



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة المدنية
Département of Civil Engineering



N° d'ordre : M/GC /2025

Mémoire de Master académique

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Etude des caractéristiques physico-mécaniques Des mortiers à base de granulats de sable recyclé

Présenté par :

CHABANE LOUBNA et ALOUANE KAMILIA

Présidente : MOSTEFA Fouzia	M.C.B	UMAB Mostaganem
Examineur : GUERZOU Torkia	M.C.B	UMAB Mostaganem
Encadrant : MEBROUKI Abdelkader	Professeur	UMAB Mostaganem

Année Universitaire : 2024/ 2025

Remerciements :

Tout d'abord, nous remercions Dieu, le Tout Puissant, de nous avoir donné la volonté et le courage afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.

Ensuite, nous remercions nos parents qui nous ont soutenus beaucoup pendant toute la vie et qui continuerons à nous aider dans tous les projets de l'avenir.

Ainsi que tous les membres de nos familles qui ont participé de près ou de loin à nous encourager et nous aider dans notre projet

Un grand merci à notre encadrant, le Professeur **MEBROUKI Abdelkader**. Nous Lui adressons toute notre reconnaissance pour ses réflexions scientifiques et ses Nombreux conseils qui ont contribué au bon avancement de ce travail. Nous avons particulièrement apprécié sa disponibilité son soutien.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements à chacun des membres du jury, Docteur **MOSTEFA Fouzia** et Docteur **GUERZOU Torkia** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en Acceptant de juger ce travail.

Nous remercions sincèrement Monsieur, Monsieur **KHLIFA Belkacem**

Responsable du laboratoire sol et géotechnique.

Nous tenons aussi à remercier tous les Enseignants du Département de Génie

Civil qui a contribué à notre formation.

Dédicace :

Dédicaces Je dédie ce travail A nos parents et à notre famille qui m'ont soutenu seulement durant la préparation de ce travail, mais aussi dès le premier jour qu'on a vu la lumière de ce monde.

A tous nos amis de la promotion de 2ème année Master Matériaux en Génie Civil 2024/2025
A toute l'équipe du laboratoire de génie civil de l'université de MOSTAGANEM a tous ceux qui aiment et respectent le droit du savoir

Résumé :

Les mortiers de ciment sont largement utilisés dans le bâtiment pour leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. L'incorporation de granulats de sable recyclé (GSR) peut influencer leurs performances, tout en contribuant à une construction plus durable. Cette étude vise à évaluer l'impact du remplacement partiel du sable naturel par du GSR à des taux de 0% (référence), 10%, 20% et 30% sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers.

Les essais réalisés incluent la mesure des résistances mécaniques (compression et traction) aux âges de 2, 7, 14 et 28 jours, ainsi que l'analyse de l'absorption d'eau unidirectionnelle, des pertes de masse et du suivi de la consommation d'eau durant l'hydratation. Les résultats montrent que la substitution du sable naturel par du GSR affecte progressivement les caractéristiques des mortiers. Une substitution jusqu'à 20% peut maintenir des performances mécaniques acceptables, tandis qu'au-delà (30%), une réduction significative des résistances est observée.

Par ailleurs, l'absorption d'eau augmente avec le taux de GSR en raison de la porosité accrue des granulats recyclés. Les mesures d'hydratation révèlent également des modifications dans la cinétique de prise, liées à la capacité absorbante des GSR. En conclusion, cette étude démontre que l'utilisation de sable recyclé jusqu'à 20% offre un compromis viable entre performance mécanique et durabilité, favorisant ainsi l'économie circulaire dans les matériaux de construction.

Mots-clés : Mortier, granulats de sable recyclé, résistance mécanique, absorption d'eau, hydratation.

ملخص:

تُستخدم ملاطات الأسمنت على نطاق واسع في البناء نظرًا لخصائصها الميكانيكية ومتانتها. يمكن لدمج الركام الرملي المعاد تدويره (GSR) أن يؤثر على أدائها، مع المساهمة في تحقيق بناء أكثر استدامة. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير استبدال الرمل الطبيعي جزئيًا بـ GSR بنسب 0% (عينة مرجعية)، 10%، 20%، و30% على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للملاطات. شملت الاختبارات قياس المقاومة الميكانيكية (الضغط والشد) في أعمار 2، 7، 14، و28 يومًا، بالإضافة إلى تحليل امتصاص الماء أحادي الاتجاه، فقدان الكتلة، ومراقبة استهلاك الماء أثناء عملية التميؤ. أظهرت النتائج أن استبدال الرمل الطبيعي بـ GSR يؤثر تدريجيًا على خصائص الملاط. يمكن لنسبة استبدال تصل إلى 20% أن تحافظ على أداء ميكانيكي مقبول، في حين أن النسب الأعلى (30%) تؤدي إلى انخفاض ملحوظ في المقاومة. كما لوحظ زيادة في امتصاص الماء مع ارتفاع نسبة GR بسبب المسامية العالية للركام المعاد تدويره. كشفت قياسات التميؤ أيضًا عن تغييرات في حركية التصلب، مرتبطة بقدرة امتصاص GSR للماء. في الختام، تثبت هذه الدراسة أن استخدام الرمل المعاد تدويره بنسبة تصل إلى 20% يوفر توازنًا مقبولًا بين الأداء الميكانيكي والمتانة، مما يعزز الاقتصاد الدائري في مواد البناء. الكلمات المفتاحية: الملاط، الركام الرملي المعاد تدويره، المقاومة الميكانيكية، امتصاص الماء، التميؤ.

Abstract:

Cement mortars are widely used in construction due to their mechanical properties and durability. The incorporation of recycled sand aggregates (RSA) can influence their performance while contributing to more sustainable construction. This study evaluates the impact of partially replacing natural sand with RSA at rates of 0% (reference), 10%, 20%, and 30% on the physico-mechanical properties of mortars.

The conducted tests included measuring mechanical strength (compression and tension) at 2, 7, 14, and 28 days, as well as analyzing unidirectional water absorption, mass loss, and monitoring water consumption during hydration. The results show that replacing natural sand with RSA progressively affects mortar characteristics. A substitution rate of up to 20% maintains acceptable mechanical performance, while higher rates (30%) lead to a significant reduction in strength.

Additionally, water absorption increases with higher RSA content due to the greater porosity of recycled aggregates. Hydration measurements also reveal changes in setting kinetics related to the water absorption capacity of RSA. In conclusion, this study demonstrates that using recycled sand at up to 20% provides a viable balance between mechanical performance and durability, promoting circular economy practices in construction materials.

Keywords: Mortar, recycled sand aggregates, mechanical strength, water absorption, hydration.

SOMMAIRE /Table de Matière :

REMERCIEMENTS I

DEDICASEII

RESUMES..... III

SOMMAIRE.....V

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....VI

LISTE DES TABLEAUX.....XIV

LISTE DES FIGURES.....XVI

INTRODUCTION GENERALE.....1

Chapitre 01 : Synthèse bibliographiques

1. Introduction :..... 17

2. Définition :..... 17

3. Les mortiers : 18

3.1 Généralités.....18

3.2 Définition des mortiers : 18

3.3 Caractéristiques principales d'un mortier : 19

3.4 Les Constituants des mortiers : 19

 3.4.1 Les ciments.....20

 3.4.2 La chaux :..... 20

 3.4.3 Les sables :..... 20

 3.4.4 L'eau de gâchage : 21

 3.4.5 Les adjuvants : 21

3.5 Les différents types des mortiers : 21

 3.5.1 Les mortiers de ciment Portland : 21

 3.5.2 Les mortiers de chaux : 22

 3.5.3 Les mortiers bâtards :..... 22

 3.5.4 Mortier de terre : 22

 3.5.5 Mortier de chaux grasse : 23

 3.5.6 Mortier rapide : 23

 3.5.7 Mortier de plâtre : 23

 3.5.8 Mortier réfractaire : 23

 3.5.9 Mortier industriel : 24

3.6	Caractéristiques des mortiers :	24
3.6.1	Maniabilité :	24
3.6.2	Perméabilité :	24
3.6.3	Conditions d'hydratation :	24
3.6.4	Déformabilité :	24
3.6.5	Retrait :	25
3.6.6	Adhérence :	25
3.6.7	Durabilité :	25
4.	Les sables des granulats recyclés :	25
4.1	Introduction.....	25
4.2	Les propriétés et performances.....	26
4.3	Avantage environnementaux et économique.....	26
5.	Caractéristiques des mortiers à base de sable recyclés à l'état frais.....	27
6.	Exemple chiffré.....	28
7.	Caractéristiques des mortiers à base de sable recyclé à l'état durci :	28
7.1	Les propriétés mécaniques	29
7.2	Durabilité	29
7.3	Comportement microstructural:	29
7.4	Retrait et fluage.....	30
7.5	Solutions d'amélioration.....	30
7.6	Les performances comparatives	30
7.7	Applications recommandées	31
8.	Conclusion	31

Chapitre 02 : Matériaux et Méthodes

Introduction :	.....	34
I. Les matériaux utilisés :	.....	34
1 Le ciment :	.....	34
1.1 Composition du ciment :	.....	35
1.2 Autres constituants des ciments :	.....	35
1.3 Caractéristiques du ciment :	.....	35
1.4 Essais sur le ciment :	.....	37

1.4.1 La masse volumique apparente et absolue du ciment :.....	37
2. Le sable :.....	37
2.1 Caractéristiques physico-chimiques :	38
2.2 Propriétés physiques :	38
2.3 Les types de sables utilisés :	38
2.3.1 Le sable de mer :.....	38
2.3.2 Sable de carrière :	39
2.3.3 Le sable recyclé :	39
2.4 Les caractéristiques des sables :.....	39
2.4.1 Analyse granulométrique : (NF P 18-304)	39
2.4.2 Module de finesse : (NF P 18 304).....	40
2.4.3 Caractéristique physico-chimiques des sables :.....	43
3. L'eau de gâchage :	46
4. L'adjuvant :.....	47
5. Le mortier :	47
5.1 Formulation et conservation des éprouvettes :.....	477
5.2 Confection des mortiers :.....	49
5.3 Matériels utilisées pour la confection des éprouvettes :	49
II. Procédures expérimentales :.....	Erreur ! Signet non défini. 0
1. Préparation des éprouvettes et déroulement des essais :.....	50
2. Les essais sur mortiers :	51
2.1 Essai de résistances à la traction :	51
2.2 Essai de mesure des résistances à la compression :	52
6. Conclusion	54
Chapitre 03 : Résultats et Analyse	
Introduction :.....	58
1 Résultats des essais sur mortiers à l'état durci :.....	58
1.1 Essais de résistances mécaniques :	58
1.1.1 Résultats sur les essais de traction par flexion :.....	59
1.1.2 Résultats sur les essais de compression :	60
1.1.3 Evolution des résistances à la traction par flexion et à la compression:.....	62
2. Variations et Pertes de masses :.....	63
3. Absorption capillaire.....	66

4. Absorption d'eau par hydratation	68
5. Conclusion	71
Conclusion générale	72

La liste des symboles et abréviation :

E/C : Rapport massique de l'eau sur ciment.

M : la masse

V : le volume

T : Température mesurée (C°)

MF : Module de finesse

ESP : équivalent de sable mesuré au piston.

ESV : équivalent de sable visuel mesuré visuellement

Ps: Masse volumique absolue

ρ_{ap} : Masse volumique apparente

Rc : Résistance à la compression en MPa.

Rt : Résistance à la traction en MPa.

SGR : Sable de granulats recyclés

GRS : Granulate Recycled Sand

La liste des figures :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Figure I-1 : Exemple d'un mortier	19
Figure I-2: Exemple d'un ciment.....	20
Figure I-3: Exemple d'un Adjuvant -SIKAPLAST BV40.....	21
Figure I-4: Mortier de terre	23
Figure I-5 : Exemple de sable granulat recyclé.....	26

Chapitre II : Matériaux et méthodes

Figure II-1 : Échantillon de ciment (CPA CEM II 42.5).....	35
Figure II-2 : Les étapes de détermination de la masse volumique absolue du ciment.....	38
Figure II-3 : Sable de mer.....	39
Figure II-4 : Sable de carrière.....	40
Figure II-5 : Sable de granulat recyclé (SGR).....	40
Figure II-6 : Essai de granulométrie de sable de mer.....	41
Figure II-7 : Courbes granulométriques des différents sables utilisés	43
Figure II-8 : Mélanges des trois sables utilisés	44
Figure II-9 : Eprouvettes de l'essai de l'équivalent de Sable	44
Figure II-10 : Echantillon de sable de carrière	46
Figure II-11 : Entonnoir et balance servant aux mesures.....	46
Figure II-12 : Récipient rempli servant à la mesure du volume du sable de carrière.....	47
Figure II-13 : Procédure de détermination du coefficient d'absorption du (SGR)	49
Figure II-14 : Malaxeur à mortier.....	50
Figure II-15: Moules pour les éprouvettes de mortier.....	50
Figure II-16 :Appareil de vibration	50
Figure II-17 : Machine d'essai flexion compression	51
Figure II-18 : Dispositif de l'essai de traction	51
Figure II-19 : Dispositif de l'essai de compression	53

Chapitre III : Résultats et Analyse

Figure III-1a : Variation des résistance à la traction des différents mortiers	59
Figure III-1b: Résistance à la traction des mortiers avec et sans (SGR).....	60
Figure III-2 a: Variation des résistances à la compression des différents mortiers.....	61
Figure III-2b: Résistances à la compression des mortiers avec et sans (SGR)	61
Figure III-3 a : Evolution des résistances à la traction	62
Figure III-3 b : Evolution des résistances à la compression.....	63
Figure III-4 : Variation des masses des mortiers.....	64
Figure III-5 : Pertes de masses des différents mortiers.....	65
Figure III-6 : Essai de mesure de l'absorption capillaire unidirectionnelle.....	66
Figure III-7 a : Courbes de variation de l'absorption capillaire unidirectionnelle.....	67
Figure III-7 b : Histogramme de variation de l'absorption capillaire unidirectionnelle	68
Figure III-8 :Suivi de l'hydratation pour les différents mortiers.....	69
Figure III-9 : Diminution des masses des différents mortiers	69
Figure III-10 a : Courbes de diminutions des masses comparées aux masses de départ	70
Figure III-10 b : Histogramme de diminution des masses comparées aux masses de départ ..	70

La liste des tableaux :

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Tableau I-1 :Influence du type de sable sur les caractéristiques des mortiers.....	28
Tableau I-2: Solution d'amélioration des caractéristiques des mortiers.....	30
Tableau I-3 : Mortier standard vs recyclé (28 jours).....	30

Chapitre II : Matériaux et Méthodes

Tableau II-1 : Paramètres physico-mécaniques du ciment.....	36
Tableau II-2 : Caractéristique chimiques du ciment	37
Tableau II-3 : Caractéristique mécanique du ciment.....	37
Tableau II-4 : Caractéristiques minéralogiques du ciment.....	37
Tableau II-5 : Classement du sable	41
Tableau II-6 : Analyse granulométrique du sable de carrière	42
Tableau II-7 : Analyse granulométrique du sable de mer	42
Tableau II-8: Essai d'équivalent de sable de carrière	44
Tableau II-9 : Masse volumique absolue et apparente des granulats	47
Tableau II-10 : La formulation des mortiers normalisés	48
Tableau II-11 : Opérations de malaxage du mortier normal	49

Chapitre III: Résultats et Analyse

Tableau III-1 : Résultats des essais de traction par flexion.....	59
Tableau III-2: Résultats des essais de la compression	61
Tableau III-3 :Variation des masses des mortiers	64
Tableau III-4 :Pertes des masses des différents mortiers	65
Tableau III-5 : Variation des masses due à l'absorption capillaire	66
Tableau III-6 : Pourcentage des augmentation des absorption capillaire.....	67
Tableau III-7 : Variation des mesures par hydratation.....	69
Tableau III-8 :Compararison des masses volumiques des produits hydratés.....	70

Introduction Générale

Les mortiers de ciment, composés de ciment, de sable et d'eau, sont largement utilisés dans la construction pour diverses applications telles que la maçonnerie, le revêtement de sol et la réparation des structures. Cependant, ces mortiers traditionnels ont tendance à présenter des caractéristiques limitées en termes de résistance à la fissuration et de durabilité.

Le secteur de la construction génère des quantités considérables de déchets, représentant environ 30% de la production mondiale selon les estimations (d'Akhtar et Sarmah (2018)).

Cette problématique environnementale majeure a conduit à l'apparition de solutions alternatives, notamment l'utilisation de granulats recyclés (GR) dans la fabrication de mortiers. La directive européenne 2008/98/CE impose d'ailleurs un objectif ambitieux de 70% de recyclage des déchets de construction d'ici 2030, soulignant l'urgence de développer des matériaux plus durables.

Les granulats recyclés, principalement issus de la déconstruction de bâtiments et d'infrastructures, offrent une alternative encourageante au sable naturel dont l'extraction atteint des niveaux alarmants - 40 milliards de tonnes par an selon le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (2019) (UNEP, 2019). Cependant, leur incorporation dans les mortiers pose des défis techniques importants en raison de leurs caractéristiques spécifiques.

Les sables issus des granulats recyclés sont des matériaux alternatifs aux sables naturels, ils constituent une solution pour la diminution des ressources naturelles participant ainsi à la protection de l'environnement.

Dans ce contexte, des études faites sur la valorisation des déchets de déconstruction en tant que graviers, sables ou fines. Leurs utilisations dans les bétons et les mortiers sont doubles, d'une part protéger l'environnement et diminuant les surconsommations des ressources naturelles et d'autre part, améliorer les caractéristiques physico-mécaniques et de durabilité des bétons et des mortiers.

La présente étude entre dans le cadre d'un travail de recherche expérimental de préparation du diplôme de Master, option "Matériaux en Génie Civil" a pour objectif d'étudier l'influence du taux de substitutions des sables naturelles (50% sable de mer et 50% sable de carrière) par du sable issu de granulats recyclés de même classe granulaire, pour confectionner différents mortiers et de mesurer les caractéristiques physico-mécaniques (résistances mécaniques), l'absorption unidirectionnelle d'eau par capillarité ainsi que le suivi de l'absorption d'eau pour l'hydratation des différents mortiers.

Le premier chapitre est dédié à l'étude bibliographique sur les granulats recyclés, sur les mortiers à base de granulats recyclés et sur leurs caractéristiques à l'état frais et à l'état durci.

Dans le deuxième chapitre est réservé à l'identification des matériaux utilisés, à leur caractérisation ainsi qu'à l'essentiel des protocoles expérimentaux utilisés dans cette recherche.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les résultats des essais réalisés et leurs interprétations, en comparant ces derniers aux règles normatives et aux résultats de littérature.

Enfin, une conclusion générale permet de faire une synthèse des principaux résultats obtenus.

Chapitre I : Synthèse bibliographiques

1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les paramètres de composition du mortier, leurs différents types ainsi que les caractéristiques principales telles que l'ouvrabilité, la prise, les retraits et les résistances mécaniques.

2. Définition :

Une construction est généralement réalisée par des éléments, donc il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements par un mélange de sable, de l'eau, du ciment et éventuellement un adjuvant pour obtenir un « Mortier » qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Le mortier est un matériau complexe dont les caractéristiques physico-chimique et mécaniques des divers constituants sont différentes. Composé essentiellement de sable, de ciment et d'eau de gâchage et d'adjuvants pour améliorer certaines caractéristiques ou propriétés pour faire face à des situations bien définies. Chacun de ses composants joue un rôle bien précis dans le mélange. Les mortiers sont d'usage très répandu : maçonnerie réparation, scellements enduits sols, passe de revêtements lourds...etc. en fonction de leur utilisation, leur dosage varie de façon importante.

C'est le mortier qui par la qualité de sa mise en œuvre va assurer la cohésion et la bonne répartition des charges entre assises. Il assure également un rôle de colle, et lorsqu'il comble chacun des espaces entre la pierre à bâtir, il permet de réaliser des ensembles monolithiques à la résistance variable selon la nature du mortier.

