

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

*Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzou*

*Faculté du génie de la construction*

*Département de génie civil.*



# Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structure et Matériaux

## Thème

**Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des Fines de Mortiers de Démolition sur les propriétés des Mortiers.**

*Proposé et dirigé par:*

M<sup>me</sup> O. MALEK. HADDAD

*Présenté par :*

M<sup>elle</sup> TALEB KARINA

**Année 2015/2016**

# Remerciements

*"La confiance est un élément majeur, sans elle aucun projet n'aboutit"*

Mes sincères remerciements vont aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

J'adresse mes sincères remerciements à ma promotrice **M<sup>me</sup> O.MALEK.HADDAD**, qui sans elle se mémoire n'aboutira jamais. Je la remercie énormément de m'avoir encadré, de m'avoir prêté main forte durant cette période difficile, de m'avoir consacré tout son temps, de m'avoir fait part de ses précieux conseils. Je lui adresse toute ma profonde gratitude et m'a reconnaissance pour toute l'aide qu'elle m'a apporté pour la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier particulièrement mes parent sans lequel je n'existerai pas et qui m'ont conduit jusqu'à l'âge adulte, pour leur patience à mon égard sans jamais douter de mes capacités.

J'adresse mes remerciements à tous les enseignants ainsi qu'aux techniciens du Laboratoire du Génie Civil qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils, et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de répondre à mes questions durant toute la période de ce mémoire.

**MERCI**



# Dédicaces

*Je dédie ce mémoire*

*A mes chers parents ma mère et mon père qui m'ont apporté leurs soutiens, leurs amours et leurs encouragements.*

*Puisse dieu tout puissant vous garder et vous procurer santé et bonheur.*

*A mes frères, à ma sœur, à ma tante, mon oncle et leurs enfants, pour leurs soutiens, orientations et conseils.*

*Et pour tous ceux qui m'ont aidé de loin ou de près à la réalisation de ce mémoire.*

KARINA

# Résumé

De nos jours, on assiste à une accélération de la démolition d'ouvrages anciens en béton et ainsi à une accumulation importante de gravats en déchet. Ce dernier, une fois traité fournit une ressource inépuisable en granulats de recyclage pour qui les propriétés sont à définir.

L'étude présentée ici vise à développer l'utilisation de fines de mortiers de démolition FMD comme addition minérale en accompagnement au ciment.

Par les résultats de cette étude, nous avons démontré que l'incorporation de fine de mortiers de démolition dans la fabrication de mortier par substitution du ciment engendre une baisse des propriétés mécaniques des nouveaux mortiers. La résistance diminue au fur et à mesure que le pourcentage en FMD augmente.

Les mortiers composés de FMD ont eu un comportement de plus en plus ferme sans modification de la quantité d'eau. Cet effet peut s'expliquer par la demande en eau de ces fines qui est plus importante à celle du ciment.

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	4
<b>Partie 1 : Généralités sur les bétons</b> .....	4
<b>I.1. INTRODUCTION</b> .....	4
<b>I.2.LES CONSTITUANTS D’UN BETON</b> .....	5
<b>I.2.1.Le ciment</b> .....	5
<b>I.2.2.Les granulats</b> .....	8
<b>I.2.2.1.Provenance des granulats</b> .....	9
A-Granulats alluvionnaires .....	9
B- Granulats de roches massives.....	9
C-Granulats de transformation .....	10
D- Granulats de recyclage .....	10
<b>I.2.2.2.Propriétés des granulats</b> .....	10
A-Module de finesse .....	12
B- Forme et texture des granulats .....	13
C- La propreté .....	13
D- Propriétés mécaniques des granulats.....	14
<b>I.2.3. Les adjuvants</b> .....	14
I.2.3.1. Classes des adjuvants .....	14
I.2.3.1.1. Les adjuvants modifiant l’ouvrabilité du béton .....	14
I.2.3.1.2. Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement .....	16
I.2.3.1.3. Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton.....	17
<b>I.2.4. Les additions minérales</b> .....	19
<b>I.2.5. L’eau de gâchage du béton</b> .....	20
<b>I.3. CLASSIFICATION DES BETONS</b> .....	20

I.3.1. Classification selon les masses volumiques.....	20
I.3.2. Classification selon la consistance (ouvrabilité).....	20
I.3.3. Classification selon la résistance mécanique .....	21
I.3.4. Classification selon l'exposition et actions dues à l'environnement .....	22
<b>I.4. COMPOSITION DES BETONS .....</b>	<b>22</b>
I.4.1. Méthode de Bolomey .....	23
I.4.2. Méthode de Dreux Gorisse .....	23
I.4.2.1. Calcul du dosage en ciment .....	24
I.4.2.2. Calcul du dosage en eau.....	25
I.4.2.3. Calcul du dosage en granulats.....	25
<b>I.5. PROPRIETES ESSENTIELLES DES BETONS .....</b>	<b>28</b>
I.5.1. Propriétés de résistance des bétons .....	28
I.5.2. Le béton armé .....	29
I.5.3. Les bétons de fibres .....	30
<b>I.6. DURABILITE DES BETONS .....</b>	<b>30</b>
<b>I.7. CONTROLE DE LA QUALITE DES BETONS .....</b>	<b>31</b>
<b>Partie 2 : Généralités sur la Rhéologie du béton.....</b>	<b>34</b>
<b>I.8. INTRODUCTION .....</b>	<b>34</b>
<b>I.9. Comment évalue-t-on la rhéologie ? .....</b>	<b>34</b>
I.9.1. La mesure rhéologique et les rhéomètres .....	35
<b>I.10. Les éléments qui influencent la rhéologie des bétons .....</b>	<b>36</b>
<b>Partie 3 : Généralité sur les mortiers.....</b>	<b>38</b>
<b>I.11-INTRODUCTION.....</b>	<b>38</b>
I.12-AUTRES PROPRIETES D'UN MORTIER.....	39
I.13-LE MORTIER COMME OUTIL D'AIDE A LA FORMULATION DES BETONS .....	40
I.14-Les mortiers dans le bâtiment.....	42

<b>Partie 4 : <i>Le béton un matériau recyclable et recyclé</i></b> .....	44
<b>I.15. INTRODUCTION</b> .....	44
<b>I.16. LES DECHETS DE LA CONSTRUCTION ET L'ENVIRONNEMENT</b> .....	44
<b>I.17. LES DECHETS ET LE RECYCLAGE</b> .....	46
I.17.2-Classifications des déchets .....	46
1.17.2.1. Les déchets inertes DI .....	46
1.17.2.2. Les déchets industriels banals (DIB) .....	46
1.17.2.3. Les déchets ménagers et assimilés .....	46
1.17.2.4. Les déchets dangereux (spéciaux) .....	46
I.17.3. Gestion des déchets .....	47
I.17.4. Valorisations des déchets .....	47
<b>I.18. ENJEUX ET UTILISATION DES GRANULATS RECYCLES COMME GRANULATS A BETONS</b> .....	48
I.18.1. Différents types de granulats recyclés .....	49
I.18.2. Différentes applications des granulats recyclés .....	50
<b>I.19-ELABORATION DES GRANULATS RECYCLES</b> .....	50
I.19.1. Processus de fabrication des granulats recyclés .....	51
<b>I.20. COMPOSITION ET PROPRIETES PHYSIQUES DES GRANULATS RECYCLES DE BETON</b> .....	51
<b>CHAPITRE II : COMPOSITION DES MORTIERS &amp; PROCEDURES EXPERIMENTALES</b> .....	53
<b>II.1. INTRODUCTION</b> .....	53
<b>Partie 1 : <i>Compositions des Mortiers</i></b> .....	54
<b>II.2-FORMULATION DES MORTIERS</b> .....	54
<b>II.3. MATERIAUX ET FORMULATION</b> .....	54
II.3.1. Matériaux utilisés .....	54
II.3.1.1. Ciment .....	54
II.3.1.2. Sable .....	54

II.3.1.3. Fine de Mortiers de démolitions .....	54
II.3.1.4-Adjuvant .....	55
II.3.1.5. Eau de gâchage .....	55
<b>II.4- PREPARATION ET CARACTERISATION DES FMD.....</b>	<b>55</b>
II.4.1-Préparation des FMD .....	55
II.4.2-Résultat de caractérisation des FMD .....	56
II.4.2.1-Analyse granulométrique des FMD .....	56
II.4.2.2-Comparaison de la courbe granulométrique des FMD et celle d'un ciment.....	56
<b>II.5. Caractérisation du sable .....</b>	<b>57</b>
II.5.1. Echantillonnage (NF P 18-553).....	57
II.5.2.Analyse granulométrique.....	57
II.5.3. Module de finesse du sable.....	58
II.5.4. Absorption et masses volumiques du sable .....	59
<b>II.6. FORMULATION DES MORTIERS POUR ESSAI DE RESISTANCE.....</b>	<b>59</b>
II.6.1. Nomenclature des mortiers étudiés .....	60
II.6.2. Compositions des mortiers.....	60
<b>II.7. FORMULATION DES MORTIERS POUR LA RHEOLOGIE.....</b>	<b>60</b>
II.7.1. Principe de formulation.....	61
II.7.2. Compositions des mortiers.....	61
<b>Partie 2 : Procédures expérimentales .....</b>	<b>63</b>
<b>II.8. PROCEDURES EXPERIMENTALES ET CONDITIONS DE CONSERVATIONS.....</b>	<b>63</b>
II.8.1. Confections des mortiers .....	63
II.8.2. Préparation de la gâchée .....	63
II.8.3. Démoulage et Cure du béton .....	64
<b>II .9-CONFECTION DES MORTIERS POUR LA RHEOLOGIE.....</b>	<b>64</b>
II.9.1-Préparation de la gâchée.....	65
II.9.2-Mesure de l'affaissement et de l'étalement des mortiers .....	66
<b>II .10-ESSAIS D'AUSCULTATION SONORE (ULTRA-SON) .....</b>	<b>67</b>
II.10.1-Description de l'appareil .....	67
II.10.2- Principe de mesure .....	67

II.10.3- Etalonnage de l'appareil.....	68
II.10.3.1- Disposition des transducteurs.....	68
<b>II.11-COMPORTEMENT MECANIQUE DES MORTIERS</b> .....	69
II .11.1- Essai de flexion 3 points.....	69
II .11.2- Essai de compression pure .....	70
<b>CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS</b> .....	71
<b>III.1. INTRODUCTION</b> .....	71
<b>Partie 1 : Résultats de la rhéologie des mortiers</b> .....	72
<b>III.2 -RESULTATS DES ESSAIS RHEOLOGIE DES MORTIERS</b> .....	72
III.2.1- Etalement et affaissement des mortiers.....	72
III.2.1.1- Etalement et Affaissement des mortiers pour le cas où d-SP/C est constant.....	72
III.2.1.2- Etalement et Affaissement des mortiers pour le cas où d-SP/C variable.....	75
III.2.2- Corrélation des résultats cas où d-SP/C constant & cas où d-SP/C variable .....	78
<b>Partie 2 : Résultats de résistances mécanique à la compression, à la flexion et à l'ultra-son</b> .....	80
<b>III.3. RESULTATS DES ESSAIS MENES SUR LES MORTIERS</b> .....	80
III.3.1. Résultats des masses volumiques des mortiers durcis .....	80
III.3.2- Résultats des résistances à 28 jours .....	81
III.3.2.1. Résistance à la compression à 28 jours .....	82
III.3.2.1.1. Corrélation entre la Rc à 28 jours et le % en FMD .....	83
III.3.2.2. Résistance à la flexion à 28 jours .....	83
III.3.3- Résultats des essais d'auscultation sonore (ultra-son) .....	84
III.3.3.1. Corrélation entre la Résistance à la compression et la vitesse à l'ultrason .....	86
<b>III.4 CONCLUSION</b> .....	87
<b>Conclusion générale</b> .....	89
<b>Référence bibliographique</b> .....	91
<i>Annexe 1 : Différents essais de laboratoire</i> .....	93
<i>Annexe 2 : Résultats des différents essais de caractérisation</i> .....	102

<b>CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>4</b>
<i>Figure I.1.</i> Désignation d'un ciment courant .....	7
<i>Figure I.2.</i> Exemples de granulats d'origines différentes .....	8
<i>Figure I.3.</i> Illustration des granulats expansés : (a) <i>bille d'argile expansé</i> ; (b) <i>schiste expansé</i> .....	10
<i>Figure I.4.</i> Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.....	12
<i>Figure I.5.</i> Défloculation du ciment par l'action dispersante des superplastifiants [4] .....	15
<i>Figure I.6.</i> Courbes d'évolution du seuil de cisaillement (début de prise) en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [11] .....	16
<i>Figure I.7.</i> La création d'un réseau de microbulles d'air accroît considérablement la résistance au gel du béton [4].....	18
<i>Figure I.8.</i> Produit de cure [4].....	19
<i>Figure I.9.</i> Courbes illustratives de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams.....	21
<i>Figure I.10.</i> Dosage en ciment en fonction de rapport E/C et de l'affaissement au cône d'Abrams [5] .....	25
<i>Figure I.11.</i> Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [5] .....	26
<i>Figure I.12.</i> Courbe du mélange optimum selon la méthode de Dreux Gorisse [5] .....	27
<i>Figure I.13.</i> Essais de caractérisation des bétons.....	35
<i>Figure I.14.</i> La mesure rhéologique et les rhéomètres : <b>a) Principe de fonctionnement d'un rhéomètre</b> , <b>b) Exemples de rhéogrammes</b> .....	36
<i>Figure I.15.</i> Constituants des mortiers [19] .....	38
<i>Figure I.16.</i> Composition granulométrique du sable de référence CEN.....	42
<i>Figure I.17.</i> Compositions des déchets du bâtiment .....	47
<i>Figure I.18.</i> Exemple des Sept étapes de recyclage pour le projet C2 CA .....	50
<i>Figure I.19.</i> Compositions des granulats recyclés de béton [21] .....	51

<b>CHAPITRE II : COMPOSITION DES MORTIERS &amp; PROCEDURES EXPERIMENTALES</b> .....	<b>53</b>
<i>Figure II.1 : a) Concasseur b) Mortier et FMD</i> .....	55
<i>Figure II.2.Courbe granulaire des FMD</i> .....	56
<i>Figure II.3.Distribution granulométrique d'un ciment [24]</i> .....	56
<i>Figure II.4.Courbe granulaire du Sable 0/3</i> .....	58
<i>Figure II.5.Moule de confection des éprouvettes 7×7×28 cm</i> .....	59
<i>Figure II.6.Gachée du mortier</i> .....	64
<i>Figure II.7.Mortier après arasement</i> .....	64
<i>Figure II.8.Mortiers 7×7×28 cm<sup>3</sup></i> .....	64
<i>Figure II.9.Malaxeur électrique pour mortier</i> .....	65
<i>Figure II.10.Mesure de l'étalement</i> .....	66
<i>Figure II.11.Mesure de l'affaissement</i> .....	66
<i>Figure II.12.Appareil de test ultrasonique Pundit-Lab</i> .....	67
<i>Figure II.13.Remise à zéro du Pundit Lab avec la barre de calibrage</i> .....	68
<i>Figure II.14.Différents types de dispositions des transducteurs</i> .....	68
<i>Figure II.15.Position des transducteurs</i> .....	69
<i>Figure II.16. Schéma de principe</i> ....	69
<i>Figure II.17.Mortier soumis à la flexion 3 points</i> .....	70
<i>Figure II.18: Mortier soumis à la compression pure</i> .....	70
<b>CHAPITRE III : RESULTATS &amp; INTERPRETATIONS</b> .....	<b>71</b>
<i>Figure III.1. Résultats d'étalement des mortiers cas où (d-SP/C constant)</i> .....	73
<i>Figure III.2. Résultats d'affaissement des mortiers cas où (d-SP/C constant)</i> .....	74
<i>Figure III.3. Etalement et Affaissement des différents Mortiers pour d-SP/C constant</i> .....	74

<i>Figure III.4. Affaissement fct. Etalement des mortiers cas où (d-SP/C constant) .....</i>	<i>75</i>
<i>Figure III.5. Résultats d'étalement des mortiers cas où (d-SP/C Variable).....</i>	<i>76</i>
<i>Figure III.6. Résultats d'affaissement des mortiers cas où (d-SP/C Variable).....</i>	<i>77</i>
<i>Figure III.7. Etalement et Affaissement des différents Mortiers pour d-SP/C variable .....</i>	<i>77</i>
<i>Figure III.8. Affaissement fct. Etalement des mortiers cas où (d-SP/C variable) .....</i>	<i>78</i>
<i>Figure III.9. Superposition des résultats d’Affaissement fct. Etalement des mortiers (2 cas d’étude).....</i>	<i>79</i>
<i>Figure III.10. Masses volumiques des différents mortiers en fonction du pourcentage de FMD .....</i>	<i>81</i>
<i>Figure III.11. Courbes de compressions à 28 jours des mortiers étudiés .....</i>	<i>81</i>
<i>Figure III.12. Résistances à la compression à 28 jours des mortiers testés .....</i>	<i>82</i>
<i>Figure III.13. Corrélation entre la baisse de la résistance à 28 jours et le % de FMD .....</i>	<i>83</i>
<i>Figure III.14. Résistances à la Flexion à 28 jours des mortiers testés .....</i>	<i>84</i>
<i>Figure III.15. Vitesses à l’ultra-son à 28 jours des mortiers testés .....</i>	<i>86</i>
<i>Figure III.16. % de baisses des vitesses à 28 jours des mortiers testés .....</i>	<i>86</i>
<i>Figure III.17: Corrélation entre la baisse de la résistance à 28 jours et la vitesse à l’ultrason</i>	<i>87</i>

<b>CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	<b>4</b>
<i>Tableau I.1.</i> Liste des différents types de ciments courants normalisés [3].....	6
<i>Tableau I.2.</i> Résistance à la compression .....	7
<i>Tableau I.3.</i> Classes de consistances des bétons ordinaires .....	21
<i>Tableau I.4.</i> Classes de résistances des bétons.....	22
<i>Tableau I.5.</i> Coefficients d'appréciation de la qualité KG des granulats.....	24
<i>Tableau I.6.</i> Différents types d'essais pour Béton et Mortier .....	39
<i>Tableau I.7.</i> Taux de recyclage en Europe .....	48
<b>CHAPITRE II : COMPOSITION DES MORTIERS &amp; PROCEDURES EXPERIMENTALES</b> .....	<b>53</b>
<i>Tableau II.1.</i> Masses volumiques et coefficients d'absorption du sable.....	59
<i>Tableau II.2.</i> Nomenclature des compositions de mortiers testés .....	60
<i>Tableau II.3.</i> Compositions des mortiers en gramme.....	60
<i>Tableau II.4.</i> Compositions des mortiers pour le 1 <sup>er</sup> essai en gramme .....	62
<i>Tableau II.5.</i> Compositions des mortiers pour le 2 <sup>ème</sup> essai en gramme .....	62
<b>CHAPITRE III : RESULTATS &amp; INTERPRETATIONS</b> .....	<b>71</b>
<i>Tableau III.1.</i> Résultats d'étalement & d'affaissement des mortiers cas où (d-SP/C constant) 73	
<i>Tableau III.2.</i> Résultats d'étalement des mortiers cas où (d-SP/C Variable).....	76
<i>Tableau III.3.</i> Récapitulatif des pesées des éprouvettes (g) et des masses volumiques ( $kg/m^3$ )	80
<i>Tableau III.4.</i> Résistance moyenne en Compression et % des résistances en (MPa) .....	82
<i>Tableau III.5.</i> Résistance moyenne en Flexion (MPa).....	84
<i>Tableau III.6.</i> Vitesses à l'ultra-son (m/s) obtenues à 28 jours.....	85



---

# *Introduction Générale*

---

# Introduction Générale

De nos jours le béton est le deuxième matériau le plus consommé dans le monde après l'eau. La réputation du béton à travers les âges s'explique par ses multiples qualités dont la principale est sa durabilité. Le béton est un matériau économique et polyvalent. Sans le béton on ne pourrait pas réaliser ce qu'on construit aujourd'hui, dans les secteurs du bâtiment et travaux publics (immeubles d'habitation, ponts, tunnels, aéroports, barrages, ports, etc.). Il est à la fois robuste et universel, on peut le faire partout à l'air à l'eau.

Dans la construction l'utilisation en granulats naturels est très indispensable, les granulats constituent l'ossature du béton et ils représentent, environ 80 % du poids total du béton. Selon les statistiques, le bâtiment et les travaux publics ont besoin chaque année de 560 millions de tonnes de granulats et de matériaux assimilés. Par conséquent, leur extraction des rivières et des oueds ou bien des roches massives des montagnes a une grande incidence sur l'environnement, cela peut provoquer l'épuisement des ressources naturelles et affecte négativement la faune et la flore.

Les enjeux environnementaux et économiques nous force à trouver des solutions intelligentes dans le traitement du déchet et la protection de l'environnement. La valorisation des déchets du bâtiment offre plusieurs avantages:

- Disparition des décharges sauvages, réduction des volumes dans les décharges,
- Préservation de l'environnement en réduisant les volumes d'extraction des carrières, et des gisements alluvionnaires ;
- économie d'énergie soit par le transport, ou par l'extraction, puisqu'il s'agit de matériaux locaux.

Le présent travail a pour objectif d'étudier la faisabilité d'utiliser le déchet de la maçonnerie issue des travaux de rénovation des habitations. Le déchet est transformé en une poudre finement broyée et par la suite utilisée comme addition minérale pour la composition de nouveau mortier. Nous avons envisagé trois domaines d'étude pour ces fines de mortiers de démolition (FMD):

- Effet sur les propriétés rhéologique (affaissement et étalement) des mortiers,

- Effet sur la résistance à 28 jours des mortiers, effet sur la vitesse des ondes ultrasoniques à 28 jours
- Effet sur les phases d'hydratation d'un mortier composé de FMD.

Pourquoi les FMD ?

A partir du deuxième et troisième point de cette étude nous espérons répondre à la question : est-ce que cette addition est inerte ou bien active ? Si elle est active, qu'elle est alors son indice d'équivalence quand elle sera utilisée avec le ciment ?

En effet, il est connu que la résistance mécanique d'un béton est une fonction croissante asymptotique qui tend vers des propriétés ultimes qui parfois ne sont jamais atteintes. Aussi, dans la littérature il est parfois signalé qu'une partie du ciment introduit dans la composition d'un béton ou d'un mortier reste dans son état non hydraté même après plusieurs années d'âge du béton, notamment dans les bétons massiques. Ainsi, on se basant sur ces deux connaissances, on souhaite au final savoir si cette addition peut participer à la formation d'hydrates à leur nouvelle utilisation ?

Pour atteindre cet objectif, nous avons envisagé d'introduire dans le mortier des quantités de FMD suivant des pourcentages de substitutions massiques différentes. On s'est alors intéressé à trois aspects des bétons : résistance à la compression à 28 jours sur des mortiers ; rhéologie des mortiers à l'état frais et chaleur d'hydratation des mortiers.

Ce présent mémoire est organisé de la manière suivante :

Après l'introduction générale, ce document est composé de trois chapitres et d'une conclusion générale.

**Le premier chapitre** : est composé de trois parties

- **Partie 1** : nous avons fait un rappel sur les généralités des bétons ainsi que les méthodes fondamentales de formulation des bétons.
- **Partie 2** : nous avons fait un rappel sur les généralités sur la rhéologie du béton
- **Partie 3** : Nous avons donné quelques généralités sur les mortiers, ainsi que leurs applications dans certains domaines.
- **Partie 4** : nous avons donné quelques généralités sur la gestion des déchets et l'intérêt de leur recyclage et particulièrement les déchets de mortiers. Nous avons également donné quelques possibilités d'utilisation de ces matériaux dans le secteur de la construction.

**Dans le deuxième chapitre** nous avons :

- Présenté les résultats de caractérisation des matériaux utilisés pour la composition de nos mortiers.
- Nous avons calculé les différentes compositions des mortiers.
  
- A la fin de ce chapitre, nous avons présenté les procédures expérimentales à respecter pour réaliser les deux campagnes d'essais (essais de résistance à la compression, flexion et ultrason à 28 jours, rhéologie des mortiers au mini cône d'Abrams).

*Le troisième chapitre est* composé de deux parties traitant chacune une partie de l'étude menée. Nous avons alors présente les résultats et l'interprétation des résultats obtenus.

En dernier, nous avons récapitulés nos conclusions sur le travail menés et proposé des perspectives.



---

# *Chapitre I*

---

## CHAPITRE I: *ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

### Partie 1 : *Généralités sur les bétons*

#### I.1. INTRODUCTION

La résistance mécanique et la déformation sont des propriétés importantes des bétons, car elles jouent un grand rôle prépondérant sur la stabilité et la durabilité des ouvrages. Les propriétés du béton changent en fonction de la composition du béton de la nature de ces différents composants, notamment de la quantité et nature du ciment et de la quantité d'eau. Les autres paramètres qui influencent les propriétés des bétons peuvent être résumés en plusieurs catégories :

- ❖ Nature et dosage de ses composants (ciment, granulats, adjuvants...);
- ❖ Conditions de son murissement au jeune âge (climat chaud, climat froid) ;
- ❖ Conditions de mise en œuvre (malaxage, vibration, protection ...)
- ❖ Conditions d'exposition du béton durci (environnements agressifs ou pas) ;
- ❖ Sollicitations auxquelles il sera soumis.

Ainsi, en prêtant une grande importance à ces aspects on peut produire des bétons avec des propriétés très variables : en résistances, isolation thermique, résistance au feu, isolation phonique, durabilité. On peut également se permettre avec le béton des réalisations de formes très complexes, de différentes teintes et textures.

#### *Qu'est-ce qu'un béton ?*

Le béton est un matériau composite constitué de granulats (Filler, sables, graviers...), ciment, d'eau et le plus souvent d'adjuvants. Ces composants sont très différents, leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 t/m<sup>3</sup> pour l'eau à 3 t/m<sup>3</sup> pour le ciment. Les dimensions de leurs grains s'échelonnent du µm pour les grains les plus fins du ciment à 30 mm pour les grains des gravillons.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés : à l'état frais, alors qu'il est plastique on peut le travailler ; à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses propriétés continuent d'évoluer durant de nombreux mois.

Au cas par cas, en fonction de la disponibilité des matières premières, de la nature de l'ouvrage, des moyens de mise en œuvre, on rédige un cahier des charges qui englobera la liste des critères auxquels doit répondre le béton à fabriquer.

## I.2.LES CONSTITUANTS D'UN BETON

### I.2.1.Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide [1, 2]. Le ciment est composé essentiellement de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO), de silice (SiO<sub>2</sub>), d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) et d'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire à la fabrication du ciment est extraite de la roche calcaire ; l'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont extraits de l'argile. Le calcaire et l'argile contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Na<sub>2</sub>O +K<sub>2</sub>O et MgO, l'oxyde ferrique.

#### *Les différents types de ciments courants*

Les ciments courants ont pour constituant principal le clinker (norme ENV. 197-1). Au clinker sont ajoutées, suivant la nature du ciment voulu, les additions minérales de différentes natures.

- ❖ Laitier granulé de haut fourneau (S)
- ❖ Pouzzolanes naturelles (Z)
- ❖ Cendres volantes (V et W)
- ❖ Fumées de silice (D)
- ❖ Calcaire (L)
- ❖ Schistes calcinés (T)
- ❖ Constituants secondaires.

Les ciments courants normalisés sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne, l'ancienne appellation est indiquée entre parenthèse (voir tableau suivant). Pour chaque ciment sont indiqués les désignations propres et les pourcentages respectifs de leurs constituants.

**Tableau I.1. Liste des différents types de ciments courants normalisés [3]**

Désignations	Types de Ciment	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants (laitier, cendres, fumées de silice, pouzzolanes, calcaire, schistes)	Teneur en constituants secondaires
CEM I(CPA)	Ciment portland	95 à 100%	/	0 à 5%
CEM II/A (CPJ)  CEM II/B (CPJ)	Ciment portland compose	80 à 94%  65 à 79%	de 6 à 20 % de l'un quelconque des constituants, sauf dans les cas où le constituant est des fumées de silice auquel cas la proportion est limitée à 10 % (*) ;  de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus.	0 à 5%
CEM III/A (CHF) CEM III/B (CHF) CEM III/C (CLK)	Ciment de haut-fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	36 à 65 % de laitier de haut-fourneau 66 à 80 % de laitier de haut-fourneau 81 à 95 % de laitier de haut-fourneau	/
CEM IV/A (CPZ)  CEM IV/B (CPZ)	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %  45 à 64 %	10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %.  36 à 55 % comme si dessus	0 à 5 %
CEM V/A (CLC)  CEM V/A (CLC)	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %  20 à 39 %	18 à 30 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.  31 à 50 % de chacun des constituants comme ci-dessus	0 à 5 %

Il existe d'autres ciments, spéciaux, décrits par d'autres normes, généralement utilisés pour des ouvrages spéciaux ou dans des conditions spéciales. Parmi d'autres, nous avons :

- ❖ Ciment prompt naturel (CNP).
- ❖ Ciment alumineux fondu (CA)
- ❖ Ciment de laitier à la chaux (CLX)
- ❖ Ciment à maçonner (CM)
- ❖ ...

#### **Classes de résistance des ciments courants :**

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours, conformément à la norme NF EN 196 – 1, elle est exprimée en MPa. Pour chaque type de ciment, trois classes de résistance sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours, ces classes sont notées, 32,5, 42,5 et 52,5.

Tableau I.2. Résistance à la compression [4]

<b>Résistance à la compression (en MPA)</b>				
<b>Désignation de la Classe de résistance</b>	<b>Résistance à court terme</b>		<b>Résistance courante à 28 jours</b>	
	<b>À 2 jours</b>	<b>À 7 jours</b>		
<b>32,5N</b>	–	<b>≥ 16</b>	<b>≥ 32,5</b>	<b>≤ 52,5</b>
<b>32,5R</b>	<b>≥ 10</b>	–		
<b>42,5 N</b>	<b>≥ 10</b>	–	<b>≥ 42,5</b>	<b>≤ 62,5</b>
<b>42,5R</b>	<b>≥ 20</b>	–		
<b>52,5N</b>	<b>≥ 20</b>	–	<b>≥ 52,5</b>	–
<b>52,5R</b>	<b>≥ 30</b>	–		

Pour chaque classe de résistance normale, deux classes de résistance au jeune âge sont définies, une classe avec une résistance au jeune âge ordinaire (indiquée par la lettre N) et une classe avec une résistance au jeune âge élevée (indiquée par la lettre R).

