

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



**Laboratoire Génie Minier**

المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر



Groupe Industriel des Ciments d'Algérie

Département Génie Minier

Laboratoire Génie Minier

GICA –Centre d'Études et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de Construction (CETIM)

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Utilisation des rejets miniers des districts de Kherzet Youcef (W.Setif) et de Boucaid (W.Tissemsilt) pour la confection du béton : Etude de leurs comportements mécanique et environnemental**

Nakib AMARI

Sous la direction de Dr Amira MERCHICHI et Pr Malek OULDHAMOU

Présenté et soutenu publiquement le (10/07/2023)

**Composition du Jury :**

Président	M. Elabes MOUSSAOUI,	MAA	ENP
Promoteur	Mme .Amira MERCHICHI,	MCB	ENP
Co-Promoteur	M. Malek OULDHAMOU,	Pr	ENP
Examineur	M. Mouloud ISSAAD,	MCB	USTHB
Invité	M. Mohamed KORICHI,	ING	CETIM

ENP 2023



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



**Laboratoire Génie Minier**

المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر



Groupe Industriel des Ciments d'Algérie

Département Génie Minier

Laboratoire Génie Minier

GICA –Centre d'Études et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de  
Construction (CETIM)

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Utilisation des rejets miniers des districts de Kherzet  
Youcef (W.Setif) et de Boucaid (W.Tissemsilt) pour la  
confection du béton : Etude de leurs comportements  
mécanique et environnemental**

Nakib AMARI

Sous la direction de Dr Amira MERCHICHI et Pr Malek OULDHAMOU

Présenté et soutenu publiquement le (10/07/2023)

**Composition du Jury :**

Président	M. Elabes MOUSSAOUI,	MAA	ENP
Promoteur	Mme. Amira MERCHICHI,	MCB	ENP
Co-Promoteur	M. Malek OULDHAMOU,	Pr	ENP
Examineur	M. Mouloud ISSAAD,	MCB	USTHB
Invité	M. Mohamed KORICHI,	ING	CETIM

ENP 2023

## ملخص

يهدف المشروع إلى دراسة استخدام نفايات التعدين من منطقتي خرزة يوسف (ولاية سطيف) وبوقايد (ولاية تيسمسيلت) لتصنيع الخرسانة. كان الهدف هو استعادة هذه التصريفات الوفيرة من أجل حماية البيئة. تتكون الطريقة من الاستبدال الجزئي للرمال بنفايات التعدين في تكوين الخرسانة. المشروع مقسم لعدة أجزاء :

- 1) توصيف نفايات التعدين والمواد الخام ، وكذلك صياغة محددة للخرسانة مع الاستبدال الجزئي لنفايات التعدين.
- 2) إجراء اختبارات مقاومة الانضغاط لتقييم السلوك الميكانيكي للخرسانة
- 3) إجراء اختبارات متانة اختراق الماء لدراسة سلوكها البيئي.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها جدوى الاستبدال الجزئي لمخلفات التعدين في الخرسانة ، بأداء ميكانيكي مرضٍ وتحسين الاستدامة البيئية.

**الكلمات المفتاحية:** استعادة ، البيئة ، الخرسانة ، نفايات التعدين ، الاستدامة ، التصنيع

## Abstract

The aim of this project is to study the possibility of using mining waste from the districts of Kherzet Youcef (wilaya of Sétif) and Boucaid (wilaya of Tissemsilt) for the production of concrete. The recovery of these tailings would make it possible to free up appreciable surfaces which will be allocated to other uses and to protect the environment. The method consists of partially substituting sand with mining waste in the composition of the concrete. The project is divided into several parts:

- 1) A characterization of mining waste and raw materials, as well as the specific formulation of concrete with the partial substitution of mining waste.
- 2) Carrying out compressive strength tests to assess the mechanical behavior of the concrete,
- 3) Water penetration durability tests were carried out to study the environmental behavior of the concrete.

The results obtained showed that the partial substitution of mining waste in concrete is a possibility, since satisfactory mechanical performance was achieved with an improvement in its environmental sustainability.

**Keywords:** recovery, environment, concrete, mining waste, sustainability, manufacture

## Résumé

Le but de ce projet est l'étude de la possibilité d'utilisation des rejets miniers provenant des districts de Kherzet Youcef (wilaya de Sétif) et Boucaid (wilaya de Tissemsilt) pour la fabrication du béton. La valorisation de ces rejets permettrait de dégager des surfaces appréciables qui seront affectées à d'autres utilisations et de protéger l'environnement. La méthode consiste à substituer partiellement le sable par les rejets miniers dans la composition du béton. Le projet est divisé en plusieurs parties :

- 1) Une caractérisation des rejets miniers et des matières premières, ainsi que la formulation spécifique du béton avec la substitution partielle des rejets miniers.

- 2) Réalisation des essais de résistance à la compression pour évaluer le comportement mécanique du béton,
- 3) Des essais de durabilité de pénétration d'eau ont été effectués pour étudier le comportement environnemental du béton.

Les résultats obtenus ont montré que la substitution partielle des rejets miniers dans le béton est une possibilité, puisque des performances mécaniques satisfaisantes ont été atteintes avec une amélioration de sa durabilité environnementale.

**Mots clés** : valorisation, environnement, béton, rejet minier, durabilité, confection

## *Remerciement*

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers Allah, le Tout-Puissant, pour sa guidance, sa protection et ses bénédictions tout au long de mon projet de fin d'études.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ma promotrice, Docteur **Amira MERCHICHI**. Elle est une véritable idole pour moi et une source inépuisable de motivation. Sa présence bienveillante, son expertise exceptionnelle et son soutien indéfectible ont été les piliers de mon parcours académique. Sa passion pour la recherche, son dévouement sans faille et son mentorat précieux ont été une inspiration constante. Je suis honoré d'avoir eu la chance de travailler sous sa direction et je la remercie du fond du cœur pour son rôle essentiel dans ma réussite.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers mon co-promoteur, Professeur **OULD HAMOU Malek**, directeur du laboratoire de génie minier. Son ouverture d'esprit, sa générosité et sa disponibilité sans faille ont été d'une valeur inestimable tout au long de ce projet. Il a su non seulement ouvrir les portes de laboratoire, mais aussi de son cœur, en partageant son expertise et ses conseils précieux.

Mes remerciements vont également à Monsieur **KORICHI Mohamed** de l'entreprise CETIM, qui m'a apporté un soutien précieux et des conseils avisés. Je tiens également à remercier tous les ingénieurs et cadres de cette entreprise pour leur assistance et leur collaboration précieuses.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude envers Monsieur **MOUSSAOUI Elabes** d'avoir accepté d'être le président du jury de ma soutenance

Je suis extrêmement reconnaissant envers Docteur **ISSAAD Mouloud** d'avoir accepté d'examiner mon travail. Et je suis honoré par sa présence

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance envers l'ingénieure du laboratoire de génie civil, **Samia**, et le technicien **Ahmed** pour leur aide précieuse.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude envers l'équipe pédagogique du département de génie minier pour leur dévouement exceptionnel et leur engagement envers une formation de qualité.

Je souhaite également remercier chaleureusement mes collègues de promotion pour leur collaboration, leur soutien et les échanges enrichissants tout au long de notre parcours. Leur présence a été une source de motivation et d'inspiration.

Je tiens à exprimer mes excuses si j'ai omis de mentionner quelqu'un d'autre qui a joué un rôle important dans la réalisation de ce projet

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes proches pour leur amour, leur soutien indéfectible et leurs encouragements constants tout au long de ce projet. Leur soutien a été essentiel dans la réalisation de mes objectifs académiques.

## *Dédicace*

Je dédie ce travail à mes chers parents, qui ont été ma source de soutien inébranlable et d'inspiration tout au long de ma vie. Leurs encouragements et leur amour inconditionnel ont été mes moteurs pour atteindre mes objectifs. Je suis également reconnaissant envers mes sœurs pour leur soutien constant et leurs précieux conseils.

Je souhaite également exprimer ma gratitude envers mes grands-mères pour leurs prières sincères et leur affection constante. Leurs bénédictions ont été une source de réconfort et de force tout au long de mon parcours académique.

Mes oncles et tantes ont également joué un rôle important dans ma vie, me prodiguant des conseils avisés et me soutenant dans mes choix. Je leur suis reconnaissant pour leur présence et leur soutien inconditionnel.

Je dédie également ce travail à tous mes cousins et cousines, qui ont partagé avec moi des moments de joie, de rires et de souvenirs inoubliables. Leur amitié et leur soutien ont été précieux dans ma vie.

Je souhaite également adresser mes remerciements à mes chers amis du G1 : Nabil, Noro, Belkacem, Hamza et spécialement Sami et Salim. Leur amitié sincère, leur soutien constant et leur encouragement ont été des éléments clés dans ma réussite. Leurs précieux conseils et leurs moments de partage resteront gravés dans ma mémoire.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes que j'ai eu la chance de connaître et de croiser dans ma vie. Chacune d'entre elles a contribué à ma croissance personnelle et m'a apporté des leçons inestimables.

Je dédie ce travail à toutes ces personnes qui ont été présentes à mes côtés, m'encourageant, me soutenant et m'inspirant tout au long de ce parcours. Leur impact sur ma vie est immense et je leur suis infiniment reconnaissant.

## *Table de matières*

Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction .....	14
Chapitre 1 : Présentation des sites.....	15
Partie 1 : district de Kherzet Youcef .....	15
1 Situation Géographique : .....	15
2 Aspect géologique :.....	16
2.1 Géologie régionale.....	16
2.2 Géologie locale .....	18
2.2.1 Mine de Kherzet Youcef .....	18
2.2.2 Mine de chaabet El Hamra .....	20
3 Minéralisation : .....	21
4 Traitement .....	22
4.1 Préparation mécanique .....	23
4.2 Broyage et classification.....	24
4.3 Flottation et filtration.....	26
Partie 2 : district de Boucaid .....	26
1 Situation Géographique : .....	26
2 Historique.....	27
3 Aspect géologique.....	28
3.1 Géologie régional .....	28
3.2 Géologie locale .....	29
3.2.1 Gisement de Sidi Belabbes :.....	29
3.2.2 Gisement de Lakhdar : .....	29
3.2.3 Gisement Nord : .....	30
4 Minéralisation : .....	30
5 Traitement .....	30
5.1 Concassage : .....	30
5.2 Enrichissement : .....	31
5.3 Pulvérisation et conditionnement : .....	31
Chapitre 2 : Revue bibliographique .....	33
1 L'activité minière et son impact sur l'environnement .....	33

2	Méthodes de gestion .....	36
2.1	Sur le site minier.....	36
2.1.1	Désulfuration environnementale : .....	36
2.1.2	Barrière à l'oxygène : .....	37
2.1.3	Les recouvrements étanches et contrôle des infiltrations d'eau: .....	37
2.1.4	Neutralisation : .....	37
2.2	En dehors du site minier .....	37
3	Réhabilitation.....	37
4	Valorisation.....	38
5	Défi de réutilisation.....	39
6	Industrie de fabrication béton .....	40
7	Procédé de fabrication du béton.....	41
8	Matière première : .....	42
8.1	Le ciment .....	42
8.2	Les granulats.....	42
8.3	Eau de gâchage .....	42
8.4	Les adjuvants .....	43
9	Utilisation des déchets miniers comme matière alternative dans la fabrication béton .....	43
10	Propriétés technologiques .....	44
10.1	Propriétés mécaniques: .....	44
10.2	La teneur en particules fines (< 20 µm) : .....	44
10.3	Maniabilité : .....	44
10.4	Le temps de prise : .....	44
11	Comportement environnemental .....	45
Chapitre 3 : Matériels et protocoles analytiques .....		46
1	Échantillonnage : .....	46
2	Préparation des rejets .....	47
2.1	Séchage : .....	47
2.2	Préparation mécanique des échantillons.....	48
2.3	Homogénéisation .....	49
3	Caractérisation matière première .....	50
3.1	Caractérisation physique : .....	50
3.1.1	Granulométrie : <b>NF-EN 933-1</b> .....	50
3.1.2	Teneur en eau : <b>NF EN 1097-5</b> .....	52
3.1.3	Calcul du pH : .....	53
3.1.4	Masse volumique : <b>NF EN 1097-6</b> .....	54

3.1.5	Bleu méthylène <b>NF EN 933-9</b> .....	56
3.1.6	Capacité d'échange cationique : .....	60
3.1.7	Equivalent de sable : <b>NF EN 933-8</b> .....	60
3.2	Caractérisation chimique .....	64
	Spectrométrie de fluorescence aux rayons x .....	64
3.3	Minéralogique.....	64
	Spectrométrie diffraction rayon x .....	64
4	Formulation du béton :.....	65
4.1	Dosage en ciment et en eau : .....	66
4.1.1	La résistance souhaitée :.....	66
4.1.2	Détermination du rapport C/E :.....	66
4.1.3	Détermination de coefficient granulaire G :.....	66
4.1.4	Détermination du dosage en ciment C (kg/m <sup>3</sup> ) : .....	67
4.2	Détermination des pourcentages des agrégats .....	67
4.3	Coefficient de compacité ( $\gamma$ ).....	69
5	Caractérisation du béton .....	75
5.1	Caractérisation physique du béton :.....	75
5.1.1	Masse volumique du béton frais : <b>NF EN 12350-6</b> .....	75
5.1.2	Affaissement : <b>NF EN 12350-2</b> .....	76
5.2	Etude de comportement mécanique norme <b>NF EN 12690-3</b> .....	76
5.3	Etude de comportement environnemental .....	77
	CHAPITRE 4 Résultats et interprétations.....	80
1	Caractérisation de la matière première .....	80
1.1	Caractérisation physique : .....	80
1.1.1	Granulométrie : .....	80
1.1.2	<b>Module de finesse</b> : (pour le sable et les rejets) .....	83
1.1.3	Teneur en eau .....	83
1.1.4	pH :.....	84
1.1.5	Masse volumique.....	84
1.1.6	Bleu méthylène.....	85
1.1.7	Capacité d'échange cationique : .....	85
1.1.8	Equivalent de sable : .....	86
1.2	Caractérisation chimique .....	86
	Spectrométrie florissante rayon x (FRX) .....	86
1.3	Caractérisation minéralogique .....	87
	Spectrométrie diffraction rayon x (DRX) .....	87

1.4	Caractérisation nvironnementale .....	89
	Essai sobek .....	89
2	Formulation du béton : .....	90
2.1	Dosage en ciment et en eau : .....	90
2.1.1	La résistance souhaitée : .....	90
2.1.2	Détermination du rapport C/E : .....	90
2.1.3	Détermination du dosage en ciment C (kg/m <sup>3</sup> ) .....	90
2.1.4	Détermination des pourcentages des agrégats .....	90
2.1.5	Coefficient de compacité ( $\gamma$ ) .....	91
3	Caractérisation du béton .....	93
3.1	Caractérisation physique du béton : .....	93
3.1.1	Masse volumique du béton frais .....	93
3.1.2	Affaissement .....	93
3.2	Etude du comportement mécanique .....	94
3.3	Etude de comportement environnementale .....	98
4	Interprétation générale : .....	99
	Conclusion générale .....	101
	Annexes .....	104
1	ANNEXE A .....	104
2	ANNEXE B .....	105
3	ANNEXE C .....	105
	Références Bibliographiques .....	108

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau 1 : Coordonnées UTM de la mine de Kherzet Youcef et Chaabet El Hamra (MERCHICHI Amira, 2013).....</b>	<b>15</b>
<b>Tableau 2: Stratigraphie de la région du Hodna (BOUSDIRA Dina, 2009).....</b>	<b>17</b>
<b>Tableau 3: Minéralisation des mines Kherzet Youcef et Chaabet El Hamra.....</b>	<b>22</b>
<b>Tableau 4 : Coordonnées UTM de la mine et l'usine de Boucaid (Google earth) .....</b>	<b>27</b>
<b>Tableau 5: Coordonnées des échantillons prélevés.....</b>	<b>46</b>
<b>Tableau 6: Prise des masses d'échantillons.....</b>	<b>50</b>
<b>Tableau 7 : Prise des masses des échantillons pour l'essai de masse volumique.....</b>	<b>55</b>
<b>Tableau 8 : Coefficient G.....</b>	<b>66</b>
<b>Tableau 9 : Corrections d'ordonnée de point de cassure A .....</b>	<b>68</b>
<b>Tableau 10 : Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage.....</b>	<b>69</b>
<b>Tableau 11 : Granulométrie des granulats .....</b>	<b>80</b>
<b>Tableau 12 : Granulométrie des rejets.....</b>	<b>81</b>
<b>Tableau 13: Résultats du module de finesse .....</b>	<b>83</b>
<b>Tableau 14 : Résultats de la teneur en eau.....</b>	<b>83</b>
<b>Tableau 15 : Résultats du pH.....</b>	<b>84</b>
<b>Tableau 16 : Résultats des masses volumiques.....</b>	<b>84</b>
<b>Tableau 17 : Résultats de bleu de méthylène.....</b>	<b>85</b>
<b>Tableau 18 : Résultats de CEC .....</b>	<b>85</b>
<b>Tableau 19 : Résultat FRX et pourcentages des éléments chimiques présents dans les rejets .....</b>	<b>86</b>
<b>Tableau 20 : Table des minéraux du rejet R1 .....</b>	<b>88</b>
<b>Tableau 21: Table des minéraux du rejet R2 .....</b>	<b>88</b>
<b>Tableau 22: Table des minéraux du rejet R3 .....</b>	<b>89</b>
<b>Tableau 23: Résultats des essais statiques.....</b>	<b>89</b>
<b>Tableau 24 : Résultats des quantités pour la formulation d'un mètre cube de béton .....</b>	<b>91</b>
<b>Tableau 25: Quantité optimale pour la formulation témoin .....</b>	<b>92</b>
<b>Tableau 26: Masse du sable et les rejets dans les formulations .....</b>	<b>92</b>
<b>Tableau 27 : Résultats de la masse volumique du béton frais.....</b>	<b>93</b>
<b>Tableau 28 : Résultats d'affaissement.....</b>	<b>93</b>
<b>Tableau 29: Résultats des résistances à la compression .....</b>	<b>94</b>
<b>Tableau 30 : Résultats de la pénétration d'eau .....</b>	<b>98</b>
<b>Tableau 31: Tableau récapitulatif des résultats .....</b>	<b>99</b>

## *Liste des figures*

<b>Figure 1: Situation géographique de la mine de Kherzet Youcef .....</b>	<b>15</b>
<b>Figure 2: Schéma structural de la chaîne des Maghrébides (wildi, 1981).....</b>	<b>16</b>
<b>Figure 3: Carte géologique de la région Ain Azal .....</b>	<b>17</b>
<b>Figure 4: Zones susceptibles d'être affectées par la présence de polluants métalliques sur le site de Kherzet Youcef. (MERCHICHI Amira, 2013).....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 5: Coupe schématique du gisement de Chabet- El- Hamra avec la disposition des six Lentilles composant les deux corps minéralisés (MERCHICHI Amira, 2013) .....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 6: Usine de traitement complexe Kherzet Youcef (AKACHE Aymen ; BEDGHIOU Kaouther, 2021).....</b>	<b>22</b>
<b>Figure 7: Schéma de traitement du minerai zincifère du complexe de Kherzet Youcef (MERCHICHI Amira, 2013).....</b>	<b>25</b>
<b>Figure 8: Situation géographique du district boucaïd .....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 9: Schéma de traitement du minerai zincifère du complexe de Kherzet Youcef (MERCHICHI Amira, 2013).....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 10: Schéma descriptif du processus de traitement du minerai de baryte (MOKRANE Islem , 2021).....</b>	<b>32</b>
<b>Figure 11: Etapes de la production du DMA (AUBERTIN et al. 2002) .....</b>	<b>34</b>
<b>Figure 12: Phases de formation du DMA.....</b>	<b>35</b>
<b>Figure 13: Schéma de fabrication du béton .....</b>	<b>41</b>
<b>Figure 14: Proportions de la matière première pour la fabrication du béton .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 15: Points de prélèvement des échantillons.....</b>	<b>46</b>
<b>Figure 16: Illustration des points prélevés au niveau des digues à terrils de Boucaïd.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure 17: Échantillons de rejets de baryte Boucaïd .....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 18: Échantillons de rejet plomb-zinc Boucaïd .....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 19: Échantillons de baryte après concassage et tamisage.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 20: Rejet plomb-zinc Boucaïd homogène (R2) .....</b>	<b>49</b>
<b>Figure 21 : Rejet de Baryte Boucaïd homogène (R3).....</b>	<b>49</b>
<b>Figure 22: Rejet de plomb-zinc de Kherzet Youcef (R1) .....</b>	<b>49</b>
<b>Figure 23: Prises des masses des granulats et rejets .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure 24: Etuve de séchage .....</b>	<b>51</b>
<b>Figure 25: Lavage des échantillons.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure 26: Tamisage des échantillons.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure 27 : Préparation des solutions .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 28 : Préparation des rejets solides .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 29: Agitation des solutions.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 30 : Calcul du pH à l'aide du pH mètre .....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 31 : Calcul de la masse volumique pour les rejets.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure 32 : Calcul de la masse volumique pour les granulats .....</b>	<b>56</b>
<b>Figure 33 : Essai de bleu de méthylène.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure 34 : Tache de bleu après observation d'auréole .....</b>	<b>59</b>
<b>Figure 35 : Solution lavante et fluctuante .....</b>	<b>61</b>
<b>Figure 36 : Mesure de la hauteur des fines .....</b>	<b>63</b>
<b>Figure 37: Agitation rectiligne du cylindre.....</b>	<b>63</b>
<b>Figure 38 : Schéma de principe de la diffraction aux rayons X.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure 39: Abaque de quantité de ciment dans 1 mètre cube.....</b>	<b>67</b>
<b>Figure 40 : Préparation des moules .....</b>	<b>70</b>
<b>Figure 41 : Préparation de la matière première dans des sacs à conservation .....</b>	<b>71</b>
<b>Figure 42 : Malaxage du béton dans un malaxeur .....</b>	<b>72</b>

<b>Figure 43 : Versement du béton dans le récipient</b> .....	72
<b>Figure 44 : Table vibrante</b> .....	73
<b>Figure 45 : Moules remplis du béton</b> .....	73
<b>Figure 46 : Eprouvette du béton lors de démoulage</b> .....	74
<b>Figure 47: Confection des éprouvettes dans les bassins</b> .....	74
<b>Figure 48 : Récipient cylindrique rempli du béton</b> .....	75
<b>Figure 49: Essai d'affaissement</b> .....	76
<b>Figure 50: Essai de résistance à la compression</b> .....	77
<b>Figure 51 : Essais de pénétration d'eau</b> .....	78
<b>Figure 52: Pendage ou fendage brésilien</b> .....	78
<b>Figure 53 : Trace d'eau pénétrée au fond d'éprouvette</b> .....	79
<b>Figure 54 : Courbes granulométriques des granulats</b> .....	81
<b>Figure 55 : Courbes granulométriques des rejets</b> .....	82
<b>Figure 56 : Spectre du Rejet R1</b> .....	87
<b>Figure 57 : Spectre du Rejet R2</b> .....	87
<b>Figure 58: Spectre du Rejet R3</b> .....	88
<b>Figure 59 : Courbe granulométrique avec droite de Dreux gorisse</b> .....	91
<b>Figure 60 : Représentation graphique de la résistance a la compression (7 et 28 jours) pour le rejet R1</b> .....	96
<b>Figure 61: Représentations graphiques de la résistance à la compression (7 et 28 jours) pour le rejet R2</b> .....	96
<b>Figure 62 : Représentations graphiques de la résistance à la compression (7 et 28 jours) pour le rejet R3</b> .....	97
<b>Figure 63 : Carte géologique schématique de la région de Kherzet Youcef montrant la faille de Kherzet Youcef (BOUSDIRA Dina, 2009)</b> .....	104
<b>Figure 64 : Colonne lithostratigraphique du gisement de Chaabet El Hamra (TOUBI ; MEZGHACHE, 2018)</b> .....	105
<b>Figure 65 : Rupture correcte</b> .....	106
<b>Figure 66: Exemple d'une rupture correcte pour l'éprouvette à base de rejet R1</b> .....	106
<b>Figure 67: Rupture incorrecte</b> .....	106
<b>Figure 68 : Exemple d'une rupture incorrecte pour l'éprouvette à base de rejet R3</b> .....	107

## *Liste des abréviations*

UTM : Universal Transverse Mercator

ppm : partie par million

cm : centimètres

mm : millimètres

m : mètres

km : kilomètres

km<sup>2</sup> : kilomètres carré

Pb : plomb

Zn : zinc

g/t : grammes par tonne

DMA : drainage minier acide

pH : Potentiel hydrogène

PN : potentiel de neutralisation

PA : potentiel d'acidité

MPa : Méga pascalle

µm : micromètre

kg : kilogrammes

°C : température avec degré Celsius

Dmax : diamètre avec la plus grande taille

G1 : gravier 3/8 (de 3 mm jusqu'à 8 mm)

G2 : gravier 8/15 (de 8 mm jusqu'à 15 mm)

G3 : gravier 15/25 (de 15 mm jusqu'à 25 mm)

R1 : rejet de plomb-zinc de kherzt youcef

R2 : rejet de plomb-zinc de Boucaid

R3 : rejet de baryte de Boucaid

MB : bleu de méthylène

CEC : Capacité d'échange cationique

FRX : fluorescence aux rayons X

DRX : diffraction aux rayons X

## *Introduction*

L'activité minière joue un rôle important dans le développement économique du pays, mais malheureusement génère une quantité non négligeable de rejets qui ont un impact négatif sur l'environnement. Afin de réduire cet impact, une solution novatrice pour la valorisation de ces déchets dans le domaine de la construction a été proposée et étudiée dans le cadre de mon projet de fin d'études intitulé : Utilisation des rejets miniers des districts de Kherzet Youcef, wilaya de Sétif et de la laverie de baryte de Boucaïd, wilaya de Tissemsilt, pour la confection du béton : étude de comportement mécanique et environnemental.

Les objectifs de ce projet sont multiples :

- 1/ Ils visent à étudier la faisabilité d'utiliser les rejets miniers de plomb, de zinc et de baryte dans la formulation du béton, en substituant partiellement le sable traditionnellement utilisé.
- 2/ Ils évaluent le comportement mécanique du béton ainsi élaboré, en termes de résistance, de durabilité et de performances globales.
- 3/ De plus, une analyse environnementale a été menée pour évaluer l'impact positif de cette valorisation sur la réduction des déchets miniers et sur la préservation des ressources naturelles.

Ce projet s'est déroulé en plusieurs étapes. Dans un premier temps une Présentation des sites miniers des districts de Kherzet Youcef à Sétif et Boucaïd à Tissemsilt a été réalisée afin d'acquérir une connaissance précise de ces zones et de leurs rejets miniers. Ensuite Une revue de la littérature a été également effectuée, portant sur les rejets miniers, leur impact sur l'environnement, les différentes stratégies de gestion et de valorisation de ces déchets, ainsi que sur la fabrication de béton et l'utilisation des rejets miniers dans sa formulation. Cette revue de littérature nous a permis de recueillir les connaissances existantes sur le sujet, d'identifier les insuffisances dans les recherches précédentes et de situer le projet dans le contexte global de la valorisation des rejets miniers. Ensuite, des échantillons de rejets miniers des districts de Kherzet Youcef et Boucaïd ont été collectés et caractérisés afin de déterminer leur composition chimique, leur granulométrie et leurs propriétés physiques. A la fin, différentes formulations de béton ont été élaborées en substituant progressivement le sable par les rejets miniers, et des essais expérimentaux ont été réalisés pour évaluer les propriétés mécaniques et environnementales du béton ainsi obtenu. Enfin, une analyse comparative a été effectuée pour évaluer l'efficacité de la substitution des rejets miniers et déterminer les avantages économiques et environnementaux de cette approche.

Ce projet revêt une importance particulière pour l'Algérie, où l'industrie minière joue un rôle significatif dans l'économie nationale. En utilisant les rejets miniers locaux dans la construction, ce projet permettra de réduire la dépendance aux ressources naturelles traditionnellement utilisées dans la fabrication du béton, tout en favorisant une gestion plus durable des déchets miniers. De plus, il contribuera à renforcer l'expertise nationale dans le domaine de la valorisation des déchets miniers et à promouvoir une approche responsable et respectueuse de l'environnement dans le secteur minier.

Ce projet se distingue par son originalité, en explorant l'utilisation des rejets miniers de plomb, de zinc et de baryte dans la formulation du béton. Cette approche novatrice vise à résoudre deux problématiques majeures : la valorisation des déchets miniers et la préservation de l'environnement. Les résultats attendus de cette étude apporteront de nouvelles connaissances scientifiques et techniques dans le domaine de la construction durable, tout en offrant des perspectives prometteuses pour l'industrie minière et la préservation des ressources naturelles.

Le présent chapitre aborde les éléments clés relatifs aux deux régions d'étude, district de Kherzet Youcef (W.Sétif) et district de Boucaïd (W.Tissemsilt), en mettant l'accent sur l'aspect géologique et la minéralisation, ainsi que sur l'historique des activités minières et le processus de traitement de ces deux minerais.

*Partie 1 : district de Kherzet Youcef*

**1 Situation Géographique :**

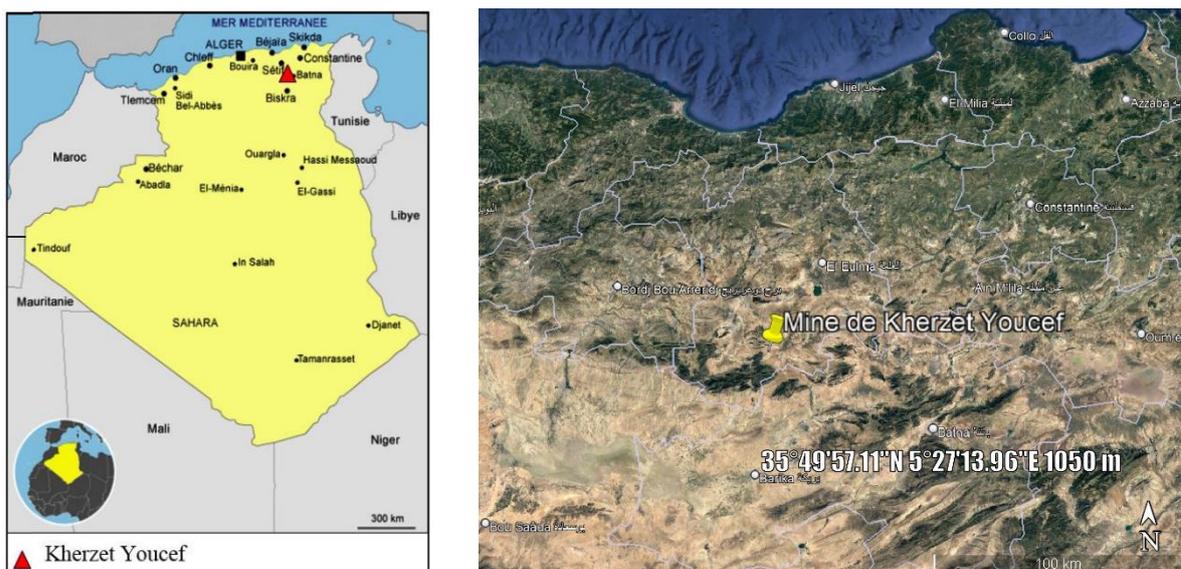
La mine de Kherzet Youcef se trouve dans l'Est de l'Algérie, à environ 5 km au Nord-Ouest de la ville d'Ain Azel. Elle est située à environ 50 km Sud-Est de la ville de Sétif et à 60 km Nord-Ouest de la ville de Batna. À proximité de la mine de Kherzet Youcef se trouvent une laverie et une digue de stockage des résidus de traitement.

