



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement  
/...../...../.....

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الهندسة المدنية

Département de Génie Civil

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER**

Domaine: Sciences et Technologies.

Filière: Génie Civil.

Spécialité: structure.

**Thème :**

**Réutilisation des eaux grises déversées par la centrale à  
béton dans le processus de production.**

Soutenu le...../...../.....

Par

**TOUNSI Abdelghani & HASSINI Madani**

Devant le jury composé de:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

DEHANE Sarah

Magister

Université de Ouargla

Encadreur

Année universitaire 2020/2021

## *Remerciement*

Nous remercions d'abord et avant tous ALLAH le tout puissant d'avoir nous donner la force, la volonté et le courage de mener à terme le présent travail.

Nous remercions notre encadreur M<sup>elle</sup> **DEHANE**, pour avoir accepté la direction de ce travail, ses conseils, ses encouragements, son efficacité et surtout sa patience.

Nos sincères remerciements et notre gratitude aux membres du jury qui nous a accordé l'honneur d'examiner notre thèse.

Nous remercions s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études.

Un grand merci à toute l'équipe du laboratoire LTPSud- Ghardaïa

Nous tenon à remercier l'ingénieur **Mr DJEKAWA Cheikh**, pour son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous et à toutes.

## الملخص:

الخرسانة (خليط من الإسمنت والرمل والحصى والماء) هي مادة بناء مستخدمة على نطاق واسع بحيث ان الماء يشكل عنصرًا أساسيًا في تركيبها. يشير مصطلح "المياه الرمادية" إلى مياه غسيل خلاطات الخرسانة وشاحنات الخلط ومياه الغسيل من مرافق إعادة تدوير الخرسانة الطازجة. يمكن استخدام المياه الرمادية في الخرسانة ولتحقيق ذلك يجب أن تفي خصائصها الفيزيائية والكيميائية لبعض المتطلبات المعيارية التي تتعلق بشكل أساسي بمحتوى الكلوريدات والكبريتات والمواد الصلبة العالقة. أظهر نتائج هذا البحث أن الخرسانة المحضرة بالمياه الرمادية لها خصائص فيزيائية وميكانيكية ومتانة تعادل خرسانة التحكم. وبشكل عام ، فإن الاستبدال الجزئي أو الكلي لمياه الصنبور بالمياه الرمادية التي تحتوي على مواد صلبة تقل عن 50000 جزء في المليون لخلط الخرسانة أمر ممكن تمامًا.

**الكلمات المفتاحية:** الخرسانة, الاسمنت, الماء الرمادي, الخرسانة الطازجة, الديمومة.

## Résumé

Le béton (mélange de ciment, de sable, de gravier et d'eau) est un matériau de construction largement utilisé dans lequel l'eau constitue un élément essentiel dans sa formulation. Le terme « eaux grises » désigne les eaux de lavage des bétonnières et des camions malaxeurs et les eaux de lavage des installations de recyclage du béton frais. L'eau grise peut être utilisée dans le béton et pour y parvenir les propriétés physiques et chimiques de cet effluent doivent respecter certaines exigences normatives qui portent essentiellement sur la teneur en chlorures, en sulfates et en matières solides en suspension.

Les résultats de cette recherche montrent que les bétons préparés avec les eaux grises présentent des propriétés physiques, mécaniques et une durabilité équivalentes aux bétons témoins. Et globalement, le remplacement partiel ou total de l'eau de robinet par de l'eau grise ayant une teneur en solides moins de 50 000 ppm pour le gâchage de béton est tout à fait possible.

**Mots clés :** Béton, Ciment, Eau grise, Béton frais, Durabilité.

---

## ABSTRACT

Concrete (a mixture of cement, sand, gravel and water) is a widely used construction material, which mixing water is an essential element in its formulation. The term "grey water" refers to wash water from washing mixers, trucks, and from fresh concrete recycling systems. Grey water can be used in concrete, but first, the physical and chemical properties of this effluent must meet certain normative requirements, which mainly concern the content of chlorides, sulfates and suspended solids.

The results of this research show that concretes prepared with gray water have physical and mechanical properties and durability equivalent to control concretes. And overall, the partial or total replacement of tap water with gray water having a solids content of less than 50,000 ppm for mixing concrete is quite possible.

**Keywords:** Concrete, Cement, Grey water, Fresh concrete, Durability.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>4</b>
<b>1.1. Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2. Utilisation de l'eau dans le domaine du béton .....</b>	<b>5</b>
1.2.1. Nécessité de recycler l'eau .....	5
<b>1.3. Méthodes de récupération du béton et de l'eau grise .....</b>	<b>6</b>
1.3.1. Procédés de recyclage .....	7
<b>1.4. Caractérisation de l'eau grise .....</b>	<b>10</b>
1.4.1. Composition chimique de l'eau grise .....	10
1.4.2. Caractéristique physique de l'eau grise .....	11
<b>1.5. Normes relatives à l'utilisation des eaux grises .....</b>	<b>12</b>
1.5.1. Norme européenne EN 1008-2002 .....	12
1.5.2. Norme ASTM C1602 .....	13
<b>1.6. Influence de l'eau grise sur les propriétés du béton frais .....</b>	<b>14</b>
1.6.1. Temps de prise .....	14
1.6.2. Affaissement .....	14
1.6.3. Teneur en air .....	14
1.6.4. Température .....	15
1.6.5. Masse volumique .....	15
<b>1.7. Influence de l'eau grise sur les propriétés du béton durci .....</b>	<b>15</b>
1.7.1. Résistance à la compression .....	15
1.7.2. Retrait de séchage .....	16
1.7.3. Durabilité des bétons fabriqués par l'eau grise .....	16
<b>1.8. Conclusion .....</b>	<b>17</b>
<b>CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Introduction .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2. Matériaux utilisés .....</b>	<b>19</b>
2.2.1. Ciment .....	19
2.2.2. Granulats .....	19
2.2.3. Eau de gâchage .....	23
<b>2.3. Formulation de béton étudié .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4. Fabrication du béton, Mise en place et Conservation .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5. Méthodes expérimentales .....</b>	<b>29</b>
2.5.1. Propriétés du Ciment .....	29
2.5.2. Propriétés des bétons à l'état frais .....	29
2.5.3. Propriétés des bétons à l'état durci .....	30
<b>2.6. Conclusion .....</b>	<b>33</b>

<b>CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS .....</b>	<b>34</b>
<b>3.1. Introduction .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2. Caractéristique des eaux grises utilisées .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3. Résultats des mesures de temps de prise du ciment .....</b>	<b>36</b>
<b>3.4. Résultats des mesures de l'affaissement du béton frais .....</b>	<b>37</b>
<b>3.5. Résultats des mesures de la température du béton frais .....</b>	<b>37</b>
<b>3.6. Evolution des résistances mécaniques à la compression .....</b>	<b>38</b>
<b>3.7. Evolution de la vitesse de son et de la résistance à chocs par Scléromètre .....</b>	<b>39</b>
<b>3.8. Résultats des mesures de perméabilité du béton .....</b>	<b>40</b>
<b>3.9. Conclusion .....</b>	<b>41</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>42</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>45</b>

# LISTE DES TABLEAUX

## CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.1 Critères des normes régissant l'évaluation de l'eau de gâchage .....	13
--	----

## CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

Tableau 2.1 Analyse granulométrique du sable .....	20
Tableau 2.2 Analyse granulométrique des graviers .....	20
Tableau 2.3 Masses volumiques des granulats .....	21
Tableau 2.4 Coefficient d'absorption des granulats .....	22
Tableau 2.5 Propreté des granulats .....	22
Tableau 2.6 Caractéristique mécanique des graviers .....	23
Tableau 2.7 Valeurs de A .....	25
Tableau 2.8 Valeurs de K .....	25
Tableau 2.9 Calcul de la composition d'un mètre cube de béton .....	26
Tableau 2.10 Composition de chaque formulation du béton (pour 0.06m <sup>3</sup> de béton) .....	27
Tableau 2.11 Classification du béton selon la vitesse d'une impulsion ultrasonique .....	32

## CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Tableau 3.1 Résultats d'analyses des eaux grises .....	35
Tableau 3.2 Effet des eaux grises sur le temps de prise du ciment .....	36
Tableau 3.3 Effet des eaux grises sur la température du béton frais .....	37
Tableau 3.4 Valeurs moyennes des poids et des résistances mécaniques à la compression ..	38
Tableau 3.5 Valeurs des vitesses de son et des résistances à chocs par scléromètre .....	39
Tableau 3.6 Effet des eaux grises sur la perméabilité du béton .....	40

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure 1.1 Méthode de récupération des eaux par bassins de décantation .....	7
Figure 1.2 Installation de recyclage de l'eau avec une vis de relevage .....	8
Figure 1.3 Installation de recyclage de l'eau avec une cuve de relevage .....	9
Figure 1.4 Bassin d'homogénéisation avec agitateurs et pompes .....	9

## CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

Figure 2.1 Courbe granulométrique du mélange des granulats .....	21
--	----

## CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Figure 3.1 Effet des eaux grises sur l'affaissement du béton frais .....	37
Figure 3.2 Effet des eaux grises sur l'évolution de la résistance à la compression .....	39
Figure 3.3 Effet des eaux grises sur la vitesse de son à 28 jours .....	40

# LISTE DES PHOTOS

## CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ET PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

Photo 2.1 Échantillons d'eaux utilisées.....	24
Photo 2.2 Baril de l'eau grise .....	24
Photo 2.3 Mise en place et Conservation du béton .....	28
Photo 2.4 Mesure de prise du ciment .....	29
Photo 2.5 Mesure de l'affaissement du béton .....	30
Photo 2.6 Mesure de la température du béton .....	30
Photo 2.7 Mesure de la résistance mécanique à la compression .....	31
Photo 2.8 Mesure de vitesse de son .....	32
Photo 2.9 Scléromètre .....	32
Photo 2.10 Mesure de la perméabilité du béton .....	33

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## Contexte général

La croissance de la population, l'urbanisation et l'industrialisation rapides ont conduit les gouvernements de nombreux pays à lancer plusieurs projets de construction à grande échelle pour répondre à la demande croissante de constructions et d'infrastructures. L'augmentation des projets de construction a augmenté la demande de béton prêt à l'emploi en raison de sa haute qualité et de sa facilité d'utilisation.