#### **Désignation et marquage :**

La désignation complète d'un ciment courant est décrite dans la norme NF EN 197-1 ; voir l'exemple [CEM II / A – LL 32,5 R CE CP2 NF].

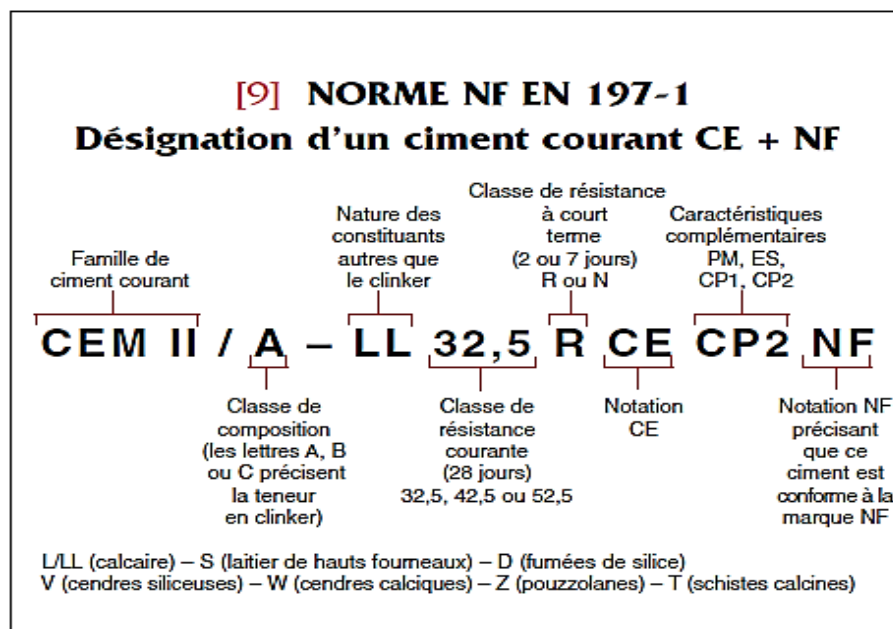


Figure I.1. Désignation d'un ciment courant [4]

Les ciments courants doivent être marqués CE. Ce marquage atteste de leur conformité à la norme harmonisée EN 197-1 et permet à ces ciments de circuler librement au sein de l'espace économique européen.

### I.2.2. Les granulats

On appelle granulats, tout matériau inerte qui entre dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm, les granulats vont des fillers, sables, graviers, aux cailloux (voir figure I.2). La provenance des granulats peut être naturelle, de transformation (artificielle) et pour ces dernières années de recyclage. On distingue quatre catégories de granulats en fonction de leur provenance :

- ❖ Les granulats d'origine alluvionnaire ; ils sont considérés comme roulés, ou semi concassés;
- ❖ Les granulats de roches massives; appelés aussi granulats concassés ;
- ❖ Les granulats de transformation ayant subis des transformations physico-chimiques;
- ❖ Les granulats de recyclage.



Figure I.2. Exemples de granulats d'origines différentes.

### ***1.2.2.1. Provenance des granulats***

**A-Granulats alluvionnaires** : Les gisements les plus habituels sont les lits de rivières déposés par les cours d'eau et les fonds marins. En fonction de la situation du gisement par rapport à la hauteur du cours d'eau ou de la nappe phréatique de l'endroit, l'exploitation a lieu soit à sec ou dans l'eau. La forme de ces granulats est roulée. Cette forme est acquise par l'érosion. Ces granulats sont criblés (séparés) en différentes classes granulaires. On peut distinguer :

- **Sables et graviers alluvionnaires fluviatiles** : siliceux ou silico-calcaires déposés par les cours d'eau pendant l'ère quaternaire. Ils sont exploités tout au long du réseau hydrographique.
- **Alluvions marines** : exploitées entre 10 et 30 mètres de profondeur sur le plateau continental. Ces granulats ne sont immergés que depuis quelques milliers d'années par suite de la remontée du niveau marin après la dernière glaciation (époque actuelle). En réalité, il s'agit d'anciennes alluvions fluviatiles et littorales.
- **Couches de sables ou de sablons, roches sédimentaires non consolidées** : déposées il y a des millions d'années.

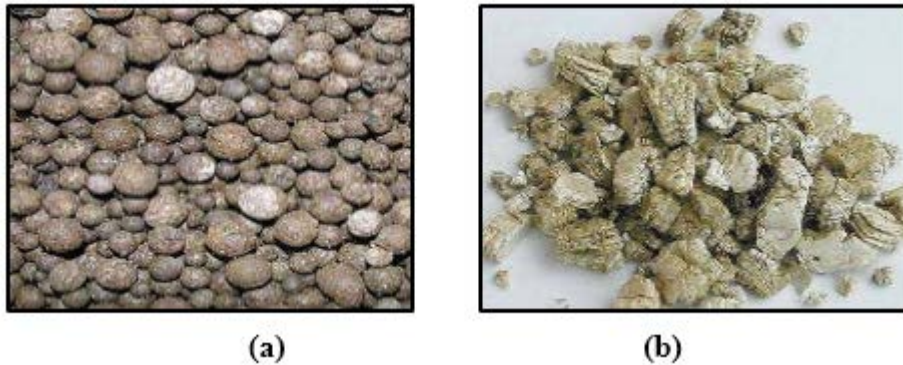
**B-Granulats de roches massives** : Les gisements de roches massives (carrières) correspondent à une multitude de situations géologiques (couches plus ou moins épaisses, filons, épanchements volcaniques, massifs de granite...) et à des localisations géographiques très différentes. La carrière peut être implantée en plaine sur un plateau ou en montagne au bord d'une falaise. L'exploitation s'effectue à flanc de coteau ou en puits, en fonction de la situation du niveau géologique utile. On peut ainsi extraire et produire des granulats avec des roches éruptives, des roches métamorphiques et des roches sédimentaires consolidées (calcaires...).

Ces granulats sont obtenus par abattage et concassage, ce qui leur donne des formes angulaires. Une phase de pré-criblage est indispensable à l'obtention de granulats propres. Différentes phases de concassage aboutissent à l'obtention des classes granulaires souhaitées. Les granulats concassés présentent des caractéristiques qui dépendent de l'origine de la roche, régularité du banc, degré de concassage... On peut distinguer :

- ❖ Roches sédimentaires consolidées telles que les calcaires ou les degrés. On les exploite dans les bassins sédimentaires et dans les régions montagneuses.
- ❖ Roches métamorphiques dures telles que les quartzites ou les gneiss. Elles affleurent plus particulièrement dans les massifs montagneux anciens.
- ❖ Roches éruptives anciennes. Il s'agit de roches plutoniques à cristaux plus ou moins développés (granites, diorites, micro-diorites, gabbros...) ou de roches volcaniques (rhyolites...), exploitées dans les massifs montagneux anciens avec une répartition géographique analogue à celle des roches.

- ❖ Roches volcaniques récentes telles que le basalte, le trachyte ou l'andésite ; roches épanchées par le volcanisme récent du massif Central.

**C-Granulats de transformation :** Les granulats de transformation sont souvent d'origine minérale résultant d'un procédé de transformation industriel comprenant des modifications thermiques (cuisson) ou chimiques. Dans cette catégorie se rangent les granulats légers transformés, comme l'argile expansée (Figure I- 3 a), le schiste expansé (Figure I- 3 b).



**Figure I.3. Illustration des granulats expansés : (a) bille d'argile expansé; (b) schiste expansé**

La cuisson à des températures allant de 1000 à 1200 °C, dans un four rotatif, de nodules d'argile ou de schiste produit d'une part un dégagement gazeux au sein de chaque nodule sous l'effet de réactions chimiques, ce qui entraîne l'expansion du nodule, d'autre part une vitrification de la couche externe. On obtient alors un granulats plus gros, avec une grande porosité, donc plus léger.

**D- Granulats de recyclage :** L'emploi des déchets et des sous-produits industriels dans le secteur du bâtiment répond simultanément au souci d'économie des ressources naturelles en granulats. Dans la partie 2 de ce présent chapitre nous avons définis d'une manière plus approfondie le recyclage dans la construction et les différentes possibilités de granulats de recyclages et les inconvénients et les intérêts de chacun dans la construction.

### ***1.2.2.2. Propriétés des granulats***

Les propriétés des granulats sont intimement liées aux propriétés du massif rocheux d'origine, c.-à-d. la composition chimique et minéralogique, les caractéristiques pétrographiques, la densité, la dureté, la résistance, la stabilité physique et chimique, la structure des pores et la couleur. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèque qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et

l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci [5, 6].

D'après leur nature minéralogique, on distingue trois grandes classes :

- ❖ Les granulats siliceux ;
- ❖ Les granulats calcaires ;
- ❖ Les granulats granitiques (argileux ou schisteux)
- ❖ ...

Les granulats ont des effets sur les propriétés mécaniques et sur la consistance du béton de plusieurs manières [1, 7, 8] :

- ❖ Par leurs propriétés de résistances mécaniques ;
- ❖ Par leur capacité d'adhérence à la pâte liante (pâte de ciment durcie);
- ❖ Par leur forme (roulés, concassés et semi-concassés);
- ❖ Par leur distribution granulaire et donc la compacité du mélange granulaire formé ;
- ❖ Par leur diamètre maximal, et leur volume par rapport au volume total du béton.

Dans une composition de béton, la dimension des granulats à utiliser passe des micromètres à quelques centimètres. La dimension maximale est variable, elle dépend du confinement des armatures et des dimensions des coffrages. On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoirs (trous circulaires). Les principales classes granulaires caractérisées par les dimensions extrêmes  $d$  et  $D$  des granulats sont (Norme XP P 18-540):

- ❖ Fillers 0/D  $\Rightarrow$  pour  $D < 2$  mm et ayant au moins 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm.
- ❖ Sablon 0/D  $\Rightarrow$  pour  $D < 1$  mm et avec moins de 70 % de grains passant au tamis de 0,63 mm
- ❖ Sable 0/D  $\Rightarrow$  Pour  $1 \text{ mm} < D \leq 6,3$  mm ;
- ❖ Gravies 0/D  $\Rightarrow$  Pour  $D > 6,3$  mm
- ❖ Gravillons d/D  $\Rightarrow$  Pour  $d \geq 1$  mm et  $D \leq 125$  mm
- ❖ Ballast d/D  $\Rightarrow$  Pour  $d \geq 25$  mm et  $D \leq 50$  mm



*Figure 1.4. Éventail de grosseurs de granulats utilisés dans le béton.*

### **A-Module de finesse :**

Pour confectionner un béton de qualité, on utilise au moins deux classes de granulats différentes. Les principales divisions comprennent le sable et le gros granulat, dont les éléments mesurent au moins 5 mm de diamètre.

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

- ❖ S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton ;
- ❖ Si le sable est grossier, la plasticité du béton sera réduite et sa mise en place sera difficile.

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par son module de finesse (**MF**). Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis (0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5).

La valeur du MF est d'autant plus élevée que le granulat est grossier. Un bon sable à béton doit avoir un MF d'environ 2,2 à 2,8. En dessous de 2,2 le sable a une majorité d'éléments fins, ce qui nécessite une augmentation du dosage en eau. Au-dessus de 2,8 le sable manque de fines et le béton perd en ouvrabilité [5, 1].

La quantité de pâte de ciment fraîche à introduire dans le béton doit être suffisante pour recouvrir la surface de tous les grains de sorte que, plus la surface spécifique des granulats est faible, moins il faut de pâte et conséquemment, plus la demande en eau est faible.

**B- Forme et texture des granulats** : La forme et la texture ont des effets sur la compacité du béton à formuler, et donc sur l'ouvrabilité et maniabilité du béton.

La texture de la surface des granulats affecte sa liaison avec la pâte de ciment et influence la demande en eau du mélange. La forme en aiguille ou plate, mais aussi les granulats très anguleux sont à éviter, car elle nécessitent une quantité d'eau plus élevée, pour une même maniabilité du béton, ce qui peut nuire à la qualité du béton et peut provoquer des défauts d'aspect. La forme et la texture des granulats influencent :

- ❖ La demande en eau
- ❖ La maniabilité : facilité de mise en œuvre et le compactage du béton.
- ❖ La compacité
- ❖ du mélange, donc le volume des vides à remplir par la pâte de ciment.
- ❖ L'adhérence du granulat à la pâte de ciment.

**C- La propreté** : Les granulats utilisés dans le béton doivent être propres, débarrassés de tous corps polluants qui peuvent nuire à l'adhérence entre la pâte de ciment et les granulats et provoquer une fissuration précoce du béton [5, 1].

La propreté désigne d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains, traces dues à la présence d'oxyde de fer, pyrite, argile... Un granulat propre ne laisse pas de traces. D'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes...

Les granulats ne doivent pas contenir d'hydrocarbures, d'huiles végétales ou de matière organique. Les granulats doivent être exempts de sulfures sous forme de pyrites, de sulfates et de chlorures qui nuisent aux propriétés de durabilité du béton durci.

Il existe plusieurs essais de laboratoire pour le contrôle de la propreté des granulats :

- ❖ Essai de la perte au feu
- ❖ Essai d'équivalent de sable « ES »
- ❖ Tests chimiques ; les composants chimiques à utiliser dépendent du produit recherché.

Exemple de l'essai au bleu de méthylène qui permet de déterminer la teneur en argile du Sable : les fines d'origine argileuse retiennent le bleu de méthylène.

Les fines selon la norme NF P 18-540 désignent les particules passant au tamis de 0,08 mm. Les fines peuvent provenir du sable, des gravillons et d'additifs divers. Dans le sable et gravillon concassé, leur pourcentage peut être élevé. Un excès de fines nécessite un dosage en eau plus élevé, mais un manque

de fines conduit à des bétons peu maniables et de faible compacité. Leur nocivité est grande lorsqu'elles contiennent des matières argileuses, c'est pourquoi il faut les tester au bleu de méthylène.

**D- Propriétés mécaniques des granulats :** En plus des propriétés de résistance à la compression, cisaillement, traction..., les granulats sont testés vis-à-vis de la résistance à l'usure et au choc donc à l'écrasement. Pour certains usages les granulats peuvent également être caractérisés vis-à-vis de l'action du gel dégel et des températures d'usages très élevées.

### **I.2.3. Les adjuvants**

Les adjuvants sont des produits chimiques ou naturels sous forme liquides ou poudres, ils sont capables d'améliorer certaines propriétés des produits cimentaires tel que les bétons, mortiers et les coulis. Les adjuvants sont incorporés aux bétons à faible dose inférieure à 5 % de la masse du ciment, avant ou pendant le malaxage. Les propriétés à améliorer sont visées soit à l'état frais, pendant la prise et le durcissement, ou bien à l'état durci [9,10]. On peut alors énumérer parmi d'autres :

- ❖ La rhéologie;
- ❖ la cinétique d'hydratation (temps de prise et de durcissement);
- ❖ les performances mécaniques ;
- ❖ ...

Chaque adjuvant est défini par une fonction principale, caractérisée par la modification majeure qu'il apporte aux propriétés des bétons. Un adjuvant présente une ou plusieurs fonctions secondaires qui sont plus souvent indépendantes de la fonction principale. L'emploi d'un adjuvant peut aussi entraîner des effets secondaires non recherchés (non souhaités). L'efficacité de la fonction principale de chaque adjuvant peut varier selon son dosage et sa compatibilité avec les matériaux utilisés [1, 9]. Dans leur ensemble, les adjuvants ne doivent pas contenir de chlore.

#### ***1.2.3.1. Classes des adjuvants***

Selon les objectifs visés, on introduit dans le béton des adjuvants de nature et de fonction différente. Dans cette section on présente les différentes classes d'adjuvants [10].

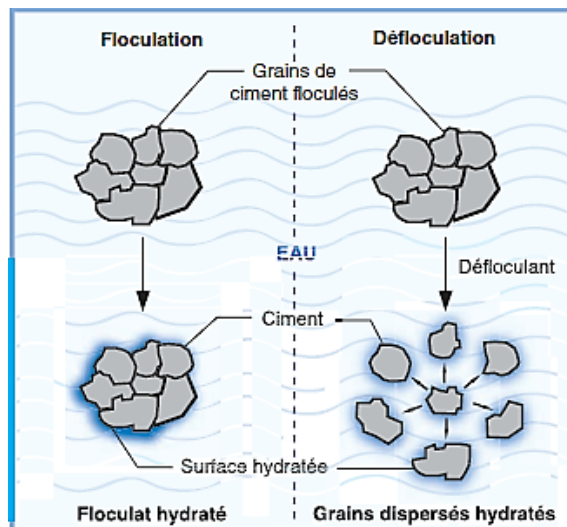
##### ***1.2.3.1.1. Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité du béton***

Ces adjuvants modifient le comportement rhéologique des bétons, à l'état frais, avant le début de prise. Ce sont en général des produits de synthèse, ils sont à base de lignosulfonates, de sels d'acides organiques, de mélamine sulfonate, de naphthalène sulfonate et dérivés de mélamine ou naphthalène.

Ces adjuvants ont des effets sur les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams. Plus le dosage en adjuvant est important plus l'affaissement est grand. L'affaissement cesse lorsque l'on atteint le dosage de saturation où l'adjuvant n'a plus d'effet. La viscosité peut être caractérisée par le temps d'écoulement dans un entonnoir : le temps d'écoulement baisse avec l'augmentation de l'adjuvant, cela se traduit par une viscosité faible.

### **Mode d'action**

Lors du gâchage du béton, sous l'effet des forces attractives de l'eau, les particules de ciment forment des agglomérats piégeant une bonne partie d'eau libre à l'intérieur « floculation ». L'eau disponible pour fluidifier le béton est ainsi limitée, et le béton présente une certaine fermeté. Le plastifiant (superplastifiant) s'adsorbe à la surface des particules de ciment. Une fois adsorbé, il agit par répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains et/ou par répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres (Figure I-5). L'eau initialement piégée entre les floculats est à nouveau disponible pour fluidifier le béton [4].



**Figure I.5. Défloculation du ciment par l'action dispersante des superplastifiants. [4]**

Ce processus permet:

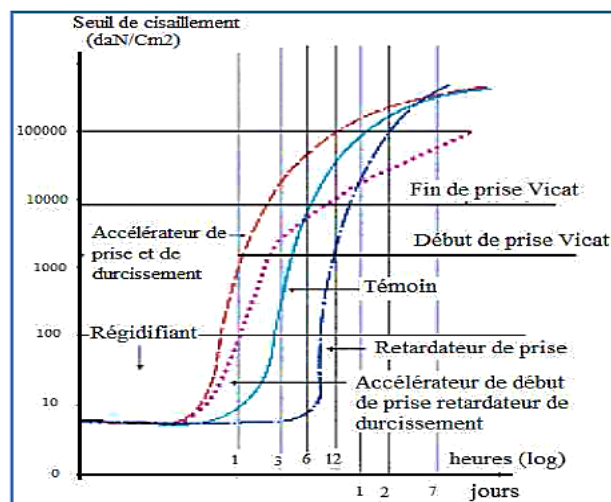
- ❖ D'améliorer la maniabilité sans augmenter le dosage en eau : dans ce cas la quantité d'eau de la formule initiale de béton n'est pas modifiée, mais son ouvrabilité évolue avec le changement du pourcentage en superplastifiant ; quant à la résistance mécanique, elle reste quasi constante ; cette catégorie d'adjuvants regroupe les fluidifiants appelés aussi plastifiants, les superfluidifiants appelés superplastifiants.

- ❖ D'améliorer les performances mécaniques du béton ; de réduire le rapport E/C, dans ce cas la quantité d'eau du béton est réduite pour une même maniabilité, et la résistance mécanique augmente. Ce sont les réducteurs d'eau.

En réalité, un fluidifiant est aussi un réducteur d'eau ; cela dépend de l'objectif visé dans son utilisation.

### I.2.3.1.2. Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement

Ce sont des produits chimiques qui modifient la solubilité des constituants du ciment et surtout leur vitesse de dissolution. Physiquement, cette action se traduit par l'évolution de la résistance au jeune âge, en fonction de l'adjuvant utilisé (le graphique ci-dessous, illustre ce phénomène).



**Figure I.6. Courbes d'évolution du début de prise en fonction de la présence d'un accélérateur ou d'un retardateur de prise [11].**

#### Les accélérateurs de prise et les accélérateurs de durcissement

L'accélérateur de prise a pour fonction principale de diminuer les temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, il diminue le temps de passage de l'état plastique à l'état solide du béton. L'accélérateur de durcissement a pour fonction principale d'accélérer le développement des résistances initiales des bétons.

Les constituants de ces adjuvants sont généralement des dérivés de la soude, de la potasse ou de l'ammoniaque.

Ils sont à recommander pour les bétonnages par temps froid, les décoffrages rapides, les scellements, les travaux en galerie, les travaux sous l'eau, etc.

Il est à noter qu'un béton fortement accéléré, au moyen d'adjuvants, risque d'avoir une résistance mécanique finale légèrement diminuée.

### **Les retardateurs de prise**

Le retardateur de prise a pour fonction principale d'allonger le temps de début et de fin de prise du ciment dans les bétons, il augmente le temps de passage de l'état plastique à l'état solide du béton. Le retardateur de durcissement a pour fonction de retarder le développement des résistances initiales des bétons. Ils sont à base de lignosulfonates, d'hydrates de carbone ou d'oxydes de zinc ou de plomb. Par rapport au témoin, l'augmentation du temps de début de prise est comprise entre une à deux heures. A l'état durci, la résistance du béton est en général augmentée par rapport à celle du témoin.

Les retardateurs de prise sont particulièrement recommandés pour les bétonnages par temps chaud et les bétonnages en grande masse. Ils permettent aussi de faciliter les reprises de bétonnage.

#### ***1.2.3.1.3. Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton***

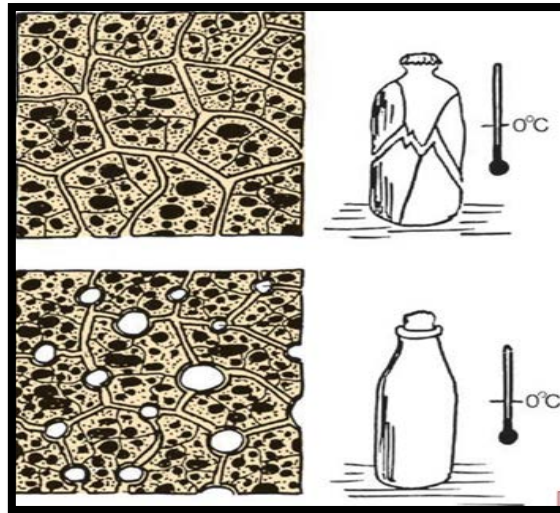
### **Les entraîneurs d'air**

Ils ont pour fonction la formation de microbulles d'air uniformément réparties dans la masse du béton. Les entraîneurs d'air sont des corps tensio-actifs : lignosulfonates, abiétates de résines, sels d'éthanolamine, que l'on mélange en fonction des propriétés à obtenir.

Le béton durci contient naturellement une certaine quantité d'air provenant, soit d'un entraînement lors du malaxage, soit de l'évaporation de l'eau de gâchage non fixée. Cet air (2 % du volume) est réparti de manière aléatoire. En revanche, l'entraîneur d'air permet d'en entraîner un volume supérieur et de le répartir uniformément.

L'objectif d'introduire l'entraîneur d'air est d'améliorer la résistance au gel du béton durci, ainsi que sa résistance aux sels de diverglaçage. Les microbulles qui coupent les réseaux des capillaires limitent le développement des contraintes dues au gel de l'eau interstitielle. L'entraîneur d'air permet également d'améliorer la résistance aux incendies des bétons. En revanche, la présence de bulles peut entraîner une chute des résistances mécaniques.

En Europe, l'utilisation des entraîneurs d'air pour les bétons routiers est obligatoire. La valeur de l'air occlus doit être comprise entre 4 et 6 %.



**Figure 1.7. La création d'un réseau de microbulles d'air accroît considérablement la résistance au gel du béton. [4]**

### Les hydrofuges de masse

Les hydrofuges de masse ont pour fonction principale de diminuer la perméabilité et l'absorption capillaire des bétons, des mortiers ou des coulis durcis. Cette diminution de l'absorption capillaire procure une bonne étanchéité au béton. Les hydrofuges sont généralement à base d'acides gras ou de leurs dérivés (stéarates). Ils peuvent également comporter des matières fines (type bentonite) ainsi que des agents fluidifiants.

L'efficacité dépend de la nature du ciment. Cependant, il est à préciser que ces adjuvants ne peuvent pas rendre étanche un mauvais béton, présentant des vides importants ou des hétérogénéités.

Ils sont utilisés pour les bétons d'ouvrages hydrauliques (canaux, murs de fondation, retenues d'eau...) et les mortiers d'étanchéité (chapes, joints de maçonnerie, galeries de tunnels).

### Les rétenteurs d'eau

Ces produits ont pour fonction de réguler l'évaporation de l'eau et d'augmenter ainsi l'homogénéité et la stabilité du mélange. Le ressuage par l'action de ces stabilisants est réduit de 50 %.

La rhéologie du béton frais est améliorée même dans le cas d'une diminution du volume des fines. La diminution des résistances à 28 jours par rapport à un béton témoin est de l'ordre de 20 %.

Ces produits sont des agents colloïdaux ou des dérivés de la cellulose, ils sont utilisés pour l'exécution de mélanges retardés ou de mélanges à couler sous l'eau sans délavage.

### Les produits de cure

Les produits de cure ont pour fonction de protéger le béton frais après sa mise en œuvre, en évitant sa dessiccation par évaporation trop rapide de l'eau. Celle-ci entraînerait une baisse des résistances mécaniques, la formation de fissures de retrait avant prise.

Ces produits sont à base de résines, cires ou paraffines en émulsion aqueuse, de résines naturelles ou synthétiques, de cires ou de paraffines dissoutes dans un solvant pétrolier, de caoutchouc chloré. Ce sont des produits que l'on peut pulvériser sur le béton frais. Il se forme alors un film continu imperméable protecteur qu'il faut ensuite éliminer par brossage une fois le béton durci.

Ils sont recommandés pour les bétonnages des planchers, pistes, dallages et généralement tous les ouvrages pour lesquels le rapport surface d'évaporation/épaisseur est élevé.



*Figure I.8. Produit de cure [4]*

### I.2.4. Les additions minérales

Les additions minérales sont souvent sous forme d'une poudre fine ou ultra fine de faibles dimensions, elles sont ajoutées en quantité de l'ordre de 10 % du poids de ciment. Les additions minérales sont soit actives ou inertes, elles améliorent notablement les performances et la durabilité du béton grâce à leurs propriétés physicochimiques (cendres volantes, laitier, fillers...).

Ces poudres permettent dans un premier temps d'améliorer la consistance du béton frais en le rendant plus fluide. A long terme, ces poudres procurent aux bétons une meilleure compacité (une porosité réduite) ce qui permet d'améliorer leurs propriétés de durabilité [12].

Par ailleurs pour les poudres actives à caractère pouzzolaniques (fumée de silice et cendres volantes...), ils permettent d'obtenir des bétons plus résistants et plus compacts et donc plus durables. Ces poudres sont souvent utilisées pour produire des bétons à hautes résistances et des bétons à ultra hautes performances.

### I.2.5. L'eau de gâchage du béton

L'eau est un constituant nécessaire pour obtenir un béton ou un mortier. Pratiquement toute eau naturelle potable n'ayant pas une odeur ou un goût prononcé peut être employée pour la fabrication du béton. Les eaux non potables ne doivent pas contenir de composés risquant d'attaquer chimiquement les hydrates de ciment, les granulats ou les armatures (comme le chlorure, environ 0,2 % à 0,4 % de la masse de ciment peut provoquer des risques de corrosion).

L'eau doit être pure de toutes particules en suspension dont la quantité peut modifier les qualités originales. L'eau doit être débarrassée des poussières en suspension, des huiles...

## I.3. CLASSIFICATION DES BETONS

Les bétons peuvent être classés en plusieurs catégories de plusieurs manières.

### I.3.1. Classification selon les masses volumiques

Il existe quatre grandes classes

- |                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| ❖ Bétons très lourds              | $Mv > 2500 \text{ kg/m}^3$                             |
| ❖ Bétons lourds (bétons courants) | $1800 \text{ kg/m}^3 \leq Mv \leq 2500 \text{ kg/m}^3$ |
| ❖ Bétons légers                   | $500 \text{ kg/m}^3 \leq Mv < 1800 \text{ kg/m}^3$     |
| ❖ Bétons très légers              | $Mv < 500 \text{ kg/m}^3$                              |

Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent des masses volumiques de  $2500 \text{ kg/m}^3$  environ. Ils peuvent être armés ou non. Lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, ils sont précontraints.

Les bétons très lourds dont la masse volumique peut atteindre les  $6000 \text{ kg/m}^3$  sont utilisés pour les ouvrages hydrauliques là où il faut empêcher la perméabilité de l'eau. On les utilise également dans le cas des centrales nucléaires et tout ouvrage de stockage des produits radioactifs.

Les bétons légers et très légers peuvent répondre aux problèmes d'isolation dans le bâtiment. Ils sont aussi utilisés dans les ouvrages maritimes.

### I.3.2. Classification selon la consistance (ouvrabilité)

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité : aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures. L'ouvrabilité (la consistance) peut être effectuée

facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams ; essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique.

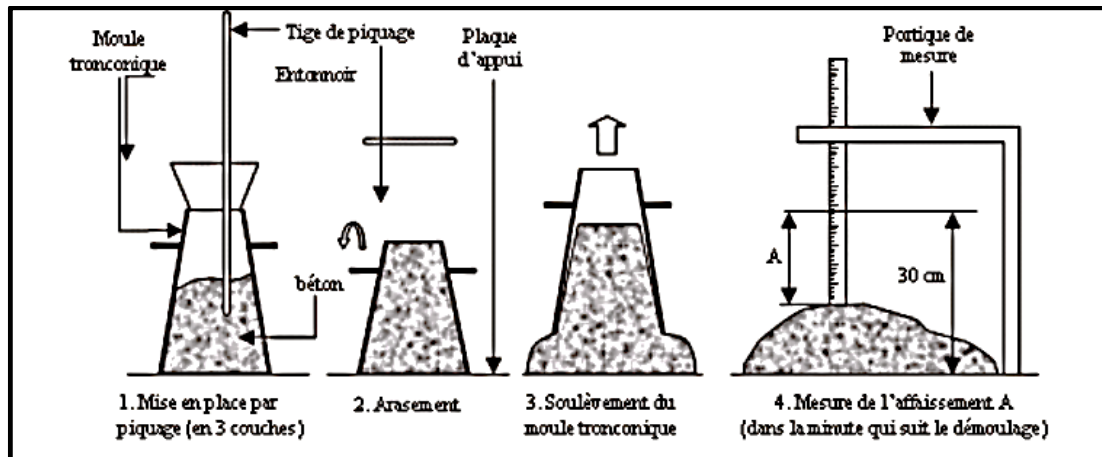


Figure I.9. Courbes illustratives de l'essai d'affaissement au cône d'Abrams

Selon la valeur de l'affaissement, il existe 5 classes de bétons :

Tableau I.3. Classes de consistances des bétons ordinaires

Classes	Consistance du béton	Affaissement au cône d'Abrams (cm)
S1	Ferme	1 à 4
S2	Plastique	5 à 9
S3	très plastique	10 à 15
S4	Fluide	16 à 21
S5	très fluide	≥ 22

Il existe plusieurs autres essais de laboratoire pour la caractérisation de la consistance du béton :

- ❖ Essai d'affaissement à la table à secousse ;
- ❖ Essai d'écoulement dans un cône d'écoulement ;
- ❖ Maniabilimètre à béton
- ❖ ...

