



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ : GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT : GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : BENOUAR Badreddine & LAMERI Lahcen

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE: GENIE CIVIL

OPTION: STRUCTURE

Thème

**COMPORTEMENT FLEXIONNEL DES POUTRES EN BETON
ARME CONTENANT DES GRANULATS DE BETON
RECYCLE**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
KHENFER Med Mouldi	Professeur	Président
GOTTEICHA Messaouda	M.A.A	Examinatrice
BELLAKEHAL Haizia	M.C.A	Rapporteur
KROBBA Ben Harzallah	M.C.B	Co-rapporteur

Promotion : 2019 - 2020

قال عز وجل : { وَقَضَىٰ رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا إِيَّاهُ وَبِالْوَالِدَيْنِ إِحْسَانًا إِمَّا يَبُلُغَنَّ عِنْدَكَ الْكِبَرَ أَحَدُهُمَا أَوْ كِلَاهُمَا فَلَا تَقُلْ لَهُمَا أَفْ وَلَا تَنْهَهِمَا وَقُلْ لَهُمَا قَوْلًا كَرِيمًا * وَاخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا * رَبُّكُمْ أَعْلَمُ بِمَا فِي نُفُوسِكُمْ إِن تَكُونُوا صَالِحِينَ فَإِنَّهُ كَانَ لِلأَوَّابِينَ غَفُورًا }
صدق الله العظيم

الى نور العيون و رمش الجفون و السر المكنون و الحب المجنون في القلب المفتون و العقل الموزون
و الصدر الحنون , الى البلسم الشلفي و القلب الدافئ و الحنان الكافي, الى التي احاطتني بسياج
حبها الى ارووع ام في الوجود امي الحبيبة

الى صاحب السيرة العطرة و الفكر المستنير صاحب الوجه الطيب و الافعال الحسنة الى من وضعني
في طريق الحياة والدي العزيز رحمه الله

الى من ساندني في السراء والضراء من العائلة الكريمة اختي العزيزة سعيدة و مرية و و اخوتي عبد
الحق و اسامة و بهاء الدين, خالي عيسى و زوجته نعيمة و خالي احمد و زوجته خدوج و الي خالي عبد
القادر و زوجته نوية, والى وررود حديقتنا محمد, اية, فاطنة, سيرين, مريم و مؤمن, الى البرعمتين
الصغيرتين ياسمين و انفال

إهداء خالص الى اعمدة الاسرة و الى اهل الحكمة النصيحة الجد و الجدة حفصهم الله و اطال في اعمارهم
الى من قاسمني جهد البحث فكان نعم المعين و الشريك و كان سندا و دعما لي لعمرى مولاي لحسن

الى اصدقاء الدرب مصطفى, طاهر, محمد, مداني, نور الزمان , اسلام, عدنان, زكرياء, عيس
رقية, مليكة , رحاب

و الى كل من ساهم من قريب او من بعيد في انجاز هذا العمل المتواضع

بدر الدين بن النوار

وَقَضَى رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا إِيَّاهُ وَبِالْوَالِدَيْنِ إِحْسَانًا إِمَّا يَبُلُغَنَّ عِنْدَكَ الْكِبَرَ أَحَدُهُمَا أَوْ
كِلَاهُمَا فَلَا تَقُلْ لَهُمَا أَفٍّ وَلَا تَنْهَرْهُمَا وَقُلْ لَهُمَا قَوْلًا كَرِيمًا* وَاخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ
الدُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا* رَبُّكُمْ أَعْلَمُ بِمَا فِي
نُفُوسِكُمْ إِنْ تَكُونُوا صَالِحِينَ فَإِنَّهُ كَانَ لِلْأَوَّابِينَ غَفُورًا

وإن كنت سأحدث عن نعيم الحياة سأبدأ بأمي نور عينيا يا جنتي انتي, أمي
يا صاحبة القلب الكبير يا صاحبة الوجه النضير ياتاج الزمان يا صدر الحنان أنتي
الحبيبة الغالية وأنتي الأم المثالية وأنتي الأميرة لو كان للحب وساما فأنتي بالوسام
جديرة.

إلى صاحب السيرة العطرة و الفكر المستنير صاحب الوجه الطيب و الأفعال
الحسنة إلى من وضعني في طريق الحياة والدي العزيز رحمه الله

إلى من ساندني وكل عثرات في حياتي من عائلتي الكريمة إلى أختي الجليلة و
زوجها عمرو أخي بشير و عبد الجليل ونصر دين وسايح, إلى من كان لي صديقا
إبن أختي مداني و زهرتين صغيرتين أميرة وخديجة

وإهداء خاص إلى من كان سندي و أخي وذراعا لي في بحثنا هاذا بنوار بدر الدين

وإلى أصدقائي محمد بشير, الحسن والحسين, عبد القادر, نور الزمان. عدنان, إسلام
وإلى كل من ساندني

العمرى مولاي لحسن

Remerciement

Avant tout propos, nous rendons grâce à Dieu de nous avoir donné la force et compassion afin de finir ce travail malgré les difficultés et les circonstances.

C'est une occasion agréable d'exprimer quelques lignes de notre reconnaissance à ceux qui nous ont donné un soutien sans faille et un encouragement continu tout au long de nos années d'études et à travers le processus de recherche et de rédaction de cette thèse.

Ces remerciements sont destinés en premier lieu à l'encadreur *Dr. Bellakehal Hizia*. Nous tenons à exprimer nos sincères gratitude pour le soutien continu de nos études et recherches de master, pour sa patience, sa motivation et ses immenses connaissances. Ses conseils nous ont aidé durant le temps de recherche et d'écriture de ce mémoire, elle nous a guidé et encouragé de manière convaincante à être professionnel et à faire ce qu'il faut même lorsque la route est devenue difficile. Sans son aide persistante, l'objectif de ce projet n'aurait pas été atteint.

Nous tenons à remercier le Co encadreur *Dr. Ben Harzallah Krobba* il est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation des essais expérimentaux.

Nous remercions ensuite l'ensemble des membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir étudier notre travail : président *Professeur Khenfar Med Mouldi* pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de cette thèse et de présider ce jury, Examinatrice *Gotteicha Messaouda* pour avoir accepté d'examiner cette thèse.

Nos remerciements s'adressent également au *Professeur Mouattah Kaddour* pour nous avoir donné une meilleure visibilité sur l'utilisation du programme ANSYS, ce qui nous a facilité le processus de simulation.

Enfin, nous devons exprimer notre très profonde gratitude à tous ceux et celles qui nous ont aidé et encouragé de près ou de loin dans la réalisation de ce modeste travail, par leur patience, leurs compétences et leurs interventions adéquates aux plans technique, économique et moral.

Nous vous disons merci

عنوان المذكرة : سلوك الانحناء لروافد الخرسانة المسلحة المحتوية على ركام خرساني معاد تدويره

المؤطر: بلكمل حيزية

الإسم: - مولاي لحسن

اللقب: - العمري

- بدر الدين

- بن النوار

ملخص: يعد استنفاد الموارد الطبيعية تحديًا كبيرًا لإنتاج الخرسانة المستدامة. إن استبدال بعض الحصى بالحصى المعاد تدويره سيكون له تأثير اقتصادي وبيئي ملحوظ. يعتبر سلوك الخرسانة المسلحة المحتوية على ركام خرساني معاد تدويره (GBR)، مقارنةً بخرسانة الركام الطبيعي، هو موضوع تطورات مهم في الأدبيات. تم بالفعل إجراء العديد من الدراسات حول الخصائص الطازجة والمتصلبة لخرسانة GBR. ومع ذلك، لا تزال هناك حاجة للبحث في العناصر الهيكلية التي أجريت مع هذا النوع من الخرسانة. توجد دراسات قليلة حول سلوك الانحناء للحزم. يهدف هذا المشروع إلى دراسة سلوك إنحناء روافد ذات خرسانة مسلحة على أساس ركام الخرسانة المعاد تدويره باستخدام برنامج محاكاة ANSYS. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها عددًا ارتباطًا جيدًا بنتائج التجربة.

كلمات مفتاحية: الركام المعاد تدويره، الانحناء، خرسانة مسلحة، النمذجة، ANSYS

Memory title: Bending behaviour of reinforced concrete beams containing concrete aggregates.

**Name: Lamri
Benouar**

**First name: Moulay Lahcene,
Badreddine**

Directed by: Bellakehal Hizia

Abstract: The exhaustion of natural resources is a major challenge for the production of sustainable concrete. Replacing some of the gravel with recycled gravel will have a marked economic and environmental impact. The behavior of reinforced concrete containing recycled concrete aggregates (GBR), compared to that of natural aggregate concrete is the subject of important developments in the literature. Several studies have already been carried out on the fresh and hardened properties of GBR concretes. However, research on structural elements carried out with this type of concrete is still needed. Few studies exist on the bending behavior of beams. This project aims to study the bending behavior of reinforced concrete beams based on recycled concrete aggregates using a simulation with the ANSYS software. The results obtained numerically show a good correlation with the experimental results.

Key words: Recycled aggregates, Bending, Reinforced concrete, Modeling, ANSYS.

Titre du mémoire : Comportement flexionnel des poutres en béton armé contenant des granulats du béton recyclé.

**Nom : Lamri
Benouar**

**Prénom: Moulay Lahcene,
Badreddine**

Encadreur: Bellakehal Hizia

Résumé : L'épuisement des ressources naturelles constitue un défi majeur pour la production durable du béton. Le remplacement d'une partie des graviers par des graviers recyclés aura un impact économique et environnemental marqué. Le comportement de béton armé contenant des granulats de béton recyclé (GBR), comparé à celui de béton de granulats naturels fait l'objet de développements importants dans la littérature. Plusieurs études ont déjà été réalisées sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons de GBR. Cependant, les recherches sur les éléments de structure réalisées avec ce type de béton sont encore rares. Peu d'études existent sur le comportement flexionnel des poutres. Ce travail a pour objectif d'étudier le comportement flexionnel des poutres en béton armé à base des granulats de béton recyclés utilisant une simulation avec le logiciel ANSYS. Les résultats obtenus numériquement montrent une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux.

Mots clés : Granulats recyclés, Flexion, Béton armé, Modélisation, ANSYS.

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 01 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1 : La teneur des constituassions du béton en poids et en volume.....	2
Tableau I.2 : Différents types des bétons.....	2
Tableau I.3 : défèrent type de ciment.....	6
Tableau I.4 : Classification des ciments en fonction de leur résistance normale.....	8
Tableau I.5 : classification normalisée des granulats.....	11
Tableau I.6 : Classification des granulats suivent leur masse volumique.....	11
Tableau I.7 : Classification des déchets.....	22
Tableau I.8 : Principaux minéraux détectés par DRX, à l'exclusion du quartz et de la calcite (fortement présents).....	27
Tableau I.9 : Propriétés des GBR VS granulats naturel.....	32

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Tableau II.1 : Caractéristiques techniques du ciment utilisé.....	37
Tableau II.2 : Pourcentage des masses en fonction des diamètres provenant de 5 kg d'agrégats recyclés.....	39
Tableau II.3 : Masse volumique apparent des granulats utilisés.....	41
Tableau II.4 : Masses volumiques absolues des granulats utilisés.....	41
Tableau II.5 : Compacité et porosité des granulats.....	42
Tableau II.6 : Analyse granulométrique de gravier naturel 8/15.....	43
Tableau II.7 : Analyse granulométrique de gravier recyclé 8/15.....	43
Tableau II.8 : Analyse granulométrique de sable naturel.....	44
Tableau II.9 : Analyse granulométrique de sable recyclé.....	44
Tableau II.10 : Coefficients d'uniformité et de courbure des granulats.....	45
Tableau II.11 : Résultats de l'essai d'absorption d'eau.....	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.12 : Résultats de l'essai de l'équivalent de sable.....	48
Tableau II.13 : Classification des sables.....	49
Tableau II.14 : Résultats de l'essai Los Anglos.....	50
Tableau II.15 : Classification des granulats selon le coefficient Los Angles.....	51
Tableau II.16 : Récapitulatif des résultats de caractérisation physiques des matériaux de base.....	51
Tableau II.17 : Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max}	54
Tableau II.18 : Correction sur le dosage en eau (%).....	55
Tableau II.19 : Valeur de terme correcteur K en fonction du dosage en ciment.....	56
Tableau II.20 : Dosages des différents matériaux.....	58

CHAPITRE 03 : ETUDE ET ANALYSE DES RESULTAS NUMERIQUES

Tableau III.1 : Types de bétons	65
Tableau III.2 : Propriétés mécaniques des bétons (entre parenthèses ; écart type).....	66
Tableau III.3 : Propriétés des armatures (entre parenthèses ; écart type).....	67
Tableau III-4 : Flèches (phase finale de fissuration) pour une charge appliquée de 40 kN ...	69
Tableau III.5 : Les constants réels de l'approche de fissures discrets.....	70
Tableau III-6a : Propriété du béton.	71
Tableau III-6b : Propriété de l'acier.....	72
Tableau III-7 : Comparaison de la flèche_ Résultats numériques.	82
Tableau III-8 : Comparaison des résultats numérique, analytique et expérimental en termes de la flèche.....	82

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 01 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1 : Photo d'un laitier d'acier de haut fourneau.....	12
Figure I.2 : Photo du mâchefer.....	13
Figure I.3 : Photo de la cendre volante.....	14
Figure I.4 : Scories et site de stockage scories.....	14
Figure I.5 : sable de fonderies.....	15
Figure I.6 : boues rouges.....	15
Figure I.7 : Granulats de débris de béton.....	16
Figure I.8 : Granulats de débris de maçonneries.....	16
Figure I.9 : Granulats de débris de mixtes, proviennent de la rénovation et de la démolition des bâtiments.....	17
Figure I.10 : Industrie du béton.....	17
Figure I.11 : Ciment durci.....	18
Figure I.12 : Déchets de marbres et déchets de marbre broyés.....	18
Figure I.13 : Granulats de débris hydrocarbonés.....	19
Figure I.14 : Déchets plastiques.....	19
Figure I.15 : déchets de verres.....	20
Figure I.16 : déchets de pneus usagés.....	20
Figure I.17 : Cinétique d'absorption d'un gravillon de GBR 4/10.....	26
Figure I.18 : vues du chantier de Chaponost, premier chantier expérimental de RECYBETON.....	33
Figure I.19 : vues du chantier du contournement de Nîmes-Montpellier.....	33
Figure I.20 : vues du chantier de Mitry-Mory.....	33
Figure I.21 : vues du chantier de Villeneuve-la-Garenne.....	34
Figure I.22 : vues du chantier de Gennevilliers.....	34
Figure I.23 : sous-fondation de voirie en GBR.....	34
Figure I.24 : voile de béton à GBR.....	35
Figure I.25: valorisé les déchets de briques et de béton issus de la démolition partielle (déchets inertes du bâtiment) pour la fabrication de panneaux de façade rapportés sur la structure du bâtiment rénové.....	35

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Figure II.1 : Lavage et séchage des échantillons.	39
Figure II.2 : Essai de l'analyse granulométrique par tamisage.	43
Figure II.3 : Courbes granulométriques des granulats étudiés.	45
Figure II.4 : Essai d'absorption de deux types de sable.....	47
Figure II.5 : l'essai de l'équivalent de sable : a) sable naturel, b) sable recycler, c) dispositif de l'essai.	48
Figure II.6 : Essai Los Anglos.	50
Figure II.7 : dosage en ciment en termes de C/E et l'affaissement.	54
Figure II.8 : Courbes granulométriques des granulats étudiés.	57
Figure II-9 : Géométrie de la poutre	59
Figure II.10 : Diagrammes du moment fléchissant et l'effort tranchant.	59
Figure II.11 : Ferrailage des poutres.....	60

CHAPITRE 03 : ETUDE ET ANALYSE DES RESULTAS NUMERIQUES

Figure III.1 : Préférence de l'ANSYS APDL.....	63
Figure III.2a : Essai de flexion 4 points et plan de ferrailage	65
Figure III.2b : Essai de flexion 4 points et plan de ferrailage	66
Figure III.3 : Courbe Charge – flèche à mi-travée. – Poutre 0S0G.....	68
Figure III-4 : Courbe Charge – flèche à mi-travée. – Poutre 100S100G.....	69
Figure III.5 : Solid65 – Elément Solide 3D Du béton armé (ANSYS 14).....	70
Figure III.6 : LINK180 Elément linéaire 3D (ANSYS 14).....	70
Figure III-7 : Courbe contrainte – déformation Uniaxial de béton.....	73

LISTE DES FIGURES

Figure III-8 : Courbes Force – flèche _ Effet du coefficient β	75
Figure III-9: Géométrie des poutres dans ANSYS APDL	76
Figure III-10a : Maillage avec des lignes.....	77
Figure III-10b : Maillage avec Surfaces.....	77
Figure III-11 : Le Maillage sur la Poutre.....	78
Figure III-12 : Analyse Type « Statique »	79
Figure III-13 : Déformée de la poutre en béton ordinaire (0S0G).....	79
Figure III-14 : Courbes force – flèche _Poutre 0S0G.	80
Figure III-15 : Déformée de la poutre en béton des agrégats recyclé (100S100G).....	80
Figure III-16 : Courbes force – flèche _Poutre 0S0G.	81
Figure III-17 : Comparaison des courbes Force – Flèche des poutres _ Résultats numérique.....	82

SYMBOLES

BTP : Bâtiment et des Travaux Publics.

DIB : Déchets industriels banales

DID : Déchets industriels dangereux

DIS : Déchets industriels spéciaux

DAS : Déchets d'activité de soin

DASRI : Déchets d'activité de soin à risques infectieux

DAOM : Déchets d'activité de soins assimilables aux ordures ménagères

OM : Les ordures ménagères

PNAE-DD : le plan national d'action pour l'environnement et le développement durable

FEDEP : le Fonds National de l'Environnement et de dépollution

CNTPP : Le Centre National des Technologies de Production plus Propres

GBR : granulats de béton recyclé

DCD : déchets de construction et de démolition

PCD : pâte de ciment durci

GN : granulats naturels

MA : mortier adhérent

DRX : Diffraction des Rayons X

FX : fluorescence X

PAF : Perte au feu

NRMCA : National Ready sMixed Concrete Association

TABLE DES MATIERES

DEDICACES

REMERCIEMENT

RESUME

LISTE DES FIGURS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DE SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 01 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION :	1
2. GENERALITE SUR LES BETONS :	1
2.1 Différents types du béton :	2
2.2 Approche de formulation d'un béton :	3
2.3 Principaux avantages et inconvénients de béton :	4
3. LE CIMENT :	5
3.1 Définition :	5
3.2 Fabrication du ciment :	5
3.3 Types de ciment :	6
3.4 Classification des ciments :	7
3.4.1. Classification suivant la composition :	7
3.4.2. Classification suivant les résistances à la compression :	7
3.4.3. Classification suivant le type d'environnement :	8
4. LES GRANULATS :	9
4.1 Définition :	9
4.2 Classification des granulats :	10
4.2.1 Classification des granulats selon leur taille :	10
4.2.2 Classification des granulats selon leur masse volumique :	11
4.3 Types des granulats :	11
4.3.1 Les granulats naturels :	11

TABLE DES MATIERES

4.3.2	Les granulats artificiels :	11
4.3.3	Les granulats recyclés :	15
5.	GENERALITES SUR LES DECHETS :	20
5.1.	Définition des déchets :	20
5.2.	Classification des déchets :	21
5.3.	Principes et types de recyclage des déchets :	22
5.4.	Etapes du recyclage :	22
5.5.	Impact du recyclage sur l'environnement :	23
5.6.	Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil :	23
6.	ELABORATION DES GRANULATS DE BETON RECYCLE :	24
7.	PROPRIETES DES GRANULATS RECYCLES :	25
7.1.	Absorption d'eau des GBR :	25
7.2.	Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR :	26
7.3.	Contrôle de la teneur en GBR dans un mélange de sables naturels et recyclés :	27
8.	LE BETON A GRANULAT RECYCLE :	27
8.1.	Définition :	27
8.2.	Béton armé à granulat recyclés :	27
8.2.1.	Poteaux en béton armé à granulats recyclé :	27
8.2.2.	Poutre en béton armé à granulats recyclé :	28
8.3.	Propriétés de béton à granulats recyclés :	29
8.3.1.	A l'état frais :	29
8.3.2.	A l'état durci :	30
8.3.3.	A long terme (durabilité de béton) :	30
9.	VALORISATION DES GBR EN GENIE CIVIL :	31
9.1.	Exemples de réalisations :	32
9.2.	Utilisation des GBR en Algérie :	35
10.	CONCLUSION :	36

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

1. INTRODUCTION :	37
2. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISE :	37
2.1. Ciment :	37
2.2. Granulats :	38
2.2.1. Granulats naturels :	38
2.2.2. Granulats de béton recyclés :	38
2.3. Elaboration des granulats recyclés (gravier et sable) :	38
2.4. Eau de gâchage :	39
2.5. Aciers de ferrailage :	40
3. ESSAIS DE CARACTERISATION DES MATEREAUX :	40
3.1. Masses volumiques :	40
3.1.1. Masse volumique apparente : NF P18-555	40
3.1.2. Masse volumique absolue : FN P18-555	41
3.2. Compacité et porosité	42
3.3. Analyse granulométrique : NF P94-056	42
3.4. Coefficient d’Absorption d’eau des granulats : NF P18-555	46
3.5. Equivalent de sable : NF P18-597	47
3.6. Essai Los Angeles :NF P18-573	49
4. RECAPITULATION DES RESULTATS ET DISCUSSION :	51
5. FORMULATION DES BETONS :	52
5.1. Composition du béton :	53
6. CONFECTION DES POUTRES :	59
7. CONCLUSION :	60

TABLE DES MATIERES

CHAPITRE 03 : ETUDE ET ANALYSE DES RESULTAS NUMERIQUES

1. INTRODUCTION :	61
2. PRESENTATION DE LOGICIEL ANSYS :	61
2.1. Environnements logiciels :	61
2.2. Types d'analyses effectuées par ANSYS :	62
a) Pré-processor :	63
b) Solveur :	64
c) Post-processor :	64
3. Montage et résultats expérimentaux :	64
4. Description des poutres :	65
5. Résultats expérimentaux :	67
6. Modélisation numérique :	69
6.1 Types des éléments :	69
6.2. Modèles des matériaux :	71
6.3. Etapes de modélisation des poutres :	76
a) Maillage :	76
b) Conditions aux limites :	78
c) Execution et calcul par logiciel ANSYS :	78
7. Analyse des résultats numériques :	79
7.1 Poutre en Béton ordinaire :	79
7.2. Poutre en béton des agrégats recyclé :	80
8. Discussions et comparaison des résultats :	81
9. Conclusion :	83

CONCLUSION GENERALE

REFERNCE BIBLIOGRAPHIQUE

ANNEXE

INTRODUCTION GENERALE

Un mode de vie moderne, et parallèle aux progrès de la technologie, a conduit à une augmentation de la quantité et du type de déchets générés, entraînant une difficulté de l'élimination des déchets, dans une vision de développement durable. Vu les besoins croissants des ressources en matériaux et aux exigences liées aux conditions de préservation de l'environnement, des ressources naturelles et de l'énergie, il est nécessaire d'étudier toutes les opportunités de réutilisation et valorisation des déchets et sous-produits industriels, notamment dans le domaine de Génie Civil. Parmi ces déchets sont les déchets de démolition et construction des bâtiments.

Actuellement, la plupart des granulats utilisés sur le marché sont des granulats naturels issus de carrières ou de l'extraction des lits des fleuves ou des fonds marins. Ces produits offrent l'avantage d'une qualité relativement constante et d'un approvisionnement continu. Le granulat recyclé ne peut pas être considéré à ce jour comme un matériau de remplacement qui permettrait d'éviter l'exploitation des gisements naturels mais il peut ralentir ce processus [38].

En Algérie, suite des sinistres naturels comme les séismes et les crues, ou le vieillissement et la dégradation des bâtiments publics, des ponts et des installations industrielles, plusieurs ouvrages sont démolis. Une estimation en 2016 a été effectuée par le centre national d'étude et de recherche intégrée en bâtiment (CNERIB) sur les déchets inertes de quatre wilayas de la région de centre (Alger, Blida, Boumardas, Tipaza) il l'estime entre 300 milles à 500 milles t/ans dont 40% de béton jamais recycle.

Les granulats recyclés sont largement utilisés dans la construction des routes, mais leur utilisation dans les structures en béton armé est limitée en raison de nombreux obstacles. De nombreuses études ont été menées sur l'utilisation de granulats de béton recyclé pour produire du béton similaire au béton classique. Ces études ont démontré la durabilité de ces composés et l'importance de la qualité des granulats dans le comportement du béton surtout le comportement flexionnel. Ces études dépendent de la méthode de remplacement du volume et de la quantité de cet agrégat recyclés dans une matrice de béton.

Ce projet de Master a été proposé pour contribuer au développement de l'industrie du recyclage et à la valorisation des déchets de construction et de démolition en Algérie par leur incorporation

dans une matrice de béton. Le composite élaboré est un béton dans lequel les granulats naturels (sable et gravier) ont été substitué par des granulats recyclés avec des teneurs massiques de 0,30,50 et 100%. Cette étude comporte deux parties principales : une étude expérimentale et une étude numérique. L'étude expérimentale consiste, après avoir caractérisé tous les matériaux utilisés et évalué les propriétés physiques à l'état frais et à l'état durci du béton, à confectionner des poutres à échelle réduite en béton armé soumises à la flexion. Afin de comparer l'influence des granulats recyclés sur le comportement flexionnel de ces poutres par rapport à une poutre témoin.

L'étude numérique consiste à modéliser, à l'aide de logiciel d'éléments finis ANSYS, les poutres élaborées expérimentalement. Néanmoins, à cause de l'apparition de la pandémie Corona, nous n'avons pas pu confectionner les poutres. Donc nous avons utilisé les résultats expérimentaux d'un projet de recherche nommé RECYBETON [42], là où des poutres à échelle réelle en béton armé ont été examinées par l'essai de flexion à quatre points. Deux de ces poutres vont être modélisées par le logiciel ANSYS. Une comparaison entre les résultats numériques ainsi obtenus et les résultats expérimentaux sert à tirer des conclusions sur la possibilité de prédire des résultats théoriques des poutres en béton armé à base des agrégats recyclés soumises à la flexion.

Ce mémoire comporte, après une introduction générale, trois chapitres. Le premier chapitre concerne l'étude bibliographique. Dans ce chapitre on a présenté des définitions générales des différents constituants du béton, leurs classifications, leurs avantages et leurs inconvénients. Ainsi, qu'un bref état de l'art sur la valorisation et le recyclage du béton. Terminant par une comparaison entre les propriétés des granulats et béton recyclé avec celles de granulats et béton ordinaire. Le deuxième chapitre, est consacré à la caractérisation des matériaux de base intervenant dans ce travail. Puis la formulation du béton basée sur la méthode Breux-Gorisse. En fin, les étapes de confections des poutres en béton à base de granulats de béton recyclés.

Le dernier chapitre est destiné à l'étude numérique élaborée par le biais du logiciel ANSYS. Ce chapitre présente l'analyse des modèles numérique et expérimental, ainsi qu'une étude comparative entre les résultats obtenus de ces deux modèles. En fin, ce travail est clôturé par une conclusion générale. Il contient encore un annexe qui présente en détail les étapes de modélisation des poutres par le logiciel ANSYS qui nous espérons très utile aux futurs étudiants.

CHAPITRE I :

ETUDE

BIBLIOGRAPHIQUE

1. INTRODUCTION :

Chaque année les activités du Bâtiment et des Travaux Publics produisent plus de 100 millions de tonnes de matériaux de démolition et de déblais, qui dans le cas général sont des déchets inertes. Leur réutilisation dans un contexte d'économie de la ressource naturelle a vite été considérée comme une priorité pour les acteurs des Travaux Publics : Maîtres d'ouvrage, Maîtres d'œuvre, entreprises de BTP, carriers... [1]

L'utilisation d'agrégats recyclés a été explorée pour mener à un avenir durable car elle fournit une alternative au béton naturel traditionnel. Des études ont montré que pour que l'industrie de la construction soit durable, les granulats recyclés doivent être largement utilisés et même remplacer l'agrégat naturel. Cependant, la recherche sur les granulats recyclés a découvert les lacunes de ce matériau, les facteurs limitant à son utilisation en raison de sa faible résistance[2].

Plusieurs études de recherche tentent d'améliorer la qualité des agrégats recyclés soit en ajoutant des divers additifs ou en changeant ses méthodes de production.

Cependant, L'industrie est toujours en retard vis-à-vis l'utilisation d'agrégats recyclés dans les éléments structuraux. Par conséquent, les questions de recherche qui se pose jusqu'à maintenant sont :

- Quelles sont les différences entre les agrégats recyclés et les agrégats naturels ?
- Quelles sont les raisons qui ont conduit à l'utilisation du béton granulaire recyclé comme matériau de structure ?

2. GENERALITE SUR LES BETONS :

Le béton est un mélange hétérogène de matériaux de pierre et de sable appelés agrégats, en plus d'une liaison (ciment), d'eau et de certains vides. Le béton est apparu au début de la fabrication des raccords hydrauliques au milieu du XIXe siècle, à l'époque de la fabrication du ciment artificiel. Il s'agit d'un matériau de la construction utilisé dans la mise en œuvre de fondations et de structures des bâtiments, les murs de soutènement, les ponts et autres éléments de construction qui doivent acquérir une certaine résistance au moment spécifié du durcissement. Il est également caractérisé par la douceur de coulage et les économies de coût. Il nécessite des spécifications appropriées pour les matériaux qui le composent (Tableau I.1).

Tableau I.1 : La teneur des constituants du béton en poids et en volume. [3]

Constituants	Eau	Air	Ciment	Granulats
Volume (%)	14 – 22	1 – 6	7 – 14	60 – 78
Poids (%)	5 – 9	-	9 – 18	63 – 85

2.1 Différents types du béton :

Avec les nouveaux moyens technologiques, la famille des bétons est en constante évolution. Le béton est un matériau dont la composition peut évoluer. On peut adapter son dosage at ses constituants en fonction des performances recherchées. En répondant aux normes de sécurité et s'adaptant aux envies des hommes, le béton, sous ses différentes formes, répond à nos besoins. Il existe plusieurs types de béton, béton compacte au rouleau, béton à durcissement rapide, béton réfractaire, béton de poudre réactive, béton ordinaire, béton préfabriqué, béton de terre, béton bitumineux, béton arme, béton projeté ... etc. (Tableau I.2)

Tableau I.2 : Différents types des bétons.

Type de béton	Caractérisations	Application
Le béton léger [4]	• Une bonne qualité d'isolation thermique et phonique. • Une faible masse volumique. • Une forte maniabilité.	Hourdis, cloisons, réhabilitation de bâtiment anciens, remplissages
Le béton lourd [5]	• La masse volumique apparent est $>2600 \text{ kg/m}^3$. • Les résistances mécaniques plus élevées.	• Une barrière efficace contre les rayons X, les rayons Gamma. • Utilisé pour réaliser des contrepoids.
Le béton auto-plaçant [6]	Ajout d'adjuvants tels que des super-plastifiants et des agents de viscosité dans la composition. Béton très fluide se mettant en place sans avoir recours à un système de vibration.	Radier, fondations, sols industriels
Le béton fibré [7]	Ajout de fibres de nature, dimension et forme différentes. Réparties de manière homogène dans le mélange, ces fibres améliorent certaines caractéristiques du béton (résistance à la traction, tenue au feu).	Dalles, sols industriels, poutres, tuyaux
Les bétons hauts	Bétons aux résistances accrues, très peu poreux.	Ponts, centrales

performances [8]	Plus durables.	nucléaires, ouvrages de grande ampleur
Béton compacte au rouleau [9]	Ayant une apparence très sèche et raide et un affaissement nul, constitué d'une proportion importante de granulats avec une faible quantité de ciment d'où l'ajout des minéraux	Construction des barrages et dans la construction des routes et les zone de stockage.
Béton à durcissement rapide [10]	Le durcissement est accéléré, ou la mise en précontrainte le plus rapidement en préfabrication. Le durcissement rapide est obtenu soit par des adjuvants accélérateurs de durcissement, des ciments à durcissement rapide, la diminution du rapport E/C au bien par le traitement thermique.	Pour les petits ouvrages de réparation ou des éléments d'ouvrages demandant une remise en service rapide.
Béton ordinaire	Homogène composé exclusivement des constituants de base ciment, granulat, eau. Un rapport E/C qui varie en fonction de la plasticité ainsi que de la résistance désirée $20\text{MPa} \leq f_{c28} \leq 50\text{MPa}$.	Dalles, poteaux, poutre, voiles, fondations.
Les bétons décoratifs	Leur composition évolue en fonction des caractéristiques recherchées.	Murs, terrasses, dalles, routes, trottoirs

2.2. Approchedeformulation d'un béton :

La composition du béton a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, eau, sable et gravier ou pierres concassées) conduisant à des bétons dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera, après durcissement, les meilleures caractéristiques (bonne étanchéité, résistance mécanique élevée, faible retrait etc..) plusieurs méthodes de composition sont proposées par des spécialistes de renom. [11]

Quelle que soit la méthode utilisée, la composition du mélange calculée ne peut correspondre parfaitement au béton désiré, car il n'est pas possible d'appréhender avec précision la composition du béton, ceci peut être dû à la qualité des constituants qui influence sur la qualité du béton : forme, angularité, porosité, types de granulats, finesse de mouture et classe de résistance vraie du ciment ... etc.

