple des déchets agricoles spéciaux dangereux

Figure I.10. Différentes catégories des déchets inertes et non inertes

Figure II.1. Schéma définissant le cycle de vie d'un matériau

Figure II.2. Evaluation des impacts environnementaux

Figure II.3 Différentes catégories de dommage répertorié

Figure. II.4. Types de laitier

Figure. II.5. Vidange d'une cuve à scories

Figure. II.6. Aspect général de la cendre volante

Figure. III.1 Granulats recyclés

Figure III.2. Origines des granulats

Figure III.3. Application en fondation et en sous- fondation de différentes infrastructures

Figure III.4. Absorption d'un granulats recyclé en fonction du temps

Figure. III.5. Variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton

Figure. III.6. Rapport E/C des bétons à base de granulats recyclés

Figure. III.7. Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton

Figure. III.8. Porosité des bétons à granulats recyclés

Figure. III.9. Résistance à la compression du béton à base de granulats recyclés de béton Pour les trois dosages à 28j

Figure. III.10. Résistance à la compression des bétons à granulats recyclés

Figure III.11. Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton recyclé

Figure III.12. Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton conventionnel

Figure III.13. Processus de malaxage de la méthode de mélange en deux étapes par rapport à la méthode normale

Figure III.14. Observation au MEB d'une fissure du granulat recyclé d'un béton préparé avec la méthode de mélange double

Figure III.15. Observation au MEB d'une fissure du granulat recyclé d'un béton préparé avec la méthode de mélange normale

Figure. III.16. Matériels forains de recyclage courant

Figure. III.17. Principe du recyclage dans le tambour d'un poste discontinu

Figure. III.18 Poste discontinu à tambours parallèles

Figure. III.19. Exemple Matériaux Alternatifs (MA)

Figure. III.20. Les mâchefers d'incinération

Figure IV.1. Formation des sédiments

Figure IV.2. Dragage mécanique

Figure IV.3. Dragage hydraulique

Figure IV.4. Résultats de l'affaissement bétons avec SP

Figure IV.5. Résultats de l'affaissement des bétons avec et sans SP

Figure IV.6. Résultats de l'influence du différent pourcentage des sédiments sur la résistance à la compression.

Figure IV.7. Argile expansée

Figure IV.8. Coupe transversale de l'argile expansée

Figure IV.9. Réutilisation des pneus usagés par rechapage

Figure IV.10. Répartition des voies de valorisation des pneus usagés

Figure IV.11. Valorisation matière des pneus usagés

Figure IV.12. Evolution de Masse Volumique du béton en fonction de la masse des granulats en caoutchouc

Figure IV.13. Evolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en granulats de caoutchouc

Figure. IV.14. Boues des stations d'épuration

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1. Estimation de l'émission totale des DMA en (Millions/tonnes) [2]

Tableau I.2. Répartition des déchets spéciaux En Algérie selon MATE en 2004

Tableau I.3. Amendes applicables dans le domaine de l'environnement

Tableau II.1. Composition chimique élémentaire de la scorie

Tableau III.1. Procédés e recyclage des eaux

Tableau III.2. Procédés de recyclage des déchets usuels inertes

Tableau III.3. Procédés de recyclage des déchets usuels non inertes

Tableau III.4. Procédés e recyclage des déchets industriels dangereux

Tableau III.5. Procédés e recyclage des déchets toxiques

Tableau IV.1. Différents types de boues

CHAPITRE I. GESTION DES DECHETS

I.1 Introduction

Parmi les préoccupations majeures des chercheurs et des pouvoirs publics pour le XXIème siècle c'est la limitation de l'impact négatif des activités de l'homme sur l'environnement qui ne cessent de détériorées la qualité de l'air, de l'eau et de la terre. Le domaine du génie civil s'invite de plus en plus dans cela par une dynamique internationale visant la limitation, la surveillance des rejets, le recyclage et la valorisation de matériaux qui peuvent être injectés directement dans le secteur de la construction [1-2].

En effet, le recyclage a vu le jour depuis que l'homme est sur terre. Par l'utilisation de feuilles d'arbre pour s'habiller et de pierre et de bois comme arme. Au fils des siècles le recyclage à évoluer à l'Age de bronze (De 1200 av. J.-C.à 3000 av. J.-C.) on fessait fondre du métal pour la fabrication de nouveaux objets. Au fils des siècles les procédés de recyclage évolue et tous les matériaux sont pratiquement réutilisé à des fins économiques ou bien pénuries oblige (vieux chiffons, papiers, cartons,...) surtout durant la première et deuxième guerre mondiale. En 1970, le logo actuel des produits recyclable voit le jour, les consommateurs se sensibilisent à l'étiquette « produit recyclable » et la situation évolue (paiement des taxes de pollutions, non recyclage, non-conformité,...) [3].

D'autre part, jusqu'à ce jour les pays développés mettent de nouvelle procédure afin de traiter les déchets et réduire leur impact sur l'environnement (l'électricité produite par le traitement des déchets). [4]

Enfin , avant de valoriser un déchet, il faut connaître son origine, l'analyser, le caractériser et connaitre son comportement dans le temps et cela dans le afin dans quel contexte choisir la valorisation.

I. 2. Définition et origine de production des déchets :

I.2.1 Définition d'un déchet

Un déchet est un objet en fin de vie qui est impropre à la consommation ou à l'usage et dont le détenteur veut se débarrasser [3,5].

D'autre part, le législateur donne la définition d'un déchet dans l'article 3 de Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relatif à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, cité dans le Journal Algérien N°77, comme étant tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation et toutes substances, matériaux, produits ou, plus généralement, tout objet, bien, meuble dont le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer [2].

I.2.2 Origine de production des déchets :

Il existe différente origine des déchets parmi lesquelles :

- Biologiques : tout cycle de vie produit des métabolites ;
- Chimiques : toute réaction chimique est régie par les principes de la conservation de la matière on peut cité par exemple le procédure de clinkérisation dans le four, des éléments (SiO_2 , CaO , Al_2O_3 et Fe_2O_3) qui se combinent pour donner les constituants minéraux : C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF , Autre : (Sulfates, Alcalins, impuretés,.....)
 - C_3S : Les silicates tricalciques : $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (Alite)
 - C_2S : Les silicates bicalciques : $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ (Belite)
 - C_3A : Les aluminates tricalciques : $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$
 - C_4AF : Les aluminoferrites tétracalciques : $4\text{CaO} .\text{Al}_2\text{O}_3 .\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Célite)
- Technologiques : tout procédé industriel conduit à la production de déchets ;
- Economiques : les produits en une durée de vie limitée ;
- Ecologiques : les activités de la dépollution (eau, air) génèrent inévitablement d'autres déchets qui nécessitent une gestion spécifique ;
- Accidentelles : les inévitables dysfonctionnements des systèmes

I.3. Différentes classes de déchets (selon l'Article 5, loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 J.O.A. N°77) :

Les déchets au sens de la législation comprennent trois grandes catégories :

- a. Les déchets ménagers et assimilés ;
- b. Les déchets spéciaux (industriels, agricoles, soins, services,...) ;
- c. Les déchets inertes.

Les estimations faites par Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) et , l'Agence nationale des déchets a recensé en 2016, 22,94 millions de tonnes de déchets dont 11,5 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés, 11 millions de tonnes de déchet inertes (céramiques et débris de travaux de construction ou de démolition) et 400 000 tonnes de déchets spéciaux, valeurs rapportés en 2017 par le journal le soir d'Algérie [2] .

I.3.1 Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Les déchets ménagers et assimilés résultent des :

- Déchets issus des ménages urbains individuels ou collectifs
- Déchets banals issus des activités industrielles (Bois , Métaux, plastiques, plâtre, charpente,...)
- Déchets issus des activités commerciales, artisanales et autres (Papiers, cartons, matériaux d'isolation sans amiante,...)

Les quantités de déchets produites varient d'une ville à l'autre et en fonction de la croissance démographique. Les quantités totales de déchets ménagers assimilés (DMA) collectées par le service, sont en nette augmentation à cause de l'évolution de la société algérienne. En effet , la consommation des ménages a augmenté pour sa part, de près de 45% durant la période 1999-2004. Le tableau I.1 présente l'estimation de l'émission totale des DMA entre 1994 et 2007 [2,5].

CHAPITRE I. GESTION DES DECHETS

Tableau I.1. Estimation de l'émission totale des DMA en (Millions/tonnes) [2]

Années	Total collecte DMA
1994	4.5
1995	5.1
1996	5.8
1997	5.9
1998	9.2
1999	6.9
2000	7.5
2001	8.03
2002	8.6
2003	9.1
2004	9.4
2005	10.5
2006	11.8
2007	13.16
Pourcentage de variation annuel moyen	7.95 %

La figure I.1 représente la répartition des DMA en Algérie en 2014.

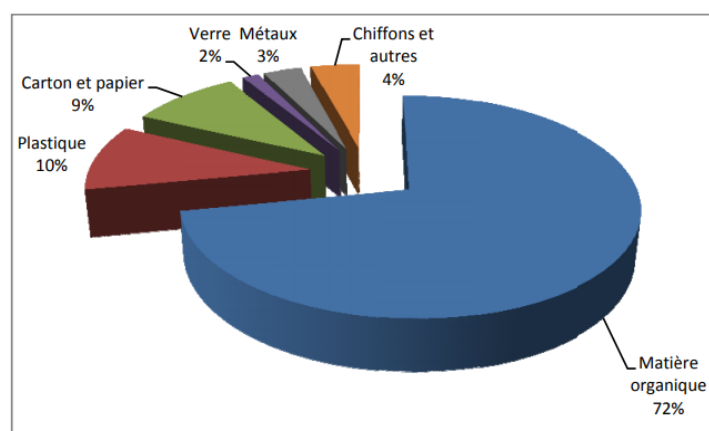


Figure I.1. Composition des déchets ménagers en Algérie (2014) [2]

Les figures I.2, I.3 et I.4 représentent différents exemples de déchet.



Figure I.2. Déchets issus des ménages urbains individuels ou collectifs [6]

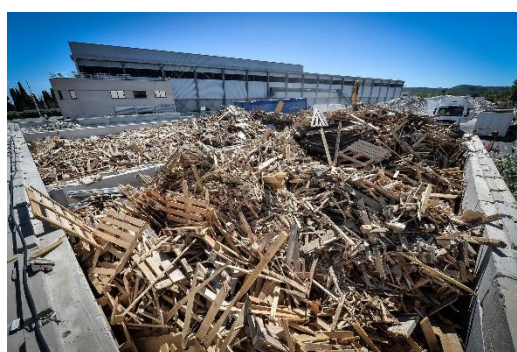


Figure I.3. Déchets banals issus des activités industrielles [7]



Figure I.4. Déchets issus des activités commerciales, artisanales [8]

En effet, d'après la figure I.1, nous constatons que les principaux composants des déchets ménagers et assimilés (DMA) reflète le mode de consommation des ménages algériens qui est basé pour une grande partie sur les produits frais (fruits et légumes) qui sont les éléments organiques avec un taux moyen de 72 %, l'absence de la culture des produits de conserves ce

refaite dans les autres proportions : les plastiques 10 %, le papier/carton 9 %, le verre 2 %, les métaux 3 % et les chiffon et autres 4% [2,5] .

I.3.2 Les déchets spéciaux :

Les déchets spéciaux nécessitent un mode spécifique de traitement en raison de leur nature et de leur composition. L'origine de ces déchets est l'activité industrielle, agricole, les soins, les services et toutes autres activités, qui ne peuvent être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets ménagers et assimilés [2]. Il existe un cas particulier de déchets spéciaux, qui sont susceptibles de nuire à la santé publique et à l'environnement via leurs constituants ou par leurs matières nocives. On parle ici de **déchets ultimes dangereux**.

En 2002, selon le cadastre national des déchets spéciaux Algérien, la production de déchets industriels spéciaux est de 325 000 t/an et la quantité en stock est de 2 008 500 tonnes. Les 12 plus grands générateurs de déchets se trouvent dans les régions Centre, Est et Ouest. Ils produisent près de 87% de déchets au niveau national soit 282 800 tonnes par an, et près de 95% en stock soit 1 905 200 tonnes [9].

Le tableau I.2 donne la répartition des déchets spéciaux des quatre régions les plus importantes en Algérie (2004) :

Tableau I.2. Répartition des déchets spéciaux En Algérie selon MATE en 2004

Région	Production t/an
Est	145000
Ouest	98550
Centre	77007
Sud	4500

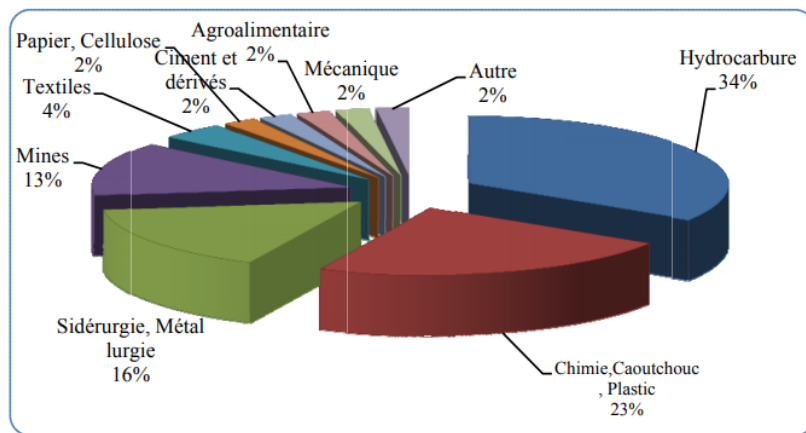


Figure I.5. Différents secteurs générateurs des déchets [9]

En se référant à la figure I.5, nous remarquons que le secteur des hydrocarbures et de la chimie génèrent 57% des déchets spéciaux suivi par le secteur de sidérurgie (16%) et celui des mines avec un taux de 13%. Plus de 10% du total des déchets spéciaux sont répartis entre le textile (4%), le papier, le ciment et dérivés (2%), l'agroalimentaire (2%), la mécanique (2%) et autre (2%). [9]

❖ Déchets ultimes dangereux :

Un déchet ultime dangereux est défini comme un déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux [10]. Dans ce cas le déchet ultimes est mis dans les centres de stockage, cela signifie qu'ils sont enfouis en respectant un cahier des charges rigoureux pour limiter la pollution. Les déchets sont déposés dans une alvéole étanche assurée par une couche d'argile de plusieurs mètres d'épaisseur puis d'une membrane plastique si bien qu'une goutte d'eau mettrait environ 30 ans pour traverser cette couche [5,11]. La figure 1.6 retrace le cycle de vie d'un déchet.

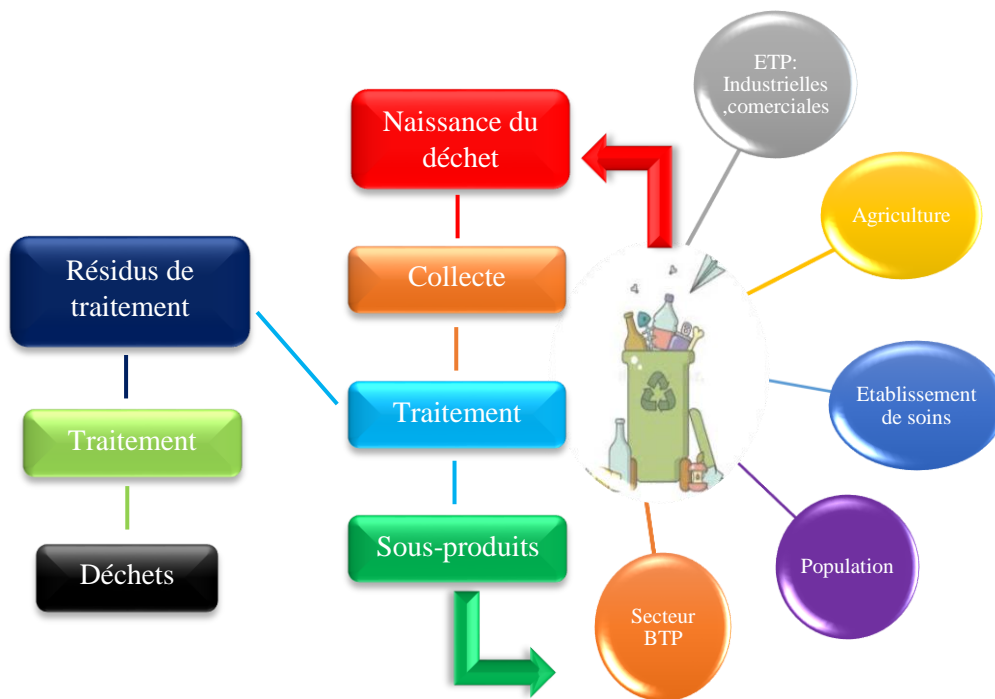


Figure. I.6. Cycle de vie d'un déchet

La figure I.7 montre des exemples de déchet ultime dangereux.



Figure I.7. Exemple de déchet ultime dangereux [12]

❖ Déchets d'activités de soin :

Les déchets d'activités de soin sont des déchets dangereux venant des hôpitaux, cliniques, maisons de retraite, les dispensaires, les services vétérinaires...etc. En 2002, le cadastre des déchets de soins Algérien a recensé plus de 40 190 tonnes de déchets hospitaliers avec 43% pour la région sanitaire du Centre, 29% pour la région sanitaire Est, 22% pour la région sanitaire Ouest, 4% pour la région sanitaire Sud-est et 2% pour la région sanitaire Sud- Ouest [9] .

CHAPITRE I. GESTION DES DECHETS

En outre, sur 236 incinérateurs existant au niveau des établissements hospitaliers sur le territoire national, 64 incinérateurs ne fonctionnent pas. Une taxe incitative au déstockage des déchets issus des activités de soins a été mise en place, elle est d'un montant de 24 000 DA/ tonne de déchet stocké [2,9] .



Figure I.8 . Exemple des déchets de soin [12]

❖ Les déchets agricoles :

Ce sont des déchets qui proviennent de l'agriculture, de la sylviculture et de l'élevage (végétal ou animal). Beaucoup de ces déchets sont liquides et à ce titre (Pesticides, insecticides,...), peuvent être considérés comme des effluents dangereux. Certains d'entre eux sont utilisés sur place pour la fabrication du compost en raison de leur richesse en matières organiques [5].



Figure I.9. Exemple des déchets agricoles spéciaux dangereux [13]

I.3.3 Les déchets inertes

Les déchets inertes sont des déchets qui ne présentent pas de danger pour l'homme ou l'environnement, ils ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique lors de leur mise en décharge. Ces déchets proviennent de l'exploitation des mines, des carrières, des travaux de démolition, de construction ou de rénovation et ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres éléments générateurs de nuisances et susceptibles de nuire à la santé et à l'environnement [5,9].

D'après le Centre National d'Étude et de Recherche Intégrée en Bâtiment (CNERIB), 300 000 à 500 000 t/an de déchets inertes sont produits dans quatre wilayas de la région centre dont 12% d'acier et 40% de béton. En 2003, suite au séisme qui a touché la wilaya de Boumerdès, plus de 2,5 M de tonnes de déchets inertes ont été enregistrées [2].



Figure I.10. Différentes catégories des déchets inertes et non inertes [12]

I.4 Gestion des déchets selon la réglementation en vigueur en Algérie [2]

Selon l'article 3 de Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets, la gestion des déchets est définie comme toute opération relative à la collecte, au tri, au transport, au stockage, à la valorisation et à l'élimination des déchets, y compris le contrôle de ces opérations. À partir de cette définition, plusieurs opérations se distinguent dans le mode de gestion des

déchets existant en Algérie [2,9].