### I.3.3. Classification selon la résistance mécanique

La résistance utilisée pour la classification des bétons durcis est souvent la résistance mécanique à la compression à 28 jours ( $R_{c28j}$ ). Les classes de résistance à la compression des bétons courants de masses volumiques comprises entre  $1800 \text{ kg/m}^3$  et  $2500 \text{ kg/m}^3$ , selon la norme EN 206-1 sont données dans le tableau suivant.

**Tableau I.4. Classes de résistances des bétons**

Classes de résistance	Rc minimale sur cylindre N/mm <sup>2</sup>	Rc minimale sur cube N/mm <sup>2</sup>
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
...	...	...
C100/115	100	115

Les valeurs données dans le tableau (I.4) sont mesurées sur des cylindres de 150 mm de diamètre sur 300 mm de hauteur et des cubes de 150 mm de côtés.

#### I.3.4. Classification selon l'exposition et actions dues à l'environnement

Le béton peut être soumis à plusieurs attaques chimiques liées à l'environnement d'exposition. Ainsi on peut classer les bétons comme suit.

- ❖ Classe X0 : Aucun risque de corrosion ni d'attaques
- ❖ Classe XC : corrosion induite par carbonatation
- ❖ Classe XD : Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine
- ❖ Classe XS : Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer
- ❖ Classe XF : Attaque gel/dégel avec ou sans agent de diverglaçage.
- ❖ Classe XA : Attaque chimique

#### I.4. COMPOSITION DES BETONS

La formulation d'un béton consiste à définir les proportions de ces différents constituants. La formulation des bétons dépend des propriétés de mise en œuvre, mécaniques et de durabilité souhaitée [5, 7, 13]. Toutes les méthodes de formulation suivent les mêmes grandes lignes résumées comme suit :

- ❖ Choix du squelette granulaire (gravillons et sable) et du diamètre maximal des granulats ; le squelette doit être validé par un fuseau granulaire de béton correspondant au type de béton espéré. Un fuseau granulaire est obtenu par rassemblement des courbes granulaires des bétons de qualité, qui ont fait preuves dans des projets antérieurs.
- ❖ Choix de la nature du ciment et du rapport eau / ciment ;

- ❖ Choix de la quantité de ciment et donc du volume des granulats ;
- ❖ Choix des adjuvants ;
- ❖ Recherche par le biais d'essais expérimentaux des dosages en adjuvants.

Quant à la nature des granulats, souvent elle est imposée par les carrières qui fournissent la région où le béton doit être produit.

Il existe plusieurs méthodes de formulation des bétons, méthode de Bolomey, méthode d'Abrams, de Faury, de valette, de Joisel... Dans la partie qui suit, on rappelle les grandes lignes de la méthode de Bolomey et de **Dreux Gorisse**, méthodes les plus utilisées en Algérie.

#### I.4.1. Méthode de Bolomey

La formulation en termes de résistance à la compression, la méthode est basée sur la relation suivante :

$$R_{cb} = R_{cc} \times G \left[ \frac{C}{(E+Air)} - 0,5 \right] \quad \text{[I- 1]}$$

*R<sub>cb</sub>*: résistance à la compression du béton, *R<sub>cc</sub>*: résistance caractéristique à la compression du ciment, C : quantité ciment ; E : quantité d'eau efficace ( $\leq 200$  litres) ; Air : volume d'air (en litre) ; G : coefficient de qualité des granulaire.

La formulation du squelette granulaire du béton, ciment compris, est recherchée de façon à ce qu'elle soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique obtenue par la formule suivante:

$$P = A + (100 - A)\sqrt{d/D}$$

A : varie de 8 à 16, il est d'autant plus élevé que le dosage en ciment est plus fort ; P : est le pourcentage de grains passant au tamis de diamètre d ; D : est le diamètre du plus gros grain.

Cette méthode aboutit théoriquement, plus au moins, à une granularité continue [14].

#### I.4.2. Méthode de Dreux Gorisse

Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations déjà validées sur chantier et ayant donné satisfaction. Elle est très simple d'utilisation, elle ne demande que la connaissance des courbes granulométriques des granulats [14]. Les étapes de la méthode sont récapitulées dans les paragraphes suivants.

Expérimentalement on commence par l'évaluation du rapport C/E en fonction de la résistance moyenne désirée,

$$f_{cb} = K_G \times F_{cim} \left( \frac{C}{E} - 0,5 \right) \quad [\text{I- 2}]$$

La relation est nommée formule de Bolomey, où :  $f_{cb}$ : résistance moyenne en compression **visée** (à 28 jours) en MPa ;  $F_{cim}$ : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa ;  $C$  : dosage en ciment (kg/m<sup>3</sup>) ;  $E$  : dosage en eau (kg/m<sup>3</sup>) ;  $K_G$  : coefficient granulaire.

❖ **La résistance visée  $f_{cb}$** : elle représente une majoration de 15 % de la résistance désirée.

Ainsi 
$$f_{cb} = f_{c28} + 15\% \times f_{c28}$$

Avec  $f_{c28}$  est la résistance à la compression du béton désiré à 28 jours d'âge.

Ainsi si l'on souhaite formuler un béton de classe de résistance C25, on vise alors une résistance

$$f_{cb} = 1,15f_{c28} = 1,15 \times 25 = 28,75 \text{MPa}$$

Le coefficient  $K_G$  traduit la qualité des granulats (forme, texture, minéralogie, diamètre maximal, dureté,...). La valeur de  $K_G$  doit être mentionnée sur la fiche technique des granulats à l'achat. Le tableau suivant donne quelques valeurs de  $K_G$  en fonction de leurs diamètres et de leurs qualités.

**Tableau I.5. Coefficients d'appréciation de la qualité  $K_G$  des granulats.**

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D ≤ 12.5 (granulats fins)	20 ≤ D ≤ 31.5 (granulats moyens)	D ≤ 50 (gros granulats)
<b>Excellente</b>	0.55	0.60	0.65
<b>Bonne</b>	0.45	0.50	0.55
<b>Passable</b>	0.35	0.40	0.45

**$F_{cim}$  classe vraie du ciment** : la classe vraie du ciment est en fonction de la classe du ciment, la valeur est indiquée sur la fiche technique du produit à l'achat.

#### **I.4.2.1. Calcul du dosage en ciment**

Le dosage définitif en ciment ( $C$ ) dépend du rapport  $C/E$ , mais aussi de la quantité d'eau, soit donc de la consistance (affaissement) du béton visée.

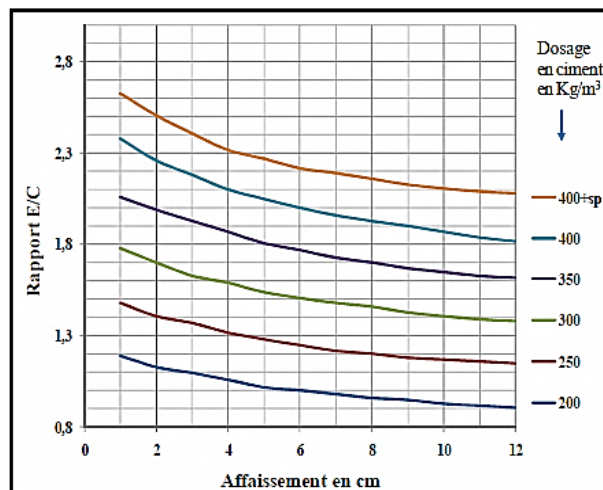


Figure I.10. Dosage en ciment en fonction de rapport E/C et de l'affaissement au cône d'Abrams [5]

Cet Abaque permet d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport E/C et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône d'Abrams).

#### I.4.2.2. Calcul du dosage en eau

Une fois le dosage en eau fixé, on déduit alors le dosage approximatif en eau totale à prévoir (provisoirement) et qu'il conviendra bien entendu d'ajuster ultérieurement par quelques essais de laboratoire en fonction du diamètre maximale des granulats mais aussi de l'état d'humidité des granulats...

#### I.4.2.3. Calcul du dosage en granulats

Le choix du sable à utiliser est d'une grande importance. Par cette méthode, il est conseillé d'utiliser des sables roulés car ils conduisent aux meilleurs résultats du point de vue maniabilité.

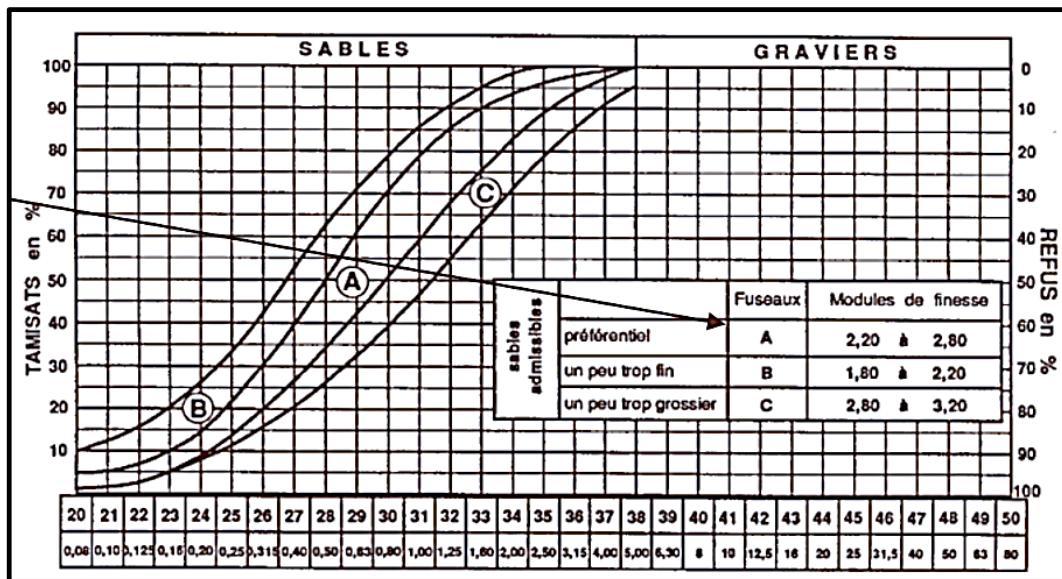


Figure 1.11. Fuseaux préférentiels pour la granularité des sables pour béton selon la méthode de Dreux Gorisse [5].

- ❖ Le fuseau A correspond au sable préférentiel, MF de 2,20 à 2,80.
- ❖ Le fuseau B correspond au sable trop fin, MF de 1,80 à 2,20 (induit à l'augmentation du dosage en eau).
- ❖ Le fuseau C correspond au sable trop grossier, MF de 2,80 à 3,20.

Il est à noter : qu'un sable grossier (fuseau C) risque d'entraîner une moins bonne maniabilité et une possible ségrégation et qu'un sable fin (fuseau B) nécessite une grande quantité d'eau pour humidifier le sable donc améliorer la maniabilité ce qui peut pénaliser la résistance mécanique du béton. Il est toujours possible de modifier le module de finesse d'un sable par l'adjonction d'un deuxième sable de module de finesse différent.

### Tracé de la courbe granulaire de référence

La composition granulométrique optimale est représenté par une ligne brisée OAB voir figure suivante:

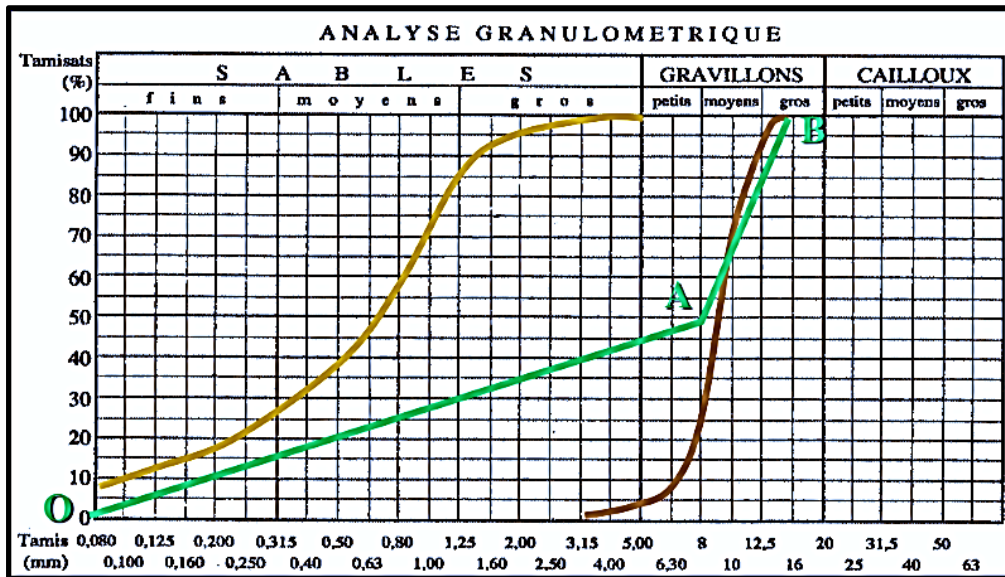


Figure I.12. Courbe du mélange optimum selon la méthode de Dreux Gorisse [5]

Le point (B) (à l'ordonnée 100%) est confondu avec le point d'ordonnée 100% de la courbe granulométrique du plus gros granulat. Le point de brisure (A) a les coordonnées ainsi définies : En abscisse :

- ❖ Si  $D \leq 20$  mm, l'abscisse est  $D/2$
- ❖ Si  $D \geq 20$  mm, l'abscisse est située au milieu du segment délimité par  $D$  et par le tamis de 5mm.

$D$  : dimension des plus gros grains du squelette granulaire retenu par la méthode de Dreux-Gorisse, est telle que le refus sur le tamis correspondant soit le plus proche possible de 8%.

En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K$$

$K$  : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité de serrage à la mise en place (vibration); de la forme des granulats et du module de finesse MF du sable.

Dans le cas d'une vibration normale du béton et des dosages habituellement utilisés en ciment.

$$K = 6 MF - 15 \text{ Si le sable est roulé}$$

$$K = 6 MF - 13 \text{ Si le sable est concassé.}$$

Une fois la courbe granulaire de référence est définie, reste à définir les proportions du gravier et du sable qui vont permettre d'approcher au plus près cette courbe.

### *Compacité du béton et dosage des granulats*

Pour le calcul du dosage en granulats nous avons besoin d'une appréciation de la compacité du béton. La compacité du béton étant le rapport à 1 m<sup>3</sup> du volume absolu des matières solides (ciment + granulats) réellement obtenues dans 1 m<sup>3</sup> de béton frais mis en œuvre après vibration.

La compacité du béton dépend principalement de trois paramètres qui sont :

- ❖ Consistance désirée pour le béton ;
- ❖ De l'intensité de la vibration ;
- ❖ Du diamètre maximal des granulats.

## **I.5. PROPRIETES ESSENTIELLES DES BETONS**

Les propriétés du béton changent en fonction de la composition du béton de la nature de ces différents composants, notamment de la quantité et la nature du ciment et de la quantité d'eau.

Les propriétés mécaniques d'un béton évoluent avec son âge, notamment au jeune âge. Ainsi au gâchage le béton frais est maniable, il présente des propriétés de résistances nulles. A partir du début de la prise du ciment, le béton commence à acquérir de la résistance en fonction de la nature du ciment et des conditions climatiques (temps chaud, temps froid). Ainsi à 7 jours le béton atteint près de 50 % de sa résistance finale. A 28 jours, le béton atteint près de 85 % de sa résistance finale. A partir de 28 jours l'évolution de la résistance du béton continue d'évoluer lentement et d'une façon asymptotique.

En fonction des conditions d'exposition, le béton est exposé à des attaques chimiques de différentes natures (humidité, sels marins, sulfures, eaux d'égout, CO<sub>2</sub>, gel dégel...), le béton va se dégrader soit par carbonatation, soit par lessivage, soit par oxydation.

Par ailleurs, un béton sollicité en traction ou en cisaillement va développer de la fissuration juste après la sollicitation. Un béton sollicité en compression restera intact (pas de fissure liée à la compression).

### **I.5.1. Propriétés de résistance des bétons**

- ❖ **Résistance à la compression** : le béton présente une excellente résistance à la compression ; résistance souvent prise égale à la résistance caractéristique du béton mesurée à 28 jours. Cette résistance peut prendre des valeurs entre (20 MPa) pour les bétons ordinaires jusqu'à 120 MPa pour les bétons spéciaux.
- ❖ **Résistance à la traction et au cisaillement** : le béton présente une faible résistance au cisaillement et en traction. Sa résistance à la traction est de l'ordre du 10<sup>ème</sup> de sa résistance à la compression. Ainsi le béton sollicité en traction ou en cisaillement se fissure dès la sollicitation et tombe en ruine. Pour y remédier à cette faiblesse les bétons sont donc armé d'Acier d'où l'appellation **Béton Armé**.

- ❖ **Résistance aux chocs** : on entend par chocs les sollicitations soudaines (de courte durée) et d'une forte intensité comme le séisme, les explosions, les accidents de véhicules contre les ouvrages...

Dans ces cas le béton se comporte comme un matériau fragile, il se brise juste après la sollicitation, il n'est pas ductile. Un matériau ductile se déforme largement avant de rompre.

Pour compenser les insuffisances du béton, notamment en terme de résistance à la traction, au cisaillement, aux chocs ; mais aussi aux effets des attaques chimiques qui provoquent de la fissuration dans le béton, on introduit alors dans le béton soit des armatures ou bien des fibres, d'où le béton armé et le béton fibré.

### **I.5.2. Le béton armé**

Le béton armé est utilisé dans tous les éléments d'ouvrages (poteaux, poutres, dalles, fondations, voiles...) soumis à des sollicitations importantes. Dans ce cas, les bétons sont dosés à près de 350 à 450 kg de ciment par m<sup>3</sup>. Les armatures sont souvent en Acier, elles sont introduites pour compenser les défauts du béton en résistance à la traction, au cisaillement et aux chocs. Ces bétons présentent, dans le cas courant, des masses volumiques de l'ordre de 2500 kg/ m<sup>3</sup>.

Toutefois, la masse volumique de ces bétons peut être adaptée en fonction des objectifs : bétons légers et bétons lourds.

Il existe trois sortes de béton armé :

**Bétons ordinaires (BO)** : les bétons ordinaires sont caractérisés par une résistance à la compression de l'ordre de 20 à 45 MPa. Ces bétons sont utilisés pour la réalisation des ouvrages à usage d'habitations, commerces, scolaires, administratifs, culturels...

**Bétons à hautes performances (BHP)** : Ils sont caractérisés par une résistance à la compression de l'ordre de 45 à 80 MPa.

**Bétons à ultra hautes performances (BUHP)** : Ils sont caractérisés par une résistance à la compression de l'ordre de 80 à 120 MPa.

Le BHP et le BUHP se caractérisent souvent par des propriétés de durabilité excellentes, soit donc une faible porosité. Ils sont obtenus par l'introduction d'un pourcentage en fumée de silice ou de cendres volantes dans la composition du béton, mais aussi de forts réducteurs d'eau pour pouvoir formuler des bétons compacts à faible rapport E/C.

Ces bétons sont utilisés pour la réalisation des ouvrages d'une grande importance où la durée de vie longue est un critère essentiel à obtenir, exemple: Ponts, tunnels, centrales nucléaires, barrages d'eau, certains murs de soutènement...

### I.5.3. Les bétons de fibres

Ce sont les bétons armés (BO, BHP, BUHP) auxquels on va associer des fibres. Les fibres ont des longueurs qui varient entre quelques millimètres à quelques centimètres, elles sont très fines au plus 1 à 2 mm de diamètre. Elles peuvent être de plusieurs natures : aciers, verre, végétales, synthétiques... Dans le béton les fibres sont réparties d'une manière homogène dans son volume, sans orientation privilégiée. Les fibres sont introduites pour limiter la fissuration du béton au jeune âge et à long terme. Ils vont également réduire le caractère fragile des bétons en lui procurant une meilleure résistance aux chocs notamment pour les surfaces extérieures et les surface de dallage.

### I.6. DURABILITE DES BETONS

La durabilité est un objectif de qualité, elle consiste à maintenir les propriétés des bétons sur des durées de temps assez longues.

La mauvaise durabilité de matériaux cimentaires se manifeste par une dégradation résultant d'une action simultanée des phénomènes internes au matériau (réaction physico-chimique) et des facteurs externes (conditions d'exposition). Ces phénomènes peuvent être subdivisés en plusieurs catégories [1, 15, 16,17] :

- ❖ Les effets physiques, actions de la température, cycle de gel dégel, incendie.
- ❖ Actions mécaniques dues aux sollicitations dynamiques, à l'abrasion et à la fatigue.
- ❖ Les effets chimiques qui sont très nombreux, les environnements agressifs peuvent être liquide (eau de mer, pluies), solides (sols gypseux), gazeux (gaz carbonique)
- ❖ Effets biologiques dus principalement à la présence de bactéries (conduites d'égouts).

Il est à noter que la structure interne du ciment est un milieu très alcalin possédant un pH voisin de 13. Par conséquent, tous les environnements lui sont agressifs. Sa structure poreuse le rend plus vulnérable devant la présence de liquide et de gaz qui le traverse.

En effet, La durabilité du béton s'explique en grande partie, par la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans les réseaux poreux des bétons. Un béton est d'autant plus durable qu'il résiste à la pénétration des agents agressifs. Cette qualité peut être caractérisée au moyen de deux grandeurs physiques : la perméabilité et la diffusivité. La première est relative au déplacement d'un fluide sous l'effet d'une pression motrice, elle dépend de la taille des espaces poreux dans lesquels s'écoule le fluide ainsi que leur interconnexion. La seconde est relative au déplacement d'une espèce chimique à l'échelle moléculaire sous l'effet d'un gradient de concentration.

Les modes de dégradation peuvent être résumés comme suit :

- ❖ La lixiviation ou l'hydrolyse (dissolution) des hydrates
- ❖ Les échanges ioniques entre les hydrates et le milieu agressif
- ❖ Formation de produits expansifs

La cinétique de dégradation est contrôlée par la porosité et la connectivité des pores dans le matériau. Un béton est d'autant plus durable que sa porosité est réduite et donc la pénétration des agents agressifs est limitée.

## I.7. CONTROLE DE LA QUALITE DES BETONS

La formulation des bétons devient de plus en plus compliquée pour deux raisons principales qui sont :

- ❖ Les exigences sur les propriétés de béton souhaitées (ouvrabilité, résistance, ductilité, durabilité, rapidité de maturité, pompabilité...);
- ❖ Par le nombre de produit à introduire dans les bétons et leur variété dans le marché, notamment les adjuvants. En effet, les bétons traditionnels étaient composés de quatre matériaux à savoir : les granulats (gravillons et sable), le ciment et l'eau. Ces dernières années, les bétons sont composés systématiquement de ces quatre produits de base, mais aussi : d'adjuvants, d'additions minérales pour améliorer les performances mécaniques et de durabilité ; parfois de pigments pour la coloration ; fibres pour améliorer le comportement en traction et en ductilité des bétons, etc.
- ❖

Contrôle de la qualité au laboratoire : la composition d'un béton est dans un premier temps calculé par un professionnel des bétons en se servant de l'expérience déjà acquis, la composition doit être validée au laboratoire par des essais de convenance. Ces essais vont permettre de vérifier si les critères souhaités (dictés dans le cahier des charges) sont conformes aux propriétés du béton finalement formulé. Souvent des réajustements sont nécessaires pour satisfaire tous ces critères et validée la composition définitivement.

Dans le cahier des charges souvent sont dictés la classe de consistance du béton éventuellement sont mode de mise en place (pompable ou pas), durée et intensité de sa vibration ; sa classe de résistance à 28 jours où à des âges avancés au besoin, sa cinétique de murissement sous des conditions de référence en humidité (souvent voisine de 80 HR) et à la température de 20°C. Parfois, des consignes sur l'ordre d'introduction des composants des bétons et la durée de malaxage sont donnés. Et aussi, les traitements possibles au jeune âge du béton pour éviter la fissuration précoce.

Contrôle de la qualité Sur chantier : à la confection du béton sur chantier, des échantillons sont extrait de chaque gâchée lors du coulage des éléments de la structure. Deux critère sont

systématiquement contrôler : la consistance (plasticité) en effectuant l'essai au cône d'Abrams sur place au chantier ; parallèlement des moules d'éprouvettes sont remplis pour le contrôle de la résistance à 28 jours par un laboratoire de contrôle des bétons.

Au besoin, lorsqu'on souhaite de réaliser un décoffrage précoce il est alors demandé des essais d'écrasement d'éprouvettes de béton à l'âge prévu pour le décoffrage, cela néanmoins pour garantir l'auto-portance du béton à l'âge du décoffrage, notamment pour le cas des dalles pleines.

**En cas de défauts :** dans les cas où des défauts de réalisation apparaissent lors du décoffrage, notamment en présence de ségrégations profondes des bétons (présence de nids de cailloux) des essais supplémentaires seront alors nécessaires. Ces essais sont réalisés sur place, par extraction de carottes de béton (échantillons de petites tailles) dans les éléments atteints. Dans ce cas on peut également tester les bétons par des essais non destructifs comme le scléromètre ou l'appareil de propagation d'ondes ultrasoniques (ultrasons).

#### **Contrôle de la qualité du béton dans le vieux bâti :**

Ces dernières années, plusieurs constructions présentes des pathologies (défauts liés à la dégradation du béton) qui remettent en cause la capacité portante de ces structures, et mettent en danger la sécurité des usagers.

La dégradation des propriétés physiques et chimiques des bétons sont d'origines nombreuses et différentes (retrait excessif, gel-dégel, corrosion des armatures, carbonatation des bétons, réaction alcali-granulats, etc...). Ces dégradations font que la construction est vieillie à des âges très précoces par rapport à ce qui est souhaité. Ainsi, pour prolonger la durée de vie de cet ouvrage (le garder en service) par réhabilitation ou par confortement, il est demandé de faire une auscultation pour connaître l'état de vieillissement du béton et calculé ces propriétés résiduelles. Dans tous les cas, avant toute intervention, même de démolition, notamment lorsqu'il s'agit d'un ouvrage d'Art ou d'un ouvrage important qui rentre dans le patrimoine d'un pays, on demande toujours de faire des essais de contrôle de qualité de ces bétons.

L'auscultation de ces bétons se fait alors en utilisant, en fonction de l'état de dégradation des bétons, des essais in-situ par carottage ou par des essais non destructifs.

***Les méthodes d'essais par carottage*** présentent un intérêt majeur pour déterminer les caractéristiques mécaniques du béton, car ces essais sont menés sur un béton de l'élément de la structure. Par contre il est localisé sur un endroit précis, ne représente pas le béton en tout point de la structure. Pour y remédier plusieurs carottes sont alors extraites à des endroits différents pour avoir une idée sur l'ensemble du béton de la structure. Cette méthode présente l'inconvénient de créer des défauts (trous)

dans la structure ce qui donc porte atteinte à l'intégrité de la structure malgré que ces trous sont dans un deuxième temps remplis de mortiers pour les fermer.

*Les méthodes d'essais non destructives* permettent de déterminer les propriétés physique et mécanique d'un élément sans le détruire. L'application des méthodes non destructives se fait à l'aide des appareils comme l'ultrason et le scléromètre.

Ces méthodes sont utilisées dans le but de connaître la dégradation en profondeur ; et comme ces méthodes sont non destructives on peut alors faire l'essai autant de fois que l'on souhaite et en tout point de la structure sans porter atteinte à l'intégrité de la structure. Ces méthodes permettent entre autres de définir les profondeurs des ségrégation des bétons, détection des fissures et de leurs profondeur, détecter et caractériser les défauts liés à la dégradation des bétons et à son endommagement...

## CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### Partie 2 : Généralités sur la Rhéologie du béton

#### I.8. INTRODUCTION

La rhéologie est une branche de la physique qui s'occupe de mesurer, de modéliser, de prévoir l'écoulement des différents fluides. Le but principal de la rhéologie est d'étudier la réponse qu'a chaque fluide à s'opposer aux sollicitations mécaniques qu'il subit.

L'étude de la rhéologie s'occupe de proposer des modèles mathématiques qui peuvent décrire les différents comportements rhéologiques. La rhéologie permet de comprendre comment le comportement des matériaux change lorsqu'ils sont soumis, par exemple, à une étape de malaxage, quand leur texture évolue au cours du temps, quand ils passent du repos au mouvement et vice-versa. Cette science s'applique à des substances fort différentes : l'eau, les huiles, les yaourts, le sang, les dentifrices, le bitume, le béton... Avec l'avènement des bétons autoplaçants, elle a connu un intérêt grandissant dans le domaine des matériaux de construction.

Le comportement à l'état fluide du béton est décisif pour son utilisation optimale. Souvent, dans les métiers du béton, on utilise le terme rhéologie au sens du "maintien de l'ouvrabilité", C'est-à-dire la variation dans le temps d'une des caractéristiques d'écoulement du béton, à savoir : son étalement. Mais d'autres mesures peuvent également être utilisées vitesse d'écoulement dans le V-Funnel (entonnoir pour béton).

#### I.9. Comment évalue-t-on la rhéologie ?

Les propriétés d'écoulement recherchée dans un béton réfléchissent directement le processus de sa production : énergie de son malaxage, sa mise en place (avec ou sans vibration) sa pompabilité (son flux dans des tuyaux), les forces qu'il exerce sur les parois des coffrages, et ainsi de suite. Il est facile d'anticiper l'impact de ces aspects dans les conditions de production et mise en œuvre du béton. Pour évaluer de façon empirique ces aspects, des essais technologiques ont été introduits dans la caractérisation des bétons : **le cône d'Abrams, la table à secousse, le maniabilimètre, le V-funnel, la L-box, l'essai au tamis...**Tous visent à simuler un aspect des conditions de mise en œuvre du béton ou, de manière plus générale, de son écoulement.