Cette digue, qui s'étend sur une surface de 07ha, stocke les résidus de traitement du minerai de Kherzet Youcef depuis 1979, ainsi que les résidus de traitement du minerai de Chaabet El Hamra depuis 1994. (MERCHICHI Amira, 2013)

Le tableau ci-après présente les informations géographiques du complexe minier de Kherzet Youcef, exprimées en coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator) :

Sites/coordonnées	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)
Kherzet Youcef	718 000 à 722 000	3 968 900 à 3 966 500	950 à 1250
Chaabet El Hamra	726 902 à 728 505	3 962 567 à 3 963 212	950 à 1200

**Tableau 1 : Coordonnées UTM de la mine de Kherzet Youcef et Chaabet El Hamra (MERCHICHI Amira, 2013)**



**Figure 1: Situation géographique de la mine de Kherzet Youcef**

## 2 Aspect géologique :

Notre zone d'étude se trouve dans les monts du Hodna, entre l'Atlas Tellien au nord et l'Atlas Saharien au sud. Elle fait partie d'une région géologique plus vaste. En étudiant la géologie locale, nous pouvons comprendre la composition minéralogique des déchets miniers et les phénomènes géochimiques qui les affectent

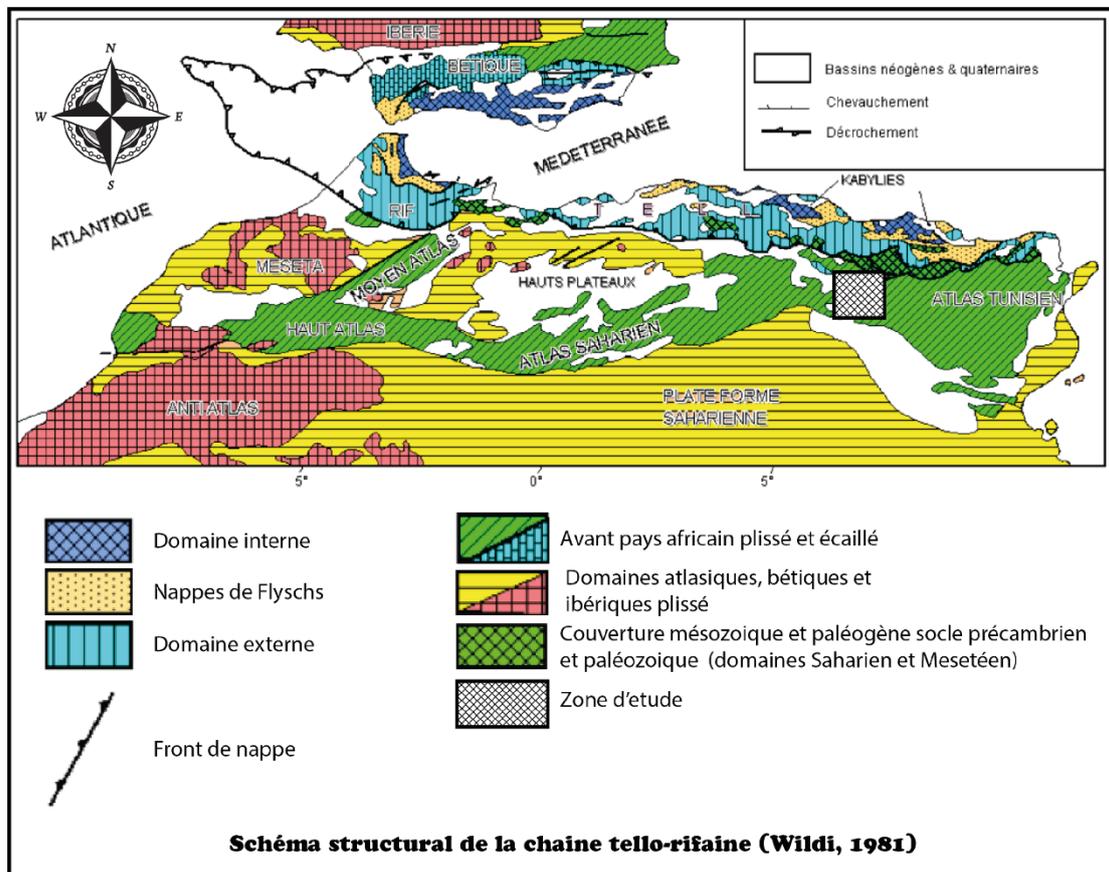


Figure 2: Schéma structural de la chaîne des Maghrébides (wildi, 1981)

### 2.1 Géologie régionale

Kherzet Youcef est une région située à la frontière nord des montagnes du Hodna. Cet endroit se trouve dans une zone de dépression au sud du port d'Aïn Mlila. Le sol est caractérisé par des dépôts de roches marneuses et carbonatées datant du Méso-Cénozoïque, qui reposent sur le socle plissé de la plate-forme épi-hercynienne (BOUSDIRA Dina, 2009). La structure géologique de la région se compose d'une série d'anticlinaux, qui sont des plis de roches inclinés vers le haut, avec des noyaux jurassiques ou crétacés. Il y a également des sillons qui ont été remplis de formations rocheuses datant du Miocène jusqu'au Post-Miocène.

Le domaine des montagnes du Hodna est caractérisé par deux unités tectoniques distinctes séparées par le front sud sétifien. La première, l'allochtone sud sétifien, se trouve au nord et se compose d'un grand empilement d'écaillés rocheuses limitées par des cisaillements. La deuxième, l'autochtone hodnéen, se trouve au sud et inclut le Djebel Hadjar Labiod (ATTOUCHEK Lynda, 2006).

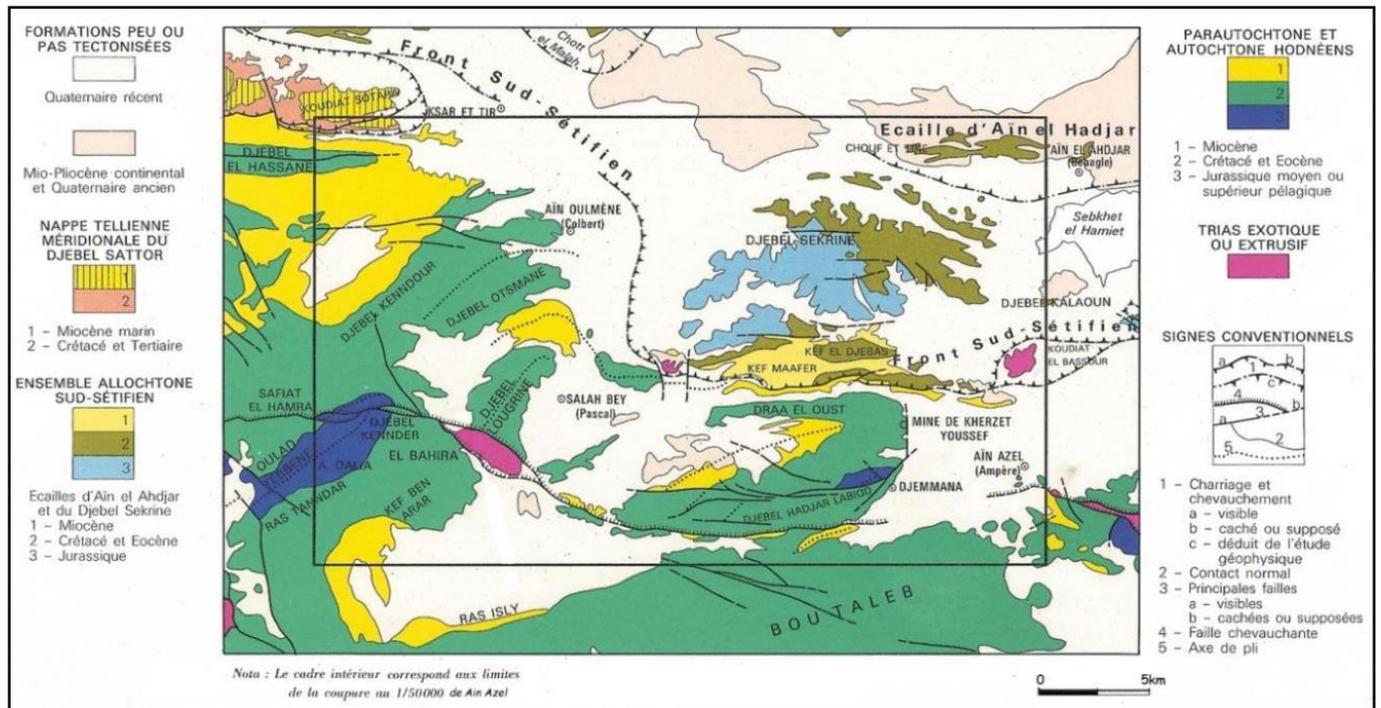


Figure 3: Carte géologique de la région ain Azel

Système	Sous système		Eléments lithologiques
<b>Trias</b>			- évaporites, - "argiles-marnes" bariolées, - Lambeaux calcaréo-dolomitiques - roches volcaniques
<b>Jurassique</b>	<b>Jurassique supérieur</b>		- calcaire à intercalations marneuses
	<b>Jurassique inférieur et moyen</b>	<b>Lias</b>	- marnes jaunâtres, blanchâtres, verdâtres ou rouge-violacées - dolomie et calcaire dolomitique
		<b>Dogger</b>	- Calcaire à intercalations marneuses
<b>Le Crétacé</b>	<b>Le Crétacé supérieur</b>		- marnes - calcaires
	<b>Le Crétacé inférieur</b>		- marnes - grès - argiles - calcaires
<b>Néogène</b>	<b>Pliocène</b>		- conglomérats - argiles - grès - marnes
	<b>Miocène</b>		- conglomérats - marnes - grès - gypses - argiles
<b>Quaternaire</b>	<b>Glacis des hautes plaines</b>		- cailloux - graviers - blocs à remplissage limoneux argileux
	<b>Terrasses des basses plaines</b>		argiles, de limons et de sables

Tableau 2: Stratigraphie de la région du Hodna (BOUSDIRA Dina, 2009)

## 2.2 Géologie locale

### 2.2.1 Mine de Kherzet Youcef

La mine Kherzet Youcef est caractérisée par une géologie particulière qui se manifeste par la présence d'une série de plateformes instables et enfoncées composées de dolomites. Cette série est organisée en séquences régressives contenant des couches de dolomies ainsi que des intervalles courts de marnes, de dolomies marneuses et de laminites. Les dolomites présentes dans cette mine sont des micrites extrêmement riches en matières organiques et en marcasite d'origine sédimentaire. La structure de ce gisement est monoclinale et stratiforme. (BOUSDIRA Dina, 2009)

Dans la région de l'Est, le gisement est contraint par une importante faille (**Annexe A**) de direction Nord-Sud avec un angle de pendage allant de 65 à 85°, connue sous le nom de "faille de Kherzet Youcef". Le flanc Est de cette faille s'enfonce profondément jusqu'à une profondeur de 700 mètres et est recouvert de formations géologiques terrigène datant du Tertiaire et du Quaternaire. Le contexte tectonique de la région est principalement caractérisé par des phénomènes cassants, avec des fissures diaclase et des failles, qui influencent la géométrie et la distribution des gisements. (TOUAHRI Belkacem, 1991)

Il y a environ une vingtaine de couches minéralisées dans le gisement, bien que leur intensité varie considérablement. Parmi celles-ci, seules sept sont exploitées car les autres ne répondent pas aux limites d'exploitabilité. La série dolomitique métallifère a une épaisseur totale de 170-190 mètres. Cependant, la faille de Kherzet Youcef limite le gisement à l'Est, où les minéralisations ne commencent qu'à une distance de 10-30 mètres du mur de cette faille. Le nombre de couches minéralisées est maximal à proximité immédiate de cette faille.

Les différentes couches se répartissent en deux cycles dolomitiques qui forment le cœur du Barrémien. Ces cycles sont séparés par un épisode d'affaissement qui a conduit à la formation de dépôts réduits d'origine tidal, présents sur la plateforme ouverte. Ces dépôts comprennent des argiles, des marno-calcaires noduleux et des marnes.

Le gisement présente une morphologie caractérisée par des amas stratiformes de matériau érodé, qui s'étendent dans une direction plus ou moins allongée vers le NNE. Leur largeur peut varier entre 60 et 150 mètres. Il est à noter que l'intérieur du gisement n'a pas été affecté par des phénomènes tectoniques. Seules des déformations souples peuvent être observées sur la paroi de la faille. Un amas minéralisé puisse présenter une épaisseur allant jusqu'à 3 mètres. (TOUAHRI Belkacem, 1991)

La formation de la série métallifère se situe dans la partie médiane du Barrémien et est caractérisée d'une série de dépôts qui oscillent rapidement entre des pôles argileux et carbonatés. Cette formation est superposée à une série de strates alternantes, comprenant du calcaire, des grès intercalés de dolomies, ainsi que des marnes et des argiles.

La suite stratigraphique se clôt par une suite de quarante calcimicrites argileux qui contiennent des fragments de grands Lamellibranches, avec des couches de marnes intercalées à intervalles réguliers et des bancs de calcisparites grises massives. La zone médiane minéralisée commence après la dernière couche de grès à passées marneuses.

Age	Lithologie	Caractères hydrogéologiques probables
Mio-Plio-Quaternaire	Sables, graviers, galets et conglomérats	Formation perméable
Miocène	Calcaires, calcaires gréseux dolomies et conglomérats à la base	Formation perméable
Turonien	Dolomies à silex et calcaires	Formation perméable à semi-perméable
Cénomanién	Alternance de marnes et calcaires marneux	Formation imperméable à semi-perméable
Vraconien	Marnes, calcaires gréseux et grès	Formation perméable
Albien	Alternance de marnes et calcaires marneux	Formation imperméable à semi-perméable
Aptien supérieur	Alternance de calcaires, grès, marnes et marneux calcaire	Formation perméable à semi-perméable
Aptien inférieur	Alternance de marnes, calcaires et dolomies	Formation perméable à semi-perméable
Barrémien supérieur	Alternance de calcaires, marnes gréseux et dolomies	Formation perméable
Barrémien inférieur	Alternance calcaro-marneuse, dolomies et grès	Formation perméable

*Figure 4: Zones susceptibles d'être affectées par la présence de polluants métalliques sur le site de Kherzet Youcef. (MERCHICHI Amira, 2013)*

### 2.2.2 Mine de chaabet El Hamra

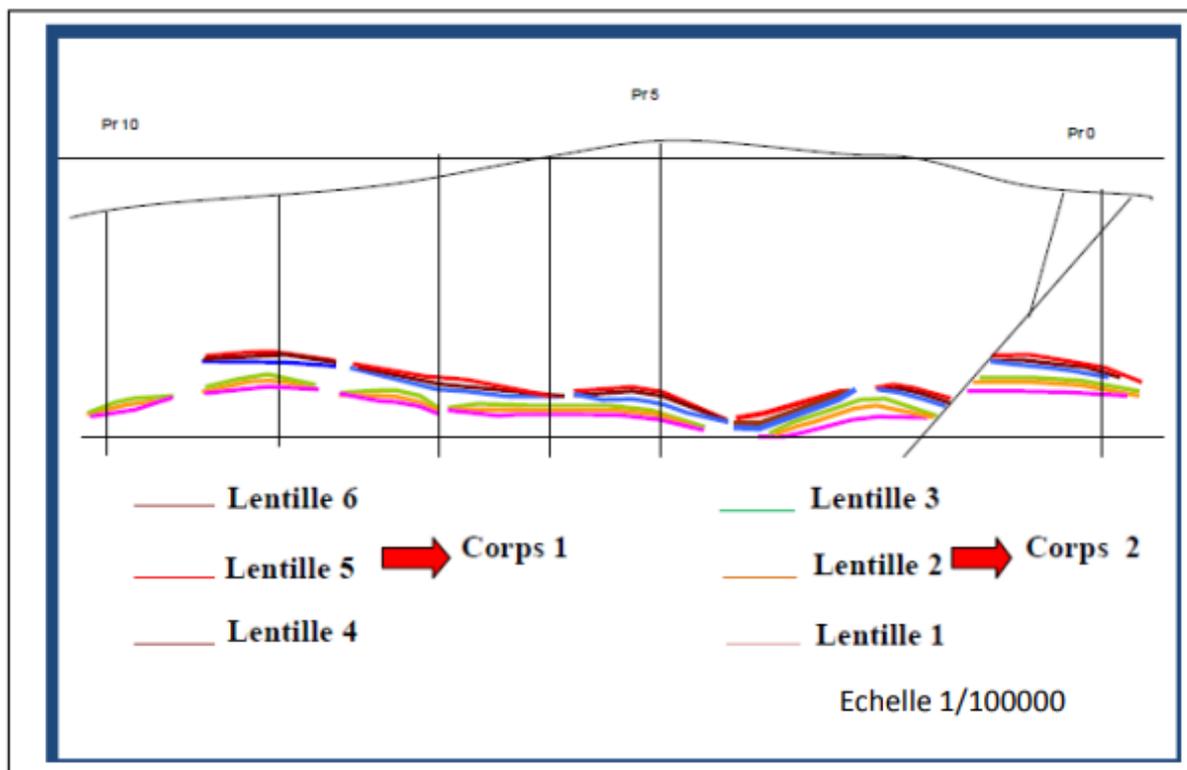
Le gisement de Chaabet El-Hamra abrite une importante réserve de minerai de zinc qui se présente sous forme de deux faisceaux de couches lenticulaires stratiformes. Chacun de ces faisceaux est caractérisé par une puissance de 6 mètres et est constitué de trois couches lenticulaires, respectivement numérotées 1, 2 et 3 pour le faisceau inférieur, et 4, 5 et 6 pour le faisceau supérieur.

Le site s'étend sur une superficie de 2700 mètres en longueur et de 100 à 400 mètres en largeur. Il renferme un gisement de minerai qui plonge vers le Nord-Ouest avec un pendage de 10 degrés. Le minerai se trouve dans une dolomie bréchique ou poreuse de la partie inférieure de l'étage Hauterivien, qui est une période du Crétacé inférieur.

Le toit de la couche supérieure du minerai (corps n°1) est constitué de dolomie à lits marneux, tandis que le mur de la couche inférieure (corps n°2) est formé d'une dolomie massive avec des concrétions, appelée dolomie tachetée. La galène est rare et se développe principalement aux extrémités des lentilles, ce qui limite la zone de minerai contenant du zinc par rapport à celle contenant de la baryte et de la pyrite.

Le minerai contient de la sphalérite qui peut prendre différentes formes, notamment massif, en taches de recristallisation, fissuré et bréchique, qui constituent la majeure partie du minerai industriel. La couche supérieure du minerai a une épaisseur moyenne de 5 mètres, tandis que celle de la couche inférieure est de 4 mètres.

Colonne stratigraphique (ANNEXE B)



**Figure 5: Coupe schématique du gisement de Chabet-El-Hamra avec la disposition des six Lentilles composant les deux corps minéralisés (MERCHICHI Amira, 2013)**

### 3 Minéralisation :

La minéralisation se présente sous forme de remplissage de fractures dans la roche, qui ont subi une stylolitisation intense et une fracturation en accord avec les contraintes géologiques. À l'échelle macroscopique, cela peut se manifester par des veines de minéraux visibles à l'œil nu, qui traversent la roche en remplissant des fissures ou des failles.

À l'échelle microscopique, la minéralisation se présente sous forme de cristallisation dans les espaces entre les grains de roche ou dans les fractures microscopiques. Les minéraux peuvent former des cristaux distincts ou remplir les pores de la roche. La forme exacte de la minéralisation dépendra des conditions géologiques et des processus de formation qui ont conduit à la concentration des minéraux dans la zone de la mine

Minéraux sulfurés	Sphalérite (ZnS)	Les gisements de Chabet El Hamra et de Kherzet Youcef sont riches en sphalérite, un minéral couramment présent. Elle est souvent associée à la pyrite, la marcasite et différentes formes de dolomites. Dans la mine de Kherzet Youcef, la proportion de sphalérite peut atteindre jusqu'à 40-60%, tandis que dans d'autres zones, elle est présente à un taux minimum de 10-15%. (HENNI Abderrahmane, 1998)
	Galène (PbS)	Le gisement de Kherzet Youcef contient une quantité importante de galène, allant jusqu'à 30% de la composition totale, tandis que dans le gisement de Chaabet El Hamra, la galène est rarement présente mais se présente sous forme de plages cristallisées triangulaires. (OUCHENE Midou, 2010)
	pyrite (Fe <sub>2</sub> S)	les chercheurs ont constaté une rare présence de pyrite qui se présente sous forme de micro-individus (1 à 5 microns) dans la roche argilo-carbonatée. Elle est également disséminée en petits grains dans l'encaissant dolomitique. (HENNI Abderrahmane, 1998)
	marcasite (FeS)	La mine de Kherzet Youcef est caractérisée par une abondance de marcasite, un sulfure courant qui agit comme ciment dans les brèches dolomitiques près de la faille. Les analyses ont révélé la présence d'éléments traces tels que l'arsenic, l'argent, le bismuth, le cobalt, le cuivre, le gallium, l'antimoine, le nickel, le niobium et l'yttrium dans la marcasite, à des concentrations de l'ordre du ppm. La teneur moyenne en zinc dans la région est d'environ 25%. (HENNI Abderrahmane, 1998)
	chalcopryrite (Cu,FeS)	Est une espèce minérale composée de cuivre, de fer et de soufre. Elle est souvent associée à la galène ou incluse dans cette zone d'étude. Les cristaux de chalcopryrite, qui ont une couleur jaune doré, peuvent se présenter sous forme sub-automorphe (MERCHICHI Amira, 2013)
Minéraux de gangue	Dolomite (CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> )	Le principal minerai de gangue, qui forme l'encaissant direct des sulfures, est la dolomite. Elle peut prendre différentes formes, telles que compacte, caverneuse, ou renfermant des cavités et des fissures.
	Barytine (BaSO <sub>4</sub> )	La barytine est rarement présente sous forme de filonnets monominéraux, et se forme après la sphalérite et la pyrite. Elle a une couleur blanche, parfois rosâtre en raison d'imprégnations d'hématites. (HENNI Abderrahmane, 1998)

Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	La calcite est présente sous forme de veinules dans les roches encaissantes, ainsi que dans des nids qui tapissent les géôles et forment des druses bien développées. Elle est également le composant principal des calcaires. (OUCHENE Midou, 2010)
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	Le quartz est rarement présent dans le gisement de chaabet El Hamra et Kherzet Youcef et se présente sous forme de cristaux subautomorphes à automorphes. Il s'agit d'un quartz diagenétique qui se trouve en faible quantité dans le gisement de Chabet El Hamra (MERCHICHI Amira, 2013)
Hématite ((Fe,Al) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	La région de Chabet el Hamra est riche en hématite, un minéral bien formé présent dans des veines de 1 à 2 cm d'épaisseur. On peut également observer des veines de barytine et de dolomie, ainsi que des cristaux de calcite rhomboédrique.
6. Fluorite (CaF <sub>2</sub> )	Moins abondante, est souvent associée à la barytine et à la calcite dans les espaces vides du champ minier. (MERCHICHI Amira, 2013)

**Tableau 3: Tableau de minéralisation des mines Kherzet Youcef et Chaabet El Hamra**

#### 4 Traitement

Le complexe minier de Kherzet-Youcef dispose d'une laverie qui permet de traiter les minerais provenant de deux mines : Chaabet El Hamra et Kherzet Youcef. Cette laverie a été spécialement construite pour valoriser les minerais plombo-zincifères grâce à la technique de flottation. Grâce à cette méthode, les minerais polymétalliques sont triés et séparés pour en extraire le plomb et zinc, ce qui permet de les valoriser et de les commercialiser. Le complexe minier de Kherzet-Youcef est donc un lieu de traitement essentiel pour l'exploitation des mines de la région.



**Figure 6: Usine de traitement complexe kherzet youcef (AKACHE Aymen ; BEDGHIOU Kaouther, 2021)**

Depuis sa mise en service, la laverie a connu plusieurs évolutions, en fonction des caractéristiques des minerais, des conditions technico-économiques et des types de concentré à produire.

Au cours des années 80, la laverie de la mine plombo-zincifère de Kherzet Youcef était alimentée en minerai pour produire du plomb et du zinc. Cependant, après l'inondation de cette mine en 1990, la laverie s'est tournée vers le traitement du minerai zincifère de la mine de Chaabet El Hamra, ne produisant plus qu'un concentré de zinc. (MERCHICHI Amira, 2013)

Au cours de la durée de vie de l'exploitation minière, estimée à environ 15 à 17 ans, 1 318 657 tonnes de minerai zincifère ont été traitées, avec une teneur moyenne en zinc de 5,92%, à une cadence annuelle de 77 500 tonnes.

L'usine d'enrichissement du complexe minier de Kherzet Youcef, qui a auparavant servi à l'enrichissement du minerai de plomb et de zinc de l'ancienne mine, a été adaptée pour traiter le minerai de zinc de la mine de Chaabet-El-Hamra. Les essais de traitement à l'échelle industrielle ont révélé que la flottabilité du minerai de Chaâbet-El-Hamra était relativement simple, mais que son broyage était assez difficile, car il était contenu dans une gangue dolomitique d'une dureté comprise entre 8 et 9 sur l'échelle de Protodiakonov. (AKACHE Aymen ; BEDGHIOU Kaouther, 2021)

- La laverie est composée de plusieurs installations essentiels dont :
- Installations de préparation mécanique (concassage et broyage) ;
- Installations de flottation Pb/Zn et de classification ;
- Installations de traitement gravimétrique ;
- Aires de stockage de minerais abattus et de concentré ;
- Laboratoire d'analyse chimique ;
- Atelier de préparation des réactifs de flottation ;
- Silos de stockage de minerais concassés ;
- Blocs administratifs et une base de vie ;
- Des épaisseurs et système de séchage du concentré ;
- Ateliers de réparation mécanique des équipements ;
- Magasins ;
- un parc de stockage des résidus de traitement (MERCHICHI Amira, 2013)

La laverie du complexe minier de Kherzet-Youcef est dédiée au traitement du minerai zincifère pour produire un concentré contenant du zinc. Afin de valoriser ce minerai, plusieurs méthodes de traitement sont mises en place, notamment :

#### 4.1 Préparation mécanique

La valorisation du minerai est une étape cruciale pour toute exploitation minière. Au sein du complexe minier de Chabet El-Hamra, le minerai est traité mécaniquement pour être préparé en vue de son utilisation. Tout d'abord, le minerai est concassé et broyé afin de réduire ses dimensions et de séparer les particules contenant le minerai utile de la gangue. Le complexe minier dispose d'un concasseur à mâchoire d'une capacité de production de 600 tonnes par heure pour concasser le minerai ayant des dimensions entre 80 et 350mm. Les particules ayant des dimensions inférieures à 80mm passent à travers le pré-crible pour optimiser le rendement du concassage.

Après le concassage primaire, une étape de criblage à 15mm est effectuée, suivi d'un concassage secondaire pour les particules ayant des dimensions comprises entre 15 et 80mm. Les particules concassées ayant une taille inférieure à 15mm sont ensuite soumises à une préparation mécanique par voie humide, qui consiste en un processus de broyage et de classification. Cette étape permet d'obtenir des particules de dimensions optimales pour l'extraction du minerai utile et ainsi maximiser la valorisation du minerai extrait. (MERCHICHI Amira, 2013)

#### 4.2 Broyage et classification

Pour le minerai qui a une granulométrie inférieure à 15 mm, un lavage et un criblage sont effectués avant de passer au broyage et à la classification. Le broyage de la fraction 0-15 mm est effectué dans un broyeur à boulets qui fonctionne en circuit fermé avec un classificateur à spirale, et pour améliorer l'efficacité de ce processus, un deuxième petit broyeur à boulets est placé en série avec le premier. Cette méthode permet d'augmenter la réduction des sables du classificateur et d'optimiser la production de minerai. Tout cela est fait avec une cadence de l'ordre de 14 à 15 tonnes/heure pour maintenir une production constante et efficace. (MERCHICHI Amira, 2013)

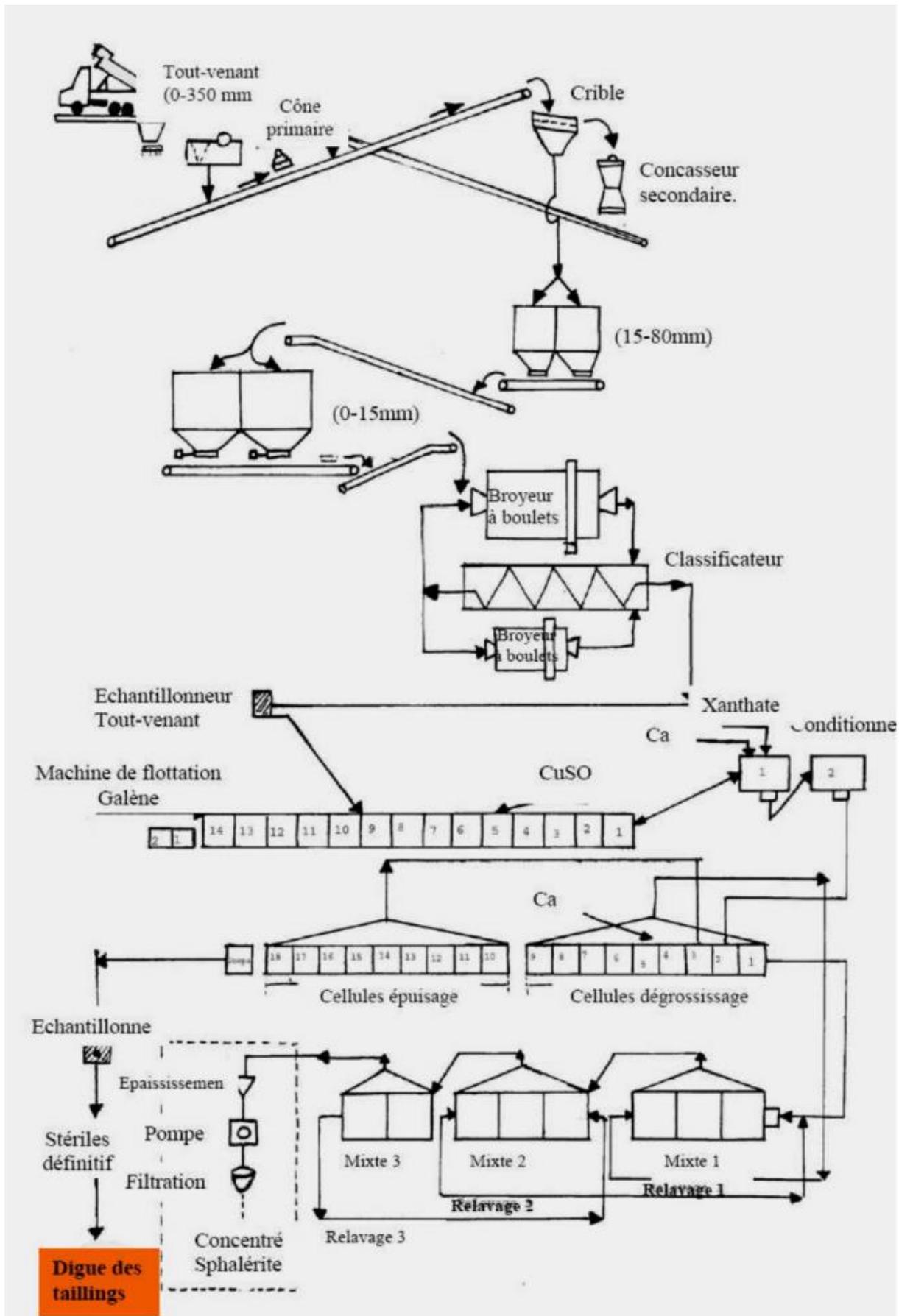


Figure 7: Schéma de traitement minéral zincifère du complexe de Kherzet Youcef (MERCHICHI Amira, 2013)

### 4.3 Flottation et filtration

Après la préparation mécanique, le minerai est soumis à un circuit de flottation, qui permet d'obtenir des concentrés à partir desquels les minéraux économiques sont extraits. Dans ce circuit, le zinc est le produit recherché, et le processus de flottation est composé de plusieurs étapes : La flottation principale ou dégrossissage de Zinc, La flottation de contrôle ou épuisage du Zinc, ainsi que trois stades de flottation de relavage du concentré de Zinc.

Les produits non flottés de l'épuisage sont dirigés vers la digue des stériles, tandis que le pré-concentré du premier relavage et les mousses de l'épuisage sont renvoyés en tête du dégrossissage.

Le concentré de zinc est récupéré grâce aux mousses obtenues lors du 3eme relavage du processus de flottation. Ces mousses sont envoyées vers un épaisseur pour en augmenter la densité avant de passer à travers des filtres rotatifs à vide. Ceux-ci permettent de séparer l'eau du concentré, qui est alors stocké à l'air libre sous forme de produit marchand prêt à être commercialisé. Cette étape est essentielle pour la qualité du produit final, car elle permet de garantir une concentration en zinc optimale. (MERCHICHI Amira, 2013)

Le concentré est obtenu avec une teneur en Zn de 53%. Le taux de récupération du métal contenu dans le minerai est élevé, de l'ordre de 85%.

Les réactifs utilisés pour la flottation de Zinc dans l'usine de traitement du minerai de Chaâbet El- Hamra sont les suivants : (MERCHICHI Amira, 2013)

- La chaux hydratée comme régulateur avec une consommation moyenne de 2560g/t ;
- Le sulfate de cuivre, comme activant une consommation moyenne de 250 à 500g/t ;
- Le Xanthate Isobutyl, comme collecteur une consommation moyenne de 50 à 150 g/t ;
- L'huile de pin, comme moussant, de 25 à 75 g/t ;
- Le Sulfate de Zinc.

## Partie 2 : district de Boucaïd

### 1 **Situation Géographique :**

La mine de Boucaïd est située à 250 km au sud-ouest de la capitale Alger, bénéficiant d'une position stratégique le long de la route reliant la wilaya de Chlef à celle de Tissemsilt. Plus précisément, elle est localisée à 58 km au sud de Chlef et à 62 km au nord de Tissemsilt. Son accès s'effectue aisément à partir de la route nationale 19.

Avec une superficie d'environ 67 km<sup>2</sup> selon le découpage administratif de 1984, la mine de Boucaïd est enclavée dans la commune de Lazharia, partageant ainsi son nom avec cette dernière, située dans la daïra de Lazharia. Elle s'étend le long du versant nord, nichée au pied du majestueux massif de la chaîne de l'Ouarsenis, à une altitude d'environ 1200 mètres.

Les infrastructures de la mine, ainsi que son unité d'exploitation, sont judicieusement implantées à proximité de la RN19, ce qui facilite grandement son accès, comme mentionné précédemment.