I.4.1 Collecte, transport et stockage des déchets

I.4.1.1 Collecte

La collecte des déchets est une étape obligatoire quel que soit le type de traitement envisagé derrière. Elle consiste à séparer et à trier chaque objet et à l'acheminer vers un centre de traitement approprié.. La collecte est la première étape du traitement des déchets, elle peut se dérouler sur plusieurs étapes [2, 5, 9] :

- **Pré-collecte** : c'est une opération effectuée par les habitants d'un foyer, d'un immeuble d'un organisme ou d'une entreprise qui vise le rassemblement et le stockage des déchets dans des lieux dédiés (caissons métalliques, niches en dur, Poubelles individuelles, Sacs en plastique perdus,...)
- **La collecte globale** : c'est une opération de ramassage et/ou le regroupement effectué par l'ordre public qui rentre dans le cadre de la protection de la santé des populations en vue de les transférer vers un lieu de traitement ou d'élimination (mise en décharge, enfouissement, compostage et incinération).
- **La collecte sélective** : consiste à séparer et à trier les déchets et à les répartir sur divers récipients pouvant être des conteneurs, des poubelles ou des sacs.
- **Tri des déchets** : c'est une opération de séparation des déchets selon leur nature en vue de leur traitement par exemple : le papier, plastique...

I.4.1.2 Transport et stockage

Les déchets sont des matières, solutions ou objets qui ne peuvent pas être utilisés tels quels, mais qui doivent être transportés (route, rail, voie maritime ou aérienne) du lieu de collecte vers un lieu de traitement ou de stockage. Le stockage concerne la fraction des déchets qui ne peut être valorisée sous forme de matière ou d'énergie dans les conditions techniques et économiques. Selon une enquête

menée par les services du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE), le stockage des déchets se fait dans la plus part du temps dans des décharges sauvages (plus de 3 130 décharges sauvages ont été recensées sur les 48 wilayas avec une superficie de l'ordre de 4552.5 ha) [9].

I.4.2 Traitement des déchets

Le terme traitement des déchets est une pratique permettant d'assurer que les déchets sont valorisés, ou éliminés d'une manière garantissant la protection de la santé publique et /ou de l'environnement contre les effets nuisibles que peut générer ces déchets [4,9].

I.4.2.1 Valorisation des déchets :

C'est une opération de réutilisation, de recyclage ou de compostage des produits usés ou des déchets afin d'améliorer leurs valeurs en modifiant leur état en vue de les rendre capables dans un délai fixé d'être utilisable dans d'autres secteurs ou de produire un revenu.

I.4.2.1.1. Recyclage

Le terme recyclage est défini dans le Code de l'Environnement comme toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opérations de recyclage [4].

I.4.2.1.2. Compostage

Le compostage est un processus biologique de valorisation et de transformation sur plusieurs jours des déchets organiques (déchets verts, fruits, légumes, agroalimentaire) à une température de 60 °C pour obtenir un compost. Cependant, malgré le fait qu'il permet de réduire la quantité à enfouir en décharge de 55%, de prolonger la durée de vie de la décharge, et de réduire la matière organique

enfouie. Le compostage ne représente que 1% de l'ensemble des déchets produits en Algérie car son cout est élevé [9].

I.4.2.2 Elimination des déchets :

Lorsqu'une opération ne débouchant pas généralement sur une possibilité de valorisation ou autre utilisation du déchet on procède à l'élimination des déchets par traitement thermique, physico- chimique et biologique, de mise en décharge, d'enfouissement et d'immersion [2,9].

I.4.2.2.1 Incinération :

Incinérer signifie « réduire en cendres ou brûlé » par l'action du feu les matières dans une unité adaptée. L'incinération est une technique polluante qui permet produire de l'énergie (l'électricité, chauffage). L'incinération a deux sous-produits : les mâchefers et des résidus d'épuration de fumées qui sont considéré comme un déchet ultime constitué de poussières et de cendre volante, riche en substances toxiques (dioxines, furanes, HAP, métaux lourds et métalloïdes) [2]. En Algérie, l'incinération est appliquée uniquement pour les déchets hospitaliers au sein des hôpitaux. Pour les DMA, ce mode de traitement n'est pas adopté même si cette solution semble plus écologique que l'enfouissement. Elle présente plusieurs inconvénients :

- Un taux d'humidité qui est très élevé
- Un coût de traitement plus élevé (le traitement d'une tonne revient à 5 000 DA contre 4 000 DA pour l'enfouissement),
- La prédominance de déchets organiques dans les DMA (70% de matières organiques)
- La rentabilité énergétique car le coût du kWh produit par la Sonelgaz est moins cher que celui produit par incinération

❖ Pyrolyse et gazéification

-La pyrolyse et la gazéification sont deux méthodes liées de traitements thermiques où les matériaux sont chauffés à très haute température et avec peu d'oxygène. Cette méthode est plus efficace que l'incinération directe. La pyrolyse des déchets solides transforme les matériaux en produits solides, liquides ou gazeux.

-La gazéification est utilisée pour transformer directement des matières organiques en un gaz de synthèse appelé syngaz composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène. Ce gaz est ensuite brûlé pour produire de l'électricité et de la vapeur. La gazéification est utilisée dans les centrales produisant de l'énergie à partir de la biomasse pour produire de l'énergie renouvelable et de la chaleur [3].

I.4.2.2.2 Enfouissement des déchets :

C'est une opération de stockage des déchets en sous-sol. Les déchets admis en centre d'enfouissement technique (CET) sont des déchets essentiellement solides, minéraux avec un potentiel polluant constitué de métaux lourds très peu réactifs, très peu évolutifs, et très peu solubles comme les déchets issus de l'incinération (cendres, mâchefer).

I.4.2.2.3 Immersion des déchets :

C'est une opération de rejet de déchets dans le milieu aquatique. Le rejet de ces déchets est régi par des lois et des conventions internationales afin de ne pas polluer le milieu aquatique et l'environnement.

Parmi ces déchets [14] :

- les déchets de poisson ;
- les navires et plates-formes ;
- les matières géologiques inertes, inorganiques (par exemple les déchets miniers) ;
- les matières organiques d'origine naturelle ;
- les objets volumineux constitués principalement de fer, d'acier et de béton.

I.4.2.2.4. Procédés de stabilisation /solidification (S/S)

Le terme "**stabilisation /solidification** "sont des procédés qui transforment les déchets en matériaux solides moins problématiques d'un point de vue environnemental ; ces procédés font appels à des techniques d'immobilisation physiques et / ou chimiques de ces déchets [3].

- **La stabilisation**, ou fixation chimique, est définie comme le procédé qui permet de réduire le potentiel dangereux et la lixivibilité (extraction de produits solubles par un solvant) des matériaux en convertissant ces polluants sous des formes moins solubles, mobiles ou toxiques.
- **La solidification** permet de transformer un matériau en un monolithe solide ayant une bonne intégrité physique et structurellement homogène.
- **Objectifs de la stabilisation/solidification des déchets :**

Les procédés de la stabilisation /solidification doivent donc répondre aux objectifs suivants :

- Transformer le déchet en un solide plus facile à transporter et à stocker ;
- Diminuer la surface d'exposition déchet – environnement ;
- Limiter la solubilité des polluants en cas de contact avec un fluide lixiviant afin de ne pas polluer les eaux superficielles ou souterraines.

Les concentrations maximales admissibles dans les Percolats (fluide issus de la fermentation des déchets) sont par exemple de : 5,5 à 9 pour le pH, inférieures à 30° C pour la température, inférieures à 250 mg.L⁻¹ pour les sulfates, inférieures à 15 mg.L⁻¹ pour les métaux, inférieures à 10 mg.L⁻¹ pour les hydrocarbures [3].

CHAPITRE I. GESTION DES DECHETS

I.5 Les coûts de gestion des déchets et amendes

Les coûts de traitement des déchets sont élevés comme cité précédemment. D'autre part la réglementation en vigueur en matière environnementale et de gestion de déchets constitue une liste d'amendes liées au non-respect de la réglementation et aux infractions en rapport avec les déchets. Ces amendes varient selon le type et l'auteur de l'infraction (personne physique ou personne morale : ETP). En plus des amendes, la loi prévoit même une durée d'emprisonnement pour les infractions dangereuses. Le tableau I.3 montre les différents types d'infraction ainsi que les amendes correspondantes à chacune d'elles [1,9]

Tableau I.3. Amendes applicables dans le domaine de l'environnement

Infraction	Amende		
<ul style="list-style-type: none">- Jeter et abandonner des déchets,- Refus d'utiliser un système de collecte de tri...	-Personne physique	500 à 5 000 DA	En cas de récidive : doublement
	-P. physique industrielle, commerciale, artisanale	10000 à 50 000 DA	
<ul style="list-style-type: none">- Jeter ou abandonner des déchets inertes sur tout site non désigné.	10 000 à 50 000 DA		
<ul style="list-style-type: none">- Utilisation de produits recyclés susceptibles de créer des risques pour les personnes.	100 000 à 200 000 DA		
<ul style="list-style-type: none">- Réutilisation d'emballages de produits chimiques pour contenir directement des produits alimentaires.	Emprisonnement 2 mois à 1 an, + 200 000 à 400 000 DA ou l'un des deux		
<ul style="list-style-type: none">- Le mélange des déchets spéciaux dangereux.	Emprisonnement 3 mois à 2 an, + 300 000 à 500 000 DA ou l'un des deux		
<ul style="list-style-type: none">- Remettre des déchets spéciaux dangereux en vue de leur traitement à une personne exploitant une installation (art 62)	Emprisonnement 6 mois à 2 an, + 400 000 à 800 000 DA ou l'un des deux		
<ul style="list-style-type: none">- Exploitation d'une installation de traitement des déchets sans se conformer aux dispositions prévues par loi.	Emprisonnement 8 mois à 3 an, + 500 000 à 900 000 DA ou l'un des deux		
<ul style="list-style-type: none">- Jeter, enfouir, abandonner des déchets spéciaux dangereux dans des lieux non réservés à cet effet.	Emprisonnement 1 an à 3 an, + 600 000 à 900 000 DA ou l'un des deux		
<ul style="list-style-type: none">- Ne pas réhabiliter un site fermé,- Ne pas surveiller un site.	Emprisonnement 6 mois à 18 mois, + 700 000 à 900 000 DA ou l'un des deux		

Source : Loi 2001

I.5 Conclusions :

L'état de l'environnement en Algérie en matière de déchets urbains est très négligé. En effet, il existe des insuffisances constatées sur le terrain parmi lesquelles :

- des quartiers ou de village ne sont pas desservis par la collecte des déchets
- les entreprises privées ou publiques ne respectent pas les lois de collecte, de traitement et de valorisation des déchets
- les ménages n'essayent pas de s'investir dans le traitement et la valorisation des déchets

Cependant, la société et l'état doivent mettre en place une politique environnementale efficace par le respect des lois et la mise en place du dispositif de tri sélectif (papier, verre, plastique, métal...) car la participation des ménages au tri est la clé de réussite.

Enfin, la situation algérienne en terme de déchet est préoccupante et doit évoluer, et cela par des études qui **évalue les impacts environnementaux** avant de procéder à la valorisation et recyclage des métiers.

CHAPITRE II. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

II.1 Introduction :

Avant de s'attaquer aux techniques et aux procédés de recyclage et de valorisation, il est important d'évaluer les impacts environnementaux d'un matériau ou produit. En effet, les impacts environnementaux sont étroitement liés *au cycle de vie* d'un matériau ou produit cela sous-entend que ces produits sont fabriqués pour une durée de vie bien précise et pour un besoin bien précis.

De ce fait, il est important de connaître l'impact environnemental des déchets afin d'améliorer leur stockage et de déterminer les filières de valorisation les plus adaptées et les plus respectueuses de l'environnement.

A titre d'exemple : les déchets inertes ne posent pas de soucis pour l'environnement (sauf visuel) car ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique, chimique ou biologique de nature à nuire à l'environnement. Cependant, les déchets ultimes dangereux sont évolutifs du fait de leur teneur en matière organique et sont souvent stockés et doivent être traités. Donc, dans ce cas le paramètre à prendre en compte est la lixiviation des déchets afin de ne pas polluer les eaux superficielles ou souterraines [2,3].

II.2 Cycle de vie d'un matériau :

II.2.1 Définition du cycle de vie d'un matériau dans le génie civil :

Le cycle de vie d'un matériau inclut plusieurs phases [2,3] :

1. Extraction des matières premières ;
2. Production des constituants ;
3. Fabrication des matériaux et produits qui le composent ;
4. Matériels et engins nécessaires à sa réalisation ;
5. Distribution et transport jusqu'aux chantiers ;
6. Sa construction et sa vie en œuvre (exploitation, maintenance et entretien) ;
7. Et en fin de vie, sa disparition, déconstruction et la valorisation des matériaux.

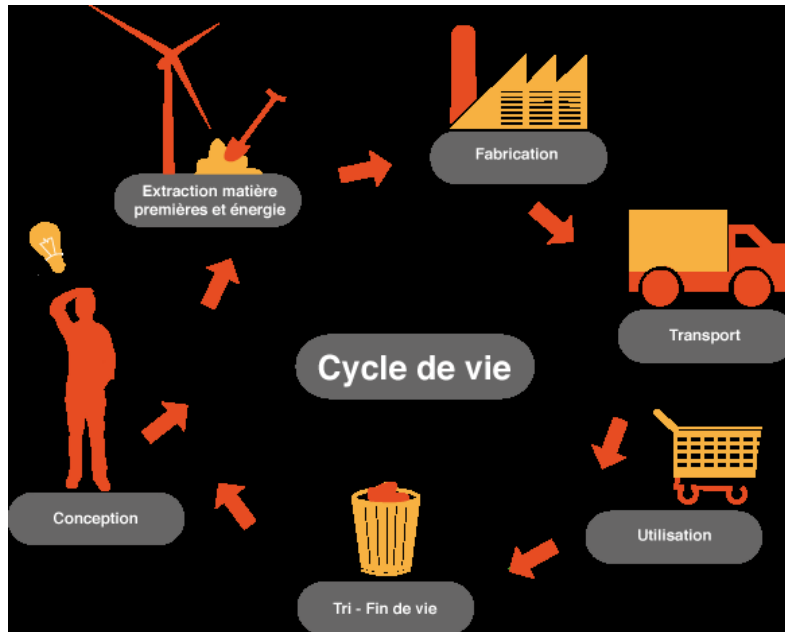


Figure II.1. Schéma définissant le cycle de vie d'un matériau [3]

II.2.2 Avantages de la connaissance du cycle de vie d'un produit :

Le cycle de vie d'un produit passe par son analyse c'est pour ça qu'en parle de l'*analyse du cycle de vie d'un matériau ACV*. En effet, ACV est un outil d'évaluation et d'aide à la décision permettant l'évaluer l'impact environnemental d'un produit ou d'un service afin de définir des priorités d'action en matière d'environnement, et ce, en fonction de l'ensemble des mesures réalisables et des contraintes, notamment économiques. Parmi les avantages de la connaissance du cycle de vie d'un produit ACV [3]:

- Améliorer leur empreinte environnementale grâce à l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO). L'ISO a déjà publié jusqu'à maintenant plus de 350 normes relatives à l'environnement et aux systèmes de management environnemental.
- Maîtriser au mieux les délais et les coûts de la fabrication d'un produit puisque la phase de planification et de conception qui permette de découper le projet en tâches, de décrire leur enchaînement dans le temps, d'affecter à chacune une durée et un effort à réaliser.
- Obtenir une qualité conforme aux exigences. Là aussi, il est également important de définir les normes qualité qui seront appliquées comme la méthode de conception choisie ou les règles qui régiront les tests.

CHAPITRE II. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- Maîtriser la communication qui sert comme appui à une démarche marketing lors d'un lancement de produits
- Le pilotage des projets qui permet le contrôle de la gestion des flux, matière et énergie d'un site

II.3 Evaluation des impacts environnementaux / Analyse de l'impact

Il s'agit d'évaluer l'impact sur l'environnement des émissions et extractions inventoriées pour déterminer quelles émissions contribuent à quel impact environnemental (effet de serre, toxicité humaine,...).

La figure II.2 illustre une évaluation globale des impacts environnementaux. Enfin, le tableau II.3 illustre les différentes catégories de dommage et d'impact qui sont répertoriés dans le logiciel IMPACT 2002 + [2,3].

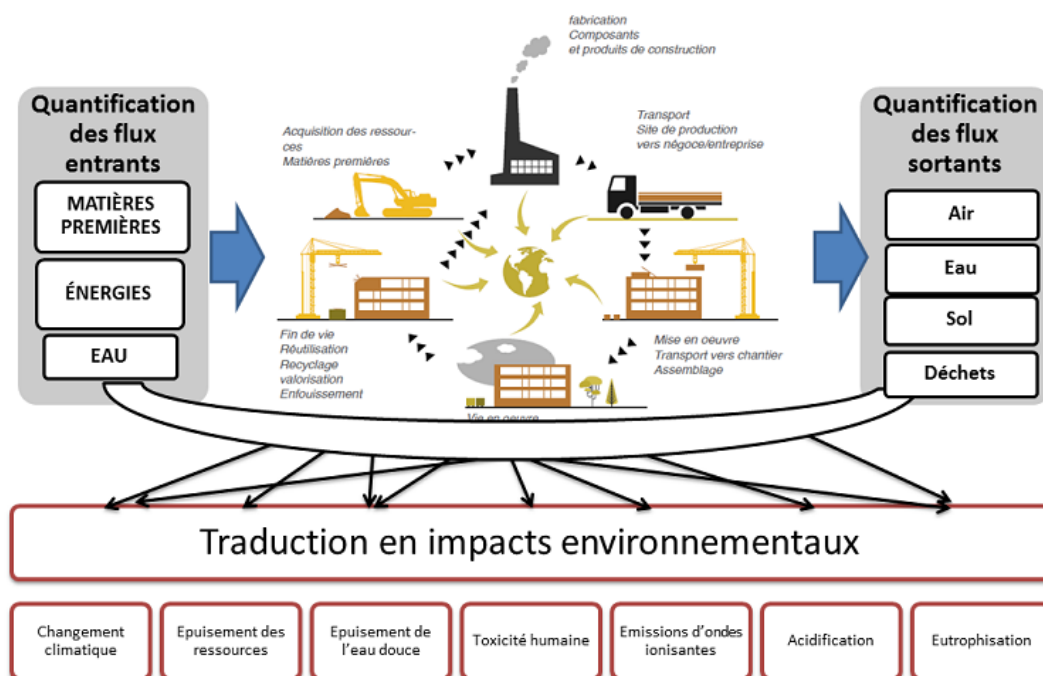


Figure II.2. Evaluation des impacts environnementaux [2]

CHAPITRE II. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

IMPACT 2002+	
Catégorie de dommage	Catégorie d'impact
Santé humaine (SH)	Effets cancérogènes
	Effets non-cancérogènes
	Effets respiratoires dus aux substances inorganiques
	Radiations ionisantes
	Détérioration de la couche d'ozone
	Oxydation photochimique
Qualité des écosystèmes (QE)	Écotoxicité aquatique
	Écotoxicité terrestre
	Acidification/eutrophisation terrestre
	Occupation des terres
Changement climatique (CC)	Réchauffement global
Ressources (R)	Énergies non renouvelables
	Extraction minière

Figure II.3. Différentes catégories de dommage répertorié [2]

II.4 Développement durable dans le Génie civil

II.4.1 Définition :

Le développement durable est un développement ou une évolution qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures. Ce dernier s'articule autour de trois principaux enjeux qui sont [5] :

- Efficacité économique,
- Équité sociale,
- Responsabilité environnementale.

II.4.2 Sous-produits industriels et additions minérales

Le développement durable passe par la valorisation des sous-produits industriels et des additions minérales (laitiers de haut fourneau, Pouzzolane, cendres volantes, scories d'aciéries, etc.) qui participent aux enjeux précédents. D'autre part, l'utilisation des sous-produits industriels et des additions minérales est devenue une priorité dans la composition des ciments et des bétons. De plus, l'incorporation des additions minérales dans le ciment a permis de proposer plusieurs types de ciments à partir d'un même clinker.

En outre, la plupart des ajouts minéraux, en présence d'eau et de chaux forment un silicate de calcium hydraté suivant une réaction exothermique, qui est du même type que celle qui est formée durant l'hydratation du ciment Portland . La réaction pouzzolanique qui se produit concerne principalement les fumées de silice, les cendres volantes et les pouzzolanes naturelles.