3. Les mortiers :

3.1 Généralités :

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

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

3.2 Définition des mortiers :

Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux, assurer la stabilité de l'ouvrage, combler les interstices entre les blocs de construction. En général le mortier est le résultat d'un mélange de sable, d'un liant (ciment ou chaux) et d'eau dans des proportions données, différent selon les réalisations d'adjuvant.



Figure I-1 : Exemple d'un mortier

Les mortiers sont très utilisés pour des travaux de tous types, ces derniers se déclinent en divers produits, qu'ils soient de ciment, de chaux ou de résine, tous ne s'utilisent pas de la même façon.

$$(\text{Liant} + \text{sable}) + \text{Eau} = \text{mortier}$$

3.3 Caractéristiques principales d'un mortier :

Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre eux les différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.) au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de :

- Solidariser les éléments entre eux.
- Assurer la stabilité de l'ouvrage.
- Comblent les interstices entre les blocs de construction.

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables. Leur choix varie en fonction avec l'ouvrage à réaliser et son environnement. La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier.

3.4 Les Constituants des mortiers :

Classiquement, un mortier est un simple mélange de liant (chaux ou ciment) de sable et d'eau. Néanmoins, de nos jours l'emploi d'adjuvants et de différentes additions minérales est obligatoire pour atteindre des propriétés améliorées.

3.4.1 Les ciments :

Le ciment est un matériau anhydre finement broyé, utilisé comme un liant hydraulique. Par simple mélange avec l'eau, le ciment développe des hydrates rigidifie le matériau granulaire non cohésif en matériau cohésif présentant des propriétés mécaniques élevées. Il existe deux grandes familles de Ciments :

- Les ciments Portland, constitués majoritairement de silice et de chaux.
- Il est utilisé principalement dans les bétons de bâtiments et les ouvrages de génie civil.



Figure I-2: Exemple d'un ciment

3.4.2 La chaux :

Il est obtenu par calcination, c'est-à-dire chauffage à haute température, de pierre calcaire.

Selon la composition du matériau de base, on obtiendra :

- La chaux aérienne est obtenue à partir de calcaire très pur
- La chaux hydraulique est obtenue à partir de calcaire contenant des silicates, aluminates, des composés de magnésium.

3.4.3 Les sables :

Le sable, est une roche sédimentaire meuble, constituée de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,063 et 2mm. Ils proviennent de deux sources :

- Naturelle : Mer, Oued, Sahara. Ce cas représente la quasi-totalité des constructions
- Industrielle : issu du concassage des granulats de carrière, et plus rarement du recyclage des déchets de construction. Selon leurs dimensions, les sables sont classés comme suivant :

- Sable finde 0.08 à 0.135mm
- Sable moyen.....de 0.135 à 2 mm
- Sable gros.....de 2 à 5 mm

3.4.4 L'eau de gâchage :

Le dosage en eau dépend de l'utilisation du mortier : un enduit à projeter doit être beaucoup plus liquide qu'un mortier d'assemblage de parpaings. Un mortier trop sec manque d'homogénéité et il est difficile à utiliser (il ne "colle" pas). Un mortier trop humide sèche mal et il est difficile à appliquer en épaisseur (il coule).

3.4.5 Les adjuvants :

Un adjuvant est un produit incorporé en faible quantité au moment du malaxage du béton ou du mortier en afin de modifier les propriétés du mélange à l'état frais ou à l'état durci. Chaque adjuvant est défini par une fonction principale et une seule, un adjuvant peut présenter une ou plusieurs fonctions secondaires.



Figure I-3 : Exemple d'un Adjuvant -SIKAPLAST BV40

3.5 Les différents types des mortiers :

3.5.1 Les mortiers de ciment Portland :

Les ciments Portland sont des liants hydrauliques composés principalement de silicates de calcium hydrauliques qui font prise et durcissent en vertu d'une réaction chimique à l'eau appelée hydratation.

3.5.2 *Les mortiers de chaux :*

Le mortier de chaux sert à maçonner les pierres, mais aussi à faire des enduits intérieurs et extérieurs. Il sert aussi, en décoration, pour faire de la peinture à la chaux et, chose moins connue, le matériau sert aussi à faire du béton de chaux, matériau utilisé depuis l'Antiquité.

Fabriqué avec de la chaux hydraulique, moins résistant et moins étanche que le mortier de ciment, il est plus souple et laisse respirer les murs.

Composition = chaux + sable + eau

3.5.3 *Les mortiers bâtards :*

Fabriqué avec un mélange de ciment et de chaux, avec des caractéristiques intermédiaires entre le mortier de ciment et le mortier de chaux. La chaux apporte la plasticité (permet de réduire le risque de fissuration comparé au mortier de ciment pur), le ciment apporte la résistance et une vitesse de durcissement plus élevée.

-Mortier réfractaire à base de « ciment fondu ».

-Mortier rapide à base de ciment prompt ou mélange ciment portland gris + ciment fondu.

Composition = ciment + chaux + sable + eau.

Pour obtenir plus de plasticités : plus de chaux

Pour obtenir plus de résistances : plus de ciment

3.5.4 Mortier de terre :

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



Figure I-4: Mortier de terre (Pentocelo, 2007)

3.5.5 Mortier de chaux grasse :

Utilisation de chaux grasse comme matériau de construction fait ses preuves depuis de nombreux millénaires. De nos jours, elle est appréciée pour sa durabilité et sa rentabilité, et parce qu'elle satisfait aux critères relatifs à l'écologie de la construction. La durabilité est et reste un thème extrêmement important dans notre société.

3.5.6 Mortier rapide :

Comme pour le mortier normal, il s'agit d'un mélange de ciment, de sable et d'eau mais auquel on ajoute un adjuvant pour améliorer le temps de prise du mortier. Il est rapide et résistant pour les scellements.

3.5.7 Mortier de plâtre :

Le mortier de plâtre est utilisé comme enduit de finition de plafonds et murs intérieur et extérieur. Il se compose de mortier d'enduit et offre de nombreuses options de conception comme couche de finition. Le plâtre est divisé en différents groupes de mortiers de plâtre.

3.5.8 Mortier réfractaire :

Il est fabriqué avec du ciment fondu, qui résiste à des températures élevées. Il est utilisé pour la construction des cheminées et barbecues.

3.5.9 Mortier industriel :

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, Conditionnés en sacs, prêts à l'emploi, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortier, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en œuvre. Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins

3.6 Caractéristiques des mortiers :

3.6.1 Maniabilité :

Suivant les emplois, les propriétés requises peuvent être différentes mais dans tous les cas, la maniabilité du mortier conditionne sa mise en œuvre. La maniabilité est apportée par les éléments fins (liants et fillers) et par les adjuvants. Cela explique le surdosage fréquent des mortiers traditionnels composés uniquement de sable et de ciment.

3.6.2 Perméabilité :

L'aptitude des mortiers à se laisser traverser par les liquides dans des conditions de pression et de viscosité du liquide données. La perméabilité diminue en augmentant la compacité, elle n'est obtenue qu'avec un dosage en liant suffisant pour l'enrobage de tous les grains internes.

3.6.3 Conditions d'hydratation :

Un autre problème, généralement rencontré lors de la mise en œuvre des mortiers, est celui de l'hydratation correcte du liant. Les liants hydrauliques ont besoin d'eau pour durcir normalement. Or les mortiers sont souvent appliqués en couche mince et risquent une déshydratation prématurée due à l'absorption des matériaux avec lesquels ils sont en contact ou à l'évaporation.

Ce risque amène à utiliser des produits spécifiques (formulations contenant des rétenteurs d'eau) et à prendre des précautions particulières lors de leur emploi par temps chaud (humidification des supports et ré humidification ultérieure).

3.6.4 Déformabilité :

Aussi dans les travaux de liaison comme le revêtement, le mortier est utilisé en association avec d'autres matériaux et doit présenter une déformabilité suffisante pour absorber les variations dimensionnelles admissibles des supports.

3.6.5 Retrait :

Les contraintes qui résultent du retrait peuvent être absorbées par le développement de microfissures internes non préjudiciables au comportement ultérieur du mortier. Toutefois, dans les travaux de surface, elles peuvent également conduire à des fissurations d'autant plus préjudiciables que le mortier est destiné à assurer la protection de la maçonnerie vis-à-vis de la pluie. Il y a lieu de noter que ces contraintes dépendent non seulement du retrait mais également des caractéristiques mécaniques du mortier et en particulier de son module d'élasticité.

3.6.6 Adhérence :

L'adhérence du mortier aux matériaux associés est, dans un grand nombre de cas, un critère primordial de bon comportement.

3.6.7 Durabilité :

Dans tous les emplois extérieurs, la résistance aux intempéries conditionne la durabilité du mortier (capillarité, perméabilité à l'eau et à la vapeur, résistance au gel). En outre, pour les travaux de surface, le mortier doit présenter une résistance aux chocs.

4. Les sables des granulats recyclés :

4.1 Introduction :

Les **sables de granulats recyclés (SGR)** sont produits à partir de la valorisation des déchets de construction et de démolition (DCD), principalement composés de béton concassé, de briques, de tuiles et de matériaux inertes. Ces granulats, obtenus par broyage, criblage et élimination des impuretés, constituent une alternative écologique aux sables naturels, dont l'extraction intensive pose des problèmes environnementaux (Adessina et al., 2023). Leur utilisation contribue à l'économie circulaire en réduisant les déchets enfouis et en limitant l'exploitation de ressources non renouvelables.



Figure I-5 : Exemple de sable granulat recyclé

4.2 Les propriétés et performances :

Les SGR présentent des caractéristiques mécaniques variables selon leur origine et leur traitement. Bien qu'ils puissent afficher une résistance légèrement inférieure à celle des granulats naturels, ils restent adaptés pour des applications telles que :

- Les **couches de fondation** et sous-fondation routière (Katz & Baum, 2016),
- Les **bétons à faible résistance** (Silva et al., 2017),
- Les **remblais** et travaux de terrassement.

Cependant, leur performance dépend fortement de la **qualité du tri** et de la présence éventuelle d'impuretés (plâtre, métaux, matières organiques), qui peuvent nuire à leur durabilité et à leur stabilité (Oikonomou, 2005). Une étude de l'**ADEME** (2020) souligne que les SGR bien traités peuvent atteindre des performances comparables à celles des granulats traditionnels, à condition de respecter des normes strictes de production.

4.3 Avantages environnementaux et économiques :

L'utilisation de sables recyclés permet de :

- **Réduire l'empreinte carbone** des chantiers en limitant le transport de matériaux neufs,
- **Diminuer les déchets en décharge**, conformément à la réglementation européenne sur la valorisation des déchets (Directive 2008/98/CE),

Baisser les coûts pour les entreprises, sous réserve d'une filière de recyclage bien organisée.

Certains sables recyclés **améliorent la résistance au feu** : Les particules de béton recyclé contiennent des **liants déjà carbonatés**, il y a moins de fissures en cas d'incendie (essais normatifs : Tenue jusqu'à **800°C** vs 600°C pour un mortier classique (étude CERIB, 2023)).

5. Caractéristiques des mortiers à base de sables recyclés à l'état frais :

Les mortiers incorporant des sables recyclés présentent des particularités rhéologiques et physico-chimiques marquées à l'état frais, nécessitant une compréhension fine de leurs comportements. Trois aspects fondamentaux méritent une attention particulière :

a) Propriétés rhéologiques et ouvrabilité :

Les mortiers recyclés exhibent généralement une réduction de 15 à 30% de leur fluidité par rapport aux mortiers conventionnels (Zhang et al., 2022). Cette diminution s'explique principalement par :

- La morphologie anguleuse des particules recyclées augmentant les frottements internes
- La porosité élevée (20-35% contre 5-10% pour les sables naturels) entraînant une absorption d'eau instantanée
- La présence de fines (<80µm) pouvant atteindre 10-15% de la masse totale

b) Comportement temporel :

L'évolution des propriétés montre des particularités notables :

- Temps de prise allongé de 20-40 minutes (Wang et al., 2021) : Résidus de plâtre ou poussières de béton dans les sables recyclés perturbent l'hydratation.
- Vitesse d'hydratation réduite de 15-25% durant les premières 24 heures
- Échauffement retardé avec un décalage thermique de 2-3 heures

c) Stabilité et homogénéité :

La microstructure présente des défis spécifiques (Wang et al., 2021) :

- Risque accru de ségrégation (indice de ségrégation +25-40%)
- Tendance à l'exsudation (libération des liquides) réduite de 30-50%
- Formation de zones poreuses localisées près des gros granulats recyclés

d) **Paramètres d'optimisation :**

Des solutions existent pour améliorer ces caractéristiques :

- Pré mouillage des granulats (réduction de 50-70% de l'absorption instantanée)
- Ajout de fumée de silice (5-8%) pour compenser la perte de fluidité
- Utilisation de super plastifiants de 3ème génération à dosage accru de 15-20%
- Stabilité améliorée : Effet positif, les fines recyclées augmentent la cohésion → moins de risque de ségrégation. Applications idéales : Coulages verticaux (enduits) ou zones difficiles d'accès.

Ces caractéristiques particulières nécessitent des ajustements de formulation mais ouvrent des perspectives intéressantes pour une construction plus durable, notamment dans les applications non structurales où les exigences mécaniques sont moins contraignantes.

6. Exemple chiffré

Le tableau ci-dessous présente une comparaison des caractéristiques des mortiers à l'état frais entre un mortier standard (sable naturel) et un mortier à base de 100% de sable recyclé :

Tableau I-1 : Influence du type de sable sur les caractéristiques des mortiers

Propriété	Sable naturel	Sable recyclé (bien traité)
Affaissement	180 mm	150 mm
Temps de prise	4 heures	5 heures
Résistance 7j	30 MPa	25 MPa (-17%)

Source : Adapté de Silva et al. (2021), *Journal of Cleaner Production*

7. Caractéristiques des mortiers à base de sable recyclé à l'état durci :

A l'état durci, les mortiers présentent les caractéristiques suivantes :

7.1 Les Propriétés mécaniques :

a) Résistance à la compression (R_c)

- **Valeurs typiques :** 10-30% inférieures aux mortiers traditionnels (Silva & Brito, 2021),
- **Évolution dans le temps :**

- J+7 : 15-20 MPa (vs 20-25 MPa pour mortier standard)
- J+28 : 25-35 MPa (vs 30-40 MPa)
- J+90 : Gain de 10-15% supplémentaire grâce à l'effet pouzzolanique des fines recyclées

b) Résistance en flexion

- Réduction de 20-40% selon la qualité des granulats
- Module de rupture typique : 4-6 MPa (vs 6-8 MPa)

c) Module d'élasticité

- Valeurs réduites de 25-35%
- Exemple : 15-20 GPa (vs 20-30 GPa pour mortier standard)

7.2 Durabilité (Zhang et al. ,2023) :

a) Perméabilité

- Augmentation de 50-100%
- Coefficient de perméabilité : 10^{-10} à 10^{-12} m/s (vs 10^{-11} à 10^{-13} m/s)

b) Résistance au gel-dégel

- Perte de masse après 50 cycles : 1,5-3% (vs 0,5-1,5%)
- Solution : Ajout de microfibrilles (0,5% vol.) réduit les dégâts de 40%

c) Carbonatation

- Profondeur après 1 an : 5-8 mm (vs 2-4 mm)
- Vitesse accrue de 30-50%

7.3 Comportement microstructural (Zhang et al. ,2023)

a) Porosité

- Porosité totale : 18-25% (vs 12-18%)
- Distribution poreuse :
 - Macropores (>50 nm) : +40-60%
 - Micropores (<10 nm) : similaires

b) Interface pâte-granulat

- Zone de transition plus large (15-25 μm vs 5-10 μm)
- Densité de microfissures supérieure de 30-50%

7.4 Retrait et fluage (EU Project HISER, 2017)

a) Retrait endogène

- Valeurs accrues de 20-40%
- Exemple : 600-800 $\mu\text{m}/\text{m}$ (vs 400-600 $\mu\text{m}/\text{m}$)

b) Retrait de séchage

- Augmentation de 30-50%
- Valeurs typiques : 1000-1200 $\mu\text{m}/\text{m}$ (vs 700-900 $\mu\text{m}/\text{m}$)

c) Fluage

- Coefficient de fluage : +25-35%

7.5 Solutions d'amélioration (ADEME, 2021) :

Le tableau suivant donne quelques propositions de solutions d'amélioration des caractéristiques des mortiers.

Tableau I-2 : Solution d'amélioration des caractéristiques des mortiers

Problème	Solution	Efficacité
Résistance réduite	Ajout de fumée de silice (5-8%)	+15-25%
Perméabilité élevée	Traitement hydrophobe des granulats	-40% absorption
Retrait accru	Fibres polypropylène (0,3% vol.)	-30% fissuration

7.6 Les Performances comparatives (CERIB, 2022) :

La comparaison entre des mortiers avec ou sans sables recyclés est donnée par la tableau ci-dessous.

Tableau I-3 : Mortier standard vs recyclé (28 jours)

Paramètre	Standard	Recyclé (30%)	Recyclé (100%)
Résistance (MPa)	35	30 (-14%)	25 (-29%)
Module élastique (GPa)	25	20 (-20%)	17 (-32%)
Prof. carbonatation (mm/an)	3	4,5 (+50%)	6 (+100%)

7. 7 Applications recommandées (NF EN 998-2 et NF P 18-545) :

L'intégration des sables recyclés dans les mortiers (et les bétons) sont recommandés pour les utilisations des mortiers dans les cas suivants :

- **Classe de résistance** : Idéal pour M5 à M20 (5 MPa à 20 MPa)
- **Usages typiques** :
 - Maçonnerie non porteuse
 - Chapes et dallages
 - Enduits intérieurs
 - Remblais structurels légers

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude bibliographique sur les mortiers et sur les différents types des mortiers.

Les constituants des mortiers ont été présenté ainsi que leurs les propriétés essentielles.

A travers cette recherche bibliographique, nous avons pu montrer que les sables de granulats recyclés peuvent remplacer les sables naturels pour former des mortiers de caractéristiques (état frais et durci) acceptables, équivalentes aux mortiers standards et dans certains cas meilleurs.

Il a aussi été montré que la substitution des sables naturels par des SGR donne des caractéristiques intéressantes jusqu'à 30%, au-delà de ce taux, les mortiers confectionnés ne répondent plus aux mêmes performances.

Problématique et axes de recherches

Le mortier, considéré comme un mini béton, est essentiellement composé de ciment, de sable, d'eau et d'adjuvant.

La consommation surabondante des matériaux naturels a poussé les chercheurs à trouver des matériaux synthétiques de rechange ou à valoriser les déchets naturels et industriels.

Dans ce contexte, les déchets de démolition et des BTP constituent des ressources exploitables.

L'incorporation des sables issus des granulats recyclés (SGR) dans les mortiers est l'une des solutions choisies et pourrait contribuer à la diminution des exploitations des sables naturels.

Dans le présent travail, nous essayerons de répondre aux questions suivantes :

- Dans la mesure des résistances, quel serait le taux de sable (SGR) qui donnerait des résistances équivalentes ou supérieures à celles des mortiers confectionnés avec 100% de sable naturel ?
- Est-ce que la quantité d'eau de gâchage (rapport E/C) reste constante pour les mortiers ?
- Les (SGR) sont connus par leur pouvoir d'absorption d'eau, quelle serait cette quantité ?
- Quelles sont les quantités d'eau absorbées par les différents mortiers, avec et sans (SGR) ?

Nous essayerons de répondre à toutes ses interrogations à la fin de ce travail de mémoire.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons les caractéristiques des matériaux utilisés au cours du travail pratique effectué au niveau des laboratoires pédagogiques du Département de Génie civil et du Laboratoire de recherche (LCTPE) de l'Université de Mostaganem.

L'objectif général de cette étude est d'évaluer le comportement mécanique des diverses formulations.

- Évaluer le comportement mécanique (Résistance) des différentes formulations.
- Évaluer l'influence le taux de substitution du sable naturel par le sable recyclé.
- Faire des mesures sur les absorptions de l'eau par les différents mortiers de différentes compositions.