La formulation d'un béton se résume alors en quatre étapes majeures :

- Détermination de la dimension maximale des granulats ;
- Détermination de la courbe granulométrique optimale des granulats ;

- Détermination du dosage en eau et air, fonction de l'objectif d'ouvrabilité ;
- Détermination du dosage optimales en fines, qui sera en fractionner en ciment et addition, en fonction des objectifs de résistances, et en respectant les prescriptions relatives à la durabilité.

Les différentes méthodes de composition des bétons :

- Méthodes de BOLOMY
- Méthodes d'ABRAMS
- Méthodes de FAURY
- Méthodes de VALETTE
- Méthodes de JOISELE
- Méthodes de DREUX GORISSE

2.3. Principaux avantages et inconvénients de béton :

Avantages du béton :

- Il est peu couteux, facile à fabriquer et nécessite peu d'entretien ;
- Il épouse toutes les formes qui lui sont données. Des modifications et adaptation du projet sur le chantier sont faciles à effectuer ;
- Il devient solide comme la pierre. Il résiste bien au feu et aux actions mécaniques usuelles ;
- Associé à des armatures en acier, il acquiert des propriétés nouvelles qui en font un matériau de construction aux possibilités immenses (béton armé, béton précontraint) ;
- Il convient aux constructions similaires. Les assemblages sont faciles à réaliser dans le cas du béton coulé sur place. Dans la plupart des cas, les dimensions des ouvrages et éléments d'ouvrage en béton sont suffisants pour ne pas poser de problème délicat de stabilité ;
- Les ressources nécessaires pour sa fabrication existent dans de nombreux pays en quantités presque illimitées ;
- Il exige peu d'énergie pour sa fabrication ; [12]

Inconvénients du béton :

Les principaux inconvénients du béton ont pu être éliminés grâce à son association à des armatures en acier ou à l'utilisation de la précontrainte. De toute façon, il reste les inconvénients suivants :

- Son poids propre élevé ;
- Sa faible isolation thermique ;
- Le cout élevé entraîné par la destruction du béton en cas de modification d'un ouvrage ; [13]

3. LE CIMENT :**3.1.Définition :**

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau, mélangé avec des granulats et gâché avec de l'eau de façon appropriée, doit être capable de produire un mortier ou un béton qui conserve son ouvrabilité pendant un temps suffisamment long et doit, après des périodes déterminées, atteindre des niveaux de résistance prescrits et aussi présenter une stabilité de volume à long terme.

3.2.Fabrication du ciment :

Le constituant principal des ciments est le clinker, qui est obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et d'argile, en proportion respective moyenne de 80 % à 20 %. Les différentes étapes de la fabrication suivre le processus suivant [14] :

- ❖ Extraction de matière première de la carrière ;
- ❖ Concassage primaire de la matière première ;
- ❖ Concassage secondaire de la matière première en taille plus petite ;
- ❖ Broyage de la matière concassée ;
- ❖ Dosage et homogénéisation de la farine crue (matière broyée) ;
- ❖ Phase de préchauffage de la farine crue (et pré calcination) à 850°C, puis la cuisson dans un four rotatif incliné à une température généralement de 1450°C. Le produit sortant du four s'appelle le clinker ;
- ❖ Broyage du mélange : clinker + gypse ($\approx 5\%$) + ajouts éventuels ;

- ❖ Le produit fini (ciment) est alors prêt pour être expédié en sacs, en vrac.

3.3.Types de ciment :

Selon les normes NF P15-301 et ENV 197-1, il y'a cinq types principaux de ciment (Tableau I.3) :

Tableau I.3 : défirent type de ciment.

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	Plus 5% de constituants secondaires. Les CEM I conviennent pour le béton armé ou le béton précontraint où une résistance élevée est recherchée.
CEM II /A CEM II /B	Ciment portland composé	80 à 94 % 65 à 79 %	Maximum 35 % d'autres constituants comme le laitier de haut-fourneau, « la fumée de silice » (limitée à 10 %), la pouzzolane naturelle, les cendres volantes, les calcaires, etc. Les ciments CEM II sont bien adaptés pour les travaux massifs.
CEM III/A CEM III/B CEM III/C	Ciment de haut fourneau	35 à 64 % 20 à 34 % 5 à 19 %	- CEM III/A et B contient entre 36 et 80% de laitier de haut-fourneau et 20 à 64% de clinker. - CEM III/C contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker.
CEM IV/A CEM IV/B	Ciment pouzzolanique	65 à 90 % 45 à 64 %	- 11 à 35 % d'autres constituants - 36 à 55 % d'autres constituants
CEM V/ A CEM V/ B	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 % 20 à 39 %	18 à 50 % de laitier de haut-fourneau et 18 à 50 % de cendres volantes siliceuse et/ou de pouzzolanes. Ces ciments sont bien adaptés aux travaux hydrauliques, souterrains, fondations et injections par exemple.

3.4.Classification des ciments :

La classification des ciments est faite de trois manières : soit d'après leur composition chimique, soit d'après leur classe de résistance, ou bien d'après le type d'environnement dans lequel ils sont utilisés.

3.4.1. Classification suivant la composition :

Selon la teneur des constituants autres que le gypse ajouté ou non au clinker, la norme Algérienne NA442 [12] donne la classification suivante :

1. CEM I Ciment Portland Artificiel (CPA) ;
2. CEM II Ciment Portland Composé (CPJ) ;
3. CEM III Ciment de Haut Fourneau (CHF) ;
4. CEM IV Ciment Pouzzolanique ;
5. CEM V Ciment aux Laitiers et aux Cendres.

Ces ciments diffèrent par le type d'ajout et sa teneur, incorporé dans le but de modifier certaines de leurs propriétés en raison des conditions d'environnement ou de performances mécaniques auquel ces ciments sont destinés. Les différents types d'ajouts normalisés sont : Laitier granulé de haut fourneau, Matériaux pouzzolaniques, Cendres volantes, Schiste calciné, Filler calcaire, et Fumée de silice.

3.4.2. Classification suivant les résistances à la compression :

La norme **NA442** [15] classe les ciments courant d'après leur résistance à la compression déterminée conformément à la norme **NA234** [16], mesurée à 28 jours, en six classes de résistance (Tableau I.4).

Tableau I.4 : Classification des ciments en fonction de leur résistance normale [17]

Classe de résistance	Résistance à la compression [N/mm ²]				Début de prise [min]	Stabilité volumique (dilatation) [mm]	Retrait à 28 jours (µm/m)
	Au jeune âge		Résistance courante à 28 jours				
	2 jours	7 jours	Mini	Maxi			
32.5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10	≤ 800
32.5 R	≥ 10,0	-	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75	≤ 10	≤ 1000
42.5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	≤ 10	≤ 1000
42.5 R	≥ 20,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60	≤ 10	≤ 1000
52.5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	≤ 10	-
52.5 R	≥ 30,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45	≤ 10	-

3.4.3. Classification suivant le type d'environnement:

Certains ciments ont des propriétés supplémentaires leur permettant de s'adapter à des environnements spéciaux, tels que :

Ciment PM : Résistant à l'eau de mer, c'est un ciment courant possédant des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (teneur limitée en aluminat tricalcique) qui lui donne une résistance accrue à l'agression des ions sulfate en présence d'ions chlorure, au cours de la prise et ultérieurement.

Ciment ES : Résistant aux eaux sulfatées est un ciment courant présentant des teneurs limitées en aluminat tricalcique (C3A) afin d'avoir une résistance accrue à l'agression des ions sulfate au cours de la prise et ultérieurement.

Ciments CP : Pour béton précontraint, on distingue deux types de ciments qui diffèrent par leur teneur en ions sulfure $2- SO_4$:

- Ciments de la classe CP2 contenant moins de 0,2% d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par pré-tension,
- Ciments de la classe CP1 contenant moins de 0,7% d'ions sulfure recommandé pour la précontrainte par post-tension. Il existe par ailleurs des ciments spéciaux répondant à des conditions spécifiques (durcissement très rapide, résistance aux fortes chaleurs ou aux agressions chimiques). C'est le cas du ciment alumineux fondu, très résistant aux milieux acides.

4. LES GRANULATS :

4.1.Définition:

Les granulats occupent une grande partie du volume du béton (60 à 75%) et sont la source de sa résistance mécanique. C'est un matériau inerte à température ambiante (sauf cas pathologiques, réaction alcali-granat). Les granulats utilisés doivent avoir une bonne résistance mécanique et leur courbe granulométrique doit être optimisée afin de remplir le plus possible de vides dans le béton. C'est la raison pour laquelle on utilise plusieurs classes granulaires dans un même béton qui sont les sables, les gravillons et les graviers. Les granulats sont généralement d'origine naturelle. Ils proviennent essentiellement de roches

sédimentaires siliceuses ou calcaires, de roches métamorphiques telles que les quartzites, ou de roches magmatiques telles que les basaltes, les granites ou les porphyres. Indépendamment de leur nature, les granulats peuvent être alluvionnaires (dits granulats roulés) ou de carrière (dits granulats concassés). L'origine des granulats peut être également artificielle (d'origine minérale, transformée, le schiste expansé ou les granulats de laitier) ou issue de recyclage (béton concassé...). Sont situés dans l'une des 6 familles suivantes [11] :

- Fillers ;
- Sablons ;
- Sables ;
- Graves ;
- Gravillons ;
- Ballast ;
- Enrochements.

Les granulats sont utilisés pour la réalisation d'ouvrages de Génie Civil, de travaux routiers et de bâtiments. Ils sont obtenus :

- a. En exploitant des gisements de sables et de graviers d'origine alluvionnaire, terrestre ou marine ;
- b. En concassant des roches massives ;
- c. Ou encore par recyclage de produits tels que les bétons de démolition ;

Leurs natures, leurs formes et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques intrinsèques spécifiques en termes de résistance mécanique et de tenue au gel, ainsi que des propriétés physico-chimiques et des propriétés chimiques.

Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains) déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

4.2. Classification des granulats[18] :

4.2.1 Classification des granulats selon leur taille :

La classe granulaire désigne un granulat selon son plus petit diamètre de grain représentatif et son plus grand diamètre de grain représentatif (Tableau I.5). Cela permet ainsi de différencier les granulats entre eux et de les classer. Cela indique aussi la plage des diamètres de grains couverte par un granulat. Elle est définie par le terme d/D avec :

d : dimension inférieure du granulat.

D : dimension supérieure du granulat.

Tableau I.5 : classification normalisée des granulats

Familles	Dimensions	Caractéristiques
Fillers	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85% de passant à 1.25mm et 70% de passant à 0.063mm
Sablons	0/D	$D \leq 1$ mm avec moins de 10% de passant à 0.063 mm
Sables	0/D	$0 \text{ mm} < D \leq 4 \text{ mm}$
Graves	0/D	$D < 6.3 \text{ mm}$
Gravillons	d/D	$d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 63 \text{ mm}$
Ballasts	d/D	$d \geq 31,5 \text{ mm}$ et $D = 50$ ou 63 mm

Il est possible de réaliser des mélanges de granulats pour obtenir des distributions granulaires adaptées à chaque utilisation.

4.2.2 Classification des granulats selon leur masse volumique :

Le classement des granulats en fonction de leur masse volumique est illustré dans le tableau suivant :

Tableau I.6 : Classification des granulats suivent leur masse volumique.

Classification	Masse volumique (t/m^3)
Granulat léger	< 2
Granulat courant	Entre 2 et 3
Granulat lourd	< 3

4.3.Types des granulats :

Les granulats utilisés pour le béton sont d'origine naturelle, artificielle ou recyclée :

- « Naturels », lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils subissent aucun traitement autre que mécanique (réduction de dimensions) ;
- « Artificiels », lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais ;
- « Recyclés », lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés [19].

4.3.1 Les granulats naturels :

Les granulats naturels, proviennent de deux sources : les carrières de roches massives et les gisements alluvionnaires. Géologiquement, les granulats naturels proviennent de trois natures de roches [20 - 23]:

- Éruptives : granites, basaltes porphyres,
- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites,
- Métamorphiques : gneiss, amphibolites,

4.3.2 Les granulats artificiels :

Dans cette catégorie se rangent des granulats provenant de la transformation thermique de roches, de minerais et de sous-produits industriels transformés. On cite ici [24 – 25]:

a) Laitier d'acier :

Le laitier de haut fourneau est un sous-produit de la transformation du minerai de fer en fonte brute. Le laitier est ensuite refroidi lentement à l'air libre et donne un matériau cristallin et compact connu sous le nom de « laitier refroidi à l'air » ou bien il est refroidi rapidement et traité au moyen de jets d'eau pour obtenir un matériau léger désigné sous le nom « laitier expansé ». Le laitier refroidi à l'air est approprié comme granulat pour le béton. La stabilité volumique, la résistance aux sulfates et la résistance à la corrosion par les solutions de chlorure font que le béton de laitier armé convient pour plusieurs applications.

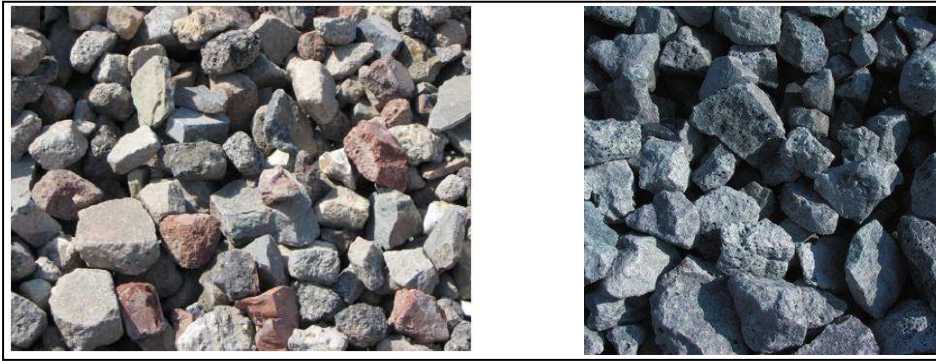


Figure I.1 :Photo d'un laitier d'acier de haut fourneau.

b) Sous-produits provenant des centrales thermiques :

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

Le mâchefer contient une proportion considérable de charbon non brûlé et d'autres impuretés. Il est utilisé principalement pour la fabrication de blocs de béton. Etant donné que le mâchefer contient des sulfates et des chlorures, il n'est pas recommandé pour le béton armé. Ce matériau risque de devenir de plus en plus rare à mesure que les centrales électriques anciennes passent à la combustion de charbon pulvérisé. A la sortie du four d'incinération les mâchefers sont généralement humides et contiennent des éléments grossiers (exemples : verre, ferrailles, gros imbrûlés).



Figure I.2 :Photo du mâchefer.

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



Figure I.3 :Photo de la cendre volante.

Les Scories se sont des résidus constituent environ 2,5% de la production totale de cendres. On prévoit que plus le charbon sera utilisé, plus on aura de cendres. La composition chimique des scories de combustion américaines est semblable à celle des cendres volantes, sauf que les scories ont une plus forte proportion d'alcalis et de sulfates. Les scories de charbon et le laitier de charbon peuvent être utilisés comme granulats légers.



Figure I.4 : Scories et site de stockage scories.

c) Granulats à hautes caractéristiques élaborés industriellement :

Il s'agit de granulats élaborés spécialement pour répondre à certains emplois, notamment granulats très durs pour renforcer la résistance à l'usure de dallages industriels (granulats ferreux, carborundum...) ou granulats réfractaires [24].

d) Sables de fonderies :

Les sables de fonderie sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie. Dans le procédé de moulage des pièces métalliques, les fonderies utilisent un sable fin siliceux associé à d'autres matériaux tels que l'argile ou des liants organiques (résines phénoliques). Quand le sable n'est plus réutilisable pour l'industrie de la fonderie, il est mis en décharge. Les sables de fonderie sont donc susceptibles de constituer une matière première d'un coût assez faible pour la fabrication des bétons hydrauliques. La réglementation française, en l'occurrence l'Arrêté Ministériel du 16 juillet 1991 relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse, précise les conditions de la réutilisation de ces sables : « les sables de fonderie peuvent être utilisés pour la fabrication de produits à base de liants hydrauliques si leur teneur en phénol est inférieure à 5mg/kg de sable rapporté à la matière sèche ».



Figure I.5 :sable de fonderies.

e) Boues rouges :

Les boues rouges sont des résidus industriels issus du processus d'extraction d'aluminium à partir de la bauxite. Elles sont stockées soit au fond des océans (Exemples : Allemagne et France), soit près des usines comme au Canada. Elles sont de consistance assez plastique pour être formées en boules, chauffées à des températures de 1260 à 1310°C, elles sont

transformées en granulats denses et résistants pouvant entrer dans la composition de bétons de résistances convenables.



Figure I.6 : Boues rouges.

4.3.3 Les granulats recyclés :

Le granulat recyclé est le granulat résultant de la transformation de matériaux inorganiques antérieurement utilisés en construction.

a) Les déchets de chantier :

Les déchets de chantiers sont composés essentiellement de déchets provenant des chantiers du bâtiment et des travaux publics et des activités industrielles consacrées à la fabrication de matériaux de construction. Ils sont définis comme étant des déchets inertes qui ne se décomposent pas, ne brûlent pas, ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. Les déchets admissibles sont : les bétons, les pierres, les tuiles, les céramiques, les briques, les carrelages ainsi que les enrobés bitumineux sans goudron (Figures I.7 – I.9). L'amiante est considérée comme déchets inertes mais son utilisation est interdite pour raison de santé [26-29].

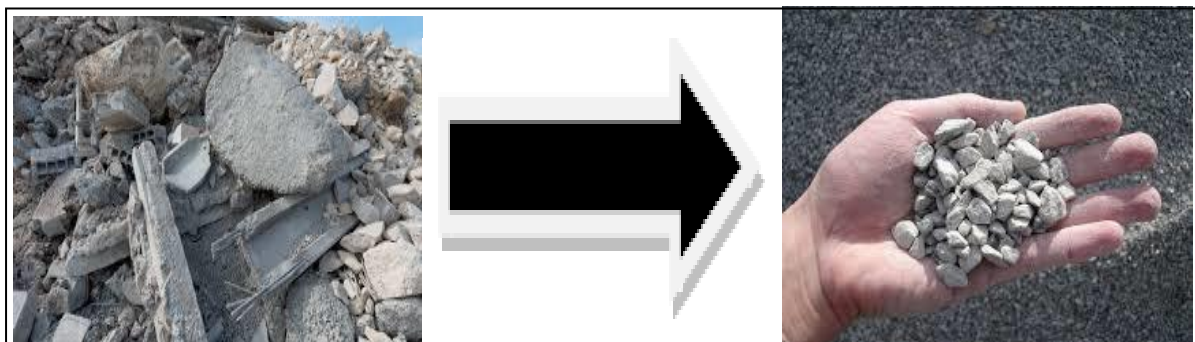


Figure I.7 : Granulats de débris de béton.

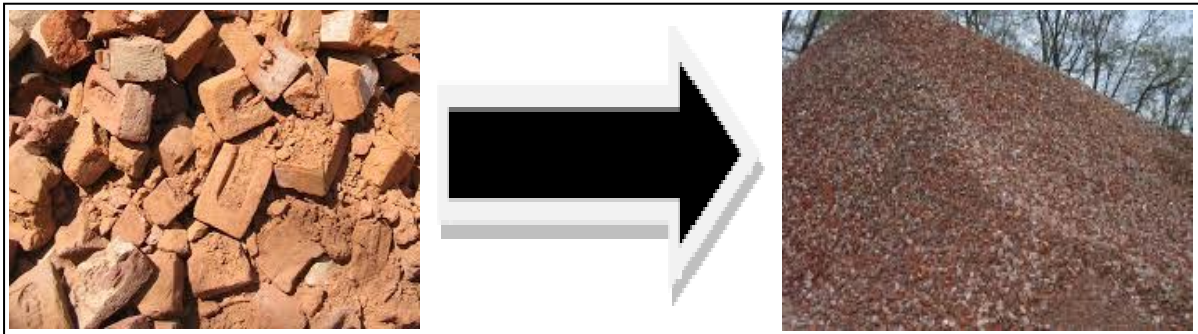


Figure I.8 : Granulats de débris de maçonneries.

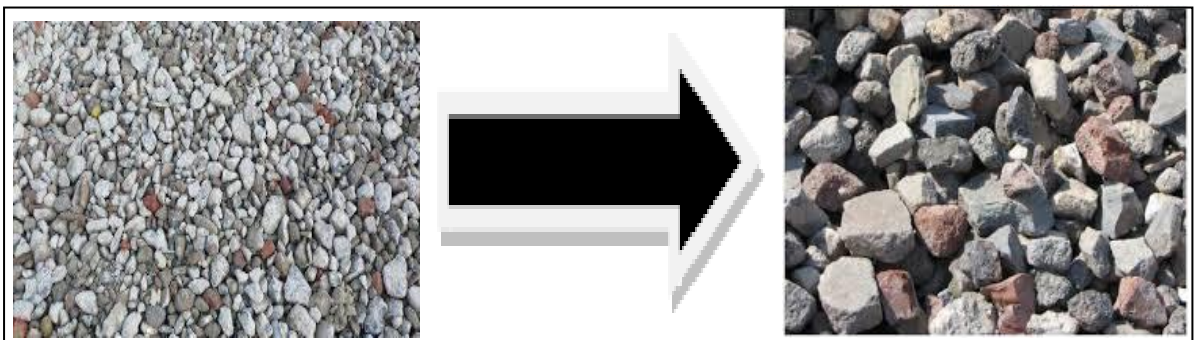


Figure I.9 : Granulats de débris de mixtes, proviennent de la rénovation et de la démolition des bâtiments.

b) Déchets de production de l'industrie du béton :

Les granulats de déchets de production ont deux origines :

- 1) Les débris de béton générés tout au long des étapes de la production ; ils résultent du nettoyage des installations de fabrication et du transport du béton frais (chutes de béton) ; il peut également s'agir de béton provenant de gâchées non utilisées ou non utilisables.
- 2) Les produits défectueux, mal formés, partiellement cassés ou d'aspect non conforme ; à ces produits défectueux s'ajoutent les produits ayant fait l'objet d'essais de résistance à la rupture.



Figure I.10 :Industrie du béton.

c) Ciment durci :

Dans le cas où un sac de ciment est en contact avec l'eau, la poudre se cristallise. Cette recristallisation du ciment est suivie d'une réaction d'hydrolyse. Ces deux réactions sont rapides et provoquent le durcissement du ciment. Il devient inutilisable comme liant sur le chantier. Le ciment ainsi durci devient automatiquement un déchet. Il peut être concassé et utilisé comme granulat de béton. Ce déchet est produit accidentellement ou par négligence, il est donc important d'éliminer le ciment durci et d'œuvrer pour empêcher sa production.



Figure I.11 :Ciment durci.

d) Déchets de marbre :

Le marbre est une roche métamorphique dérivée du calcaire, existant dans une grande diversité de coloris pouvant présenter des veines ou des fossiles. Certains types de marbre portent des noms particuliers, par exemple le cipolin ou la griotte. Le marbre désigne un carbonate de calcium à tissu compact ou cristallin qui se laisse rayer et réagit aux acides de plus ou moins siliceux ou argileux, il se présente en épaisseur homogène ou diversement

mélangé à d'autres matières, sa densité est élevée en moyenne de 2,27. La classification des marbres est fondée sur les teintes ou les dessins.



Figure I.12 : Déchets de marbres et déchets de marbre broyés.

e) Granulats de débris hydrocarbonés :

Proviennent de la démolition d'infrastructures et de la démolition des parkings.

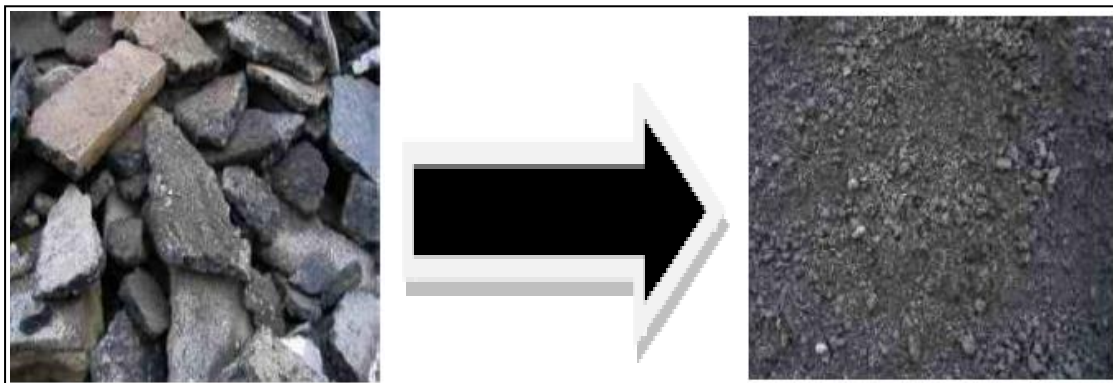


Figure I.13 : Granulats de débris hydrocarbonés.

f) Déchets plastiques :

On entend par déchet plastique, les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon. Les déchets plastiques peuvent incorporés dans des matrices cimentaires. En effet, des études antérieures ont montrées qu'il était possible d'utiliser les déchets plastiques dans les bétons comme liant pour la production d'un matériau composite à haute performance, ou ils sont ajoutés dans le béton sous forme de grains et fibres ondulées et rectilignes.



Figure I.14 :Déchets plastiques.

g) Déchets de verre :

Des millions de tonnes de verre sont récupérées chaque année et une voie de recyclage du verre consiste à l'utiliser dans les matériaux de construction. Il est utilisé sous deux formes principales : les granulats (taille $> 4\text{mm}$) et les poudres (taille $< 4\text{mm}$). Les granulats sont utilisés en remplacement des graves dans les bétons et lui procurent une résistance moindre. Les poudres sont utilisées dans les mortiers en remplacement du sable mais aussi dans l'industrie du ciment comme fines.



Figure I.15 :déchets de verres.

h) Pneus usagés :

Les matériaux cimentaires ont une capacité de déformation très limitée ainsi qu'une faible résistance à la traction, ce qui les rend sensibles à la fissuration, notamment la fissuration due au retrait. A titre d'exemple, les dallages, les chaussées et plus généralement les éléments mis en place en grande surface se fissurent sous l'effet du retrait. Ainsi, l'incorporation de granulats en caoutchouc issus du broyage de pneus usagés dans un mortier confère au composite obtenu une plus grande capacité de déformation avant localisation de la macro-

fissure. Il en résulte que le composite cimentaire incorporant des granulats en caoutchouc a une grande résistance à la fissuration dû au retrait.



Figure I.16 :déchets de pneus usagés.

5. GENERALITES SUR LES DECHETS :

5.1.Définition des déchets :

Un déchet est "tout résidu du processus de la production, de la transformation ou de l'utilisation, bondonné par le détenteur et qui, par sa nature, produit des effets nocif sur les écosystèmes naturels".

Du point de vue économique, un déchet est tout objet dont la valeur économique est nulle ou négative pour son détenteur. Pour s'en débarrasser, il paye un service ou s'en charge lui-même.

Du point de vue juridique, la définition du déchet permet de distinguer une conception subjective et une conception objective. Selon la conception subjective, une propriété devient un déchet lorsque le détenteur a la volonté de s'en débarrasser. Elle lui appartient aussi longtemps qu'elle demeure dans son espace privé. Cette propriété appartient à la municipalité lorsqu'elle est déposée sur la voie publique car, en effet, par cet acte, le détenteur manifeste clairement sa volonté de l'abandonner. Selon la conception objective, un déchet est tout objet dont la gestion doit être contrôlée au profit de la protection de la santé publique et de l'environnement, indépendamment de la volonté du propriétaire et de sa valeur économique. [30]

Voici la définition du déchet donnée par la loi française :

"Est un déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, tout substance, matériau, produit... que son détenteur destine à l'abandon.".[31]

5.2. Classification des déchets :

Tableau I.7 : Classification des déchets.

Types de déchets		Exemples
Déchets solides ménagers [32] [33]	La fraction biodégradable	Végétaux, déchets alimentaires, fruits, produits cellulose et les plastiques biodégradables.
	La fraction inerte	Verre, pierres, céramique, plastique non biodégradables, textiles synthétiques, caoutchouc.
	Les contaminants	Batteries, métaux non ferreux, solvants, peintures, huiles, encres.
Déchets industriels [35] [34]	Déchets industriels banals (DIB)	Cartons, verre, déchets de cuisine, emballages, déchets textiles.
	Déchets industriels dangereux (DID)	
	Déchets industriels spéciaux (DIS)	
Déchets hospitaliers [36]	Déchets d'activité de soin (DAS)	Déchets d'activité de soin à risques infectieux (DASRI)
		Déchets d'activité de soins assimilables aux ordures ménagères (DAOM)
		Les ordures ménagères (OM)
		Les recyclables (cartons notamment, papiers, plastiques ...etc.)
		Autres déchets industriels dangereux qui comprennent au moins une trentaine de filières.
		Déchets radioactifs.
Déchets de la construction	Déchets inertes	Béton, briques, tuiles et céramiques, mélange de béton brique tuiles et céramique, verre (partie vitrage uniquement), matériaux bitumineux sans goudron, terres et pierres (y compris déblais mais hors terre végétale)
	Déchets non dangereux non inertes	Métaux et leurs alliages, - Bois bruts ou faiblement adjuvantes, - Papiers, Cartons, - Plastiques, - Laines minérales, - Peintures, vernis, colles, mastics en phase aqueuse
	Déchets dangereux	Aérosols, - Accumulateurs et piles contenant des substances dangereuses, - Bois traité avec des substances dangereuses, - Boues de séparateur d'hydrocarbures, - Cartouches contenant des substances dangereuses

5.3. Principes et types de recyclage des déchets :

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents. Le recyclage a donc deux conséquences écologiques majeures :

- La réduction du volume de déchets, et donc la limitation de la pollution qu'ils causeraient (certains matériaux mettent des décennies, voir des siècles à se dégrader) ;
- La préservation des ressources naturelles, car la matière recyclée est utilisée à la place de celle qu'on aurait dû extraire.

Les trois grands principes du recyclage sont :

- a) **Réduire** : regroupe les actions au niveau de la production pour réduire les tonnages d'objets (par exemple les emballages) susceptibles de finir en déchet.
- b) **Réutiliser** : regroupe les actions permettant de réemployer un produit usagé pour lui donner une deuxième vie, pour un usage identique ou différent.
- c) **Recycler** : désigne l'ensemble des opérations de collecte et traitement des déchets permettant de réintroduire dans un cycle de fabrication les matériaux qui constituaient le déchet.

Les trois grandtypes de recyclage selon la technique utiliséesont [37] :

- Le recyclage dit (chimique) utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants ;
- Le recyclage dit (mécanique) est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour broyer ou pour séparer courants de Foucault ;
- Le recyclage dit (organique) consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais ou du carburant tel que le biogaz.

5.4.Etapes du recyclage :

➤ Etape 1 : Collecte de déchets :

Les opérations de recyclage des déchets commencent par la collecte des déchets. Les déchets collectés pour le recyclage ne sont pas destinés à l'enfouissement ni à l'incinération mais à la transformation. A la suite de la collecte, les déchets, triés ou non, sont envoyés dans un centre de tri où différentes opérations mécanisées permettent de les trier de manière à optimiser les opérations de transformation.

➤ Etape 2 : Transformation :

Une fois triés, les déchets sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique. Ils entrent dans la chaîne sous forme de déchets et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi.

➤ **Etape 3 : Commercialisation et conservation :**

Une fois transformées, les matières premières issues du recyclage sont utilisées pour la fabrication de produits neufs qui seront à leur tour proposés aux consommateurs.