Cône d'Abrams



J ring Test



L-box



V-Funnel

**Figure I.13. Essais de caractérisation des bétons [18]**

Ces essais sont très simples, utiles, légers et irremplaçables dans la pratique quotidienne. Néanmoins, ils donnent des résultats (temps, longueurs, ratios) qui ne correspondent pas directement à des grandeurs physiques intrinsèques à un béton donné et qui, souvent, dépendent de plusieurs d'entre elles. C'est justement l'accès aux propriétés physiques intrinsèques des bétons qui permet de caractériser de façon univoque et indépendante leurs comportements à l'écoulement. Pour ce faire, on se sert de rhéomètres. Ce sont des appareils qui imposent au fluide à étudier un écoulement contrôlé et en mesurent simultanément la réponse. Ceci permet d'obtenir un rhéogramme, soit la "**signature rhéologique** «spécifique à chaque matériau. Cette information nous informe en détail et, de façon absolue, sur le comportement rhéologique de chaque béton.

Les courbes obtenues permettent de comparer des bétons différents et d'évaluer comment les grandeurs rhéologiques caractéristiques d'un béton sont affectées, par exemple, par le G/S, par le type d'adjuvant, par le dosage en filler.

En somme, la caractérisation rhéologique permet de donner une interprétation quantitative des caractéristiques à l'état frais des bétons, en précisant de façon objective et absolue des aspects essentiels, mais souvent repérés de façon vague et subjective (béton "collant", "rêche», sportif' ...)

### I.9.1. La mesure rhéologique et les rhéomètres

Pour caractériser le comportement à l'écoulement d'un béton, on se sert de rhéomètres. Ces appareils peuvent fonctionner sur des principes différents. Les plus communs visent à induire un écoulement à symétrie cylindrique au béton, confiné dans une cuve, comme le montre la figure I.14.a, par

l'imposition d'une vitesse de rotation sur un mobile. Ils mesurent en retour la résistance que le fluide oppose à ce mouvement.

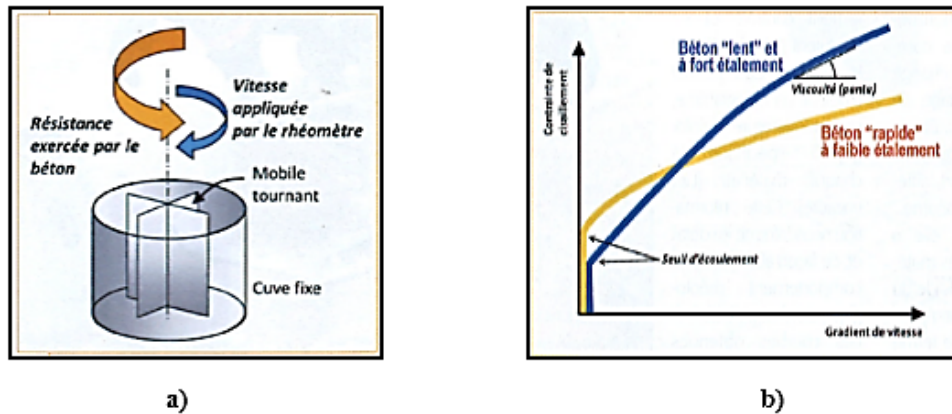


Figure I.14. La mesure rhéologique et les rhéomètres : a) Principe de fonctionnement d'un rhéomètre, b) Exemples de rhéogrammes [18]

Par le biais de considérations physiques et mathématiques, il est possible de remonter à des grandeurs qui ne dépendront pas de la taille de la cuve, ni du type de mobile, mais seulement du fluide lui-même. Ce sont là les grandeurs rhéologiques absolues (en l'espèce, le gradient de vitesse et la contrainte de cisaillement).

Il est ainsi possible d'établir des courbes que relient ces deux grandeurs pour un béton donné [Voir courbes] et donc de définir son comportement indépendamment des conditions de caractérisation et de mise en œuvre.

Après la modélisation des courbes deux paramètres sont déduits du tracé des courbes : le seuil d'écoulement (la contrainte minimale à exercer pour mettre en mouvement le béton) et la viscosité (pente de la courbe contrainte de cisaillement versus le gradient de vitesse).

### I.10. Les éléments qui influencent la rhéologie des bétons

Les éléments qui conditionnent l'écoulement d'un béton peuvent être de natures très différentes :

- **Le temps** : depuis sa confection jusqu'à la prise, le béton ne cesse d'évoluer, tout en restant un fluide, en général, son seuil d'écoulement augmente.
- **La température** : les températures les plus élevées augmentent la mobilité des molécules, et accélère le processus d'hydratation.
- **la composition de la formule béton**. Par exemple, un béton avec un rapport Eau/Ciment plus élevé, toute autre chose étant égale par ailleurs, présente une viscosité et un seuil d'écoulement plus faibles.

- **La nature des constituants** : la nature du ciment (sa finesse), du sable, des additions, la courbe granulométrique globale, le facteur de forme des granulats ont tous des effets différents et décisifs sur le comportement rhéologique du béton (des granulats roulés permettront un écoulement plus aisé du béton que des granulats concassés). De même, la présence limitée d'ultrafines comme la fumée de silice peut favoriser la vitesse d'écoulement.
- **Les adjuvants (fluidifiants)** : plastifiant et superplastifiants, qui baissent le seuil d'écoulement ou aussi la viscosité d'un béton donné (en agissant sur l'état de floculation des particules de ciment). A côté de ceux-ci, les agents viscosants, qui visent à assurer des conditions d'écoulement plus stable, ou encore les agents de stabilité qui, par le biais de différents mécanismes, agissent sur le seuil d'écoulement ou sur sa variation en fonction des conditions de repos/mouvement auxquelles le béton est soumis.

## Partie 3: Généralités sur les mortiers

### I.11-INTRODUCTION

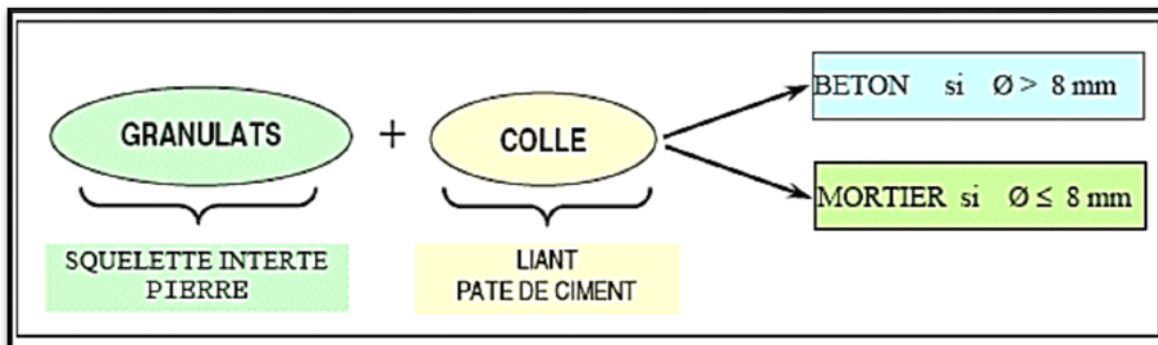
Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau et éventuellement un adjuvant pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

La ressemblance des compositions des mortiers à celles des bétons fait que le mortier s'apparente bien au béton sur tous les aspects, propriétés à l'état frais, propriétés à l'état durci, propriétés de durabilité.... Ainsi, toutes les définitions déjà abordées à la partie une de ce chapitre reste valable sur le mortier.

En comparaison au béton, les mortiers sont utilisés pour assurer une très large gamme de fonctions, cela va de la résistance, à la liaison, à la protection, isolation, esthétique, bouchage...

#### Éléments de ressemblance entre les bétons et mortiers

Les éléments de ressemblance de ces deux matériaux est lié au fait qu'ils soient composés de mêmes produits voir figure suivante :



*Figure I.15. Constituants des mortiers [19]*

Parmi d'autres points de ressemblance on peut citer :

- Mûrissement : le processus d'hydratation, et donc de durcissement du mortier est le même que ce que l'on rencontre dans les bétons.
- Maniabilité et facilité de mise en place, comme pour les bétons on peut trouver plusieurs classes de consistance des mortiers, on peut avoir des mortiers fermes, plastique, ...à autoplaçants.

- Résistances : il existe plusieurs classes de résistances des mortiers, on peut aller des mortiers à maçonner à faible résistance mécaniques, au mortier structuraux comme le Ductal à une résistance mécanique à la compression dépassant les 100 MPa.
- Comportement mécanique (lois de comportement, retrait, fluage, fatigue, fragilité, ...)
- Masses volumique : mortiers lourds à mortiers légers.
- Durabilité : on optimisant la composition des mortiers, on peut très bien développer des mortiers à des durées de vie très intéressantes, notamment pour les ouvrages hydriques.
- Effets des Adjuvants : en effet, les adjuvants interagissent principalement avec les ciments, leurs effets restent donc identiques qu'en les utilisent pour confectionner un béton ou un mortier.
- ...

Ainsi, pour définir les propriétés d'un mortier à l'état frais ou bien durci, on a tendance à utiliser les mêmes essais de laboratoire, quelques exemples sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau I.6. Différents types d'essais pour Béton et Mortier**

Propriété	Béton	Mortier
<b>Affaissement &amp; Etalement</b>	Cône D'Abrams	Cône D'Abrams (échelle 1 /2)
<b>Viscosité</b>	Temps d'écoulement au V-Funnel	Temps d'écoulement au Cône de Marsh
	Maniabilimètre à béton	Maniabilimètre à mortier
<b>Prise et durcissement</b>	Aiguille de Vicat	Aiguille de Vicat
<b>Résistances</b>	Cylindre ou cubes normalisés	Prismes 4 x 4 x 16 cm, des éprouvettes 7 x 7 x 28cm
...	...	...

## I.12-AUTRES PROPRIETES D'UN MORTIER

Le mortier est un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction.

Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et des environnements.

Production : La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier. Les mortiers peuvent être:

- Préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants, adjuvants compris;
- Préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs prédosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire);
- livrés par une centrale: ce sont des mortiers prêts à l'emploi.

L'entreprise qui fabrique sur le chantier son mortier doit choisir correctement le liant en fonction de son type et de sa classe, le ou les sables, la teneur en eau (pour obtenir la plasticité désirée) et les adjuvants adaptés à la destination du mortier. Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires; leur granulométrie doit être de préférence continue. Ils doivent être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux).

Dosage : Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume du sable humide phénomène bien connu du "foisonnement du sable". En effet, le plus souvent, sur le chantier, le sable renferme un certain pourcentage d'eau (pouvant varier de 0 % à 20 %) et il suffit de très peu d'eau pour que le poids du m<sup>3</sup> de sable soit modifié.

Diamètre Maximal du sable : Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:

- extra-fins: jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- fins: jusqu'à 1,6 mm;
- moyens: jusqu'à 3,15 mm;
- gros: jusqu'à 5 mm.

Colorants : On peut donner la couleur au mortier par des granulats ou des pigments minéraux. Ces derniers devraient avoir la composition d'oxydes minéraux et ne pas représenter plus de 6% du poids du ciment portland. On doit soigneusement choisir les pigments et ne pas en employer plus qu'il n'en faut pour obtenir la couleur désirée. L'ajout d'une trop grande quantité de pigment diminuera la résistance et la durabilité. Le poids maximal de pigment ne devra pas dépasser, en poids, 1% du ciment, sauf dans le cas de noir de carbone qui ne devrait pas représenter plus de 2%.

Les mortiers et leurs utilisations : Les fabricants de mortiers proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:

- mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
- mortiers d'imperméabilisation,
- mortier d'isolation thermique,
- mortier de jointoiement,
- mortier de ragréage,
- mortier de scellement, mortier pour chapes,
- mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
- mortier de réparation.

Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

### **I.13-LE MORTIER COMME OUTIL D'AIDE A LA FORMULATION DES BETONS**

Avec tous les nouveaux produits qui se développent continuellement, il est devenu très difficile de choisir les produits les plus adaptés aux exigences des cahiers des charges pour la formulation des

bétons. Pour faciliter l'étape de formulation et de tri des produits, plusieurs essais sur pâte de ciment, sur coulis ou sur mortier sont alors développés.

L'étalement au mini cône d'une pâte de ciment est utilisé pour étudier l'influence des superplastifiants réducteurs d'eau sur l'ouvrabilité de la pâte de ciment. En 1989, le LCPC, a développé la méthode des coulis comme outil d'aide à la formulation des bétons à hautes performances [8]. La méthode des coulis utilise les fines de béton à diamètres inférieurs à 80  $\mu\text{m}$ . Les techniques de mesure sont diverses ; mesures de l'étalement du coulis en utilisant un mini cône; mesure du temps d'écoulement au cône de Marsh pour comparer la fluidité de plusieurs pâte de ciment et ou d'additions [8, 9]. Les résultats obtenus sont utilisés pour sélectionner les constituants de la pâte et étudier leurs interactions, mais ne permettent pas de prédire complètement le comportement du béton.

La méthode du Mortier de Béton Equivalent considère un mortier dont la composition est dérivée de celle du béton et dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celles du béton [9]. La méthode est considérée comme un outil d'aide à la formulation. Elle a pour but de diminuer le nombre de gâchées de béton à réaliser pour l'optimisation de la composition d'une formule de béton.

Actuellement, la méthode MBE est utilisée au laboratoire pour faciliter la sélection des adjuvants lors de la formulation des bétons, en utilisant des tests sur mortier en complément voire en remplacement de tests sur béton.

Les coulis et les mortiers sont donc utilisés pour appréhender le comportement à l'état frais du béton, son murissement et ses propriétés à long terme résistance et durabilité.

### **Cas du Mortier normal (EN 196-1)**

Le mortier normal est un mortier qui sert à définir certaines caractéristiques d'un ciment et notamment sa résistance. Ce mortier est réalisé conformément à la norme pour déterminer la consistance de la pâte de ciment. Le sable utilisé est un sable appelé "sable normalisé CECN EN 196-1", lui-même étant défini par rapport à un "sable de référence CEN". Ce sable est commercialisé en sac plastique de  $1350 \pm 5\text{g}$ . Sa courbe granulométrique doit se situer à l'intérieur du fuseau indiqué sur la Figure I.16.

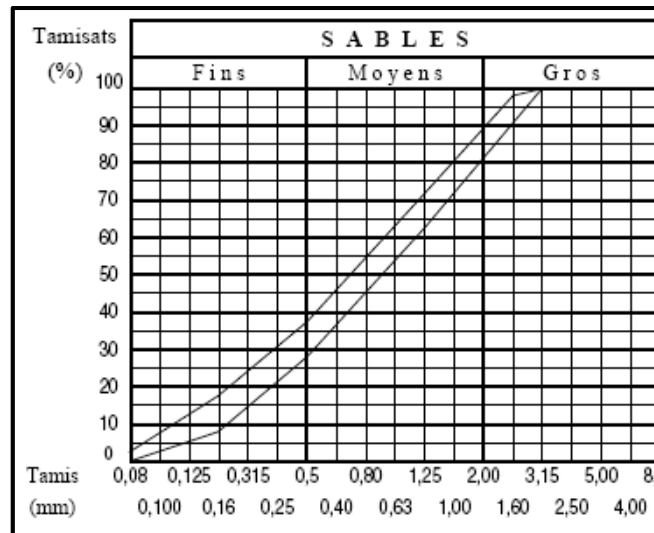


Figure 1.16. Composition granulométrique du sable de référence CEN

La composition du mortier à tester est le suivant :

- sable normalisé = 1350 g  $\pm$  5 g.
- ciment = 450 g  $\pm$  2 g.
- eau de gâchage = 225 g  $\pm$  1 g (le rapport de E/C est donc 0,50).
- 

## I.14-Les mortiers dans le bâtiment

Les mortiers peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.

**Mortier de ciment :** Il est plus résistant que les mortiers de chaux mais il reste imperméable à l'air, par conséquent, il maintient l'humidité dans une maçonnerie traditionnelle de pierres qui doit toujours être aérée. Ce mortier doit être utilisé uniquement pour la maçonnerie des blocs de bétons ou autrement dit de parpaings en ciment. Sa rigidité en fait un matériau qui a tendance à fissurer sous l'action des écarts de température, notamment alternances gel & dégel, tandis que son imperméabilité l'expose aux moisissures. En revanche, il est plus facile, rapide, et tolérant à mettre en œuvre.

**Mortier de chaux grasse :** Il fait prise en contact avec l'air. Il durcit en surface et reste souple à l'intérieur de la maçonnerie. Cette qualité en fait un mortier qui reste élastique et donc qui ne fissure pas. Ce mortier est employé dans la maçonnerie traditionnelle de pierres ou de briques. Mais il ne doit pas être utilisé dans un milieu humide (cave, mur souterrain, etc.). Le mortier de chaux grasse est moins résistant par rapport à un mortier de ciment (gras et onctueux). La durée du durcissement des mortiers de chaux est plus lente que pour les mortiers de ciments.

**Mortier de chaux hydraulique :** Il est fabriqué à partir de calcaires argileux. Il fait sa prise même sans contact avec l'air, sous l'eau par exemple. Ce mortier est employé dans la maçonnerie traditionnelle de pierres ou de briques. Deux avantages sont qu'il reste plus flexible que le mortier de ciment et est perméable à la vapeur d'eau, donc régule l'humidité

ambiante. En revanche, il est plus technique et lent à mettre en œuvre, et demande des conditions de température et hygrométrie plus étroites (néanmoins courantes en zone tempérée).

**Mortier bâtard :** Le mortier bâtard est constitué par un mélange de ciment et de chaux avec du sable, dans des proportions variables. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide.

Généralement, on utilise la chaux et le ciment par parties égales, mais des fois on prend une quantité plus ou moins grande de l'un ou l'autre suivant l'usage et la qualité recherchée.

Le mortier bâtard permet d'avoir un ciment qui respire un peu sans trop absorber l'eau ; il convient bien pour crépir et ne se fissure pas comme un ciment fort. De plus, la chaux augmente le pouvoir collant du mortier, ce qui est appréciable en enduit vertical. La perméabilité d'un mortier bâtard à la vapeur d'eau diminue proportionnellement au pourcentage de ciment qu'il contient. Il est utilisé également pour la fixation d'éléments de maçonnerie demandant une résistance mécanique plus importante (scellements etc).

**Mortier de terre :** Le mortier de terre est un mortier fait avec de l'argile ou de la terre crue. De par la disponibilité de la matière première, ce type de mortier est ou a été probablement employé partout dans le monde depuis des temps immémoriaux éventuellement en remplacement de la chaux.

**Les mortiers de fibres :** L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables. Ce sont soit des mortiers prémélangés, livrés en sac, soit des mortiers prêts à l'emploi, livrés par certaines centrales.

**Mortiers industriels secs prémélangés :** Comme la plupart des produits industriels, ces mortiers font l'objet de contrôles à tous les stades de leur élaboration par le fabricant, ce qui constitue pour l'utilisateur une sécurité.

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre.

Les autres avantages présentés par ces produits sont les suivants:

- Prédosage de composition constante, garant de régularité et de qualité;
- pas d'approvisionnement et de stockage sur place des constituants (sables, liants, adjuvants);
- perte de temps limitée (appréciable dans le cas de travaux à effectuer rapidement et lorsque la place fait défaut);
- Chantiers plus propres.

Les producteurs proposent de nombreuses formules standard répondant à la plupart des besoins. Ils peuvent également étudier des compositions de mortier adaptées, donnant les performances optimales requises pour chaque usage. Ces mortiers reçoivent le plus souvent un ou plusieurs adjuvants en poudre, afin de modifier les propriétés rhéologiques, les temps de prise, la durabilité, l'aspect (mortiers colorés) ou leur adhérence grâce à l'ajout de résines vinyliques ou acryliques. Ils sont conditionnés en sacs.

## CHAPITRE I: ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

### Partie 4 : Le béton un matériau recyclable et recyclé

#### I.15. INTRODUCTION

Le recyclage complet du béton représente un bond en avant pour l'avenir de l'environnement. Au jour d'aujourd'hui, on assiste à une accélération de la déconstruction d'ouvrages anciens en béton et ainsi à une accumulation importante de gravats stockés. Les professionnels de la construction, de plus en plus sensibles aux questions liées à la préservation de l'environnement, s'interrogent sur le devenir du béton lors de la fin de vie des constructions. Le recyclage de bétons permet en outre d'éviter leurs accumulations dans des centres d'enfouissement où la mise en décharge s'avère coûteuse (en transport et en travaux de terrassement) et où le stockage est gros consommateur d'espace. Jusqu'à présent, seule une petite fraction de ces déchets est réutilisée comme granulats recyclés pour la fabrication du béton plus particulièrement dans les travaux publics.



Dans ce chapitre, nous présentons les différents types de déchets et les principales techniques de traitements ou d'éliminations à travers le monde, ainsi le recyclage et réutilisation des déchets dans le domaine de génie civil, mais aussi l'impact des granulats recyclés sur les propriétés des bétons.

#### I.16. LES DECHETS DE LA CONSTRUCTION ET L'ENVIRONNEMENT

Contre tous les avantages que procure le béton à l'humanité, la production du béton a des inconvénients sur l'environnement. Dans le processus de fabrication du béton, on porte atteinte à l'environnement soit à la phase de production de ses constituants (granulats, ciment, adjuvants...), soit à la phase de sa production lui-même, et éventuellement par l'aspect visuel du béton dans l'environnement.

La production du béton se fait essentiellement avec des granulats d'origines naturelles. Ainsi, le recours à de nouvelles carrières est parfois difficile à réaliser en raison : d'une réglementation

rigoureuse (préservation des paysages, interdiction d'extraction de granulats alluvionnaires...), mais aussi l'épuisement ou éloignement des gisements naturels des centrales de production des bétons.

En effet, l'implantation d'une carrière entraîne une modification du paysage (contrastes de forme, de couleurs...) avec des incidences très variables selon les types d'exploitations (apparition d'un plan d'eau, d'un front de taille minéral, déboisement, etc.).

Sur une autre échelle l'extraction de granulats dans les rivières provoque l'incision verticale du lit de la rivière par érosion en amont et en aval des exploitations. Ceci se traduit par un abaissement du fond de la rivière qui a plusieurs conséquences :

- L'appauvrissement écologique au niveau du lit mineur car le substratum alluvial est une zone d'habitat pour les poissons, les invertébrés, les végétaux aquatiques alors que le substratum rocheux mis à nu est beaucoup moins favorable pour la faune et la flore ;

- L'abaissement de la nappe alluviale, notamment en période d'étiage, provoque l'assèchement des zones humides et la modification des peuplements végétaux. Il s'ensuit une disparition de la diversité de milieux d'intérêt écologique au niveau du lit majeur. La ressource en eau se trouve diminuée, en quantité et en qualité.

- la déstabilisation des ouvrages d'art (ponts...) qu'il est alors nécessaire de conforter par des seuils. La production du ciment conduit au dégagement de poussières et de gaz qui polluent l'atmosphère et mettent en danger la vie humaine et l'agriculture avoisinantes.

Les principaux polluants rencontrés dans l'industrie du ciment sont :

- Le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) émis à la combustion au niveau du four se transforme en  $\text{SO}_3$  dans l'atmosphère. En présence d'humidité il provoque des pluies acides.

- L'oxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) produit pendant la combustion, continue à s'oxyder dans l'atmosphère pour former des pluies acides.

- Le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ ) produit au niveau du four à la combustion ou lorsque le four est mal réglé, ce gaz est considéré toxique. Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) produit quand la combustion est complète. Le  $\text{CO}_2$  n'est pas officiellement un polluant mais son augmentation dans l'atmosphère pose le problème actuel de l'effet de serre.

- Les poussières représentent la forme de pollution la plus importante au niveau des cimenteries. Elles sont plus ressenties par la population pour des raisons physiologiques et psychologiques.

Par la production du béton, le premier impact des déchets des centrales de fabrication du béton prêt à l'emploi « BPE » est visuel : rejet de laitance de béton qui s'accumule et prend en masse, conduisant à un colmatage des réseaux et un dépôt dans le milieu naturel. Bruits sonores aux alentours des chantiers.

Deux besoins se ressentent actuellement :

- Trouver des ressources alternatives aux granulats naturels et limiter donc l'impact de leur extraction sur l'environnement ;
- Traiter les déchets des constructions en ruine.

## I.17. LES DECHETS ET LE RECYCLAGE

Une définition du déchet se trouve dans la loi du 15 juillet 1975 : " On considère que l'on est en présence d'un déchet s'il s'agit d'un résidu d'un processus de fabrication, de production, de transformation ou d'utilisation, ou s'il s'agit d'une substance, d'un matériau, d'un produit ou d'un quelconque bien meuble abandonné ou destiné à l'être. La loi précise aussi que les déchets sont susceptibles de présenter des effets nocifs sur les sols, la faune et la flore, des dégradations aux paysages, des risques d'odeurs, des sources de bruit ou bien encore de porter atteinte à la santé de l'homme ou à l'environnement.

### *I.17.2. Classifications des déchets*

Aujourd'hui, les filières de recyclage sont organisées différemment en fonction des déchets traités. Chaque matériau est donc acheminé dans les centres de traitement appropriés en fonction de sa capacité à être valorisé.

**1.17.2.1. Les déchets inertes DI :** Les déchets inertes sont des déchets minéraux non pollués. Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique. Ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas au contact d'autres matières d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine.

Ces déchets proviennent des activités de construction, de réhabilitation (rénovation) et de démolition liées au secteur du bâtiment, ainsi que des activités liées à la réalisation et à l'entretien d'ouvrages publics (routes, ponts, réseaux...).

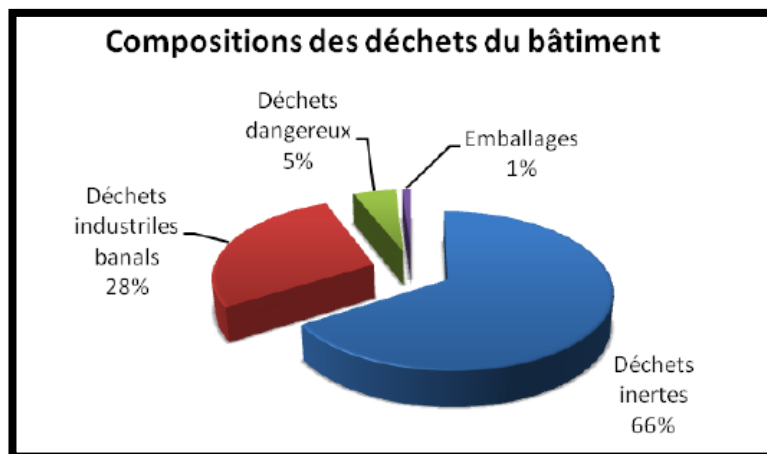
Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve : le béton, les briques, les tuiles, les céramiques, les carrelages, les matériaux à base de gypse.

**1.17.2.2. Les déchets industriels banals (DIB) :** Ensemble des déchets non inertes et non dangereux générés par les entreprises, industriels, commerçants, artisans et prestataires de services ; ferrailles, métaux non ferreux, papiers-cartons, verre, textiles, bois, plastiques, etc.

**1.17.2.3. Les déchets ménagers et assimilés :** Les déchets ménagers et assimilés sont les déchets solides produits par les ménages sur leur lieu d'habitation. Ils regroupent : les ordures ménagères, les déchets d'emballage recyclables en verre, les déchets encombrants issus des ménages et les déchets végétaux.

**1.17.2.4. Les déchets dangereux (spéciaux) :** Les déchets spéciaux sont des déchets qui, en raison de leur composition ou de leurs propriétés, présentent un danger pour la santé humaine ou pour l'environnement. Ce type de déchet doit donc subir un ensemble de traitements appropriés pour en réduire la toxicité et le risque de contamination.

Les déchets de démolition de bâtiments ou de routes peuvent donc être constitués de l'ensemble de ces types de déchets (Figure I.17).



**Figure I.17. Compositions des déchets du bâtiment**

Le traitement de ces déchets permet d'extraire les éléments non appropriés (comme les métaux) dans la fabrication de granulats recyclés pour usage routier.

### **I.17.3. Gestion des déchets**

Différentes lois, notamment celles de la directive européenne du 15 juillet 1975 et du 3 juillet 1992 regroupée et inscrite dans le code de l'environnement, fixent les objectifs à respecter pour gérer correctement les déchets :

- Prévenir ou réduire la production et la nocivité des déchets.
- Organiser le transport des déchets.
- Valoriser les déchets par réemploi, recyclage ou toute action visant à obtenir des matériaux réutilisables ou de l'énergie.
- Informer le public des effets pour l'environnement et la santé publique.
- Limiter le stockage définitif aux seuls déchets résiduels, ultimes.
- ...

### **I.17.4. Valorisations des déchets**

La valorisation de la matière issue du déchet regroupe les procédés suivants :

*Le recyclage* : réintroduction d'un déchet dans un cycle de production en remplacement total ou partiel d'une matière première vierge.

*Le Réemploi* : nouvel emploi du déchet pour un usage analogue à celui de sa première utilisation.

*La régénération* : procédé physique ou chimique qui redonne au déchet les caractéristiques permettant de l'utiliser en remplacement d'une manière première vierge.

*La réutilisation* : utilisation du déchet pour un dosage différent de son premier emploi, ou introduction de ce matériau dans un autre cycle de production que celui dont il est issu.

*Valorisation énergétique* : Elle consiste à récupérer l'énergie du déchet en l'incinérant. L'incinération c'est la réalisation d'une combustion complète du déchet dans un four, adapté aux caractéristiques de ces déchets, à une température de 700 à 900 C°

*Le stockage* : Si le déchet ne peut être valorisé, il est alors stocké dans des centres adaptés en fonction de leurs natures (dangerosité) : les centres de stockage des déchets ultimes (CSDU), anciennement centre d'enlèvement technique (CET).