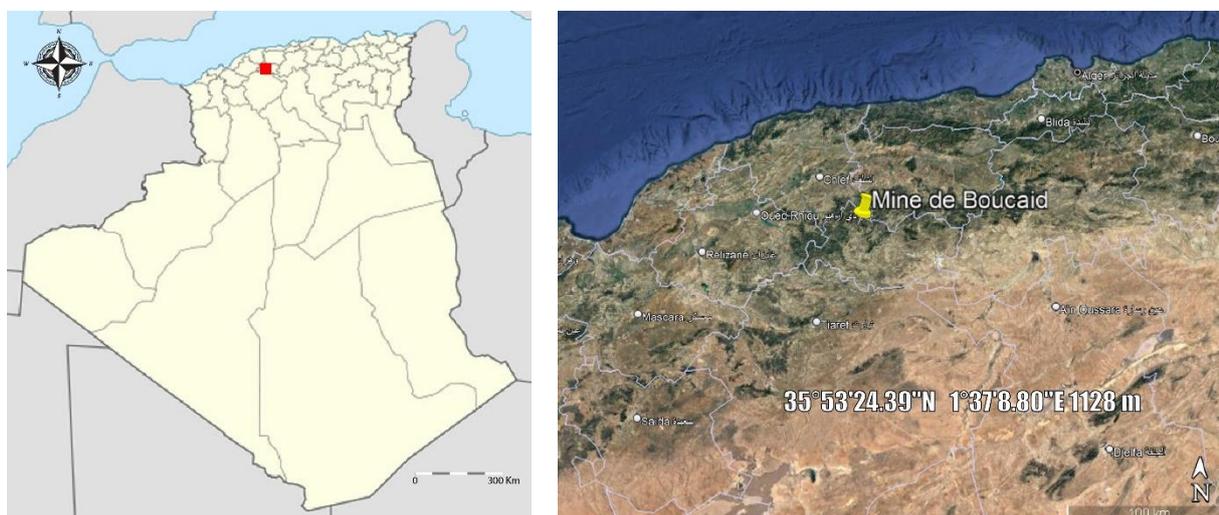
Sites/coordonnées	X (UTM)	Y (UTM)	Z (m)
Mine Boucaïd	380 312	3 971 872	1400
Usine de traitement	375 385	3 972 672	1130

**Tableau 4 : Coordonnées UTM de la mine et l'usine de Boucaïd (Google earth)**

La mine de Bou-Caïd comprend deux gisements en exploitation, à savoir Lakhdar et Sidi Bel Abbes.

Le gisement de Lakhdar se situe à 5 km au sud-est du village de Bou-Caïd, sur le flanc sud de l'extrémité ouest du massif Abdelkader. Il est relié au village de Bou-Caïd par une route communale de 2 km, suivie d'une piste de 3 km.

Quant au gisement de Sidi Bel Abbes, il se trouve à 8 km au sud-est du village de Bou-Caïd, dans la partie sud-est du massif Abdelkader. Il est relié au village de Bou-Caïd par une route communale de 5 km, puis par une piste de 2 km. (BOURBALA Brahim; MOUSSAOUI El Abas, 2013)



**Figure 8: Situation géographique district boucaïd**

## 2 Historique

Les premiers gisements découverts dans la mine de Boucaïd remontent à l'année 1856, lorsque des filons de plomb et de zinc ont été identifiés dans la zone connue sous le nom de Grand Pic. Par la suite, les gisements de Belkheiret et d'Abdelkader ont été découverts respectivement en 1860 et en 1863. Ces découvertes ont suscité une demande de permis d'exploration en 1872, soumise par M. Terrailon et M. Calen. Cependant, pour diverses raisons, les travaux n'ont jamais été entamés et la région a été progressivement abandonnée.

Ce n'est qu'à la fin du 19e siècle que des travaux d'exploitation ont réellement débuté pour l'extraction des métaux mentionnés précédemment, et ces travaux ont atteint leur apogée en 1940 grâce aux études réalisées par le géologue français M. Formmel.

La deuxième période d'exploitation de ces gisements a commencé après l'indépendance, notamment après la nationalisation des mines en 1966, ce qui a assuré la continuité des travaux d'exploitation des poly-métaux.

En 1967, la SONAREM a entrepris des travaux de prospection et de reconnaissance du gisement dans la région de Boucaïd, dans le but d'exploiter le zinc, ce qui a été réalisé jusqu'à l'épuisement des réserves en 1976.

En 1975, lors des travaux de levés géologiques du gisement de Sidi-Belabess, une importante structure de barytine d'une longueur de 850 mètres a été découverte, représentant une quantité significative de réserves. Des travaux d'évaluation et de prospection ont été menés par la SONAREM elle-même entre 1977 et 1981.

L'exploitation et le traitement de la barytine ont été réalisés simultanément aux travaux de prospection et d'évaluation, débutant en 1976. Cela a permis à la mine de changer de statut et de se transformer en une unité de production (MEKDOUR mohammed Islam ,2017)

Les travaux de recherche et de prospection ont également permis de découvrir plusieurs nouveaux sites tels que Sidi Ouadhah, situé sur les flancs oriental et occidental du massif de Belkheiret. Au cours de la période allant de 1978 à 1982, quatre autres sites ont été évalués et exploités, à savoir Ammal, Rasfa, Grand Pic et Nord. Il convient de noter que 90% des travaux ont été réalisés sur le site de Sidi Bel Abbas, tandis que les recherches sur les autres sites sont restées insignifiantes (BOURBALA Brahim; MOUSSAOUI El Abas, 2013).

### **3 Aspect géologique**

#### **3.1 Géologie régionale**

Les montagnes des Ouarsenis sont une chaîne de montagnes située dans le nord-ouest de l'Algérie. Elles s'étendent sur environ 300 kilomètres, traversant les wilayas de Tissemsilt, Médéa, Chlef et Ain Defla. Cette région montagneuse est réputée pour sa beauté naturelle, ses paysages pittoresques et sa richesse géologique.

La géologie des Ouarsenis est principalement composée de roches sédimentaires datant de différentes périodes géologiques. On y trouve des formations rocheuses telles que des calcaires, des dolomies, des grès, des marnes et des schistes. Ces roches se sont formées au cours de millions d'années par l'accumulation de sédiments marins, lacustres et fluviaux, ainsi que par des processus tectoniques.

La région des Ouarsenis est également connue pour sa diversité géomorphologique. On y trouve des vallées encaissées, des plateaux, des crêtes escarpées et des sommets montagneux. Le point culminant de la chaîne est le mont Ouarsenis, qui atteint une altitude de 1 985 mètres.

La géologie des gisements de la mine de Boucaïd est étroitement liée à la tectonique qui affecte le massif de l'Ouarsenis. Ce massif est composé de roches jurassiques qui ont été soulevées vers la surface le long d'une faille profonde, entraînant sa fragmentation en plusieurs blocs. Ce phénomène est à l'origine du déplacement des nappes géologiques. La structure du massif montagneux est donc caractérisée par un antilinéaire ennoyé, résultant du déplacement des nappes vers le Nord-Est, ainsi qu'un flanc inverse correspondant à un anticlinal couché au sud, qui remplit la zone synclinale.



*Figure 09 Situation géographique du Massif de l'Ouarsenis dans l'Atlas Tellien*

### 3.2 Géologie locale

La géologie des gisements de Baryte est :

#### 3.2.1 Gisement de Sidi Belabbes :

- Filon Sidi Belabbes partie Ouest : Ce filon se présente sous forme d'un corps filonien avec une direction Est-ouest sur une longueur de 315 m. Il est encaissé dans les calcaires du Lias moyen-supérieur. La teneur moyenne en BaSO<sub>4</sub> est de 84,55 %, et la densité moyenne est d'environ 4.
- Filon Sidi Belabbes partie Est : Ce gisement est une continuité du filon Sidi Belabbes partie Ouest, situé à l'extrémité orientale du Sra d'Abd El-Kader. Il affleure entre les altitudes de 1210 et 1290 m sur une longueur de 130 m. La teneur moyenne en BaSO<sub>4</sub> est de 86,32 %, et il est encaissé dans les calcaires du Dogger.

#### 3.2.2 Gisement de Lakhdar :

- Corps Lakhdar Supérieur : Ce corps de minerai se présente sous forme d'amas irréguliers avec une base de 350 m<sup>2</sup> à une altitude de 1475 m. Il est encaissé dans les calcaires Lias moyen-supérieur et a une teneur moyenne en BaSO<sub>4</sub> de 76,08 %.
- Corps Lakhdar Inférieur : Ce corps de minerai est situé en contrebas du corps de Lakhdar à une altitude entre 1330 m et 1452 m. Il présente une structure irrégulière et une teneur moyenne en BaSO<sub>4</sub> de 78,86 %. Il est également encaissé dans les calcaires du Lias moyen-supérieur.
- Lakhdar Niveau 1497 m : Il s'agit du prolongement du filon Sidi Ouadah au niveau 1518 m. Le filon a une puissance moyenne de 1,30 m avec une teneur moyenne en BaSO<sub>4</sub> de

85,79 %. Il est encaissé dans les calcaires du Lias moyen-supérieur. (ALILAT Abderaouf; MEDJAOURI Mohammed, 2018)

### 3.2.3 Gisement Nord :

Ce gisement est une structure filonienne qui s'est formée le long d'une faille cassante d'orientation sub-latitudinale, avec une direction comprise entre 112 et 192 degrés, et un pendage de 70 à 75 degrés vers le nord-nord-est. La minéralisation a été identifiée en surface sur une longueur d'environ 300 mètres. Elle se trouve dans les dolomies du Lias inférieur, à proximité du contact avec les schistes argileux de l'Albo-Aptien. L'épaisseur du filon varie de 0,4 à 0,6 mètres jusqu'à 9 à 10 mètres, avec une moyenne d'environ 1,5 à 1,6 mètres. La teneur moyenne en BaSO<sub>4</sub> (barytine) est d'environ 70 %.

## 4 Minéralisation :

La région de l'Ouarsenis, y compris Boucaïd, présente une morphologie des gisements caractérisée par la présence de filons, de lentilles et d'amalgames résultant des accidents tectoniques survenus dans cette zone. On distingue deux types de gisements en fonction de leur formation : les amas et les filons.

Les amas sont des gisements qui ont une forme quelconque, généralement sous forme de lentilles de dimensions similaires. Dans le gisement de Sidi-Lakhdar, la baryte se présente sous forme d'amas aux niveaux 1330m, 1452m et 1550m.

Les filons, quant à eux, sont des gisements formés par le remplissage de fractures préexistantes de la croûte terrestre, qu'ils soient continus ou discontinus, par différents minéraux. La baryte se trouve également sous forme de filons dans le gisement de Sidi-Lakhdar aux niveaux 1497m et 1620m, ainsi que dans le gisement Nord aux niveaux 1200m, 1150m et 1050m. (MEKDOUR mohammed Islam ,2017)

## 5 Traitement

L'usine de Boucaïd joue un rôle crucial dans le traitement, l'enrichissement et la transformation du minerai de baryte brut en un produit conforme aux normes API et prêt à être commercialisé.

Le processus de traitement du minerai brut de baryte, d'un diamètre maximal de 500 mm et d'une teneur minimale de 60,00 % en BaSO<sub>4</sub>, se déroule en trois étapes distinctes :

### 5.1 Concassage :

Dans cette première étape, le minerai brut est réduit à une taille appropriée pour le processus d'enrichissement. Il est chargé à l'aide d'une pelle dans une trémie de réception d'une capacité de 120 tonnes, située dans une zone de stockage pouvant accueillir jusqu'à 5000 tonnes. Le minerai subit ensuite trois opérations de réduction de taille :

- Réduction à 70 mm dans un concasseur à mâchoires de type VB67 BERGEAUD.
- Criblage et réduction de taille à 14 mm dans un groupe mobile broyeur de type SYMENS, équipé d'un système d'arrosage pour éliminer les impuretés.
- Réduction à 8 mm dans un concasseur à cylindres lisse de type BCR 60X80. Le minerai réduit est ensuite stocké dans trois trémies tampons d'une capacité de 120 tonnes chacune. Le rendement de l'installation de concassage est de 30 tonnes par heure pour une granulométrie de 0-8 mm.

## 5.2 Enrichissement :

Le minerai réduit à une taille de 0-8 mm est soumis à une séparation gravimétrique humide dans un appareil appelé Remer-Jig de marque WEMCO. Ce processus permet de séparer la baryte, constituant le produit lourd, du reste des rejets, constituant le produit léger. Le concentré de baryte est récupéré et stocké dans une aire de stockage d'une capacité allant jusqu'à 9000 tonnes. Le rendement de cette installation est de 12 tonnes par heure.

## 5.3 Pulvérisation et conditionnement :

Dans cette dernière étape, le concentré de baryte subit un processus de séchage dans un sécheur rotatif, réduisant son humidité à moins de 1 %. Ensuite, le produit séché est broyé finement dans un broyeur pendulaire, puis séparé en différentes granulométries à l'aide d'un séparateur statique. Les particules inférieures à 75 microns sont stockées dans une trémie de stockage spécifique. Le produit final, réduit à 75 microns, est conditionné dans des sacs de grande capacité (Big-Bags) pesant environ 1,5 tonne chacun. Ce produit fini est destiné à être utilisé dans les boues de forage pétrolier. La capacité nominale de l'usine, conditionnée par le concentré provenant de l'atelier d'enrichissement, est de 12 tonnes par heure.

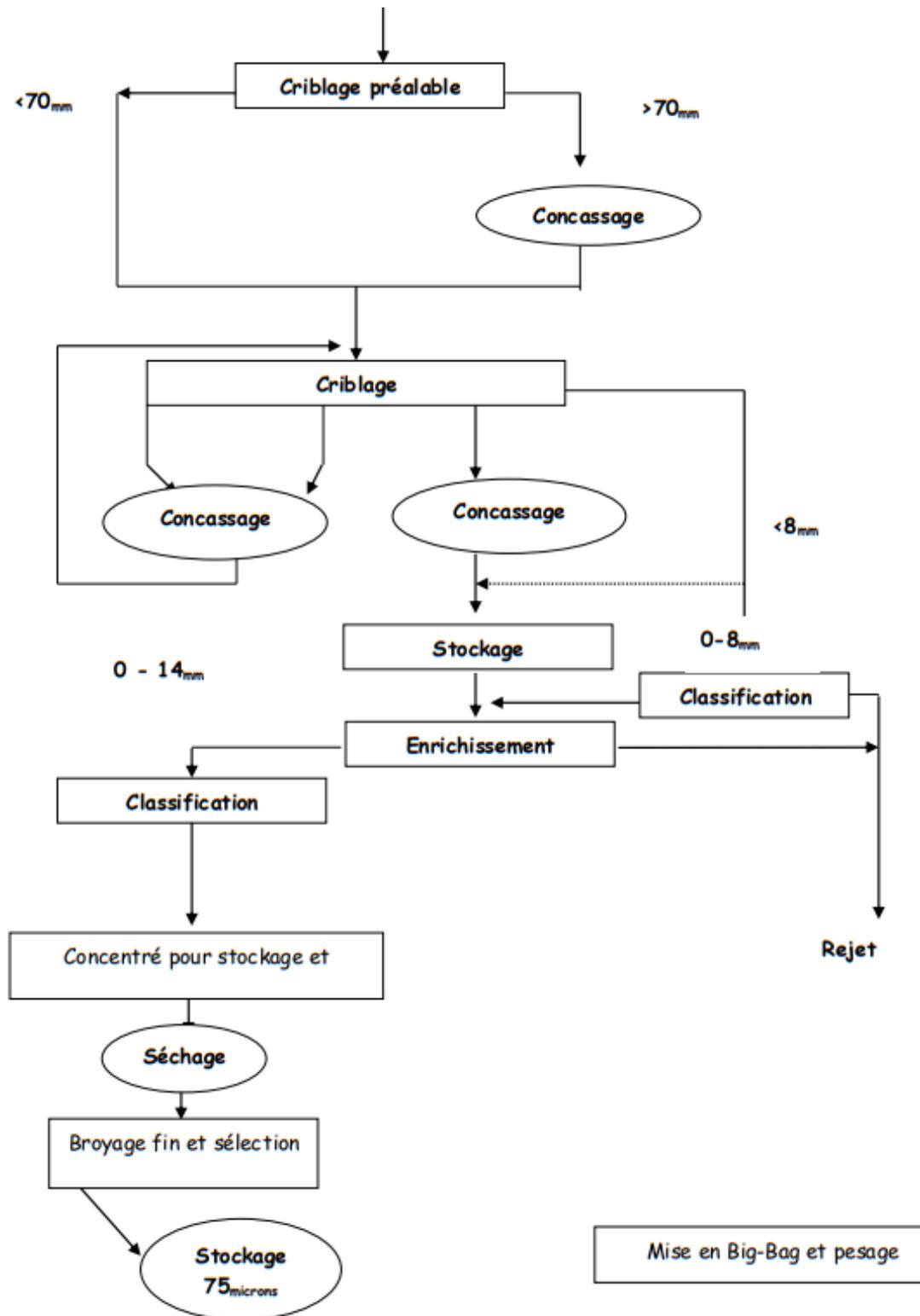


Figure 10: Schéma descriptif du processus de traitement du minerai de baryte (MOKRANE Islem, 2021)

## 1 L'activité minière et son impact sur l'environnement

L'activité minière joue un rôle important dans l'économie nationale d'un pays. Elle contribue à la croissance et au développement économique des pays riches en ressources minières. Elle est en charge de la mise en valeur de ces dernières (exploration), de leur exploitation, de leur valorisation et de leur commercialisation. (Da-Mao Xu et al. 2019)

En Algérie, après l'arrêt de toute activité minière, la remise en état du site est obligatoire. Cette étape, très importante, est effectuée conformément aux plans de restauration et de réaménagement du site minier établis par le ministère de l'industrie et des mines. Cependant cette restauration n'est pas suffisante car toute activité minière génère des quantités énormes de rejets qui ont un impact négatif sur l'environnement. Il existe 3 types de rejets qui peuvent être générés par l'industrie minière :

- Roches stériles :

Ce sont des roches sans aucune valeur marchande, avec une granulométrie importante (jusqu'à 1 mètre) ; une grande partie de ces rejets est issue de l'exploitation des minerais desquels sont extraites les substances utiles ; elles sont généralement stockées dans des haldes à stériles (terrils). Ces résidus miniers, une fois exposés à l'air et à l'eau, subissent des phénomènes d'oxydation qui mobilisent des éléments traces métalliques et métaux lourds, tels que le fer, le zinc, le plomb, le cadmium, le manganèse, etc. Une formation d'eau et d'effluents acides se crée à cause de la lixiviation des métaux lourds contenus dans la masse. Ces lixiviats sont des sources de pollution des eaux superficielles et du réseau hydrographique, connus sous le nom drainage minier acide ou DMA. C'est l'un des problèmes majeurs pour l'environnement où l'activité minière est appelée à limiter son impact. (TAHA Yassine, 2017)

- Résidus des concentrateurs :

Ils sont composés de la gangue, d'eau et parfois d'additifs chimiques utilisés lors de la phase de traitement du minerai. Sont généralement acheminés dans une aire d'entreposage appelée « parc à rejets » ou « parc à résidus ». Ces rejets peuvent contenir plusieurs millions de tonnes de matériel qui sont exposés aux conditions climatiques qui sont souvent favorables à l'oxydation des minéraux sulfureux et à la génération de DMA. (TAHA Yassine, 2017)

- Les boues de traitement des eaux contaminées :

Les boues de traitement des eaux contaminées sont des résidus solides qui se forment lors du processus de purification de l'eau contaminée. Lorsque l'eau est traitée pour éliminer les impuretés, des matières solides telles que des particules, des sédiments, des substances organiques et inorganiques sont capturées et concentrées. Ces matières forment les boues de traitement, qui peuvent contenir des polluants, des produits chimiques indésirables et des agents pathogènes.

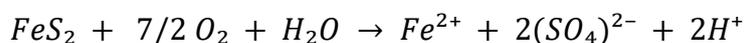
L'environnement est toutes ressources naturelles abiotiques et biotiques telles que l'air, l'atmosphère, l'eau, le sol et le sous-sol, la faune et la flore y compris le patrimoine génétique, les interactions entre lesdites ressources ; les sites, les paysages et les monuments naturels, et tout changement négatif ou positif qu'un projet peut entraîner pour l'environnement est concèderai comme un impact environnemental

L'industrie minière engendre des changements au niveau de l'environnement. Parmi ces changements, on peut citer :

- La transformation de la configuration hydrographique,
- La dégradation de paysage et sol qui constituent un risque d'érosion et de glissement de terrain,
- L'émission des poussières, du bruit et des vibrations,
- Les contaminants chimiques ou radioactifs, épuisent ou contaminent les nappes d'eau douce et détruisent la végétation ou des habitats fauniques...

Chaque étape de l'industrie minière et chaque méthode d'exploitation génère ses impacts particuliers sur l'environnement.

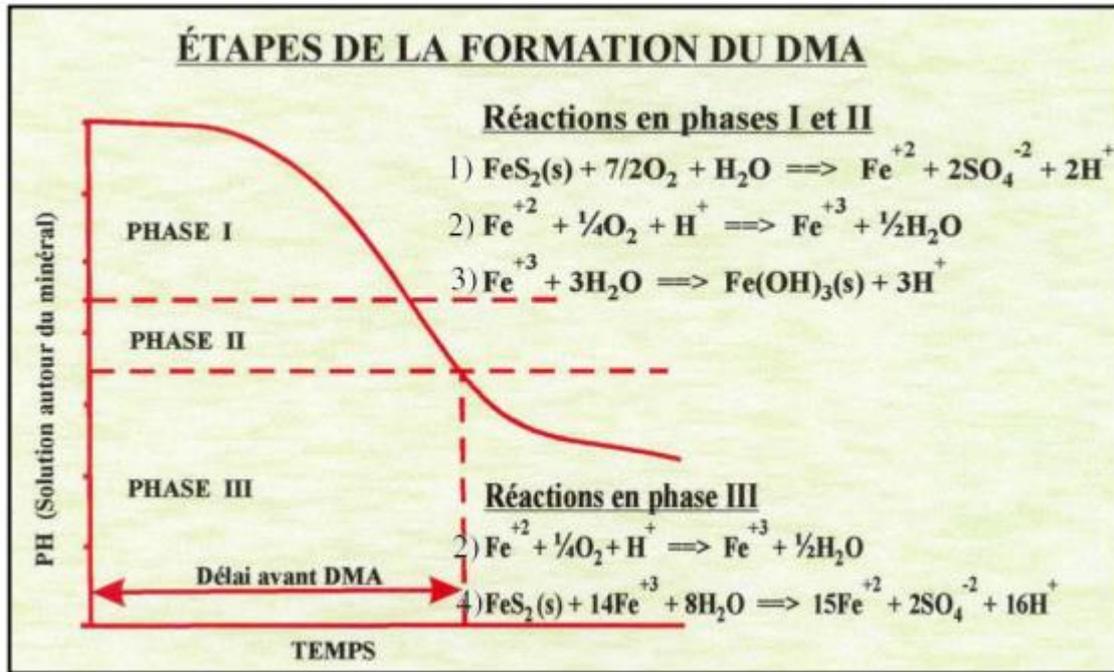
Le problème le plus pertinent de l'industrie minière à l'encontre de l'environnement est la génération du DMA. Ce dernier est caractérisé par un faible pH dû aux concentrations élevées en métaux lourds, en sulfates et en solides dissous ; sa formation se produit sous l'effet des conditions climatiques et du contact des rejets miniers avec l'eau, l'air et de la température. Ce qui cause l'oxydation directe des minéraux sulfureux. Les impacts du DMA peuvent être liés à des risques d'ordre physique, chimique ou esthétique ; le DMA est généralement issu du Fer. Cet élément existe en quantités énormes dans le monde ; on prend par exemple la formation du DMA à partir de la pyrite (FeS<sub>2</sub>) (TAHA Yassine, 2017)



La production de DMA s'initie et évolue selon 3 étapes en se basant sur des essais de lixiviation de minerais ainsi que sur l'étude de cas réels. Le tableau et la figure ci-dessous, présentent un résumé des différentes réactions et phases de formation du DMA. Le processus de la réaction se produit selon une séquence dépendant de l'activité bactérienne et des conditions de pH du lixiviat.

Réactions		
1) $FeS_2(s) + 7/2 O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+ + \text{énergie}$		
2) $Fe^{2+} + 1/4 O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + 1/2 H_2O + \text{énergie}$		
3) $Fe^{3+} + 3H_2O \rightarrow Fe(OH)_3 + 3H^+ + \text{énergie}$		
4) $FeS_2(s) + 14Fe^{3+} + 8H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ + \text{énergie}$		
Etapas	Mécanismes	Effluents
I	Réaction 1 : chimique et biologique	pH > 4,5
	Réaction 2 : chimique ralentit quand le pH baisse	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] élevée [Fe] faible Acidité faible ou nulle
II	Réaction 1 : chimique et biologique	pH de 2,5 à 4,5
	Réaction 2: taux déterminé par l'activité bactérienne	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] élevée [Fe] et acidité augmentent Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup> faible
III	Réaction 3 : contrôlée biologiquement	pH < 2,5
	Réaction 4 : au taux lié à celui de la réaction 3	[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ] élevée [Fe] et acidité élevées rapport Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup> élevé

Figure 11: Etapes de la production du DMA (AUBERTIN et al. 2002)



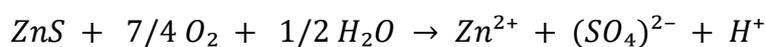
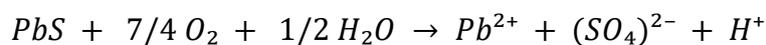
**Figure 12: Phases de formation du DMA**

Étape I : À cette étape, l'oxydation de la pyrite se fait par voie chimique et biologique (réaction 1). L'hydrolyse du fer ferreux (réaction 2) et l'oxydation du fer ferrique (réaction 3) se fait principalement par voie chimique à cette étape.

Étape II : Cette étape est initiée par le ralentissement de l'oxydation chimique du fer ferrique causée par la baisse du pH et sa substitution par l'oxydation biologique qui s'accélère.

Étape III : Lorsque le pH diminue sous une valeur de 3, la solubilité du fer augmente et moins en moins de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  précipite. L'activité du  $\text{Fe}^{3+}$  augmente ainsi et contribue à oxyder la pyrite (réaction 4) tandis que les bactéries catalysent l'oxydation de  $\text{Fe}^{2+}$  en  $\text{Fe}^{3+}$  (réaction 3). Un cycle est ainsi créé entraînant une production intense d'acidité, de sulfate et de fer. (TAHA Yassine, 2017)

Cependant les réactions de la génération du DMA issu d'autres minéraux sulfurés, la galène ( $\text{PbS}$ ) et la sphalérite ( $\text{ZnS}$ ) s'écrit :



L'exploitation minière est l'une des activités anthropiques les plus polluantes puisqu'elle génère la production de DMA, un lixiviat à forte acidité et une concentration en métaux dissous élevée. (Melanson, 2006).

Puisque chaque mine est unique du point de vue de la production de DMA et de ses effets (Akcil and Koldas, 2006), l'environnement est modifié de manière différente pour chacun des sites que ce soit pour le pH des sols et des eaux ou pour la concentration en métaux. Il n'y a donc aucune méthode universelle nous permettant de traiter le DMA. Ainsi, la capacité de support des milieux est fortement atteinte puisque les limites de concentrations pour la protection du milieu de vie aquatique sont très souvent dépassées (Pelletier-Allard Rébecca, 2014).

Les zones humides, les milieux aquatiques et les aquifères sont des endroits particulièrement vulnérables au DMA. Dans certains cas, ils peuvent même accentuer la production de DMA puisque la présence d'eau est importante dans ces milieux libérant ainsi plusieurs tonnes de métaux lourds dans les cours d'eau. Et pourtant, ce sont des milieux essentiels puisqu'ils supportent la vie d'une grande et riche biodiversité. Le caractère acide des effluents miniers comporte des impacts directs tels que la mortalité des populations de poissons et crustacés puisque peu d'espèces peuvent survivre à un pH inférieur à 5. D'autres conséquences de l'acidification auront un impact sur leur taux de croissance et de reproduction. (Pelletier-Allard Rébecca, 2014).

Dans les régions où le sol est naturellement acide, l'acidité et les métaux contenus dans le DMA sont transportés sur une plus grande distance tandis que les sols constitués de calcaires diminuent la distance parcourue. Dans cette condition, les eaux acides sont rapidement neutralisées par les roches carbonatées, et la plupart des métaux deviennent insolubles et se précipitent dès que le pH remonte (Pelletier-Allard Rébecca, 2014).

La teneur élevée en sulfates provoque une pression osmotique importante engendrant la déshydratation des êtres vivants. Les métaux solubilisés dans le DMA sont non dégradables et sont presque tous de violents poisons du métabolisme de la plupart des espèces vivantes. De plus, la présence simultanée de plusieurs métaux peut engendrer une toxicité supérieure à celle de chaque métal séparé. Par exemple, le zinc, le cadmium et le cuivre sont toxiques lorsqu'ils sont présents simultanément dans des eaux de pH faible. Ainsi, ils agissent en synergie pour inhiber la croissance des algues et affecter les poissons (FNEHIN, 2012).

L'effet des DMA s'étend bien au-delà du secteur de l'extraction de minerai et de stockage des résidus. L'entretien du caractère acide des eaux et leur entraînement vers l'aval sont favorisés par les pluies qui imbibent les gisements superficiels, terrils, décharges et bassins de décantation. Les DMA sont transportés vers les sols, les cours d'eau et les aquifères. L'acidité combinée à la présence de contaminants potentiellement toxiques comme les éléments traces et les divers métaux lourds (Cu, Cd, Pb, Co, Hg, As...), peut affecter sérieusement les écosystèmes environnants.

## **2 Méthodes de gestion**

### **2.1 Sur le site minier**

La gestion des résidus sur place peut amener les sociétés minières à prendre certaines mesures de précaution pour tenter de réduire l'impact environnemental des résidus miniers. Il existe plusieurs modes de gestion :

#### **2.1.1 Désulfuration environnementale :**

Il s'agit d'une méthode basée sur le principe d'éliminer le plus possible de sulfure des déchets miniers afin de prévenir l'apparition de problèmes de drainage minier acide ou de réduire au maximum leur intensité. L'élimination peut être réalisée par des techniques de concentration comprenant des méthodes de flottation et de gravimétrie. Cette technique fonctionne assez bien pour un site en direct.

La désulfuration a pour objectif principal la récupération de toute source potentielle de DMA et plus précisément les sulfures. Ce procédé permet d'obtenir une fraction non génératrice

d'acidité ayant un potentiel de neutralisation (PN) supérieur à son potentiel d'acidification (PA) et une deuxième fraction caractérisée par un PA élevé

#### 2.1.2 Barrière à l'oxygène :

Considérant que l'oxygène est un réactif qui provoque le drainage minier, minimiser l'apport d'oxygène devient nécessaire pour prévenir ou ralentir ce phénomène. A cet effet, des recouvrements à très faible perméabilité à l'air ou à très faible consommation d'oxygène sont installés. Ces recouvrements peuvent être naturels ou encore organiques

#### 2.1.3 Les recouvrements étanches et contrôle des infiltrations d'eau:

L'eau est à nouveau un facteur affectant la production de drainage minier. C'est pourquoi il est nécessaire d'exclure l'alimentation en eau des résidus du concentrateur, et d'empêcher l'infiltration des eaux de surface et des eaux souterraines en construisant des barrières à faible perméabilité (géo membrane ou géo composite de bentonite), il peut également y avoir des haldes avec une granulométrie de couches très fines.

#### 2.1.4 Neutralisation :

Cette technique consiste à augmenter le pH du DMA pour atteindre un pH de solubilité de certains métaux (Fe, Zn, Cu...). La neutralisation à la chaux est la plus couramment utilisée dans l'industrie minière.

### 2.2 En dehors du site minier

Les résidus miniers font actuellement l'objet de recherches et sont considérés comme des ressources plutôt que comme des déchets. Dans le cadre d'une gestion efficace et durable, un grand nombre de recherches récentes ont suscité un vif intérêt pour les modèles de réutilisation des déchets miniers dans d'autres secteurs industriels en dehors de la zone minière. Dans ce cas, l'objectif était de tester la possibilité de réutiliser ces émissions dans l'industrie de la construction d'un point de vue de la durabilité. Les matériaux de construction peuvent également absorber de grandes quantités de déchets en tant que substituts des matières premières utilisées.

Dans notre cas on peut dire que l'utilisation de ces résidus pour fabriquer du mortier est une alternative durable pour gérer ce type de déchets et que la lixiviation des métaux lourds du mortier présente des risques mineurs. On peut conclure que l'utilisation des déchets miniers hors site est un concept de plus en plus intéressant, en particulier avec l'émergence de nouvelles réglementations dans le monde insistant sur une gestion efficace et durable de tous les types de déchets.

## 3 Réhabilitation

Lorsque les travaux d'activité minière sont terminés, le site doit être prêt pour une utilisation future. Souvent, ces plans font partie de l'autorisation du site dès la phase de planification et doivent donc être régulièrement mis à jour pour tenir compte de tout changement dans les événements et les négociations avec les autorités d'autorisation, les permis et les autres parties intéressées. Dans certains cas, le but est de laisser le moins de traces possible, alors que dans d'autres une transformation complète du paysage peut être recherchée. Le concept de « fermeture de projet » signifie que les fermetures de sites sont prises en compte dans les études de faisabilité de nouvelles opérations minières, qui sont ensuite surveillées et mises à jour en continu tout au long du cycle de vie de la mine. Dans tous les cas, les effets nocifs sur l'environnement doivent être réduits au minimum.

Certaines zones peuvent être libérées pour des réparations plus complexes par la suite, telles que le remodelage, couverture et le reverdissement. Pour d'autres, l'entretien post-fermeture sera nécessaire pendant une période prolongée ou pendant toute la durée de vie.

Il n'est pas possible de restaurer un site dans son état d'origine. Cependant, l'opérateur, les régulateurs et les parties intéressées doivent tous s'entendre sur son utilisation continue. En règle générale, la responsabilité de préparer le site à cette fin incombe à l'exploitant. Pour recevoir une autorisation de disposer de matériaux, il devra cataloguer les spécificités des matériaux retenus (quantité, qualité/consistance, dangers éventuels). Dans un projet impliquant des résidus ayant un potentiel net de DMA, la principale préoccupation est d'empêcher un futur drainage acide.