I. Les matériaux utilisés :

- Ciment (CPA CEM II 42.5)
- Sables : sable de mer, sable de carrière, sable de granulats recyclés.
- L'eau.
- Adjuvant

1 Le ciment :

Le ciment utilisé dans notre étude est un ciment portland composé (CPA CEM II 42.5) de provenance de la cimenterie de GICA – BPE – Mostaganem.



Figure II-1 : Échantillon de ciment (CPA CEM II 42.5).

1.1 Composition du ciment :

Le ciment Portland composé CPA CEM II/A 42.5 est constitué de 80 à 94% de clinker Portland, de 6 à 20% maximum d'ajouts (calcaire pur) et de Constituants secondaires (0 à 5% sulfate de calcium comme régulateur de prise).

1.2 Autres constituants des ciments :

Associés au clinker, les autres constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques. Dans la mesure où ils sont des sous-produits d'autres industries, ils contribuent aussi à en amoindrir le prix de revient. On appelle "constituant principal un constituant entrant dans la composition du ciment dans une proportion excédant 5 % en masse.

Ils sont indiqués ci-dessous. La lettre entre parenthèse qui suit leur dénomination est leur désignation abrégée telle qu'elle est définie dans la norme EN 197-1

1.3 Caractéristiques du ciment :

Les caractéristiques physico-mécaniques de ciment utilisé fournies par la fabricant, sont présentées dans le tableau [II-1] ci-dessous.

Tableau II-1 : Paramètres physico-mécaniques du ciment

Paramètres	Résultats			Norme
	Mini	Maxi	Moy	
Physico-mécaniques	Mini	Maxi	Moy	NA 442
S S Blaine cm ² /g	3464	4035	3702	-
Consistance (%)	25.60	27.00	26.01	-
Début de prise (mn)	148	185	165	≥60mn
Compression 02 jours (MPa)	19.62	23.54	21.32	≥10
Compression 07 jours (MPa)	35.34	41.61	38.06	-
Compression 28 jours (MPa)	42.75	49.93	45.62	≥42.5
Flexion 2 jours (MPa)	3.96	4.71	4.31	-
Flexion 7 jours (MPa)	5.37	6.27	5.91	-
Flexion 28 jours (MPa)	6.12	7.05	6.56	-
Expansion à chaud sur pate (mm)	0.38	5.00	1.72	≤10

Les caractéristiques chimiques du ciment sont données par le tableau [II- 2] ci-dessous

Tableau II-2 : Caractéristique chimiques du ciment

Paramètres chimiques	Résultats			Norme
	Mini	Maxi	Moy	NA 442
Perte au feu (%)	6.20	8.98	7.73	-
CaO libre(%)	0.35	1.40	0.67	-
SiO ₂ (%)	17.04	20.14	18.00	-
Al ₂ O ₃ (%)	4.01	4.90	4.32	-
Fe ₂ O ₃ (%)	2.79	3.26	3.15	-
CaO(%)	62.10	64.14	63.06	-
MgO(%)	0.81	0.94	0.84	≤5
SO ₃ (%)	1.72	2.94	2.15	≤4
Cl ⁻ (%)			<0.01	≤0.1
Insolubles (%)	-		0.79	-

Tableau II-3 : Caractéristique mécanique du ciment

Age (jours)	Flexion (N/mm ²)	Compression (N/mm ²)
2jours	5.1	24.7
7jours	7.0	39.5
28jours	8.2	48.0

Tableau II-4 : Caractéristiques minéralogiques du ciment

Phase	Constituant minéraux du Clinker	Teneur rapportée au Clinker (%)
Alite (norme 50-70%)	C3S	57
Bélite (norme 15-30%)	C2S	19
Aluminate tricalcique (Norme 5-10%)	C3A	05
Ferrite alumino-calcique (norme 5-15%)	C4AF	13
Chaux libre	CaO. L	01
Régulateur de prise	Gypse	05

Le ciment utilisé est de caractéristique conforme aux normes.

1.4 Essais sur le ciment :

Plusieurs essais d'identification ont été réalisés sur le ciment :

1.4.1 La masse volumique apparente et absolue du ciment :

La masse volumique apparente et la masse volumique absolue s'expriment en poids/volume (g/cm^3 ou Kg/m^3). La masse volumique apparente est en rapport avec le volume réel, le volume interstitiel et celui des pores alors que la masse volumique absolue est en rapport avec le volume réel diminué du volume des pores, le volume interstitiel n'existant plus, les matériaux broyés supprimant le volume des pores ainsi que celui des interstices

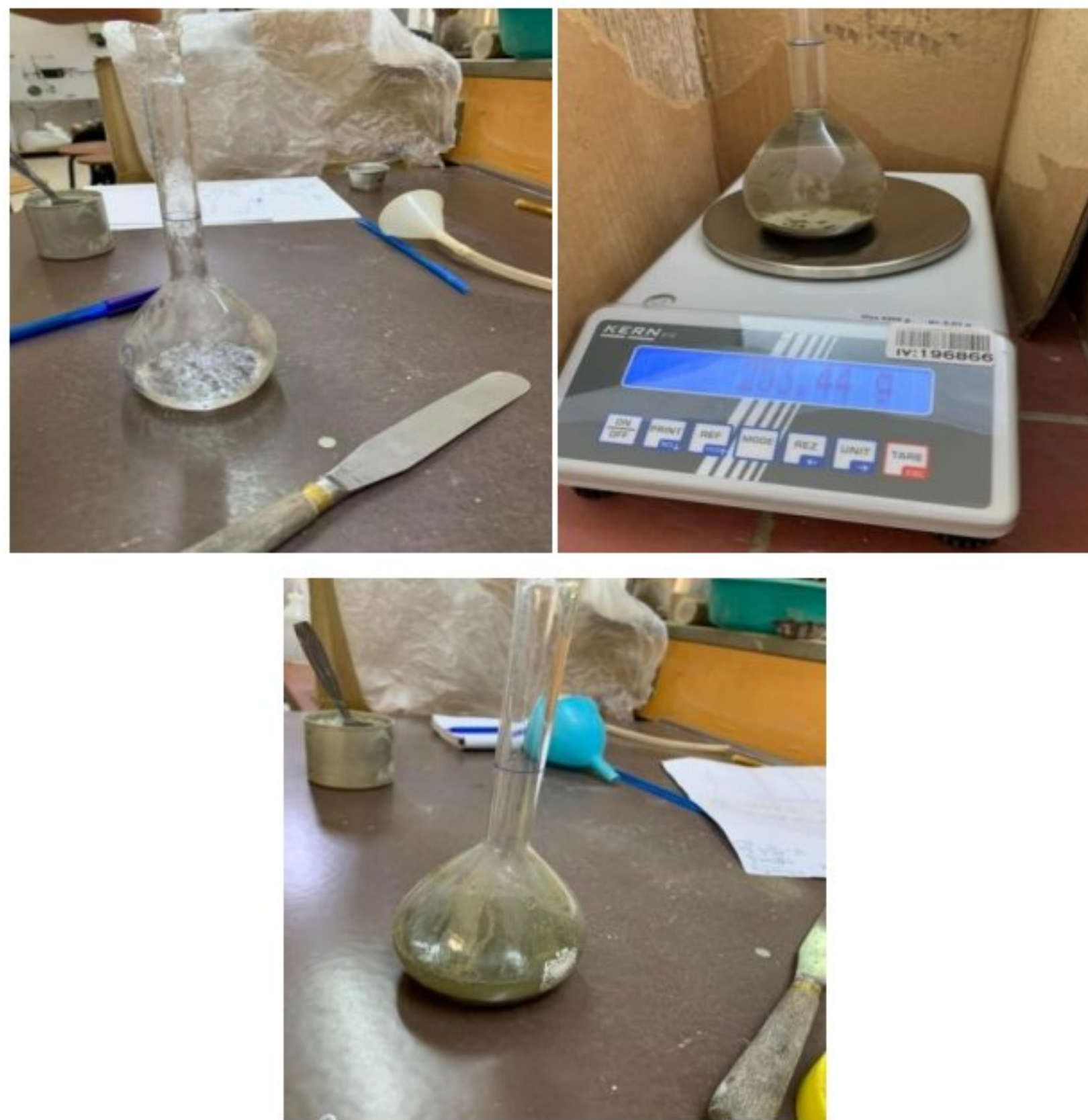


Figure II-2 : les étapes de détermination de la masse volumique absolue du ciment

2. Le sable :

Le sable est un élément essentiel entrant dans la composition du béton et du mortier. Il constitue le squelette granulaire des différents mortiers. Son utilisation permet

d'assurer une continuité granulaire nécessaire entre le ciment et le gravier pour une meilleure cohésion du béton.

2.1 Caractéristiques physico-chimiques :

Une particule individuelle est appelée grain de sable. Les sables sont identifiés grâce à la granulométrie (la grosseur des grains).

Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement.

L'aspect de la surface du grain de sable éolien est dû aux multiples impacts que subit le sable lors de son déplacement.

2.2 Propriétés physiques :

Le sable forme naturellement des pentes stables jusqu'à environ 30°, au-delà de cet angle, il s'écoule par avalanches successives pour retrouver cette pente stable.

Cette propriété peut être exploitée pour étudier des formes parfaites générées par l'écoulement du sable sur des plaques de formes différentes.

Par exemple, en faisant couler du sable sur un socle de forme carrée, le sable va former une pyramide parfaite avec des pentes de 30°.

2.3 Les types de sables utilisés :

2.3.1 Le sable de mer :

Il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.



Figure II-3 : sable de mer

2.3.2 Sable de carrière :

Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants.



Figure II-4 : Sable de carrière

2.3.3 Le sable recyclé :

Ce sable est trouvé lavé, calibré 0/3 mm, récupéré du laboratoire de recherche LCTPE, ayant déjà fait de quelques études antérieures.



Figure II-5 : Sable de granulat recyclé (SGR)

2.4 Les caractéristiques des sables :

A fins d'obtenir de bons mortier durables et résistants, il faudrait que l'étude des constituants de ces mortier soit rigoureuse. On cite quelques caractéristiques :

2.4.1 Analyse granulométrique : (NF P 18-304) :

L'analyse granulométrique permet de mesurer la distribution dimensionnelle en poids des différents éléments constituant le sable. La masse de l'échantillon pour l'essai de l'analyse granulométrique dépend des dimensions des éléments les plus gros qu'il contient :



Figure II-6 : Essai de granulométrie de sable de mer

2.4.2 Module de finesse : (NF P 18 304) :

Les sables doivent être présentés après la granulométrie pour que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

Le module de finesse d'un sable est égal au centième de la somme des refus exprimés en pourcentage pondéral sur les différents tamis de la série suivante : (2.5) – (1.25) – (0.63) – (0.315) – (0.16) – (0.080) il est donné par la relation suivante : $\mathbf{Mf} = \sum \mathbf{Ri} / 100$

Avec : Ri : refus cumulé en (%)

Tableau II- 5 : Classement de sable

Qualité de sable	Module de finesse
Peu trop fin	$1.80 \leq Mf \leq 2.20$
Préférentiel	$2.20 \leq Mf \leq 2.8$
Peu trop grossier	$2.80 \leq Mf \leq 3.20$

Tableau II-6: Analyse granulométrique du sable de carrière

<u>Sable de carrière</u>		
Diamètre tamis (mm)	Refus cum (%)	Tamisât (%)
5	0	100
4	5,74	94,26
3,15	17,1	82,9
2,5	34,78	65,22
2	51,42	48,58
1,25	73,72	26,28
0,8	78	22
0,63	78,8	21,2
0,5	81	19
0,4	83	17
0,315	84	16
0,25	84,5	15,5
0,2	85	15
0,16	85,4	14,6
0,08	86,2	13,8

Taux de fines : $13.8\% < 2.8 < Mf = 3.17 < 3.3$ sableun peu grossier.

Tableau II-7: Analyse granulométrique du sable de mer

<u>Sable de mer</u>		
Diamètre tamis (mm)	Refus cum (%)	Tamisât (%)
5	0	100
4	0	100
3,15	0	100
2,5	0	100
2	0	100
1,25	0	100
0,8	0,06	99,94
0,63	0,12	99,88
0,5	0,22	99,78
0,4	1,26	98,74
0,315	27,5	72,5
0,25	58,48	41,52
0,2	85,42	14,58
0,16	96,58	3,42
0,08	99,62	0,38

Taux de fines : 0.38 % et $Mf = 1.10$ sable très fin

Selon la norme algérienne, le taux de fines des sables doit être choisie entre 8% et 12 %, nous avons choisi de prendre un taux de 8%, car ces sables vont être substitués par du sable recyclé qui peut apporter un supplément de fines.

De plus, se basant sur la méthode des modules de finesse et en choisissant $Mf = 2.8$, le sable optimal corrigé sera composé de 50% de sable de mer et de 50 % de sable de carrière.

Les courbes granulométriques des différents sables sont représentées par la figure ci-dessous.

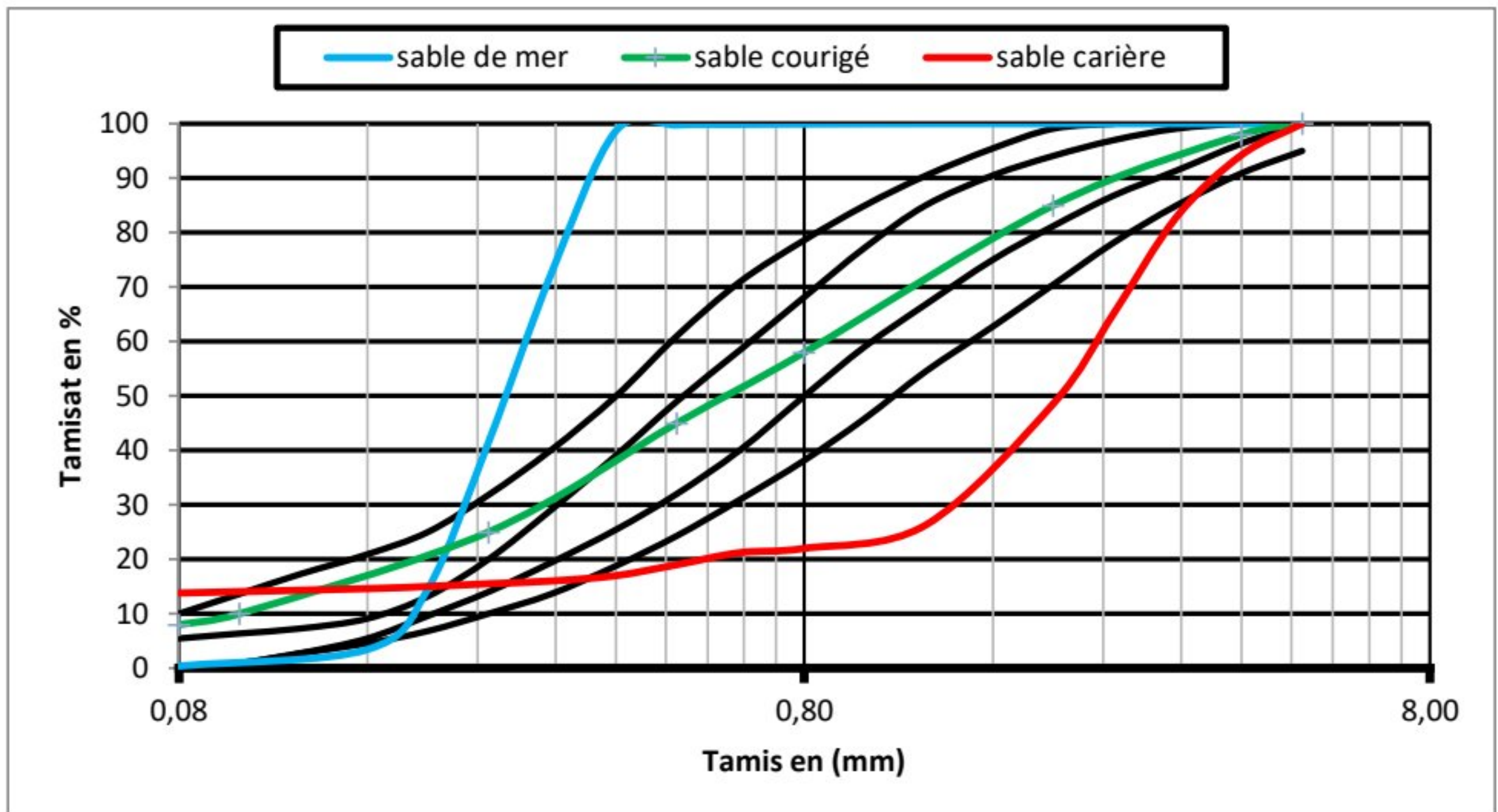


Figure II-7 : Courbes granulométriques des différents sables utilisés

Le sable issu des granulats recyclés (SGR) a été récupéré du laboratoire LCTPE, est déjà préparé, lavé et calibré lors des études antérieures. Sa classe granulaire est 0/3 mm, Il est de la même classe granulaire que le sable précédemment corrigé, il peut donc le remplacer à différents taux.



Figure II-8 : Mélanges des trois sables utilisés

2.4.3 Caractéristique physico-chimiques des sables :

Le sable de mer est propre, il a déjà été lavé et séché avant d'être utilisé. L'essai de l'équivalent de sable ne sera donc effectué que sur le sable de carrière.

a) *L'Equivalent de sable (sable de carrière) :*

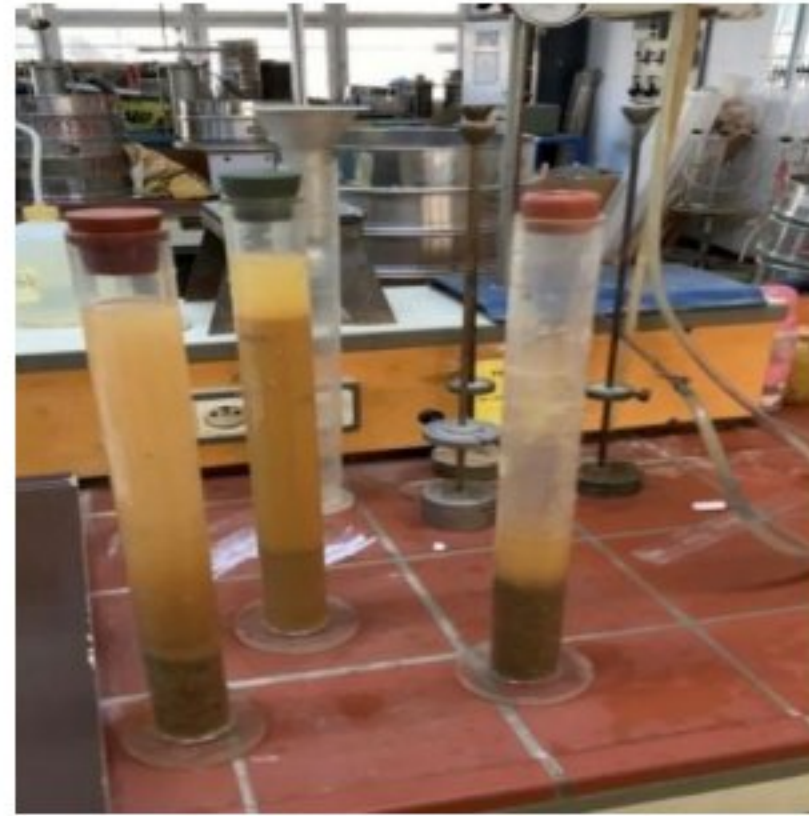


Figure II - 9: Eprouvettes de l'essai de l'équivalent de Sable

- L'équivalent de sable à piston est donné par la formule suivante :

$$E_s = \frac{h_2'}{h_1} \times 100$$

- L'équivalent de sable visuel est donné par la formule suivante :

$$E_{sv} = \frac{h_1}{h_2} \times 100$$

Tableau II-8 : essai d'équivalent de sable de carrière

	Éprouvette 1	Éprouvette 2
h_1	23.7	9.5
h_2	9.2	8.4
h'_2	8.7	8.4
E_s	38%	88.42%
E_{sv}	36%	100%

Le sable de carrière représente un équivalent de sable vérifiant **ES > 80%** : Sable très propre.