La production de béton prêt à l'emploi dans les centrales à béton augmente à son tour la consommation d'eau dans l'industrie du béton. La capacité en béton d'un camion malaxeurs varie de 6 à 12 m<sup>3</sup>, ce qui nécessite entre 900 à 1800 litres d'eau pour être produit. En outre, il est estimé qu'environ 700 à 1300 litres d'eau sont nécessaires pour laver l'intérieur d'un seul camion malaxeur à la fin de chaque journée de travail. Aussi, le lavage des bétonnières et des équipements de la centrale de bétons consomme pratiquement autant d'eau par mètre cube de béton produit, générant ainsi des grandes quantités d'eaux usées.

L'eau de lavage, appelée eau grise dans ce mémoire, contient des substances en solution (ions, adjuvants) et des matières en suspension (particules minérales fines et hydrates du ciment) provenant du béton frais. En raison de la nature extrêmement basique et la grande quantité de solides en suspension et dissous, le rejet des eaux de lavages dans les égouts municipaux ou dans les cours d'eau peut engendrer la détérioration du système, allant même jusqu'à la contamination de la nappe souterraine. Les normes environnementales considèrent l'eau recyclée comme un déchet dangereux et interdisent le rejet de ces eaux dans les cours d'eau ou les réseaux d'assainissement municipaux.

En général, la procédure de l'élimination des eaux de lavage dans les centrales à béton consiste à de laisser décanter les eaux de lavages dans plusieurs bassins de décantation puis l'eau clarifiée est recyclée pour le nettoyage des camions malaxeurs, tandis que les sédiments sont retirés et éliminés dans les décharges. Ce système ne peut pas supporter toute la quantité d'eaux de lavage générées par les opérations de production de béton prêt à l'emploi à cause de temps de séjour nécessaire à la décantation. Il est donc important de créer des stratégies alternatives pour assurer l'élimination totale des eaux de lavage.

La meilleure méthode pour disposer les eaux de lavage du béton consiste à les réutiliser comme eau de gâchage dans un nouveau mélange du béton. Le recyclage d'eau de lavage dans le béton demeure une nouvelle technologie et cela explique que les producteurs de béton et les cimentiers craignent souvent de son utilisation dans la production de béton, également parce que peu de recherches ont été disponibles sur le sujet. Pour cette raison, on a proposé de faire une étude expérimentale sur l'utilisation des eaux de lavage (eaux grises) comme eau de gâchage du béton afin de convaincre les producteurs de béton d'accepter l'utilisation de béton malaxé avec l'eau de lavage.

## **Objectifs de l'étude**

Ce projet de recherche vise à atteindre deux objectifs principaux :

- Identifier les principales caractéristiques de l'eau grise.
- Identifier et comprendre l'influence de l'eau grise sur les propriétés des bétons frais et durcis.

Pour cela, notre travail de recherche réalisé au cours de la préparation de cette mémoire est présenté en quatre grandes parties :

La première partie de ce travail est consacrée à l'étude bibliographique. Elle est pour but d'exposer les connaissances disponibles concernant l'utilisation de l'eau grise dans le béton.

La seconde partie du mémoire traitera les caractéristiques des matériaux utilisés pour la confection des bétons et fournira un aperçu sur les différents essais auxquels doivent être testés ces bétons à l'état frais et durci.

La troisième partie est consacrée à la présentation et l'analyse de résultats expérimentaux obtenus lors de cette recherche.

Enfin, une conclusion générale est dressée à partir des résultats obtenus. Les perspectives du travail de recherche proposées pourront faire l'objet d'études complémentaires sont aussi exposés.

# **CHAPITRE 1 :**

# **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## 1.1. Introduction

Le béton est un matériau de construction largement utilisé au monde. Malgré l'importance de l'eau dans l'industrie du béton, il est remarqué que peu d'attention a été accordée au pourcentage d'eau consommé lors du lavage des camions malaxeurs de béton.

Après l'utilisation, l'eau de lavage (dite eau grise) est considérée comme déchet dangereux qui peut nuire à l'environnement et aux canaux d'assainissement. Pour cela, il faut tout d'abord clarifier les méthodes et techniques de récupération de l'eau grise, ses caractéristiques et les critères de la réutilisation de cet effluent. Nous nous intéressons aussi aux recherches concernant la réutilisation de l'eau grise dans le béton et les résultats déjà obtenus relatives à ce sujet.

## 1.2. Utilisation de l'eau dans le domaine du béton

L'industrie du béton est l'un des secteurs les plus grands consommateurs d'eau. Environ 170 litres d'eau sont nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton. L'eau assure la réaction d'hydratation de ciment et la plasticité convenable au béton frais pour sa mise en place. Bien que plusieurs spécialistes s'intéressent plus à la quantité d'eau potable utilisée pour le gâchage du béton, peu entre eux sont intéressés à la quantité d'eau supplémentaire qui entre dans la fabrication d'un mètre cube de béton. Le lavage des bétonnières et des équipements de la centrale à béton consomme pratiquement autant d'eau par mètre cube de béton produit.

Chini et al [1] ont montré qu'il faut environ 100 litres d'eau pour nettoyer l'équipement relatif à la production d'un mètre cube de béton prêt à l'emploi. En d'autres termes, il est donné qu'il faut entre 700 et 1 300 litres d'eau pour laver une bétonnière standard de 9 m<sup>3</sup> [2]. En reconnaissant qu'une centrale à béton typique produit en moyenne chaque jour 200 m<sup>3</sup> de béton, il est clair que la production de béton dans les centrales à béton augmente la consommation d'eau dans l'industrie du béton.

### 1.2.1. Nécessite de recycler l'eau

Avec la demande croissante de béton et vue les statiques de la consommation d'eau dans le béton, il paraît nécessaire d'économiser l'eau potable dans l'industrie du béton prêt à l'emploi.

D'autre part, en rejetant les eaux de lavages dans les égouts municipaux ou dans les cours d'eau, leur nature extrêmement basique (pH entre 12 à 12.7) peut engendrer la détérioration du système, allant même jusqu'à la contamination de la nappe souterraine [3]. Considérant les nuisances que cela peut induire à l'équilibre des écosystèmes et à

l'environnement, les normes environnementales interdisent le rejet de ces eaux dans les réseaux d'assainissement municipales [2]. Alors, il devient plus dispendieux pour les producteurs de béton de disposer des eaux usées, au même moment où l'eau potable se fait moins en moins disponible [3].

L'idée d'utiliser de différentes sources d'eaux à la place de l'eau potable dans le béton remonte à 1924, où Abrams et ses collaborateurs ont effectué des essais sur des bétons fabriqués avec 68 échantillons d'eau différents [3]. Ils ont conclu qu'une eau chargée à plus de 6 000 ppm ne peut plus être utilisée pour la fabrication de béton [4]. Malgré qu'elle n'avait pas testé les eaux de lavage, cette étude démontre que la conscientisation à économiser l'eau potable remonte après d'un siècle [3].

### **1.3. Méthodes de récupération du béton et de l'eau grise**

Afin de respecter les exigences environnementales, de réutiliser les matières premières et de faire des économies d'argent, l'industrie de béton développe des équipements afin de recycler tous les matériaux et les résidus associés au lavage des camions, au retour des livraisons de béton non conforme et de béton résiduaire [5].

Avec l'installation d'un système de recyclage de béton, il est possible de récupérer presque tout d'un mélange de béton [3,5]. Les grandes quantités d'eaux sont récupérées et réutilisées pour le dosage des nouveaux bétons ou réintroduites à nouveau dans le processus de lavage. De plus, le sable et les granulats sont séparés par lavage afin d'être réincorporés dans un nouveau mélange. Il est également possible de faire des cubes avec le béton non utilisé pour ensuite les concasser une fois durcis et les utiliser comme source de gros granulats [3].

Plusieurs noms sont associés à l'eau grise : l'eau de lavage, puisque elle provient du nettoyage de l'équipement de la centrale à béton et des bétonnières; l'eau grise, à cause de sa couleur grisâtre due à la quantité importante de particules de ciment en solution [6]. Pour les termes anglais, 'sludge water' et 'wash water' sont souvent utilisés [3].

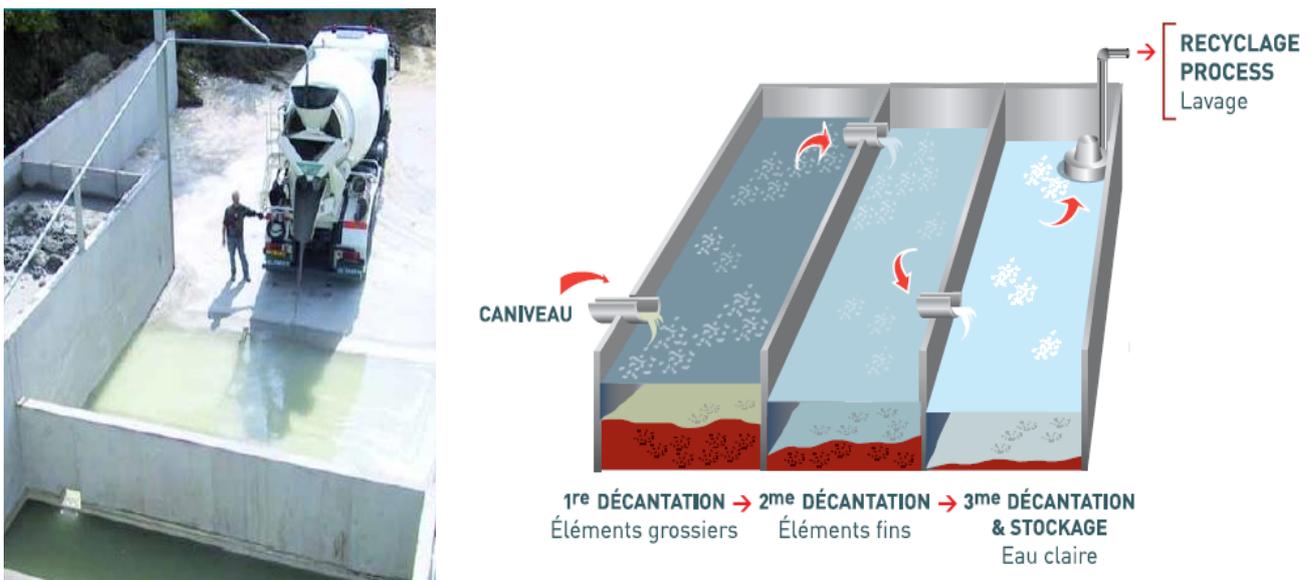
Les eaux grises proviennent principalement de trois sources :

- 1- Les eaux utilisées pour le lavage des bétonnières et des camions malaxeurs au retour de leur livraison de béton, ainsi que les eaux utilisées pour le lavage des installations de lavage, les lieux et les équipements des usines de production de béton.
- 2- Les installations de recyclage du béton frais.
- 3- Les eaux pluviales tombées sur des bâtiments d'exploitation et des aires d'exploitation non utilisées.