#### **4 Valorisation**

La valorisation d'un objet consiste à mettre en valeur l'objet qui n'a pas de valeur commerciale ou à augmenter sa valeur commerciale. Dans la gestion des rejets industriels, la valorisation a pour but d'utiliser un rejet qui n'a pas de valeur commerciale comme matière première pour un produit, un traitement, un ouvrage... etc. ou bien la valorisation veut dire la mise en valeur d'un objet ayant une faible ou n'ayant aucune valeur commerciale. La valorisation apparaît lorsqu'on cherche à éviter l'enfouissement des matières résiduelles.

Cet aspect est mis en avant lorsque les deux objectifs ciblés entrent en contradiction. Ainsi, le cas de résidus ayant un pH neutre utilisés comme matière neutralisante dans la construction d'un parc à résidus est considéré comme un exemple de valorisation en raison de son utilité environnementale même si, en soi, les résidus neutres sont eux aussi entreposés. Un autre exemple est celui du remplissage de fosse, où les rejets problématiques extraits du site minier sont retournés pour combler les vides produits par l'exploitation du sol. Les résidus ainsi disposés n'ont a priori aucune utilité technique, de sorte que cette avenue pourrait être considérée comme de l'enfouissement selon plusieurs critères. Or, le remplissage de fosse est reconnu comme une activité de valorisation lorsqu'elle permet d'éviter les problèmes environnementaux liés à l'entreposage des résidus dans un parc à résidus

L'une des méthodes qui aide à diminuer l'impact des rejets sur l'environnement et réduire leur volume, est l'utilisation de ces rejets en dehors du site minier. L'idée principale consiste à trouver des chemins de valorisation de ces rejets qui peuvent consommer ces grandes quantités. En réalité, cela dépend de la recherche des clients puissants sur le marché, attirés par les propriétés physiques, chimiques et minéralogiques de ces rejets. Chaque type de rejet possède ses propriétés propres ; cela veut dire qu'on ne peut pas trouver des rejets issus des sites différents avec les mêmes propriétés. La gestion de ces rejets ne sera pas la même.

Les chercheurs proposent des solutions pour gérer chaque type de déchet en mettant en valeur leurs caractéristiques en termes de matière minérale et de granulométrie. Les rejets miniers peuvent être utilisés avec succès dans le domaine des matériaux de construction. Cette voie de valorisation pourrait être une solution environnementale prometteuse. Il est possible en effet non seulement de réduire les quantités de rejets miniers mais aussi de conserver les ressources naturelles (argiles, sables, granulats, etc.) consommées dans les constructions. On ne peut pas dire que tous les rejets miniers sont réutilisables, une caractérisation approfondie est généralement utilisée pour statuer sur la méthode de gestion appropriée de ces rejets miniers. Cela dans le but de les classer au préalable, en se basant sur une estimation du potentiel de

génération d'acidité. Des essais statiques, cinétiques et des modèles numériques de prédiction sont souvent utilisés.

Dans le cadre de l'écologie industrielle et du développement durable, Une volonté de symbiose et de synergie entre les producteurs de déchets et les consommateurs potentiels est nécessaire afin de trouver des emplois pour la valorisation des déchets miniers. Ceux-ci ont beaucoup de potentiel à découvrir et à explorer. Ils peuvent être utilisés comme ressource secondaire ou alternative pour l'innovation des matériaux de construction écologiques. Dans ce contexte, un certain nombre d'études récentes ont consacré une attention particulière aux différentes manières dont les déchets miniers peuvent être réutilisés dans la construction. En règle générale, ces études se déroulent à plus petite échelle dans un laboratoire et l'application pratique de ces études n'a pas encore été réalisée. Des recherches ont tenté de récupérer les rejets de processus de cuivre en remplacement du sable naturel dans la production de béton ordinaire. Un taux de substitution de 60% a été jugé optimal et les matériaux du béton dérivés présentent des propriétés de résistance mécanique et de durabilité satisfaisante.

## **5 Défi de réutilisation**

Les moyens de réutiliser les déchets miniers commencent par de nouvelles technologies de gestion des déchets. La technologie détermine le cycle de vie d'un matériau, compte tenu de la manière dont il est extrait, fabriqué, utilisé et éliminé. L'application de nouvelles technologies appropriées est considérée comme une solution potentielle pour améliorer les performances de gestion des émissions. Cela entraîne des défis techniques qui font l'objet de recherches pour atténuer l'impact des services gérés de manière inefficace. En raison du grand volume de production, la collecte et le transport des déchets miniers est l'un des principaux défis. De plus, l'hétérogénéité de leurs propriétés peut affecter leur manipulation et le comportement des produits finis après recyclage. Par ailleurs, l'acceptabilité sociale est également un enjeu majeur pour les opérateurs. Il s'agit d'un contrat volontaire entre le porteur de projet et les riverains, dans le but de trouver un compromis entre ces deux acteurs, en tenant compte de la crainte des riverains vis-à-vis des activités minières. Afin d'obtenir une acceptation sociale, les principaux défis à surmonter sont les suivants :

- manque de communication entre les opérateurs et les autorités locales,
- protection de l'environnement local contre tout type de déformation,
- la protection de la santé et du bien-être des résidents,
- Protéger l'image et la réputation de la région à laquelle sont confrontés les opérateurs.

La demande exponentielle sur les bétons et mortiers, en raison de leurs propriétés mécaniques importantes et leur durabilité, pousse les industriels à trouver d'autres alternatives aux matières premières utilisées dans la production de ces matériaux de construction. Les résidus miniers qui contiennent des métaux résiduels ont été utilisés efficacement comme agrégats dans les mortiers avec de bonnes performances mécaniques et de durabilité. D'autres études ont montré la possibilité d'intégration des résidus miniers comme matériels de cimentation ou comme additifs dans les bétons et mortiers. La construction des routes en travaux publics représente un chemin de valorisation prometteuse des rejets miniers. Les résidus issus du traitement de cuivre ont fait preuve de bonnes performances une fois utilisés comme agrégats dans la construction de routes.

Une démarche qui tend à évaluer l'effet des agrégats recyclés, à travers l'évaluation des performances du béton résultant, sans prendre en considération les caractéristiques ou la nature des agrégats utilisés a été adopté. Les différents agrégats recyclés ayant subi l'étude sont ceux issus de la construction et de la démolition. Certes, l'utilisation des rejets miniers comme agrégats fins en remplacement du sable dans le mortier ou le béton présentent plusieurs défis, entre autres :

- le manque de confiance des clients,
- le doute sur les bénéfices environnementaux,
- le manque de standards et de spécifications,
- la qualité médiocre du produit final,
- le problème de transport.

## **6 Industrie de fabrication béton**

Le béton est un matériau de construction largement utilisé, en particulier à mesure que les zones urbanisées s'étendent et que les infrastructures se développent de manière exponentielle. Il a un grand potentiel dans le monde entier en raison de ses propriétés mécaniques, notamment sa résistance et sa durabilité. C'est la base pour la construction de routes, de rues, de parkings, de ponts, de gratte-ciel, de barrages, de maisons, de sols, de trottoirs et de nombreuses autres applications. Il est composé d'agrégats naturels, de liants, d'eau et d'air. L'agrégat se compose d'une fraction à grains grossiers caractérisée par du gravier ou de la pierre concassée, généralement d'une taille comprise entre 1,25 et 20 mm, et d'une fraction à grains fins caractérisée par du sable (naturel ou artificiel) Le liant est principalement du ciment Portland avec ou sans additifs, qui joue un rôle essentiel dans le processus de préparation du béton en raison de la réaction chimique du ciment en présence d'eau, qui donne sa consistance au mélange et forme le béton. C'est une colle qui durcit et forme une boule. D'autres adjuvants réducteurs d'eau peuvent être utilisés dans les mélanges de béton pour améliorer leurs performances et leur qualité. Les réducteurs d'eau sont un sujet de discussion brûlant, qui ont tendance à réduire le rapport eau-ciment et à améliorer les propriétés mécaniques du béton et sa maniabilité. La préparation du béton nécessite le choix des matériaux en fonction de la résistance cible prédéfinie (le béton classique a une résistance comprise entre 20 et 40 MPa) Cette sélection comprend un contrôle qualité des ingrédients (granulométrie, absorption d'eau, densité, etc.).

Un dosage minutieux est effectué afin d'atteindre les propriétés déterminées au départ, les ingrédients sont mélangés dans un malaxeur ou une bétonnière conçu à cet effet, puis l'affaissement est mesuré et réajusté à l'aide d'un cône d'Abrams pour contrôler spécifiquement les propriétés de travail. Les propriétés du béton varient selon qu'il est frais ou durci. Ses principales caractéristiques à l'état frais sont :

- Maniabilité : Elle caractérise la capacité de moulage et la facilité de transport du mélange.
- Affaissement : Il s'agit d'un test simple utilisant un cône d'Abrams pour mesurer la maniabilité du béton.
- Densité et teneur en humidité : La densité ou La masse volumique du béton et la quantité d'air sont mesurées à l'aide d'un air mètre.

Le béton durci à d'autres propriétés, entre autres :

- La cure : elle sert à durcir, murir le béton et atteindre une hydratation complète du ciment dans une chambre humide (80% d'humidité).
- La résistance : il s'agit d'une propriété physique exprimée en MPa et mesurée à différents temps de cure notamment à 7, 28, 56 et 90 jours à l'aide d'un test de compression uniaxiale.
- La durabilité : elle caractérise la résistance du béton à l'attaque d'un agent agressif physique ou chimique (Moranville-Regourd 1982).

En raison de la demande exponentielle sur les matériaux de construction et de la problématique causée par les rejets miniers, plusieurs études ont été menées afin de trouver des alternatives aux agrégats naturels constituant le béton et d'évaluer l'effet de ces rejets sur les performances du béton dans l'espoir de trouver la recette optimale pour une qualité meilleure.

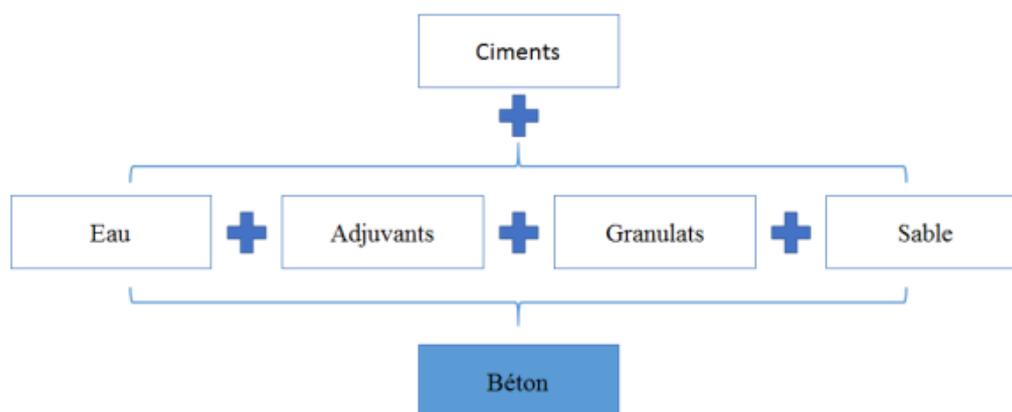
## 7 Procédé de fabrication du béton

Les méthodes de formulation du béton sont des approches utilisées pour déterminer les proportions optimales des ingrédients constituant le mélange de béton. Elles comprennent la méthode de Dreux-Gorisse, la méthode ACI, la méthode de Marshall, la méthode du dosage à la masse volumique maximale et la méthode du rapport eau-ciment, parmi ces méthodes la plus utilisée c'est celle de Dreux-Gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode qui permet d'obtenir un mélange optimal en termes de résistance, de durabilité et de maniabilité. Elle repose sur l'utilisation de courbes granulométriques et de proportions spécifiques de granulats.

Le processus de formulation selon la méthode de Dreux-Gorisse consiste à analyser les caractéristiques des granulats disponibles, tels que les sables et les gravillons, et à établir une courbe granulométrique représentant leur distribution des tailles. Ensuite, en utilisant des graphiques et des calculs, les proportions adéquates de granulats sont déterminées en fonction des performances souhaitées pour le béton.

L'objectif de la méthode de Dreux-Gorisse est d'optimiser la densité et la compacité du mélange de béton, ce qui permet d'obtenir une meilleure résistance mécanique et une durabilité accrue. De plus, cette méthode permet également d'ajuster la quantité d'eau et les proportions des autres composants du béton, tels que le ciment et les adjuvants, pour assurer une bonne maniabilité du mélange.



*Figure 13: schéma de fabrication du béton*

## 8 Matière première :

### 8.1 Le ciment

Le ciment joue un rôle essentiel dans la fabrication du béton en tant que composant principal du mélange. Les réactions physico-chimiques complexes qui se produisent entre le ciment, l'eau et les autres composants du mélange sont responsables du durcissement du béton, formant ainsi une structure solide où les différents éléments sont étroitement liés (NEVILLE Adam, 2000).

Le ciment se présente sous forme d'une fine poudre de couleur grise ou blanche. La taille des particules de ciment est mesurée par la valeur de la finesse Blaine, qui représente la surface totale des particules contenues dans 1 gramme de ciment. La finesse Blaine des ciments varie généralement entre 3 500 et 4 500 cm<sup>2</sup>/g. Les particules de ciment ont une dimension caractéristique d'environ 30 à 50 µm.(boulkhiout messaouda, 2015)

### 8.2 Les granulats

Les granulats comprennent les sables et les gravillons ; ils jouent un rôle essentiel en tant que structure de base du béton. Leur nature, leur dureté et leur forme les distinguent les uns des autres. Il est primordial que les granulats soient propres et chimiquement inertes vis-à-vis du ciment, de l'eau et de l'air. Ils doivent également répondre à certaines exigences en termes de forme, de texture de surface, de dureté, de résistance à l'abrasion, de porosité et de résistance au gel.

La propreté des granulats est essentielle pour éviter toute contamination indésirable dans le béton, ce qui pourrait compromettre sa qualité et sa durabilité. De plus, leur inertie chimique assure une interaction stable avec les autres composants, garantissant ainsi la solidité du béton.

La forme des granulats est également un facteur déterminant. Des granulats de forme irrégulière peuvent offrir une meilleure adhérence entre les particules, améliorant ainsi les propriétés mécaniques du béton. La texture de surface des granulats peut également influencer l'interlocking entre les grains, renforçant la cohésion globale du matériau.

La dureté des granulats est importante pour résister à l'usure et à l'abrasion, en particulier dans des applications soumises à des contraintes mécaniques élevées. De plus, leur porosité doit être maîtrisée pour éviter toute détérioration due à la pénétration d'eau ou de substances chimiques nocives.

Enfin, la résistance des granulats au gel est essentielle dans les environnements où les cycles de gel et de dégel sont fréquents. Des granulats résistants au gel minimisent les risques de fissuration et de détérioration du béton exposé à de telles conditions.

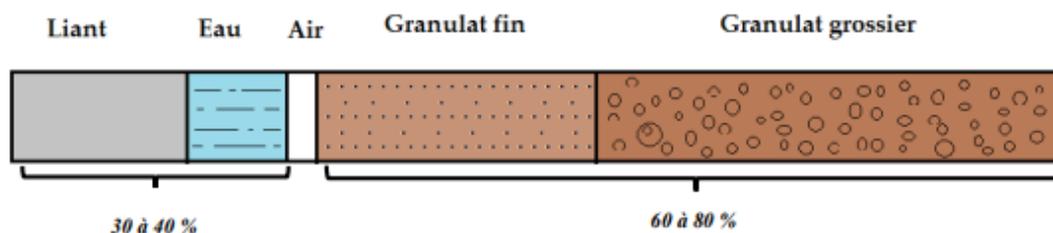
Ainsi, le choix des granulats adaptés aux exigences spécifiques du projet de construction est crucial pour garantir la qualité, la durabilité et les performances du béton.(boulkhiout messaouda, 2015)

### 8.3 Eau de gâchage

L'eau utilisée dans la fabrication du béton, appelée eau de gâchage, doit être propre et de qualité potable. Elle joue un rôle crucial dans l'hydratation du ciment et dans la mise en place correcte du béton frais. Elle doit respecter les spécifications de la norme **NA 1966** pour garantir la qualité et les performances du béton (boulkhiout messaouda, 2015)

#### 8.4 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques utilisés en petites quantités dans le béton frais pour améliorer certaines de ses propriétés. Les principaux adjuvants sont les plastifiants et les fluidifiants réducteurs d'eau, qui ont deux fonctions principales : ils permettent d'obtenir un béton frais à la consistance fluide voire liquide, et ils offrent la possibilité de réduire la quantité d'eau nécessaire pour la fabrication et la mise en place du béton. L'effet des adjuvants peut varier en fonction du type et de la composition du ciment, et des problèmes de compatibilité peuvent survenir entre les adjuvants et les ciments utilisés. (boulkhiout messaouda, 2015)



*Figure 14: Proportion de la matière première pour la fabrication du béton*

#### 9 Utilisation des déchets miniers comme matière alternative dans la fabrication béton

L'utilisation de rejets de finesse bien déterminée dans le béton comme matière de charge minérale constitue un sujet de recherche pertinent visant l'amélioration des propriétés mécaniques du béton. Des essais ont été menés sur l'utilisation des rejets miniers hétérogènes provenant d'ancienne mine de manganèse en Espagne, ayant des propriétés physiques et chimiques variables comme agrégats fins remplaçant le sable pour la production du béton. Les résultats obtenus montrent que le béton à base de rejets miniers atteint une résistance à la compression supérieure à celle du béton conventionnel. Une étude est faite sur la possibilité de substituer la fraction du sable naturel dans le béton par des résidus de traitement de cuivre, avec des ratios eau/ciment variant entre 0.4, 0.45 et 0.5. Le taux de substitution du résidu dans le béton allant de 0 jusqu'à 60 % de substitution de la fraction sableuse du béton.

Plusieurs propriétés ont été évaluées notamment la densité, le retrait, la résistance à la compression et à la flexion et l'attaque sulfatique. Les résultats ainsi obtenus ont montré que la densité du béton augmente avec l'augmentation de la proportion du résidu de cuivre incorporé dans le béton. Ceci est dû à la densité élevée du résidu comparé au sable naturel. D'autres recherches ont testé la possibilité de remplacer le sable naturel pour béton par le sable de fonderie (sous-produit obtenu à partir du coulage des alliages métalliques) à des pourcentages variés (10, 20, 30, 40 et 50%). Les résultats montrent l'amélioration de la résistance mécanique du béton produit avec le sable de la fonderie comme produit de substitution de la fraction fine ainsi qu'une bonne résistance à la carbonatation et à la pénétration rapide des chlorures.

Un intérêt particulier a été porté aux possibilités de substitution du liant (ciment) par des rejets ayant des caractéristiques similaires en particulier les résidus de sable bitumineux provenant de l'industrie minière des sables bitumineux au Canada. Ces résidus sont considérés comme un matériau de cimentation dans le béton de haute performance. En effet, ils sont valables comme un substituant partiel du ciment Portland avec une amélioration des résistances à la compression et à la flexion à court et long terme. En plus, ces résidus font partie des additifs respectueux de l'environnement et potentiellement rentables. Des résidus miniers provenant du traitement de fer ont été également testés comme liant alternatif remplaçant une fraction du ciment Portland

ordinaire. Ils ont fait preuve de meilleures performances comparées au ciment ordinaire. Leur réutilisation dans les matériaux de construction comme les bétons ou les mortiers reste faisable et rentable vu le coût onéreux du ciment. Actuellement, d'autres voies de réutilisation des rejets sont sujets de recherches, comme les ciments, les géo polymères, les agrégats légers, etc.

Notre sujet de recherche est de remplacer le sable naturel par des rejets miniers du plomb et zinc fractionné en fine dimension dans le mortier ou bien le béton, les propriétés physiques et mécaniques seront plus intéressante que les propriétés d'un mortier/béton conventionnelle puisque le plomb et zinc sont des métaux lourds

## **10 Propriétés technologiques**

### **10.1 Propriétés mécaniques:**

Le comportement du Béton a base des rejets miniers spécifiquement rejets du plomb et zinc ne présentent aucune résistance pendant les premières semaines. La présence des métaux plomb et zinc peut provoquer un retard de prise du béton, à partir des 4<sup>ème</sup> semaine que la prise de ce mortier se produit avec une résistance plus intéressante reste à découvrir si elle sera conforme au norme ou bien on la compare avec la résistance mécanique d'un béton conventionnelle.

### **10.2 La teneur en particules fines (< 20 µm) :**

En général, le béton comprend des granulats grossiers et des granulats fins, mais les résidus ne sont utilisés que comme remplacements partiels ou complets des granulats fins, car leurs particules sont fines avec un diamètre inférieur à 20 µm. Les propriétés physiques des résidus ont un impact significatif sur la maniabilité, la densité, la stabilité dimensionnelle, la résistance et la durabilité du béton. Parfois, les résidus, en particulier les résidus métalliques, contiennent des traces des métaux lourds nocifs, ce qui peut causer des problèmes environnementaux ou modifier les processus d'hydratation et la durabilité des mélanges de mortier ou de béton.

### **10.3 Maniabilité :**

Elle est définie comme étant la facilité de transport, de mise en place, de compactage et de finition du mélange. Elle est une propriété importante des mélanges de mortier ou de béton frais. Il a été constaté que le débit de mortier à base des déchets miniers diminuait avec l'augmentation des niveaux de substitution des résidus, car les résidus avaient une distribution de taille de particules plus fines, ce qui augmentait la surface spécifique totale des agrégats fins. Une conséquence similaire s'est appliquée au béton. Une diminution de l'affaissement a été observée jusqu'à l'inclusion de 100 % de substitution des résidus en tant que granulats fins. Cela pourrait être attribué à la taille des particules et à la texture de surface des résidus, qui peuvent exiger plus d'eau et donc réduire la maniabilité.

### **10.4 Le temps de prise :**

le temps du prisme du béton à base des rejets s'est prolongé lorsque les résidus ont été incorporés en remplacement des granulats fins, car les métaux lourds contenus dans les résidus ont retardé l'hydratation du ciment en formant une couche de faible perméabilité autour des grains de clinker de ciment non hydratés. L'utilisation des résidus comme remplacement d'agrégats fins a amélioré la densité des mélanges frais, car l'augmentation a été attribuée à la densité plus élevée des résidus que celle du sable naturel. De plus y 'a des études qui ont considéré que l'augmentation du tassement des grains était également une raison due à une plus grande teneur en fines dans les mélanges contenant des résidus.

## 11 Comportement environnemental

Dans le cadre de la recherche d'utiliser des rejets miniers comme granulats pour Beton conduit à sélectionner un essai permettant à la fois de

- La prédiction contre l'évolution de la qualité des eaux de drainage et le DMA
- étudier le transfert de polluants à travers un bloc monolithique. Le test de lixiviation ainsi retenu est le test de lixiviation sur monolithe. Ce protocole a été adapté à partir d'un test néerlandais standard (**EA NEN 7375**). Il consiste en la lixiviation d'un bloc monolithique avec de l'eau déminéralisée dans un réacteur agité et fermé, avec un renouvellement périodique de la solution en contact avec le matériau. Des cubes de 4 cm, obtenus par tronçonnage à sec des éprouvettes de mortier (28 jours d'âge de maturation), sont introduits dans des flacons et posés sur une grille à 2 cm du fond. Le lixiviant (eau déminéralisée) est introduit dans un rapport volume de liquide/surface du bloc (L/S) de 10 cm<sup>3</sup> /cm<sup>2</sup> . Au cours de la lixiviation, la solution est agitée à l'aide d'un agitateur magnétique. Le rythme de changement de la solution est de 6 heures, 1 jour, 2,25 jours, 4 jours, 9 jours, 16 jours, 36 jours et 64 jours. On obtient ainsi 8 solutions dont on mesure les paramètres physico-chimiques (pH, Eh et conductivité) avant de procéder à une filtration (0.45 µm) et une acidification (HNO<sub>3</sub>) pour le dosage des éléments solubles (Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, S, Sb, Se, Si, Ti, Zn).

Si le test de lixiviation a indiqué que dans le cas de teneurs en métaux résiduels est relativement faibles dans les résidus (Pb 4500 mg/kg, Zn 250 mg/kg), les risques de libération de métaux à partir des mortiers à base de résidus seront faibles et leur réutilisation comme enduits de surface peut constituer une méthode de valorisation efficace des résidus étudiés

### 1 Échantillonnage :

L'échantillonnage joue un rôle crucial dans les études géologiques et minières, offrant une méthode essentielle pour réduire la quantité de matériau à étudier. Il permet de diviser un échantillon primaire en plusieurs autres échantillons, en utilisant divers processus tels que des techniques manuelles ou mécaniques. L'objectif principal de l'échantillonnage est d'assurer la représentativité de l'échantillon prélevé, en garantissant que les caractéristiques du minerai étudié sont fidèlement reflétées.

Au niveau de la laverie de Boucaïd, il existe deux digues à terrils distincts pour les rejets de concentration. Le premier terril, qui contient des rejets de plomb et de zinc, a été abandonné depuis 1976. Pour évaluer ces rejets, nous avons sélectionné quatre points d'échantillonnage disposés de manière trapézoïdale. Quant au deuxième terril, il contient des rejets de baryte. Nous avons également choisi quatre points d'échantillonnage disposés de manière trapézoïdale, cependant, en raison des difficultés d'accès au quatrième point, nous avons opté pour un autre point accessible pour garantir une collecte de données complète et représentative. A chaque point nous avons effectué des prises dans des sacs plastiques d'échantillonnage

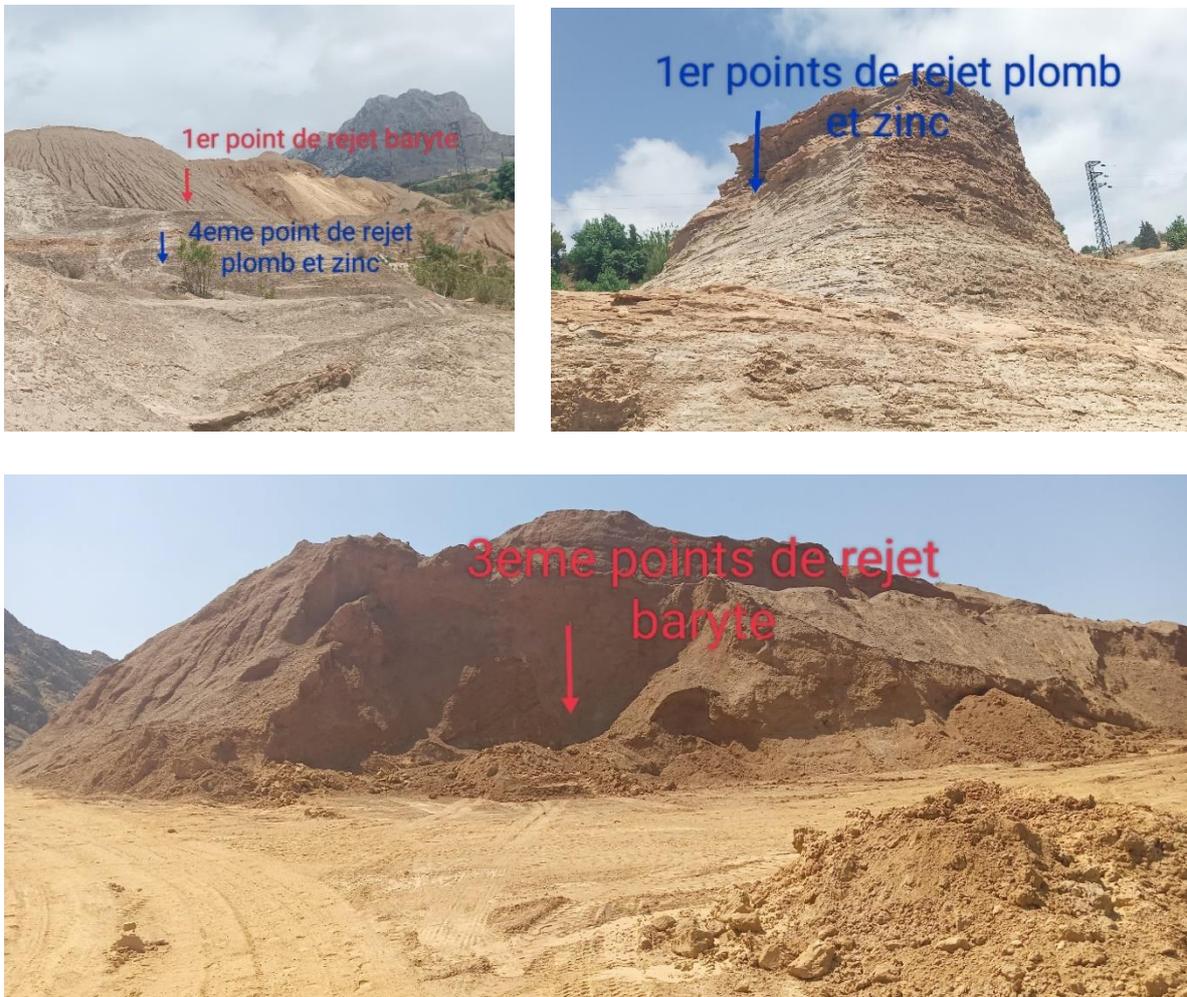
Voici les coordonnées de tous les points prélevés :

Rejet	points	latitude	Longitude	Elévation (m)
Plomb-zinc	1er	35°53'25.57"N	1°36'51.96"E	1085
	2eme	35°53'26.42"N	1°36'50.46"E	1080
	3eme	35°53'26.92"N	1°36'50.66"E	1081
	4eme	35°53'26.95"N	1°36'52.76"E	1090
baryte	1er	35°53'27.67"N	1°36'53.33"E	1093
	2eme	35°53'28.14"N	1°36'53.47"E	1100
	3eme	35°53'29.35"N	1°36'54.68"E	1107
	4eme	35°53'28.57"N	1°36'56.22"E	1110

Tableau 5: Coordonnées des échantillons prélevés



Figure 15: Points de prélèvement des échantillons



**Figure 16: Illustration des points prélevés au niveau des digues à terrils de Boucaid**

## 2 Préparation des rejets

### 2.1 Séchage :

Le séchage à l'air libre consiste à exposer les échantillons prélevés à l'environnement ambiant afin d'éliminer toute humidité présente. Pour ce faire, les échantillons sont disposés dans un endroit bien ventilé (laboratoire génie minier), à l'abri de l'humidité et de la pluie directe. Ils sont étalés sur des surfaces propres et non contaminants, comme des plateaux ou des bâches, en veillant à les espacer pour permettre une meilleure circulation de l'air. Le temps de séchage nécessaire est 48h afin d'assurer que nos échantillons sont secs.



**Figure 18: Les échantillons de rejets plomb-zinc Boucaïd**



**Figure 17: Echantillons de rejets de baryte Boucaïd**

## 2.2 Préparation mécanique des échantillons

Afin de produire un matériau homogène, les échantillons ont subi un concassage primaire et secondaire. Nous avons utilisé un concasseur giratoire pour le concassage primaire et un concasseur à cylindre pour le secondaire. Le produit concassé est ensuite tamisé, en utilisant un tamis de 2mm. Le choix de l'ouverture du tamis n'est pas aléatoire, selon les besoins de notre étude, nous cherchons à remplacer une partie de sable par les rejets, puisque le sable généralement utilisé est de diamètre qui varie entre 0 et 2 mm.



**Figure 19: Echantillons de baryte après concassage et tamisage**

### 2.3 Homogénéisation

L'homogénéisation est le processus visant à obtenir un mélange uniforme et représentatif d'un matériau. Dans le contexte des rejets miniers de plomb-zinc et de baryte, l'homogénéisation consiste à mélanger les 4 échantillons prélevés afin d'assurer une répartition homogène des particules et des minéraux dans chaque rejet.

Procédure :

- Peser les 4 échantillons des rejets de plomb-zinc et baryte, ensuite prélever 2 kg pour chaque échantillon pour assurer l'équilibre.
- Mettre les 4 échantillons pesés sur des grands sacs ayant une forme parallélépipédique très mince tout en effectuant un brassage sur les quatre cotés pendant 20 minutes environ. On obtient des rejets finaux homogénéisés.



*Figure 21 : Rejet de Baryte Boucaid homogène (R3)*



*Figure 20: Rejet plomb-zinc Boucaid homogène (R2)*

Il est important de préciser que le rejet de plomb-zinc provenant du district minier de Kherzet Youcef à Sétif nous a été fourni par l'entreprise ENOF. Ce rejet a été soigneusement préparé et homogénéisé avant d'être mis à notre disposition.



*Figure 22: Rejet de plomb-zinc de Kherzet Youcef (R1)*

### 3 Caractérisation matière première

#### 3.1 Caractérisation physique :

##### 3.1.1 Granulométrie : **NF-EN 933-1**

L'essai de granulométrie est une méthode utilisée pour analyser la répartition des différentes tailles de particules dans un matériau. Il consiste à séparer le matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes en utilisant une série de tamis. Les dimensions des mailles et le nombre de tamis sont sélectionnés en fonction des caractéristiques de l'échantillon et de la précision requise.

Dans notre procédé, nous utilisons la méthode de tamisage par lavage suivi du tamisage à sec. Le lavage est appliqué lorsque cela est possible, mais dans le cas de granulats légers qui pourraient être altérés par le lavage, le tamisage à sec est privilégié pour préserver leurs caractéristiques physiques.