L'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du mortier qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

b) *Les masses volumiques :*

La masse volumique d'une substance, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse de cette substance par unité de volume. C'est l'inverse du volume massique.

- ***La masse volumique apparente de sable :***

La masse volumique du sable est une propriété importante. Elle est utilisée par exemple pour définir les dosages des constituants d'une formule de béton, ou bien plus simplement pour s'assurer qu'on respecte le poids maximum du véhicule (PTAC) lorsqu'on transporte du sable.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$Mv_{app} = \frac{(M_2 - M_1)}{V}$$

Où :

M_1 : La masse du récipient de mesure vide.

M_2 : La masse du récipient avec l'échantillon.

V : le volume du récipient de mesure.



Figure II-10 : échantillon de sable de carrière



Figure II-11 : Entonnoir et balance servant aux mesures



Figure II-12 : Récipient rempli servant à la mesure du volume du sable de carrière

Tableau II-9: Masses volumiques absolue et apparente des granulats

Types de granulats	Sable de mer	Sable de carrière	Sable recyclé
MVap (g/cm³)	1.37	1.25	1,94
MVab (g/cm³)	2.53	2.66	2.33

3. L'eau de gâchage :

L'eau joue un rôle important, elle sert à hydrater le ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier, ainsi elle contribue à son ouvrabilité. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis).

L'eau potable convient toujours le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme NA-442.

Les mortiers devraient contenir la quantité d'eau maximale compatible avec une ouvrabilité optimale.

4. L'adjuvant :

Les adjuvants sont des produits incorporés au moment du malaxage du mortier à un dosage inférieur ou égale à 5 % en masse du poids de ciment pour modifier ou améliorer les propriétés du mélange à l'état frais et ou du mortier durci. Dans notre étude on a Utilisé les super plastifiants à savoir : Sika Plastiment BV-40 (voir annexe1)

5. Le mortier :

Le mortier est un mélange de sable, de ciment et d'eau puis éventuellement d'adjuvant.

5.1 Formulation et conservation des éprouvettes :

La formulation des mortiers utilisés dans le présent est selon les normes, de composition 1/3 de ciment pour 2/3 de sable, le rapport Eau/Ciment (E/C) est choisi constant et égal à 0.5.

Cependant, connaissant le caractère absorbant des sables (SGR) il est impératif de procéder à la mesure du coefficient d'absorption de ce sable. Dans ce qui suit la procédure normalisée de la mesure de la norme NF P18 555 et de la procédure de la norme NF EN 1097-6 (voir annexe 2).

La procédure appliquée au sable (SGR), a permis de mesurer le coefficient d'absorption, la quantité d'eau absorbée doit être restituée dans l'eau de gâchage. Les figures suivantes montrent les étapes de la procédure appliquées.



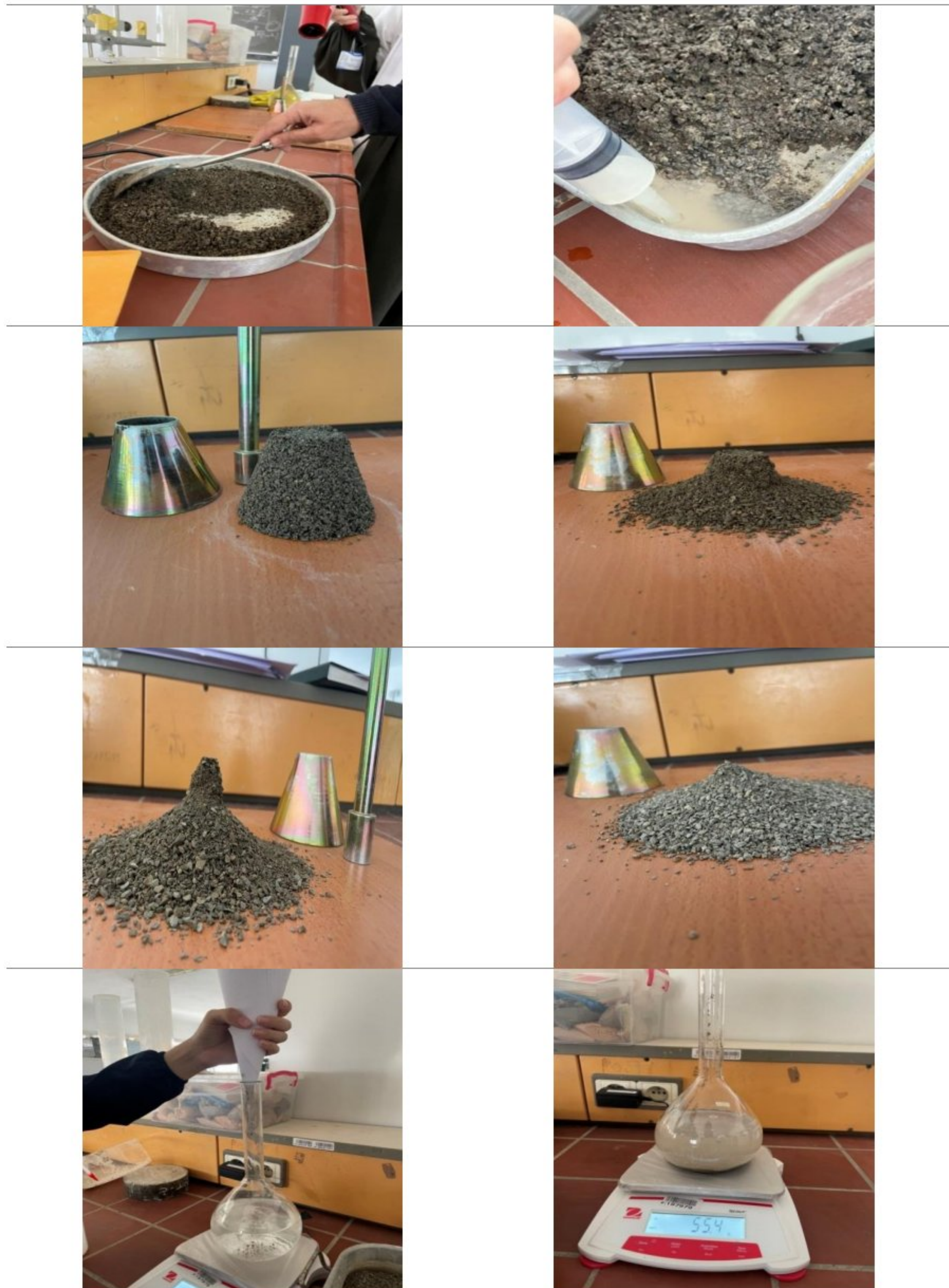


Figure II-13 : Procédure de détermination du coefficient d'absorption du (SGR)

Après mesure, le coefficient d'absorption du (SGR) est de 8.5%.

En tenant compte de la quantité d'eau absorbée par les sables (SGR), la composition des mortiers confectionnés est représentée dans les tableaux suivants :

Tableau II-10 : la formulation des mortiers normalisés

Mortier	Quantités						
	Ciment (g)	Sable de mer (g)	Sable de carrière (g)	Sable recyclé (g)	Eau à ajouter (g)	Eau (g)	Adjuvant (g) (1%)
M0	450	675	675	0	0	225	4,5
M10	450	607,5	607,5	135	11,5	225	4,5
M20	450	540	540	270	23	225	4,5
M30	450	472,5	472,5	405	34,5	225	4,5

Le tableau suivant présente l'opération normalisée de malaxage des différents mortiers.

Tableau II-11 : opérations de malaxage du mortier normal

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Introduction de sable	Introduction de la cuve		
Durée			30s	30s	15s	1min 60s 15s
Vitesse	Arrêt	Arrêt	Vitesse lente	Vitesse lente	Arrêt	Arrêt Vitesse rapide

5.2 Confection des mortiers :

La confection des mortiers de différentes compositions est régie par la norme EN 196.1. Il s'agit de la préparation des éprouvettes de dimensions 4x4x16 cm³ de différentes compositions (M0, M10, M20 et M30).

Sur ces éprouvettes, seront effectuées des mesures de résistances (compression et traction par flexion), de l'absorption capillaire unidirectionnelle et de suivi de l'absorption d'eau par hydratation.

L'essai de l'absorption d'eau unidirectionnelle se fait sur des mortiers de 28 jours d'âge, selon la recommandation de la norme en cours, alors que la procédure de mesure de la consommation d'eau pour hydratation des mortiers a été faites à partir de 2 jours d'âge, ce n'est pas une procédure normalisée, mais ça donne une idée plus au moins précise sur le suivi des hydratations des ciments des différents mortiers, par mesures des masses de ces mortiers à différentes échéances jusqu'à stabilisation.

5.3 Matériels utilisés pour la confection des éprouvettes :

- Moules pour éprouvettes (4x4x16)
- Malaxeur
- Appareil a chocs
- Main écope.
- Règle a arasé.
- Truelle.
- Machine d'essai de résistance à la flexion.
- Machine d'essai de résistance à la compression.

Une fois le mortier malaxé, il sera versé dans des moules prismatiques 4x4x16 cm³. La mise en place est réalisée par vibration.



Figure II-14: Malaxeur à mortier

Figure II-15 : Moules pour les éprouvettes de mortier



Figure II-16 : Appareil de vibration

II. Procédures expérimentales :

1. Préparation des éprouvettes et déroulement des essais :

Les essais sont effectués sur des éprouvettes prismatiques en mortier de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$.

Dans tous les essais le rapport E/C a été fixé à [0.5] pour tous les mortiers. La préparation des éprouvettes est réalisée selon la norme NF P 18-400.

Le malaxage est réalisé à l'aide d'un malaxeur dont la durée de malaxage totale est de 3 minutes.

La vibration a été réalisée sur une table vibrante à durée de vibration réglable. La durée de vibration est de 2 fois 5s (5×2) = 10 secondes.

Les moules ont été couverts de film plastique et stockés dans le laboratoire dans les premières 24h.

Après 24 heures, les échantillons ont été démoulés et conservés dans l'eau à une température ambiante jusqu'à l'âge de l'essai (2j, 7j, 14j ; 28j), les tests de résistances mécaniques des mortiers ont été effectués selon la norme NF 15 403 et NF EN196-1.

Dans notre étude, les éprouvettes prismatiques ont été confectionnées avec des sables naturels combinés (50 % sable de mer et 50% sable de carrière, les taux de substitutions de ces sables par le sable de granulats recyclés (SGR) sont 10%, 20 % et 30% ; ce choix prend en considération des études selon lesquelles il ne serait pas intéressant de substituer plus de 30%.

2. Les essais sur les mortiers :

Dans la présente étude, on s'est occupé seulement des essais sur mortiers à l'état durci.

2.1 Essai de résistance à la traction :

➤ Le but de l'essai :

Définir les qualités de résistance à la traction d'un mortier

➤ Matériels et matériaux utilisés :

- Éprouvettes $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$.
- Machine d'essai de résistance à la flexion.

➤ **Mode opératoire :**

- Placer l'éprouvette à la machine de résistance à la flexion
- Pousser le bouton avant le poids Coulisser a jusqu'à rupture de l'éprouvette la vitesse automatique de mise en charge est 50 ± 10 N/S et les deux demi prismes obtenus sont conservés pour l'essai de compression.
- Relever la force de rupture sur l'échelle [0-5000N].
- Pousser le bouton arrière le poids reviendra à son point de départ.
- Renouveler l'essai sur les deux autres éprouvettes.



Figure II-17 : machine d'essai flexion compression



Figure II-18 : Dispositif de l'essai de traction

$$R_t = 1.5 \times F_f / b^3 \times L$$

R_t : Résistance à la traction par flexion en MPa.

F_f : Charge de rupture de l'éprouvette en flexion N.

L : Longueur qui sépare les deux appuis inférieurs en mm

b : Côté de l'éprouvette en mm

2.2 Essai de mesure des résistances à la compression :

Pour toutes les caractérisations physico-mécaniques, des spécimens prismatiques de (4x4x16 cm³) mûries à l'eau ont été utilisés. Les résultats de la résistance à la compression obtenus à 2, 7, 14 et 28 jours représentent la moyenne de huit échantillons s'ils ne sont pas trop décalés.

La machine utilisée pour l'écrasement uni axial des cylindres est une presse hydraulique dont la capacité maximale est de 1500 KN en compression.

Les échantillons ont été démoulés 24 h après le coulage et puis ont été conservés à l'eau de température jusqu'à l'âge de l'essai.

Les résultats des résistances à l'état durci représentent la moyenne de trois échantillons. Les essais des résistances à la compression sont effectués, conformément à la norme EN 12390- 3, sur des spécimens prismatiques à deux échéances 2,7, 14 et 28 jours.

$$\text{Où: } R_c = F_c / b^2$$

R_c : Résistance à la compression en MPa.

F_c : Charge de rupture en N.

b : Côté de l'éprouvette en mm

➤ Le but de l'essai :

Mesurer les résistances à la compression d'un mortier à différentes échéances d'âge.

➤ Matériel utilisé :

- Huit (8) demi éprouvettes (4×4×16) cm³ obtenus après l'essai de traction-flexion.
- Machine d'essai de résistance à la compression pour mortiers.



Figure II-19 : Dispositif de l'essai de compression

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette étude. Le détail des différentes formulations a été également présenté dans cette partie.

Ces différentes formulations seront utilisées pour la réalisation de notre campagne expérimentale (études des propriétés physiques et mécaniques).

Chapitre III : Résultats et Analyse

Introduction :

Le présent chapitre est consacré à l'analyse des différents résultats expérimentaux relatifs aux essais effectués sur les mortiers, conformément aux modes opératoires mentionnés au chapitre précédent, une analyse et une discussion des résultats, suivis d'une comparaison entre les résultats obtenus aux différentes échéances.

Les mortiers ont été confectionnés avec des taux de substitution de (SGR) variant de 10%, 20 % et 30%.

Sur ces mortiers, ont été effectués seulement des essais à l'état durci (Résistances à la traction par flexion, Résistances à la compression et Pertes de masses). Les résultats obtenus seront analysés puis comparés aux résultats des mortiers de référence.

1 Résultats des essais sur mortiers à l'état durci :

Sur des éprouvettes de mortiers $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, des essais de résistances mécaniques suivis des mesures de pertes de masses ont été effectués aux échéances 2, 7, 14 et 28 jours.

Pour déterminer de la résistance à la traction par flexion, nous avons utilisé la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé.

Les demi-prismes obtenus de l'essai de flexion ont été utilisés pour les essais de résistances à la compression sur les faces latérales du moulage sous une section de $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$.

Les essais de traction par flexion ont été effectués sur quatre (04) éprouvettes de mortiers, engendrant ainsi quatre valeurs de résistances, la valeur finale retenue est la moyenne des mesures obtenues, à condition qu'aucune valeur ne soit décalée de plus de 10% par rapport aux autres.

Les huit (08) demi-prismes ainsi obtenus ont servi aux mesures des résistances à la compression, la valeur finale retenue est la moyenne des valeurs sous la même condition que précédemment.

1.1 Essais de résistances mécaniques :

Sur les différents mortiers de différentes compositions (taux de SGR varié) et aux échéances 2, 7, 14 et 28 jours, des essais de traction par flexion (à quatre points) ont été effectués sur quatre éprouvettes à chaque échéance, le résultat final est la moyenne des quatre résultats, à condition que les valeurs obtenues ne soient pas très écartées.

Sur les demi-prismes obtenus de la flexion, des essais de compression ont été effectués, ce qui a permis d'obtenir huit (08) résultats de compression pour chaque échéance, le résultat retenu est la moyenne des résultats les plus proches.

1. 1. 1 Résultats sur les essais de traction par flexion :

Les résultats obtenus sur les différents mortiers sont donnés par le tableau suivant :

Tableau III-1 : Résultats des essais de traction par flexion

Temps (j)	M0	M10	M20	M30
2	9,11	10,14	11,17	12,03
7	8,62	10,18	11,75	12,85
14	8,31	10,24	12,17	12,56
28	8,56	10,61	12,66	13,38

Les résistances à la traction aux jeunes âges (2 jours) sont assez importantes, elles sont toutes supérieures à 10 MPa sauf pour le mortier de référence M0 qui a enregistré une résistance à la traction de l'ordre de 9 MPa.

A 28 jours, on remarque une légère augmentation de résistances des mortiers avec les sables (SGR) par rapport aux mortiers de référence sans (SGR).

Les figures (III-1 a) et (III-1 b) représentent les variations des résistances à la traction par flexion des différents mortiers en fonction du temps.

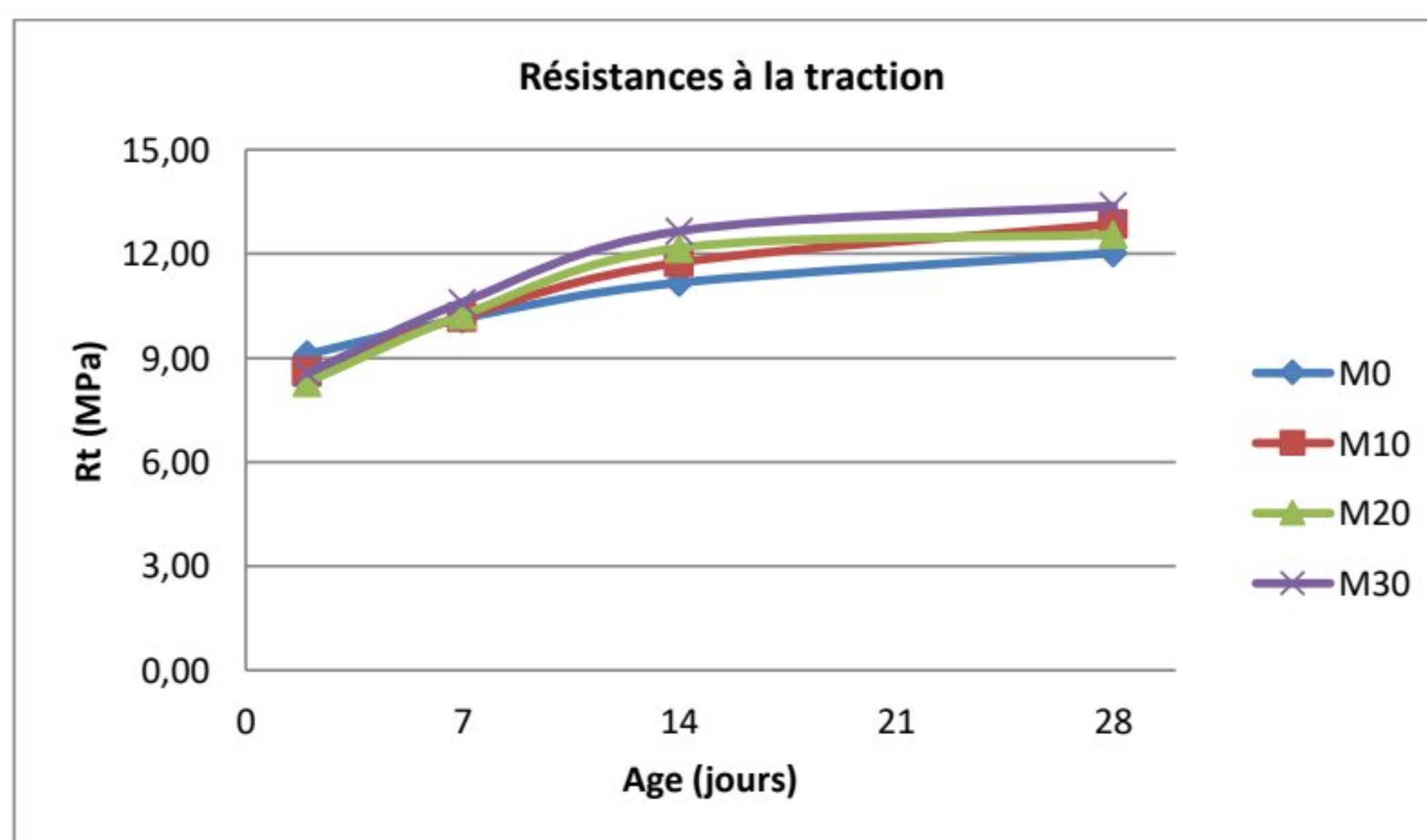


Figure (III-1 a) : Variation des résistances à la traction des différents mortiers