Enfin, les études effectuées sur les ajouts minéraux et les sous-produits industriels comme le Laitier ont montrés qu'ils contribuent à la correction de la structure inter-granulaire des mortiers et bétons. Ils jouent le rôle de micro agrégats. De ce fait, ils contribuent à la diminution de la porosité du matériau et donc à l'amélioration des propriétés des mortiers et bétons (maniabilité, résistances et durabilité...).

II.4.2.1 Laitier de haut fourneau

Les laitiers sont des sous-produits de l'industrie métallurgique. Leur composition chimique comporte de l'oxyde de calcium « CaO : chaux vive » (40 à 50 %), silice (25 à 35 %), l'alumine (12 à 30 %) ainsi que la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantité. La norme distingue deux classes de laitier A et B selon la manière de traitement à la sortie du haut fourneau [NF P 18-506] .

- Laitier cristallisé : le refroidissement lent à l'air, donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant et qui peut contenir des éléments nuisibles aux bétons, ce qui amène leur utilisation comme granulats pour les travaux routiers.

CHAPITRE II. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- Laitier granulé (vitrifié) : le refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air qui empêche la cristallisation, ce qui la rend plus réactive et permet son utilisation dans les ciments et les bétons.



Figure. II.4. Types de laitier [5].

Le chercheur, (Demirboga, 2003) a montré en étudiant l'effet de l'incorporation du laitier granulé de hauts fourneaux (10 %), qu'il engendrait une augmentation de la densité et une diminution de la résistance en compression à 28 jours et une amélioration à 120 jours.

D'autre part (Öner et al. 2003) ont étudié l'effet de la finesse sur la variation de résistance des ciments avec du laitier de haut fourneau. Les résultats ont montré que les meilleures valeurs de résistance ont été données pour une grande finesse. (Jianping et al.2012) ont étudié aussi l'effet de la granulométrie du laitier sur les résistances mécaniques et la demande en eau. Les résultats ont montré que les résistances à la flexion et à la compression augmentent avec la diminution de la taille des particules du laitier de haut fourneau. D'autre part, les particules fines du laitier augmentent les besoins en eau.

(Sagoe-Crentsil et al.2001) ont montrés que le remplacement de 35% du ciment dans le béton recyclé par un laitier de haut fourneau cause une légère augmentation de la résistance à long terme. Un meilleur gain de résistance entre 7 et 28 jours a aussi été observé pour le béton contenant du laitier. Le remplacement de 65% du ciment par un laitier de haut fourneau permet de compenser la perte de résistance à la compression due à l'utilisation de granulats recyclés [15-17].

II.4.2.2 Les scories d'aciérie

II.4.2.2.1 Définition

Les scories sont des sous-produits solides issus de la fusion, de l'affinage, du traitement ou de la mise en forme des métaux à haute température. Dans le cas particulier de la métallurgie du fer, les scories pauvres en fer sont appelées laitier. Ces dernier, sont des mélanges d'oxydes divers qui surnagent sur le métal en fusion, ou s'en détachent lors de leur mise en œuvre à haute température. Elles sont de compositions extrêmement variées suivant les époques, les procédés et les métaux traités. Qu'elles soient des déchets extrêmement polluants ou des coproduits appréciés, les scories métallurgiques représentent un enjeu écologique et économique essentiel dans la métallurgie extractive.

En effet, ces coproduits sidérurgiques, de bonne qualité mécanique, ne sont généralement pas stables dans le temps car la chaux libre et la magnésie libre qu'ils contiennent, s'hydratent et provoquent des expansions parfois importantes. Les oxydes de calcium et de magnésium contenus dans les scories ont tendance à s'hydrater et à se transformer en hydroxydes de calcium Ca(OH)_2 et de magnésium Mg(OH)_2 . Cette réaction chimique entraîne une augmentation de volume des oxydes de l'ordre de 5 à 10 % dans le cas de Ca(OH)_2 et de plus de 100 % dans celui du Mg(OH)_2 [5].

II.4.2.2.2 Élaboration des scories

Après refroidissement en fosse des scories, Les scories sont acheminées pour maturation vers un stock intermédiaire sur le crassier pendant environ une année. Ils sont ensuite traités, concassé et criblé (Figure. II.5).



Figure. II.5. Vidange d'une cuve à scories

II.4.2.2.3 Compositions chimiques et minéralogiques des scories

La composition chimique élémentaire selon le diagramme ternaire ($\text{CaO} - \text{SiO}_2$ et Al_2O_3) de Rankin classe les scories d'aciérie proche du domaine de la représentation du ciment. Cette composition peut varier du fait de la variété des fontes traitées et des techniques d'affinage. La structure chimique élémentaire de la scorie est donnée dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Composition chimique élémentaire de la scorie [15]

Elément	% Masse	% Atomique
Ok	23.96	45.79
MgK	1.00	1.26
AlK	0.56	0.63
SiK	6.77	7.37
CaK	36.26	27.66
MnK	8.27	4.60
FeK	23.17	12.68

II.4.2.2.4 Utilisation des scories en Génie Civil

a) En briqueterie

Cette voie de valorisation consiste à utiliser ces scories d'aciérie comme matières premières dans la fabrication de briques cuites. La composition chimique des scories semble en effet bien adaptée

CHAPITRE II. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

à cette utilisation. De plus, la longue cuisson en présence d'argiles, de sable et de schiste devrait permettre de s'affranchir des problèmes bien connus dus à la chaux libre des scories (gonflement / éclatement) [5].

b) En technique routière

Une autre utilisation possible de ces laitiers se situe dans les couches de roulement en raison de leurs qualités mécaniques très intéressantes. Mais les premières expériences réalisées (dans les années 70) ont conduit à des désordres après quelques mois (excroissances à la surface du revêtement). Des études sur des enrobés bitumineux ont montré que ces problèmes pouvaient être très sensiblement limités par un concassage suivi d'un vieillissement du laitier LD (vieillissement à l'air, à l'eau) [5].

c) En terrassement

Toutes filières confondues, le laitier d'aciérie est valorisé comme matériau de viabilité dans les techniques de génie civil comme remblai, protection de berges ou pour le drainage des talus.

II.4.2.3 La pouzzolane :

Les pouzzolanes sont un sous-produit composé essentiellement de silice et d'alumine (entre 70 et 80 %). Elles peuvent être d'origine naturelle ou artificielle. Les pouzzolanes sont formées surtout d'éléments vitreux elles peuvent être substituées au ciment à un pourcentage qui peut aller jusqu'à 25 %. Les pouzzolanes forment des hydrates stables en présence d'eau. Elles jouent un rôle de remplissage des pores et de correcteurs granulaires. Elle modifie aussi le produit interne de la phase alite [17].

Le chercheur, (Çolak. 2003) a étudié plusieurs caractéristiques des pâtes de ciment Portland contenant de la pouzzolane naturelle. Il a abouti au fait que :

- la substitution de 40 % de ciment Portland par la pouzzolane naturelle augmente le temps de prise (4 à 5 h).

CHAPITRE II. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

- l'incorporation de la pouzzolane naturelle en remplacement du ciment Portland a engendré une augmentation de la teneur en eau et de la porosité. De ce fait l'utilisation de superplastifiant est recommandée.

- la pouzzolane agit à long terme à cause des réactions avec l'hydroxyde de calcium.

- la substitution d'un grand pourcentage de pouzzolane naturelle dans le ciment a un effet néfaste sur la résistance au cycle gel-dégel et aux sulfates.

En outre, (Rodriguez-Camacho et al.2002) ont analysé l'importance de l'utilisation des pouzzolanes naturelles sur la résistance aux attaques des sulfates. Il a été constaté que certains ciments (types I et V) ont une meilleure résistance aux sulfates que les autres ciments. D'autre part, de meilleures résistances ont été enregistrées pour les pouzzolanes contenant de l'alumine à moins de 16 % et cela pour tous les types de ciment.

Par ailleurs, (Turanli et al.2005) ont examiné l'effet de grande quantité de pouzzolane naturelle (35, 45, et 55 %), sur les propriétés des pâtes et mortiers. Ils ont abouti aux résultats suivants :

- le temps de prise augmente avec l'augmentation des quantités de pouzzolanes incorporées.

- l'expansion après immersion dans une solution de sulfate été inférieur pour les ciments contenant de grandes quantités de pouzzolane.

II.4.2.4 Les Cendres Volantes

Les cendres volantes sont les particules non combustibles entraînées par les fumées lors de la combustion du charbon pulvérisé dans les chaudières des centrales thermiques. Pour réduire la pollution atmosphérique, les cheminées de ces centrales sont équipées de dépoussiéreurs qui captent les cendres pour éviter leur dispersion dans l'atmosphère. D'autre part, la composition chimique des (CV) est proche de celle des pouzzolanes naturelles ; elle varie en fonction de l'origine des charbons. En effet, les cendres volantes siliceuses ont des propriétés pouzzolaniques et ils sont essentiellement constitués de dioxyde de silice (SiO_2) et d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3). Tandis que les cendres volantes calciques sont essentiellement constituées d'oxyde de calcium (CaO) de dioxyde de silice (SiO_2) et d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) [15,16].



Figure. II.6 Aspect général de la cendre volante [16]

D'autre part, les cendres volantes peuvent être utilisées dans plusieurs domaines tels que :

- Traitement de sol ;
- Assises de chaussées ;
- Liants hydrauliques routiers et ciments ;
- Bétons : prêts à l'emploi, de chantier, autoplacants, de chaussées, préfabriqué ;
- Coulis d'injection, faible ou forte résistance.

CHAPITRE II. ÉVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

En effet, l'utilisation des cendres volantes à montrer dans les recherches scientifique que cela permet de réduire la quantité de ciment utilisée et donc diminuer les coûts ; améliorer la maniabilité du béton et améliorer l'acquisition des performances mécaniques à long terme et la durabilité.

D'autre part, la finesse d'une cendre influe directement sur la vitesse de développement des résistances mécaniques. Il s'agit donc de l'un des paramètres principaux pour la définition de l'aptitude d'une cendre à être additionnée au ciment. La finesse d'une cendre est comprise entre 2200 et 4000 cm^2/g [15].

En outre, (Kou et al. 2001) ont prouvé que le remplacement d'une fraction du ciment par des cendres volantes cause une diminution de la résistance à 28 jours. Il y a par contre un gain de résistance plus grand de 28 à 90 jours dû à l'effet pouzzolanique des cendres volantes.

Enfin, Selon Kou, (Kou et Poon, 2012), les cendres volantes contribuent aussi à diminuer le retrait de séchage dans les bétons utilisant un granulat recyclé [16].

II.5 Conclusion

Dans une période où le souci de protection de l'environnement prend une place de plus en plus grande, l'évaluation des impacts environnementaux est devenue une exigence. En effet, l'emploi de matériaux issus de sous-produits industriels et des additions minérales offre plusieurs avantages majeurs et indiscutables :

- L'économie des décharges dont on cherche à réduire le nombre et l'usage ;
- L'économie d'argent, en particulier dans la fabrication de ciment et la substitution d'une partie du ciment par d'autres matériaux
- Réduire l'impact environnementale et la pollution
- Aboutir à des matériaux plus performant et plus durable (Béton avec additions)

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

III.1 Introduction :

La préservation de l'environnement et ses nombreux enjeux socio-économiques occupent une grande place dans les défis de ce siècle. L'augmentation de la production entraîne une baisse des niveaux des réserves naturelles de matières premières et génère une grande quantité de déchets. Pour répondre au problème posé par la diversité et la quantité des déchets, leur valorisation par une réintroduction dans le circuit normal de production, autrement dit leur **recyclage**, est une solution qui a été adoptée autant par les pays développés que par ceux en voie de développement [2].

Le **recyclage** est un procédé de traitement des déchets (industriels ou ménagers) de produits arrivés en fin de vie, qui permet de réintroduire certains de leurs matériaux dans la production de nouveaux produits

Le terme recyclage fait l'objet d'une définition réglementaire dans le Code de l'Environnement : « Recyclage : toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les matériaux recyclables comprennent certains métaux, plastiques et cartons, le verre, les gravats, etc.

Le recyclage contribue à diminuer les quantités de déchets stockés en décharge ou incinérés et d'économiser les ressources naturelles (matière première et énergie). Il est cependant contré par l'augmentation de la production des déchets [4] .

III.2 Types de recyclage

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

- Le recyclage dit « chimique » utilise des réactions chimiques pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants ;
- Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer ou pour séparer les éléments ;
- Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz

III.3 Recyclage des déchets

Le recyclage s'inscrit dans la stratégie de traitement des déchets dite des 3R [3,5,21]:

- **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 usage un nouvel usage ;
- **Recycler**, qui désigne le procédé de traitement des déchets par recyclage.

Certains déchets sont lourds, contaminants, toxiques, écotoxiques, radioactifs, médicaux ou hospitaliers à risques, vétérinaires, combustibles et/ou explosifs ; ils sont donc sources de risques pour la santé de ceux qui les approchent. D'autre part, le recyclage de déchets permet de :

- Réduire l'extraction des matières premières ;
- Réduire des pollutions et nuisances ;
- Préserver de la diversité biologique et des espaces naturels ;
- Protection des recoures naturels ;
- La protection de l'atmosphère ;
- Contrôler et déduire des déchets dangereux.
- Une consommation moindre d'énergie ;
- Une réduction de l'utilisation des produits toxiques ou dangereux ;

III.3.1 Eaux usées

L'eau est un bien naturel qui est indispensable à la vie et fortement consommé, mais dont les ressources sont limitées. Dans les pays développés, elle est recyclée et une part de l'eau consommée est issue d'eaux usées, assainies et redistribuées. La gestion de ce recyclage des eaux usées nécessite des infrastructures et une exploitation toutes deux lourdes, généralement confiées à des entreprises spécialisées dans le traitement et la distribution d'eau ou au palier de gouvernement local [2,4].

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

Tableau III.1. Procédés e recyclage des eaux

Produit	Procédé
Eau	Récupérée et transportée par les réseaux d'égout. Traitée dans des stations d'épuration pour être à nouveau consommée.

III.3.2 Déchets usuels inertes

Les déchets usuels inertes sont produits par les ménages et les industries. Ils forment la part la plus large des déchets recyclables. Ils sont souvent simples à collecter et à transformer. Ils sont peu dangereux. En revanche, ils représentent des volumes importants à transporter et à stocké [2,4].

Tableau III.2. Procédés de recyclage des déchets usuels inertes.

Produit	Procédé
Acier	Repris en l'état par des sociétés de récupération de métaux. Fabrication des pièces de moteur, des outils, des boîtes de conserve, etc.
Aluminium	Repris en l'état par des sociétés de récupération de métaux. Fabrication des canettes, du « papier » d'emballage, des constituants d'automobile (culasses, jantes, boîtes de vitesses, etc.)
Caoutchouc	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Les pneus hors d'usage sont utilisés pour produire de nouveaux pneus (rechapés), de la poudrette de caoutchouc (ou des pellets), des bacs à fleurs, des tréteaux, des panneaux d'insonorisation, des tuiles de revêtement de sol, de l'asphalte caoutchoutée pour routes, terrains de sports et de jeu pour enfant , etc.
Carton	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Fabrication d'autres types de papier et de carton « recyclés ».
Gravats	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Broyés sous forme de granulats employés à nouveau dans le secteur de bâtiment ou le secteur industriel.

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

Papier	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Fabrication d'autres types de papier et de carton, dalles pour faux-plafonds, isolants cellullosiques.
Plastique	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Fabrication de sacs, de récipients et couvercles pour produits non alimentaires, de meubles de jardin, de vêtements, de jouets, de mobilier urbain, de clôtures, de tuyaux, de pièces d'automobile (pare-chocs, batteries...), d'éléments de signalisation routière, de cônes de voirie, etc. À noter que depuis avril 2008, la réglementation européenne autorise, en production de matériaux pour contact alimentaire, l'emploi de matériau recyclé qui a été au contact alimentaire. Une grande rigueur est alors imposée dans le tri et le procédé de régénération.
Textile	Repris en l'état par des sociétés de récupération.
Fabrication de textile et de pâte à papier.	
Verre	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Refonte des articles en verre pour en faire des neufs.
Brique alimentaire	Repris en l'état par des sociétés de récupération. Les briques broyées (technique dite de pulpage), lavées, essorées et séchées, sont triées en papier / alu et PE. Le PE est transformé en bidon, bouteille, tuyau, etc.
Équipement électrique et électronique	Les appareils sont récupérés, démantelés, déchiquetés et broyés, au moyen d'une chaîne. Les fragments valorisables sont récupérés sous forme de métaux ferr

III.3.3 Déchets usuels non inertes

Les plus connus de ces déchets sont les huiles et les peintures. L'incinération avec valorisation énergétique est un des procédés employés pour les recycler. Elle permet la production d'énergie et la destruction des déchets peu combustibles [2,4].

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

Tableau III.3. Procédés de recyclage des déchets usuels non inertes.

Produit	Procédé
Déchets liquides à composante minérale (tels que déchets de revêtement de surface, boues résultant du travail des métaux, dépollution d'eau, etc.)	Traitement physico-chimique minéral : neutralisation des acides et des bases, transformation des produits toxiques solubles en composés insolubles précipités au sein de la solution, séparation des solides et des liquides par décantation ou par filtration
Déchets liquides polyphasiques (tels que résidus de lavage et de dégraissage des cuves et des sols)	Traitement physico-chimique organique en deux étapes : séparation par décantation et séchage par incinération.
Déchets organiques (tels que huile, peinture, vernis, etc.)	Incinération avec valorisation énergétique : production d'énergie et destruction des déchets peu combustibles. Avant rejet à l'atmosphère, les gaz restants sont traités au charbon actif par adsorption, et neutralisés.
Déchets synthétiques (huile synthétique, produits de nettoyage des automobiles...)	Incinération avec valorisation énergétique : production d'énergie et destruction des déchets peu combustibles.

III.3.4 Déchets industriels dangereux

L'industrie produit une grande quantité de déchets dangereux. Ce sont pour la plupart des produits comprenant des substances chimiques toxiques ou instables. Les déchets toxiques sont dangereux pour la santé et pour l'environnement. La manipulation de déchets instables entraîne des risques d'accidents graves [2,4].

Tableau III.4. Procédés e recyclage des déchets industriels dangereux

Produit	Procédé
Boues de déchets industriels	Chauffage des déchets dans le but d'en réduire la masse et de valoriser les sous-produits. Il s'agit de techniques de séchage ou de séchage par incinération en utilisant différentes techniques. Les

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

	gaz issus du séchage peuvent être recyclés comme source de chaleur dans le procédé à partir d'une chaudière. En fonction des résidus obtenus par séchage, ceux-ci peuvent être stockés pour une utilisation ultérieure.
Déchets liquides biodégradables. Tels que les eaux issues d'un traitement physicochimique, eaux de pollution accidentelle...	Traitement biologique qui consiste à transformer la matière organique en une boue par des moyens physiques. Les micro-organismes dégradent et assimilent certaines substances organiques par sécrétion d'enzymes. La boue biologique est extraite de l'eau par décantation ou flottation. Pour accélérer le processus de dépollution dans les procédés aérobiques, on utilise un apport d'oxygène (de l'air ambiant, ou pur) dans les bassins.
Hydrocarbures liquides. Les hydrocarbures liquides sont en particulier des résidus de nettoyage de fond de bac ou des concentrats huileux provenant d'opérations physico-chimiques (filtration, décantation).	Séparation de l'eau, des hydrocarbures et des sédiments par des procédés physiques (décantation, débouillage, centrifugation, filtration). Valorisation thermique des hydrocarbures récupérés.
Hydrocarbures solides. Concerne les hydrocarbures pâteux et/ou solides tels que les déchets d'hydrocarbures issus de raffinerie et de dépôts pétroliers ; ou tels que les déchets pétroliers d'activités portuaires : boues de station de déballastage, boues de curage de bassins, déchets de marée noire, etc.	Les déchets d'hydrocarbures sont mélangés à des réactifs neutralisants. Ce processus lent produit une séparation des hydrocarbures sous forme simple (CO ₂ , H ₂ O). Combinée avec des réactifs, cette matière sous forme physique homogène devient stable, hydrophobe, oléophile et commode à entreposer. La matière finale servira comme terre de recouvrement, absorbant oléophiles, ou incorporée aux enrobés routiers.
Métaux. Concerne les métaux tels que fûts, conteneurs, emballages légers, mâchefers, sels d'argent de bains photographiques, etc.	Les fûts, conteneurs, emballages légers (en fer blanc) qui ne sont pas réutilisés en l'état après nettoyage sont compactés et transportés aux aciéries. Les mâchefers, dépollués et ôtés de tout élément métallique sont réutilisés par l'industrie

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

	métallurgique. Les sels d'argent sont stockés et transférés dans un réacteur agité, pour précipiter le sulfure d'argent. Après séparation, on obtient une boue qui sera calcinée pour la récupération de lingots d'argent.
PCB. Les PCB ou polychlorobiphényles sont des dérivés chimiques chlorés plus connus sous le nom commercial de « Pylène ». Les PCT (polychloroterphényles) sont des produits proches.	Incinérés et détruits à très haute température dans des unités spécifiques. Dans certaines unités, le chlore contenu dans le PCB est recyclé par incinération, sous forme d'acide chlorhydrique.
PCB des transformateurs et condensateurs contenant du pylène.	Chaque appareil ou équipement est vidé de son contenu liquide, démonté, et traité suivant la nature des parties actives, noyaux, bobines, cuve, etc.
Après décontamination, le cuivre et le papier sont séparés et réemployés.	
Solvants. Cétones, hydrocarbures aliphatiques, méthylbenzène, esters, glycols et solvants chlorés (trichloroéthane, trichloréthylène) issus d'activités industrielles légères (ateliers de réparation automobile) ou lourdes (métallurgie, construction automobile).	La régénération de solvants utilise la distillation simple, la distillation fractionnée sur colonne et / ou la distillation par entraînement à la vapeur pour séparer les différents constituants des solvants usés. Après distillation, les solvants sont « séchés ». L'eau résiduelle est extraite par fixation sur un support ne réagissant pas chimiquement avec le solvant. Valorisation thermique des hydrocarbures récupérés.