**Tableau I.7. Taux de recyclage en Europe**

<b>Pays</b>	<b>Déchets recyclés (millions t/an)</b>	<b>Part de recyclage dans la production de déchets (%)</b>	<b>Part de recyclage dans la consommation de granulat (%)</b>
<b>Pays-Bas</b>	7,7	64,2	6,1
<b>UK</b>	7,2	14,8	2,5
<b>Belgique</b>	2,3	30,3	2,6
<b>Danemark</b>	14,9	24,0	3,6
<b>France</b>	3	9,0	0,7
<b>Espagne</b>	0,5	3,7	0,2

Hendricks a mis en évidence que la production et l'utilisation actuelles des agrégats recyclés (issus de béton et de briques) en Europe est proche de 11 % et 10% respectivement et estime qu'en 2015 ces quantités augmenteront à 15% et 14%.

### **I.18. ENJEUX ET UTILISATION DES GRANULATS RECYCLES COMME GRANULATS A BETONS**

La réutilisation des déchets de démolition a été effectuée la première fois après la deuxième guerre mondiale en Allemagne. Sensibilisés à la problématique du traitement des déchets provenant de la construction, de la rénovation et de la démolition, des intervenants de tous les pays industrialisés sont à l'affût de solutions pour en réduire les quantités, les traiter adéquatement et identifier des applications afin de leur donner une plus grande valeur ajoutée.

La formulation d'éco-matériaux c'est-à-dire de béton avec des granulats recyclés « BETON RECYCLES » est l'un des objectifs de tous ces chercheurs.

Ces déchets de démolition se composent pour près de 95% de déchets. Les 'déchets' deviennent 'granulats recyclés' après tri et concassage. La majeure partie peut être d'autant mieux valorisée qu'elle contient peu d'impuretés et ne doit donc pas être mise en décharge.

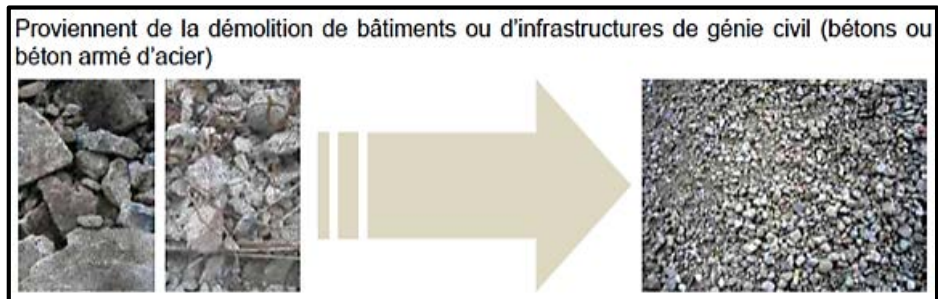
On distingue :

- Débris de béton
- Débris de maçonnerie
- Débris mixtes de béton et de maçonnerie
- Débris d'enrobés hydrocarbonés (bitumineux ou contenant des goudrons)

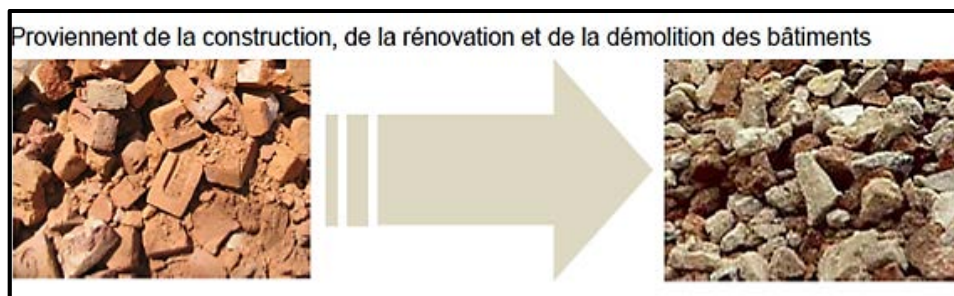
***I.18.1. Différents types de granulats recyclés***

Les GRANULATS RECYCLES sont issus de bétons recyclés ou de matériaux inertes recyclés. En règle générale, on distingue quatre classes principales de granulats recyclés [20] :

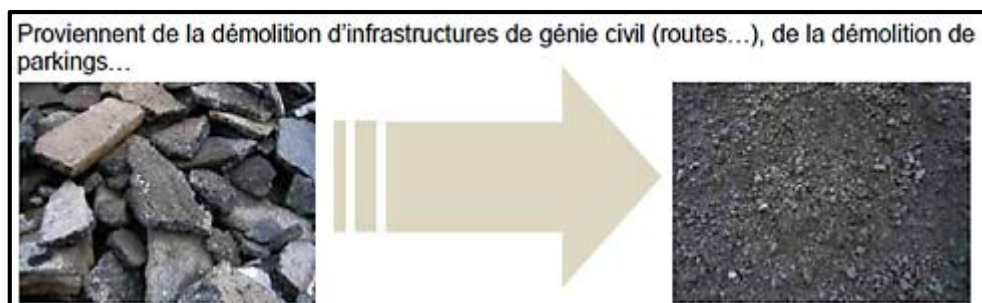
## ❖ GRANULATS DE DEBRIS DE BETON :



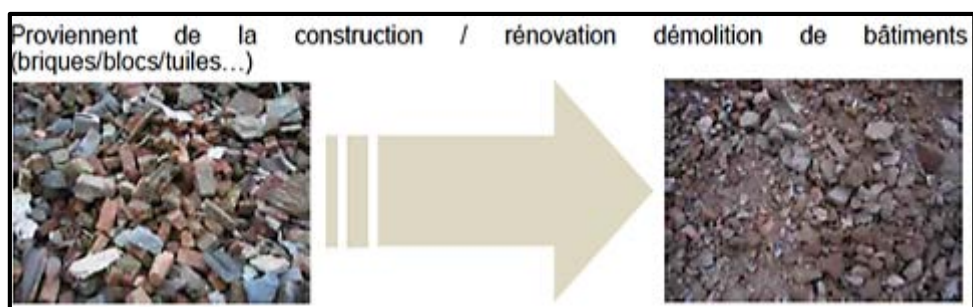
## ❖ GRANULATS DE DEBRIS DE MACONNERIES :



## ❖ GRANULATS DE DEBRIS HYDROCARBONNES :



## ❖ GRANULATS DE DEBRIS MIXTES :



### I.18.2. Différentes applications des granulats recyclés

Le potentiel d'utilisation des granulats recyclés est multiple. Ceux-ci peuvent remplacer utilement et avantageusement les granulats dits « naturels » dans la grande majorité des utilisations traditionnelles.

Parmi les applications les plus courantes, nous identifions :

- **Application en sous-fondation de voirie :** Tant en travaux publics que privés (chemins d'accès aux habitations, lotissements, etc.)...
- **Application en fondation, sous-fondation et fondation de bâtiments industriels :** Tant à l'extérieur (empièchement de propreté, réalisation des parkings, voiries et abords) qu'à l'intérieur des bâtiments, les applications des granulats recyclés sont très nombreuses en construction industrielle.
- **Application en construction : bétons maigres et graves stabilisés :** Béton prêt à l'emploi : Stabilisation des sables de pré-criblage via l'adjonction de chaux (TERACALCO) et de ciment.
- **Application en empièchement d'accès de chantier :** Souvent problématiques en conditions hivernales, les accès de chantiers gagnent à être efficaces pour ne pas ralentir les travaux
- **Application en empièchement « de propreté ».** Afin de travailler en toute sécurité sur des aires stables et propres, la réalisation d'empierrements de propreté est souvent nécessaire pour pouvoir construire efficacement des bâtiments durant les mois d'hiver.

### I.19. ELABORATION DES GRANULATS RECYCLES

L'élaboration des granulats recyclés est réalisée dans des installations fixes ou mobiles qui comprennent les mêmes grandes phases d'élaboration que les installations pour les granulats naturels (concassage, criblage et éventuellement lavage). Un prétraitement spécifique doit cependant être exécuté. Il consiste à réaliser le cisailage des ferrailles et la réduction des plus gros éléments.

Exemple de procédé développé dans le cadre du projet de coopération transnational C2CA, qui a testé la possibilité de recycler 20 000 tonnes de vieux bétons voir figure I.18.



Figure I.18. Exemple des Sept étapes de recyclage pour le projet C2 CA

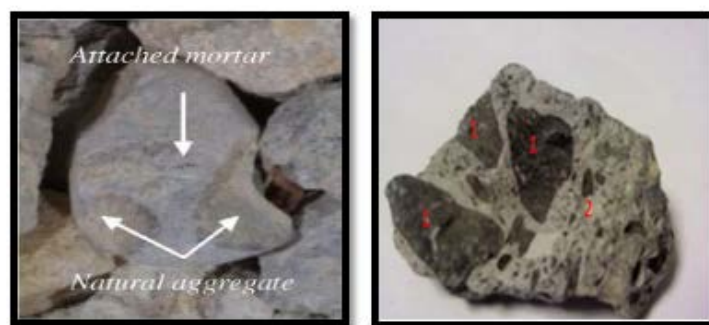
### *I.19.1. Processus de fabrication des granulats recyclés :*

Généralement, les différentes phases d'élaboration des produits issus du recyclage des matériaux de démolition sont :

- Sélection, stockage et traitement des produits bruts.
- **Préparation des matériaux** avant concassage : cette étape consiste à réduire les plus gros éléments l'aide d'un brise roche hydraulique (BRH) et à retirer les impuretés les plus grosses.
- Tri manuel
- Déferrage électromagnétique.
- **Concassage et criblage** : étape destinée à éliminer les matériaux de faibles caractéristiques.
- **Concassage secondaire** éventuel de la fraction supérieure issue du concassage primaire.
- Stockage
- Analyses éventuelles avant utilisation.

## **I.20. COMPOSITION ET PROPRIETES PHYSIQUES DES GRANULATS RECYCLES DE BETON**

Les granulats recyclés de béton diffèrent des granulats naturels par leur composition. Ils sont principalement composés d'un mélange intime de granulats naturels concassés partiellement et de pâtes de ciment hydraté concassée, enrobant les granulats naturels. La pâte de ciment durcie possède généralement une porosité nettement plus élevée que celle des granulats naturels, la teneur et les propriétés physico-chimiques de la pâte de ciment présente dans les GR a ainsi une forte influence sur leurs propriétés.



**Figure I.19. Compositions des granulats recyclés de béton [21]**

**1 : Granulats naturels (Natural aggregate)**

**2 : Pâte de ciment (Attached mortar)**

Les éléments constitutifs de ces granulats recyclés sont présents en proportion différente [22]. Les propriétés de la pâte de ciment sont à l'origine des éventuelles mauvaises propriétés des granulats recyclés constatées [21]. En effet, les propriétés physiques des granulats recyclés dépendent de la quantité et la qualité de pâte de ciment présente sur les granulats concassés. [23]. Des études montrent que la densité de ces granulats recyclés est plus faible ou encore que leur capacité d'absorption est plus élevée [22].

De plus, leurs propriétés mécaniques s'avèrent être moins bonnes que celles des granulats naturels [21]. La qualité de la pâte de ciment du béton parent est primordiale dans la définition des propriétés des granulats recyclés selon les auteurs.

L'analyse d'une comparaison entre les propriétés physiques et mécaniques des granulats recyclés nous permet de conclure que :

- La masse volumique des granulats recyclés semble plus faible que celle des granulats naturels.
- l'absorption d'eau est importante pour les granulats recyclés. En effet, l'ensemble des études montre que les granulats recyclés de béton sont caractérisés par une forte capacité à absorber l'eau. De plus, il semble que la partie plus fine des granulats recyclés absorbe une quantité d'eau plus élevée que les éléments plus grossiers.
- Le coefficient de Los Angeles est élevé comparé à celui exigé par la norme XP P 18-540-article 10. Cette tendance est confirmée par les travaux de Sanchez de Juan & Gutierrez qui expliquent que cette valeur élevée du coefficient de Los Angeles est due à la quantité de pâte de ciment présent autour des granulats naturels concassés.

D'une manière générale, les auteurs s'accordent à dire que la qualité des granulats recyclés semble être inférieure à celle des granulats naturels.

Il est donc essentiel de contrôler la quantité et la qualité de la pâte de ciment présent sur les granulats d'origine afin de comprendre leur influence sur les propriétés des granulats recyclés et, par conséquent, les propriétés des bétons de granulats recyclés de béton.

Il convient donc de définir les essais et analyses pertinents afin de caractériser les propriétés des granulats recyclés de béton. Cela induit également la nécessité de connaître les propriétés physiques et mécaniques du béton parent.



---

# *Chapitre II*

---

**CHAPITRE II :**  
*Composition des mortiers*  
**&**  
*Procédures expérimentales*

**II .1. INTRODUCTION :**

On rappelle que l'objectif de notre travail est d'étudier les effets de substitution d'une partie du ciment par des Fines issues du recyclage de Mortiers de Démolition sur les propriétés des bétons. Pour se faire nous avons choisi de travailler avec des mortiers au lieu des bétons. Nous avons alors introduit ces fines de mortiers de démolition « FMD » en différents taux de substitutions.

Dans ce chapitre nous avons présenté le cahier des charges définissant les critères considérés pour la formulation des mortiers étudiés pour les différentes parties de notre étude.

Dans un premier temps, nous avons donné toutes les compositions des mortiers étudiées, nous avons par la suite présenté les procédures utilisées pour la confection de ces derniers, c'est-à-dire depuis les pesées des matériaux jusqu'aux essais de caractérisations. On a décrit les méthodes d'essais utilisées, les conditions de fabrication et de conservation des éprouvettes.

Dans un second temps, nous avons donné les résultats de caractérisations de ces mortiers à l'état frais c'est-à-dire au jeune âge, étude de la rhéologie. Pour l'état durci, soit à 28 jours, nous avons prévu trois types d'essais, à savoir :

1. Vitesse de propagations des ondes à travers les mortiers ;
2. Résistances en flexion (traction par flexion trois points) ;
3. Résistance à la compression ;

## Partie 1 : *Compositions des Mortiers*

### II.2. FORMULATION DES MORTIERS

En général, dans la construction que ce soit dans le bâtiment, ou travaux publics les travaux de réalisation sont souvent régis par un cahier des charges dans lequel sont dictés, parmi d'autres les exigences sur les matériaux à utiliser ainsi que leurs propriétés. La formulation d'un béton et aussi d'un mortier doit répondre à des exigences telles que la provenance, la qualité et la préparation des matériaux utilisés ; les propriétés mécaniques et de durabilité du béton, etc.

Dans le cas courant le cahier des charges concerne le plus souvent la résistance à la compression à 28 jours et la consistance c'est-à-dire l'affaissement au cône d'Abrams. Ces derniers sont les critères de bases choisies pour la formulation des mortiers composés par des FMD.

Pour le cas de notre étude, nous avons choisi de travailler avec les mortiers. Pour la composition de nos mortiers on s'est basée sur le principe de composition du mortier normalisé ; les quantités des produits sont choisies dans les rapports (1, 2, 3) ainsi :

La masse de l'eau est de  $1 \times$  masse de l'eau choisie

La masse de ciment est de  $2 \times$  masse de l'eau

La masse de sable est de  $3 \times$  masse de ciment.

Dans le cas du mortier normalisé le sable à utiliser est un sable normalisé qui doit satisfaire plusieurs critères bien définis dans la norme, pour le cas de notre étude on a décidé de travailler avec un sable de notre région.

Les mortiers ainsi formulés présentent un rapport E/C égale à 0,5.

### II.3. MATERIAUX ET FORMULATION

#### II.3.1. *Matériaux utilisés :*

Dans notre étude nous avons utilisé des matériaux naturels locaux et ceux issus du recyclage, soit les fines de mortier de démolition "FMD".

##### II.3.1.1. *Ciment*

Pour la fabrication des éprouvettes et l'étude de la rhéologie nous avons utilisé un ciment Portland composé (CPJ CEM II/B 42.5N NA442), ciment Lafarge MATINE, ciment pour béton exigeant. La composition minéralogique du Clinker, selon la formule de Bogue, est : le  $C_3S$  à  $60 \pm 3\%$ , le  $C_3A$  à  $7.5 \pm 1\%$ .

##### II.3.1.2. *Sable*

Parce que l'étude se fait sur mortiers, nous n'avons donc travaillé qu'avec du sable. Ce sable est concassé, sable de carrière, il possède une étendue granulométrique allant de 0 à 3mm.

##### II.3.1.3. *Fines de mortier de démolition*

Fines de granulats de démolition, issues du recyclage de mortier de démolition. Le diamètre fixé pour l'utilisation de ces fines comme substituant au ciment est le 0,8 mm.

#### II.3.1.4. Adjuvant

Pour la rhéologie des mortiers nous avons utilisé un Superplastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi «SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 ». Le superplastifiant "TEMPO 12" est un liquide brun clair, de pH égal à  $5,5 \pm 1,0$  et de densité de  $1,060 \pm 0,020$ , spécialement formulé pour réduire la quantité d'eau de gâchage. Il est incorporé préalablement à l'eau de gâchage, en ce qui concerne le dosage nous avons respecté la fiche technique de SIKA, dont la plage de dosage est de : 0,1 à 5,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

- ❖ **SIKA VISCOCRETE TEMPO 12** : est un superplastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes :
  - Longue rhéologie (>2h),
  - Robustesse à la ségrégation,
  - Qualité de parement

#### II.3.1.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau potable du robinet.

### II.4. PREPARATION ET CARACTERISATION DES FMD

#### II.4.1. Préparation des FMD

A l'origine nous avons récupéré le déchet des travaux de rénovation d'une maison de la région. Le déchet est trié, nous avons alors choisi les cailloux de mortier dont la taille varie entre 1 cm à 5 cm. (voir figure II .1 b). Les cailloux sont par la suite concassés avec une masse pour réduire leurs tailles et en faire des granulats d'un diamètre moyen de 1 cm. Les granulats ainsi obtenus sont par la suite concassés mécaniquement par un concasseur (voir figure II .1a) pour produire une poudre la plus fine possible.

Afin d'obtenir un matériau de finesse de 0.8 mm, nous avons procédé par tamisage successive (tamis 1mm→ 0.8mm). Les fines sont nommées "FMD" dans la suite.



a)

b)

Figure II .1 : a) Concasseur b) Mortier et FMD

## II.4.2. Résultat de caractérisation des FMD

### II.4.2.1. Analyse granulométrique des FMD

Dans la Figure II.2 est donnée l'allure de la courbe granulaire des FMD.

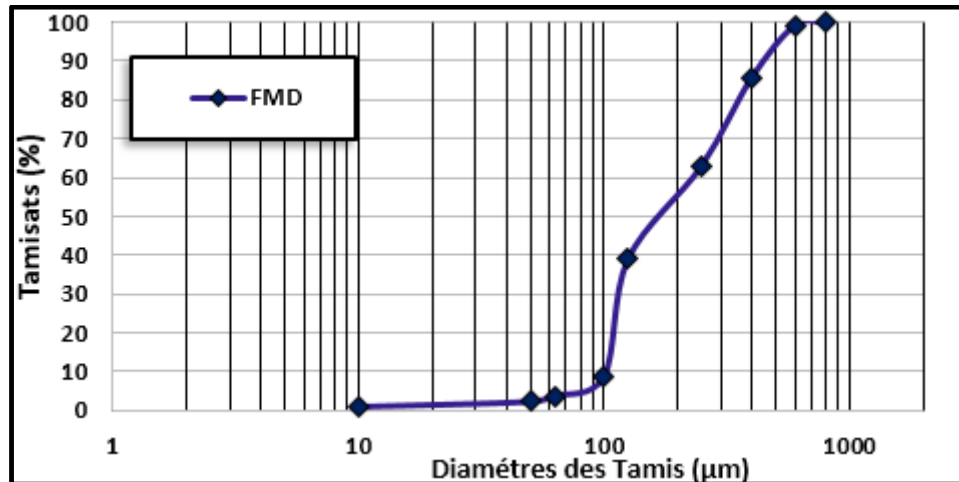


Figure II.2. Courbe granulaire des FMD

On constate que les FMD contiennent 10 % de matériau ayant un diamètre compris entre 0.01mm (10  $\mu\text{m}$ ) et 0.1 mm (100  $\mu\text{m}$ ). On remarque aussi que les FMD produites possèdent une répartition granulométrique régulière sur la plage de tamis 0.1 mm (100  $\mu\text{m}$ ) à 0.8 mm (800  $\mu\text{m}$ ).

### II.4.2.2. Comparaison de la courbe granulométrique des FMD et celle d'un ciment

La Figure II.3 donne la distribution granulométrique d'un ciment obtenue par granulométrie laser [24]. Puisque le but de notre étude est la substitution de ciment par les FMD, nous pouvons donner un aperçu de la comparaison entre la courbe granulaires des FMD et celle d'un ciment.

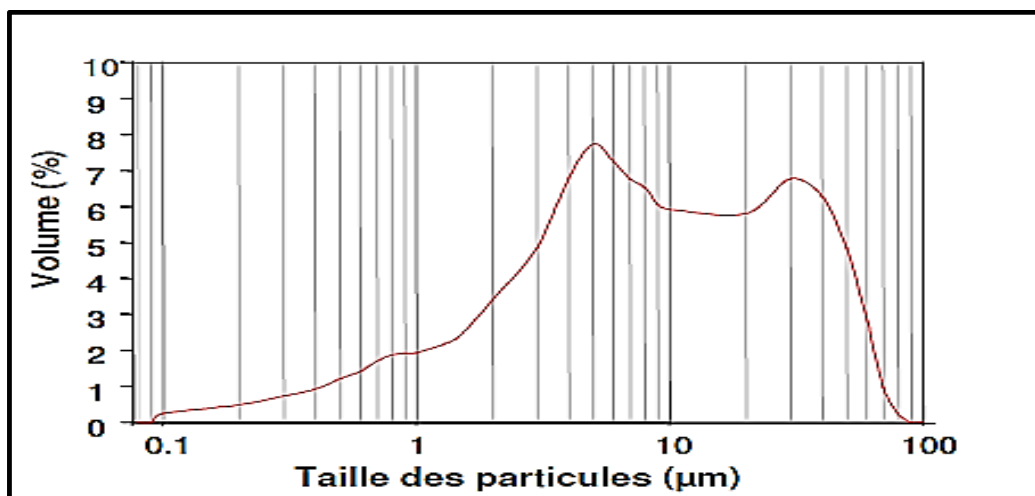


Figure II.3. Distribution granulométrique d'un ciment [24]

En comparaison des deux courbes présentées ci haut, on constate que la poudre que nous avons produite au niveau de notre laboratoire est très grossière devant celle du ciment. En effet les FMD ne présentent que 10 % de grains passant au tamis de 100  $\mu\text{m}$  alors que le ciment ne présente pas de fines dépassant les 100 $\mu\text{m}$ .

## II.5. Caractérisation du sable

Tous granulats utilisés dans les travaux de bâtiment dont on ne connaît pas de façon précise les performances en service doivent répondre à des impératifs de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. Ils doivent donc être soumis à des essais au laboratoire afin de s'assurer de leurs acceptabilités.

### II.5.1. Echantillonnage (NF P 18-553):

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Cette opération est généralement difficile, prend du temps et, parfois, est coûteuse, mais elle est essentielle; souvent, les essais effectués sont sans valeur car ils ne sont pas représentatifs. Voir l'annexe 1 pour le détail de la méthode d'échantillonnage.

En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps

- a) Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
- b) Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

Lorsqu'il n'est pas possible de prendre tout le tas et de le réduire, on procède à un prélèvement local.

### II.5.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles des grains constituant l'échantillon.

L'essai consiste à classer les différents grains qui constituent l'échantillon en utilisant des tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des mailles sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étudié est mis sur le tamis supérieur, la colonne de tamis est alors soumise à des vibrations qui permettent de séparer les grains sur les différents tamis.

Une courbe granulométrique permet d'anticiper les problèmes du béton à formuler. Lorsqu'une courbe est régulière et continue le squelette du béton formulé va être compact (meilleure compacité du squelette du béton) ; aussi la continuité de la courbe permet d'avoir des bétons à meilleurs fluidité sans problèmes de ségrégation.

Dans ce qui suit, nous avons présenté la courbe granulométrique du sable utilisé. Sur la figure II.4 est représentée la courbe du Sable 0/3.

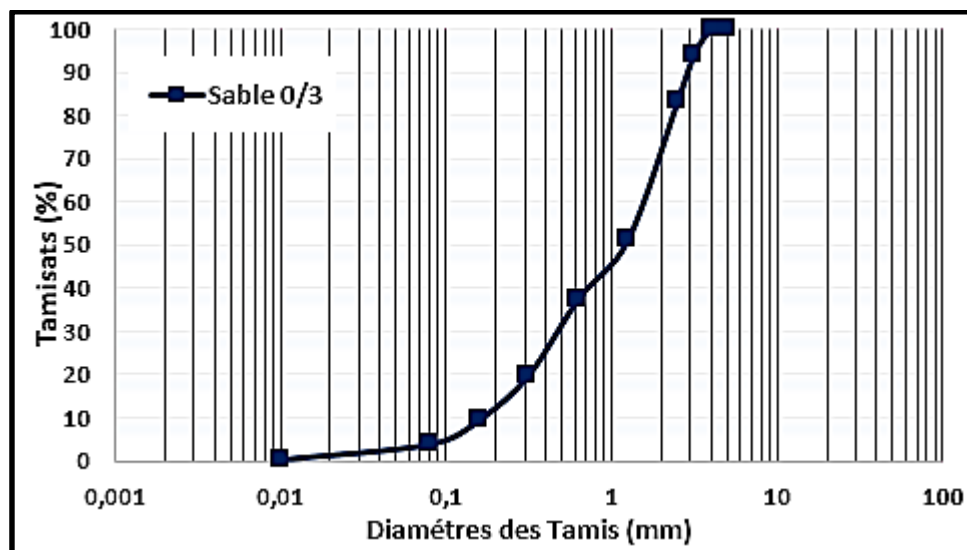


Figure II.4. Courbe granulatoire du Sable 0/3

Le descriptif des essais de granulométrie ainsi que les calculs des différents résultats sont donnés dans l'ANNEXE 1 et 2.

### II.5.3. Module de finesse du sable

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF). Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins. D'après la norme [NFP 18-540], le module de finesse d'un granulat est égal au  $1/100^{\text{ème}}$  de la somme des refus cumulés, exprimés en % sur les différents tamis de la série suivante : 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5 mm.

Ce paramètre est important pour déterminer les caractéristiques des sables utilisés dans le béton. Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

- $1.8 < MF < 2.2$  : **sable un peu trop fin** : est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.
- $2.2 < MF < 2.8$  : **sable préférentiel** : convient bien pour obtenir une ouvrabilité satisfaisante et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités
- $2.8 < MF < 3.3$  : **sable est un peu grossier** : correspond à des sable à utiliser pour la recherche de résistance élevées, mais on aura en général une moins bonne ouvrabilité et des risques de ségrégation.

$$\text{Le module de finesse } MF = \frac{90,42 + 80,12 + 62,47 + 48,90 + 16,77 + 0,00}{100} = 2.986$$

Ce sable a un module de finesse compris entre 2.8 et 3.2 donc il est peu grossier.

#### II.5.4. Absorption et masses volumiques du sable

La mesure d'absorption est essentielle pour la formulation des bétons *NF P 18-555*. En effet cette mesure va nous permettre de corriger la quantité d'eau finale à introduire dans la composition du mortier. En fonction de l'état d'humidité des granulats avant la gâchée (granulats secs ou saturés ou simplement humides), on doit recalculer la quantité d'eau à introduire dans le mortier; ainsi si les granulats sont secs ils risquent d'absorber de l'eau efficace prévue pour l'hydratation du ciment, et donc voir le rapport E/C en baisse, à l'inverse, si les granulats sont humides ou saturés ils vont alors fournir au mortier plus d'eau, et le rapport E/C varie en hausse.

Les résultats de caractérisation de l'absorption ainsi que ceux des masses volumiques du Sable 0/3 sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau II.1. Masses volumiques et coefficients d'absorption du sable**

<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2.74</b>
<b>Masse volumique réelle (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2.68</b>
<b>Masse volumique saturée à surface sèche (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>2.71</b>
<b>Capacité d'Absorption (%)</b>	<b>0.79</b>

La procédure de l'essai est décrite dans l'ANNEXE 1.

#### II.6. FORMULATION DES MORTIERS POUR ESSAI DE RESISTANCE

Après avoir définis les proportions du mortier de référence "MR", nous avons déterminé les compositions des autres mortiers M5, M10, M15, M20, M25, M30, M35. Ces derniers sont obtenus en maintenant toutes les proportions identiques au mortier de référence (en eau et en sable), la seule modification est la proportion en ciment qui sera substitué au fur et à mesure pas les fines de mortiers de démolition (FMD).

L'étude de la substitution du ciment par les fines FMD a été réalisée sur des éprouvettes prismatiques 7 cm × 7 cm × 28 cm (Figure II.5).



**Figure II.5. Moule de confection des éprouvettes 7×7×28 cm**

### II.6.1. Nomenclature des mortiers étudiés

Sept compositions de mortiers ont été préparées en maintenant constant le volume de pâte à **1372 cm<sup>3</sup>** à raison de sept taux de substitution volumique (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%). La nomenclature des mortiers testés est donnée dans le tableau II.2 suivant.

**Tableau II.2. Nomenclature des compositions de mortiers testés**

	MR	M5	M10	M15	M20	M25	M30	M35
<b>% CIMENT</b>	100	95	90	85	80	75	70	65
<b>%FMD</b>	0	5	10	15	20	25	30	35

### II.6.2. Compositions des mortiers

Toutes les compositions étudiées sont présentées dans le Tableau II.3. Pour remplir les trois compartiments du moule nous avons préparé des gâchées de près de 5 litres. Les quantités des différentes gâchées sont données dans le tableau suivant :

**Tableau II.3. Compositions des mortiers en gramme**

Mortiers	Sable (g)	Ciment (g)	Fines(g)	Eau (g)	E/C	E/L
MR	6750	2250	0	1125	0.500	0.5
M5	6750	2137.5	112.5	1125	0.520	0.5
M10	6750	2025	225	1125	0.550	0.5
M15	6750	1912.5	337.5	1125	0.580	0.5
M20	6750	1800	450	1125	0.625	0.5
M25	6750	1687.5	562.5	1125	0.660	0.5
M30	6750	1575	675	1125	0.710	0.5
M35	6750	1562.5	1462.5	1125	0.720	0.5

\* L : Liant (C + Fines de béton)

## II.7. FORMULATION DES MORTIERS POUR LA RHEOLOGIE

Les taux de substitutions du ciment par les FMD sont les mêmes que ceux présentés précédemment, le pas de substitution est de 5%. Les rapports E/C sont ceux définis précédemment.