### 1.3.1. Procédés de recyclage

Le système de recyclage des eaux de lavage peut fonctionner selon deux principales méthodes :

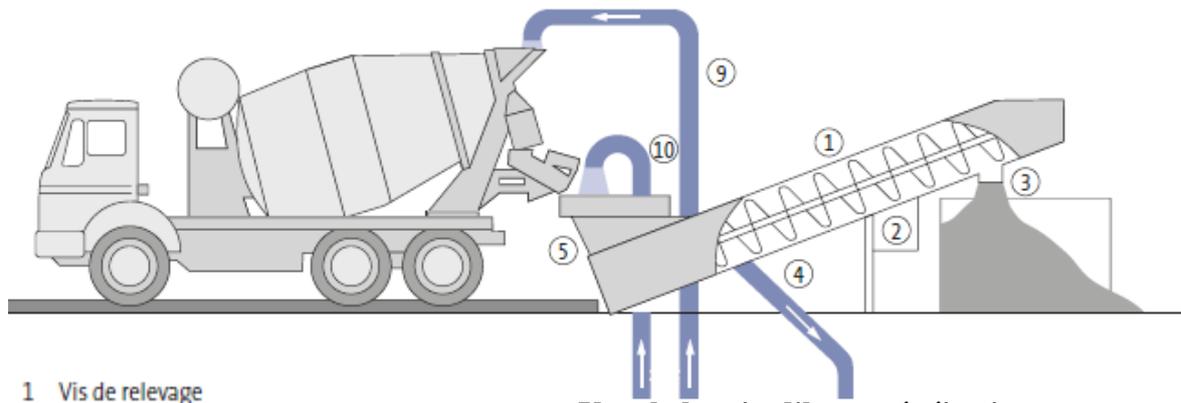
*La première méthode* : recyclage après décantation [3,7] : Il s'agit de laisser décanter les eaux de lavages dans plusieurs bassins pour améliorer la séparation physique par décantation. En général, l'eau traverse trois bassins de décantation étanches qui sont correctement dimensionnés de manière à ne rejeter aucun effluent hors du site. La majorité des particules sont retenues dans le premier bassin de décantation, mais les deux autres sont nécessaires pour assurer une certaine purification de l'eau. Ensuite, l'eau décantée stockée dans le bassin final est recyclée dans un nouveau mélange du béton, ou pour le lavage des camions malaxeur et des bétonnières, et les matières décantées sont régulièrement curées. Après un éventuel stockage sur une aire étanche du site pour ressuyage, les boues de curage sont évacuées en centre d'enfouissement approprié. La Figure 1.1 présente la méthode de recyclage de l'eau par décantation.



**Figure 1.1 Méthode de récupération des eaux par bassins de décantation**

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'il faut disposer des résidus solides accumulés au fond des bassins de sédimentations. De plus, même après le passage dans trois bassins de décantation, l'eau nécessite plusieurs traitements chimiques afin de la purifier et de la neutraliser d'avantage [3].

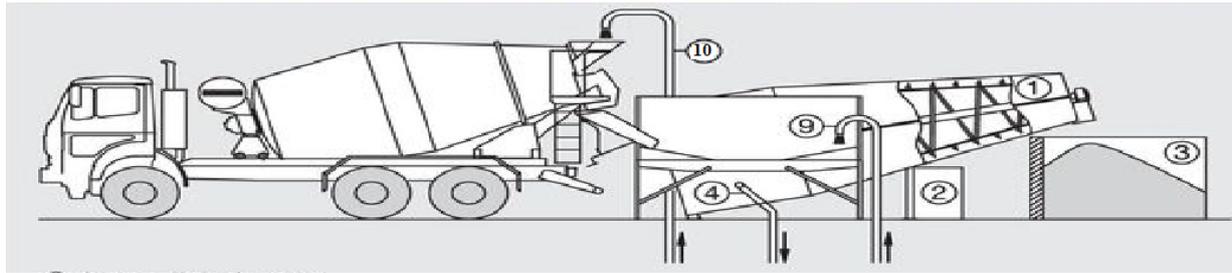
*La deuxième méthode:* recyclage par le biais d'un recycleur [3,5] : cette méthode de recyclage nécessite d'abord la séparation de sable et de gravier des eaux grises. Deux types de séparateurs différents peuvent être utilisés à cet effet. Le premier système dite « à vis » est composé d'une vis sans fin et joue sur la compacité (Figure 1.2), tandis que le second, à « cuve », est muni d'un baril séparateur et convient tout particulièrement au recyclage des mortiers (Figure 1.3).



- 1 Vis de relevage
- 2 Commande de la vis
- 3 Sortie des matières solides (sable/gravier)
- 4 Trop-plein des eaux chargées de fines
- 5 Trémie de réception



**Figure 1.2** Installation de recyclage de l'eau avec une vis de relevage

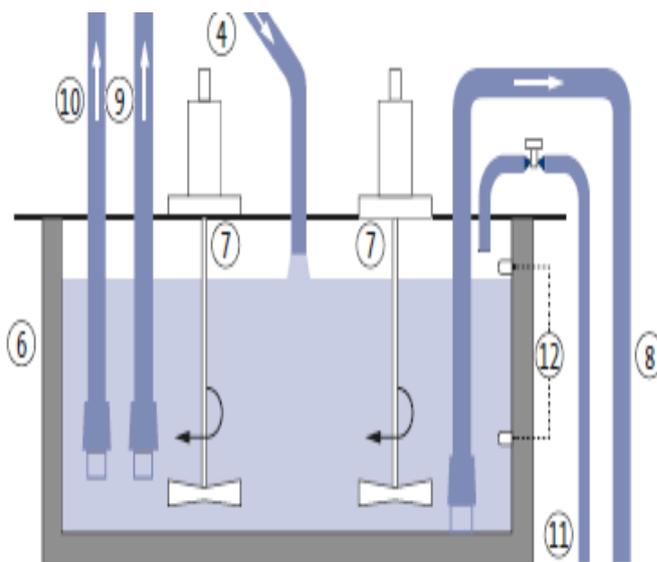


- 1 Cuve de relevage
- 2 Commande de la cuve
- 3 Sortie des matières solides (sable/gravier)
- 4 Tropic-plein des eaux chargées de fines
- 5 Trémie de réception



**Figure 1.3 Installation de recyclage de l'eau avec une cuve de relevage**

Ce dispositif permet de remonter les granulats, sable et gravier, vers un tamis qui les séparent et les emmagasines dans des endroits conçus à cet effet. Les eaux grises sont acheminées dans un bassin d'homogénéisation où des agitateurs sont installés afin d'éviter la décantation des particules et afin d'uniformiser les caractéristiques physico-chimiques de cette eau grise (Figure 1.4).



- 6 Bassin en béton
- 7 Agitateurs
- 8 Alimentation en eau recyclée de la centrale à béton
- 9 Alimentation en eau recyclée de la potence de lavage
- 10 Alimentation en eau recyclée de la trémie de réception
- 11 Amenée d'eau du réseau
- 12 Flotteurs/contacteurs de commande de l'eau du réseau



**Figure 1.4 Bassin d'homogénéisation avec agitateurs et pompes**

Bien que cette méthode de recyclage comporte le grand avantage d'être exploiter une centrale à béton sans générer aucun déchet, certains inconvénients limitent encore son utilisation. Si les agitateurs ne fonctionnent pas efficacement, le ciment complétera alors son hydratation et une couche durcie sera formée dans le fond des cuves. Le nettoyage des bassins dans une telle situation est complexe et très dispendieux. Aussi, les agitateurs de même que les systèmes de pompage servant à récupérer des échantillons d'eau sont souvent obstrués par la présence de particules fines et collantes. Pour contrer ces problèmes, Vickers propose une utilisation constante de l'eau grise, voire à chaque jour. Cela peut éviter beaucoup de bris considérant que les pompes répondent mal à des périodes de non-utilisation [3].

#### **1.4. Caractérisation de l'eau grise**

Le recyclage d'eau dans le béton demeure une nouvelle technologie et cela explique que les producteurs de béton et les cimentiers craignent souvent de son utilisation dans la production de béton frais, également parce que peu de recherches ont été disponibles sur le sujet [2].

En effet, un excès d'impuretés dans l'eau de gâchage peut affecter les propriétés du béton produit. Les impuretés peuvent avoir des effets principalement sur le temps de prise, l'ouvrabilité, la résistance mécanique et la durabilité du béton. A titre d'exemple, la teneur élevée de chlorure dans l'eau de gâchage est causes principales de dégradations des structures en béton armé due à la corrosion des armatures.

D'ailleurs, plus l'eau grise est concentrée, plus les effets sur le béton seront accentués. Considérant tous les effets que peut engendrer l'utilisation de l'eau grise, il faut connaître ses principales caractéristiques avant de l'incorporer dans un nouveau béton [3].

##### **1.4.1. Composition chimique de l'eau grise**

L'eau de lavage contient des substances en solution (ions, adjuvants) et des matières en suspension (particules minérales fines et hydrates du ciment) [6]. La composition chimique de l'eau grise, telle la nature et la concentration des substances en solution et en suspension, est variable en fonction [3,5] :

- De l'âge de l'eau grise.
- Des paramètres d'opération des usines de recyclage.
- Des caractéristiques des bétons récupérés : la teneur et le type d'adjuvant, le type de matière cimentaire et la nature des granulats utilisés.

L'analyse chimique des matières en suspension (séchées) dans l'eau grise montre que les teneurs des principaux oxydes ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ) sont similaires à celles d'un ciment Portland [8]. Sandrolini et Franzoni [2] ont montré que 80 % à 90 % des particules en suspension ont un diamètre inférieur à 100  $\mu\text{m}$  avec une classe dominante d'environ 20  $\mu\text{m}$ . Les particules sont principalement constituées de  $\text{CaCO}_3$  (30 % - 40 %) et des particules de ciment hydratées [2].

Quant au pH de l'eau grise, il varie approximativement entre 12,0 et 12,7 [6]. Ce pH élevé est principalement dû à la présence d'alcalis en solution dans l'eau grise. Même si l'apport en alcalis par l'utilisation d'eau grise est relativement faible (environ 5 %), les effets potentiels sur les propriétés du béton peuvent être significatifs en raison de la grande influence des alcalis sur la cinétique d'hydratation du ciment [3].

Selon les matériaux utilisés pour la fabrication des bétons recyclés et selon la composition chimique des eaux de lavage, les eaux grises peuvent contenir certaines quantités des chlorures et des sulfates en solution [6].