III.3.5 Déchets toxiques en quantités dispersées

Certains déchets toxiques sont mélangés en faible quantité à des produits non polluants. Il est alors impossible de recycler ces produits sans les avoir débarrassés des déchets toxiques [2,4].

Tableau III.5. Procédés e recyclage des déchets toxiques

Produit	Procédé
---------	---------

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

Lixiviat	<p>Valorisation du biogaz de décharge afin d'évaporer les lixiviats et d'oxyder thermiquement les vapeurs.</p> <p>L'objectif est de proposer un traitement «zéro rejet liquide» et d'adapter une technique souple et susceptible de traiter tout type de lixiviats.</p> <p>Étapes de traitement :</p> <ul style="list-style-type: none">• combustion du biogaz par torchère ;• récupération de l'énergie contenue dans les gaz ;• évaporation de l'eau ;• traitement par oxydation thermique des vapeurs issues de l'évaporation.
Pile alcaline et pile saline	<p>1- Préparation au traitement mécanique. Le procédé utilisé est un procédé hydrométallurgique (attaque chimique/traitement à froid) qui permet une valorisation de 80 % des composants de la pile. À la réception des lots, les piles sont triées afin de séparer les piles salines et alcalines traitées sur place. Les autres modèles (piles boutons) sont dirigées vers des installations spécialisées. Les piles sont broyées afin d'obtenir un mélange, puis tamisé pour séparer les poudres de charbon, de zinc, de manganèse, de potassium, de mercure, des autres parties plus denses. Ces dernières sont dirigées vers un séparateur magnétique qui extrait la partie métallique (fer) revendue à l'industrie métallurgique, et vers un séparateur à courants de Foucault qui dissocie, le papier et le plastique, du cuivre et du zinc.</p> <p>2- Préparation au traitement chimique. La poudre de pile est attaquée à l'acide sulfurique et le magma obtenu est filtré sur filtre presse. On obtient deux produits distincts : un résidu carboné composé de graphite et un liquide contenant des sulfates mixtes dissous dans l'eau.</p>

III.3.6 Impact du recyclage dans l'industrie

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) ;

- 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 UV 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. Dans ce dernier domaine, de plus en plus de fabricants utilisent des matériaux issus du recyclage [2, 4] .

III.3.7 Impacts du recyclage sur l'environnement

Les bénéfices socioéconomiques et environnementaux du recyclage sont considérables : moindre pression sur les ressources naturelles et paysagères, réduction des déchets, emplois dédiés, économies de matières premières. Ainsi [5] :

- le recyclage des métaux ferreux (acier notamment) et des métaux non ferreux permet d'économiser du minerai et du carburant ; le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4 kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- le taux de recyclage de l'aluminium est estimé à 95 % ;
- chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;

- chaque tonne de plastique recyclé économise 700 kg de pétrole brut ;
- chaque feuille de papier recyclée fait économiser 1 L d'eau et 2,5 Wh d'énergie en plus de 15 g de bois

III.4 Exemples de recyclages des déchets en nouveaux matériaux :

III.4.1 Déchets de démolition comme granulats pour bétons

De nos jours, le béton utilisé comme matériau de construction pose des problèmes en termes de respect de l'environnement car l'impact de ce dernier n'est pas négligeable. En plus, la consommation d'énergie due au béton provient d'activités consommatrices d'énergie qui entraînent une émission plus ou moins forte de CO₂ (transport, confection, consommation électrique, réactions chimiques, etc).

D'autre part, le béton est essentiellement composé de sable et de gravier, et un peu de ciment, il est donc déjà plus écologique que le ciment "pur" si le sable et le gravier sont extraits localement et sans trop de dommages à l'environnement.

En effet, la fabrication du ciment se fait à partir de calcaire et nécessite un chauffage à très haute température (1450°C) qui engendre d'importantes émissions de CO₂. La fabrication du ciment est donc une importante source de gaz à effet de serre. Et représente environ 7 à 8 % des émissions totales de CO₂ à l'échelle du globe (à comparer par exemple à 2% pour l'aviation civile). Chaque tonne de ciment produite requiert l'équivalent de 60 à 130 kg de fuel (ou son équivalent) et une moyenne de 210 kWh. Le ciment du cimentier Portland représente 930 kg de CO₂ émis par tonne de ciment produite. Les cimenteries modernes utilisent de plus en plus des déchets combustibles de récupération pour alimenter leurs fourneaux : carcasses de pneus, carcasses de viande, ...

Aujourd'hui Il existe un réel potentiel de recyclage du béton de déconstruction est sa transformation en grave à usage routier (remblai, couche de forme). Le « retour du béton au béton » par l'usage différencié de sa phase granulat et de sa phase matrice cimentaire permettrait un recyclage optimisé permettant sa réutilisation complète en tant que granulat recyclé en technique routière, mais aussi en béton routier ou en béton de structure, matière première (secondaire) de liants hydrauliques [2,5] .

Enfin, le recyclage du béton permet de [20]:

- Résoudre le manque de granulat naturel ;
- Prolonger la durée d'exploitation des carrières existantes ;
- Réduire les volumes mis en décharge.

III.4.1.1 Définition des granulats recyclés :

On entend par « granulat recyclé », un granulat provenant du recyclage de débris de démolition en opposition aux « granulats naturels ». Le terme « granulat recyclé » décrit un granulat qui a une fraction grossière (5 mm à 20 mm) composés du granulat d'origine et de mortier attaché à celui-ci et peuvent contenir une faible teneur en enrobé bitumineux dans le cas du recyclage des enrobés routiers (figure III.1 et figure III.2). Selon (Fathifazl *et al.*, 2009 et Etxeberria *et al.*, 2007) les granulats recyclés provenant du béton doivent être considérés comme un système composé de deux phases distinctes, le mortier et le granulat d'origine .La teneur en mortier résiduel attaché au granulat d'origine a un grand impact sur les propriétés du granulat recyclé De ce fait, la teneur en mortier résiduel du granulat est une des caractéristiques importantes permettant d'évaluer la qualité d'un granulat recyclé. Une des conséquences de la présence du mortier résiduel est la formation d'une zone de transition entre le granulat original et le mortier résiduel en plus de la zone de transition se formant entre le granulat recyclé et la nouvelle pâte de ciment [20].



Figure. III.1. Granulats recyclés [20]

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

GRANULATS RECYCLES (issus de bétons recyclés ou de matériaux inertes recyclés)

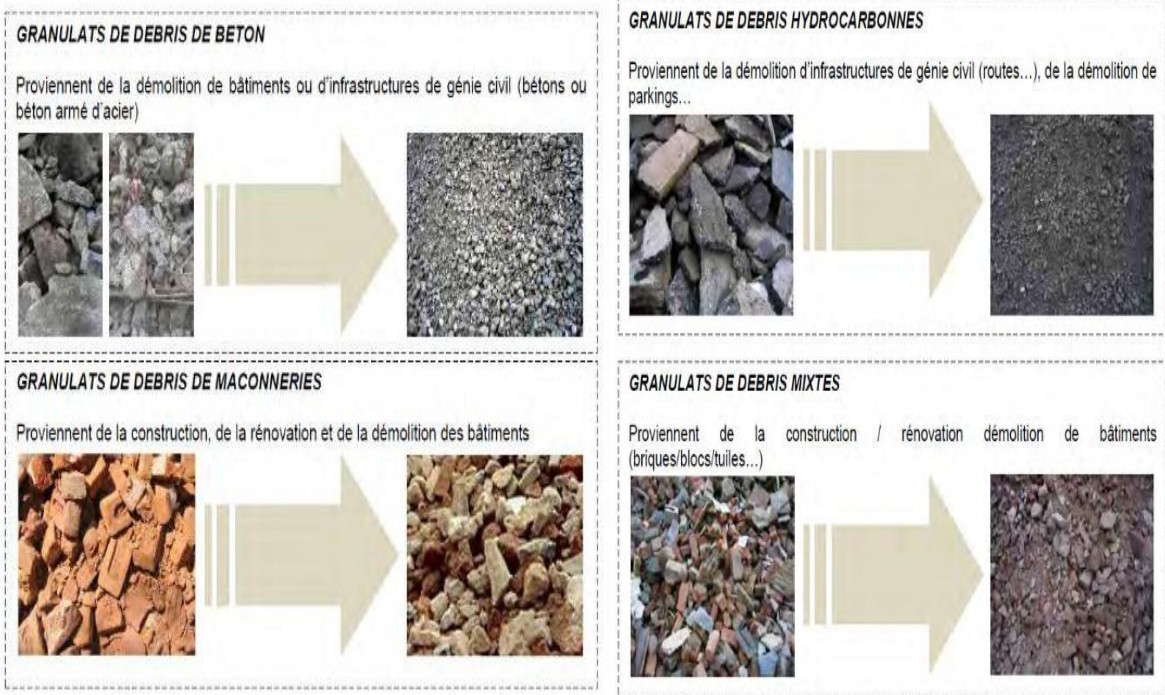


Figure III.2. Origines des granulats [5]

III.4.1.2 Domaine d'application :

Les granulats recyclés sont utilisés pour les sous fondation des voiries (chemins d'accès aux habitation, lotissement infrastructures sportives, hospitaliers ,...etc) (figure III.3).



Figure III.3. Application en fondation et en sous- fondation de différentes infrastructures

III.4.1.3 Propriétés du granulat recyclé et approche environnementale dans la production du béton

La présence du mortier résiduel attaché au granulat original affecte plusieurs propriétés du granulat, parmi elles [5] :

- Gangue de ciment d'ancien mortier ;
- Faible densité ;
- Grande capacité d'absorption d'eau ;
- Les granulats recyclés se lessivent dans l'eau ;
- Les granulats recyclés sont friables, moins réguliers et moins durs que les granulats naturels ;
- Les granulats recyclés engendrent un phénomène de ségrégation dans les bétons (Béton recyclé).

Parmi les autres propriétés qui ont été étudiées par différents chercheurs :

➤ **Distribution granulométrique**

Selon (Chakradhara Rao et al., 2011) Les granulats recyclés ont souvent plus de particules fines que les granulats naturels . Cependant, on ne peut pas généraliser cette caractéristique puisqu'elle varie beaucoup en fonction du type de granulat recyclé utilisé et du type de granulat naturel auquel on le compare.

Les chercheurs (Padmini *et al.*, 2009) on observés une diminution de la résistance du béton variant entre 10 à 35% en fonction de la grosseur des granulats recyclés. Plus la taille maximale de ces granulats est petite plus grande est la réduction de résistance observée. Il peut donc être nécessaire de diminuer le rapport E/C pour maintenir la même résistance à la compression [20-23] .

➤ **Masse volumique**

Selon (Chakradhara Rao et al., 2011; de Juan et Gutierrez, 2009; Fathifazl et al., 2009; Padmini et al., 2009; Sagoe-Crentsil et al., 2001) la densité relative du granulat recyclé est moins grande que celle du granulat naturel . La littérature à ce sujet indique que la densité relative des granulats recyclés se situe généralement entre 2,4 et 2,5 (2400 à 2500 kg/m³) alors que les granulats naturels ont généralement une masse volumique de l'ordre de 2,75 (2750 kg/m³). La masse volumique plus faible du granulat recyclé

est causée par la présence du mortier résiduel qui a une masse volumique plus faible que celle du granulat original et diminue par conséquent la masse volumique totale du granulat recyclé . Cette réduction en densité est fonction de la teneur en mortier résiduel [4,5].

➤ Absorption

Les études réalisées sur les granulats recyclés par (Butler et al., 2011; Chakradhara Rao et al., 2011) ont relevé des valeurs d'absorption d'eau beaucoup plus grande pour les granulats recyclés que les granulats naturels . Cette propriété est vraisemblablement la plus grande différence entre le granulat recyclé et le granulat naturel. (Tarn et al., 2008) ont montré que les valeurs d'absorption des granulats recyclés se situent généralement entre 3 et 10% alors que pour un granulat naturel celles-ci sont souvent en deçà de 1%, mais peuvent augmenter jusqu'à une valeur de 5%.

La mesure de l'absorption d'un granulat recyclé est une méthode simple qui peut être utilisée pour évaluer la qualité de celui-ci. Comme l'absorption du granulat est due en grande partie au mortier résiduel, une valeur d'absorption élevée indique la présence d'une grande teneur en mortier résiduel (Tam et al., 2005) et par le fait même, un impact plus important sur les propriétés du béton préparé avec ce granulat. Cette propriété est particulièrement importante puisqu'elle affecte la quantité d'eau à ajouter au mélange pour une maniabilité donnée. Comme l'absorption du granulat recyclé est beaucoup plus grande que celle du granulat naturel, la quantité d'eau que celui-ci contient à l'état saturé est largement supérieure. Une rectification de la quantité d'eau ajoutée au mélange est donc nécessaire pour maintenir le même rapport E/L.

Une autre problématique peut se présenter lors de l'utilisation du granulat recyclé asséché. Comme une plus grande absorption se fait dans les 30 premières minutes pour un granulat recyclé (Malesev et al., 2010), l'utilisation de ce granulat à l'état sec peut affecter négativement les propriétés rhéologiques du béton frais. Étant donné que les granulats secs absorbent une partie, de l'eau présente dans le béton frais, il peut être nécessaire d'ajouter jusqu'à 10 % de l'eau totale pour obtenir le même affaissement. Ceci peut affecter négativement les propriétés mécaniques ainsi que la durabilité du béton [20-23].

La Figure III.4 présente l'absorption d'un granulat recyclé durant les 30 premières minutes

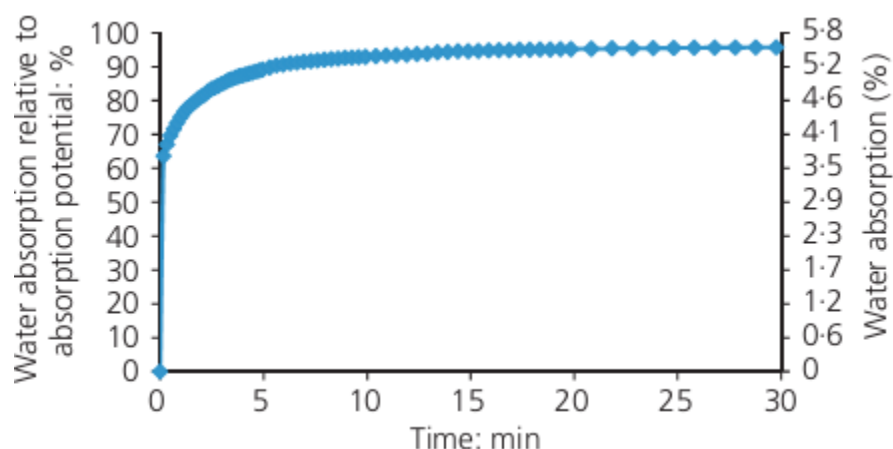


Figure III.4. Absorption d'un granulat recyclé en fonction du temps [23]

Ce graphique démontre que la plus grande partie d'eau absorbée par le granulat se fait dans les 30 premières minutes. On remarque aussi une absorption très élevée même après seulement 5 minutes (89,2 %). La vitesse de cette absorption diminue significativement par la suite. Il est donc estimé que 90 % du potentiel d'absorption du granulat s'effectue lors des 5 premières minutes [4].

➤ Maniabilité

Selon (Butler et al., 2011; Chakradhara Rao et al., 2011; Lopez-Gayarre et al., 2009) Il apparaît généralement que l'utilisation de granulats recyclés diminue l'affaissement du béton par rapport à un béton contenant un granulat naturel pour un même rapport E/C. Cette baisse de l'affaissement serait due à la grande absorption et l'angularité des granulats recyclés. En effet, selon Butler, on observe aussi une augmentation de 3,1 à 9,4 % de la demande en eau du béton lors de l'utilisation de granulats recyclés, pour garantir un affaissement égal. Ceci peut être dû au fait que les granulats recyclés ont une surface plus rugueuse et une forme plus anguleuse, créant ainsi plus de friction interne dans le béton. La grande absorption des granulats recyclés peut affecter la maniabilité ainsi que le rapport E/C effectif des bétons incorporant ceux-ci puisque les granulats non saturés peuvent absorber l'eau du mélange lors du malaxage. Il reste donc moins d'eau libre pouvant servir à lubrifier les composantes du béton, diminuant par le fait même son affaissement [19-22]

Bourmatte N. [23] a étudié l'influence de substitution de granulats naturels par des granulats recyclés sur l'ouvrabilité de béton ordinaire (Figure.III.5). Elle a constaté une augmentation du besoin en eau de tous les bétons étudiés avec le taux de substitution en granulats recyclés, par conséquent une augmentation du rapport Eau/Ciment est inévitable.

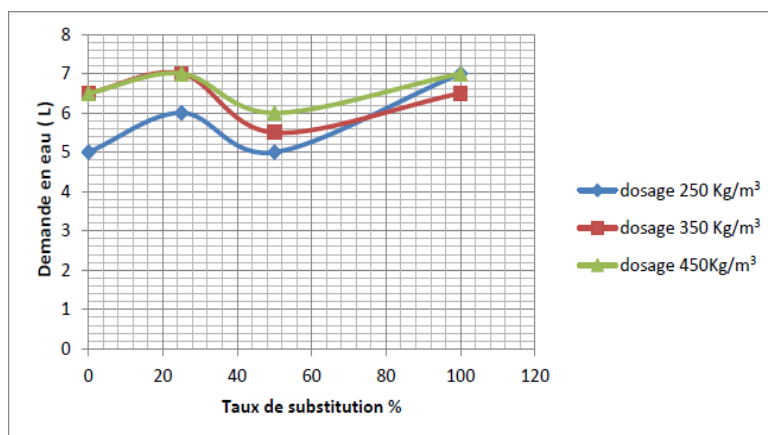


Figure. III.5. Variation de la demande en eau en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton [23].

Matar et El Dalati [24] ont trouvé aussi que l'affaissement diminué et l'ajout d'eau augmente avec l'augmentation de substitution de granulats naturel par de granulats recyclés (Figure.III.6). Ils ont expliqué cette diminution d'ouvrabilité par l'absorption d'eau par les granulats recyclés qui sont la conséquence de la présence d'une structure alvéolaire de l'ancien mortier collé aux granulats.