### II.7.1. Principe de formulation

Pour déterminer si oui ou non les FMD influent sur la rhéologie des mortiers nous avons étudié l'affaissement et l'étalement de ces derniers. Pour évaluer cette consistance, nous avons introduit lors de la gâchée un "superplastifiant SP" de SIKA.

#### Pourquoi utiliser un superplastifiant ?

La consistance des mortiers utilisés pour la confection des mortiers utilisés pour la caractérisation de la résistance mécanique (sans adjuvant) est ferme, soit un affaissement au mini cône d'Abrams inférieur à 2 cm. Cette consistance ne nous a pas permis de bien distinguer l'effet des FMD sur l'ouvrabilité des mortiers. Suite à cela, nous avons alors décidé d'utiliser des mortiers plus fluides en utilisant un superplastifiant. Nous avons alors dans un premier temps essayé de retrouver quel dosage à utiliser pour le mortier de référence.

#### Quel dosage en SP pour le MR ?

Pour trouver le dosage en SP à utiliser, nous avons fixé un critère qui est d'avoir des mortiers très fluides, à la limite des mortiers auto-plaçant. Cette consistance est choisie de manière à pouvoir bien identifier les changements liés à la substitution du ciment par les FMD. Le dosage ainsi obtenu est de 0.8 % de la masse de ciment.

Or, là aussi on s'est trouver confronter à une interrogation. L'adjuvant agit-il uniquement sur le ciment ou bien peut-il avoir un effet sur les FMD. En effet, il est connu que le contact des fines minérales avec l'eau produit des flocculats, alors est ce que ces fines elles-mêmes se flocculent ? Est-ce que cet adjuvant a un effet sur les FMD.

Ainsi pour étudier l'effet du SP sur le ciment et les FMD, mais aussi l'effet des FMD sur la fluidité des mortiers nous avons mené deux séries d'essais :

**1<sup>er</sup> Cas** : dans un premier cas nous avons fixé le dosage en SP fixé à 0.8 % de la masse du ciment. Ainsi la quantité de SP baisse avec la baisse de la quantité de ciment dans les compositions testées. La baisse de la quantité de ciment est liée à la substitution d'une partie du ciment par les FMD (Tableau II.4).

**2<sup>ème</sup> Cas** : dans ce deuxième cas, nous avons maintenu le dosage en SP constant (égale à 0.8 %) par rapport à la masse de la poudre, soit du ciment + FMD (Tableau II.5).

### II.7.2. Compositions des mortiers

Les différentes compositions étudiées pour les deux cas cités ci haut sont données dans le tableau II.4 et le tableau II.5.

**Tableau II.4. Compositions des mortiers pour le 1<sup>er</sup> essai en gramme**

Mortiers	Sable	Ciment	FMD	SP	Eau	E/C	E/L
MR	1350	450	0	3.6	225	0.5	0.5
M05	1350	427.5	22.5	3.42	225	0.52	0.5
M10	1350	405	45	3.24	225	0.55	0.5
M15	1350	382.5	67.5	3.06	225	0.58	0.5
M20	1350	360	90	2.88	225	0.625	0.5
M25	1350	337.5	112.5	2.7	225	0.66	0.5
M30	1350	315	135	2.52	225	0.71	0.5
M35	1350	292.5	157.5	2.34	225	0.77	0.5

\* *L* : Liant (C + Fines de béton)

\**M<sub>CIM</sub>* : Masse du ciment

**Tableau II.5. Compositions des mortiers pour le 2<sup>ème</sup> essai en gramme**

Mortiers	Sable	Ciment	FMD	SP	Eau	E/C	E/L
MR	1350	450	0	3.6	225	0.5	0.5
M05	1350	427.5	22.5	3.6	225	0.52	0.5
M10	1350	405	45	3.6	225	0.55	0.5
M15	1350	382.5	67.5	3.6	225	0.58	0.5
M20	1350	360	90	3.6	225	0.625	0.5
M25	1350	337.5	112.5	3.6	225	0.66	0.5
M30	1350	315	135	3.6	225	0.71	0.5
M35	1350	292.5	157.5	3.6	225	0.77	0.5

\* *L* : Liant (C + Fines de béton) ;

\**M<sub>CIM</sub>* : Masse du ciment

Ainsi, pour chaque composition nous avons mesuré l'affaissement et l'étalement au mini cône d'Abrams des mortiers.

## **Partie 2 : Procédures expérimentales**

### **II.8. PROCEDURES EXPERIMENTALES ET CONDITIONS DE CONSERVATIONS**

#### **II.8.1. Confections des mortiers**

Pour la confection des mortiers, il faut préparer le matériel ainsi que les matériaux nécessaires. Pour uniformiser les essais, nous avons décidé de travailler avec du sable sec. Il a donc fallu mettre en étuve le sable pendant au moins 24 heures à 105°C. Après séchage, faire en sorte que le sable soit ramené à la température ambiante et les mettre dans des sacs étanche afin d'éviter que le sable reprenne de l'humidité.

Pour les deux programmes expérimentaux la première étape consiste à chaque fois en la préparation du matériel nécessaire et des matériaux à utiliser en des quantités suffisantes.

#### **II.8.2. Préparation de la gâchée**

Pour la préparation des mortiers on a à chaque fois répété le protocole suivant :

1/- Huiler l'intérieur des moules d'une légère couche pour faciliter le démoulage.

Une attention particulière doit être donnée à la couche d'huile à mettre, car une présence trop prononcée d'huile peut affecter le mélange de mortier en s'infiltrant dans le mélange nuisant à la réaction d'hydratation et diminuant sa résistance à la compression.

2/- Préparer tout le matériel et matériau nécessaire pour la confection des mortiers. Préparer les pesées des matériaux à utilisés (sable, ciment, eau, fines).

Tout le matériel nécessaire est préparer (balance, récipient, spatules, truelles, bac plastique, table vibrante, éprouvettes graduées....). Tout le matériel est pré-humidifié.

3/- Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage retenue est la suivantes :

- a. Humidifier tout le matériel à utiliser ;
- b. Mettre le sable dans le bac en plastique humidifié ;
- c. Verser l'eau de pré-humidification, mélanger le tout manuellement à l'aide d'une spatule pendant 30s ;
- d. Couvrir le bac et laisser reposer 1min30s ;
- e. Ajouter le ciment et la poudre de fine, ensuite mélanger le tout pendant 30s ;
- f. Verser l'eau restante graduellement et remuer pendant 60s jusqu'à obtention d'une pâte homogène ;

- g. Disposer le moule  $7 \times 7 \times 28$  cm sur la table vibrante ;
- h. Remplir le moule au  $\frac{2}{3}$ , puis vibrer 10s ;
- i. Ajouter le reste du mélange, puis vibré 10s ;
- j. Araser à l'aide d'une règle le surplus du mortier ;
- k. Couvrir d'une membrane étanche pour éviter l'évaporation de l'eau ;
- l. Démoulage des éprouvettes après 24 heures.
- m. Identifier au feutre, les placer dans de l'eau à  $20^{\circ}\text{C}$  pour la cure du béton.



*Figure II.6. Gachée du mortier*



*Figure II.7. Mortier après arasement*

### **II.8.3. Démoulage et Cure du béton**

Les éprouvettes prismatiques  $7 \times 7 \times 28$  cm ont été démoulées à 24 heures (Figure II.8) et conservées dans de l'eau à  $20^{\circ}\text{C}$  pendant toute la durée du durcissement. Cette cure permet d'éviter l'évaporation de l'eau contenue dans les mortiers.

Au 28<sup>ème</sup> jour les éprouvettes sont retirées d'eau et pesées une à une.

Les résistances mécaniques (traction par flexion et compression) des éprouvettes de mortier ont été testées à l'échéance de 28<sup>ème</sup> jour.



*Figure II.8. Mortiers  $7 \times 7 \times 28$  cm<sup>3</sup>*

## **II.9. CONFECTION DES MORTIERS POUR LA RHEOLOGIE**

Dans ce cas comme la quantité de mortier préparée peut être contenue dans le petit malaxeur à mortier, nous avons donc à l'utiliser, notamment que la rhéologie à l'état frais est très sensible à l'énergie de malaxage. Ainsi de cette manière nous avons une garantie de malaxer avec la même énergie tous les mortiers.

### II.9.1. Préparation de la gâchée :

Les conditions de travail sont les mêmes que celles présenter pour la préparation des mortiers destinés à la caractérisation de la résistance, la seule différence est qu'ici on utilise le malaxeur à mortier (Figure II.9).



**Figure II.9. Malaxeur électrique pour mortier**

1/- Préparer tout le matériel et matériau nécessaire pour la confection des mortiers. Préparer les pesées des matériaux à utilisés (sable, ciment, eau, fines, adjuvant).

2/- Tout le matériel nécessaire est préparé (balance, malaxeur, cône d'Abrams, spatules, éprouvettes graduées, pieds à coulisse, règle....). Tout le matériel est pré-humidifié.

3/- Après avoir déterminé les proportions de chaque composant, la séquence de malaxage retenue a été la suivantes :

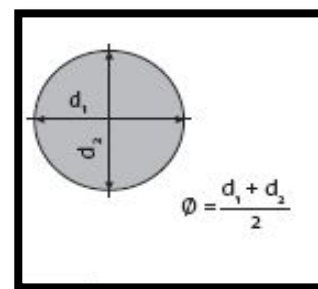
- a. Humidifier tout le matériel à utiliser ;
- b. Introduire le sable en premier dans la cuve du malaxeur ;
- c. Verser l'eau de pré-humidification, mettre le malaxeur en marche à vitesse lente;
- d. Après 30s de malaxage laissé reposer 1min30s ;
- e. Ajouter le ciment et la poudre de fine, ensuite mélanger le tout à vitesse lente pendant 30s ;
- f. Arrêter le malaxeur et procéder au raclage ;
- g. Verser l'eau restante dans la cuve et mettre le malaxeur en marche pendant 30s à vitesse lente jusqu'à obtention d'une pâte homogène ;
- h. Ajouter l'adjuvant, tout en laissant le malaxeur en marche et laisser malaxer pendant 30s à une vitesse lente ;
- i. Mettre alors le malaxeur à sa vitesse rapide et continuer le malaxage pendant 30s supplémentaires;

- j. Arrêter le malaxeur pendant 30s. Pendant les 15 premières secondes enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérant aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- k. Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 1min30s;
- l. Disposer le cône d'Abrams sur une surface lisse horizontale;
- m. Le remplir de mortier progressivement jusqu'à la surface ;
- n. A l'aide d'une règle agrafer soigneusement la surface ;
- o. Retiré verticalement avec les deux mains posées de part et d'autres du moule ;

L'échantillon de mortier s'effondre sous son poids propre, une fois le mortier stable, on mesure à l'aide du Pied à coulisse l'étalement et à l'aide d'une règle graduée l'affaissement.

### II.9.2. Mesure de l'affaissement et de l'étalement des mortiers

- L'étalement est le diamètre de la surface étalée, il est déterminé par la moyenne des deux mesures diamétralement opposées. L'une la plus large dimension de la galette formée à l'étalement est l'autre perpendiculaire à la première mesure. (Figure II.10)



*Figure II.10. Mesure de l'étalement*

- L'affaissement est la différence de hauteur entre celle du moule et celle du mortier affaissé (Figure II.11).



*Figure II.11. Mesure de l'affaissement*

## II .10. ESSAIS D'AUSCULTATION SONORE (ULTRA-SON)

L'auscultation par ultrason est une méthode non destructive destinée entre autres à tester l'homogénéité du béton, elle consiste à déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée. La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tels que l'âge du béton, les conditions d'humidités, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et des fissures. Le contrôle par ultrasons permet, sans nuire à l'intégrité d'une structure, de caractériser les défauts qu'elle contient et de porter ainsi un jugement sur l'acceptation des pièces réalisées.

### II.10.1. Description de l'appareil

Dans notre essai, nous avons utilisé l'appareil de test ultrasonique Pundit Lab (Figure II.12), ce dernier est constitué de :

- a. Un testeur ultrasonique
- b. Deux transducteurs (émetteur et récepteur);
- c. Barre de calibrage ;
- d. Deux câbles de connexions de 1.5m ;
- e. Un gel de contact
- f. Une centrale d'acquisition des données.



**Figure II.12.**Appareil de test ultrasonique Pundit-Lab

### II.10.2. Principe de mesure

L'appareil ultra-sonique génère des ondes ou des impulsions "ultra-soniques" qui sont transmises au béton par un transducteur mis au contact avec la zone à évaluer. Le temps de propagations des ondes à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital de l'appareil

### II.10.3. Etalonnage de l'appareil

Avant de commencer, l'essai il faut régler l'appareil de mesure. Cela se fait comme suit :

1. Remise à zéro du Pundit Lab en utilisant la barre de calibration (elle doit se faire régulièrement si la fréquence du transducteur est modifiée ou si les câbles sont changés). La valeur de calibration ( $\mu\text{s}$ ) est celle marquée sur la barre de calibration, elle est de  $25,4\mu\text{s}$ . Il faudra donc coupler les transducteurs avec la barre de calibration en appliquant le couplant sur les transducteurs et les deux extrémités de la barre et en appuyant fermement comme illustrés ci-dessous. (Figure II.13).



**Figure II.13. Remise à zéro du Pundit Lab avec la barre de calibration**

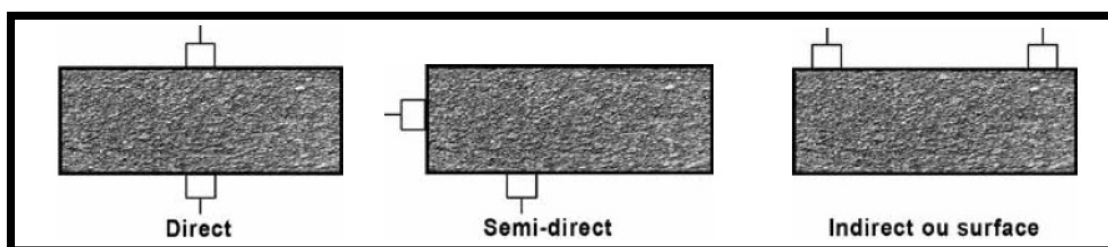
2. Finalement, il faudra régler :
  - la fréquence du transducteur à  $25,4\mu\text{s}$ .
  - la largeur d'impulsion
  - les paramètres de calibration

Après tous ces ajustements il faut préparer les éprouvettes comme suit :

- Poncer et égaliser la partie de la surface des éprouvettes à ausculter où le transducteur sera fixé, cette étape est très importante pour que les transducteurs soient en contact avec le mortier ;
- Préparer les point de mesures, cette opération consiste à marquer les point d'essai afin de centrer les transducteurs dessus ;
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériau d'interposition comme du gel...

#### II.10.3.1. Disposition des transducteurs

Trois types de dispositions des transducteurs sont communément utilisés.



**Figure II.14. Différents types de dispositions des transducteurs**

Dans notre cas, nous avons utilisé la disposition directe car cela permet une transmission maximale du signal entre les transducteurs. Nous avons placé les transducteurs (émetteur et récepteur) sur deux faces opposées, au même niveau (Figure II.15). La longueur de trajet est la distance entre le centre des deux faces opposées, dans notre cas elle correspond à la longueur de l'éprouvette qui est de 280mm.



**Figure II.15. Position des transducteurs**

Ainsi, on lit le temps de passage sur l'écran, qui est donné sous forme d'onde.

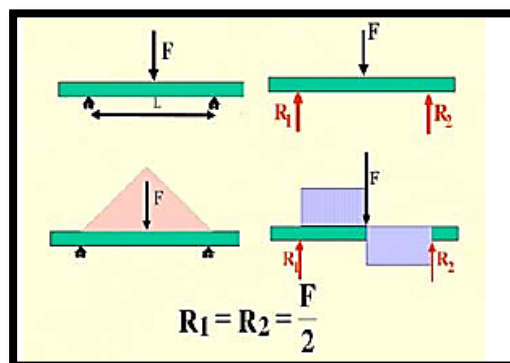
## II.11. COMPORTEMENT MECANIQUE DES MORTIERS

Des essais mécaniques sont utilisés pour caractériser les mortiers:

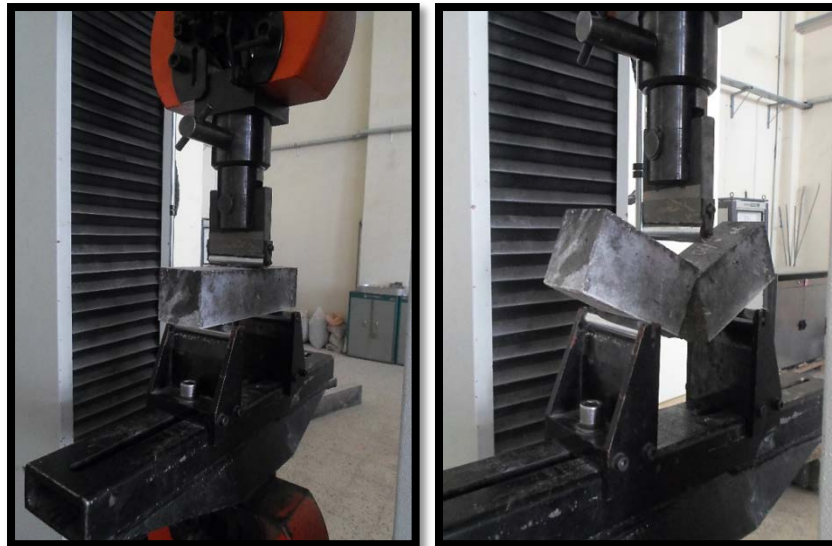
- 1- La flexion trois points sur trois éprouvettes de  $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ .
- 2- La compression pure sur les demi-éprouvettes issues du test précédent.

### II.11.1. Essai de flexion 3 points

L'essai de flexion permet de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Cet essai est réalisé sur les éprouvettes de mortier qui sont posés entre trois points d'appuis, on applique un effort sur le point central avec une force croissante jusqu'à rupture. Un schéma de principe est donné dans la Figure II.16.



**Figure II.16. Schéma de principe**



*Figure II.17.* Mortier soumis à la flexion 3 points

### *II.11.2. Essai de compression pure*

L'essai de compression pure consiste à soumettre les éprouvettes de forme carrée issus du test de flexion entre deux plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées (Figure II.18).



*Figure II.18:* Mortier soumis à la compression pure



---

# *Chapitre III*

---

## Chapitre III : Résultats et Exploitations

### III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats et l'exploitation des trois parties étudiées.

Tout d'abord, nous avons donné les résultats de la rhéologie : évolution de la plasticité (étalement & affaissement) des mortiers en fonction du dosage en FMD, cela en utilisant le mini-cône d'Abrams (Echelle ½).

Par la suite, nous avons donné l'exploitation des d'évolution de la masse volumique et de la résistance à la compression, à la flexion obtenus à 28 jours des mortiers étudiés en fonction du pourcentage de substitution du ciment par les FMD.

En dernier, nous avons présenté les résultats obtenus à l'ultrason sur les éprouvettes des différents mortiers à l'âge de 28 jours. Nous avons également essayé d'établir une corrélation entre les deux variables résistance à 28 jours et vitesse à l'ultrason.

## Partie 1 : Résultats de la rhéologie des mortiers

Dans cette partie nous avons représenté les résultats de la rhéologie, affaissement et étalement des mortiers composés de Sable + eau + ciment + FMD et SP.

On rappelle que la masse de la poudre (ciment + FMD) est maintenue constantes dans toutes les compositions de l'étude, la variable est la fraction de ciment et de FMD dans cette poudre.

Les essais sont menés de deux manières différentes :

- L'une on fixant le dosage en SP par rapport à la masse du ciment **d-SP/C constant** : soit donc  $d\text{-SP/P} = \text{variable}$ .
- L'autre on variant le dosage en SP par rapport à la masse du ciment ; **d-SP/C Variable** : soit donc  $d\text{-SP/P} = \text{constant}$  ;

L'objectif visé dans ces deux façons de doser en SP est de savoir si ce SP influe également sur les FMD, mais surtout de distinguer l'effet des FMD sur la rhéologie des mortiers.

### III.2. RESULTATS DES ESSAIS RHEOLOGIQUES DES MORTIERS

Pour le cas de notre étude, nous avons utilisé comme paramètre d'étude de la rhéologie de nos mortiers l'affaissement et l'étalement mesurés au mini cône (Echelle  $\frac{1}{2}$  du cône d'Abrams :  $h = 15$  cm ; base inférieure = 10 cm et base supérieure = 5 cm).

Ainsi, un mortier ferme se traduit par un affaissement égal à 0 cm et un étalement de 10 cm, 10 cm correspond au diamètre du cône à sa base.

#### III.2.1. Etalement et affaissement des mortiers

Rappelons que l'étalement est déterminé comme étant la moyenne de deux mesures perpendiculaires.

##### III.2.1.1. Etalement et Affaissement des mortiers pour le cas où d-SP/C est constant

Les résultats d'étalement et d'affaissement obtenus pour les mortiers où le **d-SP/C constant** mais le **d-SP/P est variable** sont donnés dans le tableau III.1.

Dans ce cas la quantité de SP baisse avec la baisse de la masse de ciment dans les compositions car d-SP/C est maintenu constant, égale à 0,8 % de la masse de ciment.

Tableau III.1. Résultats d'étalement &amp; d'affaissement des mortiers cas où (d-SP/C constant)

%FMD	Etalement (cm)			Affaissement (cm)
	Mesure 1	Mesure 2	Moyenne	
MR	22,5	22,9	22,7	12,4
M5	18,1	18,1	18,1	11,2
M10	16,3	16,4	16,35	10,8
M15	16,1	16,4	16,25	10,7
M20	15,2	15,2	15,2	9,1
M25	13,4	13	13,2	6,5
M30	11,6	11,6	11,6	5,3
M35	10	10,1	10,05	4,6

Sur la Figure III.1 ci-dessous nous avons représenté les valeurs d'étalement sous forme d'un histogramme explicatif des différents résultats du tableau.

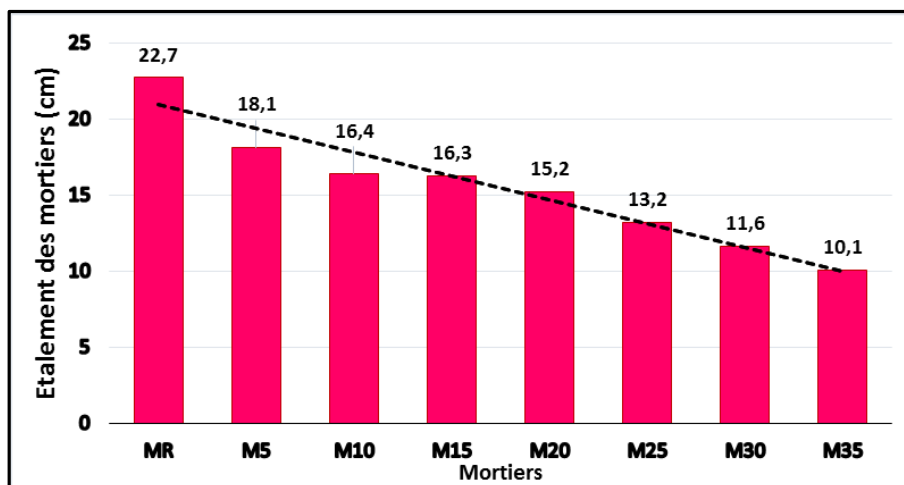


Figure III.1. Résultats d'étalement des mortiers cas où (d-SP/C constant)

D'après la figure III.1 ci-dessus on constate que l'étalement baisse avec l'augmentation de la teneur en FMD dans les compositions, les mortiers perdent de plus en plus de leur fluidité, ils deviennent donc de plus en plus fermes.

La courbe de tendance de l'évolution de l'étalement en fonction du % en FMD est de type linéaire avec un coefficient de corrélation  $R^2$  de 0.9353.

$$\text{Etalement} = -1,5661 \times \%FMD + 22,47$$

Sur la figure III.2 ci-dessous nous avons représenté les valeurs d'affaissement sous forme d'un histogramme explicatif des différents résultats du tableau (affaissement en fonction de la substitution du ciment par les FMD).

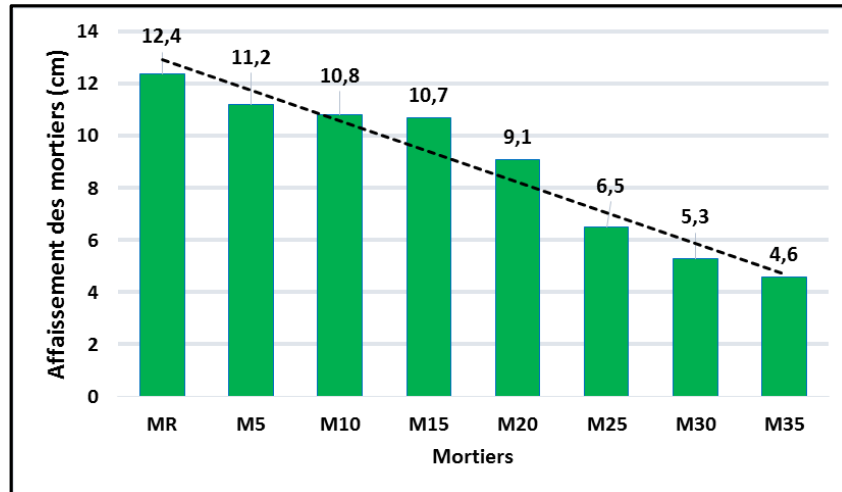


Figure III.2. Résultats d'affaissement des mortiers cas où (d-SP/C constant)

Comme pour l'étalement, d'après la figure III.2 ci-dessus on constate que l'affaissement baisse avec l'augmentation de la teneur en FMD dans les compositions, les mortiers perdent de plus en plus de leur fluidité, ils deviennent donc de plus en plus fermes.

La courbe de tendance de l'évolution de l'affaissement en fonction du % en FMD est de type linéaire avec un coefficient de corrélation  $R^2$  de 0.9395.

$$\text{Affaissement} = -1,1738 \times \%FMD + 14,107$$

Pour ce cas où d-SP/C constant, la diminution de la plasticité est importante, on passe d'un étalement de 22,7 cm pour le MR à étalement de 10 cm (soit 0 étalement car la base du cône fait 10 cm) pour le M35. En termes d'affaissement on passe de 12,4 cm à un affaissement de 4,6 cm pour les mêmes mortiers.

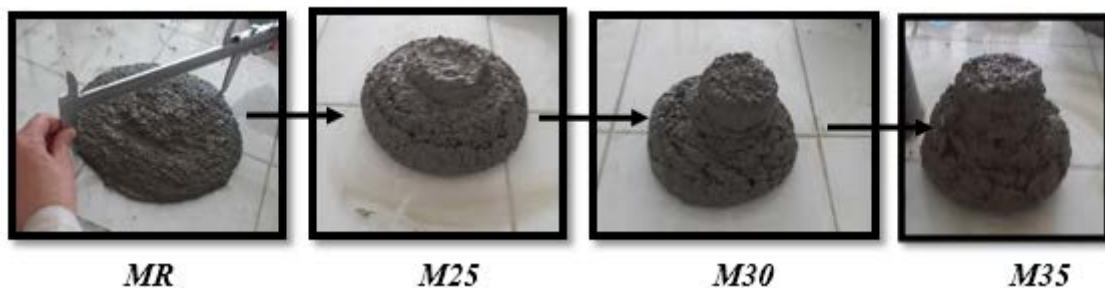
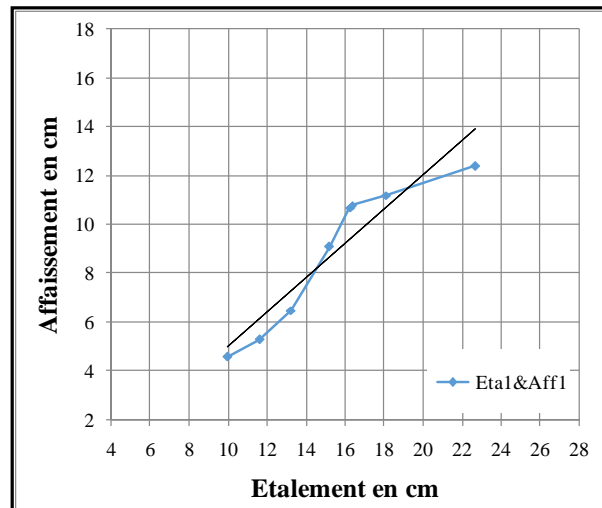


Figure III.3. Etalement et Affaissement des différents Mortiers pour d-SP/C constant

#### Corrélation entre l'étalement et l'affaissement cas d-SP/C constant

Sur la figure suivante nous avons représenté la courbe de corrélation de l'évolution de l'étalement et de l'affaissement.



**Figure III.4. Affaissement fct. Etalement des mortiers cas où (d-SP/C constant)**

La courbe de la figure III.4 montre que les deux mesures (étalement et affaissement) évoluent au même temps de façon proportionnelle en suivant une tendance linéaire. Tout de même la pente de la courbe montre que l'étalement change d'avantage que l'affaissement. En effet, entre le MR et le M35 on a perdu près de 14 cm en étalement pour 8 cm d'affaissement.

#### Interprétations des résultats de la rhéologie cas d-SP/C constant

Si l'on suit la logique des Adjuvants superplastifiants, lorsque l'on maintient le dosage en SP par rapport à la masse du ciment constant (c'est le cas dans ces mortiers) la logique dit que la fluidité va rester la même, soit donc l'étalement et l'affaissement qui normalement ne changeraient pas ou bien changeraient de peu. Or ce n'est pas le cas pour les résultats présentés sur les histogrammes ci-haut, figure III.1 et de la figure III.2.

Cette baisse de fluidité (plasticité) peut être associée donc à la présence des FMD pour qui la masse augmente, on a donc la plasticité qui baisse avec l'augmentation de la teneur en FMD.

On peut alors conclure comme suit, plus le % des FMD dans les mortiers augmente plus ils perdent de leur plasticité. Cet effet peut être associé à la demande en eau de cette poudre issue d'un déchet. On pense que la demande en eau des FMD est plus importante que celle du ciment, notamment qu'elle est en réalité un composé granulat et d'une pâte de ciment durcie qui présente une certaine porosité et donc on tendance à absorber une partie de l'eau du mortier. Plus la quantité de FMD augmente, plus la quantité d'eau disponible à l'intérieur du mortier pour fluidifier le mortier au très jeune âge est moindre.