5.5.Impact du recyclage sur l'environnement :

Les bénéfices économiques et environnementaux du recyclage sont considérables :

- Il permet de protéger les ressources, de réduire les déchets, de créer des emplois, de protéger la nature et d'économiser les matières premières ;
- L'acier recyclé permet d'économiser du minerai de fer ;
- Chaque tonne de plastique recyclé permet d'économiser 700 kg de pétrole brut ;
- Le recyclage de 1 kg d'aluminium peut économiser environ 8 kg de bauxite, 4kg de produits chimiques et 14 kWh d'électricité ;
- L'aluminium est recyclable à 100% ; 1 kg d'alu donne 1kg d'aluminium (après avoir été fondu) ;
- Chaque tonne de carton recyclé fait économiser 2,5 tonnes de bois ;
- Chaque feuille de papier recyclé fait économiser 1 L d'eau et 2,5 W d'électricité en plus de 15 g de bois [38] ;

5.6.Intérêt du recyclage dans le domaine du génie civil [39] :

Au niveau environnemental, le recyclage complet du béton contribue à minimiser l'impact CO₂ du fait que :

- ✓ Pour les grandes agglomérations, l'utilisation des granulats recyclés permettra de diminuer une partie du CO₂ attribuée au transport de granulats ;
- ✓ Le béton concassé est susceptible de piéger le CO₂ en se carbonatant [40] ;
- ✓ La récupération des fines potentiellement utilisables, après traitement, dans la production d'un nouveau ciment ou autre liant hydraulique, a un impact sur la réduction de la production de CO₂ des cimenteries.

Ainsi le recyclage des déchets comme granulats pour les routes ou la construction permet :

- ✓ Une économie de la ressource naturelle ;
- ✓ Une réduction du transport des matériaux, donc une réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre ;
- ✓ Une mise en œuvre rapide minimisant la gêne pour les habitants ;

- ✓ La réduction des quantités de matériaux mis en décharge ;
- ✓ Conserve l'espace d'enfouissement, par conséquent, réduit le besoin de nouvelle décharge et économise ainsi plus de coût.

De plus le recyclage est une activité économique à part entière. Elle est le moyen de création de richesses pour les entreprises de ce secteur. Par exemple, les 205 entreprises du recyclage en Ile-de- France rassemblent près de 5000 salariés en 2015. En Algérie, on estime que le recyclage créera plus de 30000 postes d'emplois directs. En théorie, presque tous les matériaux sont recyclables. En pratique, l'absence de filière rentable fait qu'ils ne sont pas tous recyclés.

6. ELABORATION DES GRANULATS DE BÉTON RECYCLÉ :

Pour favoriser le recyclage des déchets de construction et de démolition (DCD), les granulats de béton recyclé (GBR) doivent être de bonne qualité pour pouvoir être incorporés dans le béton. Il faut notamment qu'ils présentent une teneur élevée en béton et en matériaux rocheux, sans être trop contaminés par du plâtre, du bois, du plastique, etc. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de mettre en œuvre un procédé de démolition adéquat permettant de trier les différentes natures de matériaux rencontrés. Une déconstruction (démolition sélective) est alors toujours préférée à une démolition sans tri préalable.

Il existe plusieurs configurations de plateforme de recyclage des Déchets de Construction et de Démolition (DCD). Les procédés rencontrés actuellement comprennent généralement les opérations suivantes [41] :

- Extraction des éléments métalliques à l'aide de séparateurs magnétiques ;
- Élimination des éléments indésirables légers (plâtre, bois, plastique, etc.) par des systèmes de tri (séparateurs manuels, pneumatiques ou hydrauliques, etc.) ;
- Concassage/criblage, pour produire un matériau élaboré compatible avec l'utilisation finale recherchée ;
- Floculation des argiles, par des techniques de flottation par exemple ;

7. PROPRIETES DES GRANULATS RECYCLES :

Lorsque le béton démolé est écrasé, une certaine quantité de mortier et de pâte de ciment le béton d'origine reste attaché aux particules de pierre dans l'agrégat recyclé. Ce mortier attaché est la principale raison de la qualité inférieure des granulats recyclés par rapport à l'agrégat naturel.

7.1. Absorption d'eau des GBR [42] :

En règle générale, les GBR ont une **absorption d'eau supérieure** que celles des granulats naturels, en raison de la présence de la pâte de ciment durci (PCD) adhérente aux granulats.

Les protocoles utilisés pour les granulats naturels ne sont pas réellement adaptés pour les GBR. L'immersion des GBR peut entraîner un détachement partiel de la PCD. De même, le séchage à l'étuve à 105°C pour obtenir la masse sèche peut éliminer une partie de l'eau liée aux hydrates de la PCD.

Ils ont alors proposé une méthode spécifique pour les GBR, appelée Evaluation de l'Absorption d'Eau en Temps réel (EAET). Ici, la masse sèche est tout d'abord obtenue après 24 h à l'étuve à $75 \pm 5^\circ\text{C}$. Les granulats sont ensuite placés dans un pycnomètre entièrement rempli d'eau distillée et l'eau absorbée est enregistré à différent intervalles de temps. Cette méthode permet non seulement d'éviter les inconvénients mentionnés précédemment, mais elle donne aussi la cinétique d'absorption du GBR.

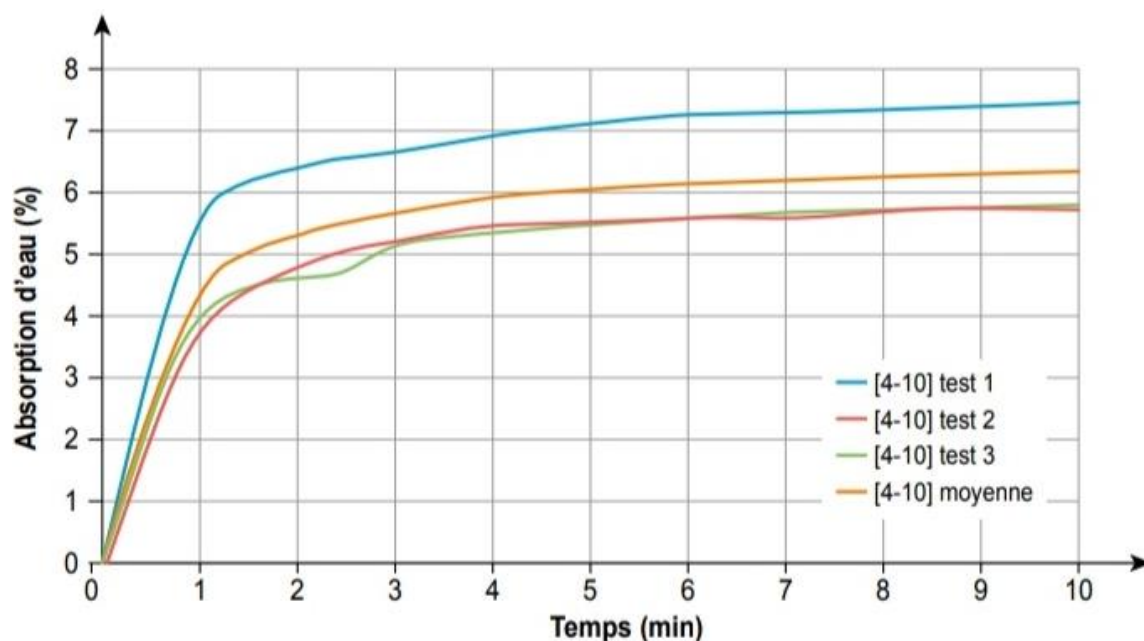


Figure I.17 : Cinétique d'absorption d'un gravillon de GBR 4/10 [42].

L'eau absorbée par les GBR après 24h d'immersion représente environ 92% de l'absorption finale, elle peut donc être considérée comme une bonne estimation d'absorption d'eau à long terme. Cependant, comme la quantité d'eau absorbée par les GBR entre 1h et 24h n'est plus très significatif, les auteurs recommandent d'utiliser alors la valeur d'absorption d'eau à 1h pour formuler les mélanges contenant des GBR, ou pour imbiber les GBR avant utilisation.

7.2.Caractéristiques minéralogiques et chimiques des GBR :

Par ailleurs, les différentes normes et directives concernant les exigences chimiques des GBR pour leur réutilisation dans le béton sont centrées sur des propriétés spécifiques, telle la teneur totale en chlorures et en sulfates solubles situé en mortier adhérent (MA) (dans l'eau ou dans l'acide), ou la présence de matières organiques, afin de prévenir certaines pathologies, comme la réaction alcali-silice et pour comprendre les mécanismes associés.

Des analyses DRX ont été effectuées sur des différents sables et gravillons de GBR, élaborées par un projet de recherche nommé RECYBETON effectué sur quatre plateformes de recyclage identifiées 1 à 4. Ces résultats montrent que le quartz et la calcite (i.e. calcaire) sont les deux minéraux systématiquement présents indépendamment du contexte géologique et géographique. Les différences sont relativement plus prononcées pour les sulfates et les alcalins. Ces derniers sont particulièrement concentrés dans les sables [42].

Les principaux minéraux identifiés (DRX) pour les différentes plateformes sont présentés Tableau 1.8. Les silicates sont représentés principalement par des feldspaths K-Na, des plagioclases et du mica blanc. De la dolomite apparaît parfois, en plus de la calcite. D'autres techniques ont été déployées pour révéler la présence de phases mineures comme les minéraux siliceux instables, ou certaines phases altérées produisant des éléments solubles, siliceux ou alcalins.

Tableau I.8: Principaux minéraux détectés par DRX, à l'exclusion du quartz et de la calcite (fortement présents)

Plateforme	Principaux minéraux identifiés par DRX à l'exclusion du quartz et de la calcite
1	Dolomite, Feldspaths K-Na (microcline/albite)
2	Micas (muscovite), Feldspaths K-Na (microcline/albite), chlorite
3	Dolomite et Feldspaths K, pics très faibles (microcline/albite)
4	Dolomite, Feldspaths K-Na

7.3. Contrôle de la teneur en GBR dans un mélange de sables naturels et recyclés :

La présence de 10% seulement de sable de GBR modifie sensiblement les caractéristiques du sable naturel, comme l'absorption d'eau, la présence d'impuretés et la teneur en sulfates solubles. Dans le mélange, le sable de GBR peut être détecté en mesurant ces différentes propriétés, mais sa quantification précise n'est pas réellement possible. Si le mélange contient une faible proportion de sable de GBR, seule la mesure des sulfates solubles dans les conditions de répétabilité permet de contrôler le dosage avec une erreur inférieure à 2%. La détermination précise de la proportion de GBR en condition de reproductibilité est compromise. Les contrôles de production ou d'utilisation, ou les agréments, seraient plus facilement validés si des propriétés cibles du mélange étaient plutôt fixées (teneur limite en sulfates solubles, par exemple) et non un pourcentage de GBR dans le mélange.

8. LEBETON A GRANULAT RECYCLE :**8.1. Définition :**

Le béton recyclé est un mélange de proportions variables d'agréats recyclés (béton, briques ...) en fonction de l'utilisation et des propriétés mécaniques recherchées en plus des granulats naturels, du ciment et de l'eau. Le béton composé de granulats recyclés varie en fonction de la différence de granulat recyclé (béton, maçonnerie, mixte...). Et selon la substitution par des granulats naturels.

8.2. Béton armé à granulat recyclés :

La possibilité de valorisation des granulats obtenus par concassage de béton pour la fabrication du béton a été l'objet de nombreuses recherches expérimentales. Ces recherches ont eu pour finalité que l'incorporation des GBR dans les bétons affecte leurs propriétés physico-mécaniques aussi bien à l'état frais et durci. Dans ce titre, nous mentionnerons quelques recherches effectuées sur le béton armé à granulats recyclés.

8.2.1. Poteaux en béton armé à granulats recyclé :

[Zhuang, 2007] a analysé l'influence de différents taux de GBR sur l'allure de la courbe contrainte-déformation (contrainte maximale, déformation au pic, module d'élasticité, résistance à la compression). Il a constaté que la courbe contrainte-déformation des bétons de GBR présente la même allure que celle du béton traditionnel. Néanmoins, malgré un rapport

entre résistance à la compression et pic de déformation plus importante, le module d'élasticité des bétons de GBR est plus faible [43].

Le comportement en compression de poteaux en béton armé utilisant des GBR de différentes qualités et à des taux différents a été étudié par [Choi et Yun, 2012]. Les auteurs concluent qu'en règle générale, le comportement axial des poteaux en béton de GBR est comparable à celui des poteaux en béton de granulats naturels [44].

[Liu et al., 2010] ont réalisé une étude sur le comportement et les performances mécaniques de poteaux très courts (élancement 4) en béton de GBR, ayant tous la même classe de résistance à la compression (45/50 MPa). Les essais ont été réalisés sur six bétons de GBR et de granulats naturels. Les résultats montrent là encore que le comportement et les mécanismes de rupture des poteaux en béton de GBR sont comparables à ceux des poteaux en béton de granulats naturels. La capacité portante des poteaux en béton de granulats naturels est cependant plus élevée que celle des poteaux de béton de GBR, en raison probablement d'une résistance effective plus élevée du béton de granulats naturels [45].

8.2.2. Poutre en béton armé à granulats recyclé :

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur les propriétés à l'état frais et durci des bétons de GBR [Xiao et al., 2006 ; Otsuki et al., 2003 ; Domingo-Cabo et al., 2009 ; Guerra et al., 2014 ; Wardeh et al., 2015 ...etc]. Montrent en général que la résistance ultime en flexion des poutres n'est pratiquement pas affectée par l'incorporation des GBR. Par ailleurs, les résultats expérimentaux présentés dans leurs travaux – pour différents taux de ferrailage – montrent que l'incorporation des GBR a bien un impact sur la déformation des poutres considérées. Cependant, les recherches sur les éléments de structure réalisés avec ce type de béton sont encore rares [42].

Des études réalisées sur l'impact de l'utilisation de bétons de GBR sur le comportement de poutres en flexion, principalement en relation avec la résistance au cisaillement du béton [Arezoumandi et al., 2014 ; Etxeberria et al., 2007 ; Fathifazl et al., 2011 ; Gonzalez-Fonteboa et al., 2007 ; Schubert et al., 2012 ; Yun et al., 2011]. Ces études admettent que la résistance au cisaillement (VRC) des bétons de GBR est généralement inférieure à celle des bétons de granulats naturels [42].

L'examen du comportement physico-mécanique a montré une diminution de la résistance du béton avec GBR fins et grossiers avec des pourcentages variables, par rapport au béton à granulats naturelles (GN). Ces diminutions étaient de 3% à 10%, 7% à 17% et 13% à 19% pour les remplacements de 25%, 50% et 100%, respectivement. Des essais à échelle réel sur des poutres en béton armé sous flexion ont montré que la déflexion à mi-travée est plus grande pour les poutres avec GBR. L'augmentation de la déflexion est d'environ 10% pour un taux de remplacement de 100%. Le module d'élasticité dépend de la résistance à la compression et est donc également affecté négativement par le niveau de substitution de GR. Le module d'élasticité diminue presque linéairement avec l'augmentation du remplacement. Les réductions signalées ont été environ 5% à 14%, 14% à 20% et 21% à 28% respectivement pour le béton avec 25%, 50% et 100% de remplacement. Le béton avec GBR présente un retrait au séchage plus élevé de 25% à 60% comparé à celui du béton avec GN. Alors que pour la substitution totale avec le GBR fin et le grossier, était comparable à un âge précoce. Mais des augmentations allant jusqu'à 40%, 70% et 85% ont été observées à des âges plus avancés pour des GBR grossiers seuls, fine seules, et à la fois grossière et fine, respectivement [42].

8.3. Propriétés de béton à granulats recyclés :

Les résultats des tests disponibles sur le béton de granulats recyclés varient dans de larges limites, sont parfois même opposés, mais des conclusions générales sur les propriétés du béton avec des granulats grossiers recyclés par rapport au béton avec granulats naturels peuvent être présentées.

8.3.1. A l'état frais :

Les aspects extérieurs du béton frais en GBR par rapport à celui en granulats naturelles (GN) sont similaires, Ils diffèrent par :

- La masse volumique du béton recyclé à l'état frais diminue, car le GR est moins dense que le granulat naturel, et le volume d'eau efficace finit par croître jusqu'à 50% pour des taux de substitution importants ;
- Le dosage en ciment reste tout d'abord constant (à faible taux de substitution) puis augmente sensiblement.
- L'utilisation de GBR réduit la maniabilité du béton ;

8.3.2. A l'état durci :

Le béton de GR diffère du béton traditionnel par un certain nombre d'aspects. Pour de faibles taux de recyclage (jusqu'à 10/15%), les effets de l'introduction de GR sur les autres propriétés des bétons sont mineurs. Avec l'augmentation graduelle du taux de substitution des gravillons, et en remplaçant partiellement ou totalement le sable, on note les tendances suivantes :

- Augmente la porosité jusqu'à deux fois supérieure à celle du béton avec GN et jusqu'à 50% de plus si seuls les GBR grossiers sont remplacés ;
- Augmente l'absorption d'eau de 1.5 à 3.5 fois selon le niveau de substitution de GN ;
- Augment l'absorption d'eau par capillaire de 40% à 50%, 59% à 72% et 134% à 153% pour les remplacements de 25%, 50% et 100% respectivement ;
- Diminution de la résistance à la compression jusqu'à 25% ;
- Diminution de la résistance à la rupture et à la flexion jusqu'à 10% ;
- Module d'élasticité diminué jusqu'à 45% ;
- Enfin, lorsqu'un béton architectonique est requis, l'aspect de surface du béton peut révéler sa composition interne.

8.3.3. A long terme (durabilité de béton) :

- Retrait au séchage augmenté jusqu'à 50% ;
- Fluage accru jusqu'à 50% ;
- Augmente la perméabilité à l'eau jusqu'à 2 à 3 fois pour 100% GBR,
- Augment la carbonatation de profondeur inférieures à 6 mm à 91 jours,
- Diminution la résistance à gel (perte de masse 37.9% pour le béton à GBR par rapport à 12.6% dans le béton à GN après 300 cycles de gel-dégel) ;
- La résistance à la fatigue en flexion est légèrement dégradée ;
- La conductivité thermique tend à se réduire, le comportement au feu ne diffère guère de celui des bétons classiques.

Le tableau suivant présente une comparaison des propriétés granulaires des GBR par rapport aux granulats naturelles selon quelques recherches.

Tableau I.9 : Propriétés des GBR VS granulats naturel.

Propriétés des granulats	GN	GBR
Texture et forme des granulats [46]	Bien arrondi, lisse (graviers) à anguleux, rugueux (pierre concassée)	Angulaire avec surface rugueuse
Densité (%)	3.87	4.67
Masse volumique réelle (kg/m³) [42]	-	2065-2327
Masse volumique apparente (kg/m³)	1420-1750	1200-1425
Masse volumique absolue (kg/m³) [48]	2790-2290	2640-2120
Absorption d'eau (%) [42]	0.2-6.3	0.4-15.8
Equivalent du sable	79.5	75
Porosité (%) [48]	0.64-2.82	8.1-14.9
Résistance à la fragmentation des gravillons (Los Anglos) (%) [46]	15-30	20-45
Chlorure (kg/m³) [46]	0-1.2	0.6-7.1
Sulfate (%) [46]	4-7	1-9

9. VALORISATION DES GBR EN GENIE CIVIL :

Actuellement les agrégats recyclés peuvent être appliqués aux secteurs suivants :

- Pour construction des gouttières, des trottoirs ...etc.
- De gros morceaux d'agrégats concassés peuvent être utilisés pour construire les revêtements qui à leur tour sont très utiles pour contrôler l'érosion des sols.
- Les gravettes de béton recyclé peuvent être utilisées comme agrégats grossiers dans le béton.
- La production du béton recyclé entraîne également la production de nombreux sous-produits ayant de nombreuses utilisations telles qu'un matériau d'amélioration du sol, un ajout de béton, un agent de remplissage d'asphalte...etc.

9.1.Exemples de réalisations :

- ✓ **Dallage de parking industriel 2100 m² : décembre 2013**



Coulage du béton recyclé

Vue générale du chantier

Zone 100S/100G

Figure I.18 : vues du chantier de Chaponost, premier chantier expérimental de RECYBETON.

- ✓ **Réalisation de la traverse supérieure et d'un mur en retour sur un pont cadre : 2014**

Gravillon Recyclé 6/20 type 1
CRB

Vue générale à 2 ans et demi

Mur et extension en béton
recyclé

Figure I.19 : vues du chantier du contournement de Nîmes-Montpellier.

- ✓ **Réalisation d'un bâtiment de stockage des archives administratives : 2015**



Coulage du béton recyclé

Vue générale intérieur

Vue générale extérieur

Figure I.20 : vues du chantier de Mitry-Mory.

✓ **Réalisation du plancher haut d'un bâtiment de bureaux : 2016**



Figure I.21 : vues du chantier de Villeneuve-la-garenne.

✓ **Fabrication du béton et coulage de murets et de trottoirs : 2015**



Figure I.22 : vues du chantier de Gennevilliers.

✓ **Application en sous-fondation de voirie :** utilisation de granulats recyclés (béton, mixtes, hydrocarbonés) pour la réalisation de chemins d'accès aux habitations, lotissement ...



Figure I.23 : sous-fondation de voirie en GBR [49].

✓ Voile de béton :



Figure I.24 : voile de béton à GBR [50].

✓ Utilisation détournée – éléments de parement :



Figure I.25: valorisé les déchets de briques et de béton issus de la démolition partielle (déchets inertes du bâtiment) pour la fabrication de panneaux de façade rapportés sur la structure du bâtiment rénové. [51].

9.2. Utilisation des GBR en Algérie :

L'Algérie fait face à deux défis majeurs ; un parc immobilier qui comporte des dizaines de milliers de logements vétustes, appelés à être démolis et un risque sismique très élevé. En 2003, suite au séisme qui a touché la wilaya de Boumerdes de nombreuses bâtisses ont été démolies et plus de 2,5 millions de tonnes de déchets inertes ont été enregistrées. À l'image des autres villes Algériennes, la wilaya de Constantine compte plus de 64,8t/an des déchets inertes [47]. La production Algérienne annuelle des déchets inertes issus essentiellement du domaine du Génie civil (Déchets de construction & démolition), est estimée à environ 11 millions de tonnes selon le rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie. Les quantités sont considérables et permettent de contribuer à réduire fortement à la production des granulats traditionnels [52].

Aujourd'hui en Algérie la réutilisation des déchets de démolition de chantiers du bâtiment pourrait s'avérer plus complexe, pour l'absence d'un service fiable de la collecte des déchets inertes et l'inexistence des décharges destinées à ce type de déchets ou des Centre d'enfouissement technique, le béton cohabite avec d'autres matériaux très divers (bois, plastiques, métaux, verre, brique...). Le recyclage du béton n'est alors possible qu'à la suite d'un tri des matériaux, on parle ici de « déconstruction ». Cette opération est onéreuse.

En Algérie, malgré les textes législatives décrétées (voir annexe), des questions liées aux normes restent toujours posées. C'est pourquoi Il faudra aussi envisager quelques évolutions ou aménagements normatifs et notamment la norme Algérienne sur les bétons et les ciments pour une optimisation de l'utilisation des granulats de béton recyclés.

D'autre part plusieurs axes de recherches restent encore à défricher. La variabilité des matériaux issus du gisement de bétons recyclés ne doit pas être négligée car le gisement n'étant pas naturel, la variabilité est plus importante, donc il faudra notamment s'assurer que le granulat ne souffre pas de pollution. Et il faut intégrer le fait que les granulats recyclés absorbent plus d'eau. Plus de recherches sur les questions liées à l'impact des mortiers accolés aux bétons issus de la déconstruction doivent être établies. L'idéal serait tests destinés à séparer la pâte de ciment du gravillon naturel.

10. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, il apparaît qu'il existe différents types de déchets, y compris ceux qui peuvent être utilisés dans le domaine du génie civil grâce à des processus de démolition et de tri qui améliorent la qualité des déchets et les rendent réutilisables comme agrégats.

L'idée de la valorisation des déchets de démolition du béton constitue actuellement une priorité très motivante sur le plan environnemental qu'économique. En effet les GBR est un déchet encombrant, mais qui peut devenir très utile. En conséquence, le Génie Civil offre de nombreuses possibilités d'utilisation des déchets de démolition du béton, en les valorisant en matériau de construction aux propriétés originales et très utiles.

Les principales propriétés chimiques, physiques et mécaniques des GBR ont une grande influence négative sur les propriétés du béton recyclé. Afin d'améliorer les propriétés du béton, il faut choisir un type d'agrégat de haute qualité et le mélanger en quantité significative dans le béton ou améliorer les propriétés de l'agrégat.

Pour ce qui concerne le béton frais, la demande en eau totale est accrue du fait de la présence du mortier dont l'absorption d'eau est importante. La rugosité de surface (du fait du broyage) des granulats recyclés contribue elle-même à la croissance de la demande en eau totale, par une demande spécifique en eau efficace (hors absorption des granulats). Cette maîtrise de la demande en eau est la clé de la maîtrise des importants phénomènes de retrait que présentent les bétons de granulats recyclés.

Enfin, la fraction mortier des granulats de béton recyclé peuvent contenir des espèces susceptibles de provoquer des gonflements, les sulfates notamment, liés aux déchets de plâtre qui peuvent être associés au béton de démolition.

CHAPITRE II :

MATERIAUX ET

METHODES

EXPERIMENTALES

INTRODUCTION :

Dans ce chapitre nous allons exposer tous les essais de caractérisation effectués pour l'identification des matériaux utilisés dans notre étude (ciment, sable alluvionnaire, sable recyclé, gravier naturel, gravier recyclé). Par la suite les différents essais expérimentaux. A l'état frais la caractérisation est effectuée par des essais d'affaissement cône d'Abrams, et à l'état durci des essais mécaniques à la compression et à la traction par flexion.

1. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISE :

Les matériaux de base intervenant dans cette étude sont le ciment, granulats naturels et recyclés, l'eau de gâchage et les aciers de ferrailage.

1.1. Ciment :

Le ciment utilisé est un ciment CEM II/ 42.5 provenant de la cimenterie de LAFARGE M'Sila (MATINE), ciment grise pour bétons de haute-performance destiné à la construction des ouvrages d'Art, infrastructure et superstructure pour bâtiments. Il est certifié, conforme à la norme Algérienne [NA442-2013]. Les caractéristiques techniques de ce ciment d'après la fiche technique du produit sont récapitulées dans le tableau suivant :



Tableau II.1 :Caractéristiques techniques du ciment utilisé.

Analyses chimiques	Valeur	Temps de prise à 20°	Valeur
Perte au feu (%)	8.0±2	Début de prise (min)	150±30
Teneur en sulfates (SO₃) (%)	2.5±0.5	Fin de prise (min)	230±50
Teneur en oxyde de magnésium (MgO) (%)	1.7±0.5		
Teneur en chlorures (%)	0.02-0.05		

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Composition minéralogique du clinker		Valeur	Résistance à la compression		Valeur
C3S (%)		60±3	2 jours (MPa)		≥ 10.0
C3A (%)		7.5±1	28 jours (MPa)		≥ 42.5

Propriétés physiques	Valeur
Consistance normale (%)	26.5±2.0
Finesse suivant la méthode de Blaine (cm²/g)	3700-5200
Retrait à 28 jours (µm/m)	< 1000
Expansion (mm)	≤ 3.0

1.2. Granulats :

Dans notre travail, deux types de granulats sont utilisés : granulats naturels et granulats de béton recyclés.

1.2.1. Granulats naturels :

Gravier concassé dénoté GN et sable alluvionnaire dénoté SN. Le gravier concassé est de granulométries 8/15 provenant de la station de concassage Ouazzane à Laghouat. Le sable alluvionnaire est un sable de granulométrie 0/5 provenant de la rivière d'Oued M'zi de Laghouat.

1.2.2. Granulats de béton recyclés :

Gravier de béton recyclés 8/15 dénoté GBR et sable de béton recyclé 0/5 dénoté SBR produit par le concassage (moyennant un concasseur à mâchoire). Le béton recyclé c'est des gravats issus des essais d'écrasement des éprouvettes cylindriques de dimensions (diamètre 16 et hauteur 32) de béton ordinaire, composé des différents types de gravier et de sable, confectionnées dans la période 3-27 novembre 2019 issus des laboratoires LTPS de Laghouat.

1.3. Elaboration des granulats recyclés (gravier et sable) :

La production de granulats recyclés destinés aux bétons reprend un ensemble de techniques conventionnelles utilisées pour la production de granulats naturels (concassage, criblage, lavage, ...). Les étapes d'élaboration granulats recyclés sont résumées comme suit :

- Fragmentation manuelle des éprouvettes en utilisant le marteau pour réduire la taille moyenne des gravats.
- Concassage mécanique moyennant un broyeur à mâchoire pour produire des granulats de différentes tailles (Figure II.1).
- Séparation des granulats recyclés par tamisage pour obtenir les trois classes granulaires 8/15, 5/8 et 0/5. Pour une quantité de 5Kg de béton, les proportions de différentes classes sont illustrées dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Pourcentage des masses en fonction des diamètres provenant de 5 kg d'agréats recyclés.

Les diamètres	16-8 mm	8-5 mm	5-0 mm
Quantité (g)	2869.7	770.8	1515.4
Pourcentage (%)	55	15	30

- **Lavage et séchage des échantillons :** Le processus de concassage laisse des résidus de poussière sur les surfaces des agrégats, donc il est nécessaire de le faire un lavage et un séchage à une température de $105^{\circ}\text{C} \pm 5$ avant de l'utiliser pour la confection du béton (Figure II.2).



Figure II.1 : Lavage et séchage des échantillons.

1.4. Eau de gâchage :

L'eau de gâchage utilisée c'est l'eau potable (eau de robinet) du réseau public de la ville de Laghouat.

1.5. Aciers de ferrailage :

Les armatures utilisées sont de deux types :

➤ Armatures de type 1 :

Des barres de haute adhérence de diamètre de 8 mm, nuance Fe E400. Destinées pour façonner les barres longitudinales de compression et de traction.

➤ Armatures de type 2 :

Des barres rondes lisses de diamètre de 6 mm, nuance Fe E235. Destinées pour façonner les cadres des armatures transversales.

2. ESSAIS DE CARACTERISATION DES MATERIAUX :

2.1. Masses volumiques :

2.1.1. Masse volumique apparente : NF P18-555

C'est la masse du matériau par unité de volume de celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides. Elle est exprimée en kg/m^3 , notée γ_{ap} et donnée par :

$$\gamma_{ap} = \frac{M}{V}$$

Avec : M : Masse du matériau (kg).

V : Volume totale de l'échantillon (m^3).

Il s'agit de remplir un volume de 1 dm^3 et on détermine la masse totale M_T , la masse de l'échantillon sera :

$$M = M_T - M_R$$

Où M_R est la masse du récipient (kg).

Le tableau suivant regroupe les résultats de cet essai pour les différents types de granulats :

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Tableau II.3 : Masse volumique apparent des granulatsutilisés.

Masse volumique apparente en Kg/m ³										
Méthode de récipient										
N° d'essai	M _R (Kg)	V(l)	SN		SBR		GN		GBR	
			M _T (kg)	γ _{ap}	M _T (kg)	γ _{ap}	M _T (kg)	γ _{ap}	M _T (kg)	γ _{ap}
1	2,4	1	3,963	1563	3,620	1220	3,665	1265	3,523	1123
2			3,960	1560	3,625	1225	3,653	1253	3,533	1133
3			3,956	1556	3,625	1225	3,667	1267	3,515	1115
moy			3,959	1559	3,623	1223	3,662	1261	3,520	1124

2.1.2. Masse volumique absolue : FN P18-555

C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. Elle est exprimée en kg/m³, notée γ_{ab} et donnée par :

$$\gamma_{ab} = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{V_2 - V_1}$$

Avec : M_s : Masse des grains solides (kg).

V_s : Volume des grains solides (m³).

V₁ : Volume de l'eau initial (m³).

V₂ : Volume total (eau + grains solides).(m³).

Le tableau suivant regroupe les résultats de la masse volumique absolue obtenus par méthode de l'éprouvette graduée.

Tableau II.4: Masses volumiques absolues des granulatsutilisés.

Masse volumique absolue en Kg/m ³										
Méthode de l'éprouvette graduée										
N° d'essai	M (kg)	V ₁ (l)	SN		SBR		GN		GBR	
			V ₂ (l)	γ _{ab}	V ₂ (l)	γ _{ab}	V ₂ (l)	γ _{ab}	V ₂ (l)	γ _{ab}
1	0.40	0.30	0,451	2649	0,461	2484	0,460	2500	0,464	2439
2			0,456	2564	0,459	2515	0,468	2380	0,468	2380
3			0,446	2740	0,463	2454	0,452	2631	0,472	2325
Moy			0,451	2651	0,461	2484	0,460	2503	0,468	2381

Les résultats regroupés dans le tableau II-4 montrent que la masse volumique des granulats de béton recyclé (GBR, SBR) est inférieure à celle des granulats naturels (GN ; SN). Cela peut être due à la porosité relativement élevée des granulats de béton recyclé.