Lors de l'évaluation de l'effet de l'eau grise sur les propriétés du béton, une attention particulière doit être portée aux adjuvants. L'eau de gâchage peut présenter une composition chimique qui pourrait influencer sur l'efficacité de certains types adjuvants [3].

#### **1.4.2. Caractéristique physique de l'eau grise**

Les matières solides en suspension ont un très faible potentiel de réactivité chimique comparativement aux ions en solution [6]. Ces particules fines sont principalement des grains de sable ou de gravier très fin et des particules de ciment hydratées et non hydratées.

Physiquement, plus l'eau grise contient des particules solides en suspension, plus le rapport E/C effectif du béton produit est diminué [3]. Cela s'explique simplement par le fait qu'une portion de l'eau est substituée par des particules du ciment [6]. Enfin, cette diminution du rapport E/C explique en majeure partie pourquoi les effets sur le nouveau béton sont plus marqués lorsque l'eau grise est plus concentrée [3]. Les teneurs en matières en suspensions sont très variables en fonction de type de l'eau grise. En pratique, les producteurs de béton peuvent ajuster la teneur en matières en suspension en ajoutant de l'eau potable dans les bassins de stockage de l'eau grise [6].

## 1.5. Normes relatives à l'utilisation des eaux grises

Il est primordial que l'eau grise (eau recyclée) doit respecter les normes d'utilisation de l'eau de gâchage. Cela a pour but d'assurer de bonnes propriétés aux bétons fabriqués avec les eaux grises. Les exigences concernant l'eau recyclée sont spécifiées dans la norme européenne EN 1008-2002-annexe A [10] et la norme de l'American Society for Testing and Materials ASTM C1602 [11] ;

### 1.5.1. Norme européenne EN 1008-2002

La norme mentionne que toute eau potable est considérée comme appropriée pour la fabrication du béton et ne nécessite aucun essai. Il y est également indiqué que l'eau non potable (ou de l'eau de lavage, traitée ou non), ne peut être utilisée que s'il est possible de démontrer que la résistance moyenne à la compression des échantillons de béton ou mortier (cubes, prismes ou cylindres) qui ont été fabriqués avec lui doit, après sept jours, atteindre au minimum 90 % de la résistance moyenne des échantillons correspondants fabriqués avec de l'eau distillée ou désionisée. La norme prévoit aussi des analyses physiques concernant le temps de début et de fin de prise de la pâte de ciment (Tableau 1.1).

Une attention particulière doit être portée à la qualité de l'eau, car une quantité excessive d'impuretés dans l'eau de gâchage peut avoir des influences défavorables sur le temps de prise, le développement des résistances du béton et la protection des armatures contre la corrosion. Afin de s'assurer de la qualité de l'eau utilisée, des limites facultatives sont suggérées quant aux concentrations maximales permises dans l'eau de gâchage (Tableau 1.1).

L'eau récupérée de la fabrication de bétons, contient des concentrations variables de particules très fines dont la taille est généralement inférieure à 0.25, est normalement appropriée pour la fabrication de béton non armé, armé et précontraint, mais doit satisfaire les exigences suivantes [10]:

- 1) La quantité supplémentaire de matériaux solides provenant de l'eau recyclée doit être inférieure à 1 % de la masse totale du granulat.
- 2) La quantité d'eau récupérée doit être répartie le plus également possible sur la production d'une journée. Une plus grande quantité des matières solides peut être utilisée pour certains procédés de production, dans la mesure où il peut être prouvé que la performance du béton est satisfaisante.
- 3) L'influence éventuelle de cette eau doit être prise en compte dans le cas où le béton produit est soumis à des prescriptions particulières, par exemple : béton architectural, béton précontraint, béton contenant de l'air entraîné, béton exposé à un environnement agressif, etc..

- 4) La répartition uniforme des matières solides dans une eau de lavage de masse volumique supérieure à 1,01 kg/l doit être effectuée par les moyens appropriés. On peut supposer qu'une eau de lavage dont la masse volumique est inférieure ou égale à 1,01 kg/l contient des matières solides en quantités négligeables.
- 5) L'eau de lavage gardée en réserve doit être protégée de manière adéquate de toute contamination.

### 1.5.2. Norme ASTM C1602

Cette norme stipule aussi que l'eau non potable ne doit pas être utilisée sans avoir préalablement été testée. La norme stipule que l'eau recyclée (et combinée) doit être testée pour vérifier sa conformité aux exigences du Tableau 1.1. La densité de l'eau recyclée doit être testée au moins sur une base quotidienne conformément à la méthode d'essai ASTM C1603 ou surveillée à l'aide d'un hydromètre [11]. La norme a fourni les cadences des analyses pour tester la conformité de l'eau recyclée suivant son densité.

**Tableau 1.1 Critères des normes régissant l'évaluation de l'eau de gâchage**

Paramètre	EN 1008 [10]	ASTM C1602 [11]
<b>Chlorure Cl<sup>-</sup></b>	$\leq 500$ mg/l (béton précontraint ou coulis). $\leq 1000$ mg/l (béton armé ou avec insert). $\leq 4500$ mg/l (béton non armé et sans insert).	Béton précontraint ou les tabliers des ponts $\leq 500$ mg/l. Béton armée $\leq 1000$ mg/l.
<b>Sulfate SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	$\leq 2000$ mg/l	$\leq 3000$ ppm.
<b>Les matières solides en suspension</b>	Recommandation pour l'eau recyclée: $\leq 1\%$ de la quantité totale d'agrégat du béton.	Le totale des solides par masse : 50000 mg/l.
<b>D'autres impuretés et contaminations nocifs</b>	Contrôle préliminaire de l'eau de gâchage qui comprend : les huiles et les graisses, les détergents, la couleur, l'odeur, les acides et les matières humiques (voir le tableau 1 de la norme). Alcalin, la teneur équivalent de Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> < 1500mg/l Sucre < 100mg/l. Phosphate, P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> < 100Mg/l. Nitrates, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> $\leq 500$ Mg/l. Plomb, Pb <sup>+2</sup> $\leq 100$ Mg/l. Zinc, Zn <sup>+2</sup> $\leq 100$ Mg/l.	Alcalin, Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> $\leq 600$ mg/l.
<b>La résistance</b>	La résistance moyenne à la compression à 7 jours et des éprouvettes de béton ou de mortier préparées avec l'eau essayée, doit atteindre au moins 90% de la résistance moyenne des éprouvettes correspondantes (préparées avec de l'eau distillée ou dé-ionisée).	La résistance moyenne à la compression à 7 jours des éprouvettes de béton ou de mortier préparées avec l'eau essayée, doit atteindre au moins 90% de la résistance moyenne des éprouvettes correspondantes (préparées avec de l'eau distillée ou dé-ionisée).
<b>Le temps de prise</b>	Le temps de début de prise $\geq 1$ h et le temps de fin de prise $\leq 12$ h, dans les deux cas ils ne doivent pas s'écarter de plus de 25% du temps de prise obtenu avec les éprouvettes de contrôle.	Le temps de fin de prise ne doit pas s'écarter de plus de 1h :30 du temps de prise obtenu avec les éprouvettes de contrôle. Le temps de début de prise ne doit pas s'écarter de plus de 1h du temps de prise obtenu avec les éprouvettes de contrôle.

## **1.6. Influence de l'eau grise sur les propriétés du béton frais**

### **1.6.1. Temps de prise**

Plusieurs études ont montré que le temps de prise de ciment peut être affecté par l'utilisation de l'eau grise. Par contre, cette caractéristique s'avère un aspect contredit dans la littérature.

Selon certaines études [4,6,12], le temps de prise est accélère lors de l'utilisation de l'eau grise. La diminution de temps e prise est d'autant plus marquée quand le béton contient des agents entraîneurs d'air ou a un faible rapport E/C [3]. Par ailleurs, il semble difficile d'établir une corrélation entre la quantité de solide dans l'eau grise et la diminution du temps de prise [6]. Il est de surcroit logique que la présence des alcalis en solution dans l'eau grise agisse à titre d'accélérateur de prise [3,4].

Par contre, Chini et al [1] n'ont observé aucun lien entre l'utilisation de l'eau grise et le temps de prise. Celui-ci est parfois légèrement plus long, d'autres fois plus court, et ce, peu importe la concentration de l'eau grise [3].

### **1.6.2. Affaissement**

Plusieurs études ont noté que l'utilisation de l'eau grise engendre une réduction de l'affaissement et par conséquent une réduction de la maniabilité du béton [2,6]. Cette perte d'affaissement est proportionnelle à la quantité de matières solides en suspension dans l'eau grise [8]. Chatveera et al [8] ont attribué cette perte d'affaissement aux particules fines entraînées par l'eau grise qui augmentent la demande en eau du béton provoquant la réduction de rapport E/C. Borger et al [9] ont conclu que la présence de fines particules, mais aussi les restes d'adjuvants semblent être la cause de la perte de maniabilité du béton.

### **1.6.3. Teneur en air**

Contrairement à l'affaissement, relativement peu de données sont disponibles quant à l'influence de l'eau grise sur l'entraînement d'air [3, 5]. Par contre, la littérature indique que les effets semblent provenir de deux sources différentes, d'une part des particules fines, et d'autre part des alcalis [5].

Smaoui et son équipe [13], ont montré que l'augmentation de la teneur en alcalis du ciment (de 0,6 % à 1,25 %  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ) a engendré une légère augmentation du volume d'air (+ 0,5 %) des bétons avec et sans air entraîné. Ces résultats suggèrent que l'utilisation d'eau grise (qui contient des alcalis) pourrait avoir des effets favorables sur la production et la stabilité du

réseau de bulles d'air des bétons à air entraîné. Su et al [12], ont montré que l'eau grise n'a pas d'effet sur le volume d'air des bétons ne contenant pas d'agent entraîneur d'air. En revanche, Gagne et Blanchard [6] ont noté une perte importante du volume d'air et ce de façon plus marquée lorsque l'eau grise est plus chargé.

#### **1.6.4. Température**

Il est important de connaître et de contrôler la température de l'eau grise, puisqu'elle influence sur certaines propriétés du béton frais et durci [3,5]. La température de l'eau grise est généralement assez élevée pour trois raisons principales [3]: premièrement, l'hydratation des grains de ciment qui est en cours est exothermique. Deuxièmement, l'agitation constante de l'eau produit de la chaleur. Troisièmement, les bassins sont presque toujours recouverts pour éviter l'évaporation de l'eau ou sa contamination. L'utilisation de l'eau chaude dans le béton entraîne l'accélération de la réaction d'hydratation du ciment et par conséquent le temps de prise de ciment. Si la température de l'eau grise devient trop chaude, il faut l'ajuster avec de l'eau potable avant de l'utiliser comme eau de gâchage [3].