Les masses des grains retenus sur chaque tamis sont ensuite rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages cumulés de particules passant à travers chaque tamis sont présentés sous forme de valeurs numériques et, si nécessaire, peuvent également être représentés graphiquement. Cette représentation permet de visualiser la répartition granulométrique du matériau et d'obtenir des données précises sur les différentes fractions de tailles de particules présentes.

##### 3.1.1.1 *Appareillage*

- a) Tamis avec des ouvertures comme spécifié dans la norme **NF EN 933-2**
- b) Fonds et couvercles s'adaptant aux tamis.
- c) Étuve ventilée, réglée par thermostat pour maintenir une température de 110 °C.
- d) Matériel de lavage.
- e) Balances précises à  $\pm 0,1$  % de la masse de la prise d'essai.
- f) Bacs, brosses.
- g) Tamiseuse.

##### 3.1.1.2 *Préparation prise d'essai*

La masse minimale représentative nécessaire (M) pour chaque prise d'essai dépend de  $D_{max}$  des granulats  $M = (D/10)^2$ . Cette masse doit être prélevée après un séchage dans une étuve à 110 °C

Pour les besoins de notre projet, nous avons entrepris l'essai de granulométrie pour les granulats sable, G1, G2, G3, rejet R1, rejet R2 et rejet R3

granulat	$D_{max}$ (mm)	Masse de prise (gramme)
Sable	2	500
G1	9	1000
G2	16	2600
G3	24	6100
R1	2	500
R2	2	500
R3	2	500

**Tableau 6: Prises des masses d'échantillons**



*Figure 23: Prises des masses des granulats et rejets*



*Figure 24: Etuve de séchage*

### 3.1.1.3 Mode opératoire

- lavage des granulats à l'aide d'un tamis 0.063 mm pour éliminer les fines, et laisser ces derniers dans l'étuve pendant 24 heures
- Commencer le tamisage en plaçant l'échantillon sur le tamis supérieur de la série de tamis.
- Agiter les tamis mécaniquement avec la Tamiseuse pendant quelques minutes.
- Après le tamisage, retirer les fractions de matériau retenu sur chaque tamis.
- Peser chaque fraction séparément avec une précision appropriée.

### 3.1.1.4 Module de finesse

Le module de finesse est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis d'ouvertures [0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4] mm selon la norme **NF EN 12620**

$$MF = \frac{1}{100} \sum_{0.125}^4 \text{refus cumulée des tamis } [0,125 - 0,25 - 0,5 - 1 - 2 - 4]$$



*Figure 25: Lavage des échantillons*



*Figure 26: Tamisage des échantillons*

### 3.1.2 Teneur en eau : NF EN 1097-5

Dans le cadre de l'essai de granulométrie, une étape clé consiste à mesurer la teneur en eau des échantillons de granulats et de rejets après lavage et séchage. Cette mesure permet d'évaluer la quantité d'eau présente dans les granulats et d'obtenir des données précises pour l'analyse granulométrique.

Après avoir lavé et séché les échantillons de granulats et rejets, nous procédons à la pesée de la masse ( $M$ ). Cette valeur représente la masse initiale des échantillons avant le tamisage. En comparant la masse initiale ( $M$ ) avec la masse après lavage et séchage ( $M'$ ), nous pouvons déterminer la perte de masse due à l'évaporation de l'eau.

La teneur en eau est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\text{Teneur en eau (\%)} = \left[ \frac{(M - M')}{M} \right] \times 100$$

En appliquant cette formule, nous obtenons un pourcentage qui indique la quantité d'eau présente dans les échantillons de granulats et de rejets, en tenant compte de la perte de masse due à l'évaporation.

Cette mesure de la teneur en eau est essentielle pour évaluer les caractéristiques des granulats et de rejets, notamment dans le cadre de l'analyse granulométrique et pour s'assurer de la conformité aux spécifications requises. Elle permet également de prendre en compte l'influence de l'eau sur le comportement des granulats et des rejets dans la formulation des mélanges et la fabrication du béton.

On va calculer la teneur en eau pour les granulats (sable, G1, G2, G3) et les rejets (R1, R2, et R3)

### 3.1.3 Calcul du pH :

Le calcul du pH pour nos 3 rejets a pour but d'évaluer le degré d'acidité ou d'alcalinité de ces rejets. Cela permet de déterminer leur potentiel d'impact sur l'environnement, en particulier sur les écosystèmes aquatiques. Le pH est une mesure qui indique si une substance est acide (pH inférieur à 7), neutre (pH égal à 7) ou alcaline (pH supérieur à 7).

En mesurant le pH des rejets, on peut déterminer si ces derniers sont susceptibles de provoquer des effets néfastes sur les eaux de surface, les sols ou les organismes vivants qui y sont exposés. Les rejets miniers acides, par exemple, peuvent être corrosifs et solubiliser des métaux toxiques, entraînant une contamination des cours d'eau et des sols environnants. Les rejets miniers alcalins, quant à eux, peuvent modifier le pH des eaux et avoir un impact sur la biodiversité aquatique.

Pour mesurer le pH des 3 rejets, nous avons besoin de :

- ❖ Béchets
- ❖ Agitateurs
- ❖ Balance
- ❖ pH mètre
- ❖ Eau distillée

Le mode opératoire pour mesurer le pH :

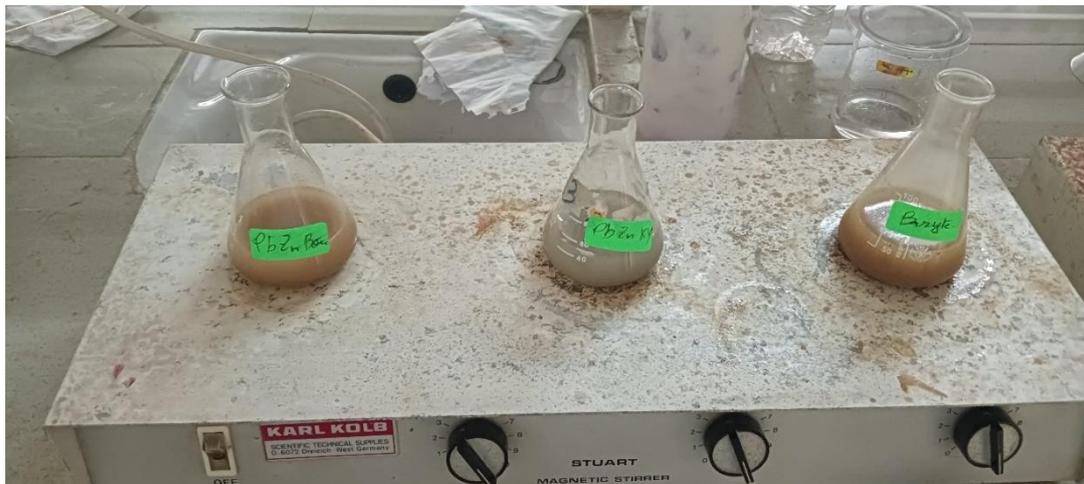
- ❖ Peser 10 grammes de chaque rejet minier.
- ❖ Préparer trois solutions distinctes en ajoutant à chaque échantillon de rejet 50 ml d'eau, en respectant le rapport solide/liquide de 1/5.
- ❖ Transférer chaque solution dans des erlenmeyers propres.
- ❖ Placer les erlenmeyers sur un agitateur et agiter pendant 1 minute à une vitesse moyenne pour assurer une bonne dispersion du rejet dans l'eau.
- ❖ Laisser reposer les solutions pendant 20 minutes après l'agitation.
- ❖ Répéter les deux étapes précédentes deux fois supplémentaires, pour un total de trois cycles d'agitation suivis de repos.
- ❖ Après le dernier repos de 20 minutes, mesurer le pH de chaque solution à l'aide d'un pH-mètre.



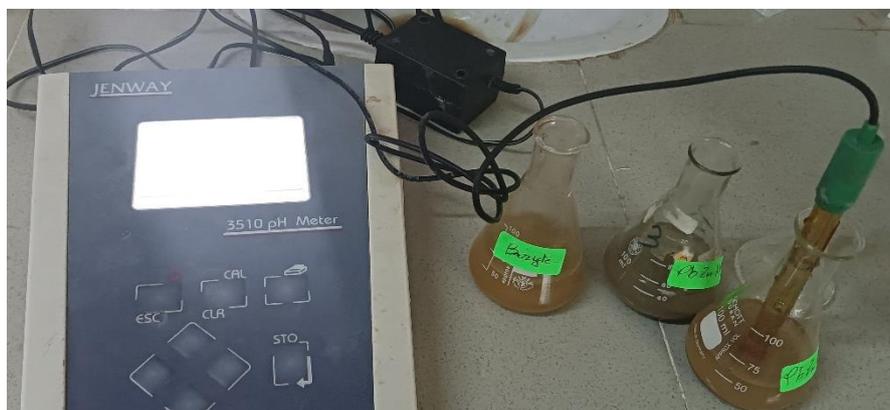
**Figure 28 : Préparation des rejets solides**



**Figure 27 : préparation des solutions**



**Figure 29: Agitation des solutions**



**Figure 30 : Mesure du pH à l'aide du pHmètre**

### 3.1.4 Masse volumique : NF EN 1097-6

L'essai de détermination des masses volumiques des granulats est essentiel dans la formulation du béton. Il permet d'ajuster précisément les proportions des composants, d'influencer les propriétés mécaniques du béton, de contrôler sa densité et d'optimiser l'utilisation des matériaux. En connaissant la masse volumique des granulats et nos rejets, il est possible de doser les ingrédients de manière appropriée, d'assurer la stabilité et la durabilité de notre béton, tout en économisant les matériaux

La détermination de la masse volumique réelle implique le calcul du rapport entre la masse et le volume d'un échantillon. La masse est obtenue en pesant l'échantillon saturé en surface sèche,

puis en le pesant à nouveau après séchage dans une étuve. Le volume est calculé à partir de la masse d'eau déplacée, mesurée à l'aide de la méthode au pycnomètre.

Il est important de ne pas chauffer artificiellement les échantillons avant l'essai, car cela peut affecter leur capacité d'absorption. Cependant, si le matériau a été préalablement chauffé, cette information doit être consignée dans le rapport d'essai.

#### 3.1.4.1 *Appareillage :*

- A. Étuve ventilée
- B. Balance
- C. Bain d'eau
- D. Chiffons absorbants
- E. Pycnomètre
- F. Entonnoir

#### 3.1.4.2 *Préparation de la prise d'essai*

Echantillons	Dmax (mm)	Prise de masse (gramme)
sable	2	400
G1	9	500
G2	16	600
G3	24	1000
R1	2	250
R2	2	250
R3	2	234

**Tableau 7 : Prise des masse des échantillons pour l'essai de masse volumique**

#### 3.1.4.3 *Mode opératoire :*

Plonger la prise d'essai préparée dans le pycnomètre rempli d'eau à une température de 22 °C, en veillant à éliminer l'air emprisonné en faisant tourner et osciller doucement le pycnomètre incliné. Placer ensuite le pycnomètre dans un bain d'eau et maintenir la prise d'essai à une température constante de 22 °C pendant 24 heures. Une fois le trempage terminé, retirer le pycnomètre du bain d'eau et éliminer tout excès d'air en faisant tourner et osciller doucement le pycnomètre. Si nécessaire, il est possible d'éliminer l'air emprisonné en créant un vide.

Remplir le pycnomètre en ajoutant de l'eau jusqu'à ce qu'elle déborde, puis placer le couvercle en veillant à éviter toute formation d'air piégé dans le récipient. Ensuite, essuyer l'extérieur du pycnomètre et mesurer sa masse, M2.

Laisser reposer la plupart de l'eau recouvrant la prise d'essai sédimenter, puis vider le contenu du pycnomètre sur un plateau.

Remplir à nouveau le pycnomètre avec de l'eau et replacer le couvercle comme précédemment. Essuyer l'extérieur du récipient et mesurer sa masse, M3.

Il est possible de pré-étalonner le volume du pycnomètre au lieu de le mesurer à chaque essai. Dans ce cas, le pycnomètre doit être placé dans un bain thermostatique à la température d'étalonnage avec une précision de  $\pm 0,5$  °C.

Étaler la prise d'essai imprégnée afin d'obtenir une couche uniforme au fond du plateau. Exposer les granulats à un léger courant d'air chaud pour évaporer l'humidité en surface. Remuer fréquemment les granulats pour les sécher complètement jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de trace d'humidité en surface et que les grains ne collent plus les uns aux autres. Laisser ensuite l'échantillon refroidir à température ambiante tout en continuant de le remuer.

Peser la prise d'essai saturée et séchée en surface, M1. Sécher les granulats dans une étuve ventilée à une température de 110 °C jusqu'à ce qu'ils atteignent une masse constante. Laisser-les ensuite refroidir à température ambiante et peser-les à nouveau, M4. Noter toutes les masses avec une précision supérieure ou égale à 0,1% de la masse M4 de la prise d'essai.

Calculer les masses volumiques réelles  $\rho_a$ ,  $\rho_{rd}$ , et  $\rho_{ssd}$  en Mg/m<sup>3</sup>. Conformément aux équations suivantes :

- Masse volumique absolue  $\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$
- Masse volumique réelle séchée à l'étuve  $\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$
- Masse volumique réelle saturée surface sèche  $\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$

Calculer le coefficient d'absorption d'eau après une immersion de 24 h, WA24, conformément à l'équation suivante :

$$WA = \frac{(M_1 - M_4) * 100}{M_1}$$

$\rho_w$  Est la masse volumique de l'eau à la température d'essai

M<sub>1</sub> est la masse dans l'air des granulats saturés et superficiellement secs (grammes)

M<sub>2</sub> est la masse du pycnomètre contenant l'échantillon de granulats saturés et l'eau (grammes)

M<sub>3</sub> est la masse du pycnomètre rempli d'eau uniquement (grammes)

M<sub>4</sub> est la masse de la prise d'essai séchée t'étuve dans l'air (grammes)



**Figure 32 : Mesure de la masse volumique pour les granulats**



**Figure 31 : Mesure de la masse volumique pour les rejets**

### 3.1.5 Bleu méthylène NF EN 933-9

La procédure consiste à ajouter progressivement des doses de solution de bleu de méthylène à une suspension de la prise d'essai dans l'eau. Après chaque ajout de solution, l'adsorption de la solution colorée par la prise d'essai est vérifiée en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour détecter la présence de colorant non lié.

Une fois que la présence de colorant non lié est confirmée, la quantité de bleu de méthylène MB est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kilogramme de la fraction granulaire testée.

L'essai au bleu de méthylène sera réalisé en utilisant du sable et les trois échantillons de rejets afin de déterminer la quantité d'argile présente. Cet essai nous permettra également de déterminer la capacité d'échange cationique.

En ajoutant le bleu de méthylène aux échantillons de sable et de rejets, nous pourrions observer l'adsorption du colorant par l'argile. L'intensité de la coloration nous donnera une indication de la quantité d'argile présente dans chaque échantillon. Cela nous permettra d'évaluer la composition des échantillons et de quantifier la teneur en argile.

#### 3.1.5.1 Appareillage :

- ❖ Burette de 100 ml graduée
- ❖ Papier-filtre
- ❖ Tige de verre, longueur : 300 mm ; diamètre : 8 mm.
- ❖ Agitateur à ailettes
- ❖ Balance
- ❖ Bécher de 1 litre
- ❖ Fiole en verre d'une capacité de 1 litre.
- ❖ Etuve ventilée
- ❖ Réactif : Solution colorée de bleu de méthylène 10 g/l
- ❖ Dessiccateur

#### 3.1.5.2 Mode opératoire

- ❖ Préparation de prise de masse :
  - Prélever au minimum 200 grammes d'échantillon représentatif du sable ou rejet à tester.
  - Éliminer les débris et les grosses particules en tamisant l'échantillon à travers un tamis de taille 2
  - Si nécessaire, sécher l'échantillon à une température 45°C pour éliminer l'humidité excessive.
- ❖ Préparation de la solution de bleu de méthylène :
  - Préparer une solution de bleu de méthylène en dissolvant une quantité de 10 gramme de colorant dans de 1 litres d'eau. La concentration de la solution sera 10 g/ l
- ❖ Préparation de la suspension de sol :
  - Prendre la quantité mesurée de l'échantillon de sable ou rejet et placer-la dans le bécher.
  - Ajouter 500ml de l'eau propre dans le bécher avec la masse prise initialement pour obtenir une suspension.
- ❖ Mélange et agitation :
  - Agiter la solution de colorant. Remplir la burette de solution colorée
  - Régler l'agitateur sur la vitesse de 600 tr/min et positionné les ailettes à environ 10 mm du fond du bécher.
  - Mettre en marche l'agitateur, agiter le contenu du bécher pendant 5 min à 600 tr/min, puis agiter continuellement à 400 tr/min pendant la poursuite de l'essai.
- ❖ Ajout de la solution de bleu de méthylène :

- Placer le papier-filtre sur le dessus d'un bécher ou d'un autre support approprié, de manière à ce que la majeure partie de sa surface ne soit pas en contact avec des solides ou des liquides.
- Après une agitation de 5 minutes à 600 tr/min, verser 5 ml de solution de colorant dans le bécher.
- Agiter à 400 tr/min pendant au moins 1 minute, puis effectuer un test à la tache sur le papier-filtre. Si aucune auréole n'apparaît après l'ajout des premiers 5 ml de solution de colorant, ajouter à nouveau 5 ml de solution de colorant, continuer à agiter pendant 1 minute supplémentaire et effectuer un autre test à la tache. Répéter cette alternance entre l'ajout de colorant et les périodes d'agitation jusqu'à l'apparition d'une auréole. Une fois cette étape atteinte, continuer à agiter sans ajouter d'autre solution de colorant. Effectuer des tests à la tache toutes les minutes.
- Si l'auréole disparaît au cours des quatre premières minutes, ajouter à nouveau 5 ml de solution de colorant. Si l'auréole disparaît à la cinquième minute, ajouter seulement 2 ml de solution de colorant. Dans tous les cas, il faut poursuivre l'agitation et les tests à la tache jusqu'à ce qu'une auréole reste visible pendant 5 minutes.
- Noter le volume total de solution de colorant, V1, ajouté pour obtenir une auréole qui reste visible pendant 5 minutes.
- Après chaque injection de colorant, le test à la tache consiste à prélever une goutte de la suspension à l'aide d'une tige en verre, puis à la déposer sur le papier-filtre. La tache qui se forme est composée d'un dépôt central de matériau, généralement de couleur bleu foncé, entouré d'une zone humide incolore.
- La quantité de suspension prélevée par la goutte doit permettre d'obtenir un dépôt dont le diamètre est compris entre 8 mm et 12 mm.
- Le test est considéré comme positif si une auréole bleu clair persistante d'environ 1 mm apparaît autour du dépôt central dans la zone humide.

### 3.1.5.3 Calcul

La quantité de bleu de méthylène MB se calcule avec la formule suivante :

$$MB = \frac{V1 * 10}{M1}$$

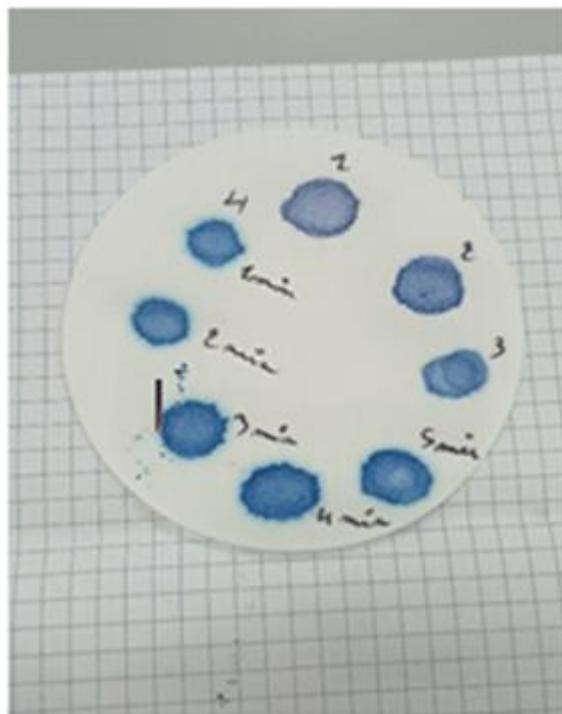
Où

M1 : est la masse de la prise d'essai, en grammes ;

V1 : est le volume total de solution de colorant injectée, en millilitres.



**Figure 33 : Essai de bleu méthylène**



**Figure 34 : Tache de bleu après observation d'auréole**

### 3.1.6 Capacité d'échange cationique :

Les essais de Capacité d'Échange Cationique (CEC) pour le sable et les rejets miniers visent à évaluer la capacité de ces matériaux à retenir et à échanger des cations. Ils sont importants pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ils permettent d'évaluer la réactivité du sable et sa capacité à retenir les ions métalliques potentiellement toxiques. De plus, ces essais sont utilisés pour caractériser les rejets miniers et évaluer leur capacité à retenir et à relâcher les cations et les métaux présents

Il est possible d'estimer la capacité d'échange cationique (CEC) à partir de l'essai de bleu de méthylène en utilisant une méthode simplifiée. Voici la formule couramment utilisée :

$$CEC = \left( \frac{MB}{1000} \right) * F * V \text{ (Meq/100g)}$$

Où :

V est le volume de la solution de bleu de méthylène utilisé dans l'essai, en millilitres (ml),

F coefficient de conversion

MB bleu de méthylène

Cependant, il est important de noter que cette méthode simplifiée fournit une estimation approximative de la CEC et peut ne pas être aussi précise que les méthodes spécifiques de détermination de la CEC. L'estimation de la CEC à partir de l'essai de bleu de méthylène est souvent utilisée comme une approche rapide et pratique pour obtenir une indication de la CEC d'un échantillon de sol

### 3.1.7 Equivalent de sable : **NF EN 933-8**

Dans un cylindre gradué, verser une éprouvette de granulats de 0/2 mm contenant un maximum de 10 % de fines (qu'elles soient naturelles ou obtenues après ajustement de la courbe granulométrique). Ajouter une petite quantité de solution lavante et flocculante, puis agiter vigoureusement pour détacher les éléments argileux des particules les plus grosses de l'échantillon.

Ensuite, procéder à l'irrigation du granulats en utilisant le reste de la solution lavante et flocculante afin de mettre les particules fines en suspension. Après un laps de temps prédéterminé, calculer l'équivalent de sable (SE(10)) en mesurant la hauteur de sédiment exprimée en pourcentage par rapport à la hauteur totale de sédiment et de flocculant dans le cylindre.

#### 3.1.7.1 Préparation de solution lavante et fluctuante

Pour préparer la solution concentrée, composée des éléments suivants :

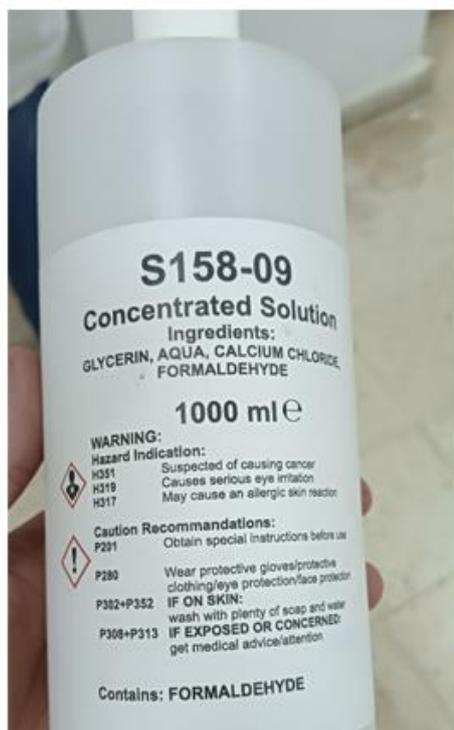
- a) Chlorure de calcium cristallin,  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , ou chlorure de calcium anhydre,  $\text{CaCl}_2$  ;
- b) Glycérine à 99 % de glycérol, de qualité réactif pour laboratoire ;
- c) Formaldéhyde en solution, 40 % en volume, de qualité réactif pour laboratoire ;
- d) Eau distillée ou déminéralisée.

Protocole : Dissoudre 220 g de chlorure de calcium cristallin dans 350 ml d'eau distillée ou déminéralisée. Laisser la solution refroidir à température ambiante et, si nécessaire, filtrer-la à l'aide d'un papier-filtre à mailles grossières ou moyennes.

Ajouter 480 g de glycérine et 12,5 g de formaldéhyde en solution à la solution de chlorure de calcium refroidie.

Diluer la solution avec de l'eau distillée ou déminéralisée jusqu'à obtenir un volume total de 1 litre. Enfin homogénéiser la solution en la mélangeant soigneusement.

Donc on prépare la solution lavante et floculante en diluant 125 ml de la solution concentrée avec de l'eau distillée ou déminéralisée afin d'obtenir une solution d'un volume total de 5 l. Cette solution sera utilisée dans la suite du processus.



*Figure 35 : solution lavante et fluctuante*

### 3.1.7.2 Appareillage

- a) cylindres gradués
- b) Piston d'essai
- c) Réglet de 500 mm, gradué en millimètres
- d) Spatule
- e) Tube laveur
- f) Agitateur rectiligne horizontale

### 3.1.7.3 Préparation d'échantillon

Avant de procéder à la prise de masse de notre échantillon de sable, il est nécessaire de calculer la teneur en fines (f). Pour ce faire, nous suivrons les étapes suivantes :

- Sécher une masse de sable de l'échantillon pendant 24 heures dans une étuve à une température de 110 °C. Noter la masse obtenue après séchage, que nous appellerons M1.
- Après le séchage, laver soigneusement cette masse de sable pour éliminer les fines. Utiliser le tamis de 0,063 mm pour tamiser le sable et retenir les particules fines.
- Sécher à nouveau la masse obtenue après le tamisage pendant 24 heures dans l'étuve à une température de 110 °C. Noter la masse obtenue après ce second séchage, que nous appellerons M2.

- Calculer la teneur en fines (f) en utilisant la formule suivante :  $f = 100 - \frac{M_2(100+w)}{M_1}$   
Ou le w est la teneur en eau de sable calculé avant

La prise de masse de l'échantillon sera réalisée à l'aide de la formule suivante :

$$Mt = \frac{120 * (100 + w)}{100}$$

Cependant, il convient de noter que cette formule est utilisée lorsque la teneur en fines est inférieure à 10%. Dans le cas où la teneur en fines dépasse 10%, une correction de la prise de masse est nécessaire.

#### 3.1.7.4 *Mode opératoire*

- Siphonner la solution lavante dans le cylindre gradué jusqu'au trait repère inférieur indiqué sur le cylindre.
- À l'aide d'un entonnoir, verser une éprouvette dans le cylindre gradué tout en maintenant le cylindre en position verticale.
- Laisser reposer chaque cylindre pendant 10 minutes afin d'humidifier l'éprouvette.
- Après les 10 minutes, boucher un cylindre à l'aide d'un bouchon en caoutchouc et fixer ce cylindre sur la machine d'agitation.
- Agiter le cylindre pendant 30 secondes, puis replacer-le en position verticale sur la table de travail.
- Retirer le bouchon en caoutchouc d'un des cylindres gradués et rincer-le au-dessus de ce cylindre avec la solution lavante, en veillant à ce que tout le matériau retombe dans le cylindre.
- Insérer le tube laveur dans le cylindre en veillant d'abord à rincer les parois du cylindre avec la solution lavante, puis enfoncer le tube à travers la couche de sédiment jusqu'au fond du cylindre.
- Ensuite, tout en faisant tourner lentement le cylindre, remonter le tube laveur de manière lente et régulière.
- Lorsque le niveau de liquide atteint le trait repère supérieur gravé sur le cylindre, remonter lentement le tube laveur en régulant le débit pour maintenir le liquide au niveau du trait repère jusqu'à ce que le tube soit complètement retiré et que le débit soit interrompu.
- Laisser reposer chaque cylindre gradué sans perturbation ni vibration pendant 20,00 minutes.
- Après ce laps de temps, mesurer à l'aide d'une règle la hauteur h1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond du cylindre gradué.
- Abaisser soigneusement le piston dans le cylindre jusqu'à ce que la base repose sur le sédiment.
- Placer le manchon sur le cylindre, puis fixer-le sur la tige du piston. Déterminer la hauteur du sédiment h2 en mesurant la distance entre la face inférieure de la tête du piston et la face supérieure du manchon en insérant la règle dans l'encoche du manchon.



*Figure 36 : mesure de la hauteur des fines*



*Figure 37: agitation rectiligne du cylindre*

### 3.2 Caractérisation chimique

#### Spectrométrie de fluorescence aux rayons x

La fluorescence X est une méthode non destructive utilisée pour déterminer les compositions élémentaires des matériaux. Dans cette technique, l'échantillon est exposé à un rayonnement de courte longueur d'onde et donc à haute énergie, tel que les rayons X. Lorsque les atomes constitutifs du matériau sont ionisés, c'est-à-dire qu'ils perdent un ou plusieurs électrons de leurs couches électroniques, des informations sur la composition du matériau peuvent être obtenues.

Le spectre du matériau analysé est ensuite enregistré, représentant l'intensité du rayonnement en fonction de l'énergie, généralement exprimée en électronvolts (eV) ou en longueur d'onde. La fluorescence X offre plusieurs types d'informations :

Une information qualitative : cette technique permet de détecter les éléments dont la masse atomique est comprise entre 11 et 92, allant du sodium (Na) à l'uranium (U).

Une information quantitative : la fluorescence X permet d'obtenir des données quantitatives sur la présence des éléments dans l'échantillon, avec une sensibilité allant de la détection de l'ordre du ppm (partie par million) jusqu'à 100% de l'élément.

Nous avons réalisé des essais de spectrométrie par fluorescence X sur nos trois rejets afin de déterminer leur composition chimique probable.

### 3.3 Minéralogique

#### Spectrométrie diffraction rayon x

La diffraction des rayons X (DRX) est une technique d'analyse qui permet d'étudier la structure cristalline des matériaux. Elle est largement utilisée dans le domaine de la science des matériaux pour déterminer la disposition des atomes dans un échantillon et identifier les phases cristallines présentes.

Lorsque des rayons X interagissent avec un matériau cristallin, ils sont diffractés par les plans de réseau atomique de l'échantillon. Ce phénomène de diffraction est régi par la loi de Bragg, qui énonce que les rayons X diffractés sont en phase constructive lorsque la différence de chemin optique entre les rayons réfléchis par les plans du réseau est un multiple entier de la longueur d'onde des rayons X.

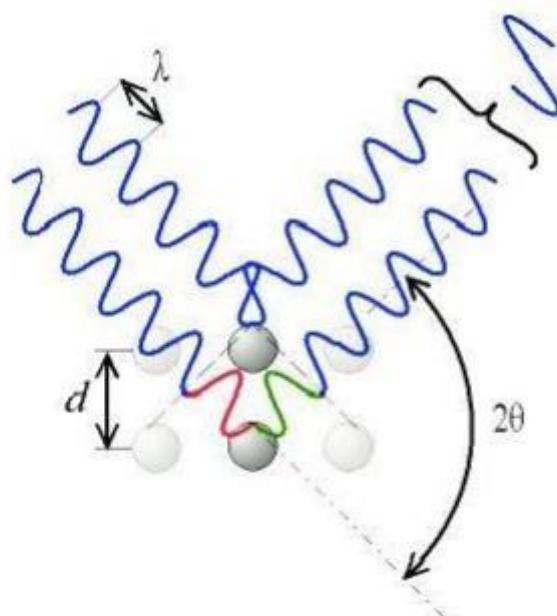
En utilisant un dispositif appelé diffractomètre, les rayons X sont dirigés vers l'échantillon et les rayons diffractés sont enregistrés sous la forme d'un diffractogramme. Ce diffractogramme représente l'intensité du rayonnement diffracté en fonction de l'angle de diffraction. Les pics de diffraction obtenus dans le diffractogramme sont caractéristiques de la structure cristalline de l'échantillon, et leur position, leur intensité et leur forme fournissent des informations sur la géométrie des plans de réseau et l'arrangement des atomes dans le matériau.

L'objectif d'utiliser la DRX sur les rejets miniers, tels que les rejets de plomb-zinc et de baryte, est d'identifier les phases cristallines présentes dans ces rejets et de comprendre leur composition chimique et leur structure. Cela permet de caractériser la nature des minéraux présents dans les rejets, d'évaluer leur potentiel économique et de mieux appréhender leur impact sur l'environnement.

En utilisant la DRX, il est possible de déterminer les différentes phases cristallines dans les rejets miniers, d'identifier les minéraux indésirables ou potentiellement valorisables, de quantifier leur abondance relative et de comprendre les mécanismes de formation des minéraux.

Ces informations sont essentielles pour la gestion efficace des rejets miniers, le développement de procédés de traitement appropriés et l'évaluation de l'impact environnemental associé à ces rejets.

En résumé, la DRX est une technique puissante pour l'analyse de la structure cristalline des matériaux, et son utilisation sur les rejets miniers permet d'obtenir des informations précieuses sur la composition chimique et la structure des minéraux présents, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et gestion de ces rejets.



*Figure 38 : Schéma de principe de la diffraction aux rayons X*

#### **4 Formulation du béton :**

Dans le cadre de notre étude, nous nous proposons de formuler plusieurs compositions de béton afin d'explorer différentes possibilités. Nous débuterons par une formulation témoin qui sera composée à 100% de sable, et servira de référence pour trouver la formulation optimale des autres mélanges.

Nous envisageons d'utiliser les trois types de rejets miniers disponibles : le rejet plomb-zinc de Kherzet Youcef, le rejet plomb-zinc de Boucaid, ainsi que le rejet de baryte de Boucaid. Ces rejets seront introduits partiellement dans les mélanges, avec des pourcentages variant de 5%, 15% à 30% (Le choix des pourcentages est basé sur plusieurs expériences réalisées dans différentes études.) . Cela nous amènera à formuler neuf compositions distinctes à base de ces rejets.