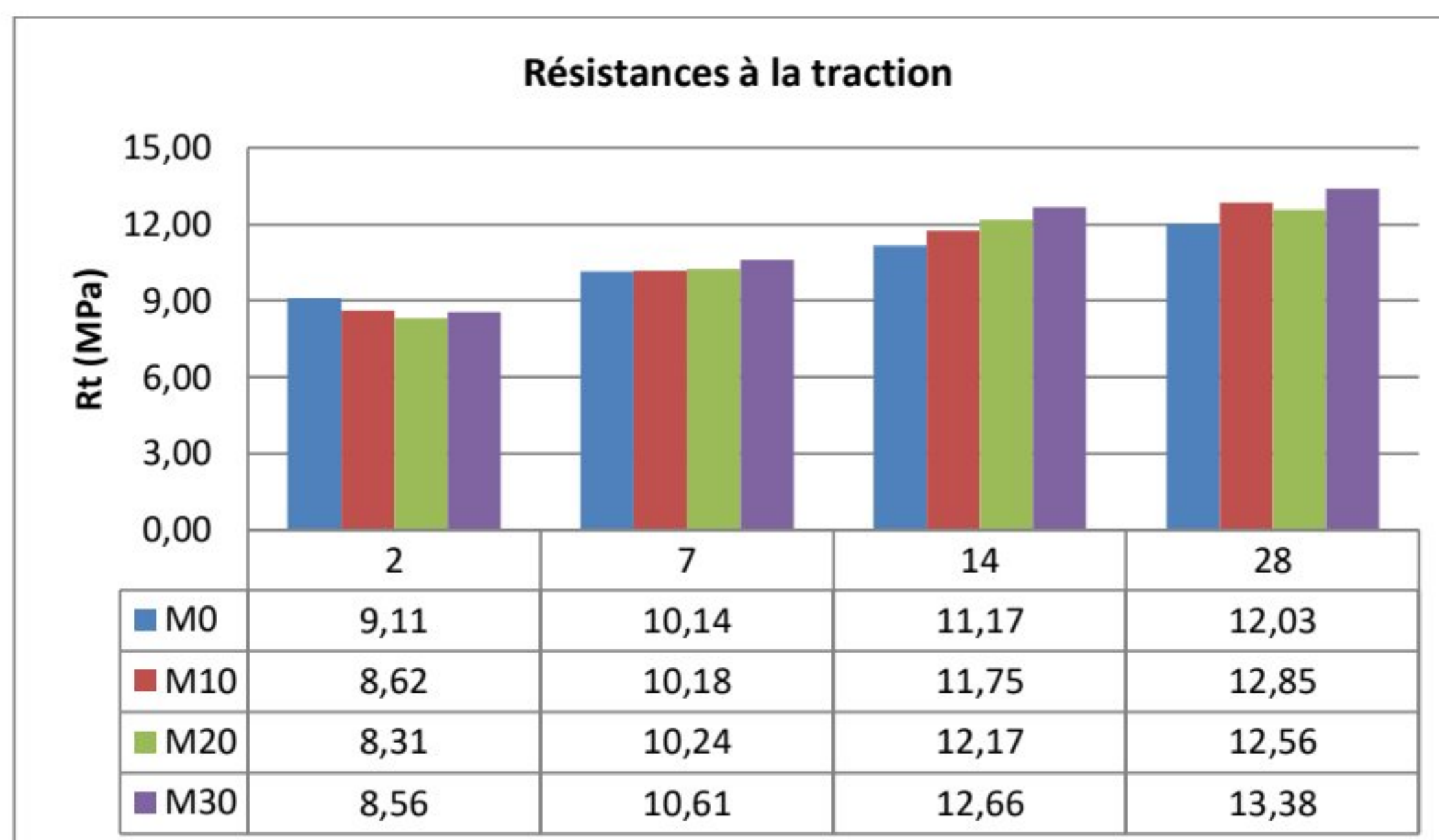


Figure (III-1 b) : Résistance à la traction des mortiers avec et sans (SGR)

Comme première observation, toutes les résistances augmentent en fonction du temps.

Les résistances à la traction augmentent en fonction des taux du taux de substitution des (SGR) incorporés, ce qui répond parfaitement aux objectifs de l'étude.

L'incorporation des sables (SGR) améliore les résistances à la traction des mortiers de ciment.

Cette amélioration de résistance a été observée à toutes les échéances (de 2 jours à 28 jours).

Le taux de substitution de 30% a généré des résistances à la traction supérieures à celles des mortiers de référence à compter de 7 jours d'âge.

Au-delà de 28 jours, l'influence des (SGR) sur les résistances à la traction pourraient être plus important.

1.1. 2 Résultats sur les essais de compression :

Les résultats obtenus sur les différents mortiers sont donnés par le tableau suivant :

Tableau III-2: Résultats des essais de la compression

Temps (j)	M0	M10	M20	M30
2	22,86	28,01	37,07	44,51
7	20,36	27,33	33,50	42,35
14	20,09	26,55	33,01	40,32
28	18,12	25,27	32,67	38,48

Les figures (III-2 a) et (III-2 b) suivantes représentent les variations des résistances à la compression des différents mortiers en fonction du temps.

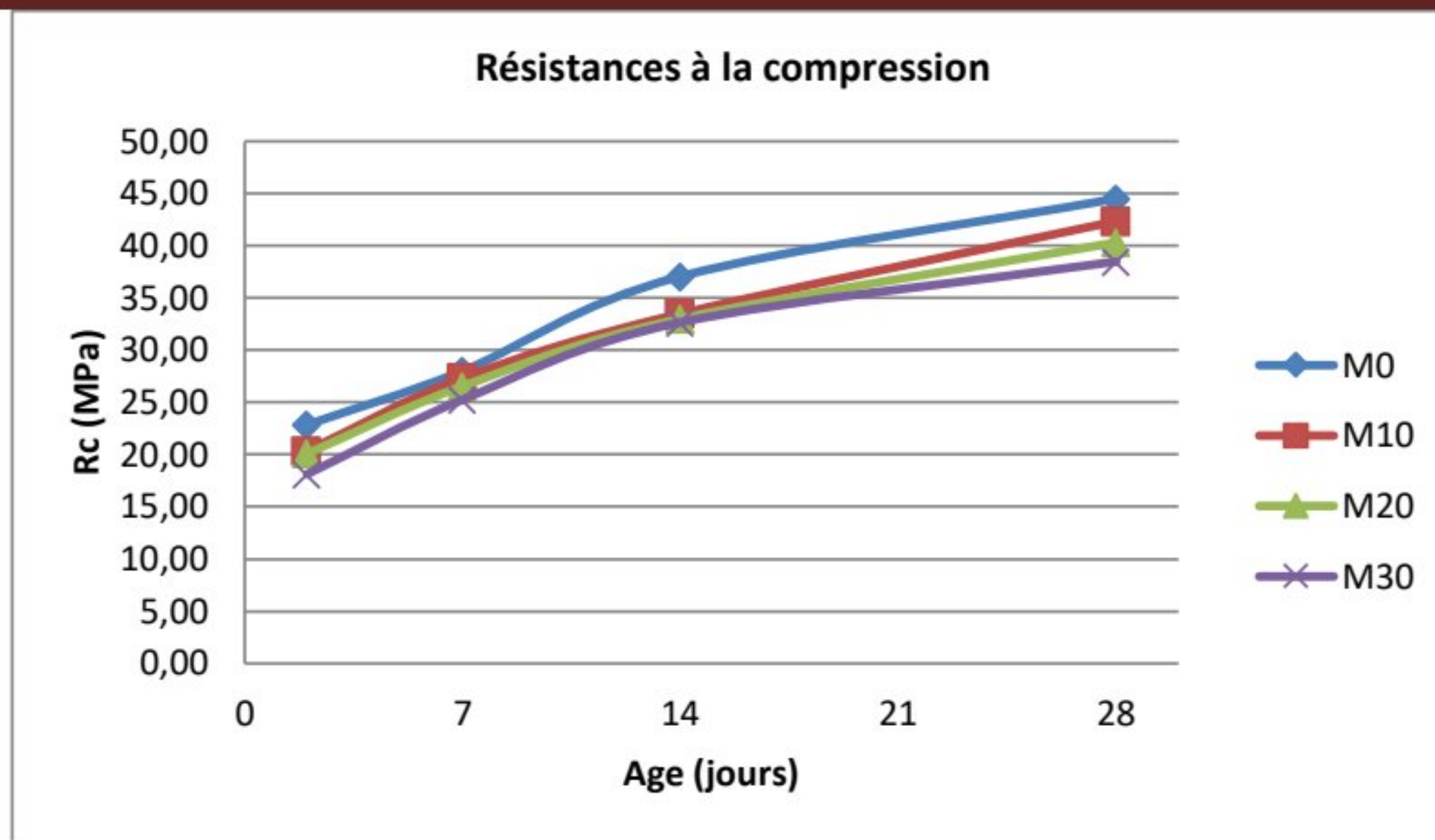


Figure (III-2a) : Variation des résistances à la compression des différents mortiers

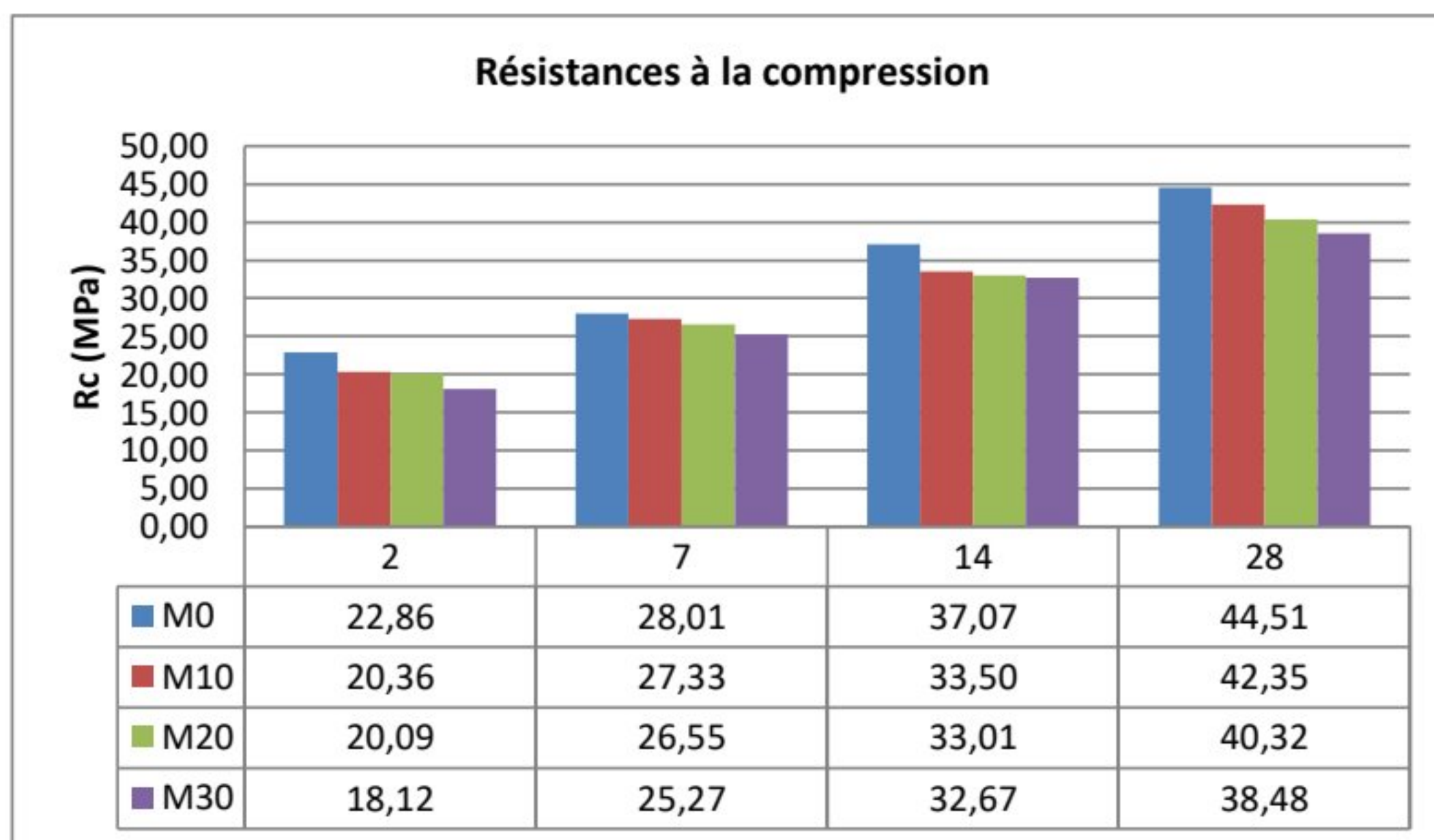


Figure (III-2b) : Résistances à la compression des mortiers avec et sans (SGR)

Comme première observation, toutes les résistances augmentent en fonction du temps.

A toute l'échéance (2 j à 28 j) ; les mortiers de référence sans (SGR) ont développé les résistances à la compression les plus élevées.

Au jeune âge (2 jours), les mortiers avec 10 % et 20% ont donné des résistances équivalentes mais inférieures à celle du mortier de référence. C'est à partir de 28 jours, que les mortiers à 10 % de (SGR) se distinguent par leurs résistances par rapport aux mortiers contenant 20 % et 30 %.

L'incorporation des sables (SGR) donnent des résistances assez importantes (entre 38 MPa et 42 MPa), ce qui permet d'économiser sur l'utilisation des sables naturels jusqu'à 30 %.

1. 1. 3 Evolution des résistances à la traction par flexion et à la compression:

La mesure de l'évolution des résistances est un moyen de vérification des variations des résistances mécaniques en fonction du temps par rapport au mortier de référence sans (SGR)

Les figures (III-3 a) et (III- 3 b) illustrent les évolutions des résistances à la traction et à la compression respectivement.

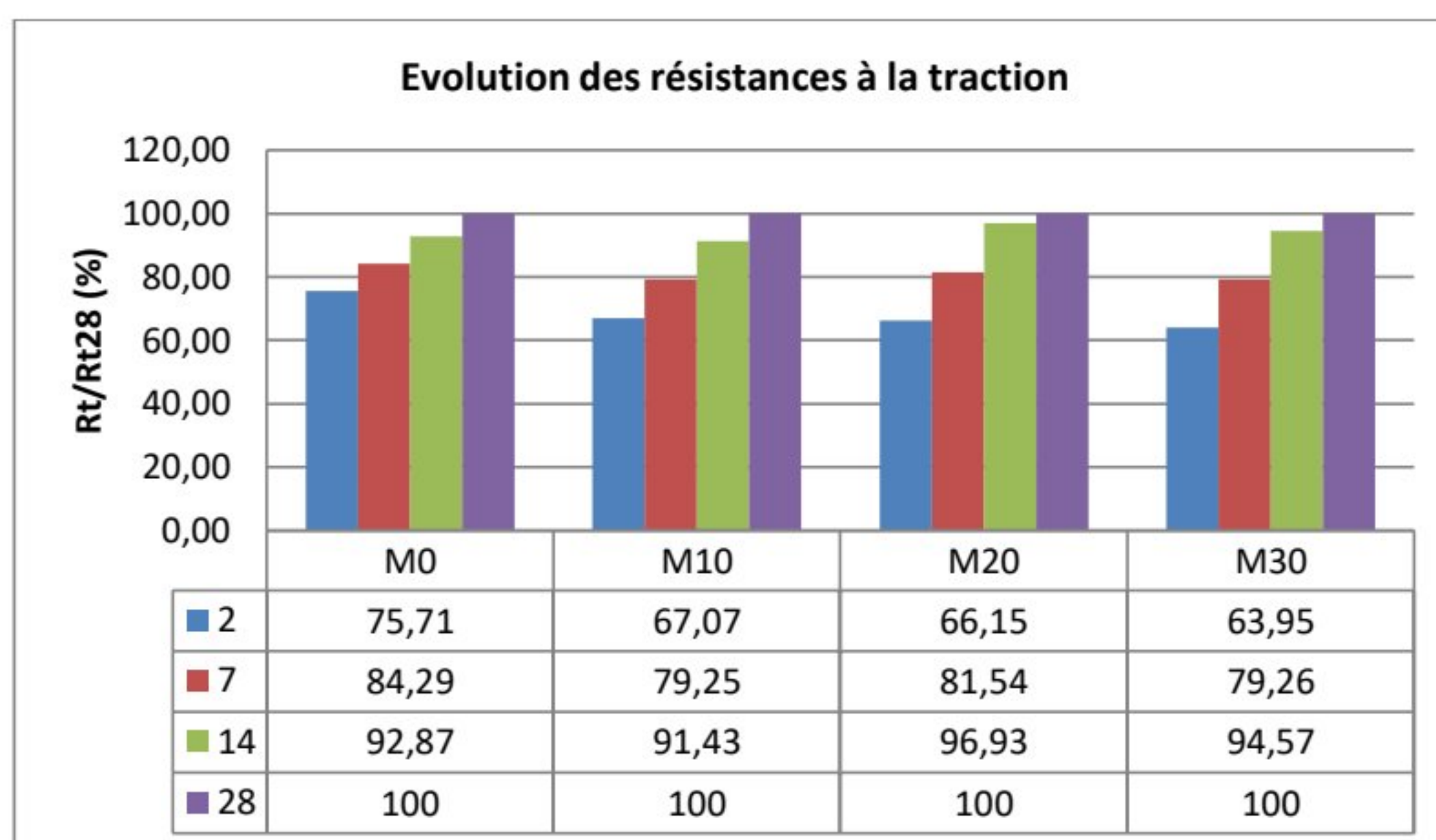


Figure (III-3a) : Evolution des résistances à la traction

Les mortiers avec 10 % de (SGR) ont développé une évolution de résistance à la traction équivalente à celle de mortier de référence à partir de 14 jours.

Les mortiers avec 20 % et 30 % de (SGR) ont enregistré des évolutions supérieures à celles des mortiers de référence à compter de 14 jours d'âge. Avant, c'est le mortier sans (SGR) qui est intéressant.