#### **1.6.5. Masse volumique**

La densité d'une eau grise de 50 000 ppm est de 1,03 kg/l [11]. Considérant que celle de l'eau potable est de 1,00 kg/l, il est clair que les bétons contenant de l'eau grise à une masse volumique plus élevée que son béton de contenant de l'eau potable. En revanche, il faut garder en mémoire que la substitution de l'eau potable par de l'eau grise diminue systématiquement le rapport E/C et par conséquent l'eau grise n'affecte pas réellement la masse volumique du béton [3].

### **1.7. Influence de l'eau grise sur les propriétés du béton durci**

#### **1.7.1. Résistance à la compression**

Il a été mentionné précédemment que l'eau grise engendre souvent une diminution de la porosité (diminution teneur en air) des bétons. Il a été rapporté qu'une perte de 1 % d'air est associée à une hausse de 4 % à 5 % de la résistance en compression [6]. Logiquement, il paraît que la présence d'eau grise dans le béton devrait augmenter un peu la résistance à la compression.

Selon certains chercheurs, la résistance à la compression à 7 jours est en général similaire ou légèrement supérieure (1 à 15%) à la résistance des bétons de référence [12]. D'autres mentionnent des gains de résistance allant jusqu'à 20 % à 28 jours, et attribuables à

l'apport en ciment de l'eau grise [3]. Il a été conclu que l'eau grise a relativement peu d'effet sur les propriétés mécaniques lorsque la concentration des matières en suspension est inférieure à 50 000 ppm [4].

Inversement, sur la base de l'étude des bétons fabriqués avec des eaux grises ayant une teneur en matières en suspension supérieure à 50 000 ppm, Chatveera et al [8] ont observé qu'une teneur en matières solides en suspension de 64 000 ppm a engendré une chute maximale de 12% de la résistance à la compression à 28 jours.

D'autre part, certains auteurs mentionnent une augmentation de la résistance à la compression à jeune âge alors qu'à 28 jours la résistance enregistrée est légèrement inférieure au béton de référence [3]. Su et al [12] ont trouvé que jusqu'à sept jours, la résistance est supérieure pour des bétons contenant de l'eau grise. Par contre, à 28 jours, l'effet est inversé et les résistances sont approximativement comprises entre 92 % et 93 % de la résistance à la compression du béton témoin, fabriqué avec l'eau potable. Considérant que plusieurs recherches ont montré une accélération de prise du béton contenant de l'eau grise, l'hypothèse des hautes résistances à jeune âge semble particulièrement plausible [3].

En Italie, les résultats d'essais Sandrolini et al [2] ont conclu qu'il ne semble pas exister une relation directe entre la quantité de solide dans l'eau grise et la résistance à la compression du béton.

### **1.7.2. Retrait de séchage**

L'utilisation d'eau grise pour le gâchage des bétons peut produire une forte augmentation du retrait de séchage [3]. Les travaux de Chatveera et al [8] ont montré que le retrait de séchage de bétons fabriqués avec de l'eau grise concentrée à 64 000 ppm et ayant des rapports E/C de 0,50, 0,60 et 0,70 augmentait proportionnellement avec la teneur en matières en suspension dans l'eau grise.

### **1.7.3. Durabilité des bétons fabriqués par l'eau grise**

Parce que la technologie de recyclage de l'eau dans le domaine du béton est un processus relativement jeune, peu de données sont disponibles sur la durabilité des bétons fabriqués à partir des eaux grise [3,5].

Sandrolini et al [2], explique que les fines particules ajoutées par l'eau grise peuvent être vues comme des fillers, ce qui explique pourquoi les bétons contenant de l'eau grise sont moins poreux et par conséquent peu perméables. Dans cette optique, la perméabilité des

bétons est diminuée et la durabilité à long terme risque est amélioré [3]. A l'inverse, l'étude de Chatveera et al [8] effectué avec une eau concentrée à 64 000 ppm et des rapports E/C élevés a démontré que les bétons contenant de l'eau grise sont plus poreux et perdent plus de poids (dégradation de la surface) lors des essais de résistances à l'attaque de sulfate.

Concernant la perméabilité aux ions chlore des bétons contenant de l'eau grise, Chini et al [1] ont montré qu'à 28 jours, la perméabilité aux ions  $Cl^-$  varie entre élevée et modérée, alors qu'à 56 jours, elle est plutôt modérée, voire faible. Les mêmes chercheurs ont tenté un essai de corrosion expérimental, et trouvent que le béton contenant de l'eau grise ne semble pas résister aussi bien à la corrosion que le béton fabriqué avec uniquement de l'eau potable [1].

## **1.8. Conclusion**

Afin de satisfaire aux normes environnementales, le recyclage de l'eau grise dans un nouveau mélange de béton semble une solution logique. L'eau grise est produite à l'aide des équipements spéciaux pour stocker, diluer et contrôler la température de l'eau recyclée. Cette eau doit répondre à certaines exigences normatives liées à la teneur en chlorures, sulfates, matières en suspension et pH pour assurer de bonnes propriétés aux bétons fabriqués avec les eaux grises.

D'après la revue de la littérature, les résultats obtenus lors des études concernant la réutilisation d'eau grise sont en majeure partie positifs. En effet, la grande majorité des auteurs concluent que l'utilisation de l'eau grise n'est pas dangereuse à la fabrication de bétons.

Cependant, il reste nécessaire de valider les résultats obtenus lors des recherches antérieures pour conduire à une utilisation plus optimale de l'eau grise pour la fabrication de béton.

**CHAPITRE 2 :**

**MATÉRIAUX ET**

**PROCÉDURES**

**EXPÉRIMENTALES**

## 2.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les matériaux constituant du béton, la formulation et la procédure de fabrication du béton, la conservation des éprouvettes et les dispositifs expérimentaux qui ont permis de réaliser les essais.

## 2.2. Matériaux utilisés

### 2.2.1. Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment CEM II/A-L 42,5N nommé « Awted » provenant de la cimenterie AMOUDA CIMENT (Laghouat), livré en sac de 50 kg. Le ciment est conforme à la Norme Algérienne NA442 [14] et la norme Européenne EN 197-1. Bien qu'il ne soit pas possible d'obtenir les informations détaillées sur ce ciment, il est considéré que leur composition doit être comparable à un ciment de type CPJ ordinaire.

### 2.2.2. Granulats

Les granulats présentent des caractéristiques très différentes selon leur origine. Ces caractéristiques influencent sur celles du béton, il est important alors de bien les connaître et de veiller au respect des spécifications.

Le sable choisis pour le béton de cette étude est d'origine naturelle (alluvionnaire) de nature siliceux provenant d'Oued M'Zi de la zone Laghouat.

Les graviers utilisés sont d'origine naturelle, concassés, variant en trois fraction de: 3/8, 8/15 et 15/25, fournis par la carrière consortium algérien des travaux, (Djebel Berriane-Ghardaïa).

#### A. Analyse Granulométrique « NA 2607-1992 [15] »

La granulométrie est l'un des paramètres les plus importants à considérer dans l'établissement d'une formulation de béton. Sa connaissance permet d'établir avec précision le dosage en granulats de manière à optimiser le squelette granulaire et ainsi réduire sa compacité selon les méthodes usuelles de formulation. L'analyse granulométrique permet également d'évaluer la teneur en éléments fins à travers la valeur du module de finesse. Les résultats des analyses granulométriques pour les granulats utilisés sont résumés dans les Tableaux 2.1 et 2.2. La courbe granulométrique est présentée dans la Figure 2.1.

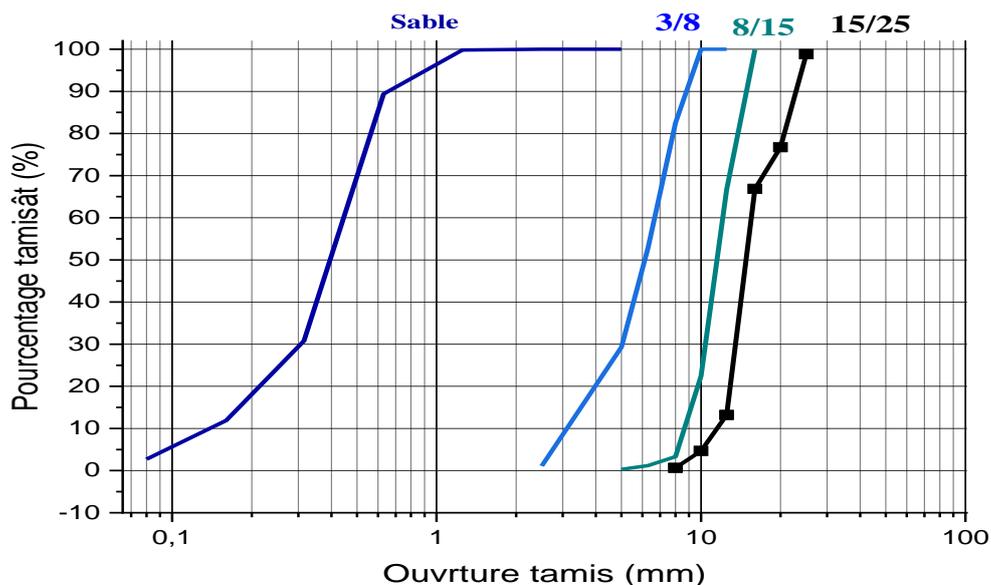
**Tableau 2.1 Analyse granulométrique du sable**

Ouverture (mm)	Masse refus cumulé (g)	Pourcentage refus cumulés (%)	Pourcentage tamisât cumulés (%)
5	0	0	100
2.5	0	0	100
1.25	2	0.2	99.8
0.63	106	10.6	89.4
0.315	692	69.2	30.8
0.160	881	88.1	11.9
0.08	973	97.3	2.7
Fond de tamis	27	-	-
<b>Module de finesse</b> $\frac{\sum \% \text{ refus (0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 et 5mm)}}{100}$		1.68	
<b>Facteur D'uniformité</b> $= \frac{d_{60}}{d_{10}}$		2.5	

La valeur de facteur d'uniformité de sable est supérieure à 2, donc c'est un sable de granularité étalée. Le module de finesse calculé (1.68) est hors la fourchette de 2.2 à 2.8, ce qui signifie que le sable choisi pour notre étude n'est pas de bonne qualité.