L'objectif est de déterminer comment ces substitutions partielles des granulats traditionnels par les rejets miniers impactent les propriétés du béton, notamment en termes de résistance et d'ouvrabilité. Nous cherchons ainsi à valoriser ces rejets en les intégrant dans des formulations de béton tout en garantissant des performances adéquates.

La formulation d'un béton est une méthode essentielle pour déterminer le mélange optimal des différents granulats, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin d'obtenir un béton présentant les caractéristiques requises pour un ouvrage spécifique.

Parmi les méthodes pratiques utilisées pour déterminer la composition des bétons, on trouve la méthode de Dreux-Gorisse. Cette méthode représente une synthèse des diverses théories

existantes sur la composition des bétons, basée sur l'analyse statistique de nombreux chantiers ayant fait l'objet d'un contrôle rigoureux. Son objectif est de fournir une formulation initiale simple et rapide du béton en fonction de deux paramètres principaux : la résistance en compression et l'ouvrabilité.

La méthode de Dreux-Gorisse permet ainsi d'établir une première estimation de la composition du béton en se basant sur les exigences spécifiques de résistance et d'ouvrabilité. Cependant, la formulation finale du béton est obtenue après plusieurs essais pratiques, qui permettent d'affiner la formule théorique initiale en fonction des propriétés désirées et des matériaux réellement utilisés.

Effectuer plusieurs essais expérimentaux afin de trouver la formulation optimale. Dans notre cas, nous avons effectué une seule fois la formulation témoin, car le mélange était homogène et compact.

Notre ciment est Farge CEM II/B 42.5 avec une densité de 3.1

4.1 Dosage en ciment et en eau :

4.1.1 La résistance souhaitée :

On l'obtient à partir de la résistance de calcul  $f_{c28}$  nécessaire à la construction d'un ouvrage donné. La résistance moyenne visée à 28 jours doit être corrigée de 15% de plus à la résistance de calcul  $f_c$  soit :  $f_c = 1.15 \times f_{c28}$

4.1.2 Détermination du rapport C/E :

La formule de Bolomey permet de déterminer la quantité d'eau nécessaire pour atteindre la résistance à la compression souhaitée du béton à 28 jours. Voici la formule

$$f_c = G \times \sigma C (C/E - 0.5)$$

$f_c$ : Résistance moyenne en compression visée à 28 jours.

C : Dosage en ciment en kg/m<sup>3</sup> de béton.

E : Dosage en eau totale sur matériaux secs en litres par mètre cube de béton.

$\sigma C$ : Classe vraie du ciment à 28 jours en Mpa.

G : Coefficient granulaire.

4.1.3 Détermination de coefficient granulaire G :

La qualité de nos granulats est bonne avec un diamètre de plus grand granulat déterminé à partir de la courbe granulométrique du gravier G3

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins $D \leq 12.5$ mm	Moyens $20 \leq D \leq 31.5$ mm	Gros $D \geq 31.5$ mm
Excellent	0.55	0.60	0.65
Bonne, Courante	0.45	0.50	0.55
passable	0.35	0.40	0.45

**Tableau 8 : tableau de coefficient G**

On tire de l'expression précédente la valeur E/C et on trouve la quantité de l'eau nécessaire.

#### 4.1.4 Détermination du dosage en ciment C (kg/m<sup>3</sup>) :

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la suivante en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams, ensuite on peut déduire quantité d'eau nécessaire

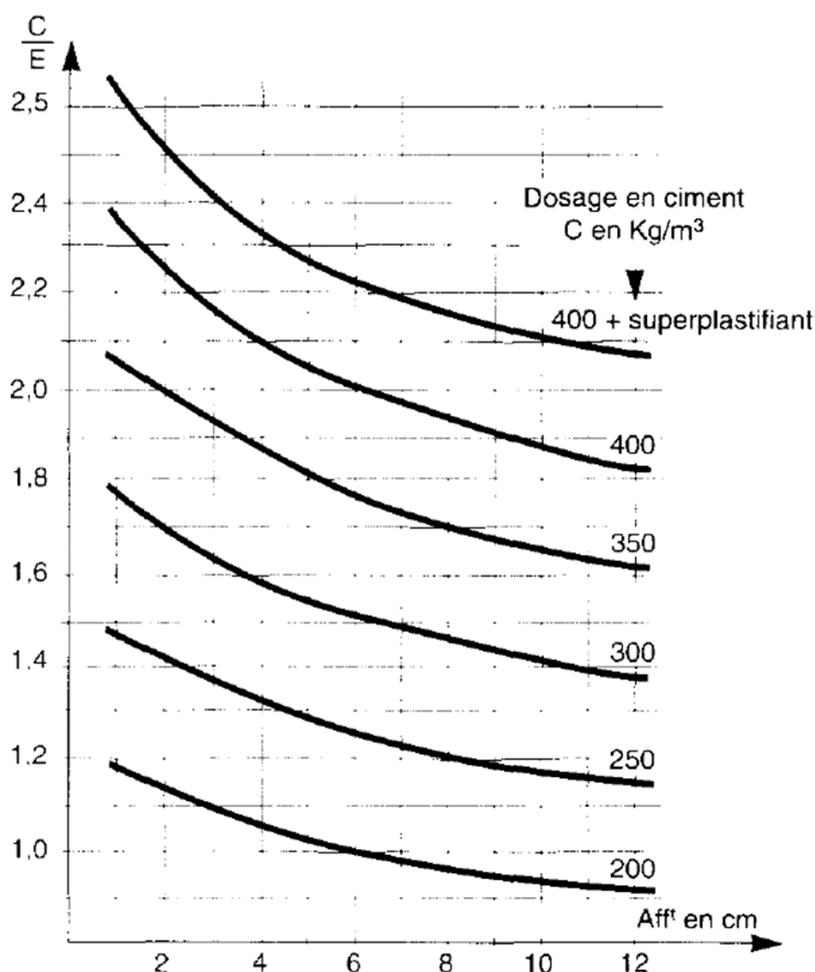


Figure 39: abaque de quantité du ciment dans 1 mètre cube

#### 4.2 Détermination des pourcentages des agrégats

Pour déterminer le pourcentage des granulats dans la formulation du béton, il est nécessaire de tracer les courbes granulométriques sur un même graphique. Cette méthode permet de visualiser la répartition des différentes tailles de grains et d'ajuster le mélange en conséquence.

Le processus commence par prendre le 95% de refus cumulé du sable et le relier avec le 5% de refus cumulé du gravier 3/8. Ensuite, on répète cette étape avec les autres granulats en reliant le 95% de refus cumulé du granulat inférieur avec le 5% du granulat qui le suit.

Au fur et à mesure, des points clés sont déterminés. L'origine (O) est située à (0,0) sur le graphique. Le point de frontière (B) correspond à la taille maximale de grains (D<sub>max</sub>) avec une proportion de 100%. Le point de cassure (A) est déterminé en fonction des coordonnées (X,Y), représentant le point d'intersection des courbes précédentes.

En reliant les points O, A et B, on obtient une zone délimitée qui représente la proportion des granulats dans la formulation du béton. L'intersection des lignes OA et AB avec les lignes précédemment tracées nous donne les proportions exactes des différents granulats à utiliser dans la formulation finale.

Afin de déterminer les pourcentages en volumes absolus des granulats nécessaires pour obtenir un mélange à minimum de vide, il est essentiel de tracer des droites reliant les courbes granulométriques des différents matériaux du mélange.

Ces droites sont définies par les valeurs de 5% de refus (95% passant) pour le matériau à faible granularité et de 5% de passant (95% refus) pour le matériau à forte granularité. En traçant ces droites et en les croisant avec la droite brisée de Dreux OAB, il est possible de déterminer les pourcentages en volumes absolus de chaque matériau. Ces pourcentages sont calculés en prolongeant les intersections jusqu'à l'axe des ordonnées.

L'objectif est d'obtenir un mélange dont la courbe granulométrique se rapproche le plus possible de la droite brisée de Dreux. Si la courbe obtenue pour le mélange diffère considérablement de la courbe de Dreux, il peut être nécessaire d'ajuster les pourcentages en volumes absolus des différents matériaux.

Les points clés de la courbe de Dreux-Gorisse sont les suivants :

- L'origine (O) est définie à (0,0) sur le graphique.
- Le point de frontière (B) correspond à la taille maximale de grains ( $D_{max}$ ) en abscisse avec 100% passant en ordonnée ( $D_{max}$ , 100%)
- Le point de cassure (A) est déterminé en fonction des coordonnées (X,Y), représentant le point de cassure de la droite de Dreux

Déterminer le X :

$$\text{Si } D_{max} \leq 20 \text{ mm} \quad X = \frac{D_{max}}{2}$$

$$\text{Si } D_{max} > 20 \text{ mm} \quad |X| = (|D_{max}| + 38) / 2$$

Déterminer le Y :

$$Y_A = 50 - \sqrt{D_{max}} + K + K_s + K_p$$

K : coefficient de correction déterminé à partir du tableau ci-dessous

$K_s$  : coefficient de correction supplémentaire  $K_s = 6 * M_f - 15$  ou le  $M_f$  module de finesse du sable

$K_p$  : coefficient de correction pompage, varie de 5 à 10 selon le degré de plasticité désiré.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluide	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

**Tableau 9 : corrections d'ordonnée de point de cassure A**

après avoir déterminé les coordonnées du point de cassure A sur la droite de Dreux-Gorisse, on utilise les courbes granulométriques pour calculer les pourcentages de volume des granulats,

on doit calculer le coefficient de compacité ( $\gamma$ ) pour déterminer le volume totale des granulats et utiliser les pourcentages des granulats déterminés précédemment pour connaître le volume nécessaire de chaque granulats dans le m<sup>3</sup>

#### 4.3 Coefficient de compacité ( $\gamma$ )

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m<sup>3</sup> de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier). Sa valeur de base c0 est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre

Consistance	Serrage	compacité						
		Dmax = 5	Dmax = 8	Dmax = 12,5	Dmax = 20	Dmax = 31,5	Dmax = 50	Dmax = 80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

**Tableau 10 : Compacité du béton en fonction de Dmax, de la consistance et du serrage**

$$\gamma = (VC + Vtg) / 1000$$

Vc : volume ciment on peut le déduire puisque on a le dosage du ciment dans 1 m<sup>3</sup> et sa densité

Vtg : volume totale des granulats (sable, G1, G2, G3)

Donc on peut déterminer le volume totale des granulats ensuite avec les pourcentages de chaque granulats, on détermine le volume de chaque type de granulats dans 1 m<sup>3</sup> et on déduit le dosage de chaque granulats en masse dans 1 m<sup>3</sup> à l'aide de la masse volumique des granulats

Dans le cadre de ce projet, nous allons maintenant mettre en pratique les formulations que nous avons étudiées pour le béton. Voici les différentes formulations que nous allons utiliser :

- Formulation témoin : 100% de sable.
- Formulations avec substitution partielle du sable par le rejet du plomb-zinc de Kherzet Youcef : 5%, 15% et 30% de substitution.

- Formulations avec substitution partielle du sable par le rejet du plomb-zinc de Boucaid : 5%, 15% et 30% de substitution.
- Formulations avec substitution partielle du sable par le rejet de la baryte de Boucaid : 5%, 15% et 30% de substitution.

Avant de commencer la formulation du béton, il est important de choisir les moules métalliques adaptés pour la confection des échantillons. Dans notre cas, nous utiliserons des moules cubiques normalisée de dimensions 150\*150\*150 mm. Norme **NF EN 12390-1**

Pour chaque formulation, nous réaliserons cinq éprouvettes. Quatre éprouvettes seront destinées à l'étude du comportement mécanique, tandis qu'une éprouvette sera dédiée à l'étude environnementale.

Avant d'utiliser les moules, il est nécessaire de les préparer correctement. Nous commencerons par appliquer une fine couche d'huile sur les parois internes des moules vides. Cette étape nous permettra de faciliter le démoulage ultérieur des éprouvettes. Il est important de veiller à bien étaler l'huile sur toutes les parois du moule, en veillant à ce qu'aucune zone ne soit oubliée.

Une fois l'huile appliquée, il est essentiel de bien fermer les boulons des moules afin d'assurer une étanchéité optimale. Cette étape garantit que le béton coulera de manière homogène dans le moule et évite les fuites ou les déformations indésirables.



*Figure 40 : Préparation des moules*

Pour assurer une formulation précise du béton, il est essentiel de préparer soigneusement les matériaux et de suivre certaines étapes clés. Tout d'abord, nous devons peser les masses requises de granulats, de ciment et d'eau, déterminées selon la méthode de Dreux-Gorisse.



***Figure 41 : Préparation de la matière première dans des sacs a conservation***

Avant de commencer la formulation, il est recommandé d'humidifier l'ensemble du matériel utilisé, y compris le malaxeur. Cela permet de faciliter le mélange et d'assurer une répartition homogène de l'eau dans le béton.

Ensuite, nous procédons aux essais à l'état frais, tels que la mesure de la masse volumique du béton et l'affaissement. Ces essais nous fournissent des informations importantes sur la consistance et les propriétés du mélange.

Dans le malaxeur, nous commençons par verser les granulats et les mélangeons pendant environ 5 minutes. Ensuite, nous ajoutons progressivement l'eau, tout en continuant de mélanger. Par la suite, nous incorporons le ciment et ajoutons à nouveau l'eau progressivement. Pour améliorer certaines propriétés du béton, nous pouvons également ajouter un adjuvant à hauteur de 0,3%.



**Figure 42 : Malaxage du béton dans un malaxeur**

Le malaxage du béton se poursuit pendant environ 5 à 10 minutes, assurant ainsi une homogénéité optimale du mélange. Une fois le malaxage terminé, nous versons le béton dans un récipient et procédons aux essais à l'état frais prévus.



**Figure 43 : Versement du béton dans le récipient**

Ensuite, nous remplissons les moules en deux fois, en appliquant des vibrations à l'aide d'une table vibrante à chaque fois pour éliminer les bulles d'air et garantir une compaction uniforme. Les éprouvettes ainsi préparées sont ensuite laissées dans les moules pendant 24 heures pour permettre une prise adéquate.



*Figure 44 : Table vibrante*



*Figure 45 : Moules remplis du béton*

Après cette période, nous démoulons les éprouvettes avec précaution et les plaçons dans des bassins d'eau à température ambiante. Cette étape est cruciale pour permettre au béton de se durcir progressivement et d'atteindre des propriétés optimales. **Norme NF EN 12690-2**



*Figure 46 : Epreuve du béton lors de démoulage*



*Figure 47: Confection des éprouvettes dans les bassins*

En suivant ces étapes rigoureuses de préparation et de confection du béton, nous serons en mesure de réaliser nos essais et d'évaluer les caractéristiques et performances du matériau de manière fiable.

## 5 Caractérisation du béton

La caractérisation du béton est un processus qui vise à évaluer et à quantifier les différentes propriétés et caractéristiques du matériau. Cela permet de comprendre et de décrire ses performances mécaniques, physiques et environnementales

### 5.1 Caractérisation physique du béton :

La caractérisation physique du béton est un processus essentiel qui vise à évaluer ses propriétés et ses caractéristiques. Pour ce faire, des tests spécifiques sont effectués à l'état frais, lorsque le matériau est fraîchement mélangé et encore malléable. Ces essais sont réalisés avant de procéder au remplissage des moules avec le béton. L'objectif est de déterminer les propriétés physiques du matériau lorsqu'il est dans cet état initial

#### 5.1.1 Masse volumique du béton frais : **NF EN 12350-6**

Cet essai nous permet d'évaluer la qualité et la maniabilité de notre béton. Il est réalisé pour toutes les formulations que nous avons développées. Pour effectuer cet essai, nous utilisons un récipient cylindrique dont le volume est préalablement connu (V). Nous le plaçons sur une balance et effectuons une tare. Ensuite, nous versons le béton dans le récipient en deux étapes. Nous commençons par remplir la moitié du récipient, puis nous utilisons une tige de compactage standard, frappe 25 coups pour éliminer les vides. Ensuite, nous remplissons l'autre moitié du récipient et le vibrons de la même manière. Une fois cela fait, nous pesons le béton sur la balance, ce qui nous donne sa masse (M). À partir de ces mesures, nous pouvons calculer la masse volumique du béton à l'état frais avec cette formule :

$$\rho = \frac{M}{V}$$



*Figure 48 : Récipient cylindrique rempli du béton*

### 5.1.2 Affaissement : **NF EN 12350-2**

L'essai d'affaissement avec le cône d'Abrams est une méthode couramment utilisée pour évaluer la consistance et la maniabilité du béton à l'état frais. Cet essai permet de mesurer la distance verticale de l'affaissement du béton lorsque le cône d'Abrams est retiré délicatement.

Pour réaliser l'essai, le cône d'Abrams en métal de forme spécifique est préparé en étant nettoyé et humidifié au préalable. Il est ensuite placé sur une surface plane et non absorbante. Le béton frais est ensuite rempli en trois couches dans le cône, en veillant à bien compacter chaque couche à l'aide d'une tige de compactage standard en frappant 25 coups vers la fin de la couche pour éliminer les vides et assurer une répartition uniforme.

Une fois le remplissage terminé, le cône d'Abrams est retiré délicatement et verticalement en le soulevant lentement, ce qui permet au béton de s'écouler et de s'affaisser naturellement. La mesure de l'affaissement se fait en mesurant la distance verticale entre la hauteur initiale du cône et le sommet de l'affaissement du béton, à l'aide d'une règle ou d'un dispositif de mesure approprié.



*Figure 49: essai d'affaissement*

### 5.2 Etude de comportement mécanique norme **NF EN 12690-3**

L'étude du comportement mécanique du béton est une démarche essentielle pour comprendre comment le matériau se comporte sous différentes charges et contraintes. Cette étude vise à évaluer les propriétés mécaniques du béton, telles que sa résistance à la compression, sa résistance à la traction, sa résistance au cisaillement, sa résistance à la flexion, sa résilience, etc.

Pour notre étude on a l'essai de compression qui permet de mesurer la résistance du béton lorsqu'il est soumis à une charge axiale. Norme **NF EN 12690-3**

Le but de l'essai de résistance à la compression est d'évaluer la capacité du béton à supporter des charges de compression importantes (KN). Cet essai vise à déterminer la résistance maximale du matériau et à fournir des informations essentielles sur sa qualité et sa durabilité.

En soumettant une éprouvette cubique de béton à une charge croissante avec une vitesse de 0.6 KN/mm<sup>2</sup>, l'essai permet de mesurer la force maximale que le béton peut supporter avant de se fracturer. Cette force est exprimée en termes de résistance à la compression, généralement mesurée en méga pascals (MPa).

La résistance à la compression est une propriété fondamentale du béton, car elle détermine sa capacité à supporter les charges verticales et à résister aux contraintes de compression. Elle est essentielle dans la conception et la construction de structures telles que les fondations, les poteaux, les poutres et les dalles.

La résistance à la compression des éprouvettes testées est donnée par la formule :

$$F_c = \frac{10 * F}{S}$$

Dans laquelle :

$F_c$  : Résistance à la compression en Méga Pascal (MPa),

$F$  : Charge maximale supportée par l'éprouvette en kilo newtons (kN),

$S$  : Surface de la face d'essai en millimètres carrés (22500 mm<sup>2</sup> dans notre cas).

Dans le cadre de notre étude, nous avons effectué des essais de compression sur quatre éprouvettes pour chacune de nos formulations. Nous avons réalisé deux essais à 7 jours de fabrication et deux essais à 28 jours de fabrication, Les essais à 7 jours nous donnent une indication préliminaire de la résistance du béton, tandis que les essais à 28 jours fournissent des données plus complètes et représentatives de la résistance à long terme.



**Figure 50: essai de résistance à la compression**

### 5.3 Etude de comportement environnemental

L'étude du comportement environnemental du béton est une démarche qui vise à évaluer l'impact du matériau sur l'environnement tout au long de son cycle de vie, de la production à la fin de sa durée d'utilisation. Cette étude comprend plusieurs aspects liés à l'environnement tels que l'émission de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie, l'utilisation des ressources naturelles, la gestion des déchets, la durabilité et la recyclabilité du béton.

Dans notre étude on se concentre uniquement sur la durabilité qui fait référence à la capacité du béton à résister aux agressions environnementales, à maintenir ses performances et à assurer sa longévité dans le temps. La durabilité du béton est étroitement liée à sa résistance aux facteurs tels que la corrosion, le gel-dégel, l'abrasion, la carbonatation et les attaques chimiques.

On a choisi de faire l'essai de pénétration d'eau (EN 12390 – 8) sur une éprouvette pour chacune de nos formulations

Le but d'essai de pénétration d'eau sur le béton est d'évaluer la capacité du matériau à résister à l'infiltration d'eau. Ces essais permettent de mesurer la perméabilité du béton, c'est-à-dire sa capacité à laisser passer l'eau à travers ses pores.

L'essai de pénétration d'eau sur le béton repose sur la profondeur de pénétration d'eau qui traverse le matériau sur une période de 3 jours. Il vise à évaluer la perméabilité du béton en simulant les conditions réelles d'exposition à l'eau. L'éprouvette de béton prélevé est placée dans un perméamétrie, et une pression d'eau de 6 bars est appliquée sur une face de l'échantillon pendant 72 heures, l'échantillon est retiré et nettoyer la surface inférieure soigneusement puis fractionné en deux à l'aide d'un essai de fendage brésilien. Enfin, Observer la trace d'eau et calculer la profondeur de pénétration d'eau entre la trace et la surface inférieure



*Figure 51 : Essais de pénétration d'eau*



*Figure 52: Pendage ou fendage brésilien*



*Figure 53 : Trace d'eau pénétrée au fond de l'éprouvette*

*CHAPITRE 4 Résultats et interprétations*

**1 Caractérisation de la matière première**

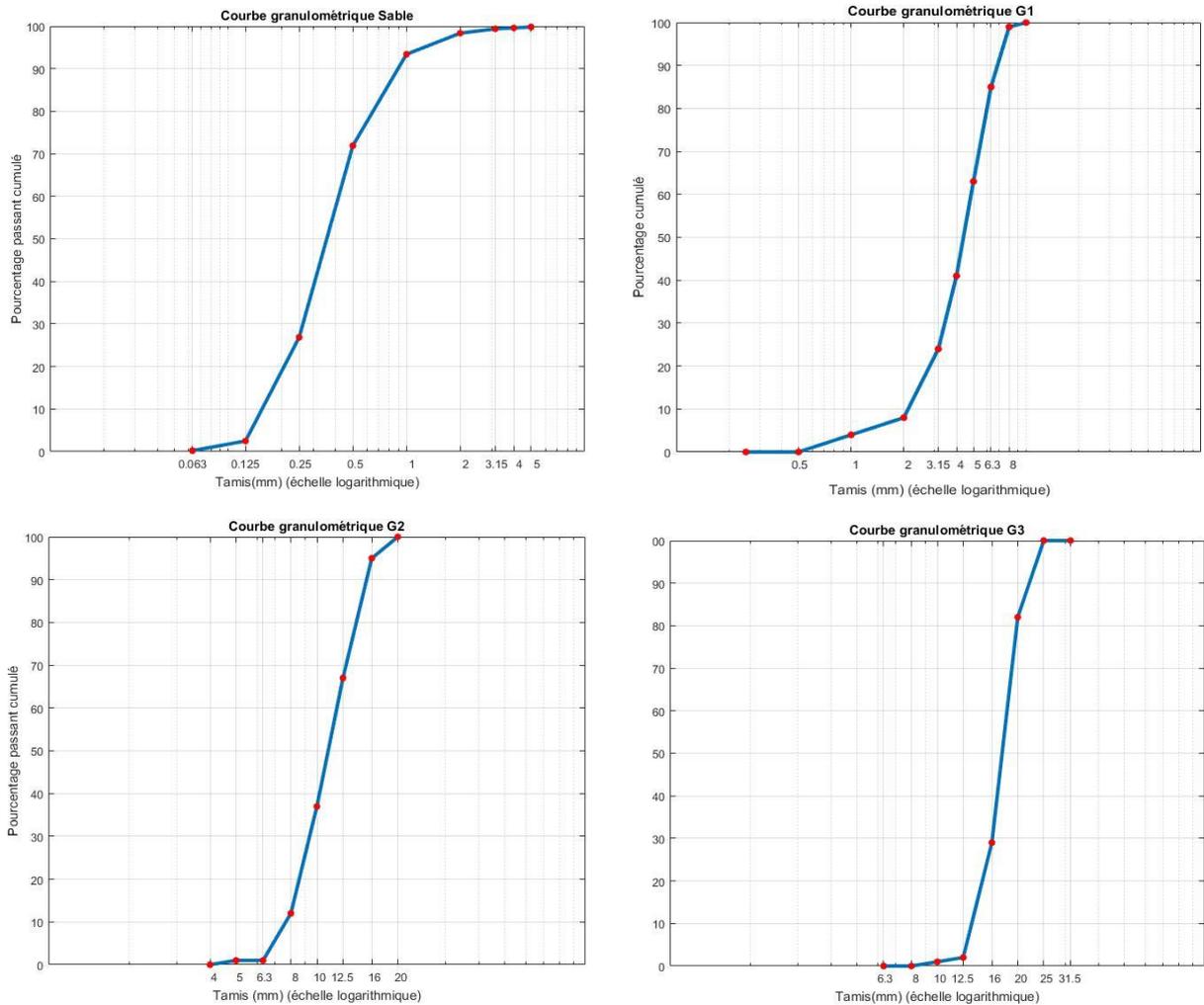
1.1 Caractérisation physique :

1.1.1 Granulométrie :

Nous allons présenter deux tableaux de granulométrie, l'un pour les matières premières (sable, G1, G2, G3) et l'autre pour les rejets R1, R2, R3. Pour représenter graphiquement les courbes granulométriques, nous utiliserons MATLAB.

tamis (mm)	Sable			Gravier 3/8			Gravier 8/15			Gravier 15/25		
	refus cumuls (g)	refus cumulés (%)	passants cumulés (%)	refus cumuls (g)	refus cumulés (%)	passants cumulés (%)	refus cumuls (g)	refus cumulés (%)	passants cumulés (%)	refus cumuls (g)	refus cumulés (%)	passants cumulés (%)
31,5												
25												
20										1088	18%	82%
16							127	5%	95%	4308	71%	29%
12,5							851	33%	67%	5960	98%	2%
10							1635	63%	37%	6050	99%	1%
8				6	1%	99%	2273	88%	12%	6070	100%	0%
6,3				150	15%	85%	2565	99%	1%	6085	100%	0%
5				366	37%	63%	2584	99%	1%	6096	100%	0%
4				591	59%	41%	2590	100%	0%			
3,15	3	1%	99%	754	76%	24%						
2	8	2%	98%	921	92%	8%						
1	32	7%	93%	957	96%	4%						
0,5	136	28%	72%	996	100%	0%						
0,25	354	73%	27%									
0,125	472	97%	3%									
0,063	486	100%	0%									

**Tableau 11 : Table granulométrie des granulats**

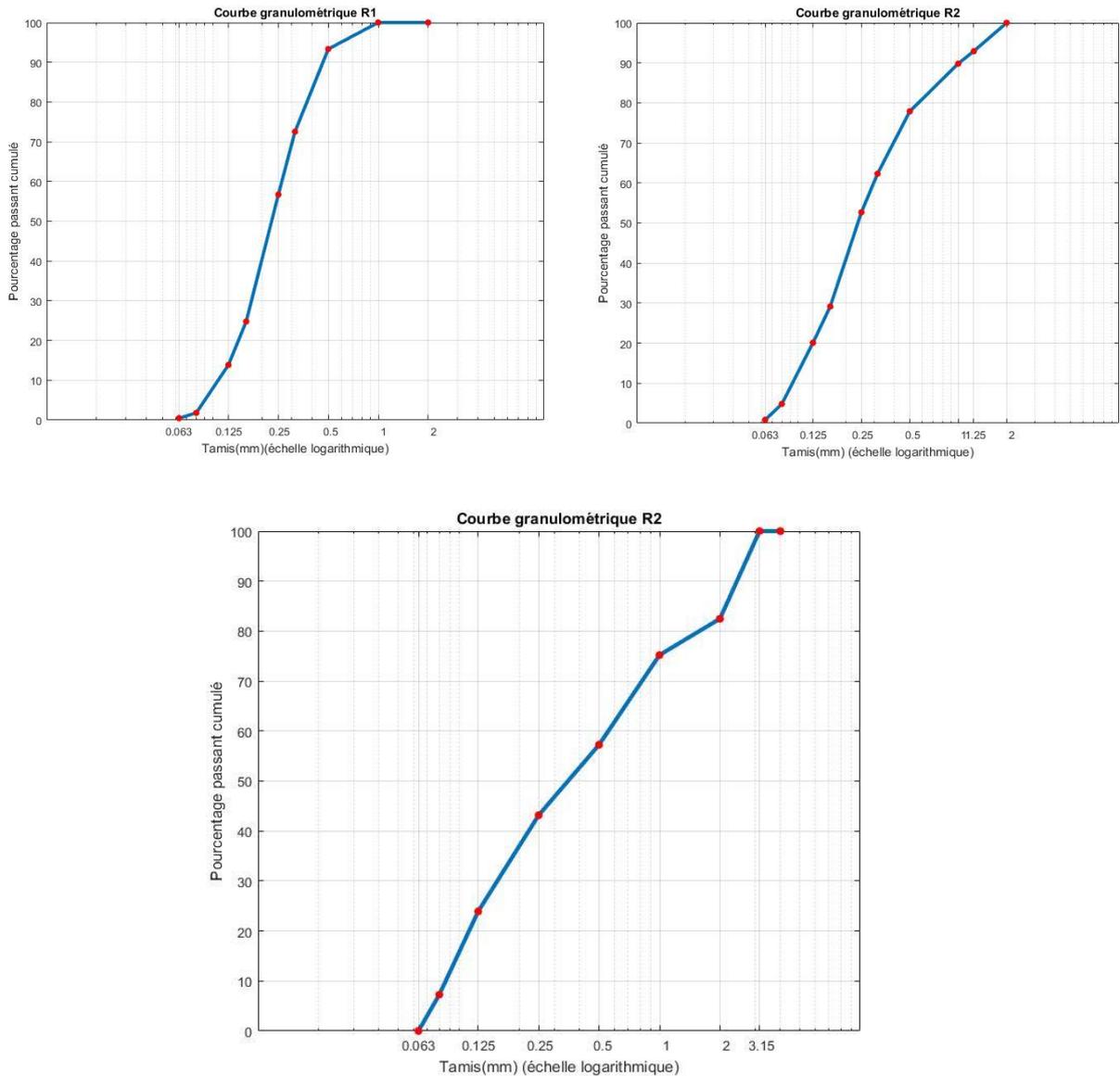


**Figure 54 : courbes granulométriques des granulates**

tamis (mm)	Rejet R1			Rejet R2			Rejet R3		
	refus cumulés (g)	refus cumulés (%)	passants cumulés (%)	refus cumulés (g)	refus cumulés (%)	passants cumulés (%)	refus cumulés (g)	refus cumulés (%)	passants cumulés (%)
2	0	0%	100%	25	7%	93%	41	18%	82%
1	8	2%	98%	36	10%	90%	58	25%	75%
0,5	32	7%	93%	78	22%	78%	100	43%	57%
0,25	194	43%	57%	167	47%	53%	133	57%	43%
0,125	386	86%	14%	282	80%	20%	178	76%	24%
0,063	448	100%	0%	353	100%	0%	234	100%	0%

**Tableau 12 : Tableau de granulométrie pour les rejets**

Après avoir lavé et éliminé les particules inférieures à 0,063 mm, la masse initiale des rejets, qui était de 500 g, diminue avant d'être utilisée pour l'analyse granulométrique.



**Figure 55 : courbes granulométriques des rejets**

**Commentaires :**

- Lorsque nous observons les courbes granulométriques du sable et graviers G1, G2, G3, nous pouvons remarquer que la répartition des tailles des particules est étendue. Cela signifie qu'il y a une diversité de tailles de grains présents dans ces matériaux. Les courbes présentent des variations significatives, ce qui indique une granulométrie hétérogène.
- De même, en examinant les courbes granulométriques des rejets R1 et R2, nous constatons une dispersion similaire des tailles de particules. Cela suggère que ces rejets partagent une composition granulométrique semblable, avec une distribution diversifiée des tailles de grains.
- Par contre nous avons observé une anomalie dans la courbe granulométrique du rejet R3, qui se distingue par sa faible dispersion des tailles de particules. Contrairement aux autres courbes, celle de R3 présente une concentration plus élevée de particules dans une plage de tailles spécifique, ce qui donne une distribution granulométrique moins diversifiée.