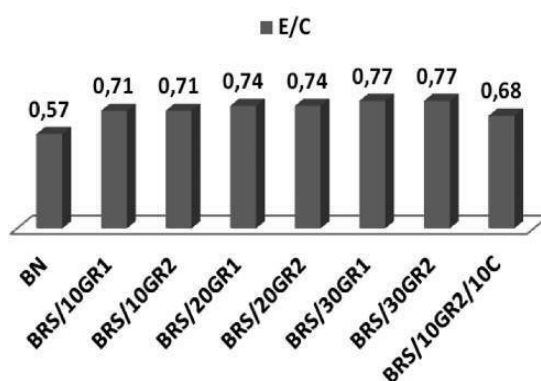


Figure. III.6. Rapport E/C des bétons à base de granulats recyclés [24].

➤ L'air occlus

La variation de l'air occlus des bétons en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton étudié par Bourmatte N. [23] est présentée dans la figure III.7 :

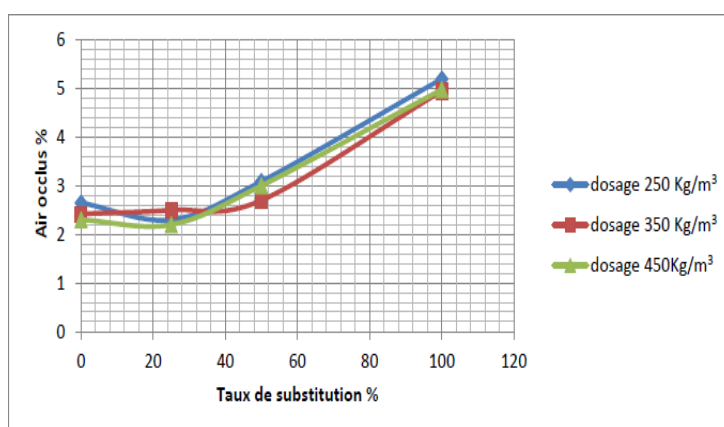


Figure. III.7. Variation de l'air occlus en fonction du taux de substitution en granulats recyclés de béton [23].

Les résultats obtenus montrent que l'air occlus du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage de substitution de granulat naturel par les granulats recyclés. Bourmatte N. [23] a expliqué cette augmentation de la quantité d'air par la forme et la rugosité des granulats recyclés, qui peuvent impliquer une plus grande difficulté pour les bulles d'air à s'extraire du béton pendant la vibration.

➤ Teneur en mortier résiduel

La teneur en mortier résiduel est le facteur le plus important pour déterminer la qualité d'un granulat recyclé puisque ses autres propriétés sont liées étroitement à celle-ci. Cette valeur peut varier beaucoup selon le granulat et la méthode utilisée pour la mesurer (20 % à 55 % et 25 à 70 %). Comme les autres propriétés du granulat sont directement liées à la teneur en mortier résiduel, il est important de mesurer celle-ci précisément. Il existe plusieurs techniques proposées dans la littérature parmi lesquelles :

Les chercheurs (Butler *et al.*, 2011) ont utilisé la méthode de la dissolution dans l'acide nitrique consiste à plonger le granulat recyclé dans une solution diluée d'acide nitrique. On chauffe, par la suite, la solution pendant deux heures pour permettre au mortier de se dissoudre. Cependant, cette technique n'est pas

adaptée aux granulats recyclés d'origine calcaire . La sensibilité de ceux-ci à l'acide utilisé peut faire en sorte que le granulat d'origine se désagrège en plus du mortier, faussant les résultats.

Les chercheurs (Butler *et al.*, 2011) ont utilisé la méthode de l'expansion thermique qui consiste à appliquer un gradient de température élevée au granulat afin de rendre le mortier résiduel friable. Pour ce faire, le granulat est saturé d'eau et chauffé dans un four à 500°C pendant 2 heures. Suite à l'application de la température, on plonge le granulat rapidement dans l'eau froide pour le fragiliser. Ces méthodes ont pour but de détacher le mortier résiduel du granulat original afin de déterminer la perte de masse associée à l'élimination du mortier résiduel. La méthode de l'expansion thermique semble être la plus efficace pour détacher le mortier du granulat . En effet, selon cette étude, près de 100% du mortier résiduel est détaché du granulat recyclé en utilisant cette technique [9,19].

➤ La porosité

Matar et El Dalati [24] ont trouvé que la porosité de béton ordinaire augmente avec l'augmentation d'incorporation de granulats recyclés (Figure.III.8). Ils ont expliqué cette augmentation par la porosité des granulats recyclés et elle augmente avec l'augmentation du rapport E/C.

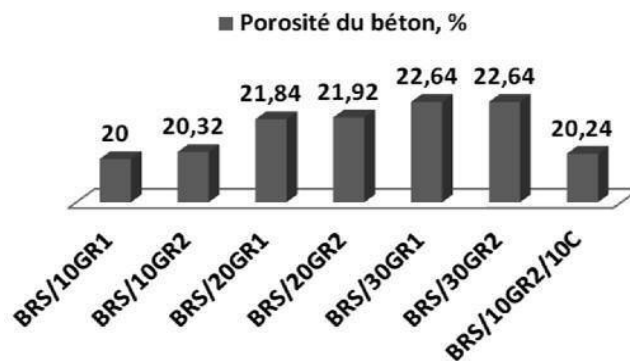


Figure. III.8. Porosité des bétons à granulats recyclés [24].

➤ La résistance à la compression

Bourmatte N. [23] constaté que la résistance à la compression des bétons diminue lorsque le pourcentage en granulats recyclés augmente (Figure.III.9). Ils ont lié cette diminution à la mauvaise adhérence entre la pate cimentaire et les granulats recyclés. Ces résultats confirment les

résultats de Matar et El Dalati [24] (Fig III.10). D'autre part , les résultats divergeant sont, par contre, présentés dans d'autres études. Par exemple, selon Sagoe-Crentsil la résistance à 28 jours serait la même que pour le béton témoin [Sagoe-Crentsil *et al.*, 2001]. Il est, cependant, à noter que dans le cas de l'étude de Sagoe-Crentsil, un rapport E/C très élevé (0,7) a été utilisé. Ces résultats divers peuvent être expliqués par le fait que le taux de remplacement du granulat naturel par un granulat recyclé n'est qu'un des multiples facteurs affectant la résistance à la compression des bétons à granulats recyclés.

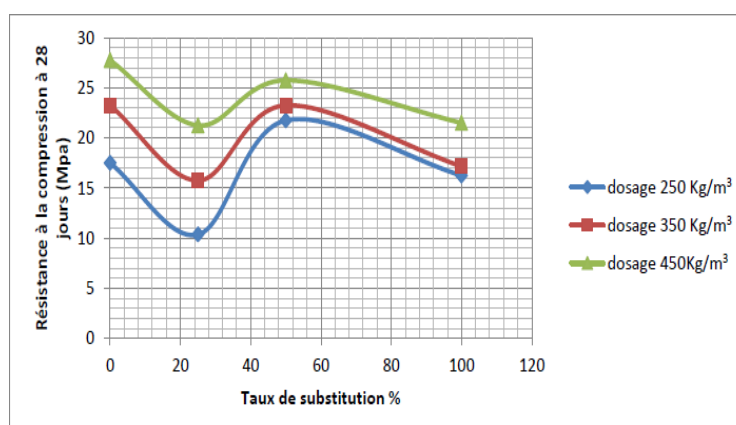


Figure. III.9. Résistance à la compression du béton à base de granulats recyclés de béton Pour les trois dosages à 28j [23].

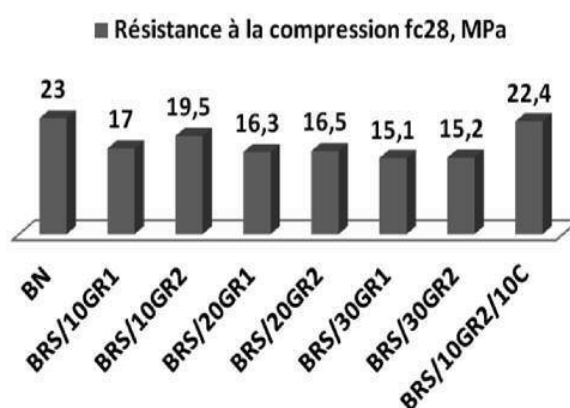


Figure. III.10. Résistance à la compression des bétons à granulats recyclés [24].

➤ Zone de transition à l'interface granulat/pâte

Le béton est un système en trois phases comprenant le granulat grossier, la matrice de mortier contenant le granulat fin et la zone de transition à l'interface granulat-pâte. Bien que la zone de transition à l'interface granulat-pâte soit relativement étroite, elle occupe une proportion relativement grande du volume de la pâte de ciment. Pour une zone de transition de 40 μm d'épaisseur, ce volume se situe entre 20 % et 40 % du volume de la matrice cimentaire. Cette zone de transition a beaucoup d'influence sur les propriétés du béton. La zone de transition est généralement le maillon faible et la source de faiblesse pour le béton. Pour cette raison, la zone de transition est généralement la raison pour laquelle il y a rupture du béton à des contraintes inférieures à la résistance individuelle de ses deux composantes (lien entre la matrice de mortier et le gros granulat) [20]. Il est donc pertinent de considérer l'interface granulat-pâte lorsqu'on évalue la résistance mécanique et la durabilité du béton.

La particularité des bétons recyclés est que ceux-ci ont deux zones de transition distinctes, contrairement aux bétons conventionnels qui n'ont qu'une zone de transition. La première zone de transition est à l'interface granulat d'origine-mortier résiduel et la seconde est à l'interface mortier résiduel-nouveau mortier (Otsuki *et al.*, 2003). Les Figure III.11 et Figure III.12 ci-dessous illustrent bien cette différence [20] :

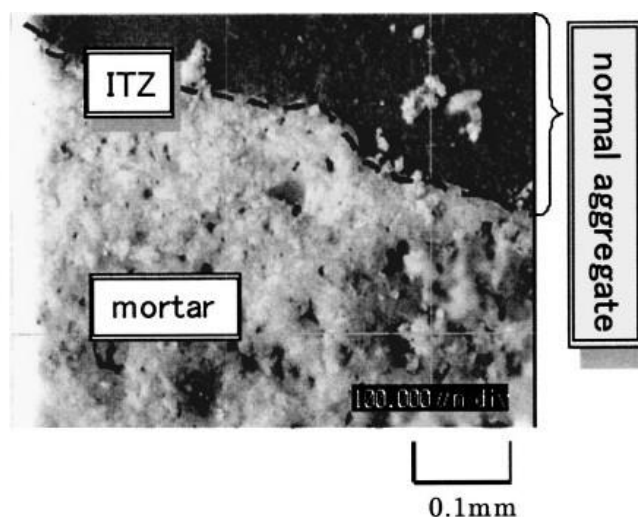
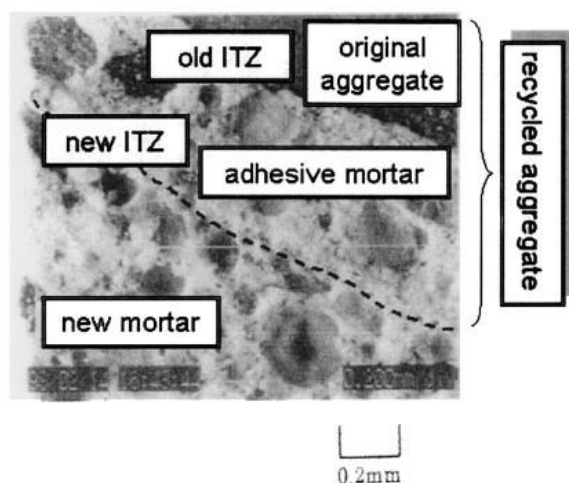


Figure III.11. Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton recyclé [20]

Figure III.12 Zone de transition à l'interface granulat/pâte d'un béton conventionnel [20]

Enfin d'autre paramètre ont été étudié à titre exemple les résultats obtenus été comme cela [19-22] :

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

- Le remplacement d'un granulats naturel par un granulats recyclé aurait un plus grand impact négatif sur la résistance à la traction des bétons recyclés que sur la résistance à la compression.
- Les granulats recyclés porteurs de chlorures se lessivent si on les trempe dans l'eau. C'est pourquoi, avec un bon lavage ou immersion totale dans l'eau pendant deux semaines au minimum, ces granulats peuvent être utilisés dans le béton, voire même dans le béton armé ou précontraint, sans aucun risque de corrosion;
- La durabilité du béton recyclé est fortement menacée par la porosité et par l'absorption d'eau élevées des granulats recyclés. Le béton recyclé ne contenant que des granulats recyclés est plus perméable à l'air et se carbonate également plus rapidement que le béton naturel. Un tel béton est donc considéré plus vulnérable aux diverses agressions d'origines extérieures ou intérieures.
- L'utilisation de granulats recyclés n'affecte pas significativement la perméabilité aux ions chlorure pour les bétons de rapport E/C de 0,55.
- La résistance au gel/dégel des bétons ne semble pas être affectée par l'utilisation des granulats recyclés.
- la résistance à la carbonatation diminue avec l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels par des granulats recyclés
- Le retrait de séchage augmente de manière proportionnelle à la quantité des granulats recyclés utilisés.
- La conservation dans l'eau du béton recyclé n'a pas révélé de gonflement significatif à l'exception du béton à base de granulats recyclés pollués par l'eau de mer, qui présente un gonflement plus grand que celui du béton naturel.

III.4.1.3 Formulation des bétons contenant des granulats recyclés :

Plusieurs méthodes de formulation et de préparation alternative du béton sont proposées dans la littérature pour améliorer la performance du béton contenant des granulats recyclés. Parmi les méthodes les plus

CHAPITRE III. RECYCLAGE DES DECHETS

citées sont la « méthode du mélange en deux étapes ». La méthode du mélange en deux étapes consiste à incorporer l'eau dans le mélange en deux étapes, dans le but de permettre aux particules de liant de bien s'adhérer à la surface du granulat recyclé. La Figure III.13 illustre la différence entre la méthode du mélange en deux étapes par rapport à la méthode traditionnelle [17, 20].

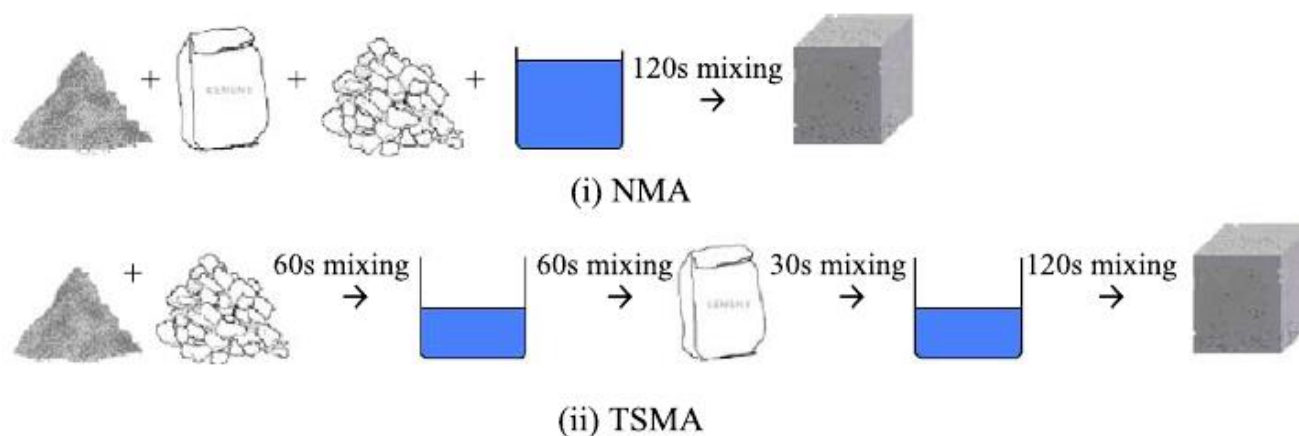


Figure III.13. Processus de malaxage de la méthode de mélange en deux étapes par rapport à la méthode normale [20]

L'amélioration des propriétés du béton provient du fait que cette technique permet de créer une couche de pâte de ciment de faible rapport E/C à la surface du granulat recyclé. Cela permet de remplir les pores et les fissures présents en surface du granulat lors du malaxage et, par le fait même, d'améliorer la qualité de l'interface pâte-granulat. Comme il est possible de le constater sur la Figure III.14 et la Figure III.15, deux images prises au microscope électronique à balayage, l'utilisation de la méthode de mélange double permet de remplir les fissures présentes dans le granulat recyclé alors que celles-ci ne sont pas remplies pour une méthode normale de mélange [20].

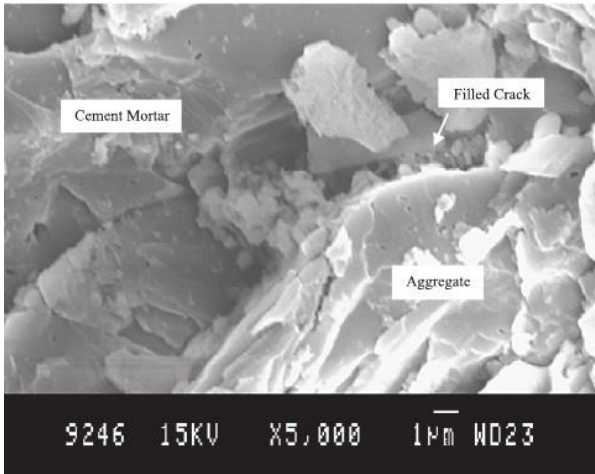


Figure III.14. Observation au MEB d'une fissure du granulat recyclé d'un béton préparé avec la méthode de mélange double [20]

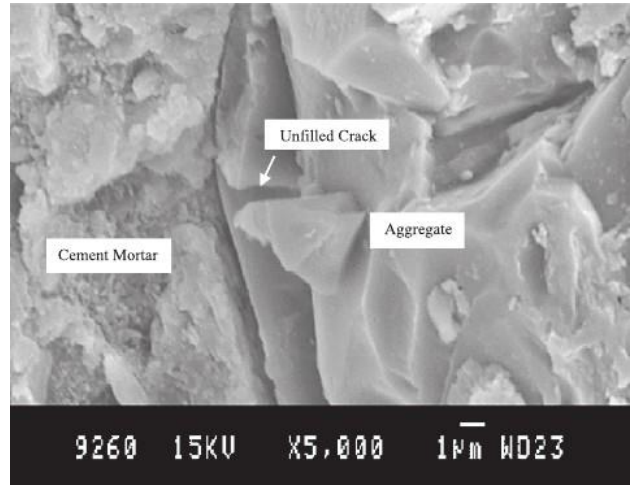


Figure III.15. Observation au MEB d'une fissure du granulat recyclé d'un béton préparé avec la méthode de mélange normale [20]

Comme mentionnée précédemment, la dureté de la nouvelle interface formée entre le granulat naturel et la pâte est contrôlée par le rapport E/C de la pâte. L'obtention d'une couche de pâte ayant un rapport E/C effectif plus bas permet de rendre la nouvelle interface plus résistante et par le fait même améliorer les propriétés mécaniques du béton [20].

III.4.2 Recyclage et valorisation des enrobés :

Le recyclage des matériaux routiers est une impérieuse nécessité vis-à-vis de la protection de l'environnement et l'économie des ressources naturelles (granulats), d'espaces naturels (décharges), d'énergie, réduction des gaz à effet de serre. Les enrobés sont des mélanges composés d'environ 5% de bitume et de 95% de granulats. Les enrobés sont des matériaux recyclables mais surtout réutilisables grâce à la capacité du bitume à retrouver ses caractéristiques physiques. Deux grands cas de figure peuvent être distingués [5] :

- Les recyclages liés à de grandes opérations de fraisage
- Le recyclage dans le cadre des surplus de production du poste

Le recyclage se fait souvent avec un concasseur mobile, parfois d'un matériel spécifique appelé

« granulateur » (Figure.III.16). Les « recyclas » résultant de cette opération sont criblés à une dimension maximale allant, selon le produit final prévu, de 10 à 20 mm (exceptionnellement 25 mm pour recyclage en assise) [5].