**Tableau 2.2 Analyse granulométrique des graviers**

Ouverture (mm)	Pourcentage tamisât cumulés %		
	15/25	8/15	3/8
25	98.84	/	/
20	76.75	/	/
16	66.84	99.9	/
12.5	13.20	66.7	100
10	4.66	22.5	100
8	0.66	3.3	82.5
6.3		1.2	52.8
5		0.3	29.3
2.5			1.1



**Figure 2.1** Courbe granulométrique du mélange des granulats

### B. Masse volumique absolue et apparente « NA 255-2006 [16] »

Les masses volumiques doivent nous renseigner sur la densité propre du matériau et également sur les valeurs des porosités. Ils présentent aussi une grande utilité dans les études relatives à la composition et la formulation des bétons. Les masses volumiques obtenues pour les différents granulats sont présentés dans le Tableau 2.3.

**Tableau 2.3** Masses volumiques des granulats

Propriétés mesurées	matériaux			
	Gravier (15/25)	Gravier (8/15)	Gravier (3/8)	sable
Masse volumique absolue $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.59	2.58	2.60	2.59
Masse volumique apparente $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.23	1.24	1.19	1.63

Les masses volumiques absolues de granulat utilisé sont comprises entre  $2t/m^3 < \rho_s < 3t/m^3$ , ce qui signifie que les granulats est de type courant selon la classification des normes.

### C. Absorption d'eau « NA 255-2006 [16] »

La connaissance du coefficient d'absorption d'eau d'un granulat permet d'ajuster la teneur en eau de gâchage entrant dans la composition du béton. Les résultats de mesure d'absorption d'eau des graviers sont présentés dans le Tableau 2.4.

**Tableau 2.4 Coefficient d'absorption des granulats**

Propriétés mesurées	matériaux		
	Gravier (15/25)	Gravier (8/15)	Gravier (3/8)
Coefficient d'absorption (%)	2.30	2.92	2.96

La valeur de coefficient d'absorption d'eau de gravier est inférieure à 5%, valeur maximale selon la norme. Pour notre étude, l'absorption de l'eau des granulats n'est pas considérée dans les calculs de quantité des mélanges.

#### D. Propreté superficielle du granulat

La propreté des granulats doit être toujours vérifiée, l'utilisation des granulats pollués peut provoquer la chute de la résistance mécanique et l'augmentation de retrait. La propreté des granulats peut s'apprécier de différentes façons telles que :

- ✓ **L'essai équivalent de sable** « NA 455-2006 [17] » qui permet de mesurer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons.
- ✓ **L'essai bleu de méthylène** « NA 1948-2006 [18] » qui permet d'évaluer le degré d'activité des particules fines argileuses qui sont nuisibles à la résistance de béton.
- ✓ **Propreté superficielle des granulats** « NA 463-1990 [19] » qui permet de déterminer le pourcentage pondéral des particules inférieures à 0.5mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2mm.

Les résultats de nos essais sont montrés dans le Tableau 2.5.

**Tableau 2.5 Propreté des granulats**

Propriétés mesurées	matériaux			
	Gravier (15/25)	Gravier (8/15)	Gravier (3/8)	Sable
Equivalent de sable ES (%)	-			38.35
Valeur de bleu de méthylène	-			0.35
Propreté pour granulat (%)	2.61	3.22	3.23	-

Le sable utilisé dans cette étude a une valeur de ES<60. Alors c'est un sable argileux de propreté non admissible pour les bétons de qualité puisque il peut provoquer un retrait ou un gonflement. La valeur de bleu de méthylène est inférieure à 01, valeur limite selon les spécifications.

## E. Caractéristiques mécaniques des graviers

Lors de fabrication de béton, le malaxage est une source de frottement intense entre grains. Si ceux-ci ne sont pas assez résistants, ils peuvent se casser en produisant des sables ou des éléments fins. Il est primordial alors d'identifier les caractéristiques mécaniques des graviers avant leur utilisation. Les essais effectués pour cela sont :

- ✓ **Essai Los Angeles** « NA 458-1990 [20] » qui permet de déterminer la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats.
- ✓ **Résistance à l'usure; essai Micro Deval** « NA 457-1990 [21] » qui permet de mesurer la résistance à l'usure par frottement des éléments d'un échantillon de granulats.

Le Tableau suivant regroupe les résultats obtenus :

**Tableau 2.6 Caractéristique mécanique des graviers**

Propriétés mesurées	Gravier (15/25)	Gravier (8/15)	Gravier (3/8)
Los Angeles (%)	-	28.11	31.14
Micro Deval (%)	28	27	30

Plus le coefficient Los Angeles est petit, plus la roche est bonne, ce qui se traduit en résistance du béton composé, car la dureté est synonyme de très grande résistance. La valeur de coefficient de Los Angeles est inférieure la limite de spécification qui est 40, ce qui explique que le gravier est acceptable pour confectionner le béton.

La valeur de Micro-Deval des graviers utilisés sont comprises entre 20% et 35%, ce qui signifie que les graviers sont de moyen à faible qualité.

### 2.2.3. Eau de gâchage

Pour atteindre l'objectif de notre étude, des éprouvettes de béton sont coulées en utilisant deux types des eaux (Photo 2.1) :

- Eau du robinet (**ER**): qui circule dans le laboratoire LTPS-Ghardaïa. L'eau est considérée potable et normalement ne nécessite aucuns essais.
- Eau grise (**EG**): provient du lavage d'un camion malaxeur à béton fournis par le groupe COSIDER.

La quantité des eaux grises nécessaire à la confection de béton est stockée dans un baril en plastique (Photo 2.2).



**Photo 2.1** Échantillons d'eaux utilisées

**Photo 2.2** Baril de l'eau grise

### 2.3. Formulation de béton étudié

La formulation du béton pour cette étude a été faite selon la méthode de "**Faurry**" où on a fixé initialement un rapport E/C de 0.53. Le béton est formulé pour une résistance à la compression simple de 25 Mpa. Le principe de la méthode de "Faurry" consiste à :

- Déterminer la courbe optimale du mélange des éléments secs;
- Calculer les pourcentages de ces constituants qui permettent de donner un mélange sec dont la courbe soit aussi voisine que possible de la courbe optimale;
- Dédurre la composition d'un mètre cube de béton.

La courbe optimale, ce n'est plus un segment de droite; mais deux segments formant une ligne brisée. Il faut alors définir : l'origine, l'extrémité et le point de brisure :

- origine : point de l'axe des abscisses correspondant au tamis de 0,0065mm.
- extrémité : point d'abscisse D et d'ordonnée 100.
- point de brisure : abscisse D/2; ordonnée yD/2 donnée par la formule :

$$Y = A + 17.8 \sqrt[5]{D}$$

Où : D : plus grande dimension de tamis et

A : constante, traduisant la consistance du béton désiré et de la provenance des granulats (Tableau 2.7)

**Tableau 2.7 Valeurs de A**

1. $D < 25$ mm : Béton armé courant pour bâtiment et ouvrage d'art.			
Consistance du béton	Sable roulés		Sable concassés
	Granulats roulés	Granulats concassés	
Assez plastique	24 à 26	26 à 28	30 à 32
Plastique	30 à 32	28 à 30	32 à 34
2. $25 < D \leq 50$ : béton légèrement armé $A = 15 \div 20$ $50 < D \leq 80$ : granulats roulés $A = 15 \div 20$ $D > 80$ : granulats roulés $A = 12$			
3. béton de pistes $A = 15$			

**a) Détermination de la courbe optimale:**

1. Origine : abscisse 0,0065 mm, sur l'axe de d.

2. Extrémité: Ordonnée 100%, abscisse:  $D_{\max}$ ,  $D_{\max} = D_{n-1}(1 + \frac{x}{2y})$ ,  $D_{n-1} = 20$

Avec :  $D_1$  : est la dimension du tamis qui serait tout juste suffisante pour laisser passer la totalité des granulats et  $D_{n-1}$ : est la dimension du tamis qui serait après le tamis  $D_1$ .

AN :  $D_{\max} = 20(1 + \frac{4}{2 \times 94}) = 20.02$  mm et  $\frac{D_{\max}}{2} = 10.01$  mm.

3. Point de brisure: abscisse:  $D_{\max}/2 = 8.78$ , Ordonnée :  $Y(D_{\max}/2)$

$$Y = A + 17.8 \sqrt[5]{D}$$

La valeur de A : le Tableau 2.7 donne  $A = 27$ , On aura alors  $Y(D/2) = 67\%$ .

**b) Calcul des pourcentages des constituants sec de mélange:**

1. Volume absolu du ciment =  $\frac{\text{masse de ciment}}{\text{masse volumique absolue du ciment}} = \frac{350}{3.1} = 112.9 \text{ dm}^3$ .

2. Volume d'eau de gâchage:

$$E = \left(\frac{K}{\sqrt[5]{D}}\right) \times 1000 \quad ; \text{ La valeur de K : (le tableau 2.8 donne } K = 0.39)$$

$$E(L) = \left(\frac{0.375}{\sqrt[5]{20.02}}\right) \times 1000 = 212$$

**Tableau 2.8 Valeurs de K**

Consistance	Moyen de mise en œuvre	Matériaux utilisés		
		Sable roulé gravier roulé	Sable roulé g. concassé	s. concassé g. concassé
Très fluide	Sans vibration	$\geq 0.37$	$\geq 0.405$	$\geq 0.46$
Molle	Moyen	0.35-0.37	0.375-0.405	0.43-0.46
Ferme	Vibration poussée	0.33-0.35	0.350-0.375	0.40-0.43

$$3. \text{ Volume absolu des éléments secs} = 1000 \text{ dm}^3 - \text{volume d'eau} \\ = 1000 - 212 = 788.1 \text{ dm}^3$$

$$\text{Le pourcentage de ciment} = \frac{112.9}{788.1} \times 100, \text{ soit } C = 14.21\%.$$

#### 4. Détermination des pourcentages des agrégats

Les pourcentages de sable et gravier sont déterminés par la méthode graphique à partir de la courbe granulométrique et le calcul de la composition d'un mètre cube de béton est donné dans le Tableau suivant:

**Tableau 2.9 Calcul de la composition d'un mètre cube de béton**

Composition	%	Volume absolu des éléments secs	Volume absolu	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	Poids (Kg)
Eau	/	/	212	1	212
Ciment	14.21	788.1	112.9	3.1	350
Gravier (3/8)	12	788.1	58.4	2.60	126
Gravier (8/15)	25	788.1	121.8	2.58	262.5
Gravier (15/25)	16.1	788.1	78.4	2.59	169.05
Sable	32.69	788.1	301	2.59	800

#### **-Remarque :**

Le volume des éprouvettes utilisées est :  $(\pi \times R^2 \times L) = (\pi \times 7.5^2 \times 30) = 5298.75 \text{ cm}^3$

On a besoin de 9 moules, donc le volume total =  $47688.75 \text{ cm}^3 = 0.047 \text{ m}^3$ .