### 1.1.2 Module de finesse : (pour le sable et les rejets)

	type du granulat fin	module de finesse (%)
	sable	2,07
	rejet R1	1,38
	rejet R2	1,66
	rejet R3	2,18
mélange rejet R1 + sable	5% R1 + 95% sable	2,04
	15% R1 + 85% sable	1,97
	30% R1 + 70% sable	1,86
mélange rejet R2 +sable	5% R2 + 95% sable	2,05
	15% R2 + 85% sable	2,01
	30% R2 + 70% sable	1,95
mélange rejet R3 +sable	5% R3 + 95% sable	2,08
	15% R3 + 85% sable	2,09
	30% R3 + 70% sable	2,1

**Tableau 13: résultats du module de finesse**

Nous constatons que les modules de finesse de nos mélanges se situent tous dans une plage acceptable, ce qui indique qu'aucune correction n'est nécessaire. Tous les modules de finesse se situent entre 1.8 et 3.2, ce qui correspond aux critères de qualité établis. Donc ça prouve la conformité de nos mélanges aux spécifications requises. Les modules de finesse sont des indicateurs importants de la distribution des tailles de particules dans le béton

### 1.1.3 Teneur en eau

granulat	teneur en eau (%)
Sable	0,8
G1	0,4
G2	0,3
G3	0,5
Rejet R1	1,6
Rejet R2	1,6
Rejet R3	3,4

**Tableau 14 : Résultats de la teneur en eau**

Les teneurs en eau des granulats sont très faibles, ce qui constitue un paramètre favorable pour la réalisation d'un béton. Cette caractéristique présente l'avantage de ne pas avoir d'impact significatif sur la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour la préparation du béton. Ainsi, nous pouvons utiliser ces granulats sans avoir à ajuster de manière importante la proportion d'eau lors du mélange.

D'autre part, les rejets présentent des teneurs en eau plus élevées par rapport aux granulats. Cependant, cela n'affecte pas la gestion de ces rejets, car nous prévoyons de les utiliser en proportions réduites dans nos mélanges.

#### 1.1.4 pH :

Rejet	Ph
R1	7,59
R2	7,56
R3	7,81

*Tableau 15 : Résultats du pH*

Les 3 rejets miniers présentent un pH légèrement alcalin, avec des valeurs proches de la neutralité (pH 7), ces valeurs indiquent une légère tendance vers l'alcalinité. Cela suggère que ces rejets peuvent être relativement neutres et ne présentent pas de caractère acide, Cela suggère que ces rejets ne sont pas fortement acides et ne devraient pas avoir un impact significatif sur l'environnement en termes d'acidification des sols ou des eaux environnantes.

#### 1.1.5 Masse volumique

granulat	masse volumique réelle séchée <b>prd</b> (Kg/l)	Masse volumique réelle saturée surface sèche <b>pssd</b> (Kg/l)	Masse volumique absolue <b>pa</b> (Kg/l)
Sable	2,57	2,59	2,63
G1	2,65	2,66	2,68
G2	2,67	2,68	2,7
G3	2,64	2,65	2,68
R1	2,83	2,88	2,97
R2	2,65	2,7	2,77
R3	2,65	2,74	2,92

*Tableau 16 : Résultats des masses volumiques*

Nous nous intéressant beaucoup plus par la masse volumique absolue puisque elle nous aide à calculer la masse de matière première du béton dans chaque formulation à partir de volume calculer par la méthode de Dreux gorisse

Les valeurs de masse volumique absolue des granulats et des rejets sont toutes relativement élevées, ce qui indique une densité considérable des matériaux

Il est intéressant de noter que les rejets présentent des masses volumiques absolues légèrement plus élevées que celles des granulats. Cela peut être dû à la présence de minéraux ou d'autres substances ayant une densité plus élevée dans les rejets.

### 1.1.6 Bleu méthylène

granulat fin	MB
Sable	0,95
R1	0,48
R2	1,19
R3	1,43

**Tableau 17 : Résultats de bleu de méthylène**

Pour le sable, le résultat de l'essai de bleu de méthylène ( $MB = 0.95$ ) indique une faible teneur en argile. Une valeur proche de zéro ou faible suggère que le sable contient peu d'argile, ce qui peut être favorable dans nombreuses applications de construction, Cela signifie que le sable peut présenter des caractéristiques de drainage, de perméabilité et de compacité adaptées au formulation du béton , de même pour le rejet R1 le résultat  $MB=0.48$  indique une très faible quantité d'argile présente dans ce rejet , la substitution partielle de ce rejet avec le sable pour la formulation du béton

Pour les deux autres valeurs qui indiquent une plus grande teneur en argile dans les rejets R2 et R3 par rapport au sable. La présence d'argile peut avoir des implications sur les propriétés physiques et mécaniques des matériaux, notamment en termes de plasticité, de cohésion et de perméabilité. Des teneurs plus élevées en argile peuvent entraîner une plus grande plasticité et une plus faible perméabilité des matériaux, ce qui peut nécessiter des considérations particulières lors de leur utilisation dans le béton, mais on peut dire que ces valeurs sont acceptables puisque le MB est inférieur à 1.5 et tous nos mélanges sont dans les normes

### 1.1.7 Capacité d'échange cationique :

Les résultats de calcul de capacité d'échange cationique pour le sable et les 3 rejets dans la table suivante :

granulat fin	CEC (Még/100g)
Sable	0,019
R1	0,005
R2	0,0298
R3	0,0429

**Tableau 18 : Résultats de CEC**

On remarque que le sable a une CEC très faible. Le sable est principalement composé de particules de taille plus grosse et a une capacité limitée à retenir et échanger des cations.

Le rejet R1 présente une CEC extrêmement faible. Cela indique que ce rejet a une capacité très limitée à retenir et échanger des cations.

Le rejet R2 présente une CEC légèrement plus élevée que le sable. Cependant, la CEC reste relativement faible, ce qui suggère une capacité de rétention et d'échange cationique limitée pour ce rejet.

Avec une valeur de CEC de 0,0429 meq/100g, le rejet R3 présente une CEC considérablement plus élevée que les rejets R1 et R2 et même le sable. Cela indique que ce rejet de baryte a une capacité relativement plus importante à retenir et échanger des cations.

#### 1.1.8 Equivalent de sable :

On a trouvé ce résultat pour l'équivalent de sable effectué pour notre sable SE(10) = 74,36 % ce résultat indique une propreté relative du matériau, avec un faible pourcentage de fines argileuses. Cela suggère que le sable est adapté pour être utilisé dans la formulation de bétons de haute qualité.

Un sable propre, avec une faible quantité de fines argileuses, est préférable pour la préparation de bétons de haute performance. Les fines argileuses peuvent avoir un effet néfaste sur les propriétés du béton, telles que la résistance, la durabilité et la maniabilité.

#### **Note :**

Tous les essais réalisés pour la caractérisation physique ont été effectués conformément aux normes. Les essais ont été réalisés à la fois sur les granulats et sur les résidus. Si les résultats des essais sur le sable sont conformes aux normes, de même que les résultats des essais sur les résidus, il est logique de conclure que les résultats des mélanges (sable et résidus) seront également conformes aux normes. Il est important de noter que le sable est prédominant dans tous les mélanges, ce qui confère une plus grande importance aux résultats des essais sur le sable.

Nous avons calculé le module de finesse des mélanges pour vérifier leur conformité. Cependant, le module de finesse des rejets ne respectait pas la norme (inférieur à 1,8), contrairement aux autres essais où les résultats du sable et des résidus étaient conformes aux normes.

#### 1.2 Caractérisation chimique

##### Spectrométrie florissante rayon x (FRX)

Nous avons procédé à l'analyse par spectrométrie de fluorescence des rayons X sur les trois rejets miniers. Cette technique nous a permis de déterminer la composition élémentaire de ces rejets avec une grande précision, cet essai est réalisé à CETIM.

Voici les résultats obtenus présenter dans la table si dessous :

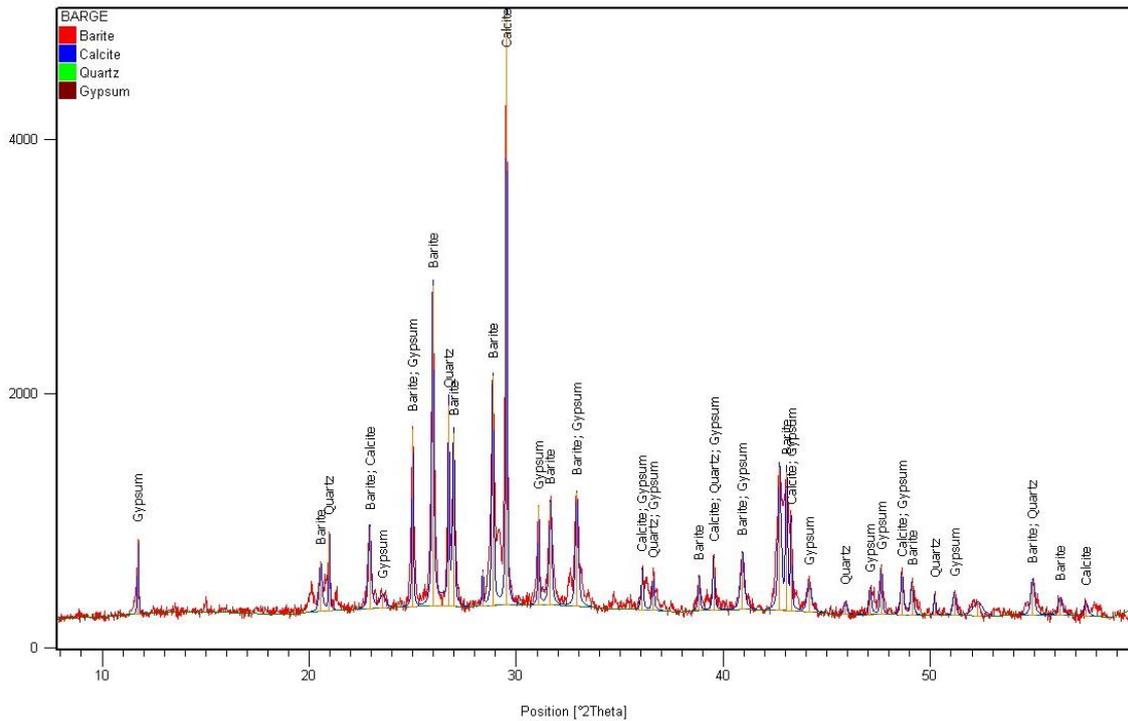
échantillon	perte au feu(%)	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	SO3	K2O	Na2O	P2O5	Tio2
		Si2 (%)	Al2 (%)	Fe2 (%)	Ca2 (%)	Mg2 (%)	S2 (%)	K2 (%)	Na2 (%)	P2 (%)	Ti2 (%)
R1	23,74	2,07	0,36	17,12	37,75	16,84	1,27	0,06	0,65	0,02	0,12
R2	25,89	7,21	1,32	10,22	48,46	0,35	3,25	0,12	2,94	0,09	0,14
R3	12,9	21,53	3,46	9,71	29,97	1,36	17,68	0,5	2,4	0,15	0,35

**Tableau 19 : Résultat FRX et pourcentages des éléments chimiques présents dans les rejets**

Les résultats de l'analyse spectrométrie de fluorescence des rayons X ont révélé la présence de différents éléments dans les trois rejets. Pour le rejet R1, nous avons identifié une concentration significative de la chaux CaO avec 37.75%, et 17.12% d'Oxyde de fer Fe2O3 de même pour La magnésie MgO avec 16.84%.

Pour le Rejet R2, nous avons observé une prédominance de la chaux CaO avec 48.46% ainsi que l'Oxyde de fer Fe2O3 avec 10.22% et 7.21% d'oxyde de Silicium SiO2 .En ce qui concerne le rejet R3, nous avons détecté un pourcentage élevé de la chaux Cao 29.97%, 21.53% d'oxyde de Silicium SiO2 et 17.63% d'anhydride sulfurique SO3.





**Figure 58: Spectre du Rejet R3**

Voici tables des minéraux qu'on tire depuis les spectres DRX :

Rejet R2	groupe de minerale	Minerale	composition chimique
	Carbonates	Calcite	CaCO <sub>3</sub>
	Sulfates	Baryte	BaSO <sub>4</sub>
	Sulfures	Pyrite	FeS <sub>2</sub>
	scilicates	Quartz	SiO <sub>2</sub>
	secondaire	Gypse	CaSO <sub>4</sub>
		Smithsonite	ZnCO <sub>3</sub>
Hemimorphite		Zn <sub>4</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (OH) <sub>2</sub>	

**Tableau 20 : Table des minéraux du rejet R2**

Rejet R1	groupe de minerale	Minerale	composition chimique
	Carbonates	Dolomite	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
	Sulfure	Pyrite	FeS <sub>2</sub>
		Marcassite	FeS <sub>2</sub>
	scilicates	Quartz	SiO <sub>2</sub>
		Albite	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>
secondaire	gypse	CaSO <sub>4</sub>	

**Tableau 21: table des minéraux du rejet R1**

Rejet R3	groupe de minerale	Minerale	composition chimique
	Carbonates	Calcite	CaCO <sub>3</sub>
	Sulfates	Baryte	BaSO <sub>4</sub>
	scilicates	Quartz	SiO <sub>2</sub>
	secondaire	Gypse	CaSO <sub>4</sub>

**Tableau 22: table des minéraux du rejet R3**

#### 1.4 Caractérisation nvironnementale

##### Essai sobek

D'après une étude qui a été faite avant voici le résultat obtenu

Echantillon	R3 (rejet de baryte)	R2 (rejet de polmb-zinc boucaid)
t = 0 h Volume de Hcl (1N) ajouté en (ml)	2	3
t=2 h Volume de Hcl (1N) ajouté en (ml)	1	2
t=22 h Volume de Hcl (1N) ajouté en (ml)	6,55	3,7
t=24 h Volume de NaOH (0.1N) ajouté en (ml)	10,9	15,6
PN (kg CaCO <sub>3</sub> /t)	214	178,5
PA (kg CaCO <sub>3</sub> /t)	46,21	44.18
PN/PA	4,63	4,04
PN-PA	167.79	134.32

**Tableau 23: résultat essai statique**

Le résultat tiré de cet essai statique démontrent que les deux rejets R2 et R3 ne sont pas générateurs d'acidité puisque PN-PA > 20 (MOKRANE islem, 2021)

## 2 Formulation du béton :

Dans le cadre de la formulation du béton, nous avons réalisé neuf formulations différentes. La première formulation est notre témoin, tandis que les trois suivantes présentent des substitutions partielles du rejet R1 à pourcentages de 5%, 15% et 30% respectivement. Deux formulations comprennent des substitutions partielles du rejet R2 à hauteur de 5% et 15%, (30% n'a pas été réalisée en raison du délai de prise élevée en plus le démoulage était impossible donc c'est une formulation ratée) et enfin, trois formulations intègrent des substitutions partielles du rejet R3 à hauteur de 5%, 15% et 30%.

Les paramètres à déterminer à l'aide de la méthode de Dreux Gorisse sont fixes et constants pour l'ensemble des formulations. Afin de faciliter les calculs pour les mélanges sable-rejet, nous avons pris en compte que les courbes granulométriques de ces mélanges seraient proches de celle du sable. En effet, étant donné que le pourcentage de substitution des rejets est relativement faible, atteignant au maximum 30%, les écarts entre les courbes granulométriques des mélanges et celle du sable restent limités. Nous estimons que les erreurs introduites par cette approche sont négligeables, de l'ordre de 1% au maximum.

2.1 Dosage en ciment et en eau :

2.1.1 La résistance souhaitée :

La résistance visée est  $f_{c28} = 30\text{MPa}$  ainsi que la résistance corrigée est  $f_c = 34.5\text{MPa}$

2.1.2 Détermination du rapport C/E :

On tire le coefficient G du **Tableau 8**  $G=0.5$  en suite on calcule le rapport  $C/E = 1.97$

Ce rapport est légèrement élevé, ce qui entraînera un béton légèrement plus fluide dans son état frais

2.1.3 Détermination du dosage en ciment C (kg/m<sup>3</sup>)

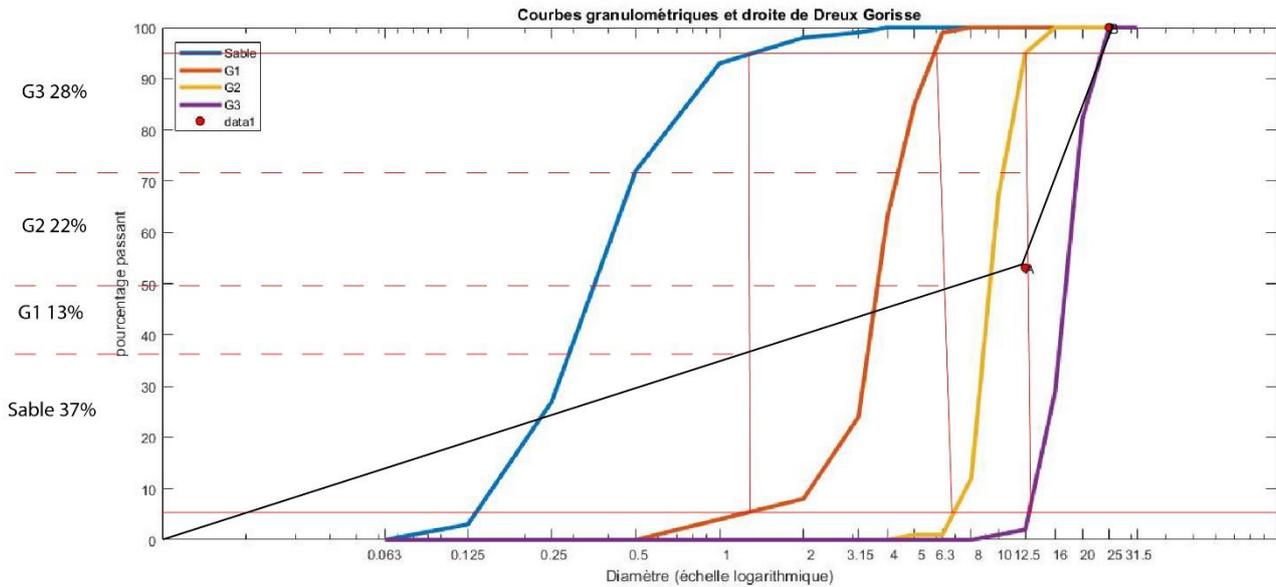
La quantité du ciment nécessaire pour nos formulations tirée de l'abaque du ciment (**figure 39**) **C=400 Kg/m<sup>3</sup>** ensuite on peut déduire la quantité d'eau nécessaire dans un mètre cube **E=203 l/m<sup>3</sup>**

2.1.4 Détermination des pourcentages des agrégats

Les coordonnées des points de la droite de Dreux-gorisse

- ❖ L'origine O (0,0)
- ❖ L'extrémité B (20, 100%)
- ❖ Cassure A (10, 53.1)

On tire les coefficients de correction du tableau de correction (**tableau 9**) pour calculer les coordonnées de A



**Figure 59 : Courbe granulométrique avec droite de Dreux gorisse**

Donc les pourcentages des granulats sont :

- ❖ Sable 37%
- ❖ G1 13%
- ❖ G2 22%
- ❖ G3 28%

### 2.1.5 Coefficient de compacité ( $\gamma$ )

On tire la compacité du tableau de compacité (**tableau 10**) pour déterminer le volume total des granulats

$\gamma = 0.815$

Le volume total des granulats sera  $V_t = 686$  l

Voici les messes optimales de la matière première pour notre béton :

Matières première	Volume dans 1 mètre cube (l)	Masse volumique absolue $\rho_a$ (Kg/l)	masse dans 1 mètre cube (kg)
Sable	253,82	2,63	667,55
G1	89,18	2,68	239
G2	150,92	2,7	407,48
G3	192,08	2,68	514,77
Ciment	129.03	3.1	8000
Eau	203	1	4060
adjuvant	0.61	1.1	0.67

**Tableau 24 : Résultats des quantités pour la formulation d'un mètre cube de béton**

L'adjuvant utilisé est le **SIKA ViscoCrete-4050 RMX**

Étant donné que nous avons effectué nos formulations pour 5 éprouvettes cubiques de dimensions 150\*150\*150, le volume total de chaque formulation est égal à 5 fois le volume d'une seule éprouvette, soit 16,875 litres. Afin de garantir que les 5 éprouvettes soient entièrement remplies, nous allons formuler 20 litres pour chaque mélange.

Donc voici la quantité optimale pour la première formulation qui sera la formulation témoin

Matières première	Masse en gramme
Sable	13351
G1	4780
G2	8150
G3	10295
Ciment	129.03
Eau	203
adjuvant	13.4

**Tableau 25: Quantité optimale pour la formulation témoin**

Le reste de formulation ont la même quantité de matière première sauf le sable puisque on a fait une substitution partielle en volume, donc voici la quantité nécessaire du sable et rejets pour le reste des formulations

Rejet	Formulation	granulats	Volume du melage pour 1 metre cube (l)	volume dans 1 metre cube (l)	volume dans la formulation (l)	masse dans la formulation (gramme)
R1	5% de Rejet R1	Sable	253,82	241,13	4,823	12684
		rejet		12,69	0,254	754
	15% de Rejet R1	Sable	253,82	215,75	4,315	12684
		rejet		38,07	0,761	2260
	30% de Rejet R1	Sable	253,82	177,67	3,55	9,337
		rejet		76,15	1,52	4520
R2	5% de Rejet R2	Sable	253,82	241,13	4,823	12684
		rejet		12,69	0,254	704
	15% de Rejet R2	Sable	253,82	215,75	4,315	12684
		rejet		38,07	0,761	2108
R3	5% de Rejet R3	Sable	253,82	241,13	4,823	12684
		rejet		12,69	0,254	742
	15% de Rejet R3	Sable	253,82	215,75	4,315	12684
		rejet		38,07	0,761	2222
	30% de Rejet R3	Sable	253,82	177,67	3,55	9337
		rejet		76,15	1,52	4438

**Tableau 26: Masse du sable et les rejets dans les formulations**

## Remarques

- On remarque la différence de quantité de rejet qui remplace une partie de sable, puisque on le remplace en termes de volume, et puisque la masse volumique diffère
- Pour les formulations à base du rejet R1 le démoulage était normal, après 24h seulement
- Pour les formulations à base des rejets R2 et R3, on remarque que le temps de prise du béton augmente lorsqu'on augmente le pourcentage de rejet du béton
- Pour le rejet R2, le temps de prise était 3 jours pour le 5% et 4 jours pour le 15%
- Pour le rejet R3, le temps de prise était 6 jours pour le 5% et le 15% et 8 jours pour le 30%

## 3 Caractérisation du béton

### 3.1 Caractérisation physique du béton :

#### 3.1.1 Masse volumique du béton frais

formulation	masse (Kg)	masse volumique
temoin	11,626	2,3252
R1 5%	11,788	2,3576
R1 15%	11,836	2,3672
R1 30%	12,183	2,4366
R2 5%	12,183	2,4366
R2 15%	12,125	2,425
R3 5%	11,785	2,357
R3 15%	11,875	2,375
R3 30%	11,989	2,3978

*Tableau 27 : Résultats de la masse volumique du béton frais*

Nous remarquons que la masse volumique de nos formulations répond aux normes puisque la masse volumique du béton sera entre 2.3 et 2.5

La masse volumique du béton témoin est la plus basse, puisque la masse volumique des rejets ajoutés est supérieure à celle du sable, donc logiquement la masse volumique des bétons à base des rejets sera supérieure à celle du témoin.

#### 3.1.2 Affaissement

formulation	Affaissement (Cm)
témoin	17
R1 5%	19
R1 15%	21
R1 30%	18
R2 5%	17,5
R2 15%	19
R3 5%	19
R3 15%	21
R3 30%	14,5

*Tableau 28 : Résultats d'affaissement*

L'affaissement de tous les types de béton que nous avons réalisé est élevé, cela montre qu'il est très fluide et peut être facilement mis en place sans trop d'efforts, sauf le béton de la formulation du rejet R3 30% qui est un peu ferme.

Les résultats des affaissements obtenus sont très satisfaisants, ce qui indique que notre formulation du béton était également réussie. La texture du béton est également excellente, ce qui contribue à sa qualité globale.

### 3.2 Etude du comportement mécanique

Rejet	formulations	Résistance a la compression pour 7 jours de confection (Mpa)			Résistance a la compression pour 28 jours de confection (Mpa)			remarques sur la résistance
		essai 1	essai 2	moyenne	essai 1	essai 2	moyenne	
	Témoin	19,7	/	19,7	31,77	29,52	30,645	excellente
R1	5%	22,6	20,46	21,53	31,57	29,89	30,73	excellente
	15%	21,14	22,97	22,06	32,08	29,61	30,845	excellente
	30%	18,56	17,73	18,17	27,32	25,92	26,62	Besoin de correction
R2	5%	10,24	7,9	9,07	28,27	28,2	28,235	acceptable
	15%	13,39	10,01	11,7	30,24	29,52	29,88	bonne
R3	5%	11,88	7,99	9,94	24,87	24,51	24,69	Besoin de correction
	15%	9,27	8,8	9,04	20,74	25,11	22,925	Besoin de correction
	30%	/	/	/	14,94	13,61	14,275	mauvaise

**Tableau 29: Resultat de resistance a la compression**

L'un des échantillons témoins a échoué en raison d'erreurs expérimentales. Par conséquent, nous n'avons pu effectuer qu'un seul essai de résistance à la compression après 7 jours de fabrication.

En ce qui concerne l'échantillon R3 avec un taux de 30%, le temps de prise du béton a dépassé les 7 jours, nous avons donc uniquement effectué un essai de résistance à la compression après 28 jours.

La résistance ciblée était de 30 MPa, et le résultat de résistance à la compression pour l'échantillon témoin s'est avéré être de 30,65 MPa. Cela signifie que notre formulation était correcte, ce qui nous permet de comparer la résistance des bétons à base de rejets avec celui du témoin.

En ce qui concerne le rejet R1, une substitution partielle avec 5% et 15% a donné une excellente résistance à la compression légèrement supérieure à celle du témoin. Les résistances à 7 jours des deux bétons R1 avec 5% et 15% (21,53 MPa, 22,06 MPa) sont supérieures à celle du témoin (19,7 MPa). Ces résistances à 28 jours confirment les excellents résultats à 7 jours (30,73 MPa, 30,85 MPa).

En revanche, le rejet R3 à 30% présente des résistances insuffisantes à 7 jours (18,17 MPa) et à 28 jours (26,62 MPa) par rapport au témoin. Lorsque le pourcentage de rejet R1 augmente dans le béton, la teneur en éléments nuisibles augmente également. Parmi ces éléments, nous

constatons la présence de MgO (d'après l'analyse chimique par spectrométrie de fluorescence des rayons X). Cet élément a un impact négatif sur la compacité et la résistance du béton.

Cela souligne la nécessité d'apporter des corrections au rejet avant de l'utiliser afin d'augmenter sa résistance et de le rendre compact, solide et résistant. Ainsi, le pourcentage optimal pour le rejet R1 semble être de 15%, car sa résistance est légèrement supérieure à celle de R1 avec 5%.

Pour le béton à base de rejet R2 avec 5% et 15%, la résistance après les 7 premiers jours (9,07 MPa et 11,7 MPa) était considérablement inférieure à celle du témoin en raison d'un retard de prise. Ce retard a été causé par la présence de gypse dans ce rejet (selon l'analyse minéralogique par diffraction des rayons X). En effet, le gypse est un élément retardateur de prise et il est présent dans le ciment avec une teneur de 5% pour assurer la maniabilité lors de la formulation du béton et donner suffisamment de temps pour remplir les moules et effectuer les essais à l'état frais. Cependant, un excès de cet élément provoque un retard de prise et une faible résistance dans les 7 premiers jours. Ainsi que la présence des métaux lourds influe sur les réactions chimiques lors de l'hydratation. Ces métaux peuvent perturber les processus d'hydratation des matériaux, entraînant des altérations dans la formation des liaisons chimiques et la structure du matériau, ce qui peut avoir un impact négatif sur les propriétés mécaniques et la durabilité du produit final.

Malgré cela, grâce à une bonne confection, ces deux bétons contenant 5% et 15% de rejet ont pu récupérer la résistance nécessaire. En effet, ce rejet contient des éléments qui facilitent la confection et l'hydratation pendant les 28 jours, ce qui augmente la résistance. Parmi ces éléments, la chaux (CaO) et la silice (SiO<sub>2</sub>) jouent un rôle important. La chaux favorise l'hydratation des composants du béton, contribuant ainsi à l'obtention d'une structure solide et résistante. La silice, quant à elle, réagit avec les composés du ciment pour former des produits de gel qui renforcent la matrice du béton et améliorent sa résistance mécanique.

La résistance après 28 jours pour les deux bétons contenant 5% et 15% de rejet R2 était de 28,26 MPa et 29,88 MPa respectivement. Bien que ces résistances soient légèrement inférieures à celle du témoin, il est remarquable de constater une croissance incroyable de 9,07 MPa à 28,26 MPa pour le béton R2 à 5% de rejet, et de 11,7 MPa à 29,88 MPa pour le béton R2 à 15% de rejet, en seulement 21 jours.

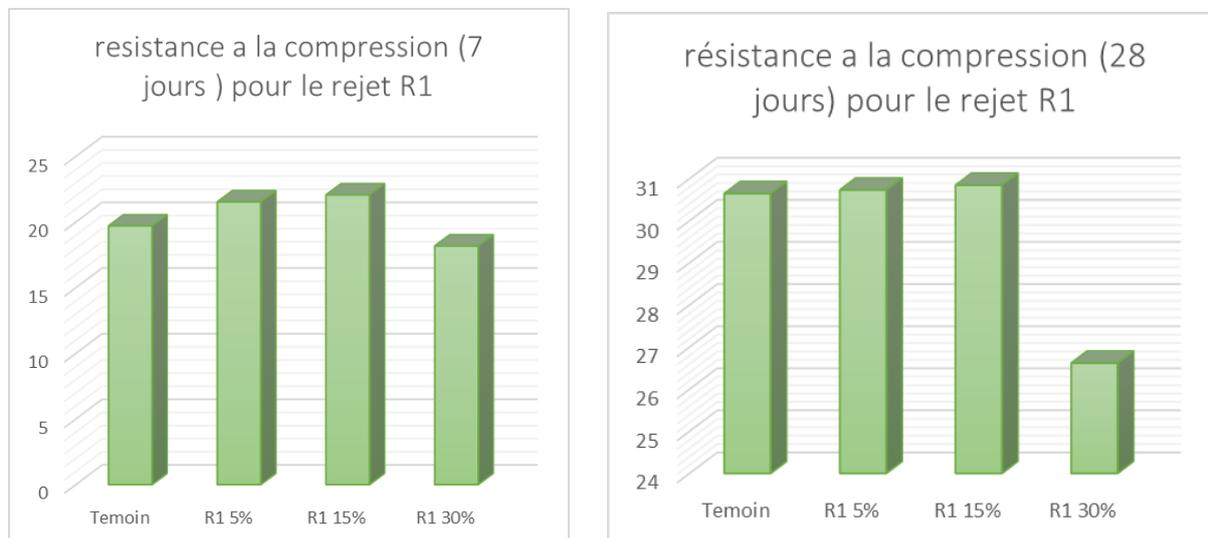
Cette augmentation significative en un laps de temps relativement court laisse supposer que si l'on donne encore quelques jours supplémentaires pour récupérer le retard initial, la résistance sera excellente et se rapprochera de celle du témoin. Cela démontre la capacité des éléments présents dans le rejet R2, tels que la chaux et la silice, à continuer à réagir et à développer la résistance au fil du temps.

Pour les bétons à base du rejet R3 avec 5% et 15%, le temps de prise est plus long que celui des rejets précédents en raison de la quantité élevée de gypse présente dans ce rejet par rapport au rejet R2, cet élément provoque non seulement un retard de prise, mais il diminue également la résistance à la compression du matériau. Les résistances à la compression après 7 jours pour ces deux bétons sont très faibles, soit 9,94 MPa et 9,04 MPa. Cependant, il est remarquable de constater qu'ils développent ces résistances de manière significative. Malheureusement, les résultats de résistance à 28 jours (24,69 MPa et 22,93 MPa) restent insuffisants, bien que si on leur accorde encore quelques jours, la résistance augmentera, mais elle restera insuffisante et encore loin de celle du témoin.

Pour améliorer la résistance et le temps de durcissement de ces bétons, des corrections peuvent être envisagées. Par exemple, l'utilisation d'un adjuvant accélérateur peut aider à accélérer le

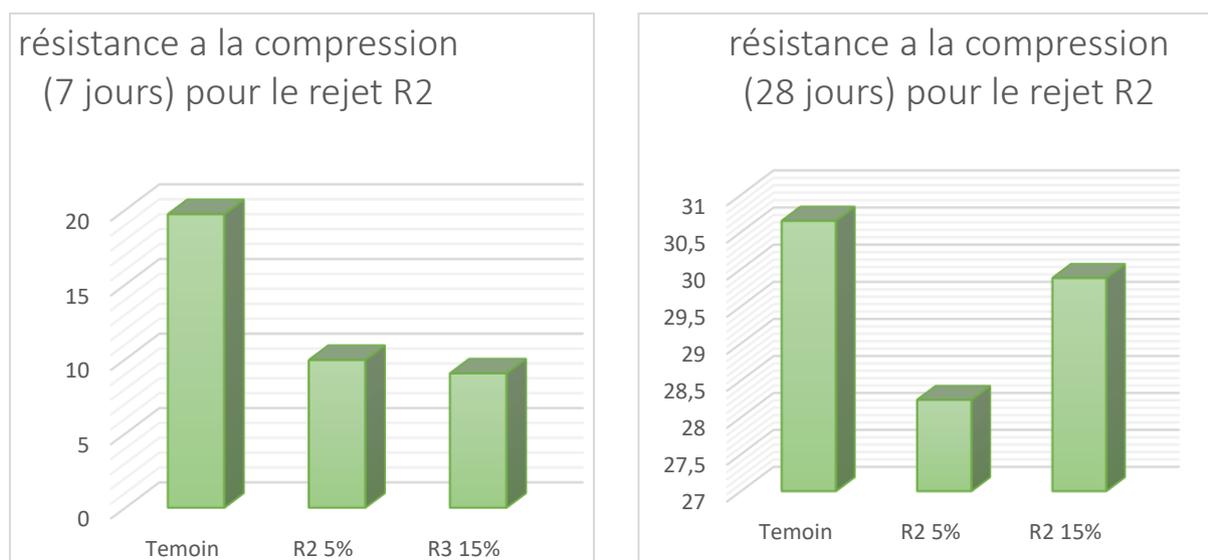
temps de prise et améliorer la résistance. Une autre recommandation serait d'utiliser un ciment de type CEM I qui ne contient pas de gypse. Cela pourrait contribuer à améliorer la résistance des bétons à base du rejet R3.