2.2. Compacité et porosité

La compacité (C) est le rapport de la masse volumique apparente sur la masse volumique absolue. La porosité (P) c'est le complément de la partie dense qui définit le pourcentage de volume des vides par rapport le volume total :

$$C = \frac{\gamma_{ap}}{\gamma_{ab}} \cdot 100 \quad \text{et} \quad P = 100 - C(\%)$$

Tableau II.5: Compacité et porosité des granulats.

		Granulats			
Les caractéristiques	Symbole	SN	SBR	GN	GBR
Compacité	C(%)	59	49	50	47
Porosité	P(%)	41	51	50	53

Ces résultats montrent que les granulats recyclés sont plus poreux que les granulats naturels.

2.3. Analyse granulométrique : NF P94-056

L'analyse granulométrique est régie par les normes NF P94-056, L'analyse granulaire nous permet de classer les dimensions granulaires qui constituent un granulat et les proportions approximatives pour chaque espèce.

Il permet également de connaître certaines propriétés et leur adéquation dans divers projets :

Le coefficient d'uniformité (Cu) : $Cu = D_{60}/D_{10}$

Le coefficient de courbure (Cc) : $Cc = (D_{30})^2 / (D_{60} \times D_{10})$

Avec : D_{60} : Diamètre approprié pour le passant 60%.

D_{30} : Diamètre approprié pour le passant 30%.

D_{10} : Diamètre approprié pour le passant 10%.

Les tableaux II.6 à II.9 représentent les résultats de l'analyse granulométrique des différents granulats étudiés.



Figure II.2 : Essai de l'analyse granulométrique par tamisage.

Tableau II.6 : Analyse granulométrique de gravier naturel 8/15.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
16	00.00	00.00	00.00	100
12.5	404.25	404.25	8.085	91.91
10	1793.04	2197.29	43.946	56.05
8	1850.63	4047.92	80.958	19.04
6.3	728.85	4779.77	95.535	4.46
5	152.06	4928.83	98.577	1.42
Fond	67.00	4995.83	99.917	0.08

Tableau II.7 : Analyse granulométrique de gravier recyclé 8/15.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
16	00.00	00.00	00.00	100
12.5	1234	1234	24.68	75.32
10	1700.82	2934.82	58.69	41.31
8	1398.53	4333.35	86.667	13.33
6.3	481.50	4814.85	96.297	3.703
5	48.93	4863.78	97.276	2.724
Fond	126.92	4990.07	99.801	1.2

Tableau II.8 : Analyse granulométrique de sable naturel.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
5	00.00	00.00	00.00	100
4	2	2	0.4	99.6
2	15.5	17.5	3.5	96.5
1	25.5	43	8.6	91.4
0.5	106	149	29.8	70.2
0.250	293	442	88.4	11.6
0.125	52	494	98.9	1.1
0.08	3	497	99.4	0.6
Fond	2	499	99.8	0.2

Tableau II.9 : Analyse granulométrique de sable recyclé.

Tamis (mm)	Refus partiels (g)	Refus cumulés (g)	Refus (%)	Passant (%)
5	00.00	00.00	00.00	100
4	1417.92	1417.92	51.67	48.33
3.15	167.3	1585.22	57.77	42.23
2.5	243	1828.22	66.62	33.38
2	133.14	1961.36	71.47	28.53
1.6	114.5	2075.86	75.65	24.43
1.25	86.65	2162.51	78.81	21.19
1.0	74.77	2237.28	81.53	18.47
0.8	62.14	2299.42	83.79	16.21
0.63	68.43	2367.85	86.29	13.71
0.5	27.65	2395.5	87.30	12.7
0.4	42.95	2438.45	88.86	11.14
0.315	41.11	2479.56	90.36	9.64
0.250	47.5	2527.06	92.09	7.91
0.200	33.93	2560.9	93.33	6.67
Fond	149.00	2709.99	98.76	1.24

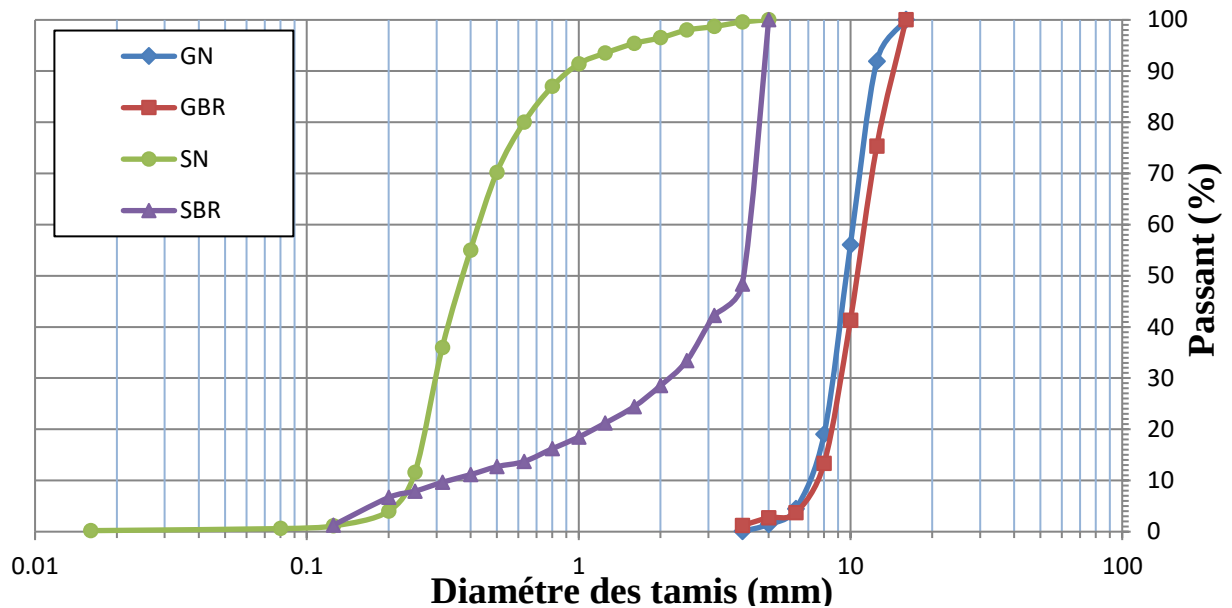


Figure II.3 : Courbes granulométriques des granulats étudiés.

Les courbes granulométriques des granulats naturels et recyclés sont représentées sur la figure II.4. On constate que la courbe granulométrique du gravier GBR est proche à celle de gravier naturel, et les deux types de granulats représentent une granulométrie uniforme et bien graduée (Tableau II.10). Le sable naturel représente aussi une granulométrie uniforme et bien graduée. Cependant, le sable SBR représente une granulométrie étalée. En effet, cet échantillon de sable est grossier et il n'est pas représentatif. Car pendant la phase de préparation on a pris cet échantillon de haut de sac contenant le sable recyclé, alors que les particules fines sont toutes cumulées en bas de sac. À cause de la pandémie de coronavirus on n'a pas pu refaire cet essai.

Tableau II.10 : Coefficients d'uniformité et de courbure des granulats.

Granulats	D ₁₀	D ₃₀	D ₆₀	Cu	Cc	Observation
SN	0.25	0.3	0.43	1.72	0.83	Granulométrie uniforme et bien graduée
SBR	0.34	2.1	4.3	12.64	3.01	Granulométrie étalée.
GN	7	8.5	10	1.43	1.03	Granulométrie uniforme et bien graduée
GBR	8	9.1	10.2	1.27	1.01	Granulométrie uniforme et bien graduée

➤ **Module de finesse (M_f) : NF P18-360**

Le module de finesse d'un sable est défini par centième de la somme des refus exprimés en pourcentages (%) sur les différents tamis suivants : (0.125 ; 0.250 ; 0.5 ; 1 ; 2 ; 4mm).

$$M_f = \frac{\sum \text{refus} (\%)}{100}$$

_ Pour le sable naturel :

$$M_f = \frac{(0.4+3.5+8.6+29.8+88.4+98.9)}{100} = 2.29$$

$1.5 \leq M_f \leq 3.5 \rightarrow$ La proportion d'éléments répartis régulièrement et son utilisation donne un mélange cohérent

_ Pour le sable recyclé :

$$M_f = \frac{(51.67+71.47+81.53+87.3+92.09+98.97)}{100} = 4.83$$

$M_f > 3.5 \rightarrow$ La majorité des éléments sont rugueux et leur utilisation provoque un déséquilibre dans la plasticité.

2.4. Coefficient d'Absorption d'eau des granulats: NF P18-555

La plupart des granulés contiennent de la poussière et des fissures qui recouvrent la surface extérieure, permettant une absorption d'eau allant de 0 à 30% du poids sec des granulés. La détermination du coefficient d'absorption d'eau (C_{Ab} %) permet d'évaluer la quantité d'eau retenue par la porosité des granulats afin d'en tenir compte pour le dosage en eau efficace lors de la formulation des bétons.

On détermine le coefficient d'absorption qui est le rapport de l'augmentation de masse de l'échantillon entraînée par imbibition partielle en eau à la masse de matériau sec. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 h à 25°C.

Le coefficient d'absorption d'eau (Ab) est défini par la relation :

$$C_{Ab} = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

Avec : M_s : Masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105°C.

M_a : Masse de l'échantillon Saturé.

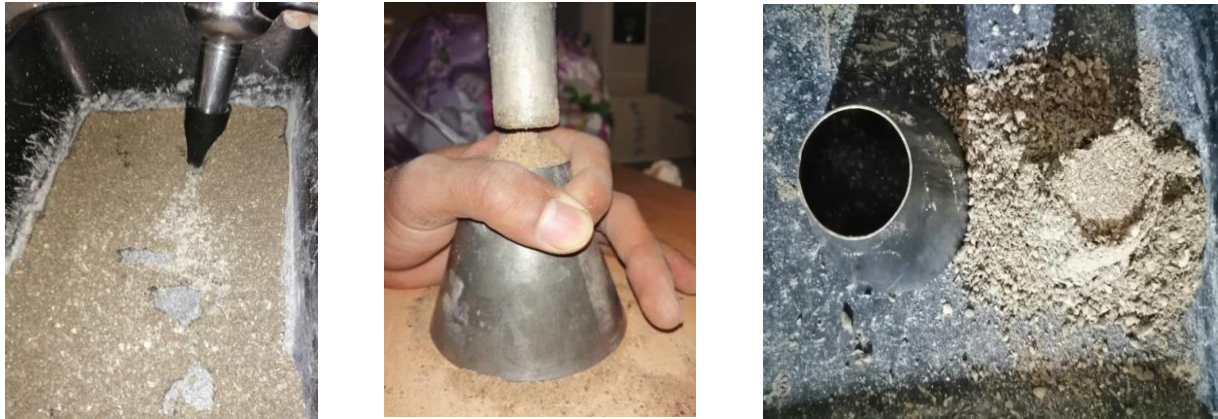


Figure II.4: Essai d'absorption de deux types de sable.

Tableau II.11: Résultats de l'essai d'absorption d'eau.

Absorption en %									
Méthode de l'essai d'absorption									
N° d'essai	M _a (g)	SN		SBR		GN		GBR	
		M _s (g)	C _{Ab}	M _s (g)	C _{Ab}	M _s (g)	C _{Ab}	M _s (g)	C _{Ab}
1	500	496,9	0,623	444,4	12,51	488,2	2,417	471,2	6,112
2		496,4	0,725	447,5	11,73	482,9	3,541	468,0	6,837
3		498,0	0,401	441,3	13,30	477,6	4,690	465,1	7,503
Moyen		497,1	0,58	444,4	12	482,9	4	468,0	7

D'après les résultats obtenus et indiqués au Tableau II.11, on remarque que le taux d'absorption d'eau des agrégats recyclés (GBR et SBR) est plus élevé à celui des agrégats naturels. Ce qui confirme les constatations citées dans l'étude bibliographique.

2.5. Equivalent de sable : NF P18-597

L'essai de l'équivalent de sable est nécessaire avant d'utiliser le sable. C'est un indice qui caractérise la propreté d'un sable. Il indique la teneur des éléments fins, qui représente les impuretés, dans l'échantillon.

L'équivalent sable est le pourcentage de hauteur du précipité par rapport à la hauteur totale du liquide lave-glace.

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

On distingue l'équivalent sable visuel (Esv) :

$$Esv = (h_2/h_1) \times 100$$

Et l'équivalent sable du piston (Esp) :

$$Esp = (h'_2/h_1) \times 100$$

Avec : h_2 : La hauteur de sable pur mesurée par une règle.

h'_2 : La hauteur de sable pur mesurée par un piston.

h_1 : La hauteur de l'impureté plus la hauteur de sable pur



(a)



(b)



(c)

Figure II.5 : l'essai de l'équivalent de sable : a) sable naturel, b) sable recycler, c) dispositif de l'essai.

Tableau II.12 : Résultats de l'essai de l'équivalent de sable.

N° d'essai	Equivalent de sable	SN	SBR
01	Esv(%)	95,6	84,61
	Esp (%)	87,9	75,89
02	Esv(%)	94.5	83.45
	Esp(%)	85.7	72.94
Moyen	Esv(%)	95.05	84.03
	Esp(%)	86.8	74.41

Tableau II.13: Classification des sables

Esv (%)	Esp (%)	Nature et qualité du sable
Esv<65	Esp<60	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
65≤Esv<75	60≤Esp<70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton
75≤Esv<85	70≤Esp<80	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
Esv≥85	Esp≥80	Sable très propre. L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

D'après les résultats présentés au tableau II.12 et la classification des sables présentée au tableau II.13, on peut conclure que le sable naturel utilisé est un sable très propre, cependant, le sable recyclé (SBR) est un sable propre à faible proportion de fines. Ces fines représentent les particules de ciment durci.

2.6. Essai Los Angeles :NF P18-573

Chaque composant du béton a un impact sur sa résistance en fonction de ses propriétés. Une des caractéristiques les plus importantes du gravier qui a un impact direct sur la résistance du béton est sa dureté, qui est quantifiée par l'essai Los Angeles. Les résultats de cet essai montrent une bonne relation avec l'érosion réelle du granulat lorsqu'il est utilisé dans le béton, en plus de cela, il montre une bonne relation avec la résistance à la compression et la résistance à la traction du béton qui en est fait.

Nous avons mené l'essai Los Angeles pour mesurer la différence entre la dureté ou de degré de résistance à la corrosion des agrégats naturels et les agrégats recyclés.

Le coefficient Los Angeles est calculé par la relation suivante :

$$C_{LA} = |(M_1 - M_2)/M_1| \times 100$$

Avec : M_1 : Poids primaire (avant de le placer dans une machine de LA).

M_2 : Poids refus sur tamis 1,6 mm (lavé et séché).



Figure II.6 : Essai Los Anglos.

On choisit le nombre des boules à partir du tableau suivant selon la classe granulaire de gravier. Pour notre cas la classe de gravier est 10-14 alors il faut utiliser 11 boulets.

Classes granulaires (mm)	Fractions	Nombre des boulets	Poids total de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4 – 6		7	3080±20	5000±2
6,3 – 10		9	3960±25	5000±2
10 – 14		11	4840±25	5000±2
10 – 25	10 – 16	11	4840±25	3000
	16 – 25	11	4840±25	2000
16 – 31,5	16 – 25	12	5280±25	2000
	25 – 31,5	12	5280±25	3000
25 – 50	25 – 40	12	5280±25	3000
	40 – 50	12	5280±25	2000

Tableau II.14 : Résultats de l'essai Los Anglos

	GN	GBR
Diamètre des granulats (mm)	8-16	8-16
Poids primaire M_1 (g)	5000	5000
Nombre de pellets	11	11
Poids refus M_2 (g)	3492	3013
Facteur de LA (%)	30	40

Tableau II.15 : Classification des granulats selon le coefficient Los Angeles.

C_{LA}	Observation
$C_{LA} \leq 15$	Les granulats sont très résistants
$15 < C_{LA} \leq 25$	Les granulats sont bons
$25 < C_{LA} \leq 40$	Matériau utilisable
$C_{LA} > 40$	Les granulats sont peu résistants au choc

D'après les tableaux II.14 et II.15 on observe que le coefficient Los Angeles (C_{LA}) de gravier GBR est plus élevé que celui de gravier naturel. Ceci est dû toujours à la pâte de ciment durci qui adhère à l'agrégat naturel. La pâte de ciment est moins solide que les granulats naturels en raison de sa haute porosité.

3. RECAPITULATION DES RESULTATS ET DISCUSSION :

Tableau II.16 : Récapitulatif des résultats de caractérisation physiques des matériaux de base.

Essais de caractérisations		SN	SBR	GN	GBR
Masse volumique NF P18-555	γ_{ap} (kg/m ³)	1560	1223	1261	1124
	γ_{ab} (kg/m ³)	2649	2484	2503	2381
Compacité	C (%)	59	49	50	47
Porosité	P(%)	41	51	50	53
Analyse granulométrique NF P94-056	D_{max} (mm)	5	5	16	16
	Cu	1.72	12.64	1.43	1.27
	Cc	0.83	3.01	1.03	1.01
Module de finesse (M_f) NF P18-360	M_f	2.29	4.83	-	-
Coefficient d'Absorption NF P18-555	C_{Ab} (%)	0.5	12	4	7
Equivalent de sable (E_s) NF P18-597	E_{sv} (%)	95	86	-	-
	E_{sp} (%)	87	74	-	-
Essai Los Angeles NF P18-573	C_{LS}	-	-	30	40

D'après le Tableau II.16, il est clair que les propriétés physiques des granulats recyclés diffèrent de celles des granulats naturels, où l'on peut remarquer que la masse volumique apparente de SBR est 20% inférieure que celle de SN, et celle de GBR est 10% inférieure que celle de GN. L'absorption d'eau des agrégats recyclés est nettement supérieure à celle des agrégats naturels. De même pour la résistance aux chocs qui a été fortement affecté. Le coefficient Los Angles a été augmenté par 33 % par rapport au gravier naturel. Ce changement des propriétés est causé par le volume des pores des granulats recyclés qui est sensiblement plus élevé que celui des granulats naturels. Ceci est dû à la nature poreuse du mortier résiduel provenant du vieux béton. La porosité plus importante du mortier le rend plus faible et moins dense qu'un granulat naturel.

4. FORMULATION DES BETONS :

De nombreuses méthodes sont proposées pour formuler un béton et qui sont la méthode de Bolomey, de Faury, de Vallette, de Dreux-Gorisse...etc. Dans notre étude, la méthode expérimentale choisie pour la formulation de béton est la méthode de Dreux-Gorisse.

Cette méthode a pour but de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié, mais seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

Les quatre critères de base de cette méthode sont :

- L'ouvrabilité ou la plasticité désirée est fixée par l'affaissement au cône d'Abrams. Elle dépend : de la nature de l'ouvrage, de la difficulté de bétonnage, des moyens de serrage, etc...
- La résistance souhaitée (rupture en compression à 28 jours) est prise égale pour la valeur moyenne visée à la résistance caractéristique demandée majorée de 15%.
 - La dimension maximale $D_{\max}$ des granulats doit être fixée en premier lieu.
 - La nature du ciment à utiliser doit tenir compte de l'agressivité du milieu ambiant.

4.1. Composition du béton :

a) Résistance désirée :

$\sigma'_{28} = \sigma' + 15\%$ Ceci en admettant un coefficient de variation de 15%

$\sigma' = 25$ MPa (valeur généralement utilisée dans les calculs par les bureaux d'études en Algérie).

$$\sigma'_{28} = 25 \times 1.15 = 28.75 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_{28} = 28.75 \text{ MPa}$$

b) Consistance désirée :

Bien que le but soit l'étude d'un béton ordinaire de structures de bâtiments, on a opté pour un béton plastique d'affaissement au cône d'Abrams de 6 cm. Vu la disponibilité des moyens de vibration (vibration courante).

c) Dimensions maximales des granulats :

D'après l'analyse granulométrique des différents matériaux utilisés : granulats naturel et granulats recyclé, la dimension maximale choisie pour les différents mélanges est :

$$D_{\max} = 16\text{mm}$$

d) Détermination du rapport C/E :

Le rapport C/E est calculé grâce à la formule de Bolomey :

$$\sigma'_{28} = G \times \sigma'_c \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Avec : σ'_{28} : résistance moyenne en compression désirée à 28 jour en MPa.

σ'_c : classe vraie du ciment à 28 jour en MPa.

E : dosage en eau en l/m^3 .

C : dosage en ciment en kg/m^3 .

G : coefficient granulaire.

$$\frac{C}{E} = \frac{\sigma'_{28}}{G \times \sigma'_c} + 0.5 \quad (I)$$

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

Tableau II.17 : Coefficient granulaire G en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats $D_{\max}$

Qualité des granulats	Dimension $D_{\max}$ des granulats		
	$D_{\max} < 20 \text{ mm}$	$20 < D_{\max} < 31.5$	$D_{\max} < 50 \text{ mm}$
Excellent	0.55	0.6	0.65
Bonne	0.45	0.5	0.55
Passable	0.35	0.4	0.45

Pour une qualité des granulats bonne et, un diamètre maximal inférieur à 20mm, le coefficient granulaire $G = 0.45$

La classe vraie de ciment $\sigma'_c = 42.5 \times 20\% = 51 \text{ MPa}$

Donc : Le rapport $\frac{C}{E} = 1.75$

e) Dosage en ciment (C) :

L'abaque de la figure suivante permet d'estimer la quantité de ciment nécessaire en fonction du rapport C/E estimé par la formule (I) et de l'ouvrabilité désirée.

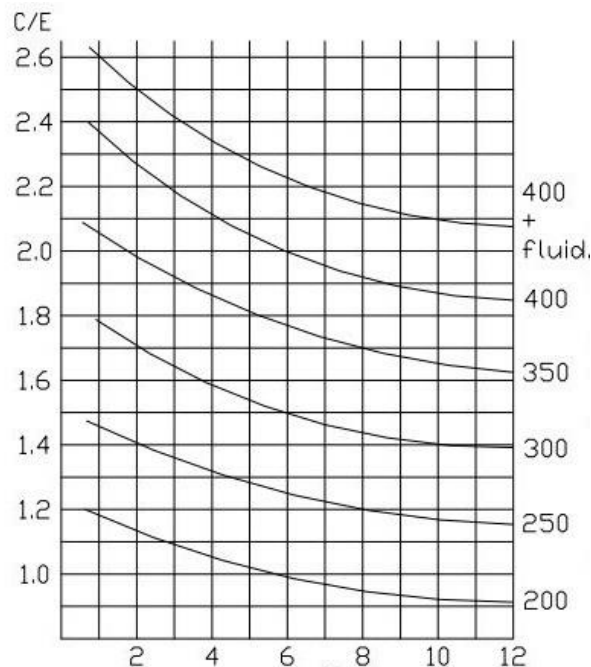


Figure II.7 : dosage en ciment en termes de C/E et l'affaissement.

La quantité de ciment optimale C est estimée à 355 kg/m^3 de béton.

f) Détermination de la quantité d'eau (E) :

Une première estimation de la quantité d'eau E est déduite du rapport C/E et de la quantité de ciment C. Cette quantité est ensuite corrigée en fonction de la taille des plus gros granulats $D_{\max}$ à l'aide du tableau II.18.

$$\frac{C}{E} = 1.75 \rightarrow E = \frac{C}{1.75} \rightarrow E = 203.1$$

Des corrections peuvent être apportées à la quantité d'eau E (Tableau II.18). La correction est à apporter au dosage d'eau si la dimension maximale des granulats est différente de 25 mm. Dans cette étude $D_{\max} = 16$ mm ; d'après le tableau suivant, la correction à apporter est de +4% sur le dosage en eau E soit $203.1 \times 1.04 = 211.21 \text{ l/m}^3$

Tableau II.18 : Correction sur le dosage en eau (%).

Dimension maximale des granulats D (mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le Dosage en eau (%)	15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Cette première partie de formulation d'un béton propose pour chacun des constituants les quantités et leur rapport : $C = 355 \text{ kg/m}^3$, $E = 211,21 \text{ L/m}^3$ et $C/E = 1,75$. Cependant le béton est constitué de sable et gravier dont il faut encore déterminer les proportions.

g) Courbe granulaire de référence :

Sur le graphique d'analyse granulométrique, on trace une composition granulaire de référence OAB. Le point O est placé à l'origine du graphique. Le point B correspond à la dimension $D_{\max}$ des plus gros granulats à l'ordonnée 100%. Le point de brisure A à des ordonnées ainsi définies

En abscisse (à partir de la dimension D tamis).

Si $D_{\max} \leq 20$ mm : l'abscisse est $x = D_{\max}/2$

On a : $D_{\max} = 16 \text{ mm} < 20 \text{ mm} \rightarrow X = 8 \text{ mm}$

En ordonnée :

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

Tableau II.19 : Valeur de terme correcteur K en fonction du dosage en ciment

Vibration		Faible		Normal		Puissant	
Forme des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400+fluid ^t	-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

Dans cette étude, les granulats sont roulé , la puissance de la vibration est normale et le dosage en ciment C de 355, on aura donc $K = 0$

$K_s = (6 M_f - 15)$ avec M_f le module de finesse du sable : $M_f = 2.29$

$K_p = 0$ si béton non pompable

Donc : $Y = 50 - \sqrt{16} + 0 - 1.26 + 0$

$$Y = 44.74$$

h) Coefficient de compacité :

C'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre (tableau des valeurs du coefficient de compacité γ)

Pour une consistance plastique et vibration normale on aura par interpolation :

$$\gamma = 0.820$$

Cette valeur est convenable pour des granulats roulés. D'où il faut apporter une correction de l'ordre de -0.01 à la compacité car notre sable est roulé et le gravier concassé.

Donc : $\gamma = 0.819$

i) Dosage des granulats :

On trace les lignes de partage entre chacun des granulats en joignant le point à 95% de la courbe granulaire de premier, au point de 5% de la courbe du granulat suivant, d'ordonnée sont la figure suivante :

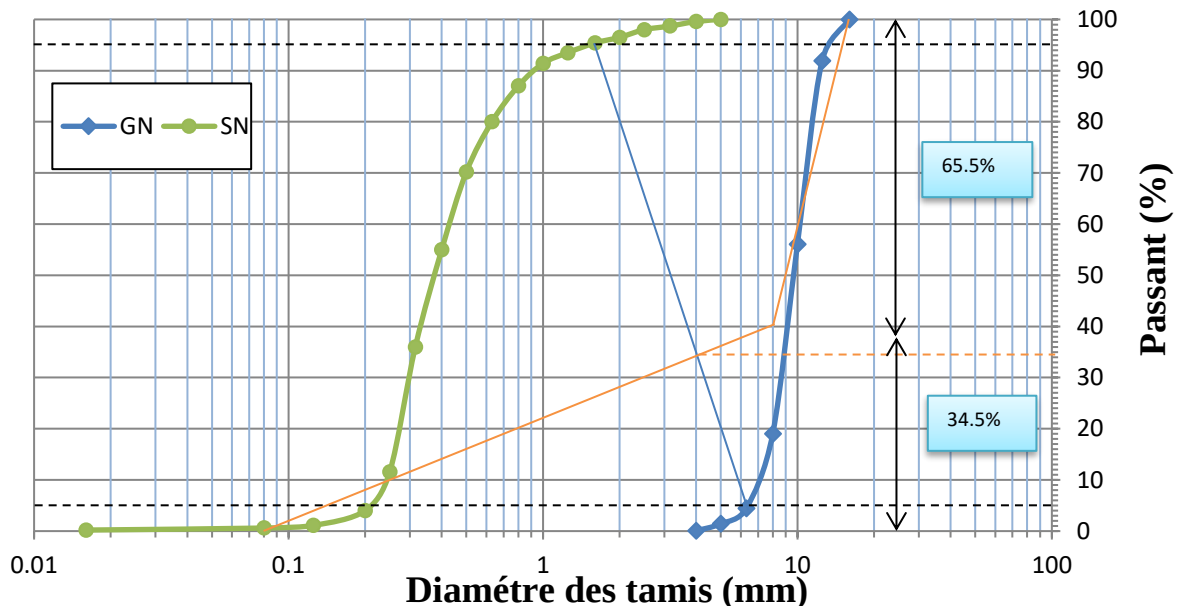


Figure II.8 : Courbes granulométriques des granulats étudiés.

On lit alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la droite de partage. Les pourcentages en volume absolu de chacun des granulats G_1 pour le sable naturel et G_2 pour le gravier naturel sont :

$$G_1 = 34.5\%$$

$$G_2 = 65.5\%$$

Le volume absolu des grains de ciment (c) :

$$c = \frac{C}{\gamma_c}$$

Avec : C : le dosage en ciment = 355 kg/m^3

γ_c : Masse volumique absolue des grains de ciment = 3.1 g/cm^3

Donc :

$$c = \frac{355}{3.10} = 114.52 \text{ l}$$

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est :

$$V = 1000 \gamma - c \rightarrow V = 1000 \times 0.819 - 114.521$$

$$V = 704.48 \text{ l}$$

CHAPITRE 02 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

D'où, les volumes absolus de chacun des granulats sont :

$$\text{Pour le sable naturel : } V_s = G_1 \times V = 37.5\% \times 704.48 = 264.18 \text{ l}$$

$$\text{Pour le gravier naturel : } V_g = G_2 \times V = 62.5\% \times 704.48 = 440.30 \text{ l}$$

Notons : γ_{ab1} et γ_{ab2} les masses volumiques absolues du sable et du gravier naturel respectivement.

Donc la masse de chacun des granulats sont :

$$M_s = V_s \times \gamma_{ab1} = 264.18 \times 2,65 = 700.077 \text{ kg}$$

$$M_g = V_g \times \gamma_{ab2} = 440.30 \times 2,5 = 1100.75 \text{ kg}$$

D'après ces résultats les principaux rapports des composants sont alors :

$$\frac{C}{E} = 1.68 \quad \frac{E}{C} = 0.59 \quad \frac{G}{S} = 1.57$$

Cette étude a pour but de préparer six compositions du béton variées en termes de pourcentage de granulats recyclés. Les dosages des différents matériaux secs pour chaque composition du béton formulés sont présents dans le tableau suivant :

Tableau II.20 : Dosages des différents matériaux.

Composants	Composition pour 1 m ³ de béton					
	B _{0/0}	B _{0/100}	B _{100/0}	B _{50/50}	B _{0/50}	B _{30/30}
Sable naturel (kg)	700.077	700.077	00.00	350.038	700.077	490.054
Sable recyclé (kg)	00.00	00.00	700.077	350.038	00.00	210.023
Gravier naturel (kg)	1100.75	00.00	1100.75	550.375	550.375	770.525
Gravier recyclé (kg)	00.00	1100.75	00.00	550.375	550.375	330.225
Ciment (kg)	355					
Eau (l)	211.12					
E _{eff} (l)	43.059	79.119	125.717	102.418	61.089	78.674

Après avoir déterminé la composition d'un mètre cube de béton, nous passons maintenant à la caractérisation du béton témoin à l'état frais (affaissement) et à l'état durci (résistance). Les résultats trouvés pour B0/0.

- Affaissement : 70 mm

- Résistance à la compression à 7 jours : $f_{c7} = 29,12 \text{ MPa}$

5. CONFECTION DES POUTRES :

L'objectif de ce travail porte sur l'étude de l'effet de substitution des granulats naturels par granulats de béton recyclé sur comportement des éléments de structure de type poutre. La géométrie des poutres en béton testées correspond aux dimensions de $(10 \times 15 \times 140) \text{ cm}^3$. Dans ce cadre, six poutres ont été préparées (Tableau II.20) avec le ferrailage schématisé sur la figure II.12

Pour le ferrailage longitudinal de la poutre, deux barres d'acier HA8 pour les armatures tendues (inférieur) deux barres d'acier HA8 pour et les armatures comprimées (supérieur) ont été utilisées. Pour les cadres des armatures, les barres en acier lisses de diamètre $\varnothing 6$ ont été utilisées.