#### 5. Calcul de la composition pour chaque formulation

Pour répondre aux objectifs de la recherche, trois séries de béton ont été coulées. La première série est malaxée avec 100% de l'eau de robinet et considérée comme témoin, la deuxième série est coulée en utilisant 100% de l'eau grise, tandis que la troisième série est malaxée avec 50% eau de grise + 50% eau de robinet.

Les résultats de calcul de composition de béton pour  $0.06 \text{ m}^3$  de béton sont donnés dans le Tableau 2.10 pour chaque type de formulation.

**Tableau 2.10 Composition de chaque formulation du béton (pour 0.06m3 de béton)**

Compositions		Formulation 01	Formulation 02	Formulation 03
Ciment (Kg)		21		
Eau Grise (EG) (Kg)		12.72	0	6.36
Eau de robinet (ER) (Kg)		0	12.72	6.36
Gravier	3/8 (Kg)	10.143		
	8/15 (Kg)	7.56		
	15/25 (Kg)	15.75		
Sable		48		

## 2.4. Fabrication du béton, Mise en place et Conservation

La mise en œuvre du coulage de béton est établie selon la norme NA 2606-1992 [22] avec les principaux éléments suivants :

1. Humidification du malaxeur,
2. Introduction dans le malaxeur les composants dans l'ordre suivant : gravier, ciment, sable.
3. Malaxage pendant 30 secondes (granulat seulement) et pendant 1 minute (pour l'ensemble de ces composants solides),
4. Introduction de l'eau de gâchage,
5. Malaxage pendant 1 minute 30 secondes,
6. Vérification des propriétés d'ouvrabilité du béton formulé via un test d'affaissement.

Les moules utilisés sont des cylindres 15x30 cm<sup>2</sup> conformes à la norme NA 2600-1992 [23] et qui sont destinés aux mesures de résistance mécanique à la compression (Photo 2.3). Les moules sont graissés avant l'utilisation à l'aide d'une huile pour faciliter le décoffrage.

Les bétons ont été mis en place par vibration à la table vibrante en trois couches (30 sec par couche) selon la norme NA 2598-1992 [23] (Photo 2.3).

Les éprouvettes de béton, démoulés à 24h après le coulage, sont conservés dans une chambre humide à une température de 20 ±2 C° et humidité ≤ 95 % jusqu'à le jour d'écrasement selon la norme NA 5093-2007 [25] (Photo 2.3).



Bétonnière



Moules à coulés



Table Vibrante



Moules remplis



Conservation des éprouvettes



**Photo 2.3 Mise en place et Conservation du béton**

## 2.5. Méthodes expérimentales

Dans ce paragraphe, nous exposerons les essais expérimentaux qui nous ont permis de mesurer les caractéristiques des ciments et des bétons à l'état frais et durci. Les résultats obtenus par ces essais sont présentés et interprétés dans le prochain chapitre.

### 2.5.1. Propriétés du Ciment

- **Essai de consistance et de temps de prise** « NA 230-2010 [26] »

L'essai a pour but de déterminer le temps de prise avec un appareil de Vicat, c'est-à-dire la durée qui s'écoule entre le temps de début de prise, qui correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, et la fin de prise qui est le moment où la pâte cesse d'être déformable et se transforme en un matériau rigide. Il est nécessaire de connaître le début et la fin de prise des liants hydrauliques afin de pouvoir évaluer le temps disponible pour la mise en place correcte des bétons. La teneur en eau idéale pour obtenir d'abord une pâte à consistance normalisée est obtenue par l'essai de consistance.



**Photo 2.4** Mesure de prise du ciment

### 2.5.2. Propriétés des bétons à l'état frais

- **Mesure de l'affaissement** « NA 1502-2007 [27] »

Durant l'opération de malaxage, l'essai d'affaissement au cône d'Abrams est réalisé selon la norme «NA 1502-2007» pour chaque formulation de béton étudiée (Photo 2.5). L'affaissement est aussi connu sous le nom de Slump provenant de l'anglais.



**Photo 2.5** Mesure de l'affaissement du béton

- **Température du béton**

La température de béton exerce une grande influence sur les propriétés du béton frais et durci; il est donc nécessaire de la noter pour chaque formulation de béton. Pour ce faire, un thermomètre est introduit dans le béton jusqu'à ce que la lecture devienne stable (Photo 2.6).



**Photo 2.6** Mesure de la température du béton

### **2.5.3. Propriétés des bétons à l'état durci**

- **Résistance mécanique à la compression** « NA 5075-2006 [28] »

L'essai mécanique de compression a été évaluée selon la norme « NA 5075-2006 [28] » sur des éprouvettes 15\*30 cm (Photo 2.7). Nous avons procédé à trois mesures et la valeur moyenne est retenue. Avant d'entamer l'essai, les éprouvettes préparées ont soumise d'abords à une opération de rectification (lissage) à l'aide d'une rectifieuse (Photo 2.7).

La résistance du béton est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_c = F/S$$

Où :  $\sigma_c$ : est la résistance en compression, exprimée en méga pascals (Newtons par millimètres carrés);

F : est la charge maximale, exprimée en Newtons;

S : Est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, exprimée en millimètres carrés.



Rectifieuse



Vue de la presse



### Photo 2.7 Mesure de la résistance mécanique à la compression

- **Essai d'auscultation dynamique par vitesse du son** « NA 5027-1997 [29] »

Le principe utilisé est celui de la mesure du temps de propagation des ondes longitudinales dans le béton émises par un ébranlement entre deux points déterminés du béton. Cette méthode consiste à presser les deux têtes sur les faces de l'éprouvette nettoyées, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transition du son. Pour notre mesure on a utilisé un Appareil de marque - Pundit Lab (PROCEQ) (Photo 2.8). Avant de commencer le contrôle de nos éprouvettes l'appareil doit être étalonné avec l'étalon (Photo 2.8).

Connaissant la distance d parcourue par les ondes, on en déduit la vitesse par l'équation suivante :

$$V = \frac{1}{t} d$$

Où : V : la vitesse de propagation en (m/s).

L : est la distance entre les transducteurs en (m) .

t : est le temps de propagation en (seconde).

Une vitesse élevée de propagation de son indique généralement un béton de bonne qualité. Une relation générale entre la qualité du béton et la vitesse de diffusion des impulsions est décrite au Tableau suivant :

**Tableau 2.11 Classification du béton selon la vitesse d'une impulsion ultrasonique**

Classification du béton	Vitesse de propagation (m /s)
Très bon	$V > 4575$
Bon	$4575 > V > 3660$
Moyen	$3660 > V > 3050$
Mauvais	$3050 > V > 2135$
Très mauvais	$V < 2135$



**Photo 2.8 Mesure de vitesse de son**

- **Essai d'auscultation dynamique par Scléromètre « NA 17004-2007 [30] »**

Cet essai consiste à déterminer la résistance à la compression de béton. Il mesure l'indice de rebondissement à la surface du matériau, indice qui est proportionnel à la résistance du matériau à la compression. L'essai est effectué selon la norme NA17004 [30] à brute la surface de l'éprouvette cylindrique en lisant directement la valeur indiquée par l'index affiché sur l'appareil scléromètre (Photo 2.9). On a effectué 3 mesures pour chaque éprouvette et la valeur moyenne est retenue.



**Photo 2.9 Scléromètre**

- **Essai de perméabilité du béton** « NF EN12390-8-2009 [31] »

L'essai consiste à déterminer la profondeur de pénétration d'eau sous pression dans un béton durci âgé au moins 28 jours au moment de l'essai. L'essai consiste à appliquer une pression d'eau de  $5 \pm 0.5$  bar sur une seule face plane d'une éprouvette cylindrique ou cubique pendant une période de 72 heures, après la rupture de l'éprouvette par fendage, on mesure la profondeur de pénétration de l'eau à l'aide d'une règle (Photo 2.10).

Dans notre recherche, l'essai est effectué sur des éprouvettes âgées de plus de 56 jours. Les éprouvettes cylindriques de dimension 15x30 cm sont sciées en deux et utilisées pour l'essai.



**Photo 2.10** Mesure de la perméabilité du béton

## 2.6. Conclusion

La partie expérimentale a été établie pour étudier l'effet des eaux grises sur les caractéristiques de béton à l'état frais (affaissement, température), sur la vitesse d'hydratation du ciment (à travers l'essai de temps de prise) et sur le développement de la résistance mécanique du béton (à travers les essais de la résistance mécanique à la compression, scléromètre et la vitesse de son), ainsi que leur influence sur la durabilité de béton (à travers l'essai de perméabilité de béton).

Pour que les bétons conforment aux spécifications requises à l'état frais et durcie, nous avons étudié tous d'abord les propriétés physiques et chimiques du sable, du gravier et du ciment, ainsi que les deux types d'eaux utilisées pour la préparation des éprouvettes.

# **CHAPITRE 3 :**

# **PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS**

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, l'ensemble des résultats obtenus lors de cette étude sont évalués puis comparés afin d'évaluer l'impact l'eau grise sur chaque propriété du béton.

Les trois mélanges de béton effectués dans cette étude sont accompagnés à la notation suivante :

**100 ER** : désigne le béton malaxé avec 100% de l'eau de l'eau de robinet.

**100 EG** : désigne le béton malaxé avec 100% de l'eau de grise.

**50 ER-50 EG** : désigne le béton malaxé avec 50% eau de grise + 50% eau de robinet.

### 3.2. Caractéristique des eaux grises utilisées

Nous avons soumis un échantillon d'eau grise à des analyses de pH, sulfate et chlorure, selon les méthodes normalisées, au niveau de laboratoire LTPS-Ghardaïa.. Les résultats recueillis sont présentés dans le Tableau 3.1.