En ce qui concerne le béton R3 avec 30% de rejet, son temps de prise dépasse les 7 jours, ce qui nous a empêchés de réaliser l'essai de résistance à la compression à 7 jours. De plus, les résultats de résistance à 28 jours sont encore loin d'être satisfaisants.



**Figure 60 : Représentation graphique de la résistance a la compression (7 et 28 jours) pour le rejet R1**

D'après nos conclusions, nous constatons qu'en augmentant le pourcentage de rejet R1 dans le béton, la résistance à la compression s'améliore jusqu'à 15%. Au-delà de ce pourcentage, la résistance commence à diminuer. Par conséquent, le pourcentage optimal pour obtenir la meilleure résistance à la compression est de 15%.

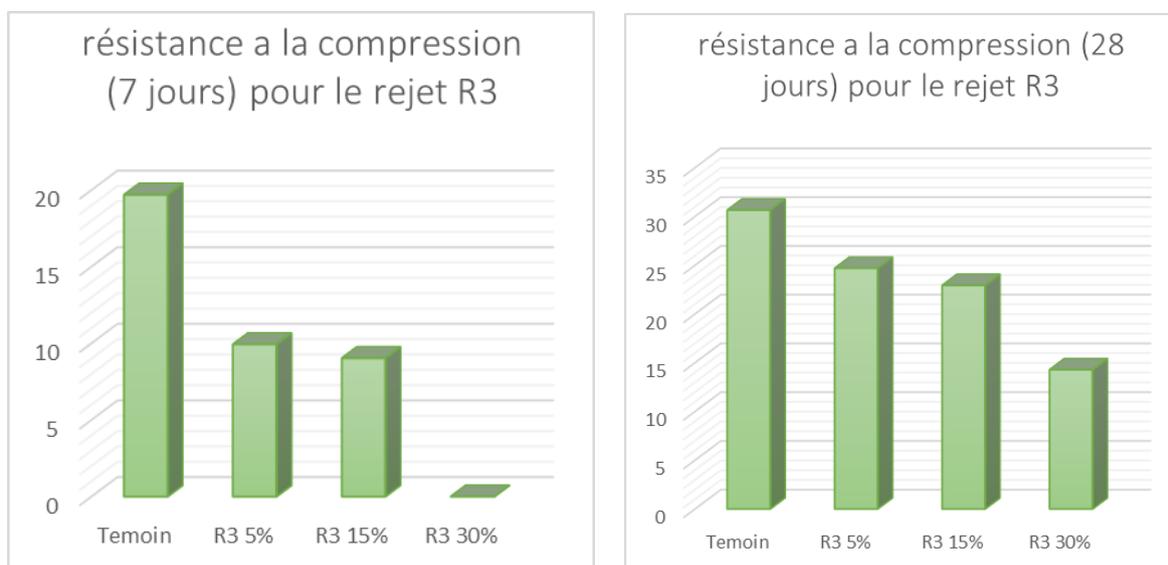


**Figure 61: Représentations graphiques de la résistance à la compression (7 et 28 jours) pour le rejet R2**

Lorsque le pourcentage du rejet R1 augmente dans le béton, nous observons une amélioration initiale de la résistance jusqu'à 15%. Malheureusement, nous ne disposons pas d'informations

supplémentaires pour déterminer si une augmentation du pourcentage au-delà de 15% serait bénéfique ou dégradante pour la résistance.

Cependant, ce que nous pouvons affirmer, c'est que la substitution de 15% de rejet R2 dans le béton présente de bons résultats en termes de comportement mécanique, en particulier en ce qui concerne la résistance à la compression



**Figure 62 : Représentations graphiques de la résistance à la compression (7 et 28 jours) pour le rejet R3**

Pour le rejet R3, nous avons constaté que lorsque le pourcentage de ce rejet augmente dans le béton, la résistance à la compression diminue. Ces résultats ne sont pas satisfaisants, car une augmentation du pourcentage de rejet R3 entraîne une détérioration de la résistance du béton.

Cela suggère que le rejet R3 contient des éléments ou des caractéristiques qui nuisent à la résistance du béton lorsqu'ils sont présents en quantités plus élevées,

Il est essentiel de mentionner l'observation de la rupture des éprouvettes après la compression, car cela nous fournit des informations précieuses sur les défauts potentiels de notre béton.

Pour les rejets R1 et R2, nous avons constaté que les ruptures de toutes les éprouvettes étaient correctes. Cela indique que le béton formulé avec ces rejets présente une bonne cohésion adéquate lors de la compression. Une rupture correcte indique que le béton a été capable de supporter la charge de compression sans se désintégrer ni se fissurer de manière excessive.

Par contre, nous avons observé des ruptures incorrectes pour les éprouvettes contenant le rejet R3. Cette observation soulève des préoccupations quant à la qualité et à la résistance du béton formulé avec ce rejet spécifique.

Les ruptures incorrectes des éprouvettes pour le rejet R3 peuvent indiquer des défauts dans la composition et l'interaction du rejet avec le mélange. Ces défauts peuvent entraîner une faiblesse structurelle, une fissuration excessive ou une mauvaise adhérence des matériaux.

(Photo des ruptures en ANNEXE C)

En résumé, nous pouvons conclure que les bétons formulés avec 5% de R1, 15% de R1 et 15% de R2 présentent des performances mécaniques adéquates, conformes aux normes requises. Ils

ont démontré d'excellents résultats en termes de résistance à la compression et d'autres propriétés mécaniques importantes, Cependant, il reste à confirmer le comportement environnemental de ces bétons.

### 3.3 Etude de comportement environnementale

Voici les résultats d'essai pénétration d'eau :

Rejet	formulations	Profondeur d'eau (mm)
Témoin		30
R1	5%	24
	15%	13
	30%	20
R2	5%	26
	15%	5
R3	5%	36
	15%	13
	30%	10

**Tableau 30 : Résultat de la pénétration d'eau**

L'observation de la profondeur d'eau à l'intérieur du béton témoin, qui atteint 30 mm après exposition à une pression d'eau, indique clairement que ce béton n'est pas résistant à l'attaque d'eau à long terme. La présence de vides à une petite échelle est la principale cause de cette sensibilité.

En effet, la masse volumique relativement basse du béton témoin confirme la présence de ces vides, par rapport aux autres bétons qui présentent tous une masse volumique plus élevée à l'état frais. Les vides peuvent résulter de plusieurs facteurs tels que des conditions de mélange inadéquates, une teneur en eau excessive ou une compaction insuffisante du béton.

La présence de vides à l'intérieur du béton peut entraîner une perméabilité accrue, permettant ainsi à l'eau de pénétrer plus facilement dans la structure. Cela peut conduire à des problèmes tels que la détérioration des armatures métalliques par corrosion, l'altération des propriétés mécaniques du béton et des problèmes d'humidité à long terme.

Lorsque nous examinons les bétons à base du rejet R1, il est clairement visible que lorsque le pourcentage du rejet R1 augmente, la profondeur d'eau diminue jusqu'à atteindre 15% de R1. Ensuite, elle augmente légèrement, ce qui nous permet de confirmer que le béton excellent, qui donne les meilleurs résultats dans l'étude mécanique, est celui avec une profondeur d'eau adéquate. Cela signifie qu'il résiste bien à l'attaque d'eau sous pression. Ainsi, le pourcentage de 15% de R1 semble être le pourcentage optimal pour ce rejet.

Il convient de noter que les autres bétons, tels que R1 5% et R1 30%, présentent également des résultats relativement meilleurs que le témoin. Cela indique que même avec une variation du pourcentage de rejet, ces bétons maintiennent une certaine résistance à l'attaque d'eau. Toutefois, les performances mécaniques et la résistance peuvent différer en fonction du pourcentage spécifique de rejet utilisé dans la formulation.

Dans le cas du béton à base du rejet R2, il est remarqué que le béton avec un pourcentage de 5% présente une profondeur d'eau importante de 26 mm. Cela indique une résistance relativement faible à l'attaque d'eau. Cependant, le béton contenant 15% de ce rejet se distingue dans cet essai, car il présente une profondeur d'eau de seulement 5 mm. Cela confirme sa résistance à l'attaque d'eau, faisant de ce pourcentage le plus optimal pour le rejet R2.

Il est important de souligner que ce béton avec 15% de rejet R2 est considéré comme le meilleur dans cette étude de comportement environnementale. Non seulement il présente une bonne résistance à la compression, mais il offre également une meilleure durabilité. Sa compacité contribue à minimiser le taux de vides, ce qui renforce ses performances globales.

En ce qui concerne le rejet R3, les deux bétons avec des pourcentages de 15% et 30% montrent une bonne résistance à l'attaque d'eau, avec des profondeurs respectives de 13 mm et 10 mm. Cela indique que les éprouvettes ont des parois quasiment imperméables, ce qui confirme leur capacité à résister à l'entrée d'eau sous pression.

Cependant, il est important de noter que le béton à base de rejet R3 avec 5% présente la profondeur la plus élevée dans cette étude, ce qui signifie qu'il est moins résistant à l'attaque d'eau. Cette observation souligne l'importance du pourcentage de rejet dans la formulation du béton, car des concentrations plus élevées semblent améliorer la résistance à l'eau.

#### 4 Interprétation générale :

Rejet	formulations	Résistance de 7 jours (Mpa)	Résistance de 28 jours (Mpa)	remarques sur la résistance	Profondeur d'eau (mm)	Remarque sur la durabilité
	Témoin	19,7	30,645	excellente	30	mauvaise
R1	5%	21,53	30,73	excellente	24	acceptable
	15%	22,06	30,845	excellente	13	excellente
	30%	18,17	26,62	Besoin de correction	20	bonne
R2	5%	9,07	28,235	acceptable	26	acceptable
	15%	11,7	29,88	bonne	5	excellente
R3	5%	9,94	24,69	Besoin de correction	36	Très mauvaise
	15%	9,04	22,925	Besoin de correction	13	excellente
	30%	/	14,275	mauvaise	10	excellente

**Tableau 31: Tableau récapitulatif des résultats**

En résumé, en croisant les études de comportement mécanique et de durabilité, nous pouvons identifier les bétons optimaux qui garantissent à la fois une bonne résistance mécanique et une durabilité face à l'agression de l'eau.

Dans cette étude, les bétons avec 15% de rejet R1 et 15% de rejet R2 se démarquent en termes de résistance à la compression et de durabilité contre l'attaque d'eau. Ces deux formulations présentent un équilibre entre une bonne résistance mécanique et une capacité à résister efficacement à l'eau.

Le béton avec 15% de rejet R1 offre une résistance à la compression satisfaisante tout en montrant une bonne résistance à l'attaque d'eau. De même, le béton avec 15% de rejet R2

présente une résistance à la compression adéquate et une durabilité élevée face à l'agression de l'eau.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de trouver un compromis entre les propriétés mécaniques et la durabilité lors de la formulation du béton. En optant pour les pourcentages de rejet R1 et R2 de 15%, on peut obtenir un béton optimal qui répond aux exigences de résistance et de durabilité dans cette étude.

Il est important de préciser que l'évaluation du comportement mécanique et environnemental des bétons ne se limite pas uniquement à la résistance à la compression et à la durabilité face à l'attaque d'eau. Ces deux critères sont pris en compte dans le contexte spécifique de cette étude, mais d'autres paramètres peuvent également jouer un rôle dans l'évaluation globale du comportement des bétons.

Il est nécessaire de mener une analyse approfondie incluant plusieurs aspects du comportement mécanique, tels que la résistance à la flexion, la résistance à la traction, la résistance aux chocs, etc.

Notant que d'autres aspects environnementaux tels que la résistance aux agents chimiques, la résistance au gel et au dégel, ainsi que l'impact environnemental global doivent également être pris en compte lors de l'évaluation complète de la durabilité des bétons.

Dans le cadre de cette étude, les bétons ont été confectionnés et évalués sur une période de 28 jours. Cependant, il est important de noter que la durée de confection peut varier en fonction des besoins spécifiques du projet et des exigences du matériau.

La période de 28 jours est souvent utilisée comme une référence standard pour évaluer les propriétés du béton, car c'est le délai généralement requis pour atteindre une résistance suffisante. Cependant, dans des situations réelles, la durée de confection peut être prolongée au-delà de 28 jours, parfois jusqu'à 180 jours ou plus, en fonction des besoins du projet, de la résistance requise et des conditions environnementales auxquelles le béton sera exposé.

Il est essentiel de comprendre que les propriétés du béton, y compris la résistance et la durabilité, peuvent continuer à évoluer au fil du temps. Par conséquent, des évaluations supplémentaires à des stades ultérieurs, tels que 90 jours, 180 jours ou même plus longtemps, peuvent être nécessaires pour obtenir une image plus complète du comportement à long terme du matériau.

Il est recommandé de réaliser des études supplémentaires pour évaluer le comportement à long terme des bétons qui ont donné de bons résultats dans cette étude. Bien que ces bétons aient montré de bonnes propriétés mécaniques et de durabilité jusqu'à 28 jours, il est important de vérifier s'ils maintiennent ces performances au-delà de cette période.

L'élément MgO présent dans le rejet R1, en particulier avec une teneur remarquable, peut être considéré comme un élément nuisible potentiel qui peut provoquer des dégradations ultérieures après 28 jours. Il est possible que cet élément ait un impact négatif sur la résistance à la compression et la stabilité de la structure du béton à plus long terme.

## *Conclusion générale*

Ce travail de fin d'études a porté sur l'étude de la possibilité de substitution des sables par les rejets provenant de la mine de Boucaïd, dans la wilaya de Tissemsilt et de Kharzet Youcef, dans la wilaya de Sétif. Après un long travail au niveau de différents laboratoires et suite aux résultats satisfaisants qui ont couronné cette modeste contribution, Plusieurs recommandations sont formulées afin d'approfondir notre travail et d'élargir notre champ d'investigation :

- Diversifier les types de rejets miniers : En plus des rejets de plomb-zinc et de baryte, il est recommandé d'explorer d'autres types de rejets miniers tels que le fer ou le cuivre. Cependant, il est important d'éviter les rejets contenant de la dolomite, car la présence de MgO peut avoir un impact négatif sur les propriétés du béton.
- Explorer la possibilité d'augmenter les taux des rejets. Au lieu de se limiter aux pourcentages de 15% et 30%, il est souhaité d'entreprendre des essais avec des taux de 20% et 25% de rejets. Cela permettra de déterminer avec précision le pourcentage optimal de rejets pour obtenir les meilleures performances du béton.
- Pour étendre l'étude du comportement mécanique, il est recommandé d'utiliser des moules cylindriques de dimensions spécifiques 16x32 (cm). Bien que cela puisse nécessiter une plus grande quantité de rejets, cela permettra de réaliser des essais de traction inverse (brésilien) ou des essais de flexion sur des éprouvettes rectangulaires de dimensions 10x10x40 (cm), l'utilisation d'éprouvettes rectangulaires pour l'essai de flexion offre une possibilité intéressante de réaliser à la fois un essai de résistance à la compression et un essai de flexion avec une seule éprouvette. Lors de l'essai de flexion, l'éprouvette rectangulaire est chargée jusqu'à ce qu'elle se cède au niveau du milieu. Ensuite, les deux moitiés résultantes peuvent être séparées pour obtenir deux cubes de dimensions 10x10x10 cm. Cela présente plusieurs avantages :
  - Maximiser l'utilisation de chaque éprouvette en réalisant deux essais différents.
  - En utilisant des cubes de 10x10x10 cm, on peut effectuer des essais spécifiques qui nous permettront d'évaluer d'autres propriétés mécaniques ou de durabilité.
- Étudier la durabilité et le comportement face à l'attaque chimique : En ce qui concerne l'étude de la durabilité, il est recommandé de réaliser des essais de perméabilité aux gaz afin d'évaluer la porosité du béton. De plus, il est recommandé d'étudier la résistance du béton aux attaques de milieux agressifs tels que les acides, les bases, l'eau de mer, les sulfates, etc.
- Variabilité des adjuvants : Pour obtenir un adjuvant adéquat, il est suggéré de varier les types d'adjuvants utilisés dans la formulation du béton. Cela permettra d'évaluer l'effet de différents adjuvants sur les propriétés mécaniques et la durabilité du béton.
- étude environnementale porte sur l'impact du béton fabriqué à base des rejets miniers sur l'environnement. Pour évaluer cet impact, les éprouvettes de béton seront broyées finement. Ensuite, des essais statiques et cinétiques seront réalisés pour déterminer comment ce béton spécifique interagit avec l'environnement et s'il peut potentiellement libérer des substances nocives

L'utilisation de béton à base de rejets miniers ne sera pas généralisée à tous les domaines de la construction. Les professionnels du BTP, de la construction et des ouvrages d'art peuvent hésiter à prendre le risque d'utiliser ce type de béton. Par conséquent, il est nécessaire de limiter son utilisation et de rechercher des solutions spécifiques, en particulier dans l'industrie minière.

Dans le cadre de ce projet de valorisation des rejets miniers récents ou abandonnés, notre objectif principal est de préserver l'environnement et de réduire les dommages causés à l'écosystème par l'exploitation minière. Ainsi, voici quelques solutions envisageables pour

l'utilisation de ce béton dans l'industrie minière (Les suggestions mentionnées ne sont pas encore mises en œuvre, mais il est possible de les réaliser à condition que cette étude se poursuive avec succès. La réussite de la continuité de cette étude pourrait permettre la mise en place de ces suggestions) :

- Barrages de résidus : Le béton à base de rejets miniers peut être utilisé pour la construction de barrages de résidus, qui sont des structures conçues pour contenir les résidus solides et les eaux de drainage provenant des opérations minières. Ce type de béton doit présenter des caractéristiques de résistance et d'imperméabilité appropriées pour assurer l'intégrité du barrage.
- Diguees : Les digues sont utilisées pour le stockage des déchets miniers et pour la prévention des fuites et des déversements indésirables. Le béton à base de rejets miniers peut être utilisé dans la construction de digues, offrant ainsi une solution de valorisation des rejets et contribuant à la stabilité et à la durabilité de ces structures.
- Les terrils et les dépôts de résidus miniers sont des monticules de déchets issus de l'activité minière. Ils peuvent présenter des risques environnementaux, tels que l'érosion éolienne et hydrique, ainsi que la contamination des eaux souterraines. En utilisant le béton à base de rejets miniers, on peut stabiliser ces terrils en les recouvrant de couches de béton, réduisant ainsi les risques d'érosion et de contamination.
- Structures de soutènement : Dans les mines à ciel ouvert ou souterraines, le béton à base de rejets miniers peut être utilisé pour la construction de murs de soutènement ou de structures de confinement. Ces structures jouent un rôle essentiel dans la stabilité des excavations minières et peuvent être renforcées par l'utilisation de ce type de béton. Dans les mines souterraines, il est crucial de soutenir les parois des galeries pour assurer la stabilité et la sécurité des opérations minières. Le béton à base de rejets miniers peut être utilisé pour la construction de murs de soutènement le long des parois des galeries, offrant une solution durable et résistante. Les voûtes des galeries sont souvent exposées à des contraintes importantes en raison de la pression du sol et des activités minières. En utilisant le béton à base de rejets miniers, on peut renforcer les voûtes des galeries et améliorer leur résistance et leur durabilité. Les piliers de soutènement sont des éléments structurels importants pour maintenir la stabilité des galeries souterraines. En utilisant le béton à base de rejets miniers, on peut construire des piliers solides et résistants, contribuant ainsi à la sécurité et à la stabilité de la mine.
- Réhabilitation des sites miniers abandonnés : Les sites miniers abandonnés présentent souvent des problèmes de stabilité des sols, d'érosion et de contamination environnementale. Le béton à base de rejets miniers peut être utilisé pour stabiliser les pentes, reconstruire les structures dégradées et réduire l'érosion des sols. Il peut également aider à encapsuler les résidus miniers et à réduire la lixiviation des produits chimiques nocifs dans l'environnement. peut-être aussi utilisé pour la construction de structures de confinement. Ces structures sont conçues pour contenir les matériaux potentiellement polluants ou dangereux afin de minimiser les impacts environnementaux.
- Lors de la construction de nouvelles infrastructures minières, telles que les routes d'accès, les bâtiments et les plateformes de travail, le béton à base de rejets miniers peut être utilisé comme matériau de construction. Il offre une alternative durable et écologique aux matériaux traditionnels, en valorisant les rejets miniers et en réduisant l'empreinte environnementale de l'industrie minière.

En conclusion, notre projet de fin d'études a abouti à la réalisation d'un béton à base de rejets miniers, et les résultats obtenus sont satisfaisants. Nous avons déterminé le pourcentage optimal

de substitution partielle du sable pour chaque rejet (15% pour le R1 et 15% pour le R2). Les retombées économiques et écologiques de cette étude sont très positives.

En effet, dans l'industrie minière algérienne, la valorisation des rejets miniers est actuellement minimale. De nombreux sites accumulent des millions de tonnes de rejets, y compris d'anciennes mines fermées et ces rejets restent stockés sur place jusqu'à ce jour. La valorisation de ces rejets nous permet de réduire considérablement cette quantité non négligeable de déchets et de libérer les sites miniers suite à leur utilisation, ce qui permettrait de gagner de l'espace et de préserver l'environnement.

En plus des bénéfices environnementaux, cette valorisation présente également un intérêt économique important pour l'industrie minière dans son ensemble. En utilisant les rejets miniers dans la production de béton, nous réduisons la dépendance aux matériaux traditionnels, ce qui peut avoir un impact positif sur les coûts de production et la rentabilité de l'industrie minière.

En conclusion, notre projet offre une solution viable pour la valorisation des rejets miniers en Algérie, avec des avantages tant sur le plan environnemental qu'économique. Il est essentiel de continuer à promouvoir et à mettre en œuvre de telles initiatives afin de maximiser l'utilisation des ressources et de contribuer au développement durable de l'industrie minière et de notre environnement.

1 ANNEXE A

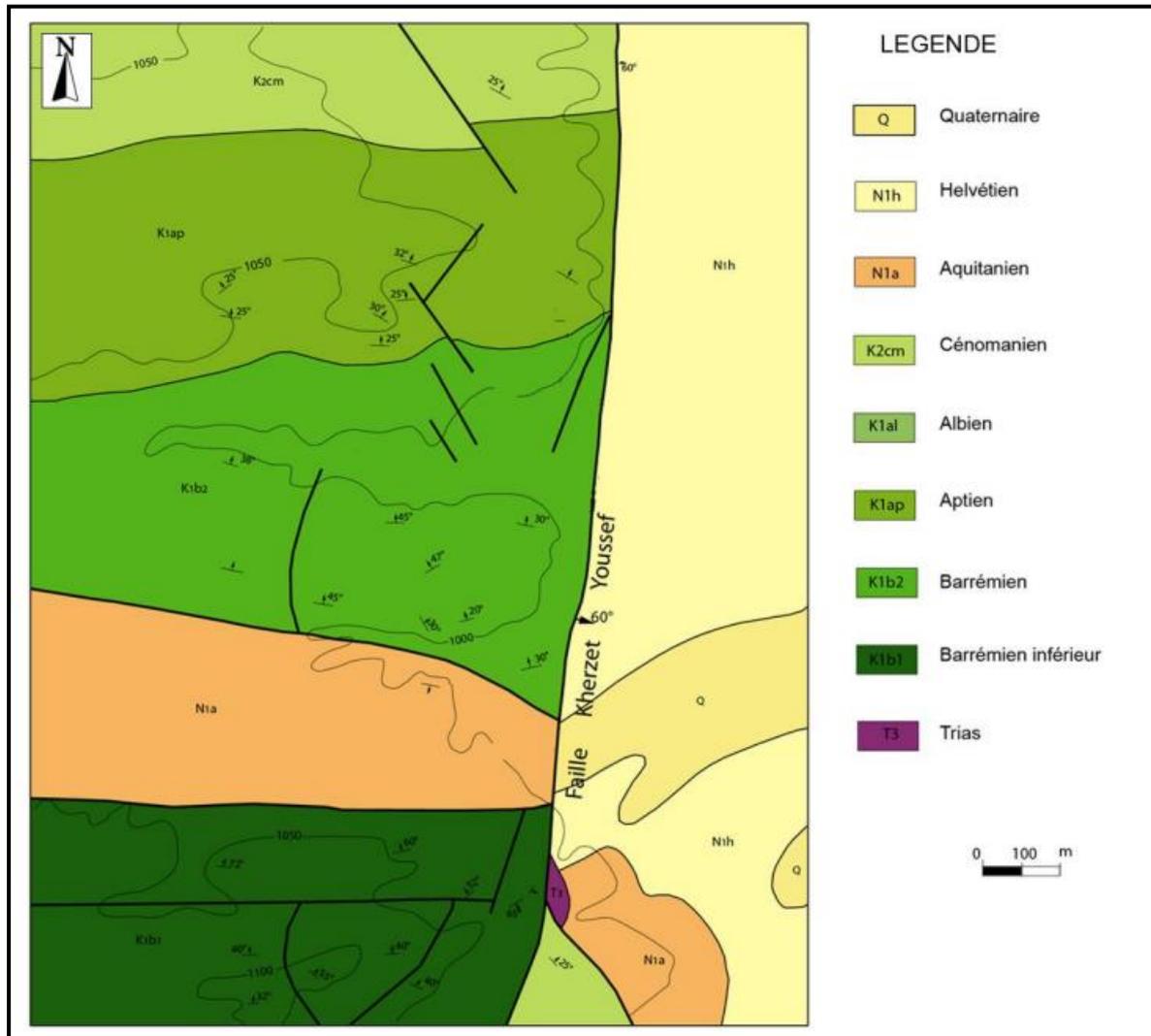


Figure 63 : Carte géologique schématique de la région de Kherzet Youcef montrant la faille de Kherzet Youcef (BOUSDIRA Dina, 2009)

## 2 ANNEXE B

Colonne stratigraphique (Stratigraphic column)		Description lithologique (Lithological description)
Miocène		Calcaires gréseux à pectens — Discordance —
Barrémien	Sup.	Grès à intercalations de dolomies gréseuses
	Inf.	Dolomies gréseuses Marnes Calcaires marneux Marnes et dolomies massives
Hauterivien	Sup.	Dolomies massives cavernieuses Grès à débris ligneux Dolomies massives minéralisées
	Inf.	Dolomies massives grises-sombres minéralisées
Valanginien		Grès et marnes argileuses

*Figure 64 : Colonne lithostratigraphique du gisement de Chaabet El Hamra (TOUBI ; MEZGHACHE, 2018)*

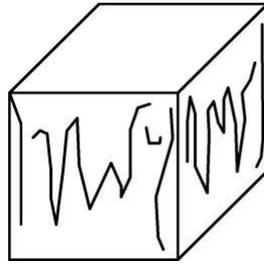
## 3 ANNEXE C

Lors des essais de résistance à la compression, on peut observer des ruptures qualifiées de correctes ou incorrectes en fonction de la conformité aux normes et aux critères d'acceptation. Voici les distinctions entre les ruptures correctes et incorrectes :

**Rupture correcte :** Une rupture correcte se produit lorsque l'éprouvette se rompt de manière prévisible et conforme aux critères établis par les normes et les spécifications applicables. Les caractéristiques d'une rupture correcte peuvent varier selon le matériau testé, mais elles incluent généralement :

- Une rupture franche avec une séparation nette des surfaces.
- Une charge appliquée de manière axiale.
- Une fissuration selon une orientation spécifique ou le long de plans de faiblesse naturels dans le matériau.
- Des caractéristiques de rupture cohérentes avec les propriétés du matériau.

Une rupture correcte est souhaitable car elle indique une performance conforme du matériau et permet une évaluation précise de sa résistance à la compression.



*Figure 65 : Rupture correcte*

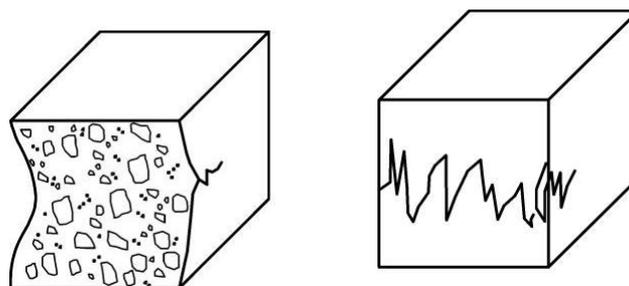


*Figure 66: exemple d'une rupture correcte pour l'éprouvette à base de rejet R1*

**Rupture incorrecte** : Une rupture incorrecte se produit lorsque l'éprouvette ne se conforme pas aux critères établis par les normes et les spécifications. Cela peut être dû à divers facteurs, tels que des défauts dans l'éprouvette, une distribution non homogène des contraintes ou des problèmes liés aux conditions d'essai. Les caractéristiques d'une rupture incorrecte peuvent inclure :

- Une rupture anormale, telle qu'une rupture en cône inversé, une rupture latérale ou une rupture en écaillage.
- Une distribution non uniforme des contraintes dans l'éprouvette.
- Des défauts internes dans le matériau qui influencent la rupture.
- Des conditions d'essai inappropriées ou non conformes aux normes.

Une rupture incorrecte peut fausser les résultats de l'essai et rendre difficile l'évaluation précise de la résistance à la compression du matériau.



*Figure 67: Rupture incorrecte*



*Figure 68 : exemple d'une rupture incorrecte pour l'éprouvette à base de rejet R3*

## *Références Bibliographiques*

- Abderaouf, ALILAT et Mohammed, MEDJAOURI. 2018.** *Caractérisation et étude géochimique des rejets provenant des sites.* 2018.
- Abderrahmane, HENNI. 1998.** *Minéralogie, géochimie du gisement pb-zn de kherzet youcef.* 1998.
- Adam, NEVILLE. 2000.** *Propreties of concrete, 5ème édition.* 2866p. ISBN 978-0-273-75580-7. 2000.
- Amira, MERCHICHI. 2013.** *ETUDE GEOCHIMIQUE ET TRAITEMENT DES REJETS DE LA DIGUE PROVENANT DE LA MINE DE KHERZET YOUSEF ET CHAABET EL HAMRA.* 2013.
- Ata, AKCIL et Soner, KOLDAS. 2006.** *Acid Mine Drainage (AMD) Causes, Treatment and Case Studies.* 2006.
- Aymen, AKACHE et Kaouther, BEDGHIOU. 2021.** *Valorisation et traitement de rejets miniers. Caractérisation et impacts environnementaux : Cas de la mine de Kherzet Youcef - Setif -.* 2021.
- Belkacem, TOUAHRI. 1991.** *Géochimie et métallogénie des minéralisations à plomb et zinc du.* 1991.
- Dina, BOUSDIRA. 2009.** *Etude des impacts des activités d'exploitation des mines polymétalliques (Pb-Zn) sur l'environnement de la région de Kherzet Youssef (Wilaya de Sétif)* . 2009.
- BOURBALA Brahim; MOUSSAOUI EL Abes.** *Essais de valorisation de la Barytine du Gisement de Bou-Caïd par Flottation.* 2013 : s.n., BOURBALA Brahim; MOUSSAOUI EL Abes.
- Islam, MEKDOUR. 2017.** *Valorisation des rejets de la mine de Boucaïd par flottation et un pré-traitement gravimétrique.* 2017.
- Islem, MOKRANE. 2021 .** *Etude géochimique et valorisation des rejets miniers préalablement désulfurés par un traitement physico-chimique et biologique : Cas des mines de Boucaïd et de Sidi Kamber.* 2021 .
- Lin, Da-Mao Xu & Chang-Lin Zhan & Hong-Xia Liu & Han-Zhi. 2019.** *A critical review on environmental implications, recycling strategies.* 2019.
- Lynda, ATTOUCHEIK. 2006.** *Etude géochimique des rejets du complexe minier de Kherzet youssef (setif) et son impact sur l'environnement.* 2006.
- Messaouda, BOULEKHIOU. 2015.** *Valorisation des tufs dans le béton.* 2015.
- Midou, OUCHENE. 2010.** *Contribution à l'étude gitologique et géostatistique de la minéralisation à Pb-Zn de la mine de Chabat-El-Hamra.* 2010.
- Monique, MELANSON. 2006.** *Analyse d'un système de traitement passif pour le site de la mine Eustis.* 2006.

**Moranville, REGOURD. 1982.** *Le béton hydraulique, chapter L'eau. Presse de l'ENPC, 59–68, 1982. 1982.*

**NETWORK, FIRST NATIONS ENVIRONMENTAL HEALTH INNOVATION. 2012.** ACID MINE DRAINAGE (AMD) Fact Sheet (FNEHIN, 2012). [En ligne] 2012. <http://focs.ca/wp-content/uploads/2012/07/Acid-Mine-Drainage-FNEHIN.pdf>.

**Rebecca, PELLETIER-ALLARD. 2014.** *Caractérisation et neutralisation du drainage minier acide par une dolomie à haute pureté.* 2014.

**walter, WILDI. 1981.** *La Chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie).* 1981.

**Yassine, TAHA. 2017.** *VALORISATION DES REJETS MINIERS DANS LA FABRICATION DE BRIQUES CUITES: ÉVALUATIONS TECHNIQUE ET ENVIRONNEMENTALE.* 2017.