Enfin, les granulats obtenus après criblage peuvent être réutilisés à bref délai, sans besoin de fragmentation supplémentaire. Les préconisations d'emploi des enrobés contenant des recyclés varient d'un pays à l'autre. La norme européenne EN 13108-8 (mars 2006) précise l'utilisation des possible des recyclas dans la formulation d'enrobés neufs. Les pourcentages de recyclas indiqués dans ce tableau peuvent être augmentés sous réserve d'une caractérisation précise ou d'une maîtrise de leur provenance garantissant leur homogénéité et le respect des spécifications [5].



Figure. III.16. Matériels forains de recyclage courant [5]

a) Recyclage à chaud en centrale

Le recyclage à chaud en centrale se fait quand les centrales sont équipés d'un sécheur rallongé, avec anneau de recyclage, soit à tambours parallèles. Soit équipés d'un anneau de recyclage, soit comprenant un malaxeur à arbres en aval du tambour [5].

b) Recyclage en poste discontinu

Les centrales de ce type comportent schématiquement une batterie de prédoseurs, un tambour sécheur, un élévateur, et un malaxeur à deux arbres à palettes, horizontaux et contrarotatifs. Le

recyclage implique de chauffer les recyclas « agrégats » sans brûler leur bitume et de les doser précisément dans le mélange final [5].

c) Recyclage dans le tambour

Deux méthodes sont utilisables pour introduire les « agrégats » à recycler [5]:

- a. par tapis lanceur installé en façade du sécheur ;
- b. par anneau de recyclage monté sur le sécheur.

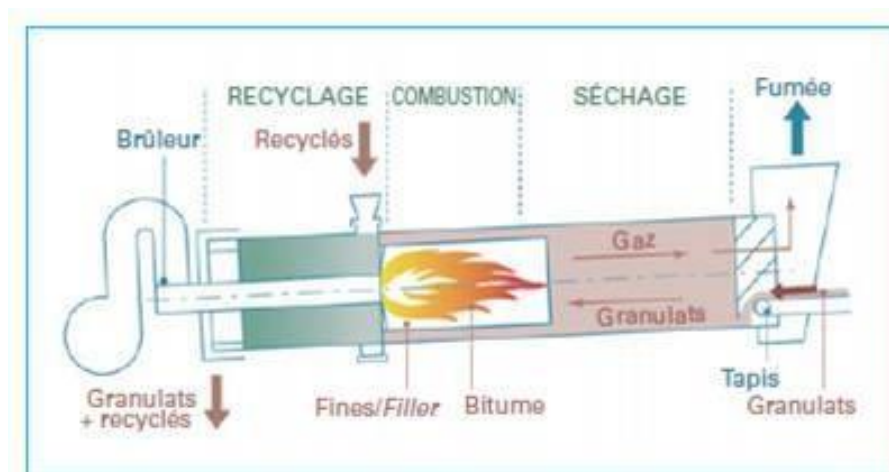


Figure. III.17. Principe du recyclage dans le tambour d'un poste discontinu [5]

d) Recyclage dans le malaxeur

Les « agrégats d'enrobés » à recycler sont introduits par l'intermédiaire d'une trémie peseuse qui débouche directement dans le malaxeur. Cette méthode permet un taux de recyclage allant jusqu'à 10 % avec des recyclas très humides, 20 % avec des recyclas secs. Elle est parfois combinée avec une introduction de recyclas dans le tambour, auquel cas le taux de recyclage total peut atteindre 30 à 50 %, selon l'humidité des recyclés [5].

e) Recyclage en poste continu

Les postes d'enrobage continus modernes sont, en quasi-totalité, de type « Tambour-Sécheur-Enrobeur » (TSE) (Figure.III.18).

On distingue deux familles de TSE, selon que le séchage s'effectue en fonctionnement à équi-courant ou à contre-courant. Les postes mobiles sont pratiquement tous des TSE [5].

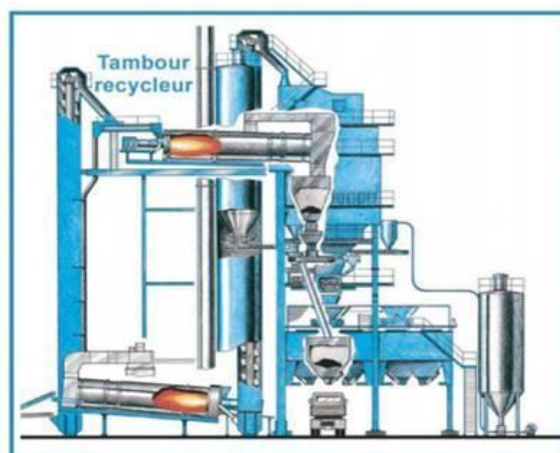


Figure. III.18 Poste discontinu à tambours parallèles [5]

III.4.3 Matériaux alternatifs, gisement et gestion

III.4.3.1 Définition des matériaux alternatifs (MA) :

Matériau élaboré à partir d'un déchet et destiné à être utilisé seul ou en mélange avec d'autres matériaux alternatifs ou non [5] (Figure. III.19).



Figure. III.19. Exemple Matériaux Alternatifs (MA) [5]

III.4.3.2 Identification des gisements

a) Les ballasts de chemin de fer réformés

La présence de ces matériaux est circonstancielle et les matériaux d'origine sont de bonne qualité. Ils peuvent en effet remplacer les granulats calcaires dans presque tous leurs usages après concassage. Cependant à ce jour, la quantité de matériaux valorisés reste marginale par rapport aux extractions [20].

b) Les co-produits minéraux

Il s'agit par exemple de matériaux issus d'exploitation des carrières industrielles (marnes, calcaire, chaux...) de moindre qualité ou encore des résidus issus du traitement des matières premières (bauxaline de l'usine de fabrication d'aluminium par exemple). Ces matériaux peuvent être utilisés comme granulats, s'ils sont concassés, ou pour effectuer des remblais. On estime la quantité disponible non utilisée de résidus minéraux à environ 200 000 tonnes par an. Des débouchés en remblais ou réaménagement ont généralement été trouvés pour ces matériaux [20].

c) Les laitiers issus de la sidérurgie

En sidérurgie, le laitier correspond aux scories qui sont formées en cours de fusion ou d'élaboration du métal par voie liquide. Il s'agit d'un mélange composé essentiellement de silicates, d'aluminates et de chaux, avec divers oxydes métalliques, à l'exception des oxydes de fer. Ses rôles dans la métallurgie des métaux ferreux en fusion sont multiples. Cette matière est un important coproduit des hauts fourneaux, appréciée comme remblai ou comme matière première dans la fabrication du ciment. Quant aux laitiers d'aciérie, les scories étaient également un débouché essentiel de la sidérurgie au début du XX^e siècle, la valorisation des laitiers modernes passe après l'optimisation des procédés métallurgiques de la sidérurgie [20].

d) Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères valorisables

Les mâchefers sont des déchets produits par l'incinération (Figure. III.20). Les mâchefers d'incinération des ordures ménagères (MIOM) sont les résidus solides issus de l'incinération de

ces dernières (Figure. III.20). Chaque année 3 millions de tonnes de mâchefers sont produits. Certains sont valorisables dans les travaux publics, d'autres doivent être stockés en décharge de déchets non dangereux [20].



Figure. III.20. Les mâchefers d'incinération [21]

e) Déblais de grands travaux, affouillements et curages

Les équilibres déblais/remblais sur les grands chantiers ne sont pas toujours faciles à atteindre. Ces grands travaux peuvent être : des travaux de terrassements de voies, des travaux de terrassements liés à des constructions, des terrassements liés à la création de plate-forme ou d'excavations diverses (bassins, darses, casiers de centre d'enfouissement technique, terrassements généraux de grands projets) qui sont autorisés au titre de réglementations diverses (infrastructures, permis de construire, ICPE, INB, autorisations de travaux divers-ATD,...). Ils peuvent être à l'origine de besoins et d'excédents valorisables importants [20].

III.4.3.3 Utilisation des matériaux alternatifs

L'utilisation des matériaux alternatifs permet principalement de répondre aux enjeux du développement durable suivants [20] :

- Préservation des ressources naturelles ;
- Diminution des distances de transport ;
- Développement d'une économie circulaire ;
- Développement de technologies exportables ;

- Développement d'emplois locaux qualifiés et non qualifiés ;

III.5 CONCLUSION :

Le béton est le matériau de construction le plus important sur la planète, en termes de volume et de chiffre d'affaires. L'approfondissement des connaissances sur les matériaux qui peuvent être utilisés dans le béton est un aspect essentiel surtout que le béton doit rattraper les autres matériaux (acier, enrobés bitumineux, etc.) pour lesquels les procédés et les circuits de recyclage existent depuis des années. En effet, l'utilisation de sous-produits industriels (Laitier, cendre volante,...) représente déjà un aspect très prometteur et attractif au vu des bonnes performances obtenues suite à l'utilisation de ces derniers en tant qu'addition ou en tant que substitue au ciment.

D'autre part, le recyclage des bétons et des granulats dans le béton reste possible tout en minimisant l'impact négatif des granulats recyclés sur les propriétés à l'état frais du béton par exemple en ajoutant une phase de pré saturation partielle des granulats au protocole de malaxage et du super plastifiant et en respectant le taux optimale de substitution des granulats naturels par un granulat de béton recyclé qui peut aller jusqu'à 30% [18,19, 22] . De ce fait, le recyclage et la valorisation de différents matériaux dans le béton comme les granulats recyclés présentent un intérêt particulier car leur valorisation permet de résoudre le manque de granulats naturels, de prolonger la durée d'exploitation des carrières existantes et, en même temps, de réduire les volumes mis en décharges.

CHAPITRE IV. VALORISATION DE DECHETS

IV.1 Introduction

La valorisation c'est donner de la valeur à un objet, à une matière, par le réemploi, le recyclage ou toute autre action visant à obtenir, à partir des déchets, ou de matières des richesses et de faire des économies en termes financiers. La valorisation apporte une nouvelle valeur aux déchets, en les sortants du circuit de collecte et de traitement. La valorisation s'oppose à l'élimination. Elle permet de faire des économies de matières premières et contribue au respect de la planète et à son développement durable.

IV.2 Valorisation des sédiments de dragages

Les sédiments sont définis comme un ensemble de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant subi un transport par l'eau, le vent, la glace et/ou par la gravité. L'origine des matières organiques est très diverse, il s'agit soit de débris qui proviennent de l'altération et de la désagrégation de roches préexistantes, des débris végétaux, soit des micro-organismes, ou encore de colloïdes humiques. Les éléments de nature minérale influencent essentiellement les caractéristiques physiques et mécaniques des sédiments. Ils sont classés en fonction de leur taille, on distingue ainsi : les argiles, les limons, les sables, les graviers et les cailloux. [25,26]. Techniquement les ports algériens n'ont pas été dragués depuis plus de 20 ans, ils ont perdu en moyenne 1 à 2 m de profondeur, ce qui les oblige à recevoir toujours des navires de faible tonnage. La figure IV.1 montre le procédé de formation des sédiments dans la nature.

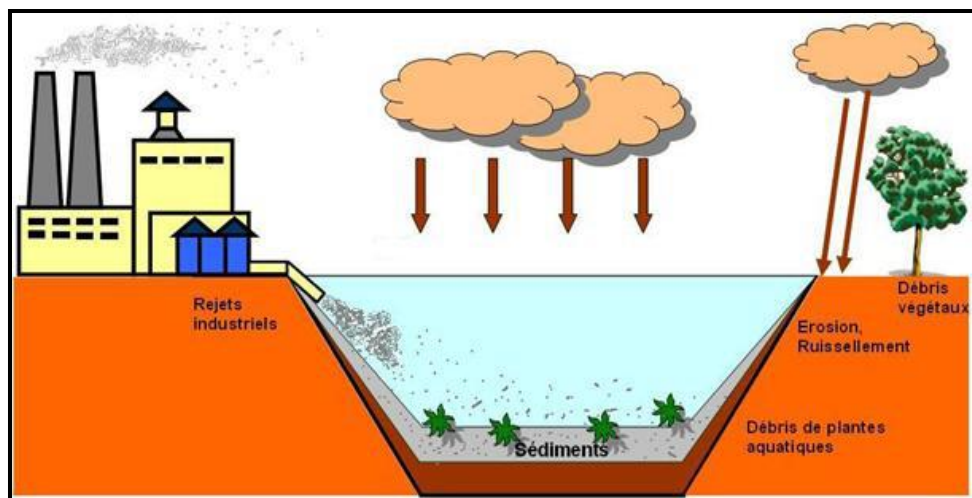


Figure IV.1. Formation des sédiments. [27]

IV.2.1 Origine des sédiments marins :

Les sédiments ont principalement deux origines : endogène ou exogène [28].

- **Origine endogène** : les particules proviennent de la production autochtone du milieu. Il s'agit de débris de macrophytes comme les plantes aquatiques, les cadavres de microphytes et d'animaux.
- **Origine exogène** : il s'agit des particules qui sont issues du ruissellement des eaux ou bien transportées par les vents. D'origines naturelles ou anthropiques, elles proviennent de l'érosion des sols, de la décomposition de matière végétale, de l'apport de matière en suspension, de matières organiques, de nutriments ou de micropolluants en raison des rejets agricoles, industriels et domestiques .

IV.2.2. Technique de dragage :

Différentes techniques sont utilisées selon la nécessité de limiter la remise en suspension des particules dans la colonne d'eau. En général, les techniques les plus précises sont les moins économiques. On distingue particulièrement [29]:

IV. 2.2.1 Les dragues mécaniques :

Elles sont utilisées dans des zones difficiles d'accès (bordures de quais, bassins étroits) et peuvent travailler jusqu'à des profondeurs de 25 m (drague à godets) à 30 m (drague à benne). Il existe différents types de drague mécanique :

- La drague à pelles ou à cuillers qui est fondamentalement une pelle Mécanique montée sur un ponton ;
- La drague rétro caveuse et la drague excavatrice sur ponton à chargement
- Frontal : ces dragues sont de simples excavateurs qui peuvent être installés sur le pont renforcé d'un chaland ponté ;
- La drague à benne preneuse qui fait descendre, se fermer et remonter une Benne ou un godet unique au moyen de câbles. [30]

La figure IV.2 illustre la technique de dragage mécanique.



Figure IV.2. Dragage mécanique [31]

IV. 2.2.2. Les dragues hydrauliques :

Sont basées sur le principe de la pompe à eau centrifuge et opèrent par création d'un vide à l'entrée de la pompe. La pression atmosphérique dans l'eau oblige la mixture à suivre la conduite d'aspiration, seule trajectoire disponible. Parmi les dragues hydrauliques, on distingue les catégories suivantes [30] :

- drague aspiratrice refouleuse stationnaire ou aspiratrice simple ;
- drague aspiratrice à désagréateur ;
- drague aspiratrice porteuse à élince traînante ou plus communément nommée drague aspiratrice en marche ;
- drague à balayage ;
- drague coupeuse à disque ;
- drague à vis sans fin.

La figure IV.3 illustre la technique de dragage hydraulique.



Figure IV.3. Dragage hydraulique [31]

IV.2.2.3. La drague pneumatique :

Cette méthode est particulièrement adaptée au dragage des sédiments contaminés, et les matériaux sont ensuite évacués par chaland ou par conduite flottante. [30]

On constate que, pour les grands ports maritimes, la technique prédominante est le dragage hydraulique, représentant une proportion de 77,5 %. Certaines opérations ont nécessité l'utilisation de dragage mixte, associant dragues mécaniques et hydrauliques, dans une proportion de 17,6 %. Par contre, dans les autres ports, 78,1 % des quantités de matières sèches sont enlevées par dragage hydraulique. Le dragage mécanique est utilisé à hauteur de 18,4 % dans ces ports tandis que le dragage mixte ne représente que 1,6 % .

IV.2.3 Procédés de traitement des sédiments :

Les procédés de traitement utilisés pour les sédiments sont similaires à ceux utilisés pour les sols. Il peut s'agir d'un prétraitement, un traitement biologique, physico-chimique ou thermique, une solidification/stabilisation, un traitement ultrasonique ou électrochimique. [32]

IV.2.3.1 Les prétraitements :

Les prétraitements sont des procédés peu coûteux et faciles à mettre en œuvre pour préparer les sédiments en vue de leur stockage, traitement ou valorisation. Généralement, la première phase consiste en une déshydratation en vue de diminuer la teneur en eau élevée des sédiments. [32]

IV.2.3.2. Les traitements biologiques ou la bioremédiation :

La bioremédiation désigne les processus de dégradation des polluants par des méthodes biologiques utilisant le potentiel métabolique des micro-organismes pour détériorer des composés organiques variés.

La bioremédiation peut se faire par les trois techniques suivantes [33, 34]

- ✓ La remédiation naturelle surveillée (Monitored Natural Recovery) ;
- ✓ La bioaugmentation ;
- ✓ La phytoremédiation.

IV.2.3.3. Les traitements physico-chimiques :

Ces traitements utilisent des techniques qui sont basées sur des principes physiques ou chimiques, comme l'adsorption/désorption, l'oxydoréduction et les échanges ioniques afin de détruire, transformer ou immobiliser les polluants [34].

IV.2.3.4. Le traitement thermique :

Le traitement thermique consiste à chauffer les sédiments à hautes températures en vue de détruire la matière organique et certains métaux lourds [32].

IV.2.4 Valorisation de sédiments dans le béton :

Les recherches réalisées ces dernières années s'orientent de plus en plus vers la valorisation des sédiments de dragage pour l'utilisation comme matériaux de construction, également vers l'adaptation de la valorisation dans les projets de gestion des sédiments [35]. En fonction des caractéristiques physico-chimiques, géotechniques, mécaniques et environnementales des sédiments de dragage, la valorisation de ces matériaux peut être utilisée dans plusieurs domaines tels que la technique routière, le béton, les granulats artificiels, éco-modelé paysagère, les briques, l'aménagement de sites naturels.

IV.2.4.1 Influence des sédiments marins sur l'affaissement des bétons :

Selon la recherche de [36] qui a étudié l'affaissement des bétons avec 10 %, 20% et 30% des sédiments et un dosage de SP=1.2%. Le béton témoin (0%) est plastique tandis que les bétons avec 10% ; 20% et

30% de sédiment sont des bétons fermes. De ce fait , on peut dire que l'incorporation de sédiment à différents pourcentages engendre une baisse de l'affaissement que ce soit avec ou sans super plastifiant. Ceci s'explique par le fait que les sédiments absorbent une importante quantité d'eau ce qui engendre une baisse de la maniabilité. L'utilisation d'un super plastifiant dans les bétons avec 20% et 30% des sédiments améliore légèrement l'affaissement par rapport au même mélange sans super plastifiant. Cette amélioration confirme la nécessité d'utiliser un super plastifiant afin d'améliorer la maniabilité dans le cas où on utilise les sédiments marins. Les Figures IV.4 et IV.5 présentent l'ensemble des résultats.