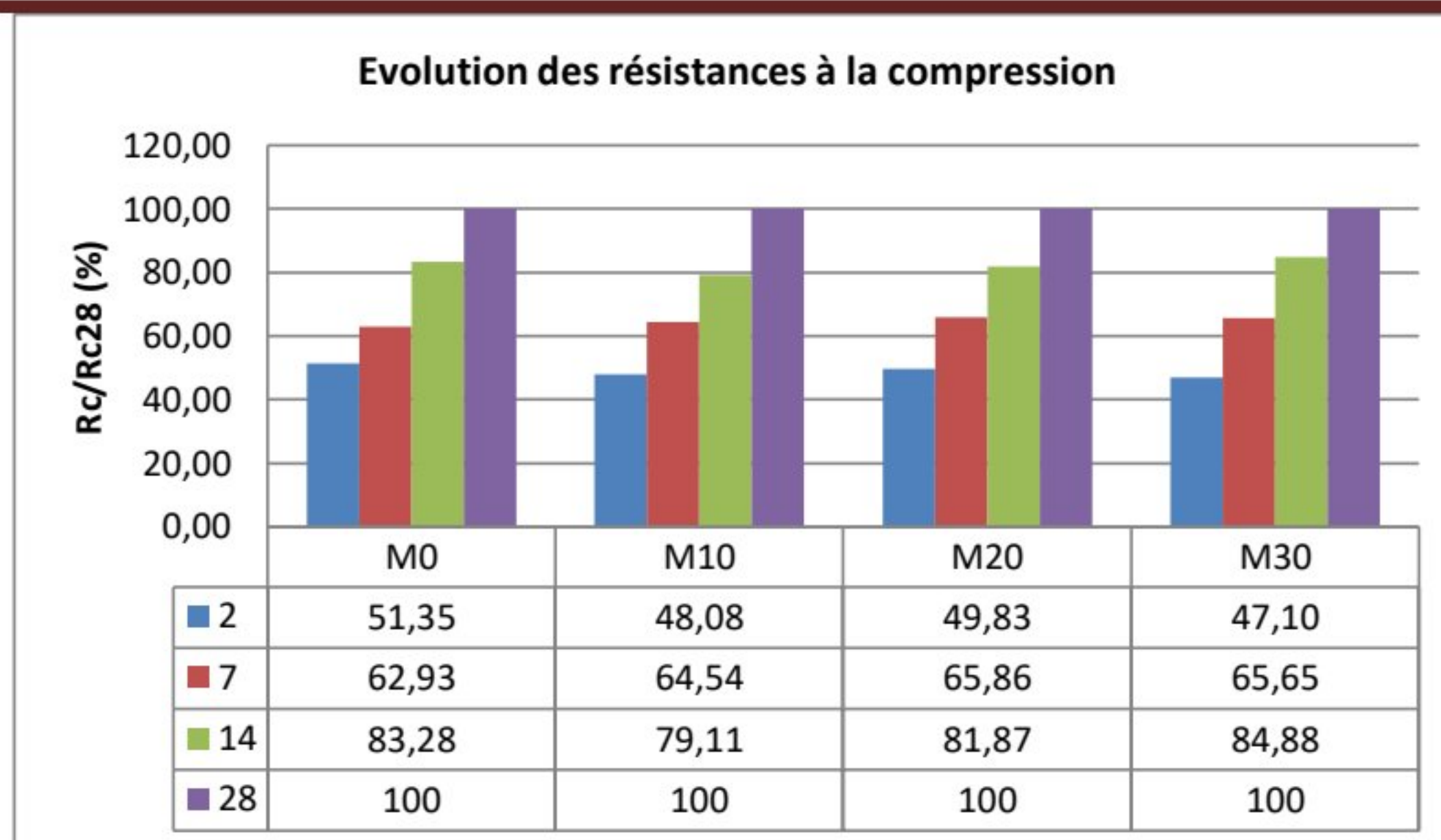


Figure (III-3b) : Evolution des résistances à la compression

A 2 jours, tous les mortiers sans (SGR) ont développé des résistances à la compression supérieures à celles des mortiers avec (SGR). Cette évolution de résistance s'est atténuée avec l'augmentation du temps. *Cela veut dire que l'incorporation des sables (SGR) améliore les résistances à la compression à partir de 7 jours d'âge.*

Les sables (SGR) qui généralement sont entourés d'une ancienne pâte contribuent à l'amélioration des résistances mécaniques à moyen terme.

2. Variations et Pertes de masses :

Les mortiers confectionnés ont été conservés dans l'eau pour durcir, durant cette cure le ciment continu à s'hydrater (réagir avec l'eau), ce qui provoque généralement des variations de masses des différentes éprouvettes en fonction du temps (jusqu'à 28 jours). Cette diminution serait due à la différence des masses volumiques des matériaux de départ et des matériaux hydratés.

Les variations des masses des différentes éprouvettes de mortiers sont données par le tableau (III-3) ci-dessous.

Tableau (III-3) : Variation des masses des mortiers

Temps (j)	M0	M10	M20	M30
2	569,9	569,2	566,05	562,2
7	573,4	567,05	563,2	550,7
14	572,36	567,5	566,055	559,75
28	571,73	560,64	554,4	549,55

La représentation graphique de toutes ces variations est donnée par la figure III-4

Ci-dessous :

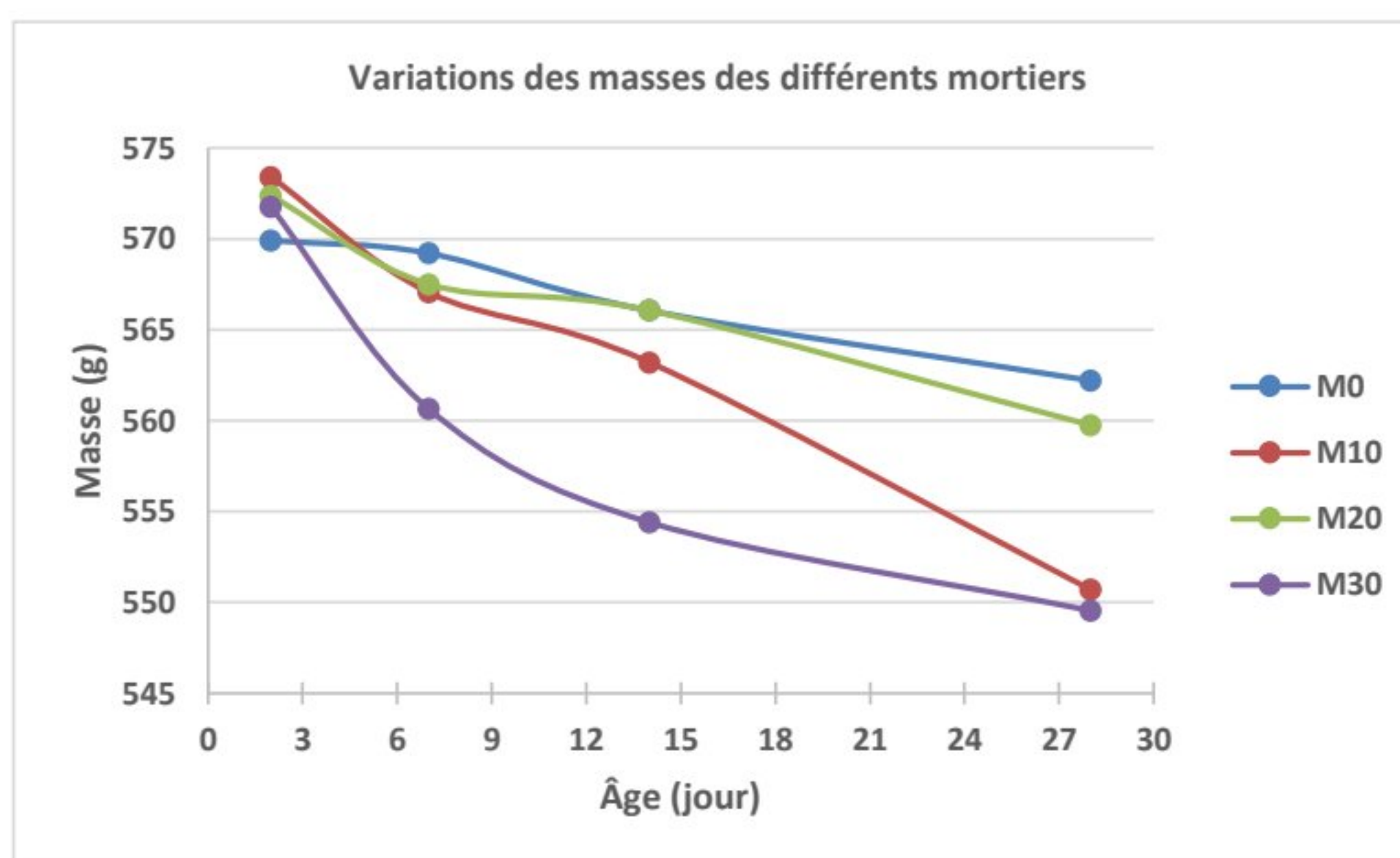


Figure III-4 : Variation des masses des mortiers

Tous les mortiers ont subi des diminutions de masses. Visuellement, ces variations deviennent importantes au-delà de 14 jours. Les mortiers à 10 % de (SGR) ont pratiquement les mêmes variations de masses que les mortiers de référence. Les mortiers avec 30 % de (SGR) ont développé les variations de masses les plus importantes.

De ces courbes, il est difficile d'observer la diminution la plus importante.

Afin de pouvoir mieux étudier ces variations, on a calculé les pertes des masses des différents mortiers ainsi que leurs variations en fonction du temps (jusqu'à 28 jours).

La perte de masses est définie par :

$$P \% = (M_j - M_0)/M_0$$

Où :

M_j : Masse du mortier au jour « j » avec (j = 2, 7, 14 ou 28)

M₀ : Masse de référence (correspond à 2 jours pour chaque mortier).

Toutes les mesures de masses ont été faites juste avant les essais des écrasements des mesures des résistances mécaniques (tractions et compressions) et aux mêmes échéances.

Le tableau III-4 ci-dessous donne les différentes valeurs des pertes des masses des différents mortiers.

Tableau III-4 : Pertes des masses des différents mortiers

Temps (j)	M0	M10	M20	M30
2	-0,12	-0,68	-0,68	-1,35
7	-0,85	-1,10	-1,10	-2,20
14	-1,94	-3,03	-3,03	-3,88
28	-2,80	-3,46	-4,46	-5,61

La représentation en courbes de ces pertes de masses est donnée par la figure III-5

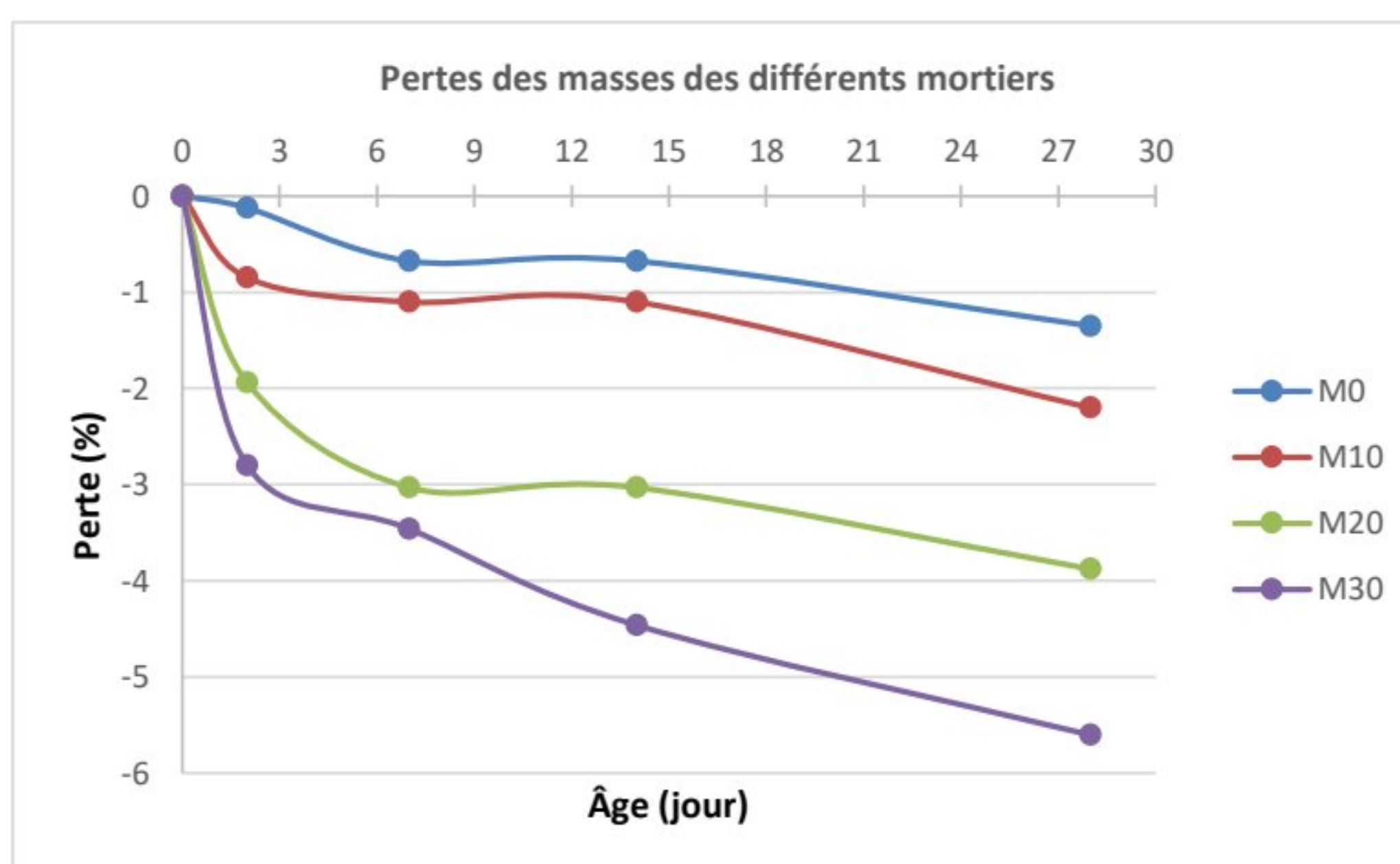


Figure III-5 : Pertes de masses des différents mortiers.

La perte de masse maximale à 28 jours de 5.61 % a été observée pour les mortiers contenant 30% de (SGR)

Le mortier M10 contenant 10 % de (SGR) a subi la perte de masse la plus faible, parmi les mortiers contenant les (SGR) jusqu'à 28 jours (2,20 %).

Les mortiers de référence sans (SGR) ont enregistré les pertes de masses les plus faibles à toutes les échéances.

3. Absorption capillaire :

Sur les mortiers de différentes compositions, les mesures des absorptions capillaires unidirectionnelles ont été effectuées. La figure III-7 montre le dispositif normalisé appliqué pour ces mesures.



Figure III – 6: Essai de mesure de l'absorption capillaire unidirectionnelle

Les mesures des différentes masses étaient continuées, de l'ordre des minutes au début de l'essai, puis de l'ordre de jours, les variations des masses au-delà de 24 heures n'étaient pas très importantes. Les mesures des augmentations des masses des différents mortiers se sont arrêtées après stabilisation (après 38 jours d'âge).

Le tableau III- 5 Donne les valeurs des masses en fonction de l'âge.

Tableau III- 5 : Variations des messes dues à l'absorption capillaire

	0	10	30	60	90	120	240	1440	2880	4320	1152	12960	14400
		min	min	min	min	min	min	min	min	min	0 min	min	min
M0	542,5	542,7	542,7	542,9	543	543,1	543,4	544,7	547,4	551,3	559,8	561,1	561,1
M10	525,4	525,8	525,9	526	526,1	526,2	526,6	527,9	530,6	534,9	544,6	546	546,3
M20	514,5	515	515,1	515,3	515,4	515,6	515,9	517,1	519,9	524	533,3	534,4	534,4
M30	503,2	503,6	503,9	504,2	504,4	504,6	505,3	506,9	510,1	513,8	523,3	524,5	524,6

Le tableau III- 6 présente les pourcentages de ces variations par rapport aux mortiers de références.

Tableau III- 6 : Pourcentage des augmentations des absorptions capillaires

	0,00	10	30	60	90	120	240	1440	2880	4320	11520	12960	14400
		min	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min	min
M0	0,00	0,04	0,04	0,07	0,09	0,11	0,17	0,41	0,90	1,62	3,19	3,43	3,43

Chapitre III : Résultats et Analyse

M10	0,00	0,08	0,10	0,11	0,13	0,15	0,23	0,48	0,99	1,81	3,65	3,92	3,98
M20	0,00	0,10	0,12	0,16	0,17	0,21	0,27	0,51	1,05	1,85	3,65	3,87	3,87
M30	0,00	0,08	0,14	0,20	0,24	0,28	0,42	0,74	1,37	2,11	3,99	4,23	4,25

Ces variations sont représentées graphiquement par l'ensemble des courbes suivantes.

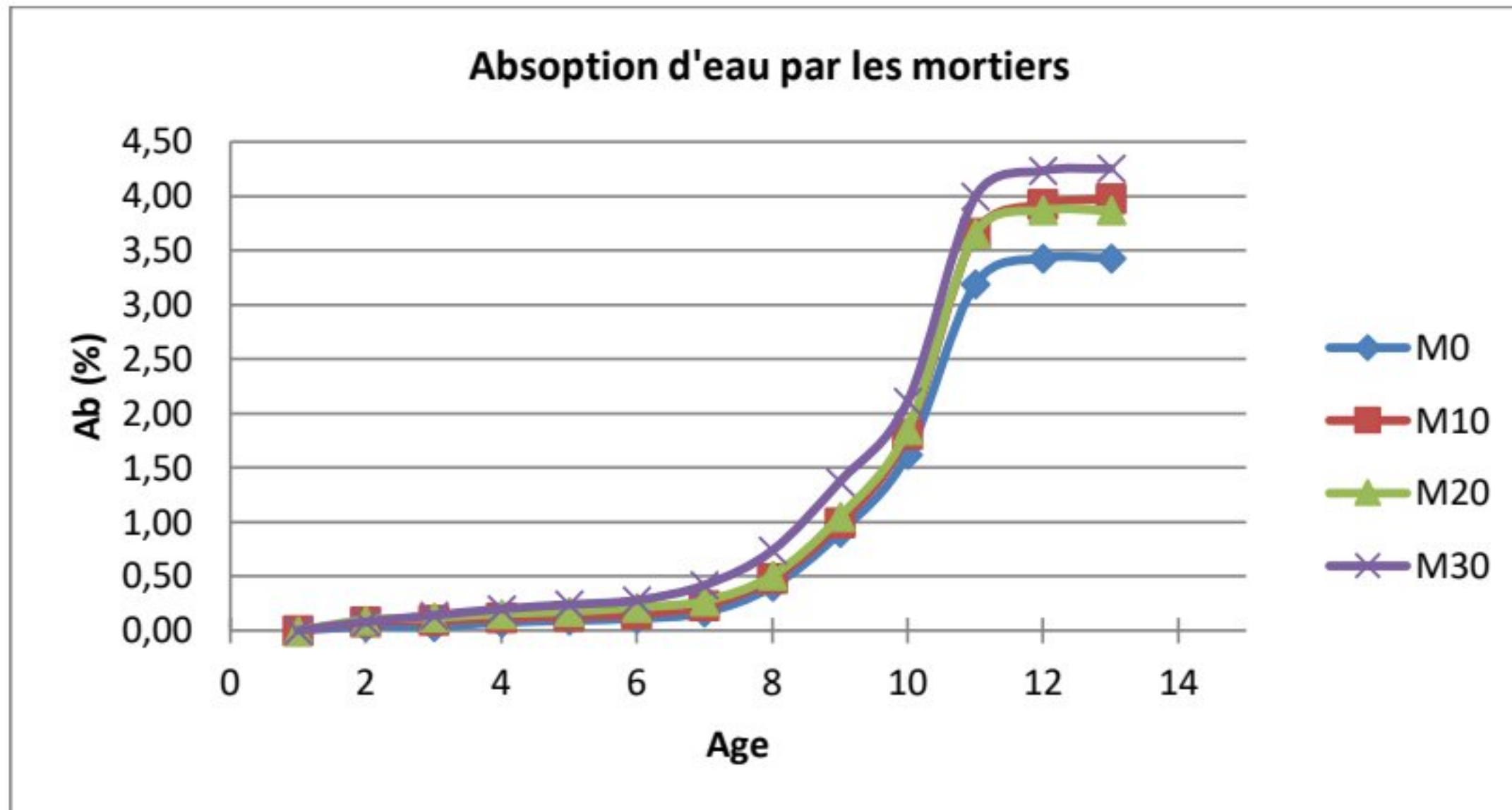


Figure III- (7 a) : courbes de variations de l'absorption capillaire unidirectionnelle