#### **III.2.1.2. Etalement et Affaissement des mortiers pour le cas où d-SP/C variable**

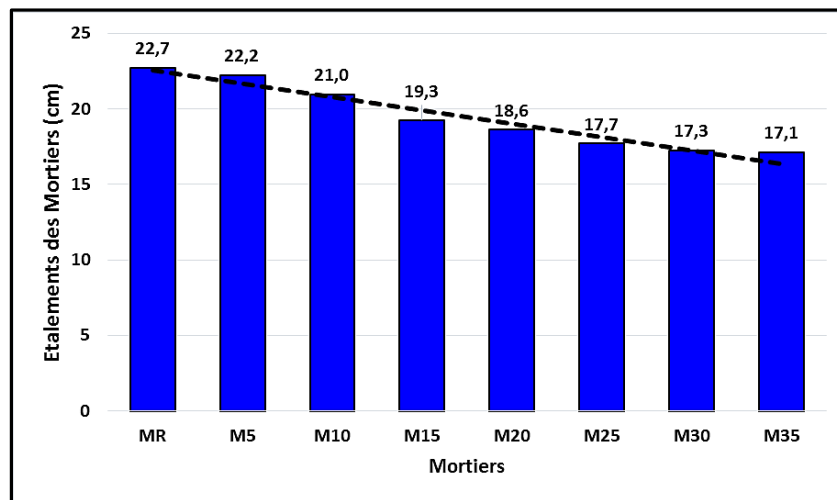
Les résultats d'étalement et d'affaissement obtenus pour les mortiers où le **d-SP/C variable** mais le **d-SP/P est constant** sont donnés dans le tableau III.2.

Dans ce cas la quantité de SP est maintenue constante égale à 3.6g pour toutes les compositions, soit un dosage de 0,8 % de la masse de la poudre (Ciment+ Fine).

**Tableau III.2. Résultats d'étalement des mortiers cas où (d-SP/C Variable)**

%FMD	Etalement (cm)			Affaissement (cm)
	Mesure 1	Mesure 2	Moyenne	
MR	22,5	22,9	22,7	12,4
M5	22,1	22,3	22,2	12,2
M10	20,9	21	21,0	11,9
M15	19	19,5	19,3	11,5
M20	18,7	18,5	18,6	11,4
M25	17,7	17,7	17,7	10,9
M30	16,6	17,9	17,3	10,8
M35	16,5	17,7	17,1	10,7

Sur la Figure III.5 ci-dessous nous avons représenté les valeurs d'étalement sous forme d'un histogramme explicatif des différents résultats du tableau (étalement en fonction du % de substitution du ciment par les FMD) pour **d-SP/C variable**.

**Figure III.5. Résultats d'étalement des mortiers cas où (d-SP/C Variable)**

D'après la figure III.5 ci-dessus on constate que l'étalement baisse avec l'augmentation de la teneur en FMD dans les compositions.

La courbe de tendance de l'évolution de l'étalement en fonction du % en FMD est de type linéaire avec un coefficient de corrélation  $R^2$  de 0,9521.

$$\text{Etalement} = -0,8851 \times \%FMD + 23,452$$

Sur la Figure III.6 ci-dessous nous avons représenté les valeurs d'affaissement sous forme d'un histogramme explicatif des différents résultats du tableau (affaissement en fonction de la substitution du ciment par les FMD).

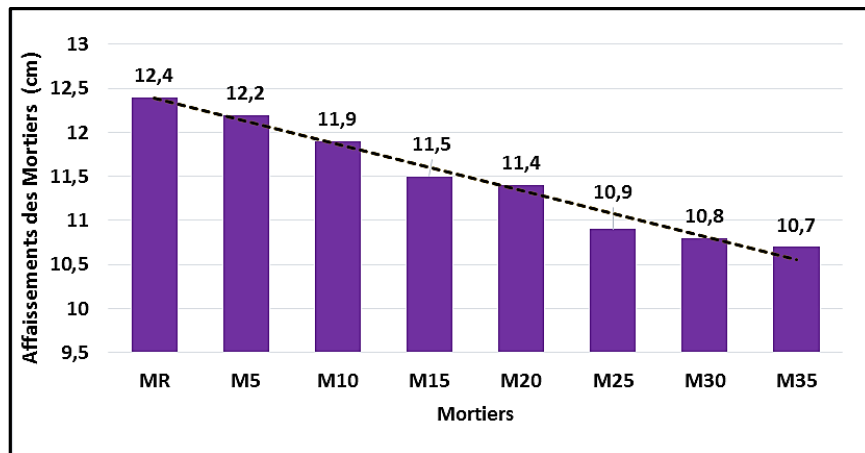


Figure III.6. Résultats d'affaissement des mortiers cas où (d-SP/C Variable)

Comme pour l'étalement, d'après la figure III.6 ci-dessus on constate que l'affaissement baisse avec l'augmentation de la teneur en FMD dans les compositions, les mortiers perdent de plus en plus de leur fluidité, ils deviennent donc de plus en plus fermes.

La courbe de tendance de l'évolution de l'affaissement en fonction du % en FMD est de type linéaire avec un coefficient de corrélation  $R^2$  de 0,9749.

$$\text{Affaissement} = -0,2619 \times \%FMD + 12,654$$

Pour ce cas où d-SP/C variable, la diminution de la plasticité n'est pas importante, on passe d'un étalement de 22,7 cm pour le MR à un diamètre de 17,1 cm (soit une baisse de 5,6 cm) pour le M35. En termes d'affaissement on passe de 12,4 cm à un affaissement de 10,7 (soit une baisse de 1,7 cm) pour les mêmes mortiers.

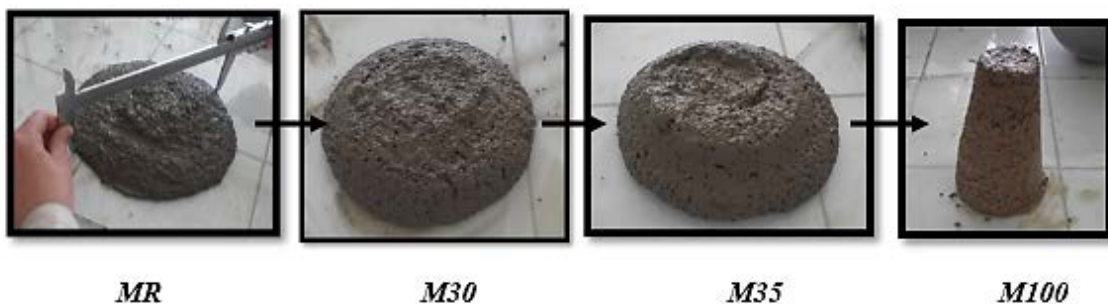
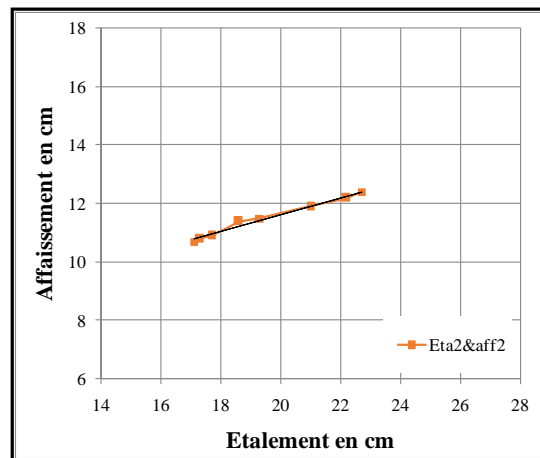


Figure III.7. Etalement et Affaissement des différents Mortiers pour d-SP/C variable

### Corrélation entre l'étalement et l'affaissement cas d-SP/C variable

Sur la figure suivante nous avons représenté la courbe de corrélation de l'évolution de l'étalement et de l'affaissement.



**Figure III.8. Affaissement fct. Etalement des mortiers cas où (d-SP/C variable)**

La courbe de la figure III.8 montre que les deux mesures (étalement et affaissement) évoluent faiblement et proportionnellement en suivant une tendance linéaire. Toutefois, on constate une très faible variation pour l'affaissement que pour l'étalement. Du mortier MR au M35 on a perdu près de 5,6 cm en étalement pour 1,7 cm d'affaissement.

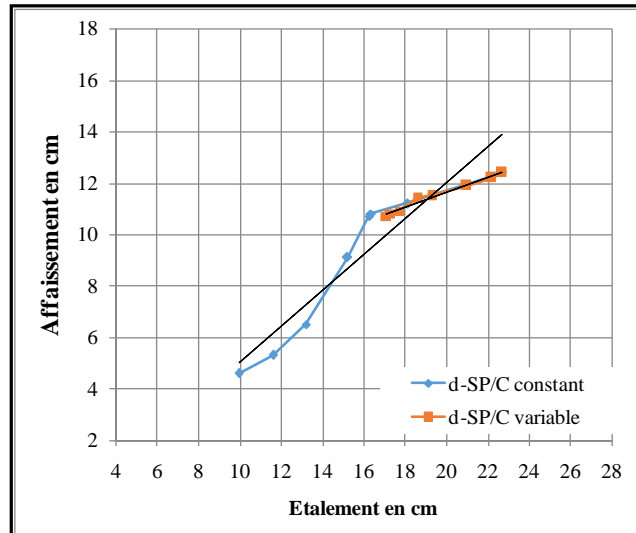
### Interprétations des résultats de la rhéologie cas d-SP/C variable

Dans ce cas, pour comprendre le phénomène il est bien de préciser qu'avoir un d-SP/poudre constant revient à dire que d-SP/ciment augmente. En effet, le fait d'introduire la même quantité d'adjuvant dans toutes les compositions et de baisser la teneur en ciment revient à dire que le dosage en SP augmente par rapport à la masse de ciment.

Ainsi, la logique d'utilisation des SP dit que la plasticité devrait augmenter significativement avec la substitution des ciments par les FMD, car il y a de plus en plus de superplastifiant disponible pour le ciment (quantité de ciment baisse, SP constant). Or ici, nous on constate le contraire, les mortiers deviennent de plus en plus fermes. Cette perte de plasticité peut donc être attribuée à la présence des FMD. Plus on met de FMD dans le mortier plus le mortier devient plus ferme.

### **III.2.2. Corrélation des résultats cas où d-SP/C constant & cas où d-SP/C variable**

Sur la figure suivante nous avons superposé les résultats de corrélation obtenus pour les deux cas d'études.



**Figure III.9. Superposition des résultats d’Affaissement fct. Etalement des mortiers (2 cas d’étude)**

La figure présentée ci haut indique que la plage de variation de la plasticité est beaucoup plus large dans le cas où d-SP/C est constant que dans le cas où il est variable. On a perdu près de 14 cm en étalement et près de 8 cm d’affaissement. Pour le deuxième cas les points sont regroupés sur une plage plus serrée, on a perdu près de 6 cm en étalement et moins de 2 cm d’affaissement.

Autrement dit, on a perdu plus de plasticité dans le cas 1 que dans le cas 2. On pense que cela peut être associé à un effet probable du SP sur les FMD. Effet, qui nécessite des investigations expérimentales supplémentaires pour qu’il soit confirmé.

## **Partie 2 : Résultats de résistances mécanique à la compression, flexion et à l'ultra-son**

### **III.3. RESULTATS DES ESSAIS MENES SUR LES MORTIERS**

#### **III.3.1. Résultats des masses volumiques des mortiers durcis**

Avant de faire les essais d'écrasement, nous avons pesé les différentes éprouvettes (trois éprouvettes par mortier). Nous avons par la suite calculé la masse volumique des différents mortiers, en utilisant la moyenne des pesées. Cette dernière est calculée en utilisant la formule suivante :

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^{i=3} X_i}{3}$$

Avec : X correspond à la variable mesurée.

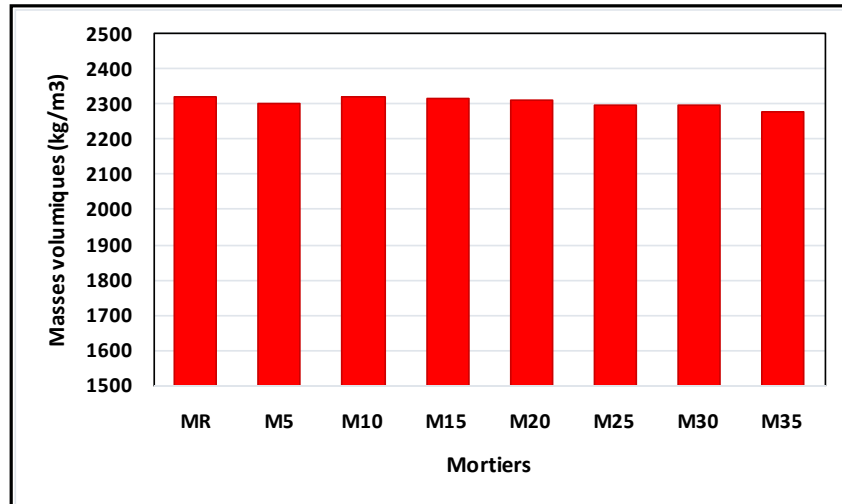
Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau III.3 suivant. Les éprouvettes sont parallélépipédiques de dimensions  $7 \times 7 \times 28$  cm donc de volume  $1372 \text{ cm}^3$ .

**Tableau III.3. Récapitulatif des pesées des éprouvettes (g) et des masses volumiques ( $\text{kg/m}^3$ )**

Mortiers	Epr (1)	Epr (2)	Epr (3)	Moyenne	Mv ( $\text{kg/m}^3$ )	% de baisse Mv
<b>MR</b>	3191	3183	3182	3185	2321	
<b>M5</b>	3165	3155	3149	3156	2300	0,90 %
<b>M10</b>	3193	3195	3156	3181	2319	0,09 %
<b>M15</b>	3173	3176	3184	3178	2316	0,22 %
<b>M20</b>	3146	3199	3169	3171	2311	0,43 %
<b>M25</b>	3178	3159	3115	3151	2296	1,08 %
<b>M30</b>	3147	3148	3152	3149	2294	1,16 %
<b>M35</b>	3119	3131	3129	3126	2278	1,85 %

Le pourcentage de baisse de la masse volumique est calculé en comparant les masses volumiques des différents mortiers par rapport à celle du mortier de référence MR.

Sur la figure III.10 suivante, nous avons représenté les résultats des masses volumiques en fonction du taux de substitution du ciment par les FMD (taux qui augmente de gauche vers la droite). Nous avons également schématisé la courbe de tendance obtenue.



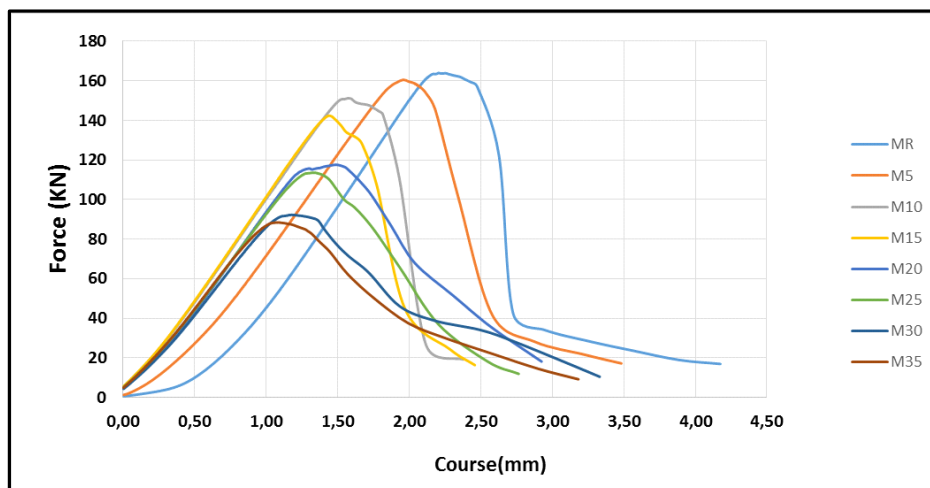
**Figure III.10. Masses volumiques des différents mortiers en fonction du pourcentage de FMD**

D'après les résultats, on constate que les masses volumiques sont du même ordre de grandeur pour tous les mortiers et cela malgré la substitution du ciment par les FMD.

Les pourcentages de baisse de la masse volumique qui ne dépasse pas les 2 % prouve cette égalité. Ce non changement des masses volumiques des mortiers est dû au fait que la masse volumique du ciment et des FMD sont du même ordre de grandeur. En effet, les deux produits sont composés de mêmes minerais et ils sont tous les deux très fins.

### III.3.2. Résultats des résistances à 28 jours

La presse d'écrasement des mortiers nous permet de mesurer la courbe d'évolution des contraintes en fonction du chargement appliqué. Les courbes obtenues sont de la forme de celles présentées sur la figure suivante. Nous avons un total de (8 × 6) courbes, nombre qui correspond au nombre d'éprouvettes total écrasées, soit 6 par mortier.



**Figure III.11. Courbes de compressions à 28 jours des mortiers étudiés**

Les Pics de ces courbes traduisent la résistance à la rupture à 28 jours des mortiers testés, pour qui l'exploitation est donnée ci-après.

Les courbes peuvent être exploitées pour définir les modules de déformation de nos mortiers, calculer leur énergie de rupture. Par ailleurs on remarque que les courbes ont tendance à s'aplanir avec

l'augmentation du pourcentage de FMD dans les mortiers, les mortiers présentent des ruptures de moins en moins fragiles. Après le Pic la baisse de la force est moins raide.

### III.3.2.1. Résistance à la compression à 28 jours

Les résistances aux compressions moyennes obtenues pour les différentes formules de mortiers testés sont données dans le tableau III.4. Sur le même tableau nous avons donné les pourcentages de baisses par rapport au mortier de référence MR.

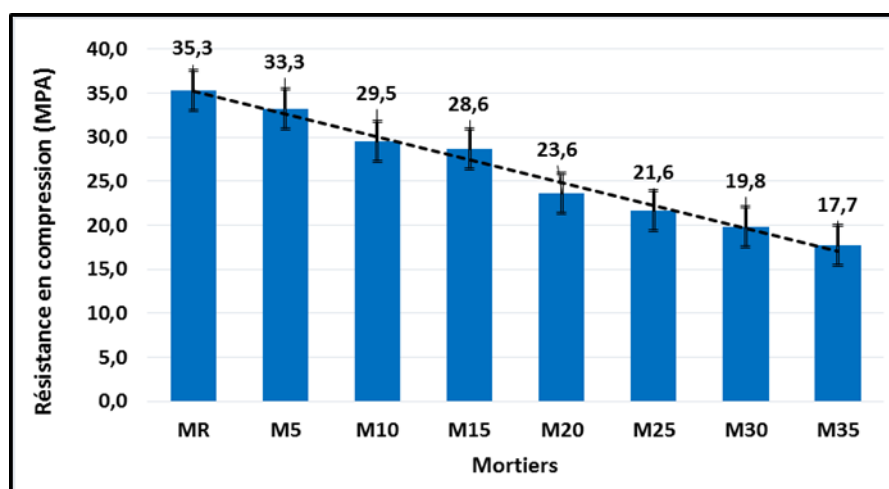
**Tableau III.4. Résistance moyenne en Compression et % des résistances en (MPa)**

Mortiers	Ep 1	Ep 2	Ep 3	Ep 4	Ep 5	Ep 6	Moyenne	% de baisse de Rc
MR	37,4	34,8	P	33,8	33,5	36,9	35,3	
M5	35,5	34,1	32,8	31,9	32,1	33,2	33,3	5,6%
M10	32,1	27,3	28,4	30,6	27,5	30,9	29,5	16,4%
M15	30,6	29,1	24,9	30,3	26,1	30,9	28,6	18,8%
M20	28,4	20,8	24,0	25,0	20,6	22,7	23,6	33,1%
M25	21,9	22,0	23,2	19,3	24,2	19,3	21,6	38,6%
M30	18,2	19,6	18,0	23,2	20,7	18,8	19,8	44,0%
M35	17,0	18,0	16,7	19,0	20,0	15,5	17,7	49,8%

\*P : panne d'électricité en plein essai

\*Ep : Eprouvette.

Pour une meilleure appréciation des résultats nous avons représenté sur la figure III.12 les résultats des résistances en compressions des différents mortiers en fonction du taux de pourcentage de substitution du ciment par les FMD. Les résultats sont représentés sous forme d'histogramme.



**Figure III.12. Résistances à la compression à 28 jours des mortiers testés**

D'après les résultats présentés sur la figure III.12 on constate que les mortiers formulés avec les FMD présentent des résistances plus faibles que celle enregistrée sur le mortier de référence (sans FMD). Les résistances ont tendance à baisser en fonction du taux de substitution en ciment dans les mortiers.

On passe d'une résistance à 28 jours de 35,3 MPa pour le MR (100 % de ciment) à une résistance de 17.7 MPa pour le mortier M35 (35 % de FMD et 65 % de ciment), soit une baisse de près de 50% de la résistance à 28 jours.

On constate également que la baisse des résistances peut être lissée par une courbe de tendance de type linéaire avec un coefficient de régression  $R^2 = 0.984$ .

Ainsi donc on peut écrire :

$$R_{c28j} = a * \% FMD + b$$

Avec a et b paramètre de la droite de régression égaux à (a = - 2.606 ; b = 37.89).

### III.3.2.1.1- Corrélation entre la Rc à 28 jours et le % en FMD

Pour une meilleure exploitation des résultats nous avons cherché à établir des corrélations entre le % de FMD dans les mortiers et le % de baisse des résistances. La courbe est représentée sur la figure III.13 suivante.

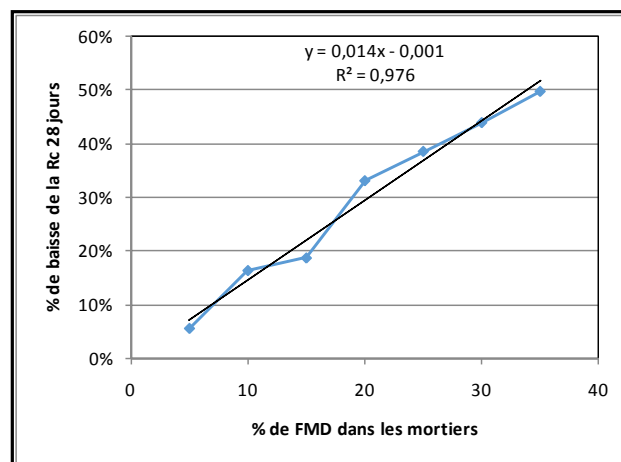


Figure III.13. Corrélation entre la baisse de la résistance à 28 jours et le % de FMD

Selon la figure on voit que pour un pourcentage de substitution du ciment de 35 %, on perd près de 50 % de résistance à 28 jours. La baisse de la résistance est de type linéaire entre le pourcentage de FMD et le pourcentage de baisse en résistance à 28 jours.

### III.3.2.2- Résistance à la flexion à 28 jours

Dans cette partie, on donne la résistance à la flexion à 28 jours, on cherche à savoir comment se comporte les mortiers étudiés en flexion. La résistance à la flexion nous permet de déterminer le niveau de sollicitation admissible en flexion pour les mortiers étudiés. Dans le tableau suivant nous avons donné les résistances moyennes sur trois mesures.

Tableau III.5. Résistance moyenne en Flexion (MPa)

Mortiers	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Moyenne
MR	2,64	4,07	4,37	3,69
M5	3,02	3,64	3,81	3,49
M10	8,57	7,51	5,91	7,33
M15	/	7,20	4,75	5,98
M20	7,02	6,73	8,67	7,47
M25	6,80	7,09	6,33	6,74
M30	6,78	6,80	5,98	6,52
M35	5,67	5,89	6,24	5,93

Pour une meilleure appréciation des résultats nous avons représenté sur la figure III.14 les résultats des résistances en flexions des différents mortiers en fonction du taux de pourcentage de substitution du ciment par les FMD. Les résultats sont représentés sous forme d'histogramme

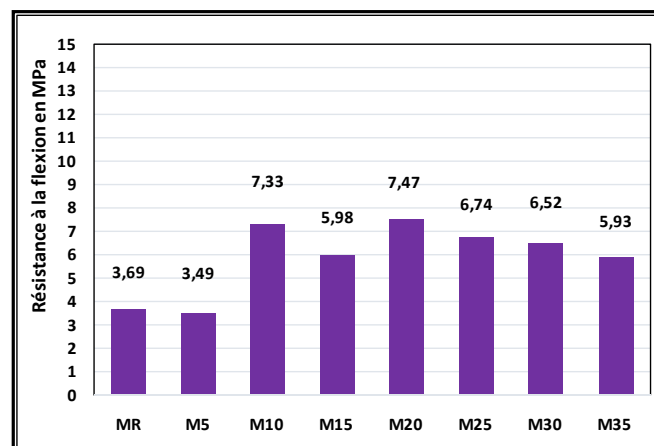


Figure III.14. Résistances à la Flexion à 28 jours des mortiers testés

Tel-que représentés, on constate qu'il n'y a pas une tendance particulière des résultats de résistance à la flexion en fonction du % de FMD. Le MR et le M5 ont des résistances plus faibles que les autres mortiers. Les six autres mortiers ont des résistances moyennes proches de 6,50 MPa.

### III.3.3- Résultats des essais d'auscultation sonore (ultra-son)

Au 28<sup>ème</sup> jours, après être pesées, les éprouvettes prismatiques sont testées à l'ultrason. Les éprouvettes sont donc humides. Les vitesses des ultrasons ont été déterminées par mesure du temps de parcours sur une série de trois éprouvettes pour chaque mortier utilisé.

Les mesures des vitesses à l'ultrason ont été réalisées en mode de transmission directe. Ce mode fournit le maximum d'énergie. Elles sont réalisées par un testeur ultrasonique EN 12504-4 Réf 10.0497 (marque Pundit-Lab), comprenant un transducteur de transmission et un transducteur de

réception de 54 kHz de fréquence. Un type de transducteur de diamètre  $D = 49.5$  mm. Les transducteurs sont mis en contact sur les faces des éprouvettes par l'intermédiaire d'un couplant. Le temps de propagation à travers le mortier est visualisé sur un afficheur digital. La longueur parcourue est de 280 mm et la dimension transversale est de  $7 \times 7$  cm<sup>2</sup> [Fiches technique Pundit Lab].

Un train d'impulsion de vibration est produit au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'éprouvette. Après avoir franchie une longueur de parcours dans le mortier, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation de l'onde ultrasonore (T). La vitesse de propagation de cet ultrason est donnée par la formule suivante :

$$V=L/T$$

Pour une meilleure précision, nous avons répété l'essai trois fois sur chaque éprouvette, et nous avons par la suite calculé la moyenne des trois mesures obtenues sur chaque éprouvette de mortier. Les moyennes ainsi obtenues sont récapitulées dans le tableau III.6 suivant :

**Tableau III.6. Vitesses à l'ultra-son (m/s) obtenues à 28 jours**

<b>Mortiers</b>	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>Moyenne</b>	<b>% de baisse des Vitesses</b>
<b>MR</b>	4568	4583	4595	4582	
<b>M5</b>	4534	4502	4540	4525	1%
<b>M20</b>	4468	4438	4424	4443	3%
<b>M25</b>	4341	4325	4364	4343	5%
<b>M30</b>	4297	4230	4288	4272	7%
<b>M35</b>	4213	4140	4209	4187	9%

Il est a noté que pour les mortiers M10 et M 15, on a eu un problème de réglage, et les résultats sont donc écartés. Et faute de temps, nous n'avons pas pu reprendre ces deux essais.

Pour bien exploiter les résultats des vitesses nous avons calculé les moyennes des vitesses obtenues sur les trois éprouvettes. Ces résultats sont représentés sur un histogramme tel que schématisé sur la figure suivante.

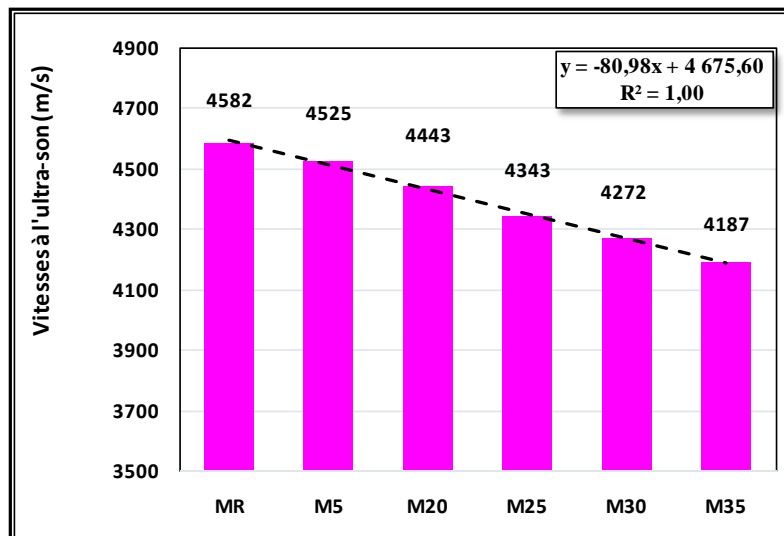


Figure III.15. Vitesses à l'ultra-son à 28 jours des mortiers testés

Les résultats de la figure montrent que les vitesses à l'ultrason pour ces mortiers baissent avec l'augmentation du % de FMD dans les mortiers. Plus il y a de FMD moins les ondes vont vite. Ainsi, la vitesse passe de 4582 m/s pour le mortier à 100% de ciment et 0 % de FMD à 4187 m/s pour le mortier à 65 % de ciment et 35 % de FMD.

En termes de pourcentage, les baisses dans les ondes sont représentées sur la figure suivante.

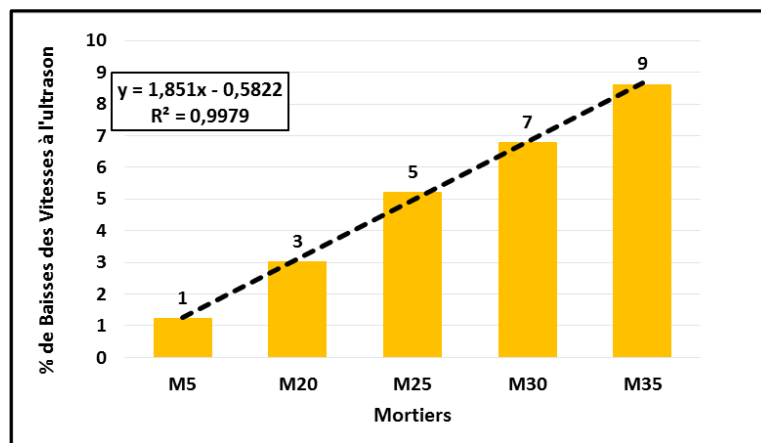


Figure III.16. % de baisses des vitesses à 28 jours des mortiers testés

### III.3.3.1. Corrélation entre la Résistance à la compression et la vitesse à l'ultrason

Dans la pratique l'essai à l'ultrason est désigné comme l'essai non destructif qui permet d'apprécier les propriétés mécanique des bétons, notamment la résistance à la compression. Plusieurs formules sont alors proposées. Ces formules permettent d'exprimer la résistance mécanique en fonction de la vitesse de propagation des ondes ultrasonique dans le béton c'est le cas par exemple de la fonction suivante [25].