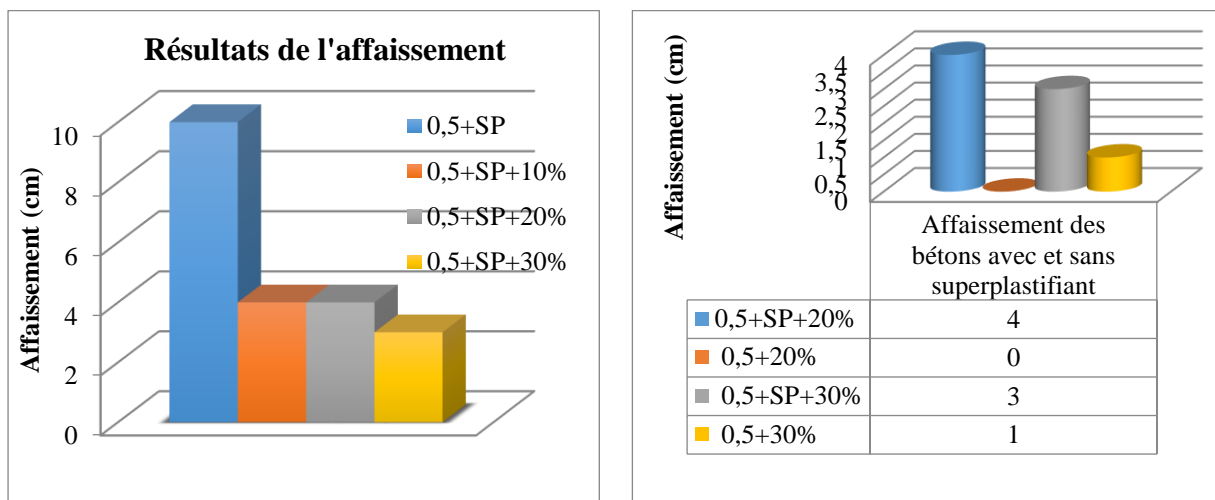


Figure IV.4. Résultats de l'affaissement SP **Figure IV.5.** Résultats de l'affaissement des bétons avec SP

IV.2.4.2 Influence des sédiments marins sur la résistance à la compression :

Selon la recherche de [36] qui a étudié la résistance à la compression à 28 jours des bétons avec différent pourcentage des sédiments. Les résultats de la figure IV.6 montrent que l'utilisation de 10% de sédiment augmente la résistance à la compression de 19.73% . D'autre par une baisse de la résistance à la compression avec l'augmentation des pourcentages (20% et 30 %) des sédiments dans le béton. Cette baisse de résistance été de l'ordre de 17.30% et 24.35% par rapport au béton témoin. Ces résultats s'expliquent par le fait que pour un pourcentage de 10% il y a eu un bon remplissage intergranulaire sans forte absorption d'eau. Cependant au-delà de ce pourcentage une forte absorption d'eau engendre une baisse

de maniabilité et une baisse des résistances . De ce fait, d'après les premiers résultats on peut dire que le pourcentage de 10 % est optimal dans ce type de bétons.

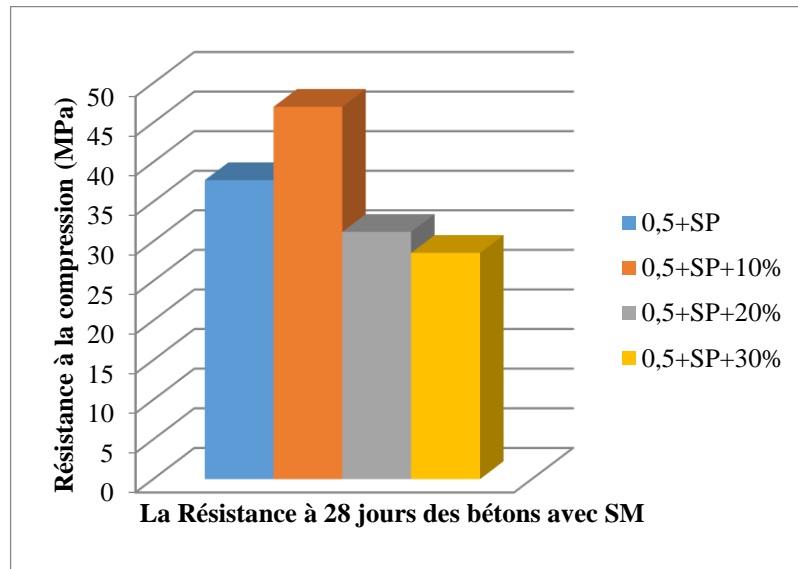


Figure IV.6. Résultats de l'influence du différent pourcentage des sédiments sur la résistance à la compression.

D'autre part, Zri et al. [37] ont aussi étudié la valorisation de sédiments de dragage dans la production des bétons. Les résultats de cette étude ont montré la faisabilité de valorisation du sable de dragage dans le béton de sable car il présente des résistances mécaniques intéressantes, supérieures au béton témoin, et peuvent atteindre jusqu'à 41 Mpa.

Enfin, les travaux de recherche d'Achour & al. [38] ce sont orientés sur la fabrication de blocs bétons intégrant 12,5 % et 20 % de sédiment marin. Les résultats de ces travaux montrent que le béton à 12,5 % présente des performances mécaniques plus élevées que celui de 20 %. Ces résultats ont été expliqués par le fait que la microstructure ainsi que l'augmentation de la porosité et de l'hétérogénéité du béton à 20 % par rapport à celles de 12,5 %.

IV.3 Valorisation des argiles expansées

Les agrégats d'argile expansée sont utilisés dans plusieurs industries en raison de leurs caractéristiques techniques et de leurs avantages précieux par rapport à de nombreuses autres matières premières industrielles . Elles sont connu pour leurs résistances à la compression un peu élevé par rapport

aux autres matériaux légers. L'argile expansée est un matériau unique aux applications polyvalentes car il possède et regroupe plusieurs caractéristiques tel que la légèreté, l'incombustibilité...etc. Ces billes d'argile retiennent également très bien la chaleur, ce qui en fait une excellente option pour isoler les racines des plantes pendant les périodes plus fraîches de l'année. De ce fait, il est considéré comme un matériau de construction écologique multifonctionnel [39].



Figure IV.7. Argile expansée



Figure IV.8. Coupe transversale de l'argile expansée

IV.3.1 Procèdes de fabrication de l'argile expansée :

La production de l'argile expansée permet une utilisation efficiente des ressources car elle est issue d'une matière première qui se trouve en abondance sur la surface terrestre « l'argile ». Le traitement par le feu des argiles sert à l'expansion et la clinkérisation / vitrification du matériau. La fabrication de l'argile expansée aussi suit cinq (5) grandes étapes [39] :

- L'extraction de l'argile et le stockage
- Le concassage, le broyage et le malaxage
- Le façonnage
- Le séchage :
- La cuisson à 1200°C

IV.3.2 Influence des agrégats d'argile expansée sur les bétons

IV.3.2.1 Rapport E/C :

Le rapport eau-ciment est un paramètre important dans la conception des mélanges de béton. Ce dernier a un impact sur les propriétés du béton frais et durci. Pour un béton normal, en diminuant le rapport eau/ciment, une augmentation de la résistance à la compression sera constater . De nombreuses recherches expérimentales ont remarqué que le développement de la résistance du LWAC est inférieur au béton de granulats normaux [39].

IV.3.2.2 Maniabilité :

La valeur d'affaissement est en fonction du poids propre et de la masse de béton. Les résultats des essais de [39,40] ont montré qu'à teneur égale en eau et avec ou sans superplastifiant, le béton avec des argiles a une valeur d'affaissement supérieure à celle des autres bétons de granulats. Cette différence peut être attribuée à la forme ronde des granulats et à leur porosité superficielle limitée par rapport aux autres granulats légers.

IV.3.2.3 Matériau cimentaire :

Pour mettre au point un mélange de béton économique, la teneur en ciment doit être optimisée. Pour ce faire, on utilise des ajouts cimentaires comme les cendres, le laitier et les fumées de silice. Pour obtenir une résistance similaire, le LWAC exige une plus grande quantité de ciment ou de liant que le béton normal. Un agrégat plus faible nécessite un mortier plus résistant et une teneur en ciment élevée pour obtenir la résistance requise. Il est bien connu qu'une teneur plus élevée en poudre peut améliorer les propriétés à l'état frais, mais elle peut nuire aux propriétés de durabilité [40].

IV.3.2.4 Influence sur l'état durci :

En raison de sa légèreté et de la faible conductivité thermique le LWAC est un matériau favorable pour l'industrie du préfabriqué. Le durcissement à haute température est l'une des solutions pour obtenir

une résistance précoce élevée par rapport au durcissement normal. Ce qui permet de réduire les coûts de transport et de manutention [40].

D'autre part, [39] ont remarqué que la substitution des granulats naturels par des granulats d'argile engendré une baisse de résistance (jusqu'à 40% pour une substitution de 30% avec des argiles) et cela quel que soit la dimension des granulats substitués (0/4 , 8,15 , 16/25).

IV.3.2.5 Durabilité :

L'Argile Expansée ne contient pas de matériaux d'origine organique. Elle n'est donc pas atteinte par des parasites (champignons, rongeurs, termites, etc.) et micro-organismes et ne se détériore pas dans le temps même dans des conditions difficiles de température ou d'humidité importantes. De plus, l'argile expansée est stable, indéformable et maintient ses propriétés intactes dans le temps. D'autre part, L'Argile Expansée est un matériau inerte, clinkérisé et dimensionnellement stable qui ne présente pas de variations de volume au contact de l'eau. Elle maintient ses caractéristiques intactes sous l'action d'acides ou solvants, elle n'est pas gélive ; résistent aux acides, aux bases et aux solvants ainsi qu'aux cycles de gel/dégel [39, 41].

IV.4 Valorisation des pneumatiques usagés non réutilisables (caoutchouc):

Composés de mélanges de caoutchoucs, d'acier et de textiles divers, les pneus usagés ne sont pas des déchets dangereux mais ils présentent un danger pour l'environnement et la santé en cas d'incendie sur le site de stockage (émissions de fumées toxiques et éventuellement d'un liquide huileux). L'expérience montre que l'incendie des pneumatiques devient rapidement non maîtrisable. Ainsi, les sites de stockage constituent un risque pour l'eau en surface, ainsi que pour l'eau souterraine. Ils représentent aussi un danger sanitaire car ils constituent un habitat privilégié des insectes. En général, la moins chère et la plus simple des solutions pour décomposer les déchets ou les pneus usagés est de les brûler. Cependant, la pollution et la quantité énorme de fumée produites par cette méthode est inacceptable et, dans certains pays il est interdit par des lois de procéder ainsi. En conséquence, la valorisation de pneus usagés est un sujet

important pour la planète entière. Les voies de valorisation choisies sont largement diversifiées : la réutilisation avec ou sans rechapage (Pneus Usagés Réutilisables-PUR), la granulation, la valorisation énergétique notamment comme combustible dans les cimenteries et l'utilisation en travaux publics (Pneus Usagés Non Réutilisables-PUNR) se sont partagés les stocks de pneus [2, 42].

De ce fait ,le problème des pneus usagés est non seulement mondial mais aussi maghrébin et africain. Dans le bassin méditerranéen, l'Algérie a pris conscience de ce problème et a donné naissance à des stratégies locales ou en coopérations internationales qui font face à la pollution. Selon une étude statistique estimative du gisement des Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) publiée en 2011, la quantité générée annuellement en Algérie est de l'ordre de 1 439 514 unités, soit 25 918 tonnes par an .Cette quantité évoluera à la hausse à cause de l'augmentation du parc automobile Algérien.

IV.4.1 La réutilisation par rechapage

Il s'agit des pneus dont la bande de roulement a atteint sa limite d'usure, mais dont le support est intègre en ayant conservé tout son potentiel de sécurité. Le rechapage (figure IV.9) consiste à ôter la bande de roulement usée et à la remplacer par une bande neuve, en garantissant au pneu rechapé des performances identiques à un pneu neuf, en toutes saisons et dans les mêmes conditions d'utilisation [2].



Figure IV.9. Réutilisation des pneus usagés par rechapage [43]

IV.4.2 Valorisation de la matière : exemple le caoutchouc des pneus usagés

Le caoutchouc est un élément indispensable dans la constitution d'un pneumatique : il représente environ 48% de son poids. En plus du latex, matière de base du caoutchouc naturel, les caoutchoucs synthétiques, dérivés de pétrole, ont permis d'améliorer les caractéristiques des pneumatiques. Les pneumatiques sont également renforcés d'armatures métalliques (15% de poids) afin d'augmenter le niveau de leur performance, mais aussi de fibres textiles (5% de poids) afin d'alléger leur poids tout en conservant leurs propriétés d'endurance [42].

La filière de valorisation des pneus se structure en quatre étapes :

- (1) Collecte primaire sur les points de vente ;
- (2) Tri et revente des pneus réutilisables ;
- (3) Transformation du produit ;
- (4) Valorisation finale.

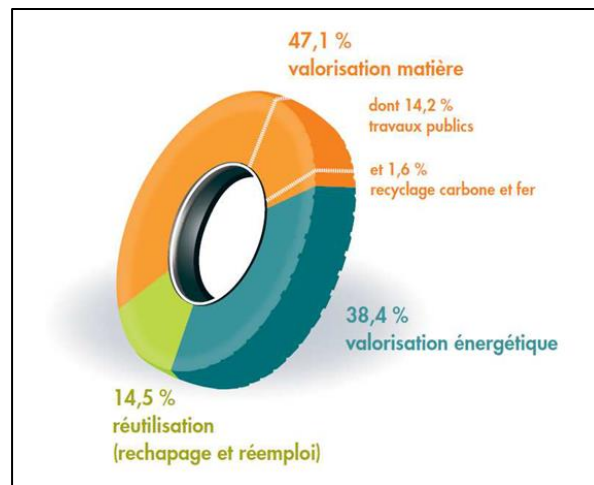


Figure IV.10. Répartition des voies de valorisation des pneus usagés [42]

La valorisation matière (figure IV.10) est le processus de traitement et de transformation des pneus usagés qui en permet une nouvelle utilisation sous une autre forme, par exemple en broyats, en granulats ou en poudrette. Leurs domaines d'applications sont [2,43] :

–Aires de jeux ;

- Piste d'athlétisme ;
- Bétons ;
- Eclisses de tramway ;
- Ecrans acoustiques ;
- Enrobés routiers ;
- Revêtement de chaussées ;
- Gazons synthétiques ;
- Objets moulés et pièces automobiles (dos d'âne) ;



Figure IV.11. Valorisation matière des pneus usagés [42]

IV.4.3 Effets des granulats en caoutchouc (rubber aggregates) sur les propriétés des bétons à l'état frais :

Les chercheurs Güneyisi et al. [44] ont évalué la rhéologie à l'état frais du béton par l'essai de l'affaissement. Les résultats ont montré que l'affaissement du béton est diminué avec l'augmentation du dosage de granulat en caoutchouc (G.C) . Pour le dosage de 50% de G.C., l'affaissement est presque nul.

Les résultats de Ait Idir.A [42] montrent que la présence de ces granulats est préjudiciable vis-à-vis de la rhéologie du matériau à l'état frais mais que l'utilisation d'un superplastifiant et d'un agent de viscosité permet de réaliser les corrections nécessaires.

Khaloo et al. [45] ont indiqué une conclusion un peu différente par rapport à d'autres auteurs. En effet, d'après cette étude le béton incorporant des G.C. a une maniabilité acceptable en termes de facilité de manipulation, de placement et de finition.

Pour ce qui concerne le béton auto-plaçant, Garros [46] a montré dans sa thèse que l'adjonction de G.C. dans des bétons auto-plaçant (BAP) entraîne une modification des propriétés à l'état frais, la modification la plus remarquable étant la chute de l'étalement avec l'augmentation du taux d'incorporation. Garros [46] a conclu que l'augmentation du dosage en G.C. se fait au détriment de l'ensemble des paramètres rhéologiques considérés. L'incorporation de ces granulats conduit à des mélanges plus visqueux et présentant des seuils de cisaillement plus importants.

IV.4.4 Effets des granulats en caoutchouc sur la masse volumique, la teneur en air et l'absorption d'eau des bétons :

Le béton incorporant des G.C. en substitution des granulats naturels a naturellement une masse volumique plus faible que celle du béton ordinaire. Si on se réfère à la classification des bétons légers établie par l'ACI Committee 213 , avec l'incorporation de G.C. on peut envisager la production de bétons légers de structure. Comme le montre la Figure IV.12 , Güneyisi et al. [44] ont observé une chute de 25% de la masse volumique avec un taux de substitution de 50% de G.C. par rapport au béton de référence.

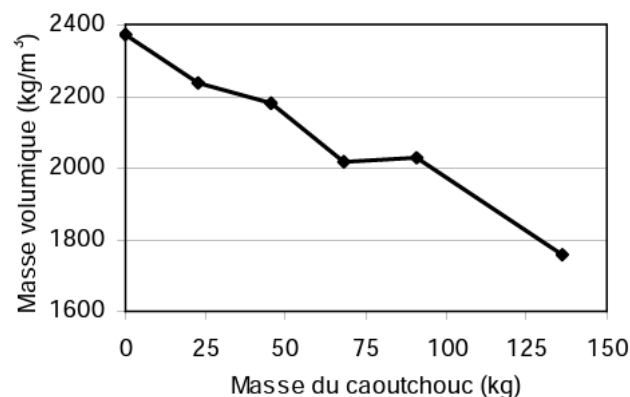


Figure IV.12. Evolution de Masse Volumique du béton en fonction de la masse des granulats en caoutchouc [44]

Fedroff et al. [47] ont aussi rapporté que la teneur en air occlus dans les bétons de caoutchouc est plus importante que celle des bétons ordinaires même sans agent entraîneur d'air.

S'agissant de l'absorption d'eau, Garros [46] et Benazzouk [48] ont prouvé que la capacité d'absorption d'eau diminue avec le taux d'incorporation des G.C. Ce que les auteurs expliquent par le fait que le caoutchouc n'absorbe pas l'eau et qu'elle doit par ailleurs contourner un réseau poreux plus dense symbolisant ainsi une plus grande difficulté à se propager à l'intérieur du composite cimentaire.

IV.4.5 Propriétés à l'état durci (résistance à la compression, traction et flexion) du béton incorporant des granulats en caoutchouc :

Plusieurs recherches se sont intéressées à l'influence des granulats de caoutchouc (GC ou RW : rubber aggregates) sur les propriétés à l'état durci du béton.

Garros et al. [46] ont prouvé que la présence de G.C. est très préjudiciable vis-à-vis de la résistance en compression. Une chute jusqu'à 86% de la résistance est observée pour les composites les plus dosés en G.C

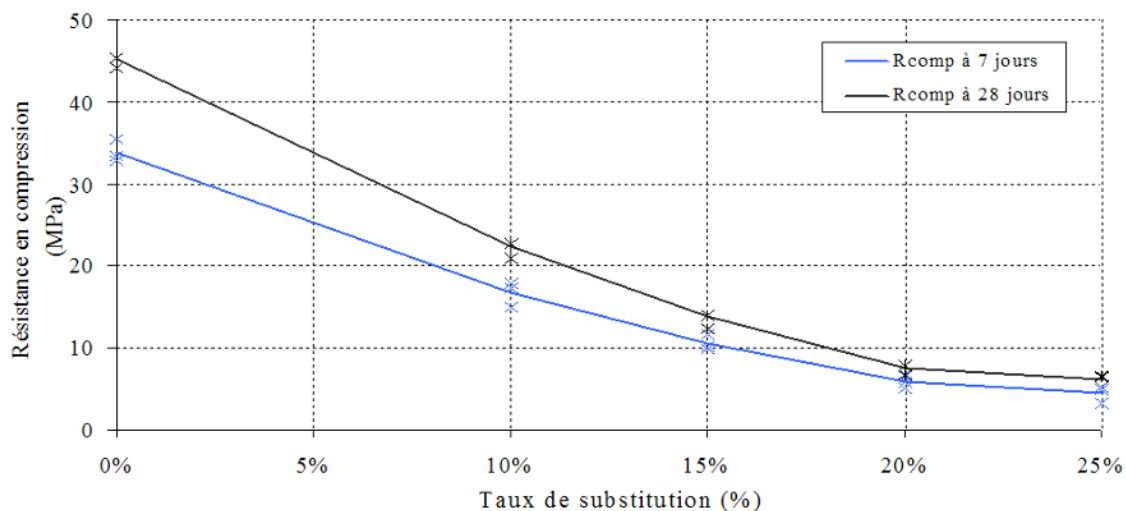


Figure IV.13. Evolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en granulats de caoutchouc [46]

Eldin et Senouci [49] ont montré une chute d'environ 85% de la résistance en compression et de 65% lorsqu'on substitue totalement le gravier et le sable respectivement par des G.C. de granulométrie équivalente. Khatib et al. [50] ont confirmé qu'il y a une chute de la résistance en compression de 90% entre un béton de référence et un béton incorporant plus de 60% de G.C. Les auteurs ont attribué cela au défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment.

De ce fait , les auteurs précédents et [23] conseillent de ne pas dépasser un taux de substitution de 20% du volume total de la phase granulaire.

D'autre part , Kaloush et al. [51] Güneyisi [44] ont montré que l'augmentation du contenu en G.C. dans le béton entraîne une réduction de la résistance à la traction par fendage.