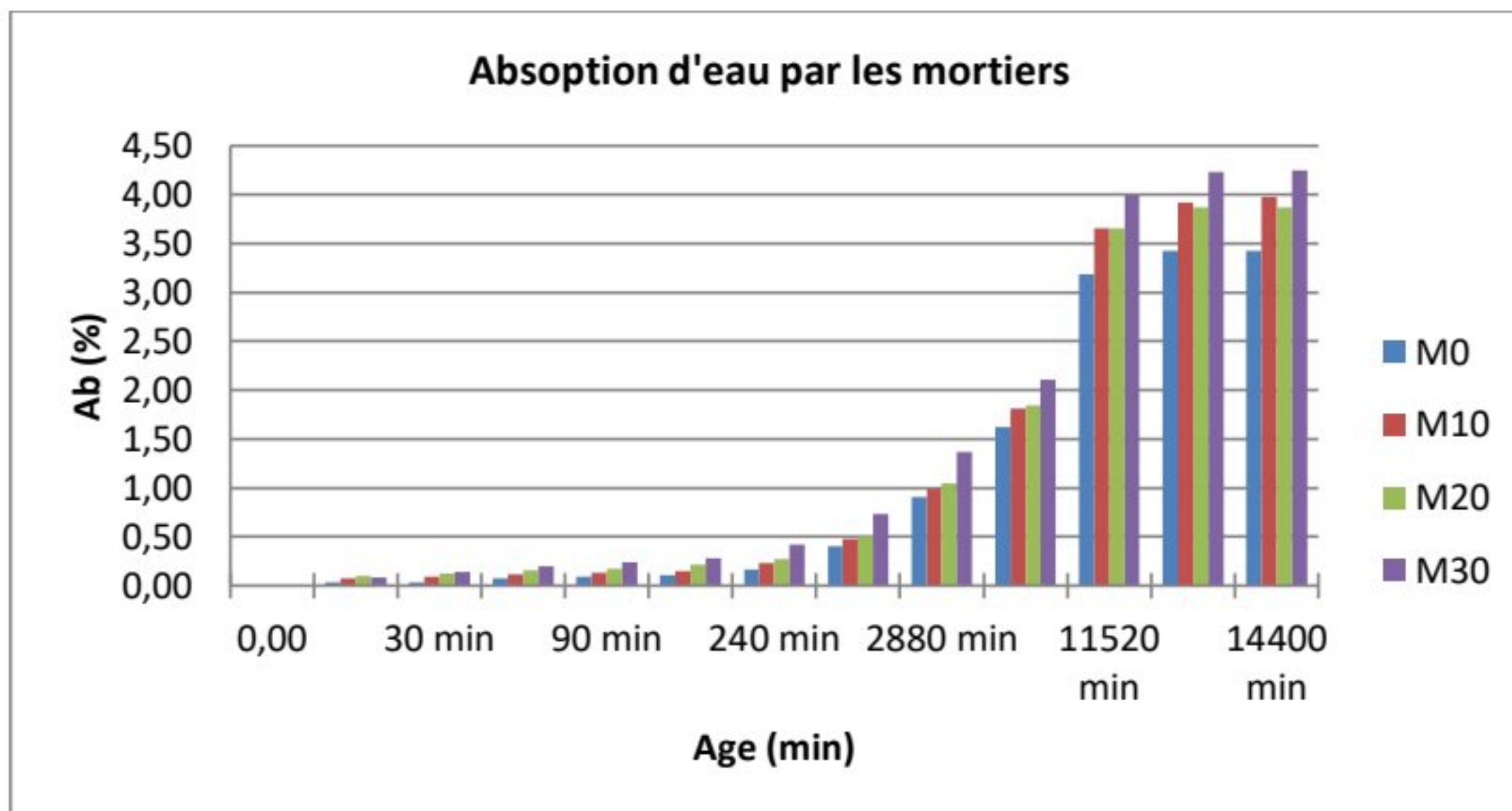


Figure III- 7 b) : Histogrammes de variations de l'absorption capillaire unidirectionnelle

Comme le montrent bien ces courbes, les absorptions initiales n'étaient pas très importantes, mais elles continuent à augmenter jusqu'à l'âge de 38 jours où toutes les masses de tous les mortiers se sont stabilisées.

Les mortiers M30 (contenant 30% de (SGR)) a généré les plus grandes valeurs de l'absorption d'eau à toutes échéances, alors que les mortiers M10 et M20 ont absorbé pratiquement les mêmes quantités d'eau, c'est à partir du 8^{ème} jour d'absorption que les mortiers M10 se détachent des mortiers M20. Les mortiers de référence M0 ont absorbé moins d'eau par rapport aux mortiers avec (SGR) durant toute la période des mesures : *l'incorporation des sables de granulats recyclés (SGR) dans la confection des mortiers génère une absorption d'eau proportionnelle aux taux de substitutions.*

4. Absorption d'eau par hydratation :

Le même essai que le précédent et dans les mêmes conditions a été appliqué sur les différents mortiers de 2 jours d'âge. L'essai n'est pas normalisé, mais à travers cette expérimentation nous souhaitons mesurer les quantités d'eau absorbées durant l'hydratation des ciments qui les composent. La figure suivante montre les éprouvettes des mortiers en absorption d'eau, les mesures se font à travers le pesage des masses et leurs évolutions en fonction du temps jusqu'à stabilisation.



Figure III- 8: Suivi de l'hydratation pour les différents mortiers

Les résultats jusqu'à l'âge de 38 jours obtenus sont donnés par le tableau ci-dessous :

Tableau III- 7 : Variation des messes par hydratation

Temp s (h)	0	0,17	0,5	22	72	192	504	840	864	888	912	960
M0	587, 8	587, 8	587, 8	586, 8	583, 9	580, 7	579	576, 7	576, 3	576, 1	575, 8	575, 7
M10	544, 5	543, 7	543, 6	541, 1	536, 1	530, 9	529	528, 5	528, 4	528, 1	527, 2	527, 1
M20	568, 9	568, 8	568, 7	568, 1	565, 6	562, 6	560	558, 6	558	557, 6	557, 4	557, 2
M30	567, 3	566, 9	566, 2	565, 9	563, 2	560, 1	558, 3	556, 3	556, 1	556	555, 9	555, 7

La représentation graphique de ces résultats est donnée par l'ensemble des courbes suivantes :

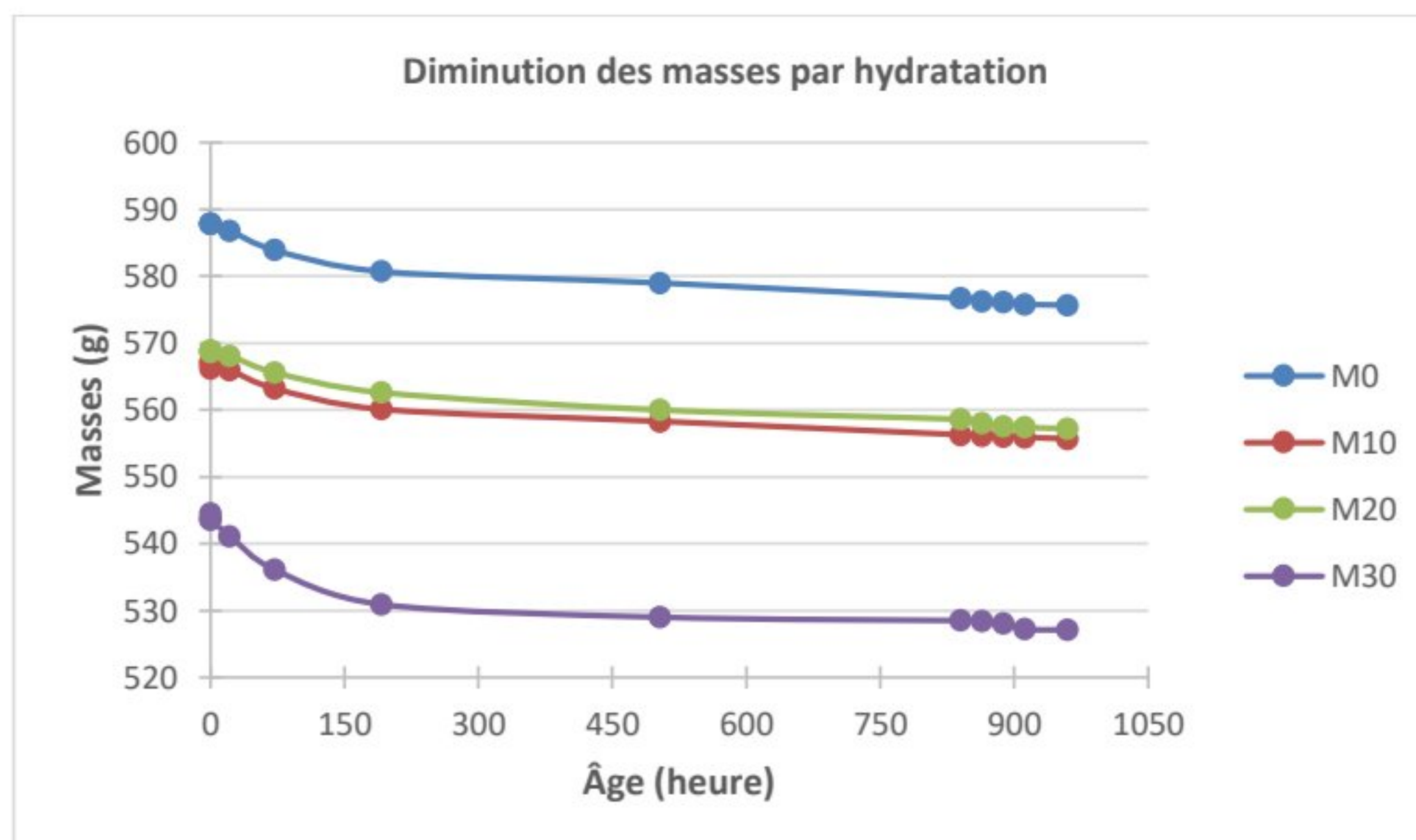


Figure III-9 : diminution des masses des différents mortiers

La diminution des masses en fonction du temps a été observée pour tous les mortiers. Cette diminution est due à la différence des masses volumiques entre le ciment anhydre (en poudre) et le ciment hydraté. Lorsque le ciment est en contact permanent avec l'eau, il y a réaction d'hydratation et les produits essentiels de cette hydratation sont : Silicate de Calcium Hydraté (C-S-H), Hydroxyde de Calcium (Portlandite - CH) et Aluminates de Calcium Hydratés (Ettringite et Monosulfoaluminate). Ces produits sont moins denses, donc pèsent moins que le ciment anhydre (Taylor, H.F.W., 1997).

Le tableau suivant donne une comparaison entre les différentes masses volumiques des produits de l'hydratation comparées à celle du ciment en poudre (Taylor, H.F.W., 1997).

Tableau III- 8 : Comparaison des masses volumiques des produits hydratés

Masses Volumiques Comparées		
Matériau	Masse Volumique (g/cm³)	Comparaison avec le Ciment Anhydre (~3.15 g/cm³)
Ciment Portland anhydre	~3.15	Référence
C-S-H (gel)	~2.0 - 2.4 (moyenne 2.2)	30% moins dense que le ciment
Portlandite (CH)	2.23	~29% moins dense
Ettringite (AFt)	1.75	45% moins dense
Monosulfoaluminate (AFm)	1.95	~38% moins dense

Les figures (III- 10 a et III- 10 b) donne une représentation plus claire de la diminution des masses comparées aux masses de départ.

Figure III- 10 a : Courbes de diminutions des masses comparées aux masses de départ

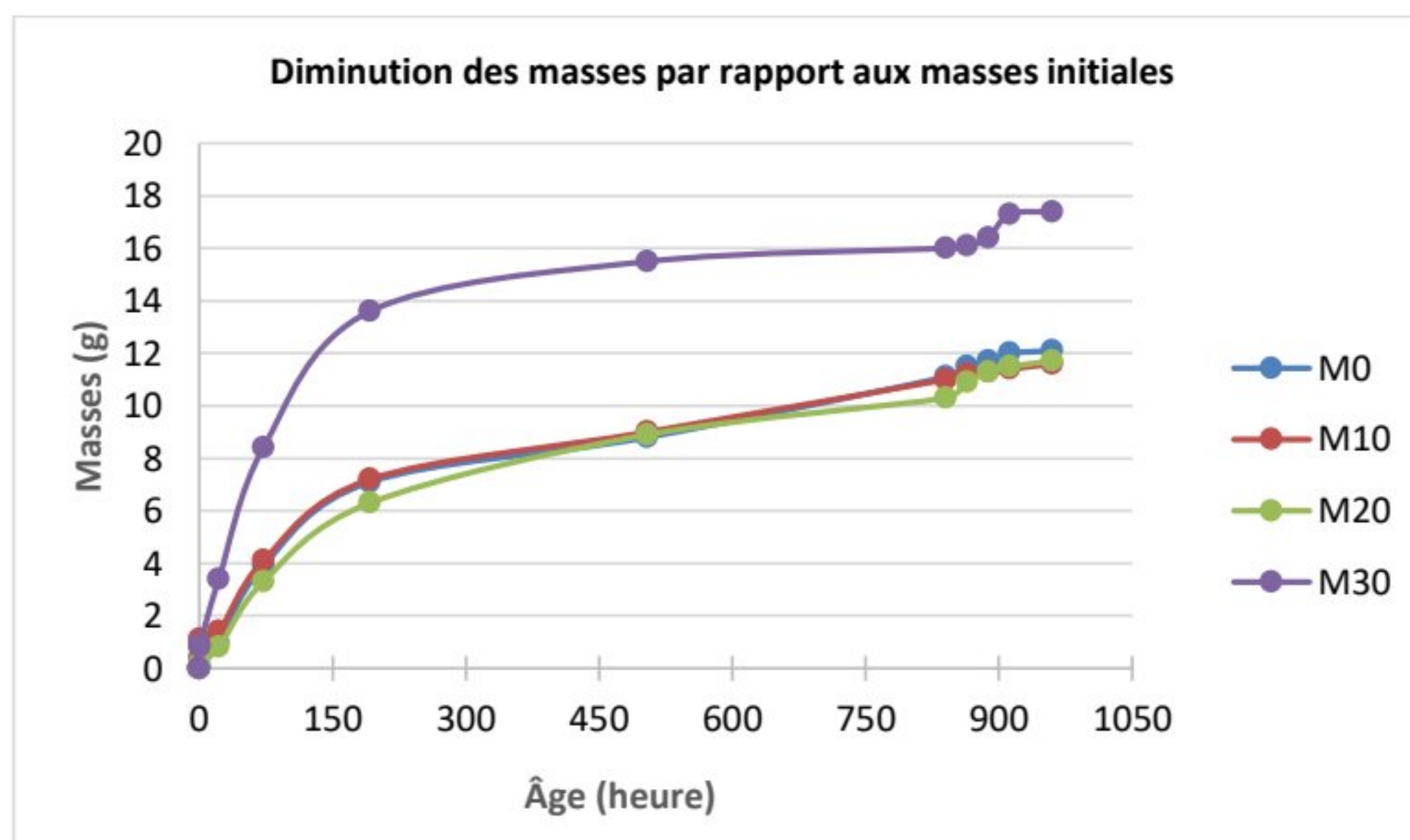
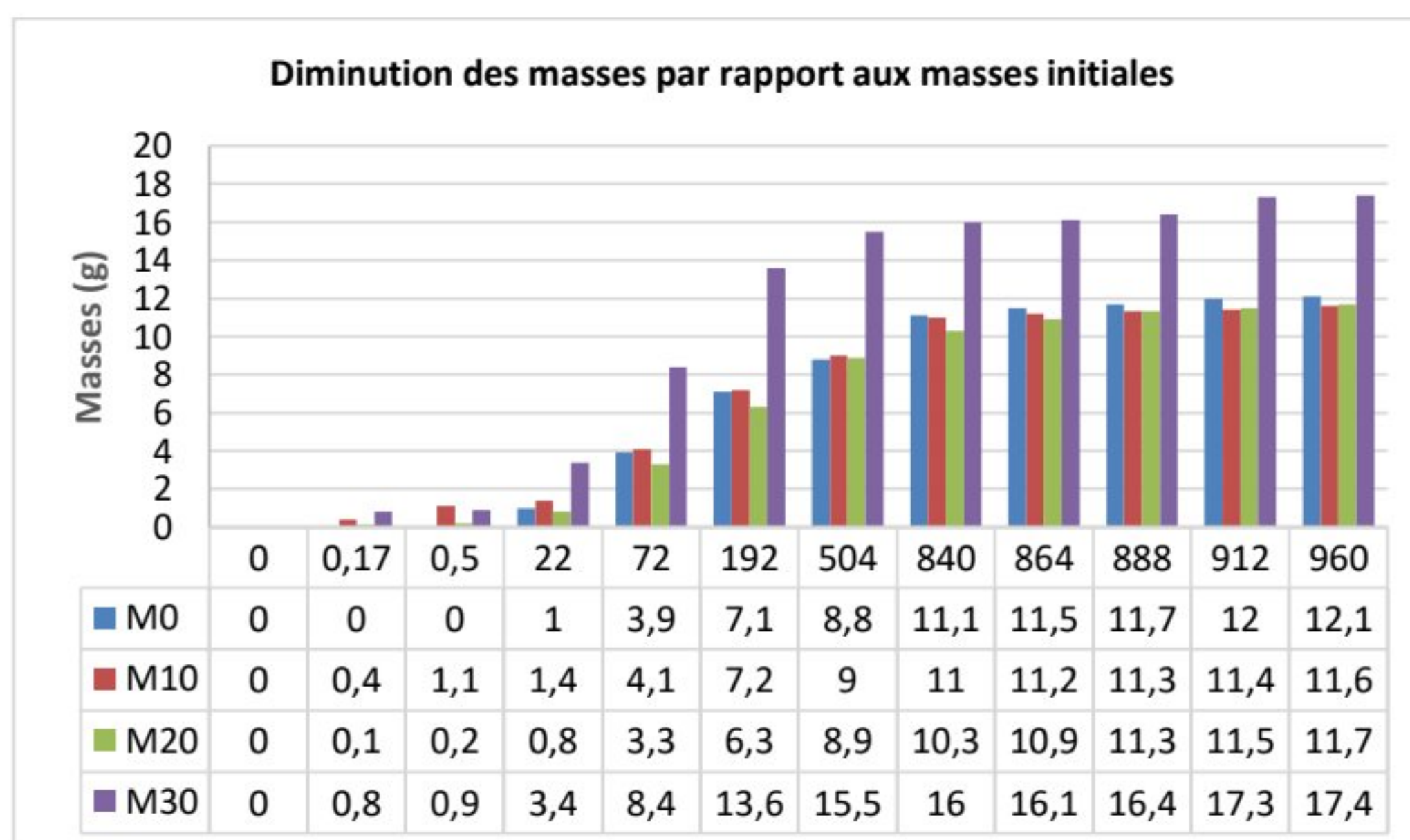


Figure III- 10 b : Histogrammes de diminutions des masses comparées aux masses de départ



Tous les mortiers ont subi des diminutions de masses lors de l'hydratation du ciment qui les composent. Les mortiers M0, M10 et M20 subissent globalement les mêmes diminutions, pour atteindre des valeurs entre 11 et 12 g après 38 jours. Alors que le mortier M30 contenant 30 % de sable (SGR) se démarque par une plus grande diminution de plus de 17 g après 38 jours de cure. Une question essentielle à laquelle on ne peut pas répondre dans la présente étude est : quelle est la relation entre le taux de substitution de sable (SGR) et la diminution des masses des mortiers ?

Conclusion :

Les caractéristiques des différents mortiers à l'état durci ont été étudiées.

Les résistances mécaniques (à la traction et à la compression) des différents mortiers ont augmenté en fonction du temps. Tous les mortiers avec des sables (SGR) ont développé des résistances mécaniques acceptables, voisines de celles des mortiers de références (cas du mortier M10).

Les pertes des masses durant la cure des mortiers jusqu'à échéance de 28 jours a aussi été étudié.

Les mesures des absorptions de l'eau par les mortiers de différentes compositions ont aussi été faites, cette absorption est proportionnelle aux taux de substitutions des sables (SGR).

Un essai non normalisé mais intéressant est celui du suivi de l'absorption d'eau jusqu'à l'âge de 28 jours a été effectué sur des éprouvettes de mortiers dès 2 jours d'âge, les résultats obtenus montrent des diminutions des masses des différents mortiers.

Conclusion générale

La consommation surabondante des matériaux naturels pour l'industrie des BTP qui utilisent d'énormes quantités de béton est à l'origine de cette étude de recherche.