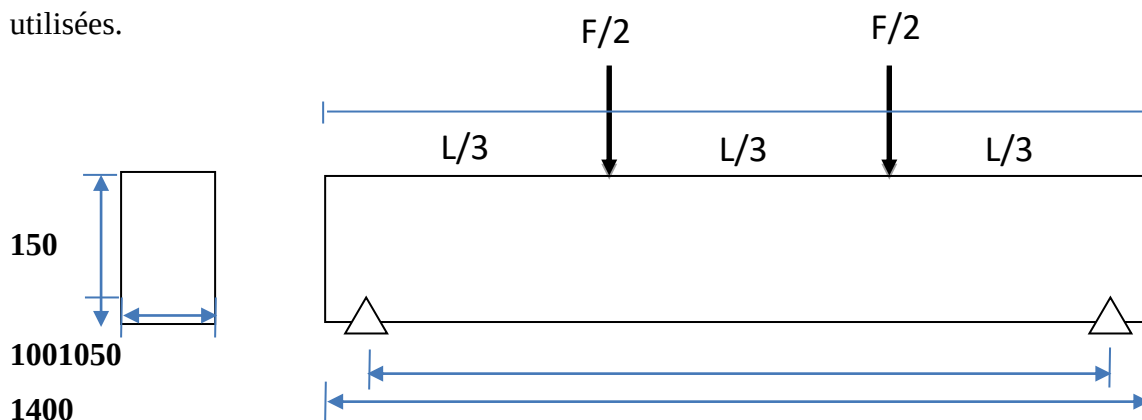


Figure II-9 : Géométrie de la poutre

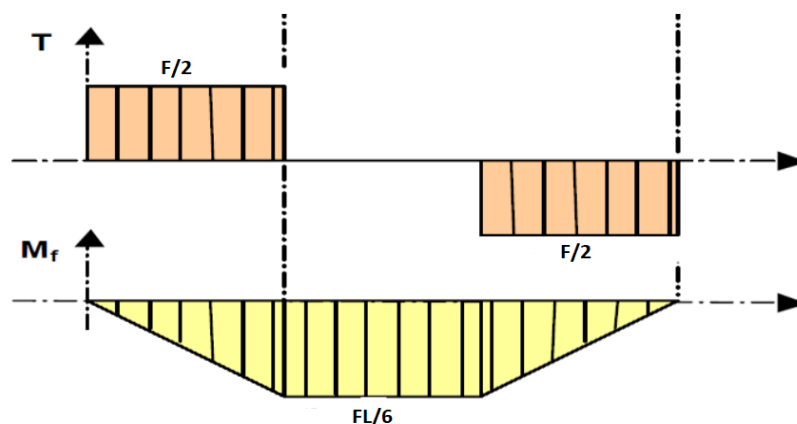


Figure II.10 : Diagrammes du moment fléchissant et l'effort tranchant.



Figure II.11:Ferrailage des poutres.

6. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons effectué les caractéristiques des matériaux utilisés dans cette recherche à l'aide des essais les plus connues. Ainsi, que la méthode de formulation et la détermination de la composition du béton.

On remarque que les propriétés du GBR diffèrent significativement des propriétés de l'agrégat naturel, en particulier la densité, la résistance à l'usure et l'absorption d'eau. En règle générale, les GBR ont une absorption d'eau plus élevée et une masse volumique plus faible que celles des granulats naturels, en raison de la présence de la PCD.

La mesure de l'absorption d'eau est particulièrement importante car elle détermine la quantité d'eau efficace (E_{eff}) dans le béton (cette quantité se référant à l'eau présente dans la pâte fraîche de ciment, à l'exclusion de l'eau absorbée par les granulats) et influe aussi sur l'ouvrabilité du béton frais et la formation de réseaux poreux du béton. Par conséquent, elle influe aussi sur les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton durci.

La porosité remarquable des granulats GBR est due probablement à deux effets :

- 1) Lors l'élaboration des granulats recyclés le concassage conduit à la création des fissures au sein des granulats.
- 2) La fissuration dans la pâte de ciment durci hydratée adhérente aux graviers.

CHAPITRE III :
ETUDE ET ANALYSE
DES RESULTAS
NUMERIQUES

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

1. INTRODUCTION :

ANSYS est un logiciel spécialisé en simulation numérique. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis. Il peut traiter des différents problèmes dans des différents domaines telle que : la mécanique, thermique, mécanique des fluides, et analyse du champ électrique...etc.

Ce chapitre est consacré à la modélisation numérique par le biais du logiciel ANSYS des poutres en béton armé de granulats naturelles et de GBR soumises à la flexion. Les types des éléments utilisés dans cette étude, ainsi que les modèles des matériaux choisis vont être présentés. Il est à noter que la modélisation entreprise lors de cette étude moyennant le logiciel ANSYS est de type 3D.

Les résultats numériques obtenus par notre étude, en termes de la flèche, vont être comparés avec les résultats expérimentaux réalisés par une étude effectuée dans le cadre du Projet National RECYBETON trouvés dans la littérature [42], et avec les résultats analytiques calculés en utilisant le règlement EUROCODE 2.

2. PRESENTATION DE LOGICIEL ANSYS :

2.1. Environnements logiciels :

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

ANSYS « CLASSIC » : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL (*ANSYS Parametric Design Language*). *ANSYS classic* est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

ANSYS « WOEBENCH » : Cette plateforme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS [53].

2.2. Types d'analyses effectuées par ANSYS :

Dès sa création en 1971, le logiciel a connu plusieurs développements, qui ont étendu le champ de son application. La version ANSYS.14 qu'on a utilisé lors de notre étude est capable à satisfaire pratiquement tous les problèmes pratiques de modélisation grâce à ces produits principaux à savoir :

- ANSYS Structural
- ANSYS Mechanical
- ANSYS CFX
- ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA
- ANSYS Electromagnetics et Ansoft
- ANSYS Multiphysics

Avec l'analyse **ANSYS Structural** on peut effectuer des simulations mécaniques en calcul des structures. Les principales capacités de cette analyse sont (Figure III.1):

- L'analyse statique
- L'analyse modale
- L'analyse harmonique (réponse forcée)
- L'analyse temporelle
- La gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).[53]

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

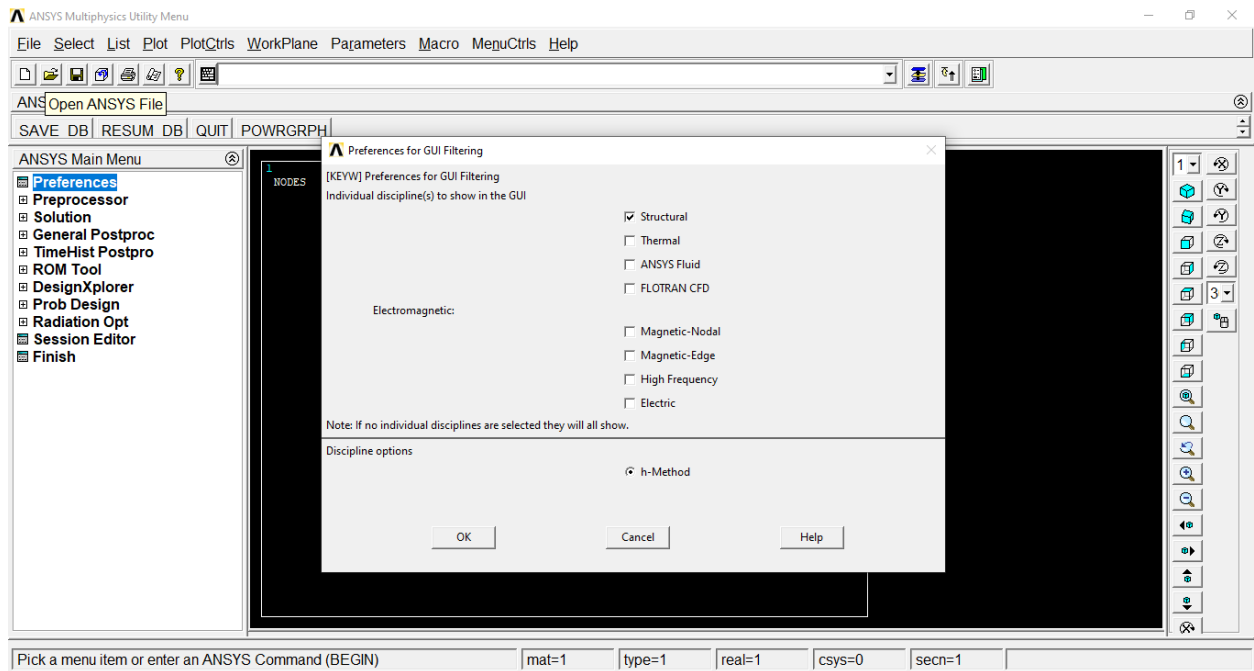


Figure III.1 : Préférence de l'ANSYS APDL

La création de modèle d'élément finis dans ANSYS nécessite plusieurs tâches qui doivent être complétées pour que le modèle s'exécute d'une façon correcte. L'analyse d'une structure par ANSYS comporte trois phases :

a) Pré-processor :

Dans cette étape, on définit le modèle d'élément finis et les facteurs environnementaux appliqués à savoir :

- Définir le type d'élément, les constantes réelles, les modèles des matériaux.
- Définir les sections des armatures
- Créer la géométrie de poutre
- Maillage d'élément.
- Définir le chargement appliqué

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

b) Solveur :

Dans cette phase l'analyse et la solution de modèle d'éléments finis est établis en spécifiant le type d'analyse désiré.

Il existe différents algorithmes de résolution pour traiter les problèmes éléments finis. On peut citer deux classes de méthodes :

- Les méthodes de résolution directes : Les méthodes directes sont utilisées pour des systèmes de taille moyenne et le temps de calcul est sensiblement proportionnel au nombre d'inconnus. Ces méthodes conduisent à la solution en un nombre fini d'opérations. Elles sont adaptées au mode de stockage de la matrice [K]. Si cette matrice est symétrique, généralement, la méthode de décomposition de Choleski est la plus utilisée, sinon le logiciel recourt à la méthode d'élimination de Gauss.
- Les méthodes itératives : Ces méthodes sont utilisées pour des systèmes de grande taille, où le traitement par la méthode directe sera insuffisant en termes de temps de calcul. La solution approchée des méthodes itératives est atteinte en un nombre infini d'opérations convergeant vers la solution analytique. Donc, ces méthodes intègrent un critère d'arrêt, lorsque la solution approchée est suffisamment proche de la solution analytique.

La méthode la plus utilisée pour la résolution des systèmes d'équations non-linéaires est la méthode de Newton-Raphson. C'est la méthode utilisée dans notre étude, vu que le comportement du béton après fissuration est considéré non-linéaire (comportement plastique).

c) Post-processor

Cette phase est consacrée à l'analyse et exploitation des résultats traitées

3. Montage et résultats expérimentaux :

Le principe de l'étude expérimentale élaborée par Mercado et al. (2018) [42] consiste à soumettre une série de poutres isostatiques en béton armé, à un essai de flexion à quatre points. Ces poutres sont distinguées par le type du béton utilisé. Le Tableau III.1 présente la teneur en granulats recyclés des quatre bétons retenus.

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

Tableau III.1 : Types de bétons [42].

Désignation (classe C 25/30)	Substitution massique (%)		Substitution massique totale (%)
	Sable de GBR	Gravillons de GBR	
0S0G	0	0	0
30S30G	30	30	30
0S100G	0	100	52
100S100G	100	100	100

Les deux poutres adoptées pour notre étude sont les poutres 0S0G et 100S100G.

4. Description des poutres [42]:

La Figure III.2 présente le schéma de montage expérimental des poutres étudiées. La longueur totale des poutres est de 5 m et la section transversale est de 40 x 15 cm. Les propriétés mécaniques des bétons et des armatures sont présentées respectivement, aux Tableaux III.2 et Tableaux III.3.

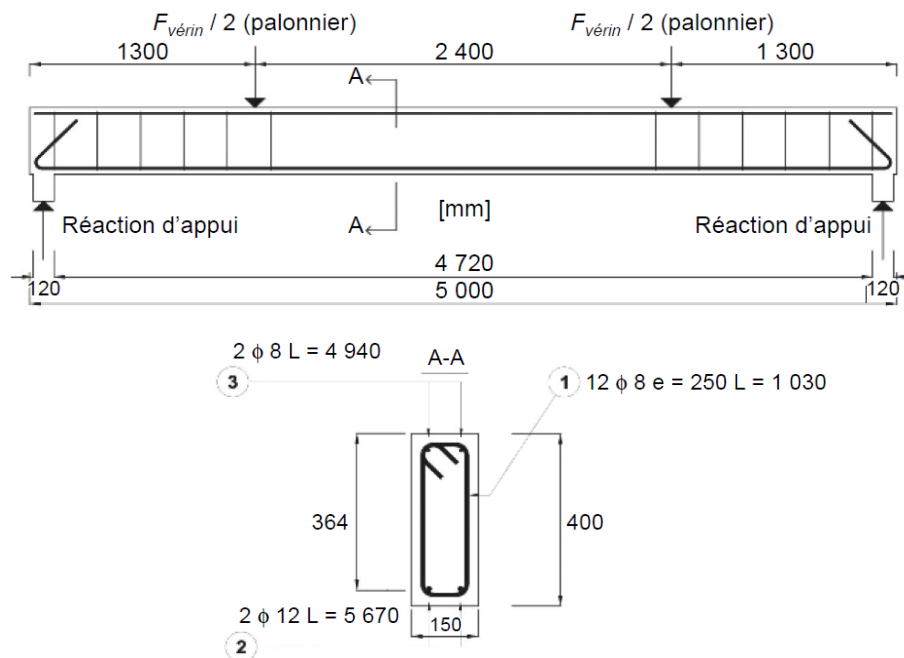


Figure III.2 : Essai de flexion à quatre points et plan de ferrailage [42].

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques des bétons (entre parenthèses ; écart type)[42].

Béton		0S0G	100S100G
Masse volumique	ρ_a [Kg.m ⁻³]	2346 (20)	2041 (19)
Résistance en compression	f_{cm} [MPa]	30.1 (2.6)	23.7 (2.1)
Résistance au fendage	$f_{ctm,sp}$ [MPa]	2.8 (0.3)	2.0 (0.1)
Résistance à la flexion	$f_{ctm,fl}$ [MPa]	4.6 (0.2)	3.2 (0.2)
Résistance à la traction calculée	f_{ctm} [MPa]	2.8	1.9
Module d'élasticité sécant	E_{cm} [GPa]	31.8 (1.1)	15.3 (1.1)

Tableau III.3 : Propriétés des armatures (entre parenthèses ; écart type)[42].

Module d'élasticité	E_s	[GPa]	201 (5)
Limite d'élasticité	$f_{0,2k}$	[MPa]	555 (9)
Résistance à la traction	f_t	[MPa]	624 (12)
$k = f_t/f_{0,2k}$	—	—	1,12 (0,01)
Allongement sous charge maximale	ε_{uk}	[%]	5,44 (0,35)

5. Résultats expérimentaux :

Les Figures III-3 et III-4 présentent l'évolution de la flèche à mi-portée, mesurée avec les capteurs LVDT en fonction de la charge appliquée, pour les poutres 0S0G et 100S100G, respectivement. La courbe pleine jaune décrit l'évolution de la flèche au cours de la phase initiale de fissuration ; la courbe pleine orange correspond à la phase finale de fissuration. La flèche mesurée sous une charge de 40 kN appliquée durant la phase finale de fissuration a été reportée dans le Tableau III.4. Comme signalé dans des travaux antérieurs, la flèche augmente lorsque la teneur totale en GBR augmente, la majoration étant d'environ 50 % pour la poutre

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

100S100G. Cette observation est à relier aux propriétés mécaniques (modules d'élasticité) des différents bétons testés dans cette étude (Tableau III.4). [42]

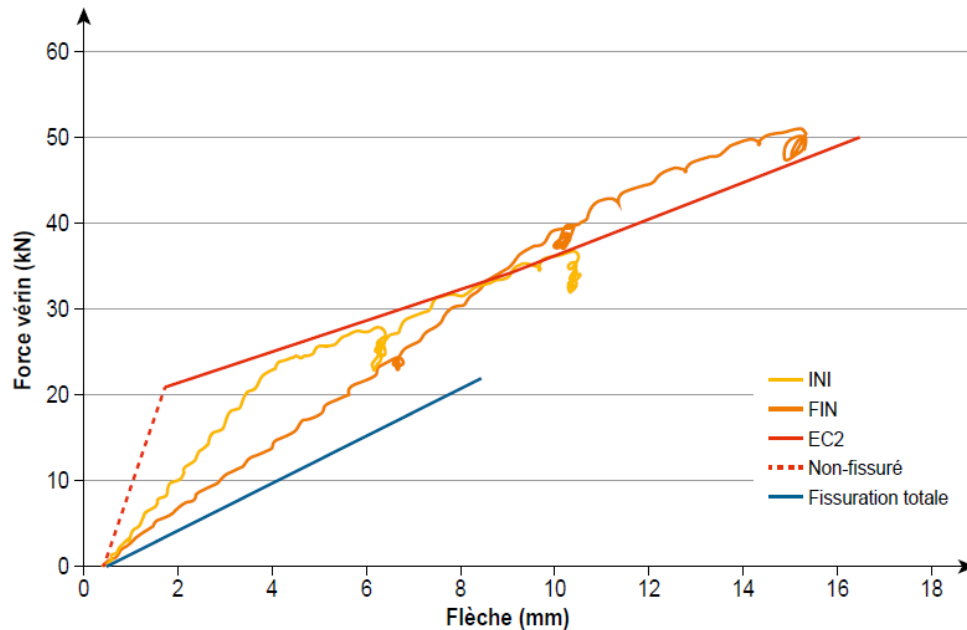


Figure III.3 : Courbe Charge – flèche à mi-travée. – Poutre OS0G[42].

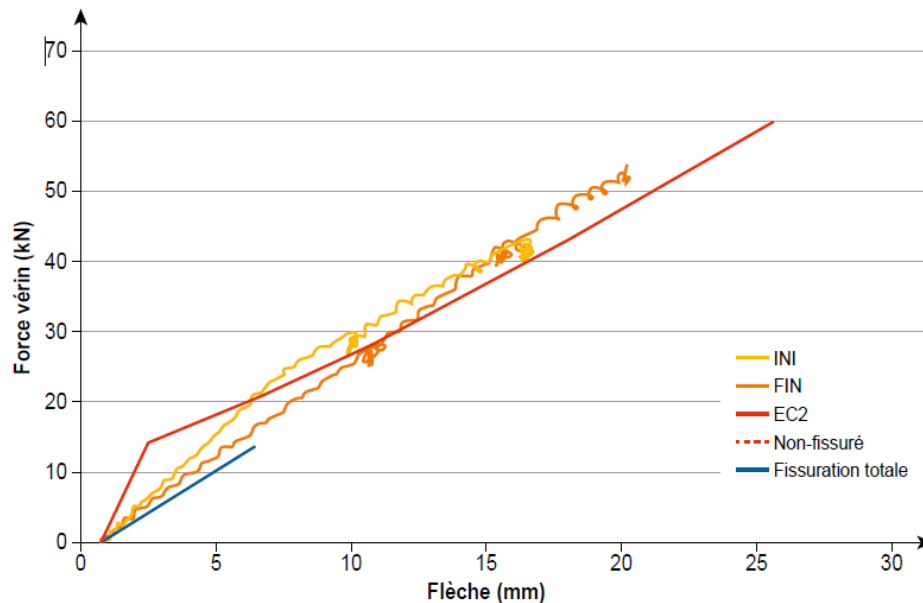


Figure III-4 : Courbe Charge – flèche à mi-travée. – Poutre 100S100G[42].

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

Tableau III-4 : Flèches (phase finale de fissuration) pour une charge appliquée de 40 kN

Désignation du béton dans les poutres	0S0G	100S100G
Déformation mesurée (mm)	10.4	15.2
Déformation calculée (mm) (EUROCODE II)	11.9	16.5

6. Modélisation numérique :

6.1 Types des éléments :

La poutre étudiée est constituée de deux matériaux : béton et acier. Pour le cas du béton, le logiciel ANSYS utilise l'élément SOLID65. C'est un élément solide à huit (08) nœuds. Chaque nœud de cet élément ayant trois degrés de liberté – translation dans les directions nodales x , y et z . Cet élément est capable d'avoir des déformations plastiques. La géométrie et la position des nœuds de cet élément type sont montrée dans la Figure III.5. Tandis que pour l'acier l'élément utilisé est l'élément LINK180 représenté sur la Figure III.6. Cet élément est un élément 3D à deux nœuds avec 3(trois) degrés de libertés pour chaque nœud : translation dans les directions nodales x , y et z . Un joint parfait entre le béton et l'acier de ferrailage a été considéré lors de cette étude. Ceci implique que le glissement relatif entre l'acier et le béton n'est pas permis et les nœuds de l'élément sont confondus avec ceux des éléments du béton adjacents. Les constantes réelles associées avec l'élément LINK 180 sont sa section transversale et sa déformation initiale qui a été prise nulle dans notre étude. Cependant, l'élément SOLID65 ne nécessite aucune constante réelle, car l'approche de fissuration adoptée est l'approche discrète. (Tableau III.5)

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

Tableau III.5 : Constants réels de l'approche de fissures discrets

Real Constant Set	Element Type	Constants			
			Real Constants for Rebar 1	Real Constants for Rebar 2	Real Constants for Rebar 3
1	Solid 65	Material Number	0	0	0
		Volume Ratio	0	0	0
		Orientation Angle	0	0	0
		Orientation Angle	0	0	0
2	Link180	Cross-sectional Area (in. ²)	113.04		
		Initial Strain (in./in.)	0		
3	Link 180	Cross-sectional Area (in. ²)	50.24		
		Initial Strain (in./in.)	0		

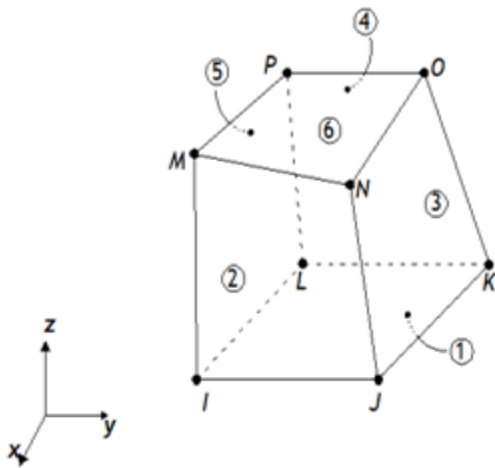


Figure III.5 : Solid65 – Élément Solide 3D
Du béton armé (ANSYS 14)

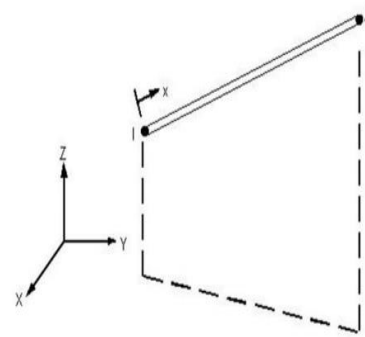


Figure III.6 : LINK180
– Élément linéaire 3D (ANSYS 14)

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

6.2. Modèles des matériaux :

Les modèles des matériaux adoptés dans cette étude sont des modèles élasto-plastiques isotropes. Les tableaux (III-6a) (III-6b) représentent les différents paramètres nécessaires pour définir les propriétés de deux matériaux utilisés : béton ordinaire et acier. L'acier de ferrailage a été modélisé d'une manière discrète, c.à.d le béton armé est composé par deux matériaux et deux éléments différents. Les propriétés des matériaux utilisées sont ceux présentées dans le Tableau III.2 de ce chapitre.

Tableau III-6a : Propriété du béton.

Material Model Number	Element Type	Material Properties		
1	Solid65			
		Linear Isotropic		
		EX	31800	
		PRXY	0.2	
		Multilinear Isotropic		
			Strain	Stress
		Point 1	0.000381	9.03
		Point 2	0.0006	15.17
		Point 3	0.0013	22.39
		Point 4	0.0019	28.31
		Point 5	0.00243	30.05
		Point 6	0.00265	30.1
		Concrete		
		ShrCf-Op	0.3	
		ShrCf-CI	1	
		UnTensSt	2.572	
		UnCompSt	-1	
		BiCompSt	0	
		HydroPrs	0	
BiCompSt	0			
UnTensSt	0			
TenCrFac	0			

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

Tableau III-6b : Propriété de l'acier.

2	Link180	Linear Isotropic	
		EX	201000
		PRXY	0.3
		Bilinear Isotropic	
		Yield Stss	555
		Tang Mod	2100

Pour définir la rupture du béton, le matériau isotrope multilinéaire basé sur le critère de rupture de Von-Mises avec le modèle Willam- Warnke [Willam&Warnke, 1974].

Avec :

PRXY : le coefficient de poisson (ν).

EX : module d'élasticité du béton (E_c).

EX est calculé comme suit :

$$E_c = 57000 \sqrt{f'_c} \quad (\text{III-2})$$

Avec :

$$f'_c = 30.1 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.2$$

Les équations ci-dessous sont utilisées pour obtenir la relation contrainte – déformation uniaxial pour le modèle de béton. [Mac Gregor 1992]

$$f = \frac{E_c}{1 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^2} \epsilon \quad (\text{III-3})$$

$$\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (\text{III-4})$$

$$E_c = \frac{f}{\epsilon} \quad (\text{III-5})$$

Avec

f : contrainte à n'importe quelle point.

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

ε : Déformation correspond à la contrainte f .

ε_0 : Déformation à la contrainte de compression limite.

Le premier point de la courbe contrainte – déformation multilinéaire isotrope doit satisfaire la loi de Hook :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{III-6})$$

Pour faciliter la convergence de l'algorithme de solution non linéaire, on a utilisé la courbe multilinéaire (figure III-7).

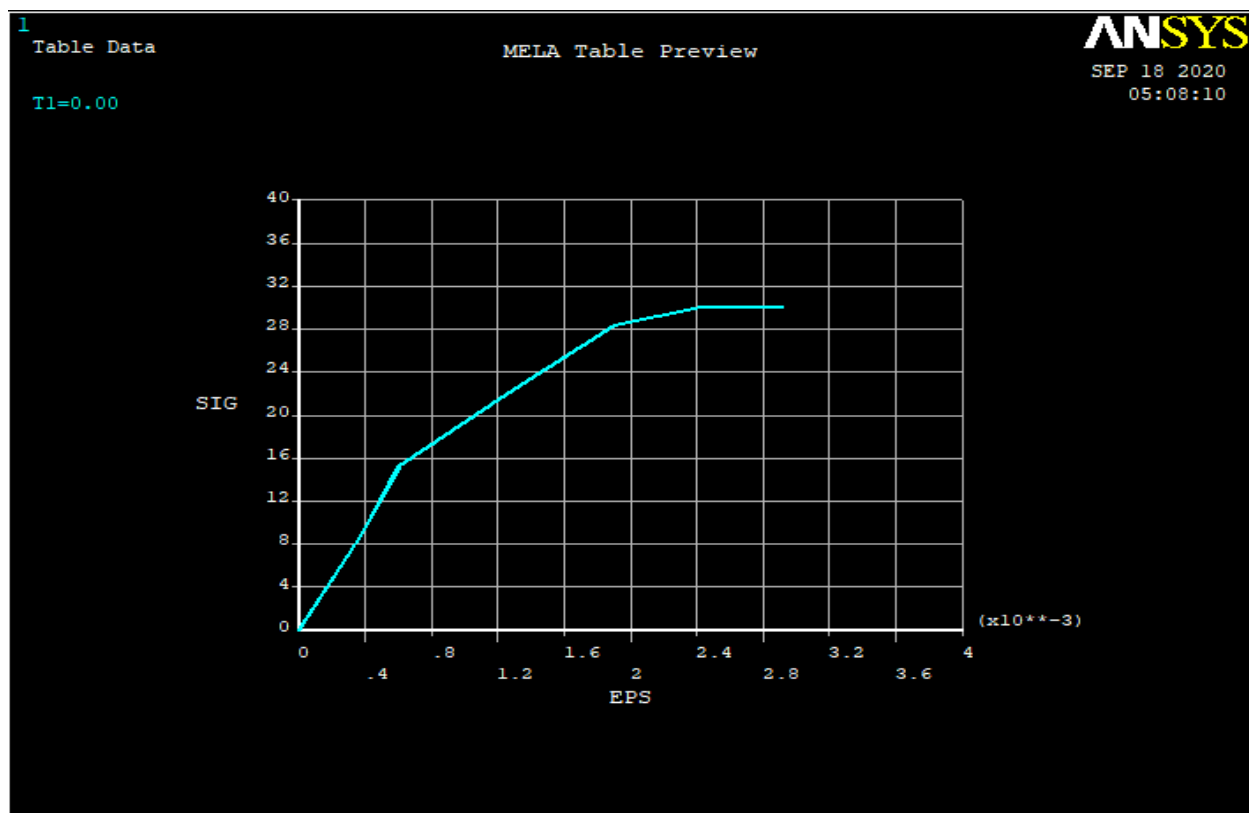


Figure III-7 : Courbe contrainte – déformation Uniaxial de béton.

On a défini le point 1 par $0.3 f'_c$ à partir de l'équation (III-6). Les points 2, 3, 4 et 5 sont obtenus à partir de l'équation (III-3).

Le modèle du matériau de Willam-Warnke dans ANSYS nécessite la définition de 9 paramètres de béton (**Tableau III-6a**) [55]:

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

1. Coefficients de transfert de cisaillement pour une fissure ouverte (β).
2. Coefficients de transfert de cisaillement pour une fissure fermée (α).
3. Contrainte de rupture de traction uniaxiale (f_r) :

La contrainte de traction uniaxial été basé sur le module de rupture :

$$f_r = 7.5\sqrt{f'_c} \quad (\text{psi}) \quad (\text{III-12})$$

4. Contrainte de compression uniaxiale (positive) (f'_c) :

La contrainte de compression uniaxial est basé sur la résistance à la compression, il prend une valeur de (-1) pour désactiver la capacité de rupture d'élément en béton des problèmes de convergence ont été répétés lorsque la capacité de rupture par compression a été active.[3]

5. Contrainte de compression biaxiale (positive) (f'_{cb})

$$f'_{cb} = 1.2f'_c \quad (\text{III-7})$$

6. Etat de contrainte hydrostatique ambiant à utiliser avec les constantes 7 et 8 (σ_h)

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}) \quad (\text{III-8})$$

Avec : σ_{xp} , σ_{yp} et σ_{zp} sont les contraintes principales dans les directions principales.

7. Contrainte de compression biaxiale (positive) sous l'état de contrainte hydrostatique ambiant (constante 6) (f_1)

$$f_1 = 1.45f'_c \quad (\text{III-9})$$

8. Contrainte de compression uniaxiale (positive) sous l'état de contrainte hydrostatique ambiant (constante 6) (f_2)

$$f_2 = 1.725f'_c \quad (\text{III-10})$$

9. Multiplicateur de rigidité pour l'état de fissures traction

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

Pour le coefficient β , trois valeurs ont été examinées pour mener une étude paramétrique sur l'influence de ce coefficient sur l'analyse, à savoir : 0.3, 0.8, 1. On a constaté qu'il n'y a pas eu une grande différence comme le montre la Figure (III-8).

En général, la valeur comprise entre 0 et 1. La valeur 0 signifie qu'il n'y a pas de transformation de fissuration et la valeur 1 représente une transformation totale de ces fissures. [54]

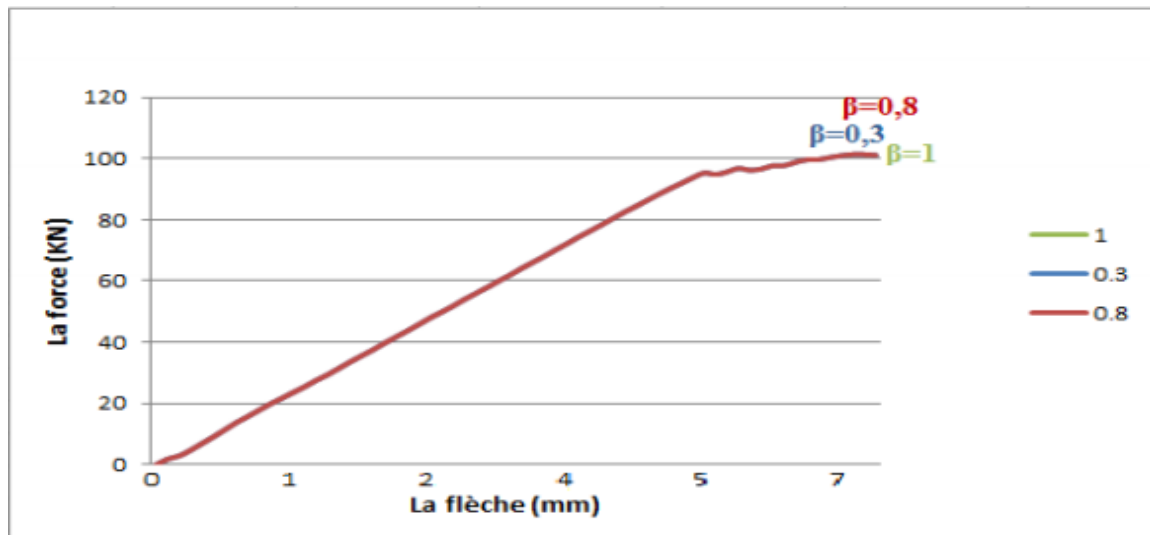


Figure III-8 : Courbes Force – flèche _ Effet du coefficient [54].