Cependant, ils ont observé aussi un bénéfice de l'incorporation de G.C. : malgré la chute de la résistance en traction, la déformation à la rupture est augmentée. Cette capacité de déformation à la rupture montre que le béton incorporant des G.C. est plus ductile

Güneyisi [44] ont observé, une chute de la résistance mécanique et du module d'élasticité, en contrepartie la capacité de déformation au stade de la localisation de la macrofissuration est significativement augmentée. Une baisse de 83% du module d'élasticité lorsque la moitié du volume granulaire est remplacé par des granulats en caoutchouc.

Dans le même sens, Khaloo [45] et Khatib et al.[50] avaient déjà conclu que malgré la chute de la résistance en flexion, les éprouvettes en béton incorporant des G.C. permettaient d'atteindre des flèches plus importantes et une capacité de déformation améliorée avant la rupture que celles en béton de référence.

De nombreux chercheurs pensent que le défaut d'adhérence entre le caoutchouc et la pâte de ciment est une des raisons de la chute de résistance du béton incorporant ces granulats. Pour cette raison, certains auteurs étudient les possibilités d'améliorer l'adhérence entre ces deux matériaux (le caoutchouc et la pâte de ciment) qui sont très différents. Cependant, leurs résultats obtenus à ce jour sont peu convaincants.

Segre et Joeques [52] utilisent une solution alcaline (NaOH) pour traiter la surface de granulats en caoutchouc dans le but d'améliorer sa capacité d'attirer et de retenir l'eau. Les observations au microscope électrique ont permis de montrer une meilleure adhérence entre la pâte de ciment et les G.C. traités à la soude.

Xi et al. [53] tentent d'améliorer l'adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment en utilisant deux adjuvants : le polymère acétate de vinyle (PVA) et le silane. Les résultats montrent que les adjuvants PVA et silane augmentent effectivement la résistance en compression du béton de caoutchouc et parmi eux, l'effet du PVA est plus favorable que celui du silane.

Albano et al. [54], qui ont aussi traité les G.C. avec une solution de NaOH ont constaté que ces mesures n'avaient pas d'influence visible sur les résistances en compression et en traction et ils en concluent qu'elles n'ont pas d'effet sur l'adhérence entre le granulats en caoutchouc et la matrice cimentaire.

Enfin, tous les auteurs s'accordent sur le fait de ne pas dépasser un taux de substitution de 25% du volume total de la phase granulaire.

IV.4.6 Durabilité des bétons contenant des granulats en caoutchouc :

Garros [46] a montré que la présence des G.C. entraîne dans ce cas aussi une augmentation du retrait. Plus le dosage en G.C. est important, plus le retrait est élevé.

Certains chercheurs considèrent que le béton incorporant des granulats en caoutchouc a un potentiel pour amortir des ondes. D'après Khaloo [45] et Albano et al. [54] l'incorporation des G.C. réduit significativement la cinétique des impulsions ultrasoniques dans le béton. En conséquence ce composite a un potentiel pour amortir une vibration et qu'il peut en particulier servir d'isolant phonique. Cette réduction est essentiellement attribuée à la diminution de la densité du composite

Avec une telle capacité d'amortissement d'ondes en général et plus particulièrement des vibrations mécaniques, il n'est pas superflu d'envisager l'utilisation de ce composite dans les applications comme les murs antibruit des artères routières, comme fondation de rails d'engins roulant ou d'assises de machines vibrantes, etc.

D'autre part, la chercheuse [23] à remplacer le sable concassé dans les mélanges de béton par les G.C dans des proportions de 10%, 20%, 40% et 60% et de la poudre de verre P.V. Les résultats ont montré que, l'incorporation simultanée de déchets de caoutchouc et de poudre de verre a amélioré l'ouvrabilité du béton en raison de la faible absorption d'eau de PV et de GC. De plus, les mélanges contenant 15% de PV ont également donné des résultats satisfaisants contre l'attaque de l'acide sulfurique et les perméabilités à l'eau des bétons avec GC.

Garros [46] rapporte que les bétons contenant 10% et 15% en masse de G.C. dont la dimension est de 2 à 6 mm ont un facteur de durabilité 60% plus élevé que celui du béton normal après 300 cycles de gel-dégel.

Sukontasukkul [55] montre que la perte de masse augmente avec le dosage des G.C. et que la résistance à l'abrasion des blocs de béton incorporant des G.C. est plus faible par rapport à celle du bloc de béton de référence.

Hernández-Olivares [56] a montré que les après une montée de température à plus de 1000° la température des bétons est plus faible dans les bétons contenant des G.C et ils présentés moins d'écaillage que les bétons de référence.

Enfin, d'autres recherches se sont orientées vers l'utilisation des GC dans les routes. Ils ont prouvé que les G.C augmentent la résistance en traction, l'endurance et en même temps on diminue le module d'élasticité des chaussées. De ce fait, on peut obtenir un matériau ayant de bonnes capacités pour l'application routière

IV.4.3 Valorisation énergétique :

La valorisation est l'utilisation de broyats de pneus usagés ou de pneus entiers comme combustible alternatif pour la production d'énergie. Cette énergie sert à fournir de la chaleur et/ou de l'électricité. Leurs domaines d'applications sont variés [42] :

–**Acierie** : La composition du pneumatique présentant une grande quantité de carbone, il est ainsi possible de remplacer l'anhracite que les aciéries électrique utilisent pour réduire la rouille des

ferrailles usagées tout en maintenant la qualité de l'acier.

–**Cimenteries** : Le processus de fabrication des ciments est extrêmement énergivore, il utilise une quantité importante de combustible fossile (gaz naturel, fuel, charbon, ...). Les pneus usagés sont utilisés comme combustible de substitution dans les fours des cimentiers, de façon à réduire leurs consommations en combustibles fossiles en vue de diminuer leur consommation énergétique. Les pneus usagés ont l'avantage de présenter un pouvoir calorifique Inférieur (PCI) élevé proche à d'autres combustibles conventionnels.

IV.5 Les boues des stations d'épuration

IV.5.1 Définition

Les boues d'épuration (urbaines ou industrielles) sont des déchets dangereux produit par une station d'épuration à partir des effluents liquides. Elles se présentent sous forme de matières organiques non dégradées, des matières minérales et des micro-organismes (bactéries) sous forme d'une « soupe grasse »[5]. De plus, la composition exacte des boues varie en fonction de l'origine des eaux usées. La concentration en matière organique peut varier de 30 à 80 %.



Figure. IV.14. Boues des stations d'épuration [43]

IV.5.2 Différents types de boues et traitement :

On distingue différents types de boues selon les moyens pratiqués pour le traitement [5].

Tableau IV.1. Différents types de boues

Types de boues	Caractéristique
Les boues primaires	Dépôts récupérés par une simple décantation des eaux usées. Elles présentent des concentrations élevées en matières minérales (sable, terre...), mais aussi en matière organique boueuse physico- chimique.
Les boues physico-chimiques	Elles ressemblent aux boues primaires sauf que durant le traitement de l'eau usée, il a été rajouté un réactif (chaux, de nitrites, sels de fer, d'aluminium, et autres agents flocculant) pour agglomérer les fines particules et améliorer la décantation . Cette procédure se nomme : <u>L'hygiénisation</u> .
Les boues biologiques	Ils n'existent malheureusement pas sur une station d'épuration puisque ces boues sont imprégnées d'éléments chimique et de physico-chimique trop important. Leur traitement est effectué par les micros organismes (bactéries).
Les boues mixtes	Mélange de boues primaires et secondaires, elles proviennent de la plupart des stations de traitement complètes.
Les boues d'aération prolongée	Boues peu concentrées, moins organiques et donc moins susceptibles de produire des nuisances. On les appelle « biosolides » quand les boues primaires, physico-chimiques ou biologiques sont <u>traitées déshydrater puis conditionner</u>

IV.5.3 Valorisation des boues de station d'épuration pour un enjeu économique et environnemental :

La caractérisation d'une boue est fondamentale pour le choix de la méthode de toutes les boues de caractère organique nécessitent un traitement spécifique qu'elles soient recyclées, réutilisées ou remises dans le milieu naturel. Il en est de plus en plus de même pour les boues essentiellement minérales.

Le traitement de la boue est devenu un corollaire inévitable du traitement de l'eau, et il nécessite de moyens techniques et financiers parfois supérieurs au traitement qui lui est applicable ainsi que pour la prévision des performances des appareils à employer.

a) Agriculture:

La valorisation dans le secteur agricole se nomme « épandage » elle permet de :

- D'actionner et de répandre dans les champs des matières présentant un intérêt agronomique pour les sols comme les boues traités.
- Valoriser les propriétés fertilisantes des boues pour les cultures agricoles car elles constituent des matières riches en minéraux et composés organiques tout en faisant attention à leur traitement et à l'élimination des métaux lourds (Risque de contamination des sols)
- Dans certain cas , des boues toxiques ou des eaux très concentrées l'utilisation agricole n'est pas envisageable.

b) Valorisation des boues dans le secteur de la construction

L'utilisation des boues dans la fabrication de matériaux de construction comme :

- Fabrication de granulats: à raison de 15 à 35% de matière sèche
- Fabrication de briques à raison de 10 à 15 % de matière sèche

c) Valorisation des boues en cimenteries

Après déshydratation des boues elles peuvent ensuite au vu de leur toxicité ou degré d'innocuité pour l'environnement, stockées ou brûlées en incinérateurs ou cimenteries (ce qui réduit légèrement la consommation de clinker et de matière première issue de carrière). L'introduction de la boue brute ou lavée (à l'entrée du four ou au cours du broyage) dans le ciment augmente d'une part, le taux de la chaux libre du ciment, améliore le rendement des broyeurs et augmente la surface spécifique de Blaine. Enfin, elle influence de façon néfaste sur le temps de prise et les résistances mécaniques.

d) Valorisation pour produire de l'énergie :

La récupération d'énergie n'est pas normalement le but premier du traitement des boues. Cependant elles sont utilisés dans certain secteur comme :

- production de gaz méthane par fermentation.
- production calorifique dans les fours d'incinération

IV.6 Conclusion :

La valorisation apporte une nouvelle valeur aux déchets, en les sortants du circuit de collecte et de traitement. La valorisation s'oppose à l'élimination. Elle permet de faire des économies de matières premières et contribue au respect de la planète et à son développement durable. Quelque soit le type de valorisation (la valorisation matière, organique ou énergétique) cela permet l'utilisation des matières non utilisée et de faire des économies financières et écologiques.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] CHELABI, H. TALEB ,Z. Amélioration des propriétés mécaniques du plâtre de construction avec des déchets plastiques et verre. Mémoire de fin d'étude Master 2 , Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, 2017.
- [2] KHENNICHE, L. Cours « Recyclage et valorisation des déchets », Université A.MIRA-BEJAIA .
- [3] MOUSSACEB,K. Cours : 3ème année département mines et géologies : « recyclage des matériaux de construction (RMC) », Université A.MIRA-BEJAIA.
- [4] MAHFOUD. H, Cours Master I :Construction des matériaux « Recyclage des matériaux », Université Laarbi Tbessi-Tébessa, 2019.
- [5] GUENDOUZ, M , Cours « Matériaux Recyclés », Université Yahya Farès De Médéa, 2018.
- [6] SITE WEB: <https://fr.dreamstime.com/photo-stock-%C3%A9ditorial-pile-des-d%C3%A9chets-domestiques-en-d%C3%A9charge-image41772978>
- [7] SITE WEB: <https://www.batirama.com/article/16113-les-cimentiers-veulent-doubler-la-quantite-de-dechets-de-bois-utilisee-d-ici-a-2025.html>
- [8] SITE WEB: <https://www.batiment-entretien.fr/actualite/traitement-des-dechets-le-coup-de-gueule-du-maire-de-toulouse>
- [9] DJEMACI, B. La gestion des déchets municipaux en Algérie: Analyse prospective et éléments d'efficacité. 2012. Thèse de doctorat. Université de Rouen.
- [10]SITE WEB: www.actu environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dechet_ultime.php4
- [11] SITE WEB : www.dechetcom.com/comptes/envchrstele/types_dechets.pdf
- [12] SITE WEB : <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-dechet-ultime-5727/>
- [13] SITE WEB : <http://www.vedura.fr/environnement/dechets/recyclage-dechets-industriels>
- [14] DESPLATS, R. « Etude sur la caractérisation et les flux de dechets en milieux aquatiques », Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par SAFEGE, Janvier 2012
- [15] LAMTIGUI A , BENDANI Y , Document intitulé « Valorisation des laitiers d'aciéries en génie civil » , ECOLE DES MINES DE DOUAI, 2014 .

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [16] BENSAFI B , BELKACEM, O« Valorisation des Bétons à base de granulats recyclés (granulats de brique) sous l'effet de température » Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2017.
- [17] KHOUADJIA, M. L. K. Etude des propriétés physico-mécaniques et rhéologiques des bétons à base des sables de carrières: expérimentation et modélisation (Doctoral dissertation : 2016, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [18] BRAYMAND, S., & al. Les granulats recyclés de bétons : un matériau à fort potentiel de valorisation dans les bétons. 2014 .Matériaux: Montpellier, France.
- [19] DE LARRARD, F., Colina, H. Le béton recyclé. Marne-la-Vallée: Ifsttar. Ouvrages scientifiques, OSI4,2018 .
- [20] BOULAY, V., Valorisation des matériaux granulaires recyclés dans le béton de ciment pour usage résidentiel, Mémoire de maîtrise Spécialité : génie civil, Sherbrooke (Québec) Canada, Octobre 2014.
- [21] ACHOUR, N. Recyclage des Matériaux en Algérie. Thèse de doctorat. Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella, 2007.
- [22] DEBIEB, F. Performances et durabilité du béton à base de granulats recyclés contaminés par les chlorures et les sulfates (Doctoral dissertation), Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 2007.
- [23] RAMDANI, S. Etude de l'influence de l'incorporation dans le béton des déchets recyclés issus du broyage des pneus usagés et verre broyé sur leurs caractéristiques et comportement.(Performance behavior of concrete made with waste rubber aggregates from grinding used tires and glass waste.). 2019. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [24] MATAR, P., & El Dalati, R. Using recycled concrete aggregates in precast concrete hollow blocks. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 43(5),2012, 388-391.
- [25] MAROT, F. Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques. 1997. Thèse de doctorat. Le Havre.
- [26] COLIN, D. Valorisation de sédiments fins de dragage en technique routière (valorization of fine dredging sediments in road techniques). 2003. Thèse de doctorat. Thesis, University of Caen, France.
- [27] SAMARA, Mazen, LAFHAJ, Zoubeir, et CHAPISEAU, Christophe. Valorization of stabilized river sediments in fired clay bricks: Factory scale experiment. Journal of hazardous materials, 2009, vol. 163, no 2-3, p. 701-710.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [28] DUBOIS. V, Etude De Comportement Physico-Chimique Et Caractérisation Environnementale Des Sédiments Marins-Valorisation En Technique Routière, Thèse De Doctorat A L'école Nationale Supérieure Des Mines De Douai, 2006.
- [29] BONNET, Corinne. Développement de bioessais sur sédiments et applications à l'étude, en laboratoire, de la toxicité de sédiments dulçaquicoles contaminés. 2000. Thèse de doctorat. Doctorat Toxicologie de l'environnement, Université de Metz.
- [30] CETMED Fascicule. Inventaire Des Techniques De Dragage. Avril 2000,
- [31] FOUCHER, J. Valorisation des déblais sableux de dragage portuaire en France métropolitaine. Final year project. ENTPE, 2005, p. 1-66.
- [32] DAMIDOT D., Guide Technique Régional Relatif A La Méthodologie De Gestion Des Sédiments De Dragage Portuaire - Plan Régional D'élimination Des Déchets Industriels Spéciaux ., S.L.: (Predis) Nord-Pas-De-Calais. 2006, 422 P.
- [33] MULLIGAN C.N., Yong R.N., Gibbs B.F. 2001, An Evaluation Of Technologies For The Heavy Metal Remediation Of Dredged Sediments. Journal Of Hazardous Materials, Vol 85, Pp. 145–163.
- [34] SCRAGG, Alan H., et al. Environmental biotechnology. New York : OXFORD university press, 2005.
- [35] BEL HADJ ALI, I. Contribution à l'étude des sédiments marins tunisiens: cas des ports de Radès et de Gabès. 2013. Thèse de doctorat. Ecole centrale de Lille..
- [36] DEBBAHI A , HERRATI K. « Valorisation des sédiments marins dans les bétons ordinaires ayant différents paramètres de composition », Mémoire de fin d'étude Master 2 , Université frères Mentouri Constantine 1 , 2019 .
- [37] ZRI A., A. N. B. M. Valorisation Des Sédiments Dans Le béton Du Sable A Base De Sable De Dragage, 1st International Conference On Sustainable Built Environment Infrastructures In Developing Countries, 2009.
- [38] ACHOUR, R. Valorisation et Caractérisation de la durabilité d'un matériau routier et d'un béton à base de sédiments de dragage. 2013. Thèse de doctorat. Université de Sherbrooke.
- [39] LEBLOUB Z, AGGOUNE B , « Evaluation des performances à l'état frais et durci des bétons ordinaires à base d'argile expansée », Mémoire de fin d'étude Master 2 , Université frères Mentouri Constantine 1 , 2021 .

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [40] VIJAYALAKSHMI, R. et RAMANAGOPAL, S. Structural concrete using expanded clay aggregate: A review. Indian. J. Sci. Technol, 2018, vol. 8, p. 1-12.
- [41] LATERLITE : Catalogue général du bâtiment ; argile expansée mortier et béton en sac, Bureau Technique et commercial France, 2017.
- [42] ABDELHALIM AIT IDIR. Valorisation énergétique des pneumatiques usagés non réutilisables , Présentation Power point , Centre des conventions d'Oran, ERA 2017, du 23 au 25 octobre 2017
- [43] SITE WEB : <https://www.directindustry.fr/prod/veolia-water-sti/product-25260-1536493.html>
- [44] GÜNEYISI E., GESOĞLU M AND ÖZTURAN T., Properties of rubberized concretes containing silica fume. Cement and Concrete Research 34, 2309–2317, 2004.
- [45] KHALOO A. R., DEHESTANI M. AND RAHMATABADI P., Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles. Waste Management 28, 2472– 2482, 2008.
- [46] GARROS M., Thèse de doctorat : Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Université Paul Sabatier de Toulouse, 2007.
- [47] FEDROFF D., AHMAD S., AND SAVAS B. Z., Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber. Transportation Research Board, No. 1532, pp.66-72, 1996.
- [48] BENAZZOUK A., DOUZANE O. AND QUÉNEUDEC. T'KINT M., Transport of fluids in cement–rubber composites. Cement & Concrete Composites 26, 21–29, 2004.
- [49] ELDIN ,N.N. AND SENOUCI A.B., Observations on Rubberized Concrete Behavior. Journal of Cement, Concrete and Aggregates. Volume 15, Issue 1, July 1993.
- [50] KHATIB Z. K. AND BAYOMY F. M., Rubberized portland cement concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, 206-213.
- [51] KALOUSH K. E., WAY G. B. AND ZHU H., Properties of Crumb Rubber Concrete. Transportation Research Record. Journal of the Transportation Research Board, Volume 1914, 2005.
- [52] SEGRE N., JOEKES I., Use of tire rubber particles as addition to cement paste. Cement and Concrete Research 30, 1421-1425, 2000.
- [53] XI Y., LI Y., XIE Z., AND LEE J.S, Utilization of Solid Wastes (Waste Glass and Rubber Particles) As Aggregates in Concrete, Proc. of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 45-54, May 20-21, 2004.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [54] ALBANO C., CAMACHO N., REYES J., FELIU J.L. and Hernández M., Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites : Destructive and non-destructive testing. *Composite Structures* 71, 439–446, 2005.
- [55] SUKONTASUKKUL P. AND CHAIKAEW C., Properties of concrete pedestrian block mixed with crum rubber. *Construction and Building Materials*, 20: 450–457, 2006.
- [56] HERNÁNDEZ-OLIVARES F. AND BARLUENGA G., Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete. *Cement and Concrete Research* 34, 109– 117, 2004.