Le but de notre étude était de valoriser des déchets issus des démolitions des anciennes constructions et des différents ouvrages des BTP dans la confection de nouveaux bétons, dont les sables naturels ont été partiellement substitués par des sables issus des granulats recyclés (SGR), les taux des substitutions choisis étaient 10%, 20% et 30% en se basant sur les résultats des études antérieures.

Les résistances mécaniques des différents mortiers ont augmenté en fonction du temps jusqu'à 28 jours. Les mortiers avec 10 % de (SGR) ont développé une évolution de résistance à la traction équivalente à celle du mortier de référence à partir de 14 jours.

Les mortiers avec 20 % et 30 % de (SGR) ont enregistré des évolutions supérieures à celles des mortiers de référence à compter de 14 jours d'âge. Avant, c'est le mortier sans (SGR) qui est intéressant.

A 2 jours, tous les mortiers sans (SGR) ont développé des résistances à la compression supérieures à celles des mortiers avec (SGR). Cette évolution de résistance s'est atténuée avec le temps : l'incorporation des sables (SGR) améliorent les résistances à la compression à partir de 7 jours d'âge.

Les sables (SGR) qui généralement sont entourés d'une ancienne pâte contribuent à l'amélioration des résistances mécaniques à moyen terme.

Sur les mesures des absorptions d'eau unidirectionnelles, on a pu constater que les absorptions initiales n'étaient pas très importantes, mais elles continuent à augmenter jusqu'à l'âge de 38 jours où toutes les masses de tous les mortiers se sont stabilisées.

Les mortiers M30 (contenant 30% de (SGR)) ont généré les plus grandes valeurs de l'absorption d'eau à toutes échéances (peut être due à la quantité de l'ancienne pâte qui entoure les grains de de sable), alors que les mortiers M10 et M20 ont absorbé pratiquement les mêmes quantités d'eau, c'est à partir du 8^{ème} jour d'absorption que les mortiers M10 se détachent des mortiers M20. La perte de masse maximale à 28 jours de 5.61 % a été observée pour les mortiers contenant 30% de (SGR)

Le mortier M10 contenant 10 % de (SGR) a subi la perte de masse la plus faible, parmi les mortiers contenant les (SGR) jusqu'à 28 jours (2,20 %).

Les mortiers de référence sans (SGR) ont enregistré les pertes de masses les plus faibles à toutes les échéances.

Les mortiers de référence M0 ont absorbé moins d'eau par rapport aux mortiers avec (SGR) durant toute la période des mesures : *l'incorporation des sables de granulats recyclés (SGR) dans la confection des mortiers génère une absorption d'eau proportionnelle aux taux de substitutions.*

La diminution des masses en fonction du temps a été observée pour tous les mortiers. Cette diminution est due à la différence des masses volumiques entre le ciment anhydre (en poudre) et le ciment hydraté. Lorsque le ciment est en contact permanent avec l'eau, il y a réaction d'hydratation et les produits essentiels de cette hydratation sont : Silicate de Calcium Hydraté (C-S-H), Hydroxyde de Calcium (Portlandite - CH) et Aluminates de Calcium Hydratés (Ettringite et Monosulfoaluminate). Ces produits sont moins denses, donc pèsent moins que le ciment anhydre (Taylor, H.F.W., 1997).

Tous les mortiers ont subi des diminutions de masses lors de l'hydratation du ciment qui les composent. Les mortiers M0, M10 et M20 subissent globalement les mêmes diminutions, pour atteindre des valeurs entre 11 et 12 g après 38 jours. Alors que le mortier M30 contenant 30 % de sable (SGR) se démarque par une plus grande diminution de plus de 17 g après 38 jours de cure. Une question essentielle à laquelle on n'a pas pu répondre dans cette recherche, est : quelle est la relation entre le taux de substitution de sable (SGR) et la diminution des masses des mortiers ?

Comme recommandations pour compléter ce travail, nous suggérons :

Etude de durabilité sur les mortiers à base de (SGR) : Essais de **carbonatation accélérée** (XP P18-458) - Résistance aux **cycles gel-dégel** (NF EN 12390-9).

Etude des mortiers de mêmes compositions, en mesurant les mêmes caractéristiques mais à des échéances de long terme (au-delà de 90 jours).

Références bibliographiques

Références bibliographiques

1. (ADEME, 2021). Agence de la Transition Écologique, "Fiches techniques granulats recyclés", 2021.
2. (Akhtar et Sarmah , 2018) : Ali Akhtar, Ajit K. Sarmah, Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective, Journal of Cleaner Production, Volume 186, 2018, Pages 262-281, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>.
3. (CERIB, 2022). Rapport du Centre d'Études et de Recherches de l'Industrie du Béton, "Mortiers recyclés : bonnes pratiques". 2022
4. (Pentocelo, 2007): Mortier de terre auteur source : own work Partial reconstitution of wall by Archaeologists. Mud bricks, Mud and dry grass mortar. Apadana of Susa. Iran p 23.
5. (Taylor, H.F.W., 1997) : *Cement Chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford Publishing. Chapitre 5 : Hydration of Portland Cement (pp. 187–256). Tableaux 5.3 et 5.4 : Densités des phases hydratées (C-S-H, CH, AFt, AFm).
6. ADEME (2020). *Guide sur l'utilisation des matériaux recyclés en technique routière*. Agence de la transition écologique. URL : www.ademe.fr/guide-materiaux-recycles. Exigences environnementales et normatives (NF EN 13242).
7. Adessina, A., Ben Fraj, A., Barthélémy, J.-F., & Chateau, L. (2023). "Durability of concrete made with recycled aggregates: Influence of pre-saturation and curing conditions." *Construction and Building Materials*, 367, 130276.
8. ASTM C1437 - Standard test method for flow of hydraulic cement mortar
9. Directive 2008/98/CE du Parlement européen et du Conseil (19 novembre 2008). *Sur les déchets et abrogeant certaines directives*. Journal Officiel de l'UE : L312/3–L312/30. URL : <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>
DOI/URL : [10.1016/j.conbuildmat.2022.130276](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130276)
10. EN 998-1:2018 - Spécifications pour mortiers de maçonnerie
11. EU Project HISER (2017). Guidelines for recycled aggregates
12. Katz, A., & Baum, H. (2016). "Effect of high levels of fines content on concrete made with recycled aggregates." *Materials and Structures*, 49(8), 3229–3245. DOI : 10.1617/s11527-015-0720-5
13. NF EN 998-2 (Mortiers pour maçonnerie)
14. NF P 18-545 (Granulats recyclés)

15. **Oikonomou, N. D. (2005).** "Recycledconcreteaggregates.". *Cement and Concrete Composites*, 27(2), 315–318. DOI : 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.020
16. **Silva, R. V., de Brito, J., &Dhir, R. K. (2017).**"Properties and composition of recycledaggregatesfrom construction and demolitionwastesuitable for concrete production."*Construction and Building Materials*, 123, 59–68.DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.029
17. **Wang, L., et al. (2021).** "Time-dependentproperties of cementitious composites containingrecycled fine aggregates". *Construction and Building Materials*, 306, 124869.
18. **Zhang et al. (2023).** *Cement and Concrete Composites* 135: 104-118
19. **Zhang, J., et al. (2022).** "Rheologicalbehavior of recycledsandmortar:From microstructural properties to macroscopic performance". *Cement and ConcreteResearch*, 151, 106632.

Annexes

Annexe 1

Information sur l'adjuvant utilisé

Sika® Plastiment® BV-40 est un plastifiant réducteur d'eau énergétique qui :

- augmente la compacité du béton, entraînant ainsi une amélioration des résistances mécaniques et de l'imperméabilité
- facilite la mise en place du béton permet éventuellement de réduire le dosage en ciment
- permet d'obtenir un retard de début de prise plus ou moins important en augmentant le dosage normal d'utilisation de béton à performances élevées, aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci

Domaine d'application :

Augmentation des résistances mécaniques Sika® Plastiment® BV-40 :

Permet de réduire l'eau de gâchage d'environ 10 % sans diminuer la maniabilité du témoin. Des essais sont indispensables pour déterminer la quantité d'eau de gâchage nécessaire à l'obtention de la maniabilité souhaitée. La compacité et l'imperméabilité sont améliorées. Les résistances mécaniques à long terme sont augmentées en moyenne de 15 à 40 %.

Sika® Plastiment® BV-40 est donc particulièrement indiqué pour:

- Les bétons armés à hautes performances
- Les bétons précontraints
- Les bétons préfabriqués étuvés

Réduction du dosage en ciment Sika® Plastiment® BV-40 permet de réduire le dosage en ciment de l'ordre de 10% en conservant les résistances mécaniques. Il est utilisé dans ce cas en B.P.E. pour la confection de béton à la résistance.

Amélioration de la maniabilité Sika® Plastiment® BV-40 permet d'améliorer la maniabilité à teneur en eau constante, tout en apportant une augmentation des résistances à long terme de 10% environ. Il est donc utilisé pour la confection de pièces élancées, fortement ferrillées et dans le cas de bétons pompés

Caractéristiques / Avantages

Sika® Plastiment® BV-40, grâce à ses propriétés physico-chimiques permet:

Sur béton frais:

D'augmenter considérablement la maniabilité même en réduisant l'eau de gâchage de disperser le ciment dans la masse

- d'améliorer l'adhérence béton-armatures
- de s'opposer à la ségrégation
- d'améliorer la thixotropie
- d'étaler éventuellement la prise

Sur béton durci :

- D'augmenter les résistances mécaniques,
- D'accroître la compacité
- D'augmenter l'imperméabilité

Annexe 2

Procédure de mesure du coefficient d'absorption du sable

Masse volumique réelle et coefficient d'absorption (NF EN 1097-6)

2- MODE OPERATOIRE - granulats de 0.063 à 4 mm

2-1 Appareillage

- pycnomètre
- moule métallique tronconique de (40 +/- 3) mm de diamètre au sommet et de (90 +/- 3) mm à la base, de hauteur (75 +/- 3) mm.
- pilon métallique pesant (340 +/- 15) g avec une surface de pilonnage de (25 +/- 3) mm
- "source d'air chaud", par exemple sèche cheveux.

2-2 Mode opératoire

Laver la prise d'essai en éliminant tous le passant à 0.063; éliminer aussi les refus à 4 mm. La prise d'essai doit avoir une masse d'un kg minimum.

Mettre la prise d'essai dans un pycnomètre et immerger celui-ci dans un bain d'eau à (22 +/- 3) ° C et le laisser ainsi pendant (24 +/- 0.5) heures à cette température. Retirer alors le pycnomètre et éliminer les bulles d'air en agitant le pycnomètre. Pour enlever toutes les bulles d'air, il est possible de faire le vide.

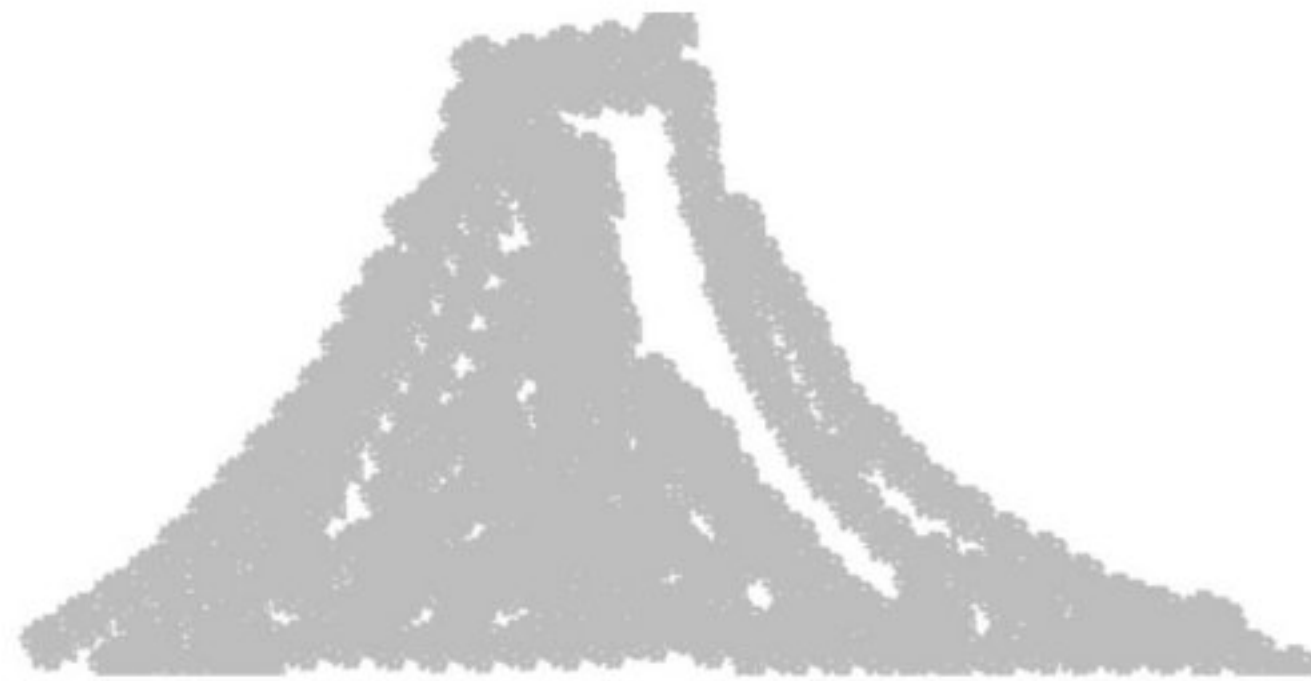
Mettre le bouchon au pycnomètre puis le peser (masse notée M2), noter la température de l'eau.

Etaler la prise d'essai au fond d'un bac pour obtenir une couche régulière de granulats puis les exposer à un courant d'air chaud pour que l'humidité en surface disparaisse. Pour savoir quand le séchage de surface est fini, il faut remplir le moule avec la prise d'essai et la tasser 25 fois, puis soulever le moule jusqu'à obtenir le cône adéquat :

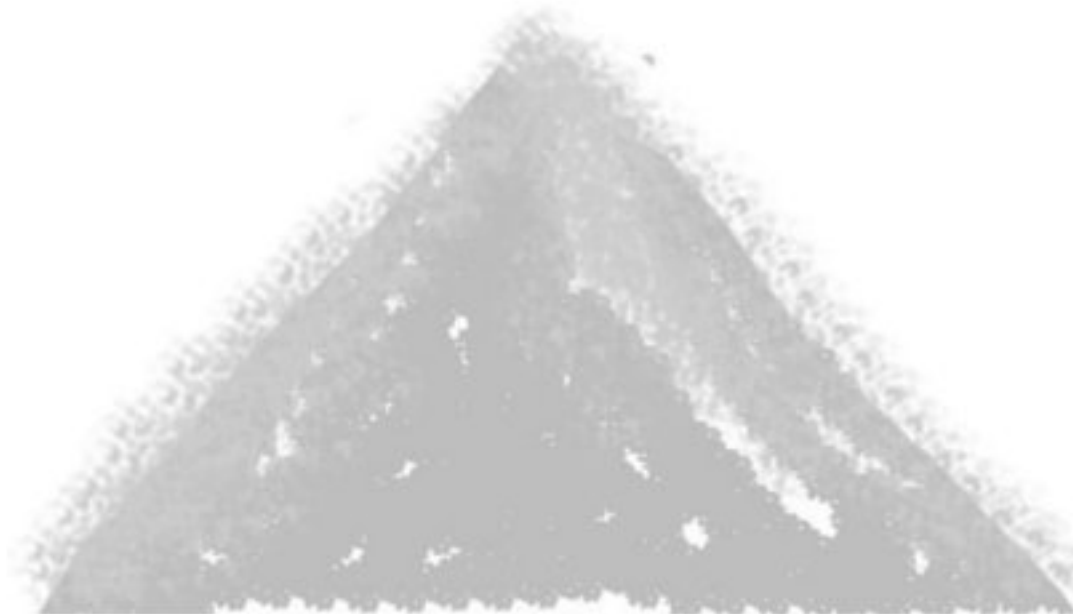
a- granulats humides qui conservent la forme du moule



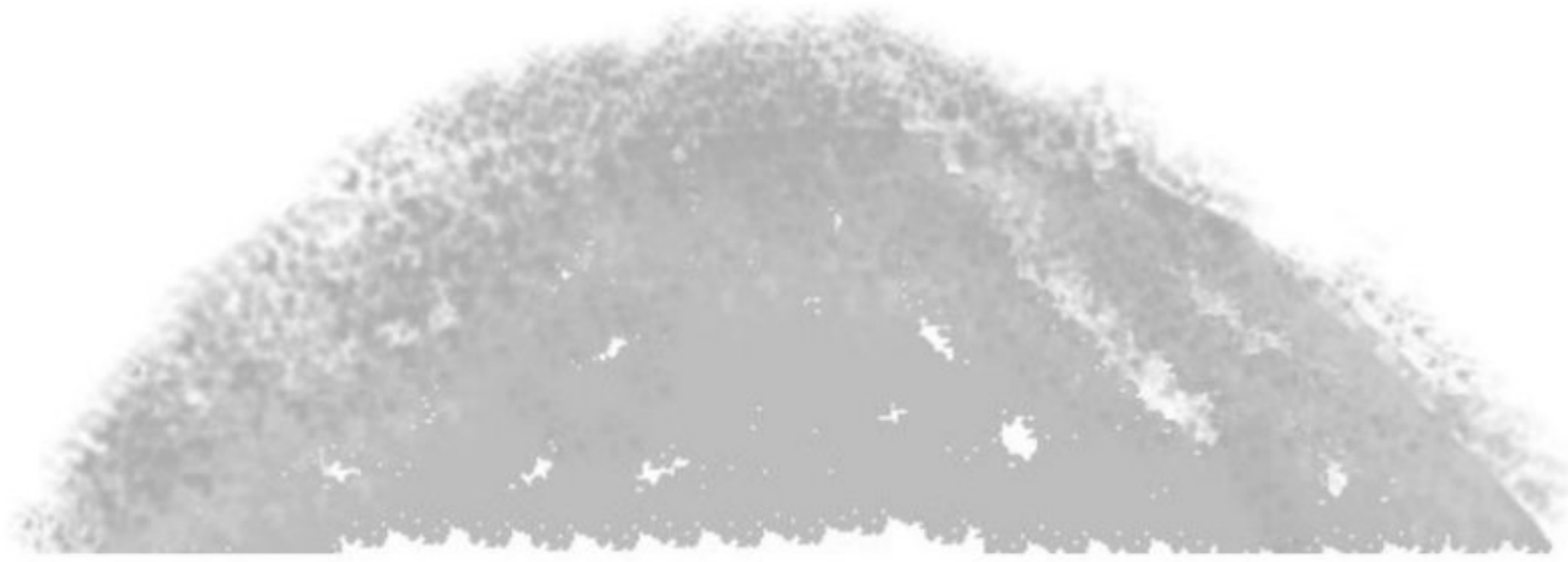
b- granulats légèrement humides



c- granulats saturés surface sèche : état à atteindre. L'effondrement du cône est complet mais un pic reste visible



d- granulats quasiment secs, état a ne pas atteindre



Peser la masse obtenue (état saturé surface sèche) notée M1 puis sécher la prise d'essai à l'étuve jusqu'à obtention d'une masse constante notée M4.

Peser le pycnomètre rempli seulement d'eau et noter sa masse M3

2-3 Calculs

avec ρ_w masse volumique de l'eau (par exemple 0.9982 à 20° C)

- masse volumique absolue $\rho_a = \rho_w \times M4 / (M4 - (M2 - M3))$ en mégagramme par mètre cube

- masse volumique réelle $\rho_{rd} = \rho_w \times M4 / (M1 - (M2 - M3))$ en mégagramme par mètre cube

- masse volumique saturée surface sèche $\rho_{ssd} = \rho_w \times M1 / M4 / (M4 - (M2 - M3))$ en mégagramme par mètre cube

- coefficient d'absorption d'eau $WA_{24} = 100 \times (M1 - M4) / M4$ en pourcentage de la masse sèche