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

6.3. Etapes de modélisation des poutres :

Géométrie et coordonnées des points de la section de la poutre modélisée

La figure ci-dessous représente la création des coordonnées des points et la conception des poutres par ANSYS.

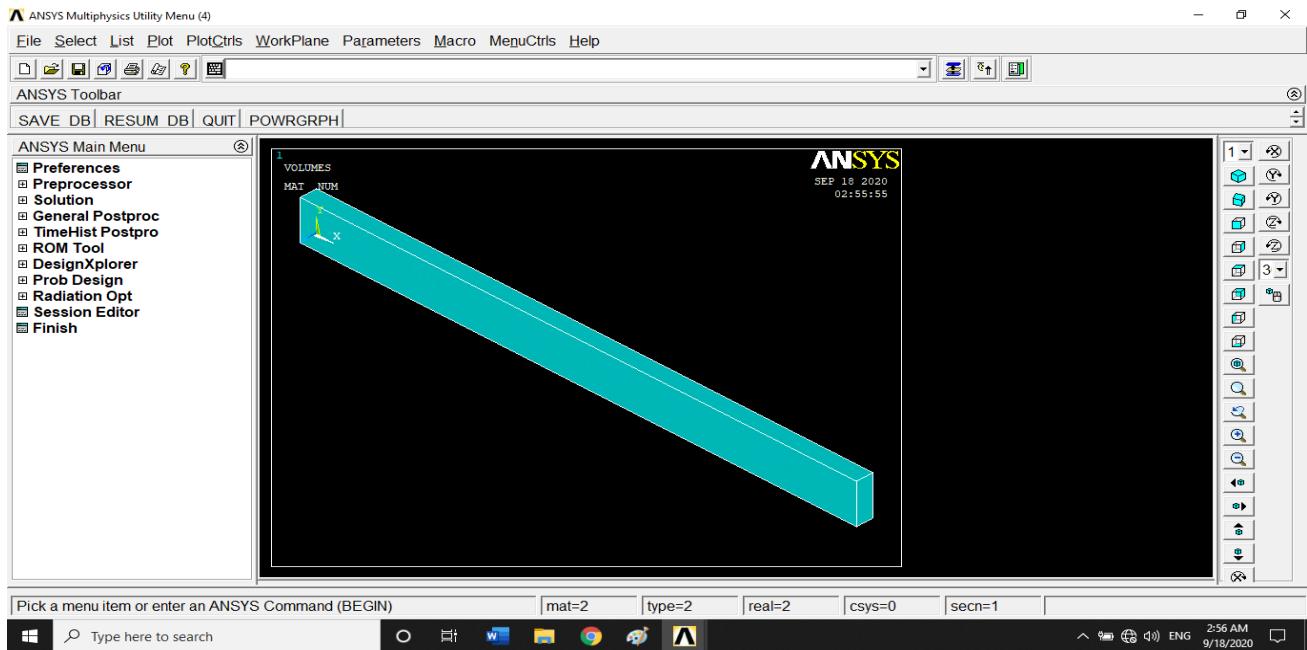


Figure III-9: Géométrie des poutres dans ANSYS APDL.

a) Maillage :

On a généré le maillage en utilisant les éléments SOLID 65 et LINK180 de telle sorte que les nœuds des éléments des barres d'acier et les éléments du béton partagent les mêmes nœuds.

Nous avons utilisé deux méthodes pour la taille de maillage :

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

➤ Avec des lignes :

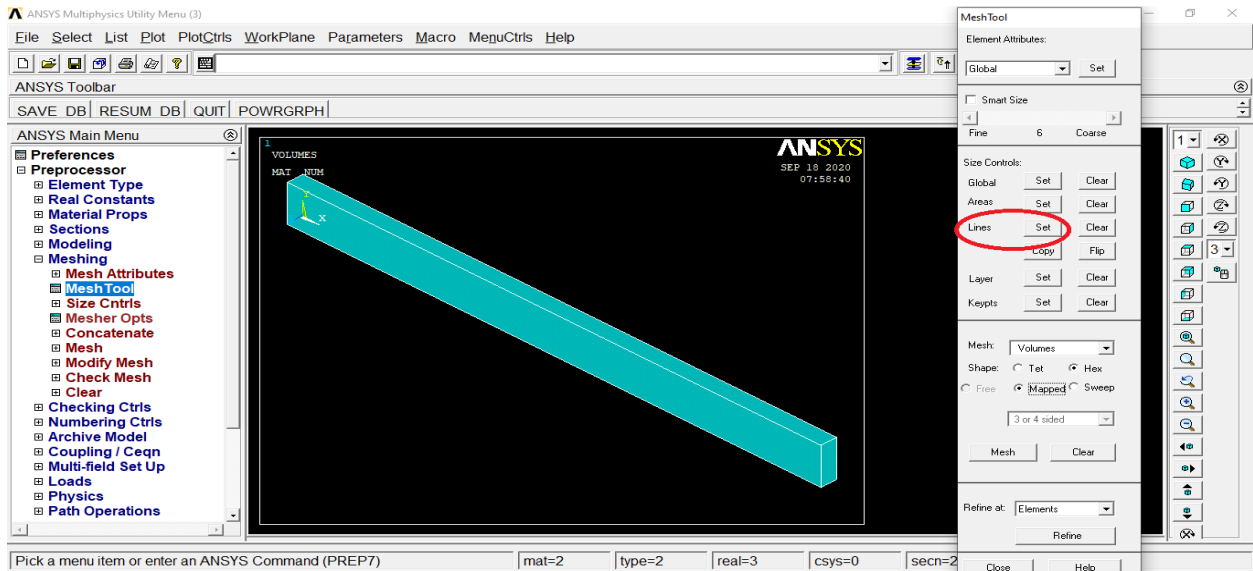


Figure III-10a : Maillage avec des lignes.

➤ Avec surfaces :

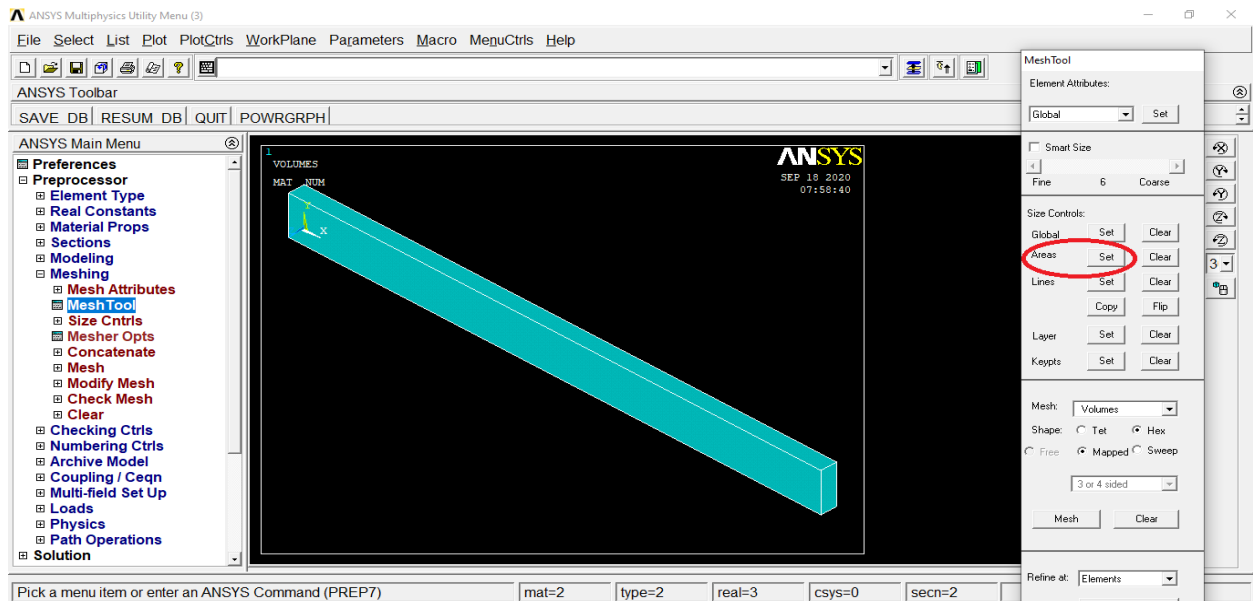


Figure III-10b : Maillage avec Surfaces.

Les dimensions des mailles pour les éléments quadratiques du béton sont (37.5 x 36.36 x 100) mm, et pour les éléments linéaires des barres d'acier est 100 mm de longueur. Le nombre total des éléments égal à 2205 (Figure III-11).

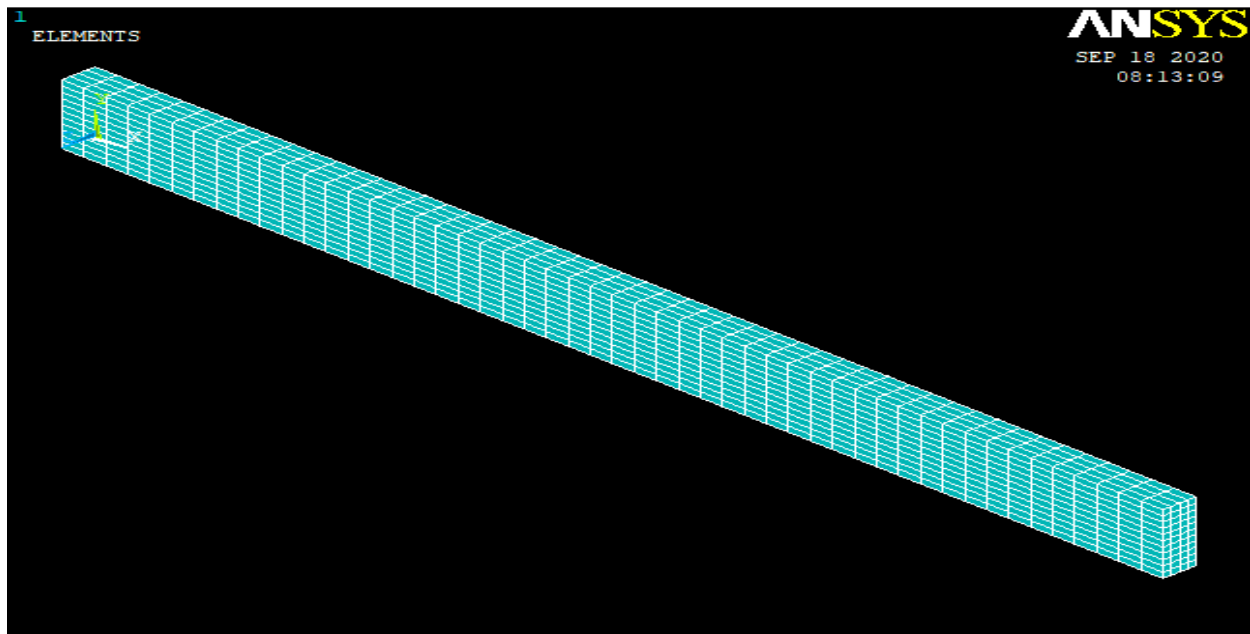


Figure III-11 : Le Maillage sur la Poutre.

b) Conditions aux limites :

Appuis :

Les poutres reposent sur deux appuis doubles c'est-à-dire :

$$U_z = U_y = 0.$$

Chargement :

Les poutres sont soumises à des charges monotones statiques transversales. La charge a été incrémentée automatiquement à l'aide du logiciel ANSYS. Toutefois, afin de comparer les flèches dans les poutres avec les résultats expérimentaux, la charge de 40 kN a été prise comme référence, vu que ces résultats ont été tabulés dans [42].

c) Execution et calcul par logiciel ANSYS :

Le modèle des éléments finis étudié représente une poutre en béton armé simple sous charge transversale. Pour ce type modèle il est recommandé d'utiliser une analyse de type statique.

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

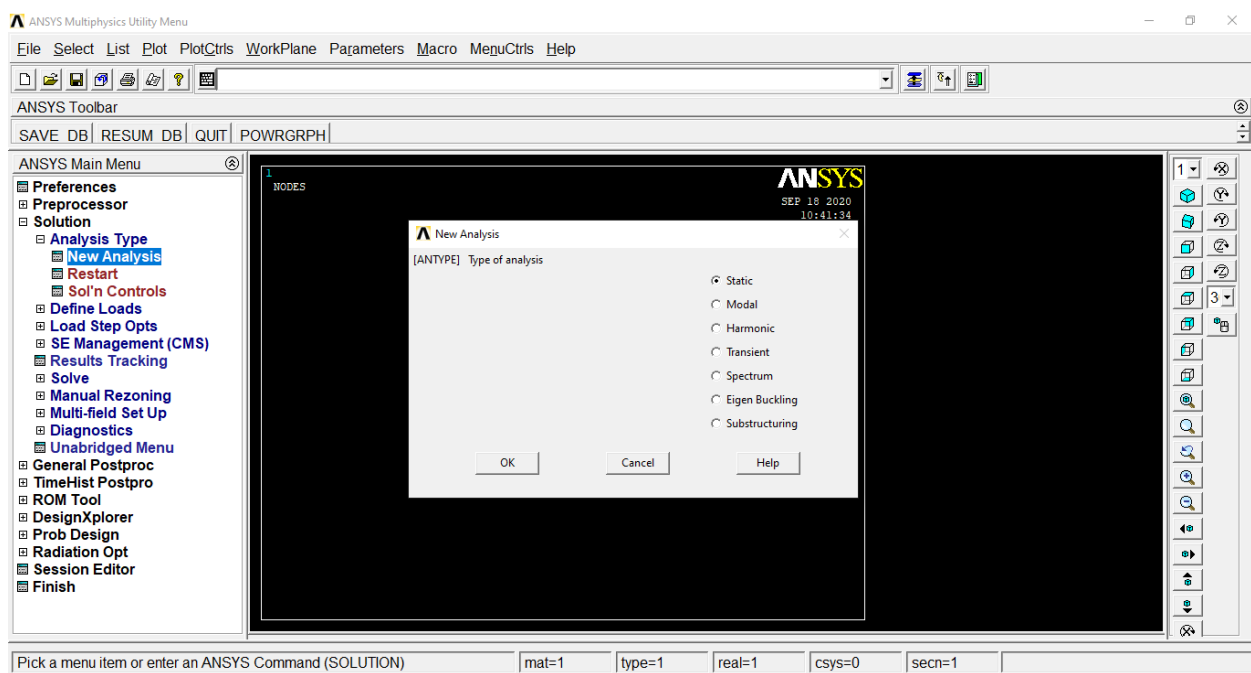


Figure III-12 : Analyse Type « Statique ».

7. Analyse des résultats numériques :

7.1. Poutre en Béton ordinaire :

La figure suivante représente la déformée numérique de la poutre en béton ordinaire (OS0G). Comme le montre la figure, la déformée de la poutre est symétrique et atteint une valeur maximale de 11.91 mm à mi-travée.

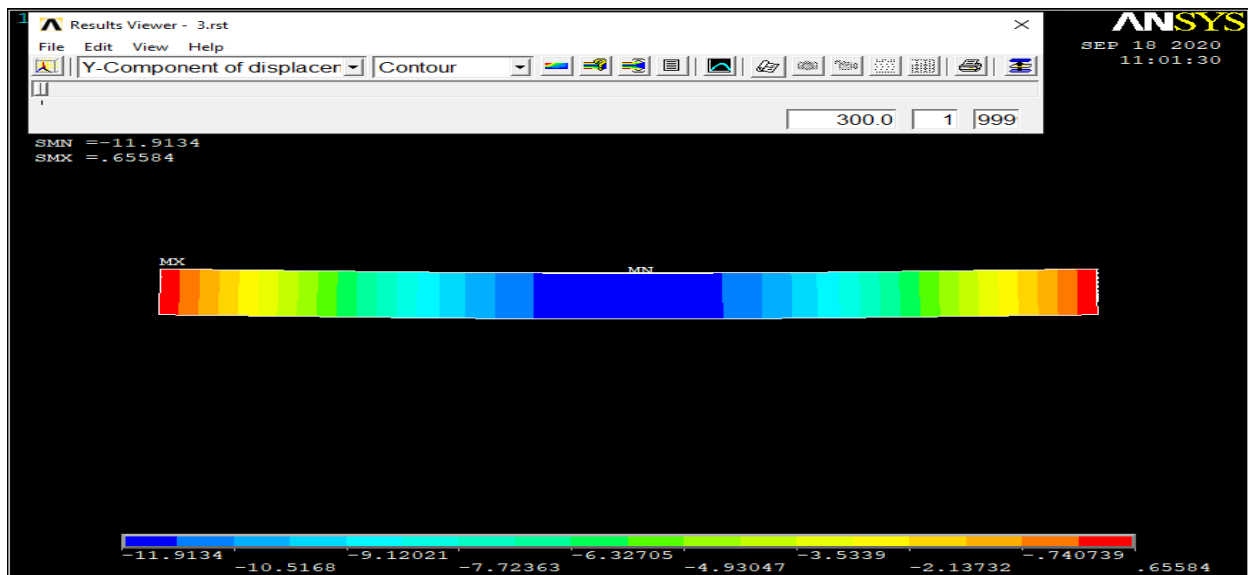


Figure III-13 : Déformée de la poutre en béton ordinaire (OS0G).

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

La figure III-14 montre la variation de la flèche en fonction de la force pour la poutre en béton ordinaire (0S0G). Cette figure montre que le comportement de la poutre est bilinéaire.

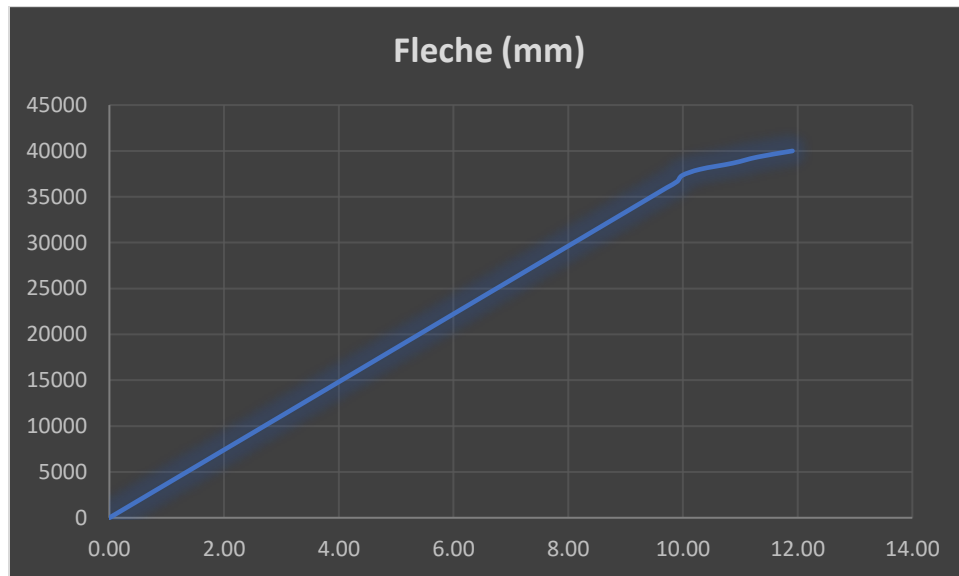


Figure III-14 : Courbes force – flèche _Poutre 0S0G.

7.2. Poutre en béton des agrégats recyclé

La figure III-15 représente la déformée de la poutre en béton des agrégats recyclé (100S100G). Comme le montre la figure, la déformée de la poutre est symétrique et atteint une valeur maximale de 15.22 mm à mi-travée.

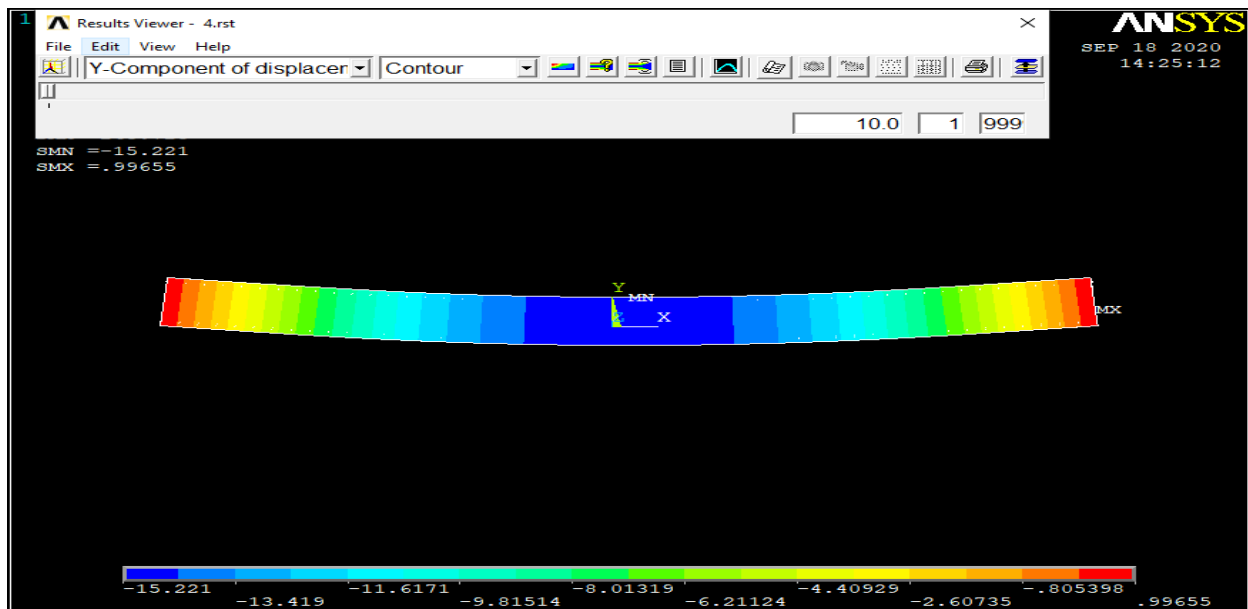


Figure III-15 : Déformée de la poutre en béton des agrégats recyclé (100S100G).

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

La Figure III-16 montre la variation de la flèche en fonction de la force pour la poutre en béton des agrégats recyclé (100S100G). Cette figure montre que le comportement de la poutre est bilinéaire.

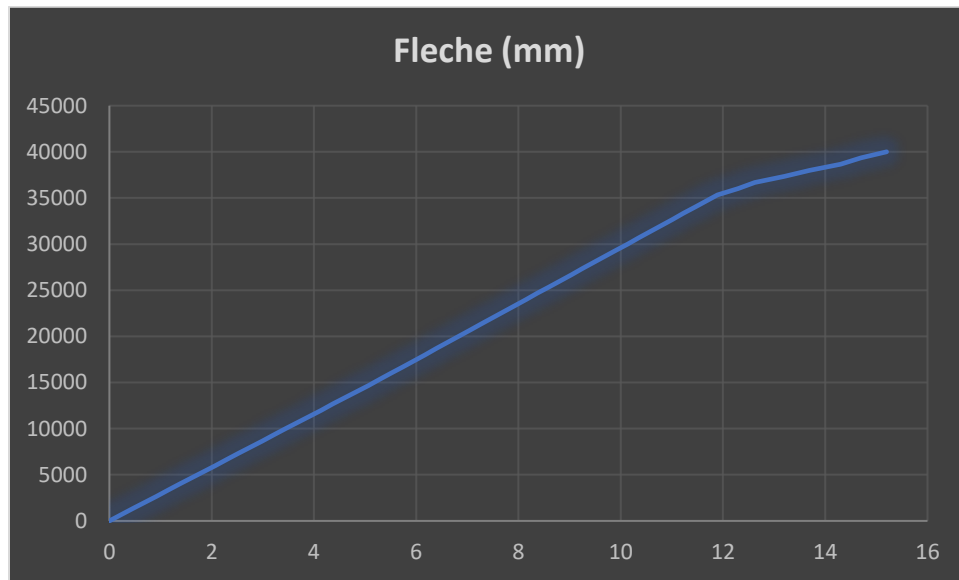


Figure III-16 : Courbes force – flèche _Poutre 0S0G.

8. Discussions et comparaison des résultats :

La Figure III-17 et le Tableau III-7 montrent une comparaison en termes de la flèche obtenue numériquement des poutres 100S100G et 0S0G. Comme nous attendions la déformée de la poutre en béton des agrégats recyclés (100S100G) est plus grande que celle en béton ordinaire (0S0G), cependant, sa rigidité est plus faible. Cette augmentation est estimée de 28%. Ceci est dû à la résistance de compression de la poutre 100S100G qui est plus faible à celle de la poutre 0S0G à cause de l'utilisation des granulats recyclés. Nous signalons que les résultats expérimentaux ont montrés une majoration de la flèche de 46%.

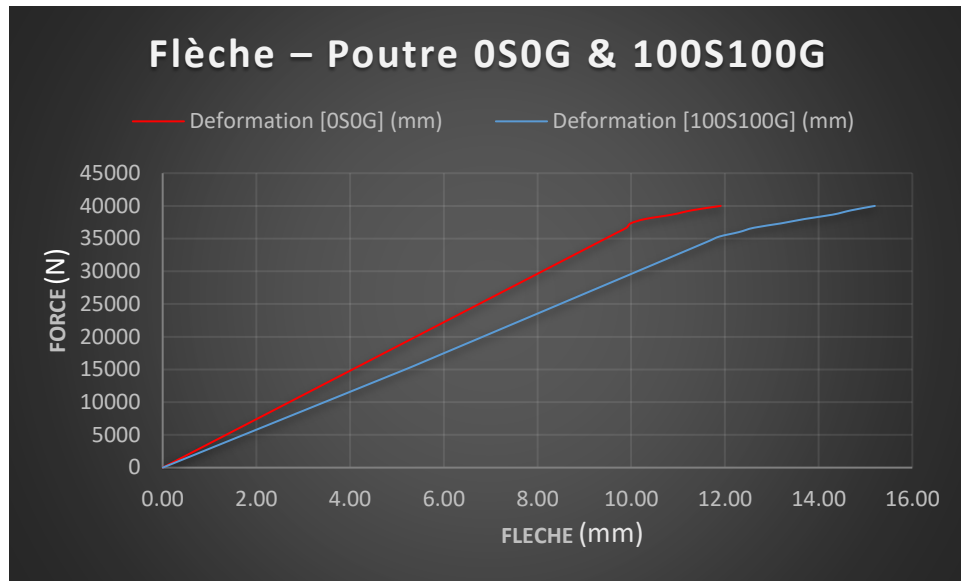


Figure III-17 : Comparaison des courbes Force – Flèche des poutres _ Résultats numérique.

Tableau III-7 : Comparaison de la flèche_ Résultats numériques.

Poutre	Agrégats Ordinaire Poutre 0S0G	Agrégats Recycle Poutre 100S100G
Flèche (mm)	11.913	15.221

Le tableau suivant montre une comparaison en termes de la flèche entre les résultats numériques obtenus par ANSYS, les résultats analytiques calculée par l'EUROCODE 2 et les résultats expérimentaux élaborés par Mercado et al. (2018) [42].

Tableau III-8 : Comparaison des résultats numérique, analytique et expérimental en termes de la flèche.

Poutre	Agrégats Ordinaire – 0S0G		Agrégats Recycle – 100S100G	
	Flèche (mm)	Erreur (%)	Flèche (mm)	Erreur (%)
Résultats expérimentaux	10.4	/	15.2	/
Résultats analytiques	11.9	14	16.5	8
Résultats numériques	11.9	14	15.2	0

CHAPITRE 03 ETUDE ET ANALYSE DES RESULTATS NUMERIQUES

On observe que les résultats numériques sont plus proches aux résultats expérimentaux que les résultats analytiques, en particuliers pour la poutre 100S100G. Ceci est expliqué par le fait que le modèle numérique est basé sur des lois de plasticité non linéaires qui sont beaucoup plus représentatifs que celles adoptées par les hypothèses de calcul de L'EUROCODE. L'EUROCODE2 n'est pas destiné à prévoir la flèche aux ELU.

9. Conclusion :

Les résultats que nous avons obtenus montrent un bon accord avec les résultats expérimentaux. Comme nous le voyons on peut simuler une poutre en béton armé avec ANSYS qui peut nous donner un résultat exact et proche du réel, et cette simulation pourrait être économique en termes de coût, de temps et d'effort.

L'étude de cas présentée ici montre que l'utilisation de GBR dans le béton ne constitue pas des obstacles de point de vue numérique.

La déformée de la poutre en béton armé à des GBR est plus grande que celle en béton armé ordinaire, cependant, sa rigidité est plus faible.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail de mémoire de Master était de contribuer expérimentalement à la compréhension du comportement des poutres en béton armé confectionnées avec des granulats de béton recyclés (GBR) et soumises à la flexion. Afin, notamment, d'aider à la conception d'ouvrages moins impactant d'un point de vue environnemental. Nous sommes intéressés à l'influence des granulats de béton recyclé sur le comportement flexionnel des poutres en béton armé, et de trouver un moyen théorique pour prédire le comportement de ces poutres.

Des essais de caractérisation des matériaux à savoir les granulats recyclés et les granulats naturels ont été élaborés au sein de notre laboratoire. Après cette étude, on peut conclure que le comportement physique et mécanique des granulats de béton recyclés a montré une différence significative par rapport à celui des granulats naturels. Notamment, une diminution de la masse volumique et une augmentation du taux d'absorption d'eau et de la porosité suite à l'augmentation du taux de remplacement des granulats naturels. On a constaté aussi une augmentation du coefficient Los Angeles « LA » due à la présence de la pâte de ciment durci adhérente aux granulats pour les granulats de béton recyclés.

À l'évidence, l'utilisation de GBR conduit à l'augmentation de l'eau de gâchage ajoutée. Cette augmentation conduit certainement à une augmentation de l'ouvrabilité et une diminution de la résistance à la compression du béton. Cependant, la diminution de la résistance et de la durabilité peut être compensée par l'utilisation de plastifiants ou l'augmentation de dosage en ciment.

La modélisation numérique des poutres en béton armé a été effectuée à l'aide de logiciel des éléments finis ANSYS. Il est évident que l'analyse par EF donne des résultats très satisfaisants sur le comportement des poutres en béton armé ordinaire, et ce tant sur l'allure des courbes que sur les valeurs de la force et de la flèche. L'objectif était de savoir si c'est le cas pour des poutres en béton armé à des GBR.