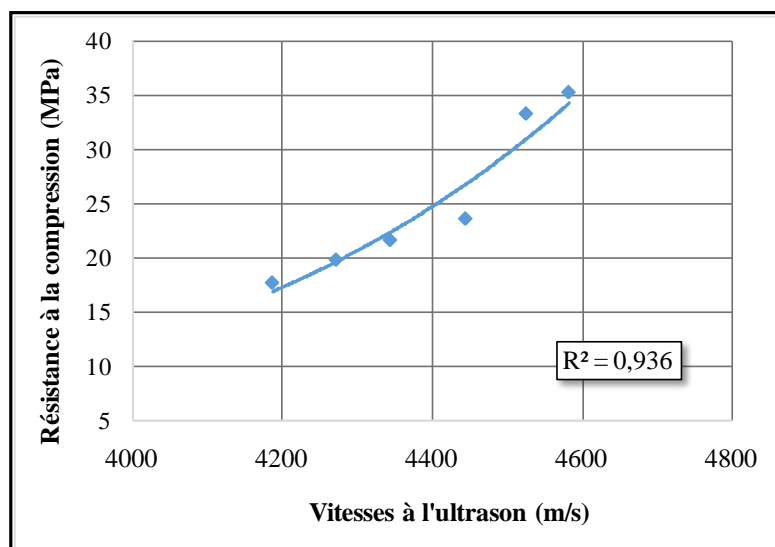
$$\sigma = 16.7 \exp (Ed/122500)$$

Ed module d'élasticité du béton testé, il est calculé à partir des résultats à l'ultrason en utilisant la relation suivant :

$$v^2 = \frac{Ed(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

Tel que présenté pour chaque béton correspond une résistance mécanique caractéristique qui correspond à une vitesse à l'ultrason bien définie.

Pour le cas des mortiers de notre étude, on a essayé d'établir la relation qui lie la contrainte à la mesure de vitesse, nous avons alors tracé la courbe de corrélation de ces deux variables.



**Figure III.17: Corrélation entre la baisse de la résistance à 28 jours et la vitesse à l'ultrason**

Sur la figure III.17 nous avons représenté la courbe de lissage des résultats de corrélation entre la variation de la résistance mécanique à 28 jours en fonction des résultats de ceux obtenus à l'ultrason. Cette équation est de type exponentiel, elle est donnée par l'équation suivante :

$$R_{c28j} = 9 \times 10^{-3} e^{10^{-3} \cdot v}$$

V : vitesse à l'ultrason donnée en m/s.

Le coefficient  $R^2$  obtenu avec cette équation est égal à 0,936.

### III.4 CONCLUSION

L'analyse des résultats de cette étude nous permet d'apprécier l'intérêt d'incorporer des fines obtenues par concassage de mortiers en tant qu'addition minérale dans la constitution d'un mortier.

Les résultats de l'étude montre que les deux mesures (étalement et affaissement) évoluent au même temps de façon proportionnelle en suivant une tendance linéaire. En somme les mortiers perdent de leur plasticité en fonction du pourcentage des FMD dans les mortiers. Plus le % de FMD est grand plus les mortiers deviennent fermes.

Cet effet peut être associé à la demande en eau de cette poudre issue d'un déchet. On pense que la demande en eau des FMD est plus importante que celle du ciment, notamment qu'elle est en réalité un composé granulats et d'une pâte de ciment durcie qui présente une certaine porosité et donc on tendance à absorber une partie de l'eau du mortier. Plus la quantité de FMD augmente, plus la quantité d'eau disponible à l'intérieur du mortier pour fluidifier le mortier au très jeune âge est moindre.

Les résultats présentés ci haut montrent que la plage de variation de la plasticité est beaucoup plus large dans le cas où d-SP/C est constant que dans le cas où il est variable. On pense que cela peut être associé à un effet probable du SP sur les FMD. Effet, qui nécessite des investigations expérimentales supplémentaires pour qu'il soit confirmé.

On constate que les mortiers formulés avec les FMD présentent des résistances plus faibles que celle enregistrée sur le mortier de référence (sans FMD). Les résistances ont tendances à baisser en fonction du taux de substitution en ciment dans les mortiers.

Pour un pourcentage de substitution du ciment de 35 %, on perd près de 50 % de résistance à 28 jours. La baisse de la résistance est de type linéaire entre le pourcentage de FMD et le pourcentage de baisse en résistance à 28 jours.

Les vitesses à l'ultrason pour ces mortiers baissent avec l'augmentation du % de FMD dans les mortiers. Plus il y a de FMD moins les ondes vont vite.

En termes de corrélation, on a pu établir une corrélation entre les deux variables la résistance à 28 jours et la vitesse à l'ultrason. Cette corrélation peut être décrite par une équation de type exponentielle.



---

# *Conclusion Générale*

---

# Conclusion Générale

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les potentialités de l'utilisation des fines de mortier de démolition (FMD) comme addition minérale dans la composition de nouveaux matériaux en occurrence les mortiers. Pour ce faire, nous avons alors substitué un pourcentage de ciment par les FMD des pourcentages allant de 0% à 35 %. L'étude a porté sur trois aspects différents :

- Résistance à la compression à 28 jours des mortiers
- Rhéologie à l'état frais des mortiers, suivie de l'affaissement et de l'étalement au mini-cône d'Abrams.
- Caractérisation des mortiers à l'ultrason à 28 jours.

Sur l'ensemble des essais menés nous avons fait une substitution massique du ciment par les FMD tout en maintenant les autres paramètres de compositions constants : même quantité en ciment, eau. Quant à l'adjuvant nous l'avant fixé de deux manières différentes :

- Dosage en SP constant par rapport à la masse de ciment, soit donc un dosage qui baisse avec la masse de la poudre.
- Dosage en SP constant par rapport à la masse de la poudre, soit donc un dosage qui augmente avec la masse du ciment.

Les résultats obtenus nous ont permis de conclure ce qui suit :

L'utilisation des FMD, comme addition minérale conduit à des résistances à 28 jours plus faibles que celle obtenue sur le mortier de référence à 100 % de ciment. La résistance est inversement proportionnelle au pourcentage de substitution du ciment par les FMD. A 35 % de substitution en FMD nous avons observé une baisse de près de 50 % de la résistance par rapport au mortier formulé avec uniquement du ciment.

En ce qui concerne la rhéologie des mortiers formulés avec ces fines, on a observé pour les deux cas d'étude que la plasticité des mortiers est inversement proportionnelle à la teneur en fines. Les deux mesures (étalement et affaissement) évoluent au même temps de façon proportionnelle en suivant une tendance linéaire. En somme les mortiers perdent de leur plasticité en fonction du pourcentage des FMD dans les mortiers. Plus le % de FMD est grand plus les mortiers deviennent fermes. Ce résultat est constaté pour les deux cas d'étude.

## Conclusion générales

A partir des résultats de la rhéologie, on peut conclure sur le fait que la demande en eau des FMD est plus importante que celle du ciment. En effet, les FMD sont des composés des fractions de granulats et de pâte de ciment durcie qui présente une certaine porosité et donc ont tendance à absorber une partie de l'eau du mortier. Plus la quantité de FMD augmente, plus la quantité d'eau disponible à l'intérieur du mortier pour fluidifier le mortier au très jeune âge est moindre.

Les vitesses à l'ultrason pour ces mortiers baissent avec l'augmentation du % de FMD dans les mortiers. Plus il y a de FMD moins les ondes vont vite.

En termes de corrélation, on a pu établir une corrélation entre les deux variables la résistance à 28 jours et la vitesse à l'ultrason. Cette corrélation peut être décrite par une équation de type exponentielle.

### Perspectives :

Reproduire le même programme expérimental avec une poudre inerte qui n'a aucun apport de résistance. Comparer ces résultats avec ceux déjà menés sur les mortiers avec différents % de FMD. Cette comparaison va nous permettre d'identifier si ces FMD apportent une part de résistance, est ce qu'elles sont actives ou inertes ? Si oui quel sera alors leur coefficient d'équivalence par rapport au ciment ?

Exploiter les résultats d'étude de la chaleur d'hydratation ; étude d'impact de la présence de ces fines sur les réactions d'hydratations :

Là encore deux aspects sont à considérés :

- ❖ Effet lié à la présence de résidus de ciment in-hydratés
  
- ❖ Effet lié au développement de nouvelle surface de nucléation pour les hydrates, surface apportée par la finesse de l'addition, plus la surface spécifique développée à l'intérieur d'un mortier est grande plus les réactions d'hydratations sont accélérées, et inversement moins la surface est importante moins les réactions vont vite.



---

***Références***  
***Bibliographiques***

---

- [1] NEVILLE A., « Propriétés des bétons » édition Eyrolles, 2000.
- [2] M. REGOURD. « L'hydratation du ciment portland », Le béton hydraulique' P.E.N.P.Ch 1982
- [3] AFN 196-NF EN 196-1, « Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques », AFNOR Avril 2006.
- [4] COLLECTION TECHNIQUE CIM-BÉTON, «les bétons – constituants, mécanismes, propriétés à l'état frais et durci, comportements mécanique et dimensionnel » chapitre 3; Tome II., Ecole Française du Béton, pp : 13\_14
- [5] DREUX G., FESTA J., « Nouveau guide du béton et de ses constituants» 8ème édition Eyrolles 2002.
- [6] DUPAIN R., SAINT ARROMAN J.C. « granulats, sols, ciments et bétons », 4ème édition Casteilla 2009.
- [7] F. DE LARRARD « Structures granulaires et formulation des bétons », édition Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000.
- [8] F. DE LARRARD, C. FERRARIS. « Béton frais remanié I et II et III », BLPC. N° 213 pp 73-89, Jav-fév 1998.
- [9] HADDAD O., « Contribution au développement d'outils d'aide a la formulation des BAP relatifs à la rhéologie a l'état frais et à la résistance au jeune âge », thèse de doctorat, France, 2007.
- [10] AITCIN P. C., S. JIANG, B. KIM, P. NKINAMUBANZI, N. PETROV, « l'interaction ciment /superplastifiant cas des polysulfonates », B.L.P.C n°233 juillet - août 2001 pp 87-89.
- [11] ACKER P., « Prise et durcissement des bétons : Les effets thermomécaniques », Techniques de l'ingénieur. Vol. 3, n° C2235, 1988.
- [12] KARA A.R., « Influence des additions minérales sur le besoin en eau et les résistances mécaniques des mélanges cimentaires », thèse de Doctorat, U Cergy Pontoise, décembre 2002.
- [13] BARON J., OLLIVIER J. P., « Les bétons - bases et données pour leur formulation », Association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Editions Eyrolles, Paris, 1997»
- [14] G. DREUX, J. FESTA, « Nouveau guide du béton et de ses constituants» 8° édition Eyrolles 1998.
- [15] BARON J. ET OLIVIER J. P. « La durabilité des bétons », presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1992
- [16] A.KHELIDJ, V.BROGHEL-BOUNY, G. BASTIAN, J. GODIN, G.VILLAIN, « Transfert dans les bétons et durabilité des ouvrages », Laboratoire Centrale des ponts et chaussées.
- [17] OUAMER.A «Les bétons à base de GBD résistances et vitesses à ultrason et porosités ouvertes», mémoire master académique, UMMTO, GC 2014.
- [18]FABER FABBRIS Article de Rhéologie « La rhéologie du béton » Mai/Juin 2013 Laboratoire de la Matière.

- [19]. Mr. BOUALI KHALED « Elaboration et caractérisation thermomécanique des mortiers à base d'ajouts de déchets de briques réfractaires » 2013/2014, Université de Boumerdes.
- [20]. INSTITUT BRUXELLOIS POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT Architectes et professionnels du secteur de la construction « Fiche 4.1 : L'utilisation de granulats issus du recyclage ».
- [21] De Juan M.S. and Gutiérrez P.A., Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 23 (2), pp. 872-877, 2009
- [22] Padmini A.K., Ramamurthy K. and Mathews M.S., Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2), pp. 829-836, 2009
- [23] Etxeberria M., VAZQUEZ A., MARI A. and BARRA M., Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled concrete, *Cement and concrete research*, pp. 2
- [24] CILAS « L'inventeur de la Granulométrie LASER » Mesure de la taille de particule de ciment avec le granulomètre CILAS 990°. Equipement scientifiques SA.
- [25] OUCHERIF Nouara, Utilisation des ondes ultrasoniques pour caractérisation d'un béton immergé dans l'eau ; Thèse de Master, Université de Tizi-Ouzou (2011/2012) « Structure 12 »

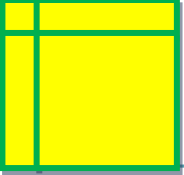


# ***Annexe 1***

---

***Différents essais de  
laboratoires***

---



## *ANNEXE 1 : Différents essais de laboratoire*

### **1. ECHANTILLONNAGE (NF P 18- 553)**

#### **1.1. But et principe de l'échantillonnage**

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, ceux-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble.

En général le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps:

- a) Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai.
- b) Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ.

Lorsqu'il n'est pas possible de prendre tout le tas et de le réduire, on procède à un prélèvement local.

- Prélèvement sur tas normaux (sables et graviers)

a) à la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.

b) à la main, sur tas d'éléments grossiers (gravier concassé) par ratissage dans un récipient voir **figure1.1**

c) au moyen d'une sonde, ouverture 4 ~ 6 cm, longueur 60 ~ 100 cm, extrémité taillée en sifflet.

- Lorsqu'un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments en tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres. On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront mélangées avec soin.

Pour que l'échantillon soit représentatif de l'ensemble on prélèvera les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulat.

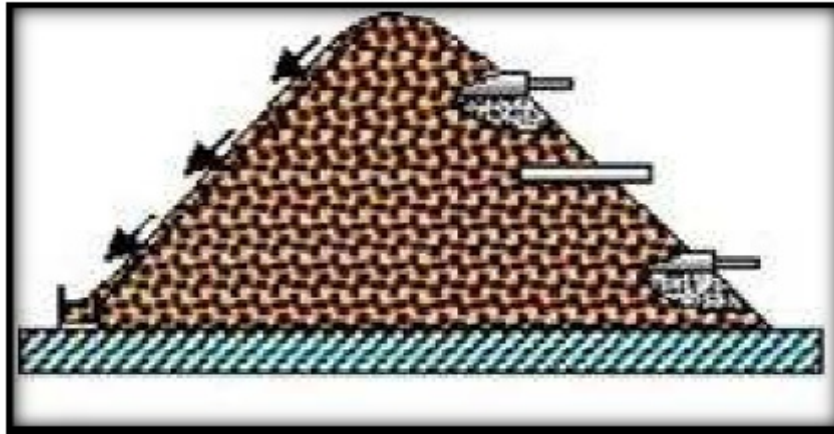


Figure I.1. Le matériau en stock.

### b. Prélèvement en laboratoire (échantillonnage en laboratoire)

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur. L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105 °C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60 °C dans le cas contraire.

#### 1.2. Quartage

Il s'agit d'une méthode manuelle qui ne demande que peu de matériel (**figure1.2**): Verser l'échantillon en un cône régulier sur un plateau horizontal ; à l'aide d'une petite pelle, séparer le cône verticalement par son sommet en deux moitiés symétriques et écarter l'une des deux moitiés de quelques centimètres; scinder ensuite les deux moitiés par un nouveau plan vertical perpendiculaire au premier, puis séparer l'échantillon de sorte que l'on obtienne quatre quarts de cône identiques ; Prélever et rassembler les quarts 1 et 3 (**figure1.2**) avec lesquels l'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la quantité désirée.

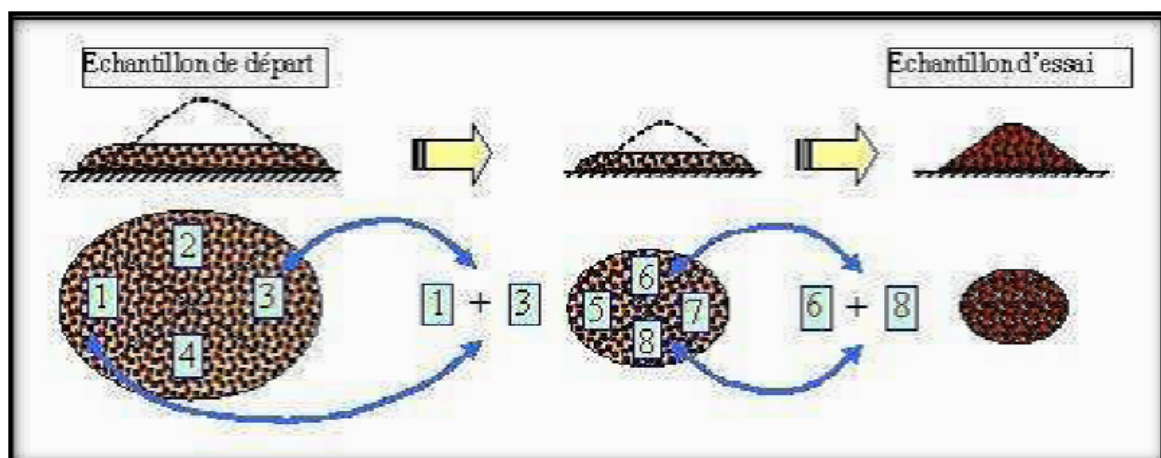


Figure I.2. Opération de quartage

### 1.3. Echantillonneur (quarteur)

Un échantillonneur ou diviseur d'échantillons a comme but de diviser une certaine quantité de matière meuble (exp : un gravier, un sable, ou tout mélange de fragments résultant d'un concassage) en deux portions de poids égaux. L'une des portions peut à son tour être passée dans le quarteur (et ainsi de suite), jusqu'à l'obtention de la quantité réduite désirée, qui sera toujours représentative de l'échantillon de départ.



*Figure 1.3. Echantillonneur utilisé*

#### Aspects pratiques

Les pièces typiques d'un système de quartage sont (**Figure 1.3**) :

- Le quarter lui-même, caractérisé par un dispositif de rainures (fentes) parallèles à directions de déversement alternativement opposées engendrant la séparation de l'échantillon. La largeur des rainures varie selon le modèle de quarter.
- Trois bacs de tailles adaptées au quarter permettant de verser l'échantillon (bac 1) et de récolter les deux moitiés de l'échantillon (bacs 2 et 3).

Le procédé peut être résumé par la (**figure 1.4**) ci-dessous. Celle-ci permet de sélectionner une masse (m) à partir d'un prélèvement de masse 3m.

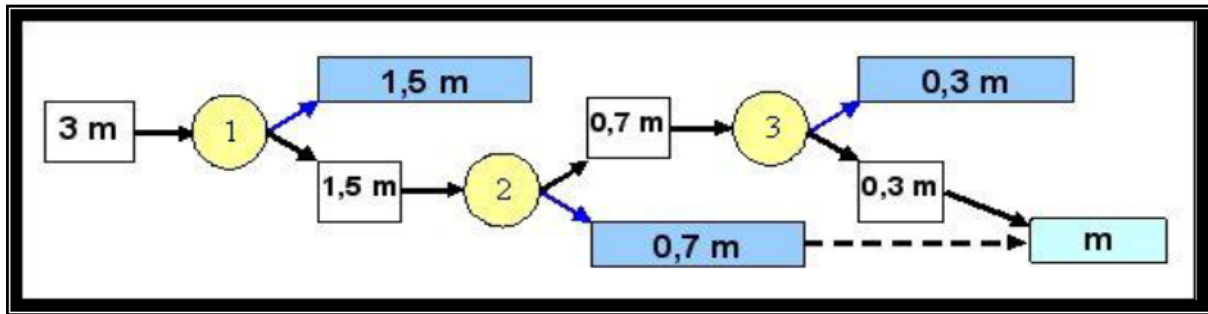


Figure 1.4. Schéma d'une opération de répartition des matériaux en utilisant de l'échantillonneur.

## 2. ANALYSE GRANULOMETRIQUE (EN 933-1 ET EN 933-2)

### 2.1-Importance de la composition granulométrique :

Les propriétés physiques et mécaniques du béton dépendent de beaucoup de facteurs.

Généralement on souhaite obtenir un béton résistant, étanche et durable. Pour atteindre ce but, il faut:

- Que le béton à l'état frais soit facile à mettre en œuvre et à compacter (pour réduire la porosité).
- Un maximum de granulats par unité de volume de béton (pour réduire la quantité de pâte liante nécessaire pour remplir les vides, tous les vides devant être remplis de pâte liante).
- Un minimum de surface spécifique (pour réduire la quantité d'eau de gâchage et obtenir un rapport C/E plus élevé).

Par ailleurs :

- Il faut choisir  $D_{max}$  aussi grand que le permet la dimension minimum de la pièce à bétonner et l'encombrement des granulats.
- La proportion de chaque dimension des grains doit être choisie de façon à remplir les vides laissés par les grains de dimensions supérieures.
- Il faut réduire la teneur en éléments fins au minimum requis pour obtenir une bonne maniabilité et une bonne compacité.

Les courbes granulométriques apporteront quelques éléments de réponses à ces conditions.

### 2.1. But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63 mm, à l'exclusion des fillers. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse

à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

## 2.2. Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis emboîtés les uns sur les autres un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

Avant l'opération de tamisage, l'échantillon est lavé au-dessus d'un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les fines et éviter ainsi l'agglomération des grains, ceci pouvant fausser les résultats de l'analyse. L'analyse granulométrique est conduite sur la fraction refusée par le tamis de 0,063 mm. La dimension nominale des tamis est donnée par l'ouverture de la maille, c'est-à-dire par la grandeur de l'ouverture carrée. Ces dimensions sont telles qu'elles se suivent dans une progression géométrique de raison  $\sqrt[10]{10}$  (Voir tableau 1.1), depuis le tamis 0,063 mm jusqu'au tamis 125 mm.

*Tableau 1.1 : Dimensions nominales des tamis selon norme EN 933-2.*

<b>Tamis (mm)</b>	0	0.063	0.08	0.1	0.125	0.160	0.2	0.25	0.315	0.4	0.5	0.63
<b>Tamis (mm)</b>	0.8	1	1.25	1.6	2	2.5	3.15	4	5	8	10	12.5
<b>Tamis (mm)</b>	14	16	20	25	31.5	40	50	80	100	125		

## 2.3. Conduite de l'essai

La prise d'essai est séchée à  $(110 \pm 5)$  °C jusqu'à masse constante puis pesée (**masse M 1**). On réalise ensuite un tamisage par lavage afin de séparer les éléments de dimension inférieure à 0,063 mm du reste de l'échantillon. Le lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'eau passant au travers du tamis de 0,063 mm soit claire. L'échantillon ainsi préparé est alors séché à  $(110 \pm 5)$  °C. Après refroidissement il est pesé jusqu'à masse constante (**masse M2**). Le tamisage à sec peut alors être réalisé.

### Dimensions des tamis utilisés

En fonction des dimensions d/D des matériaux analysés, on utilisera la série de tamis préconisée par la norme EN 933-2 (**tableau 1.1**)



*Figure 1.5. Colonne de tamis utilisée*

**Note :** Pour des raisons du manque de certains tamis dans notre laboratoire, nous avons adapté notre série de tamis de façon à ce qu'elle soit la plus proche possible de celle définie par la norme (EN 933-1 et EN 933-2).

### **Préparation de l'échantillon**

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires :

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif,
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

Dans la pratique, la masse utilisée sera telle que :  $M \geq 0,2D$  avec :

M : masse de l'échantillon en kg ;

D : diamètre du plus gros granulat exprimé en mm.

### **Description de l'essai**

Le matériau séché, de masse  $M_2$ , est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. En partie inférieure, on dispose un tamis de 0,063 mm surmontant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui n'auraient pas été entraînés par le lavage initial. Un couvercle est également disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage.

On appellera **tamisât** le poids de matériau passant à travers un tamis donné et **refus** le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la **colonne de tamis** et celle-ci est vibrée à l'aide de la **tamiseuse électrique**. Le temps de tamisage varie avec le type de machine utilisé, mais dépend également de la charge de matériau présente sur le tamis et de son ouverture. Un étalonnage de la machine est donc nécessaire.

### 3. ABSORPTION (NF P 18- 555)

#### 3.1. But de la mesure

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne qui est préjudiciable, en particulier, à la résistance au gel des bétons. En effet, l'eau incluse dans le granulat provoque l'éclatement du béton lorsque celui-ci est soumis de manière prolongée à des basses températures.

#### 3.2. Principe de la mesure

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20 °C. Le coefficient d'absorption ( $A_b$ ) est défini par la relation :

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

$M_s$  = masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C.  $M_a$  = masse de l'échantillon imbibé, surface sèche déterminée comme suit.

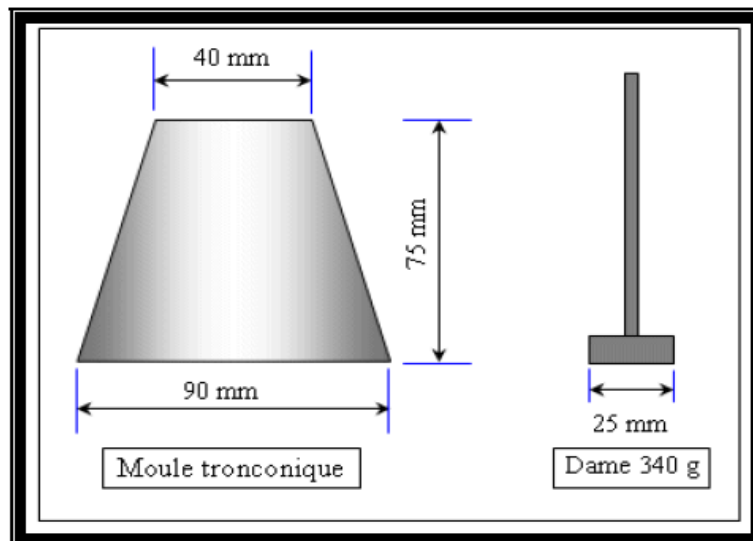
#### Détermination de la masse imbibée à surface sèche cas des sables

Après imbibition dans l'eau pendant 24 heures, étaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le soumettre à un flux d'air chaud, tout en le remuant afin que la surface externe des grains sèche. Ce séchage doit être effectué de manière douce afin de ne pas éliminer l'eau qui pourrait être piégée à l'intérieur du granulat. Veiller également à ne pas perdre de grains de sable au cours de l'opération. Les grains sont alors libres de toutes forces d'attraction capillaire.



*Figure I.6. Différents étapes de détermination de l'absorption du sable*

On peut vérifier que cet état a été atteint en plaçant le matériau dans un moule tronconique, posé sur une surface plane non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant (figure I.6)



*Figure I.7. Moule et dame pour coefficient d'absorption des graviers.*

### Détermination de la masse imbibée à surface sèche cas des gravillons (NF P 18 554)

Après imbibition, l'échantillon est soigneusement épongé avec un tissu absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement. Il est ensuite pesé.



*Figure 1.8 étapes de déterminations de l'absorption des granulats cas de graviers*



# *Annexe 2*

---

*Résultats des différents  
essais de  
caractérisations*

---

**ANNEXE 2 : Résultats des différents essais de caractérisation****Les différents résultats expérimental des granulats utilisé dans notre étude**

Dans cette annexe nous avons représenté les différents résultats expérimentaux des granulats utilisés dans notre étude

## 1) Analyse granulométrique du Sable 0/3:

<b>Matériau: Sable 0/3</b>				
Nature	<b>Gravier semi concassé 0/3</b>			
Provenance	<b>Gravier de Tizi-Ouzou</b>			
Date D'analyse	08/05/2016			
<b>Masse initial à l'état sec en (g)</b>				
	M1=	2000g		
<b>Masse après le tamisage</b>				
	M2=	1995,5g		
<b>Perte des granulats en (g)</b>				
	M1-M2=	4,5g		
	P=	4,5g		
Tamis (mm)	Refus (g)	Refus cum(g)	Refus Cumulé (%)	Tamisats C(%)
5	0	0	0	100
4	2,5	2,5	0,125	99,87
3,14	117,5	120	6	94
2,5	215,5	335,5	16,77	83,23
1,25	642,5	978	48,9	51,1
0,63	271,5	1249,5	62,47	37,53
0,315	353	1602,5	80,125	19,87
0,16	206	1808,5	90,425	9,57
0,08	115,5	1924	96,2	3,8
Fond	71,5	1995,5	99,77	0,23

## 2) Analyse granulométrique des FMD :

<b>Matériau: FMD</b>					
Nature	<b>Fines de Mortiers de démolition</b>				
Provenance	<b>Recyclage de Mortiers</b>				
Date D'analyse	08/05/2016				
Tamis (µm)	Refus (g)	Refus cum(g)	Refus Non Cumulé (%)	Refus (%)	Tamisa C(%)
800	0,2	0,2	0,04	0,04	99,96
600	13,8	14	2,76	2,8	99,2
400	57,2	71,2	11,44	14,24	85,76
250	113,7	184,9	22,74	36,98	63,02
125	120,5	305,4	24,1	61,08	38,92
100	150,5	455,9	30,1	91,18	8,82
63	25,6	481,5	5,12	96,3	3,7
50	7,3	488,5	1,46	97,7	2,24
10	6,5	495,3	1,3	99,06	0,94

**2. Absorption des granulats utilisés****2.1 Sable**

Les résultats de l'absorption du sable sont obtenus en passant par le procédé déjà expliqué dans l'annexe 1

Le calcul des différentes caractéristiques des granulats a été réalisé en utilisant les formules suivantes :

- Masse volumique absolue : 
$$\rho_a = \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

- Masse volumique réelle déterminée par séchage à l'étuve :  $\rho_{rd} = \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$

- Masse volumique saturée à surface sèche :  $\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$

<b>Sable 00/3</b>	
M1 ( masse après séchage )	705,00
M2 ( masse de récipient +verre+eau +sable)	4448,50
M3 (masse d'eau +récipient+verre)	4004,00
M4 (masse après passage à l'étuve)	699,50
Mv absolue	2,74
Mv réelle	2,68
Mv saturée à surface sèches	2,71
Absorption	<b>0,79</b>

**FIN**