Une comparaison entre les résultats numériques obtenus et les résultats expérimentaux trouvés dans la littérature [42] nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

-
- La déformée de la poutre en béton armé à des GBR est plus grande que celle en béton armé ordinaire, cependant, sa rigidité est plus faible. Cette augmentation de la flèche est estimée de 28%.
 - La courbe Force – Flèche obtenue numériquement par ANSYS montre que le comportement des poutres est bilinéaire.
 - Les résultats numériques obtenus sont en bon accord avec les résultats expérimentaux. L'écart entre les résultats est peut être attribué à l'effet des paramètres des matériaux choisis, ou à l'effet d'échelle dans les structures du béton.
 - On peut signaler aussi que la valeur de 0.3 qui a été prise pour le coefficient β n'a pas eu d'influence sur l'analyse et notamment sur la convergence comme il a été signalé par certains auteurs.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] : Norme Française XP P 18-540 (1997) , "Granulats - Définitions, conformité, spécifications, indice de classement : P 15-540".
- [2] : HfianeAfaf. (2018). Analyse des poutres en béton armé recyclés (Mémoire de master). Univesité Badji Mokhtare-Annaba.
- [3] : **L. J. Vicat**, (2000). Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments et gangues a pouzzolanes et de leur emploi dans toutes sortes de travaux.
- [4]:**Aitcin. P.C**, Ed. Eyrolles.(2001). Bétons haute performance.
- [5] : **Bresson.J**,(1980). Prévision des résistances, facteur de maturité, temps équivalent, Journée d'étude ITBTP du 15 novembre 1979 ; durcissement accéléré des béton, Paris, AnnInse.Tech. Batim.Trav.publics, 387,106-111.
- [6] : **Baron.J et sauterey.R**,(1982). Le béton hydraulique Connaissances et pratique, Presses de l'école des ponts et chaussées, sous la direction de Jacques Baron et Raymond Sauterey.
- [7] : CIM béton, (2000). Construction avec les bétons, Ed du Moniteur.
- [8] : **Chanvillarde. G**, (1999). Connaissances générales sur le matériau béton, Ed. Aléa.
- [9] : **Dreuxdes. G et Festa.J**,(1998). Nouveaux guides du béton et de ces constituants.
- [10] : **BaCaRa Projet Français**, (1996). Le béton compacté au rouleau, Presses de l'EcolNationale des Ponts et Chaussées, Ed. Eyrolles France.
- [11] : **Dreux. G, JeuFaesta**, (2002). Nouveau guide du béton et de ses constituants, huitième Edition, Edition Eyrolles.
- [12] : **J. M. Sganzin**, (2011). Programme ou résumé des leçons d'un cours de construction : avec des applications tirées spécialement de l'art de l'Ingénieure des ponts et chaussé.
- [13] : **R. Vittone, Bâtir**, (2010) : manuel de la construction, PPUR Presses polytechniques.
- [14] : **Ben inak Chouaib Amine**, (2014), processus de fabrication du ciment, et gestion des poussières ; Mémoire fin étude, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [15] : Norme Algérienne NA442 (2005). Liants hydrauliques- ciments courants : Composition, spécifications et critères de conformité. 2ème Edition. Institut Algérien de la normalisation.
- [16] : Norme 234. Méthodes d'essais des ciments (2008) - Détermination des résistances mécaniques. Institut Algérien de la normalisation.
- [17] : **R. Dupain- R. Lanchon et J. Saint Arroman**, (2013) : Granulats, Sols, Ciments, et Bétons, Ed Educavivre.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [18] :**Librairie Technique Technosciences**, (03 / 2009) : « Granulats sols ciments bétons. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. 344 pages.
- [19] :**R. Maillot**,(2001)."Mémento technique des Granulats", les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p.
- [20]: **Degussa Construction Chemicals France**, (2011). "La Technologie du Béton", Guf\Formation\Béton\Technobéton V05_01U, 140 p.
- [21]: **J. Baron, et R. Sautrey**, (2016). "Le béton hydraulique", Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 560 p.
- [22]: **V. Phoummavong**, (2012). "Cours en ligne matériaux de construction", Université Nationale du Laos, <http://www.la.refer.org/materiaux/>
- [23]: **A. M. Neville**, (2000). "Propriétés des bétons", traduit par le CRIB, Edition Eyrolles, 806p.
- [24]: **G. Arquie& C. Tourenq**, (2015) "Granulats", Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées, 717 p.
- [25]: **J. Alexandre& J. Sebileau**, (2013). "Laitier de haut fourneau", Centre Technique et de Promotion des Laitiers, Paris édition, 340 p.,
- [26]: **Hachaichi.S.** (2008). "Substitution de Sable roulé par les déchets de carrières et de hauts fourneaux dans le béton", Thèse de Magister, 92 p.
- [27]: Le LERM(2014), "Déchets de chantiers de bâtiment", enquête CEBTP/DEMAIN pour FFB et ADEME,
- [28]: **Ademe**, (2014) "Guide des déchets de chantiers de bâtiment", Paris,
- [29]: **Bourmatte.N.** (2005) "Granulats Recyclés de substitution pour Bétons Hydrauliques, Caractérisation, Performances, Durabilité", Thèse de Magister, Université Mentouri de Constantine, 159 p.
- [30]: **Sané.Y.** (2002), La gestion des déchets à Abidjan : Un problème récurrent et apparemment sans solution, AJEAM/RAGEE Vol.4
- [31] : Article 1 de la loi du 15 juillet 1975, modifiée par la loi n°92-646 du 13 juillet 1992.
- [32]: **Thonart.P, Diabaté.S, Hiligsmann.S.**(2015), Guide pratique sur la gestion des ménagers et des sites d'enfouissement, technique dans les pays du sud, Institut de l'énergie et de l'environnement.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[33] : Revue d'Africa2, L'économie verte au service du développement durable de l'Afrique et de ses citoyens, 2017.

[34] : **Bourmate.N.** (2017), Granulats recyclés de substitution pour béton hydraulique, thèse de doctorat, Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie.

[35] : <https://www.sirmet.fr>, site consulté le 23/02/2019.

[36] : **Château.L.** (2014), Déchets du bâtiment, Fiche technique, décembre.

[37] : <https://www.fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage>, site consulté le 24/04/2019.

[38] : [Recyclage-Encyclo-ecolo.com](https://www.fr.wikipedia.org/wiki/Recyclage) l'encyclopédie écologique, 2014.

[39] : **Djebien.R.** (2015), Formulation et propriétés du béton de sable à base de fines recyclés, thèse de doctorat, Université 20 Aout 1955- Skikda, Algérie.

[40] : **Thai-Hoa.V.** (2009), Caractérisation de la phase solide et transferts de gaz dans les milieux poreux insaturés. Etude expérimentale et modélisation appliquée à la diffusion de l'hydrogène dans les matériaux cimentaires. Spécialité Génie Civil. Université de Toulouse, Pp.24-25.

[41] : **Céréma.** (2014), Valorisation des graves de déconstruction, Guide Rhône-Alpes d'utilisation en Travaux Publics, 24 p.

[42] : **[H. Mercado-Mendoza, K. Apedo, P. Wolff, B. Fouré]**, 2018, *Poutres soumises à la flexion*. Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), *Le béton recyclé*. Marne-la-Vallée : Ifsttar, 2018. *Ouvrages Scientifiques, OSI4*

[43] : **Zhuang X.J.** (2007), Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading. J. Tongji University, 35 (11), 1445-1449.

[44] : **Choi et Yun, 2012 Choi W.C.** (2012), Yun H.D., Compressive behavior of reinforced concrete columns with recycled aggregate under uniaxial loading, Engineering Structures, 41, 285-293.

[45] : **Liu C.L., Bai G., Wang L., Quan Z.** (2010), Experimental study on the compression behavior of recycled concrete columns, 2nd International Conference on Waste Engineering and Management – ICWEM.

[46] : **Farhad Reza.** (2017, février). Evaluation of Recycled Aggregates Test Section Performance. Center for transportation Research and Implementation Minnesota State University, Mankato. 139p.

[47] : **Tolido Filho.RD., Gonçalves.JP., Americano.BB., Fairbairn.R.**, Potential for use of crushed waste calcined- clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil, Cement and Concrete Research 37 (2007) 1357- 13650.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [48] : **Lisa OksriNelfia**. (2015, Jouillat). Incorporation de fines issues de granulats recyclés dans la fabrication de nouveaux liants hydrauliques. Université de la Rochelle – UFR Science et Technologie.
- [49] : FEREDECO_www.feredeco.be.
- [50] : CSTC – Projet RECYHOUSE – Bétons structurels intérieurs.
- [51] : **Alain Richard**Atelier d'architecture (2012) / AA-AR - Maître d'ouvrage SPI+ - COMUREX SCRL Entreprise de fabrication de des blocs de parement – CORMAN HALLEUX sprl Entreprise générale de construction.
- [52] : Rapport sur la gestion des déchets solides en Algérie, Avril 2014.
- [53] : www.ansys.com. Consulté le 8 avril 2011.
- [54] : **TOUIHAR SOUMIABEN CHIOUKH HALIMA**. (2017). Mémoire de Master« Modélisation du comportement d'un élément structural en béton et en béton armé à la rupture par éléments finis : comparaison avec les essais de flexion 4 points »
- [55] : **Anthony J. Wolanski, B.S. May**,(2004). FLEXURAL BEHAVIOR OF REINFORCED AND PRESTRESSED CONCRETE BEAMS USING FINITE ELEMENT ANALYSIS, p.38.

Annexes

Annexes (A)

Aspect réglementaire et législatives de la gestion des déchets en Algérie :

Le gouvernement Algérien a décidé en 2001 de consacrer une enveloppe financière importante, de près de 970Md [35], pour atteindre les objectifs inscrits dans le plan national d'action pour l'environnement et le développement durable (PNAE-DD). Le secteur de l'environnement connaît actuellement des mutations à travers notamment le renforcement du cadre institutionnel et juridique.

- **Sur le plan de la politique environnementale,** le Plan National d'Action pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD) fixe les différents programmes environnementaux du pays. Ces politiques sont appuyées par le Fonds National de l'Environnement et de dépollution (FEDEP) qui intervient notamment pour aider les entreprises industrielles à réduire ou à éliminer leurs pollutions et les unités de collecte, de traitement et de recyclage des déchets, ainsi que par la nouvelle fiscalité écologique basée sur le principe du pollueur payeur afin d'inciter à des comportements plus respectueux de l'environnement.
- **Sur le plan législatif et réglementaire,** plusieurs lois ont été promulguées :
 - Loin n°01-19 du 12 Décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
 - Loin n°01-20 du 12 Décembre 2001 relative à l'aménagement du territoire dans le cadre du développement durable.
 - Loin n°02-02 du 05 Février 2002 relative à la protection et à la valorisation du littoral.
 - Loin n°03-10 du 19 Juillet 2003 relative à la protection de l'Environnement dans le cadre du développement durable.
 - Loin n°04-03 du 23 Juin 2004 relative à la protection des zones de montagne dans le cadre du développement durable.
 - Loin n°04-09 du 14 Août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
 - Loin n°04-20 du 25 Décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

Entrée en application de la fiscalité écologique en janvier 2005. Le montant de la taxe est de 24000DA/tonne de déchets liés aux activités de soin des hôpitaux et cliniques et de 10500DA/tonne de déchets industriels dangereux stockés.

- **Sur le plan institutionnel**, création de plusieurs organismes :

- Le Centre National des Technologies de Production plus Propres (CNTPP).
- L'Observatoire National de l'Environnement et du Développement Durable.
- L'Agence Nationale des Déchets.
- Le Conservatoire National des Formations à l'environnement
- Le Centre National de Développement des Ressources Biologiques
- Le Commissariat National du Littoral.
- Le Centre National des Technologies de Productions plus Propres.
- Le Haut Conseil de l'Environnement et du Développement Durable.

- **Lois Algériennes concernant les déchets :**

- Loi N°90-08 portant code communal.
- Loi N°01-19 du 12/12/2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Loi N°03-10 du 19/07/2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Décret exécutif n° 02-175 de la 20/05/2002 portant création de l'Agence Nationale des déchets.
- Décret exécutif n° 02-372 du 11/11/2002 relatif aux déchets d'emballages.
- Décret exécutif n° 04-199 du 19/07/2004 fixant les modalités de création, d'organisation, de fonctionnement et de financement du système public de traitement et de valorisation des déchets d'emballages « ECO-JEM ».
- Décret exécutif n° 04-410 du 14/12/2004 fixant les règles générales d'aménagement et d'exploitation des installations de traitement des déchets et les conditions d'admission de ces déchets au niveau de ces installations.
- Décret exécutif 07-205 du 30/06/2007 fixant les modalités et procédures d'élaboration, de publication et de révision du schéma communal de gestion des déchets ménagers et assimilés.

Annexes (B)

Dans ce qui suit on présente les étapes détaillées de modélisation, à titre d'exemple, d'une poutre en béton armé en utilisant le logiciel ANSYS.

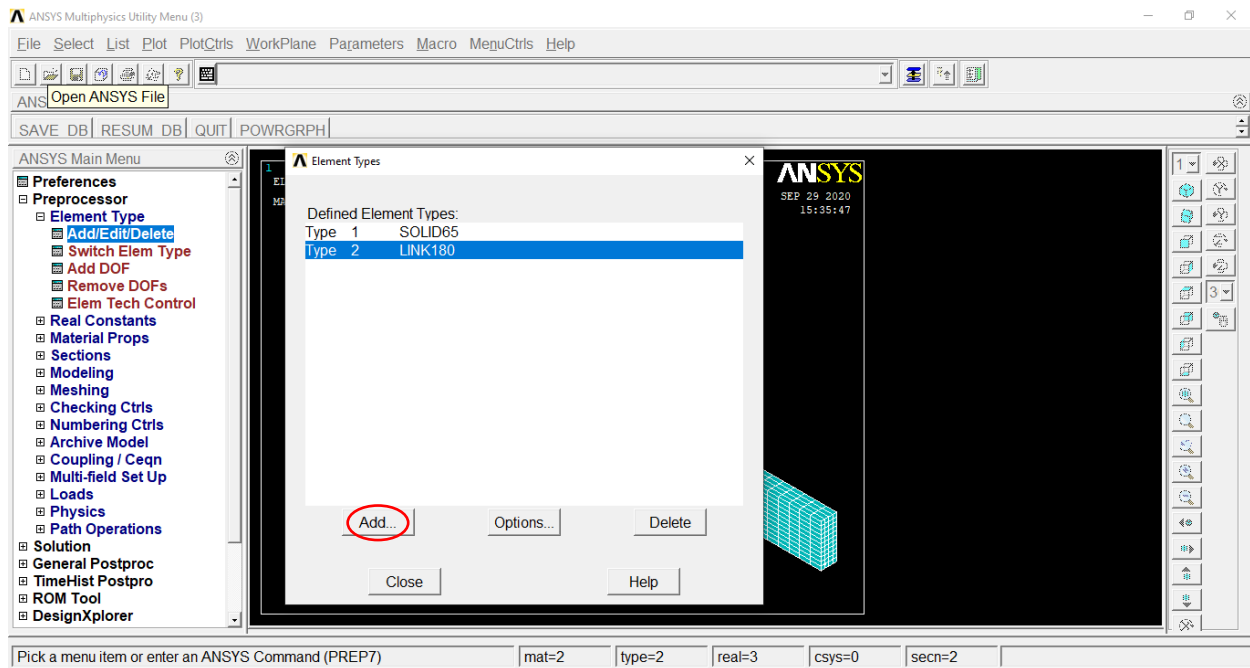
1. Définition de type des éléments

En a deux types des éléments :

- SOLID65 pour le béton
- LINK180 pour l'acier

Pour définir les types des éléments :

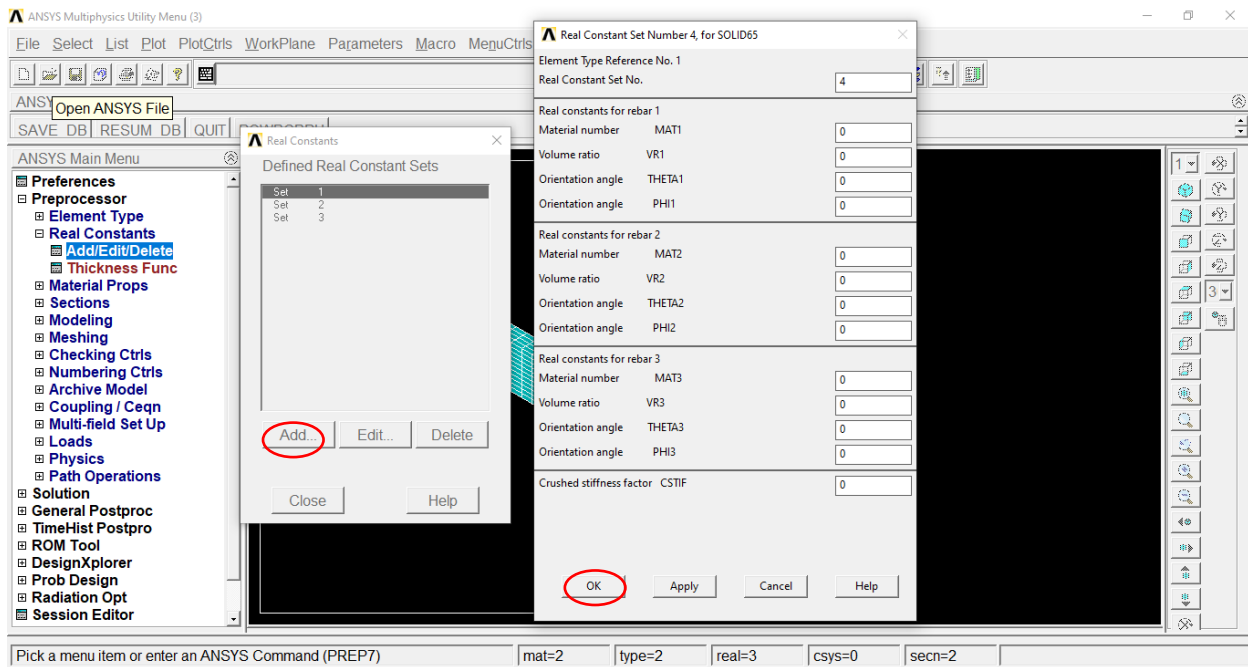
Allez dans Preprocessor> Element Type >« Add/Edit/Delete »



2. Constantes réelles

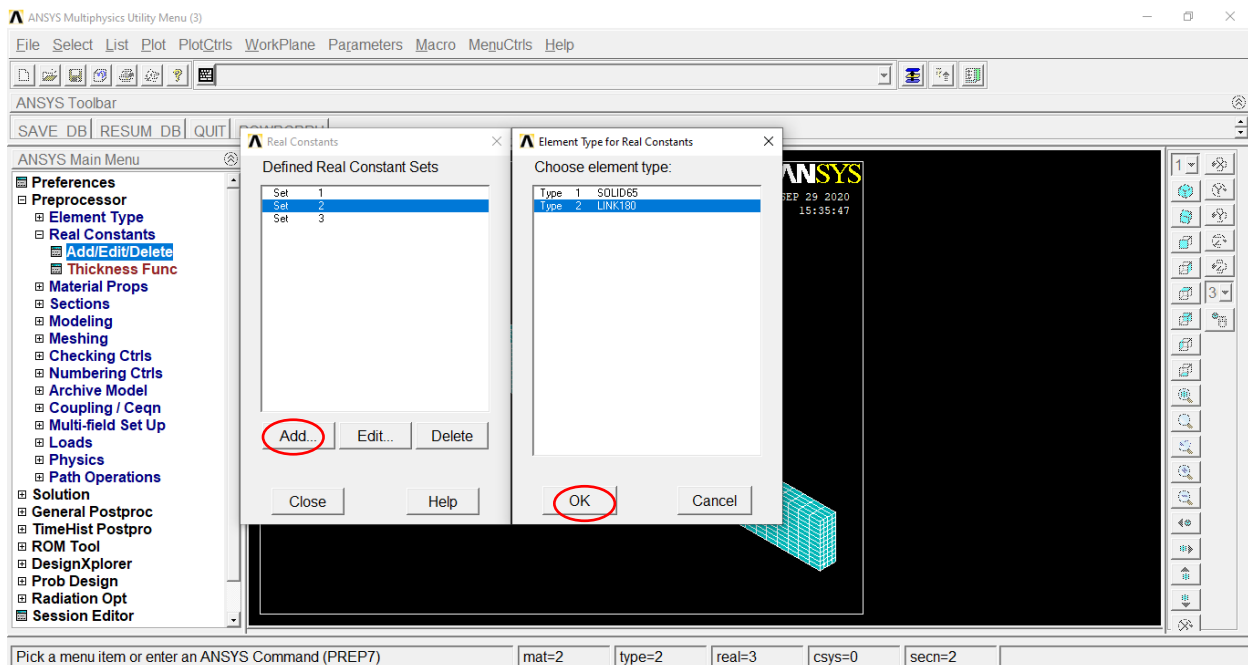
Puis il faut définir les constantes réelles pour les deux matériaux. Pour l'élément SOLID65 aucune constante réelle n'est requise dans une approche discrète, tandis que pour LINK 180 nécessite les données de la section.

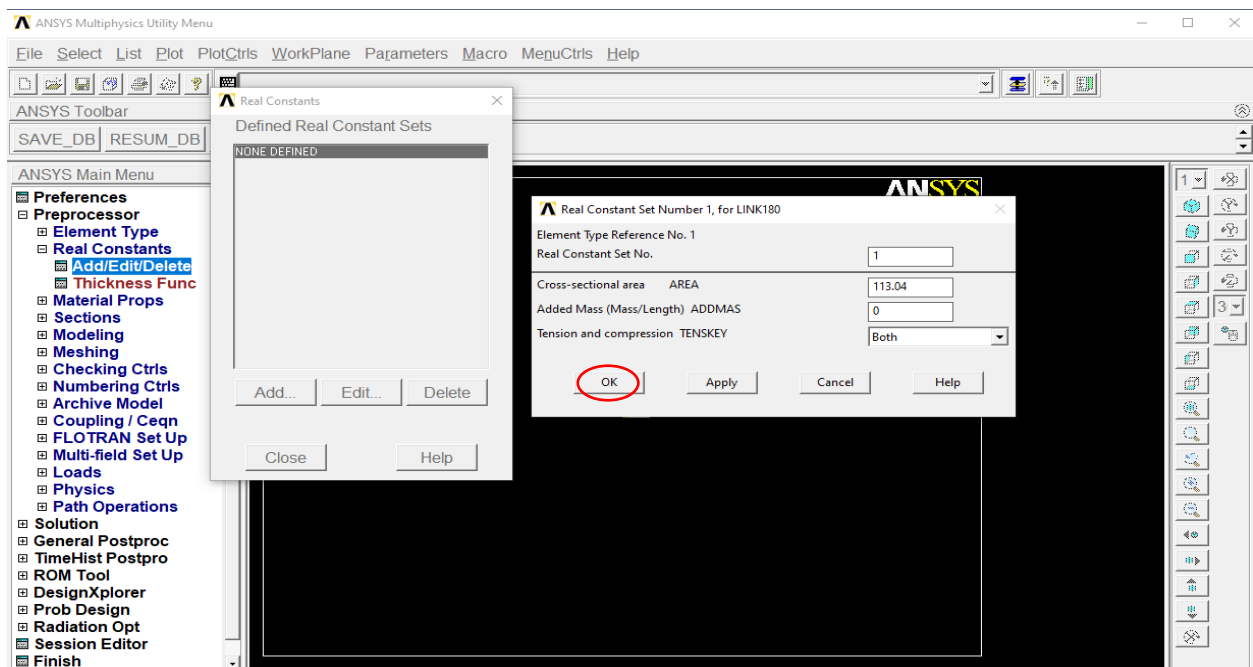
Allez dans Real Constants >« Add/Edit/Delete »>Set 1> ADD> Type 1 choisissez SOLID65



Pour Acier

Allez dans Real Constants >« Add/Edit/Delete »>Set2> ADD> Type 2 choisissez LINK180

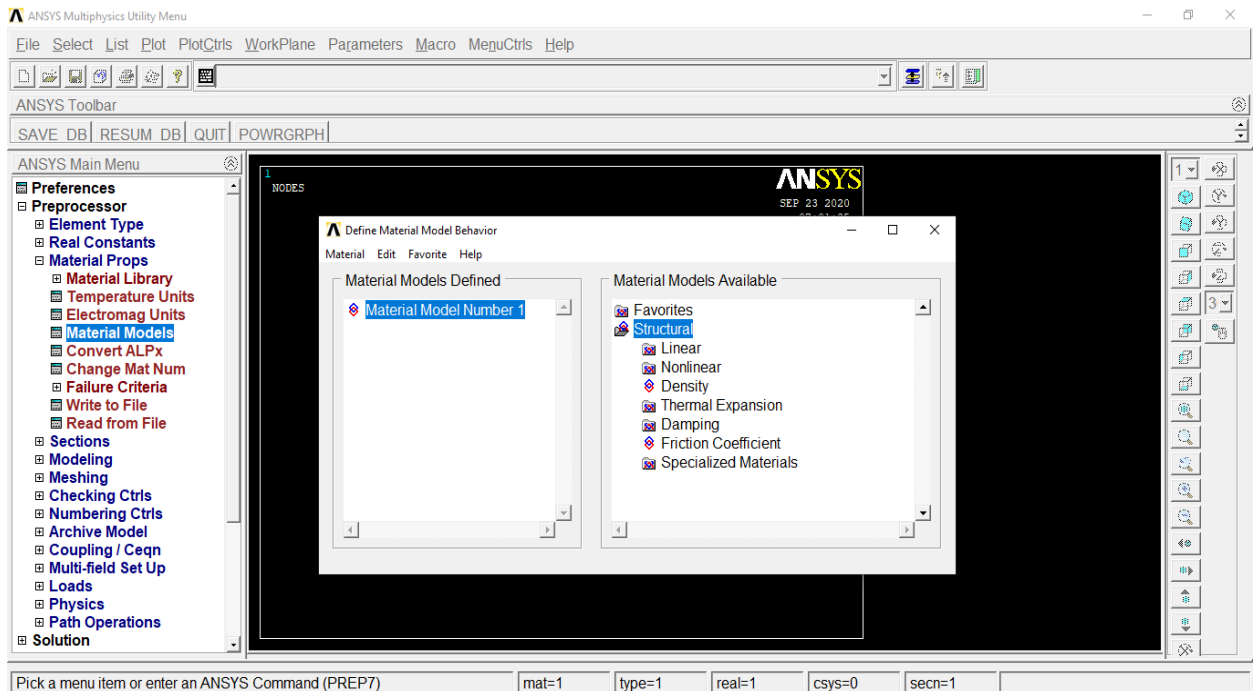




3. Propriété des matériaux

Et maintenant nous sommes sur le point de définir les propriétés du béton et de l'acier. On suit les étapes ci-dessous :

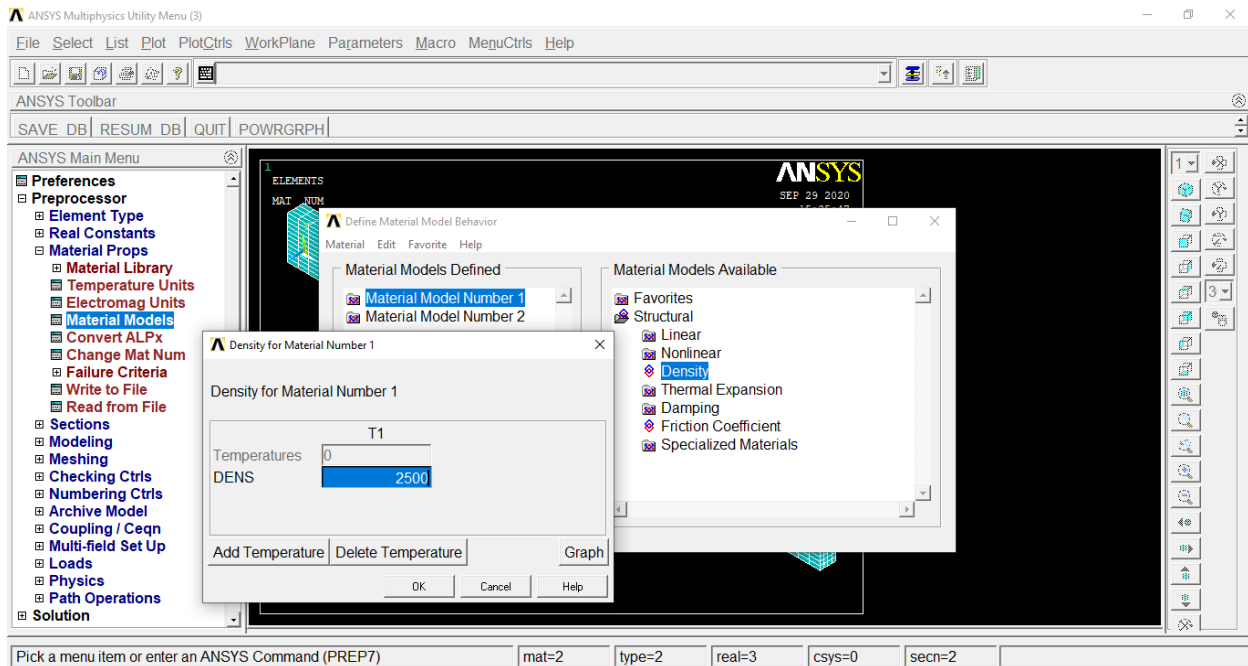
Allez à >Preprocessor>Material Props>Material Models, et définir les propriétés suivantes :



3.1. Matériel Number-1

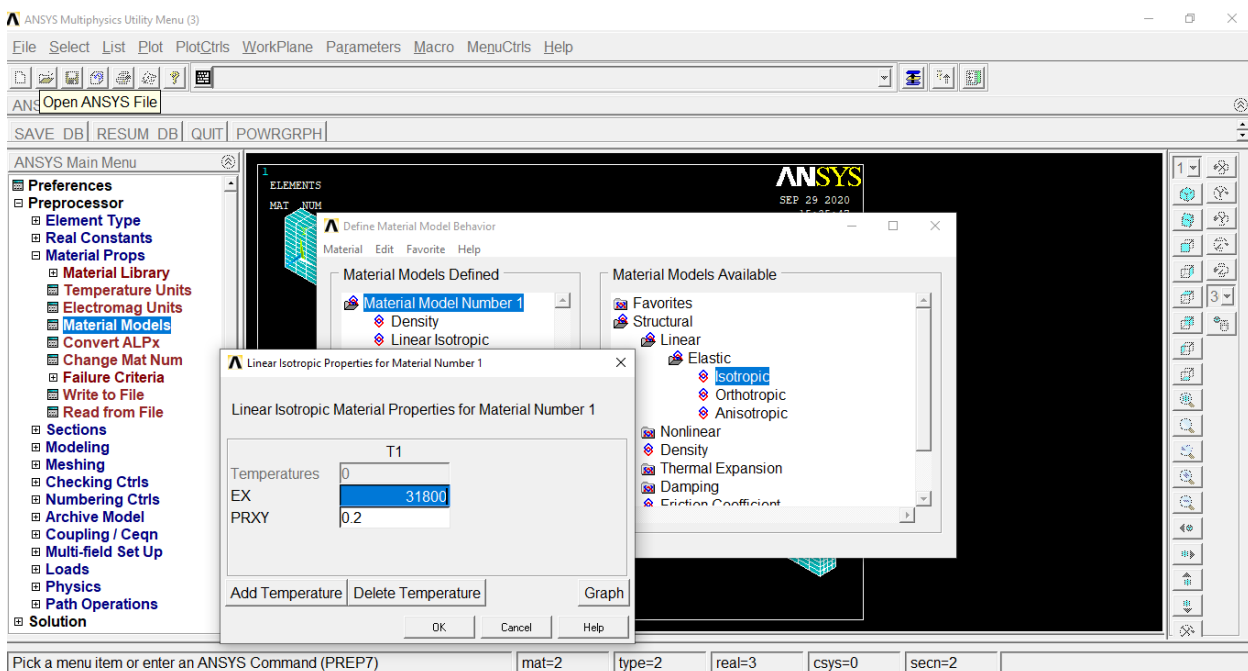
3.1.1 Densité

Allez a >Preprocessor>Material Props>Material Models>Density



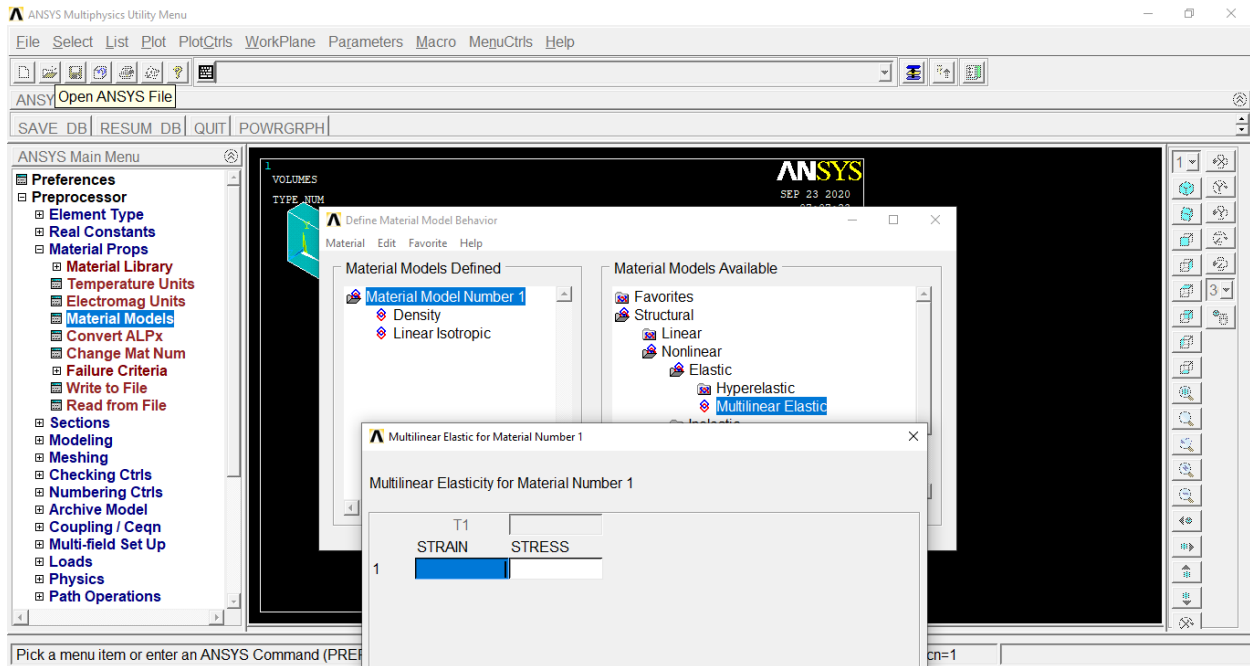
3.1.2 Isotropie linéaire

Allez a >Preprocessor>Material Props>Material Models>Linear>Elastic>Isotropic



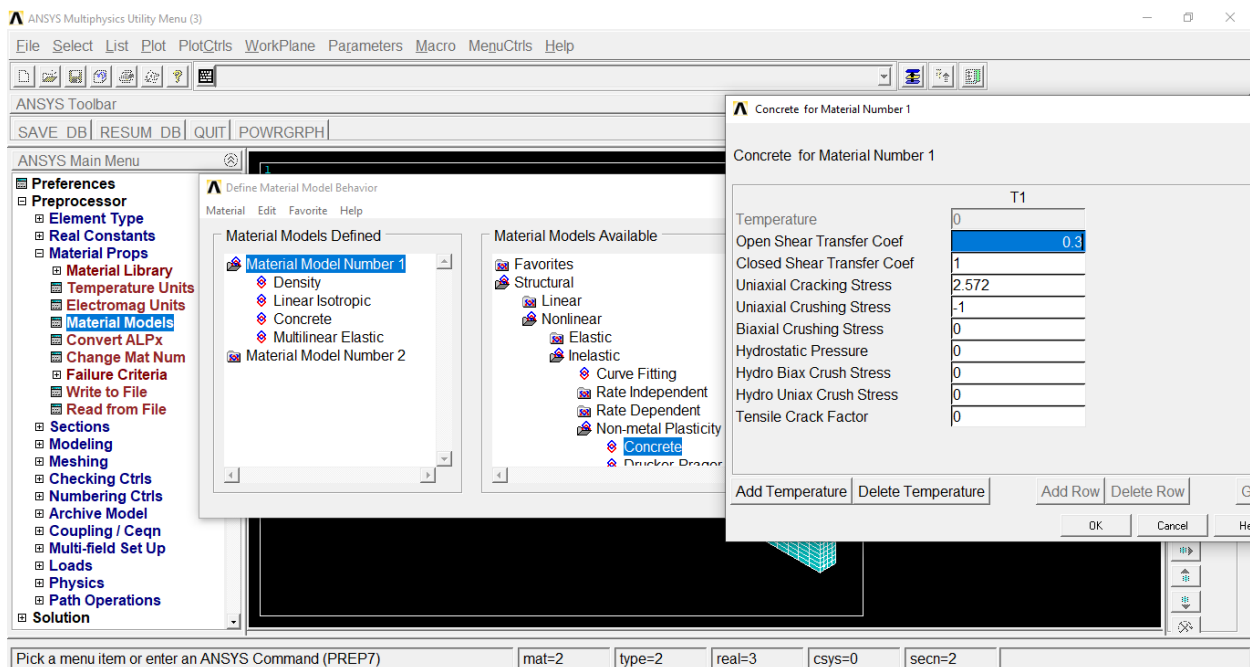
3.1.3 Élastique multi-linéaire

Allez a >Preprocessor>Material Props>Material Models>NonLinear>Elastic>Multilinear



3.1.4 Béton

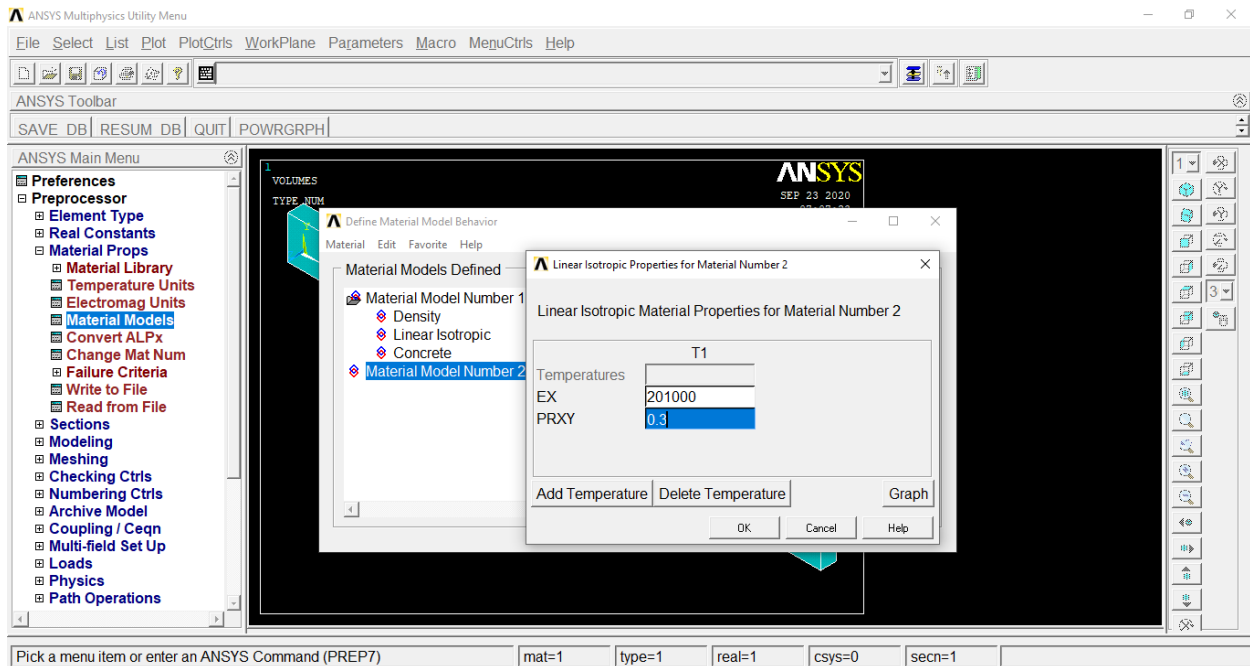
Allez a >Preprocessor>Material Props>Material Models>NonLinear>Inelastic>Non-Metal Plasticity>Concrete



3.2 Matériel Numéro 2

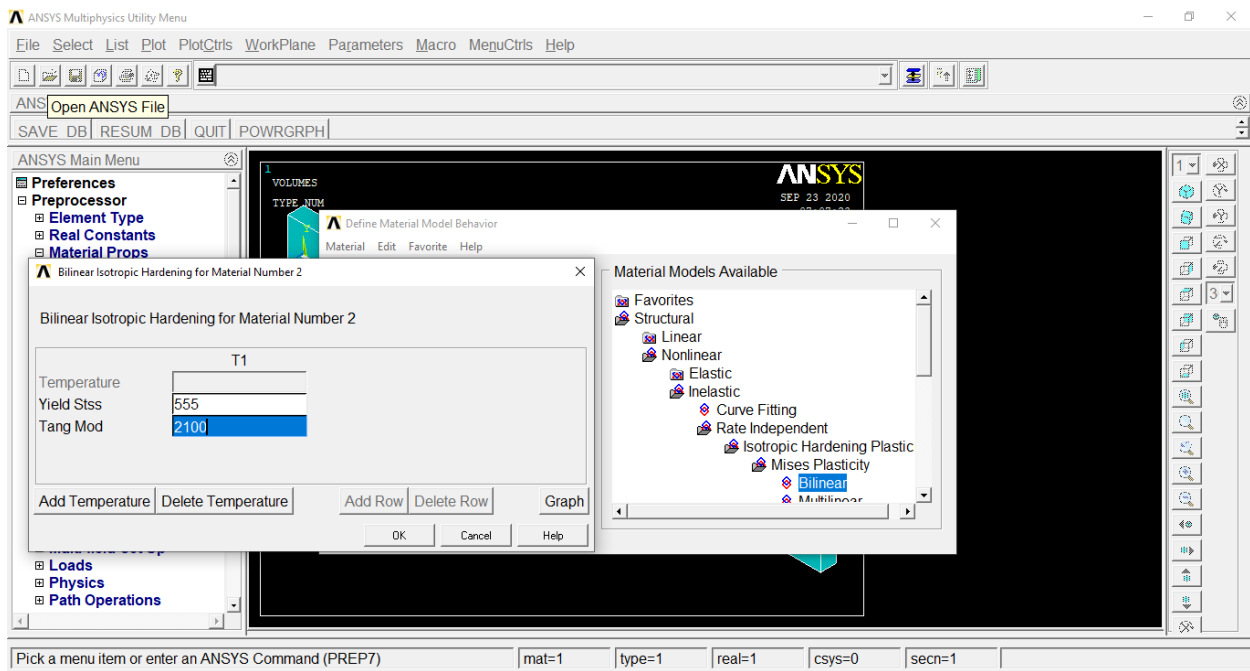
3.2.1 Isotrope linéaire

Aller a >Preprocessor>Material Props>Material Models>Linear>Elastic>Isotropic



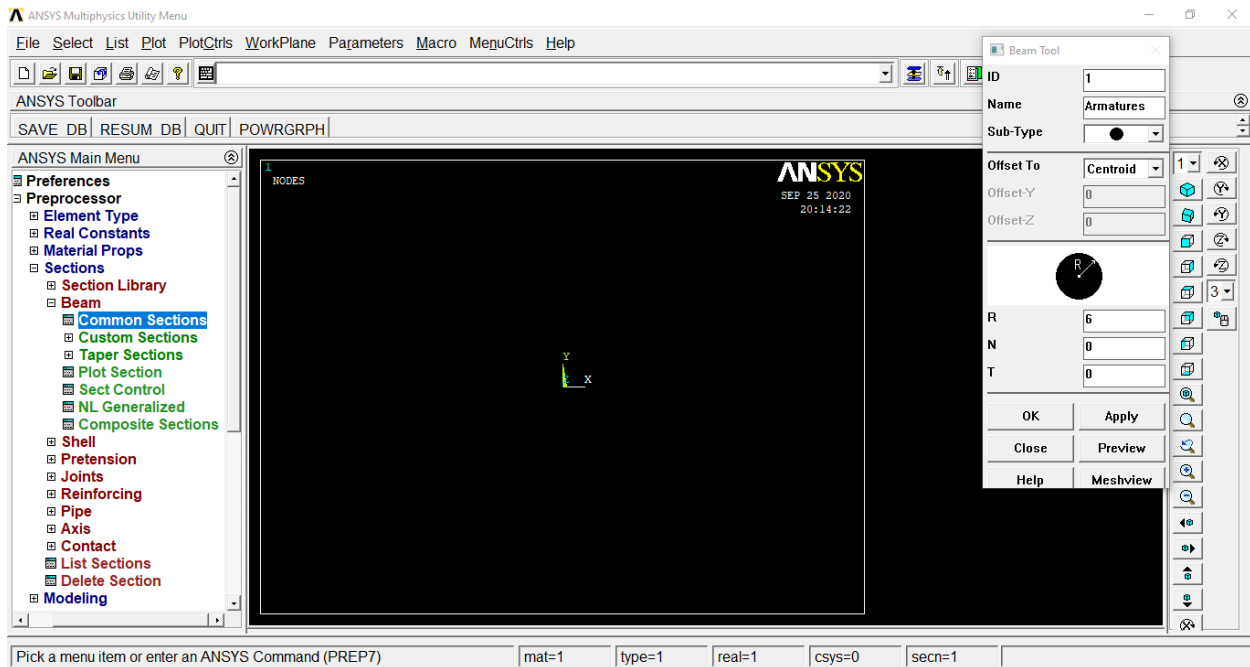
3.2.2 Isotrope bilinéaire

Allez a >Preprocessor>Material Props>Material Models>NonLinear>Inelastic>Rate independent>Isotropic Harding Plastic>Mises Placticity>Bilinear



4. Section

Dans cette partie on définit la section des armatures
Aller a : Sections> Beam> common Sections

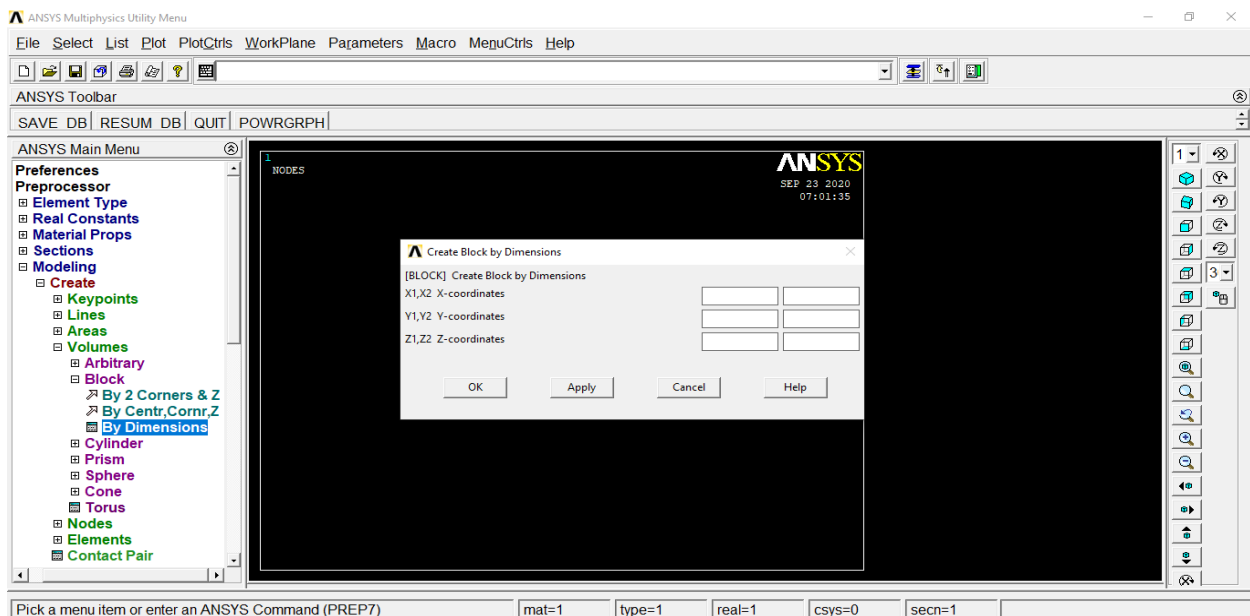


5. Géométrie de la poutre

5.1 Béton

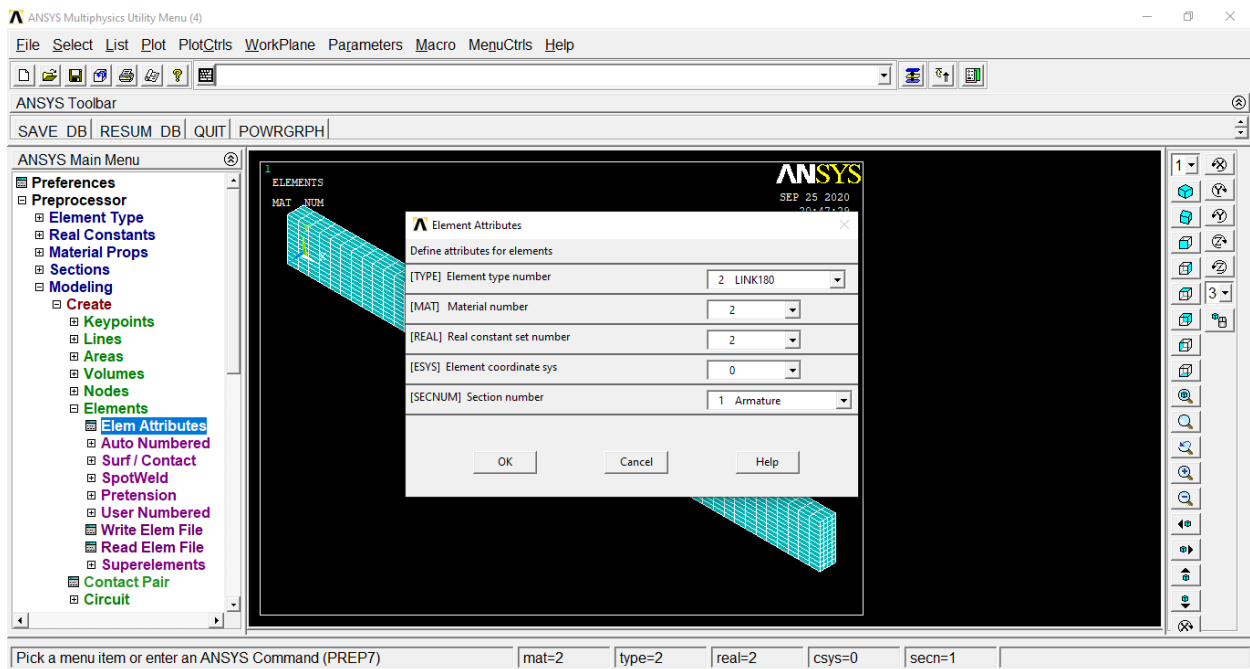
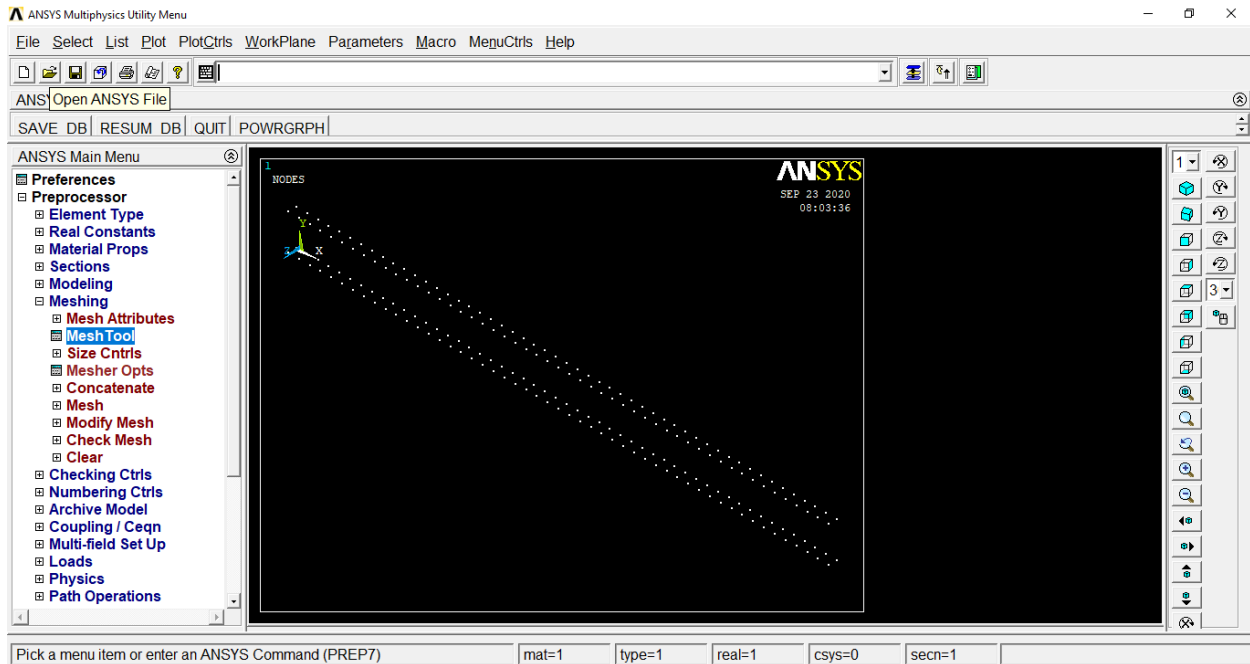
On définit la section de la poutre (béton) a partir de ses dimensions (5000X400X150) en suivant les étapes ci-dessous :

Aller à : PreProcesso>Modeling>Create>Volumes>Block>By Dimensions



5.2. Acier

Pour tracer les lignes des armatures il faut sélectionner tous les nœuds dans la ligne d'armature et lier cette ligne par l'élément LINK180, où la section précédemment définit

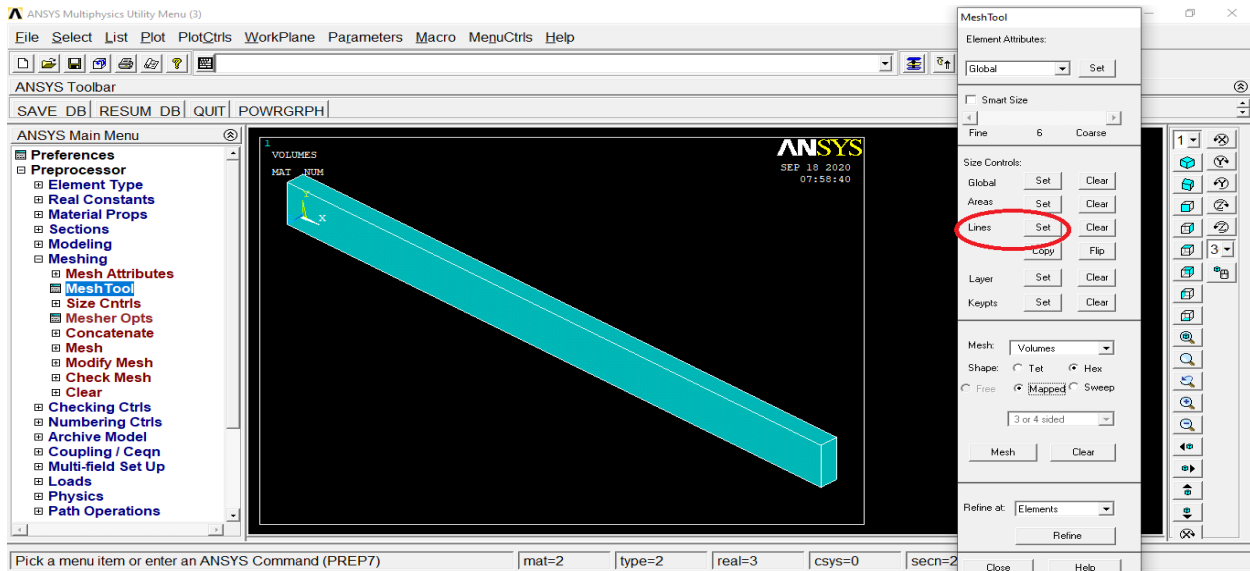


6. Maillage

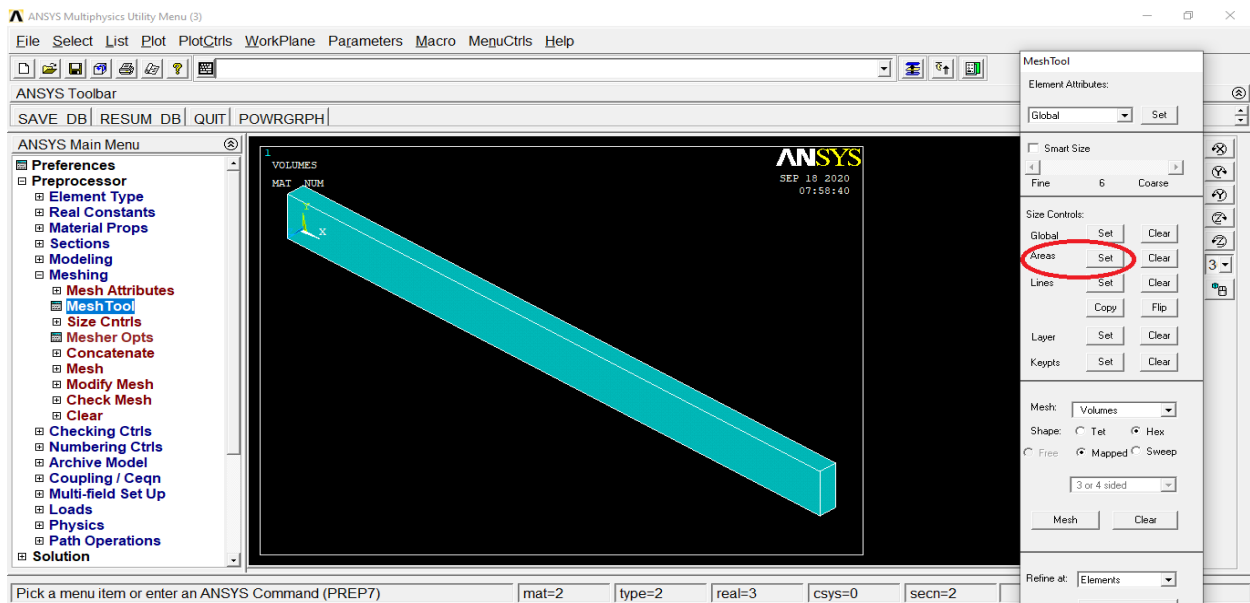
On a généré le maillage en utilisant les éléments SOLID 65 et LINK180 de telle sorte que les nœuds des éléments des barres d'acier et les éléments du béton partagent les mêmes nœuds.

Nous avons utilisé deux méthodes pour la taille de maillage :

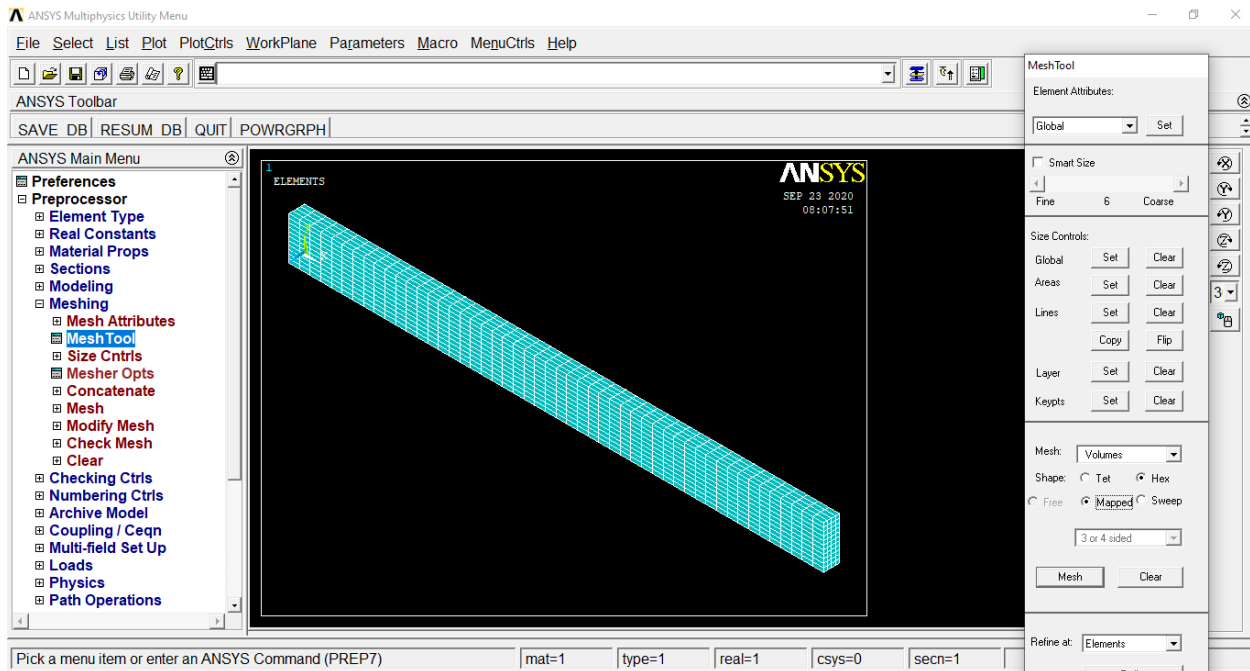
➤ Avec des lignes



➤ Avec surfaces :



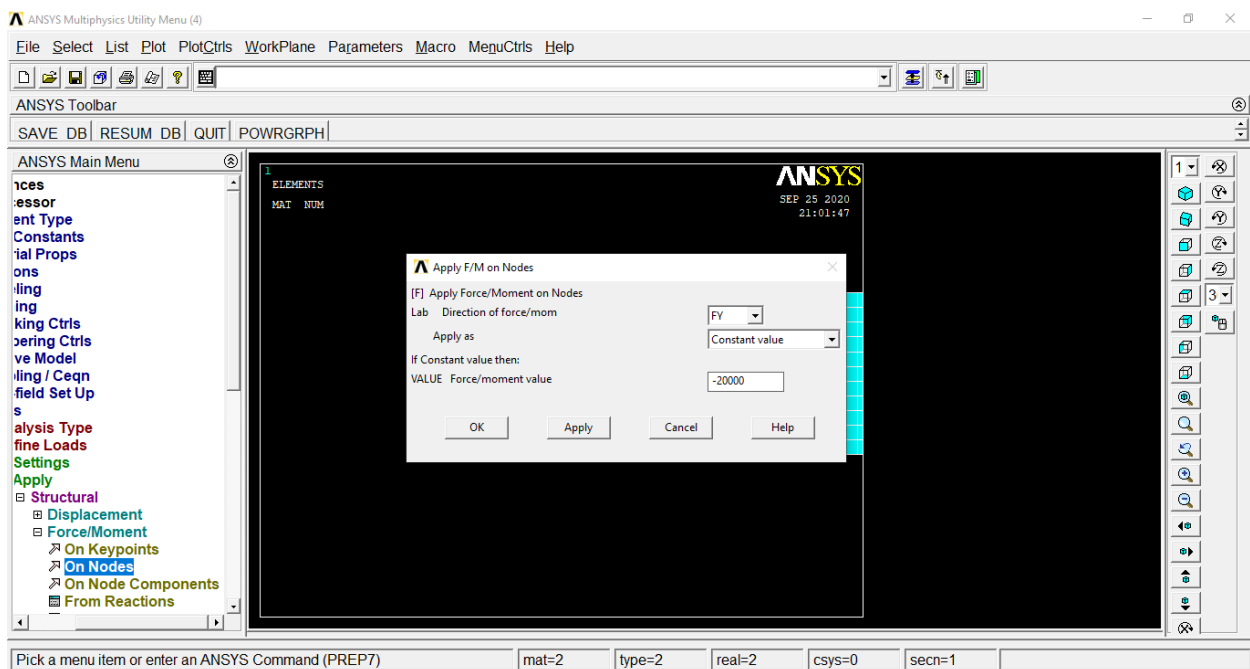
Puis sélectionner « Shape → Hex » ensuite cliquez sur « mesh »



7. Chargement

On applique la force sur les nœuds comme suit:

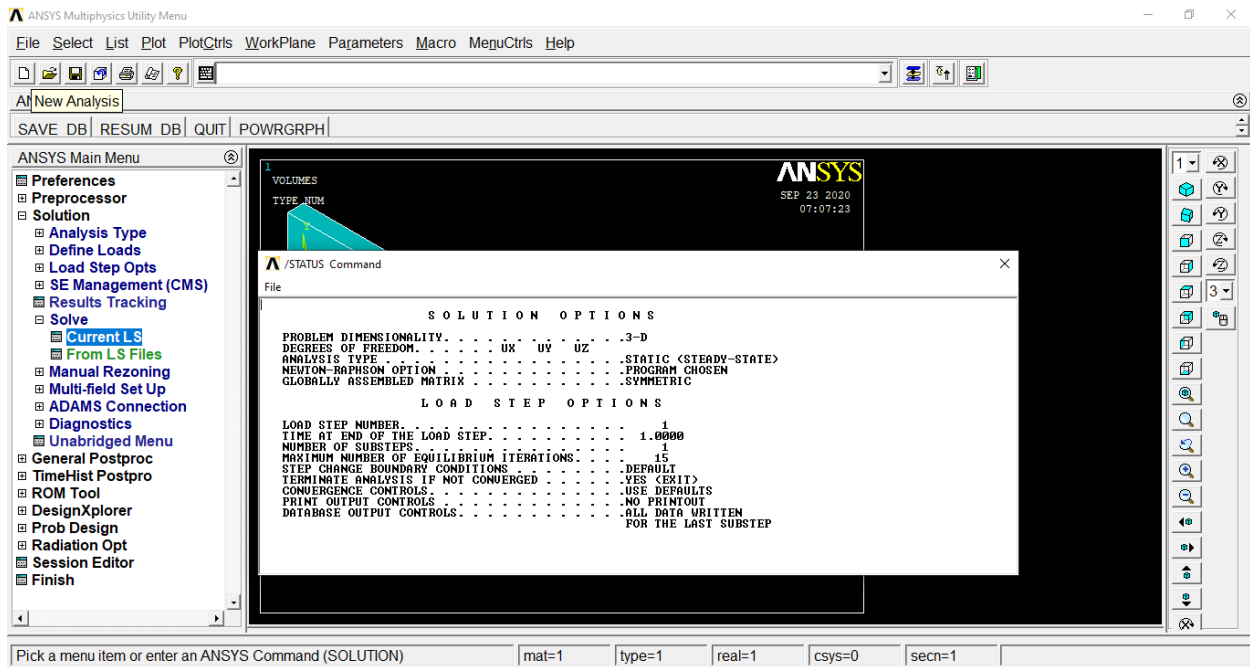
PreProcessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Force Moment>on Nodes



8. Solution

Pour lancer le calcul allez a :

Solution>Solve>Current LS



9. Analyse des résultats :

Pour afficher la déformée de la poutre aller à :

General PostProc>Result Viewer> puis sélectionner Y-Déplacement