Pour la détermination de la quantité des solides en suspension dans l'eau grise, il suffit de prélever un échantillon de volume connu, puis de laisser toute l'eau s'évaporer dans un four à 105 °C. Une fois le solide recueilli, il est possible de calculer la charge de l'eau en parties par millions et divisant la quantité de solides (mg) par le volume d'eau (1). Les résultats de calcul sont montrés dans le Tableau suivant :

**Tableau 3.1 Résultats d'analyses des eaux grises**

Paramètres	Unité	EG (01)	Limites tolérables
<b>PH</b>	-	12.46	PH ≥ 4 [10]
<b>Matières solides en suspension (MES)</b>	<b>mg/l</b>	14 900	≤ 50000 mg/l [11]
<b>Sulfate, SO<sup>2-</sup><sub>4</sub></b>	<b>mg/l</b>	625.56	≤ 2000 mg/l [10]
<b>Chlorure, Cl<sup>-</sup></b>	<b>mg/l</b>	317.3	500-4500 mg/l [10]

Les résultats présentés dans le tableau 3.1 montrent que les concentrations des constitutions des eaux grises restent dans les limites des normes. Ils montrent aussi que les eaux grises contiennent des teneurs élevées en sulfate et chlorure.

**Remarque**

A cause de la concentration des matériaux en suspension dans l'eau grise, les bétons fabriqués à partir d'eau grise se caractérisent par deux rapports E/C différents.

\*Le rapport E/C réel (II exclut la masse des fines particules du mélange).

$$\frac{E}{C} (\text{réel}) = \frac{EG}{C} \text{ par exemple dans le cas de béton 100 EG.}$$

\*\*Le rapport E/C apparent quant à lui considère l'apport de fines particules provenant de l'eau recyclée. Il est donc toujours supérieur au rapport E/C réel.

$$\frac{E}{C} (\text{app}) = \frac{EG+ER+\text{solides}}{C} \text{ par exemple dans le cas de béton 50 ER-50 EG.}$$

Afin d'être cohérent lors de la formulation des mélanges, la quantité de particules fines apportées par l'eau grise doit soustraite à la quantité de sable. Dans cette étude, cette quantité est considérée négligeable (< 50 000) et aucune correction n'est apportée au mélange.

**3.3. Résultats des mesures de temps de prise du ciment**

Le Tableau 3.2 présente les résultats des mesures de temps de début et de fin de prise pour les deux pâtes de ciment qui sont malaxées avec 100% de l'eau grise EG (02) et 100% de l'eau de robinet.

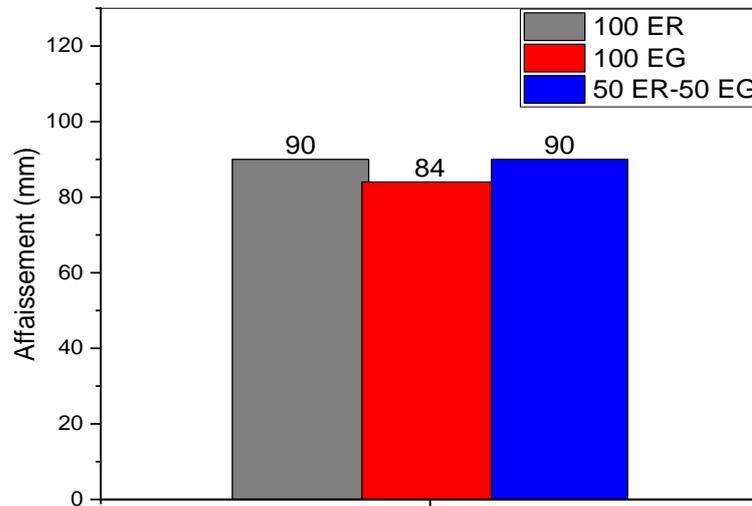
**Tableau 3.2 Effet des eaux grises sur le temps de prise du ciment**

Type d'eau	Teneur en eau (g)	Temps de prise (min)	
		Début de prise	Fin de prise
<b>100 EG (2)</b>	140	265	277
<b>100 ER</b>		271	289

A travers le Tableau 3.2, on remarque que lorsqu'on utilise l'eau grise, le temps de prise du ciment est légèrement inférieur au temps obtenu avec l'eau de robinet et cela est dû à l'effet des particules de ciment hydratées et non hydratées dans l'eau grise qui agisse comme accélérateur de prise. Avec une variation de seulement 06 minutes pour le temps initial de prise et 12 minutes pour le temps final de prise, il semble que l'eau grise utilisée dans cette étude (MES=14 900 ppm) n'a aucune influence sur le temps de prise de ciment, et que les temps de prises obtenus sont admissible selon les normes de l'eau de gâchage.

### 3.4. Résultats des mesures de l'affaissement du béton frais

La Figure 3.1 présente l'influence de l'eau grise sur l'affaissement du béton.



**Figure 3.1 Effet des eaux grises sur l'affaissement du béton frais**

La Figure 3.1 montre que l'affaissement du béton 100 EG est 84mm, il est donc légèrement faible par rapport au béton témoins, l'écart de l'affaissement est 6mm n'est pas très significatif. Par contre, l'affaissement du béton 50 ER-50 EG est égale de celle de béton témoin. L'affaissement plus faible de béton 100 EG est dû à l'effet des fines particules contenues dans l'eau grise.

### 3.5. Résultats des mesures de la température du béton frais

Le Tableau 3.3 présente l'influence de l'eau grise sur la température du béton frais.

**Tableau 3.3 Effet des eaux grises sur la température du béton frais**

Type d'eau	Température (°)
<b>100 ER</b>	23.1
<b>100 EG</b>	29.2
<b>50 ER-50EG</b>	24.8

Selon le Tableau 3.3, la température des bétons varient de 23.1° pour le béton témoin (100 ER) à 24.8° pour le béton 50 ER-50 EG, à 29.2° pour le béton 100EG. Cela signifie qu'une plus grande chaleur est dégagée lors de l'hydratation du ciment malaxée avec 100% de

l'eau grise. Cela peut être dû aux particules de ciment anhydres contenues dans l'eau grise qui tendent à s'hydrater et à dégager de la chaleur.

### 3.6. Evolution des résistances mécaniques à la compression

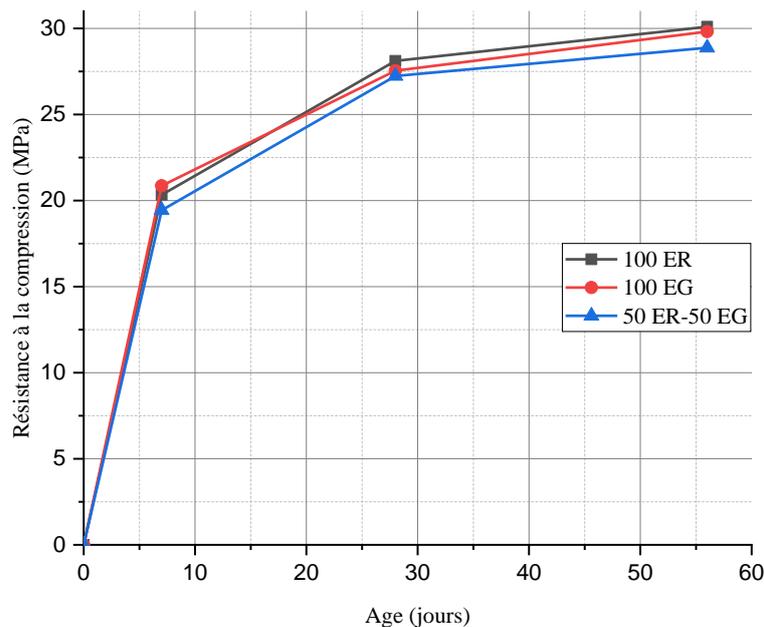
La résistance mécanique en compression est une caractéristique fondamentale du béton. Le Tableau 3.4 et la Figure 3.2 présentent les résultats de la résistance à la compression pour les trois formulations du béton étudiées en fonction de l'âge de conservation.

**Tableau 3.4 Valeurs moyennes des poids et des résistances mécaniques à la compression**

	Poids (Kg)			Résistance mécaniques à la compression $f_{cj}$ (MPa)		
	7 jours	28 jours	56 jours	7 jours	28 jours	56 jours
<b>100 ER</b>	11.85	11.88	11.83	20.33	28.11	30.10
<b>100 EG</b>	11.91	11.86	11.88	20.86	27.54	29.82
<b>50 ER-50 EG</b>	11.90	11.88	11.88	19.44	27.24	28.88

L'analyse des résultats permet d'apporter les commentaires suivants :

- L'utilisation de l'eau grise démontre une légère augmentation (moins de 1Mpa) de la résistance à la compression à l'âge de 7jours. Ceci est probablement attribuable à l'accélération du temps de prise obtenu par l'utilisation de cette eau.
- Une chute de 5% est obtenue avec le béton 50ER-50 EG par rapport au béton témoin à l'âge de 7jours.
- À l'âge de 7 jours, les éprouvettes préparées avec 100% et 50% de l'eau grise présentent des résistances à la compression acceptable par rapport aux éprouvettes d'eau de robinet selon l'exigence des normes.
- À l'âge de 28 jours, pour tous les bétons étudiés la résistance nominale visée à 28 jours est atteinte.
- À tous les âges de conservation, il n'y a aucun écart considérable de la résistance (uniquement des écarts de 1 MPa) est enregistré entre les bétons mélangés avec et sans eaux grises.



**Figure 3.2 Effet des eaux grises sur l'évolution de la résistance à la compression**

### 3.7. Evolution de la vitesse de son et de la résistance à chocs par scléromètre

Les résultats de la vitesse de son des différents bétons étudiés sont présentés dans le Tableau 3.5 et les résultats de 28 jours sont traités sous forme d'histogramme dans la Figure 3.3. Les résultats de la résistance à chocs par scléromètre des différents bétons étudiés sont présentés dans le Tableau 3.5.

La comparaison entre les vitesses de son des différents bétons étudiés nous permet d'étudier l'influence de l'eau grise sur le degré de compacité et l'homogénéité du béton.

**Tableau 3.5 Valeurs des vitesses de son et des résistances à chocs par scléromètre**

	Vitesse de son (m/s)			Résistance à chocs (MPA)		
	7 jours	28 jours	56 jours	7 jours	28 jours	56 jours
<b>100 ER</b>	2080	4260	4260	21.33	28.33	30.33
<b>100 EG</b>	2520	4180	4450	24.67	24.67	27.67
<b>50 ER-50 EG</b>	3670	4190	4210	22.67	27.83	29.66

D'après les résultats de Tableau 3.5, on remarque que à 28 jours la vitesse de propagation de son est supérieure à 4000m/s pour les trois formulations, ce qui correspond à

des bétons de bonnes résistances. D'après la Figure 3.3, on remarque que le béton malaxé avec l'eau de robinet présente une meilleure compacité à savoir son vitesse de son par rapport au béton avec l'eau grise, ce qui confirme les résultats de la résistance mécanique à la compression. Les valeurs de la résistance à chocs par scléromètre confirment aussi ces résultats.

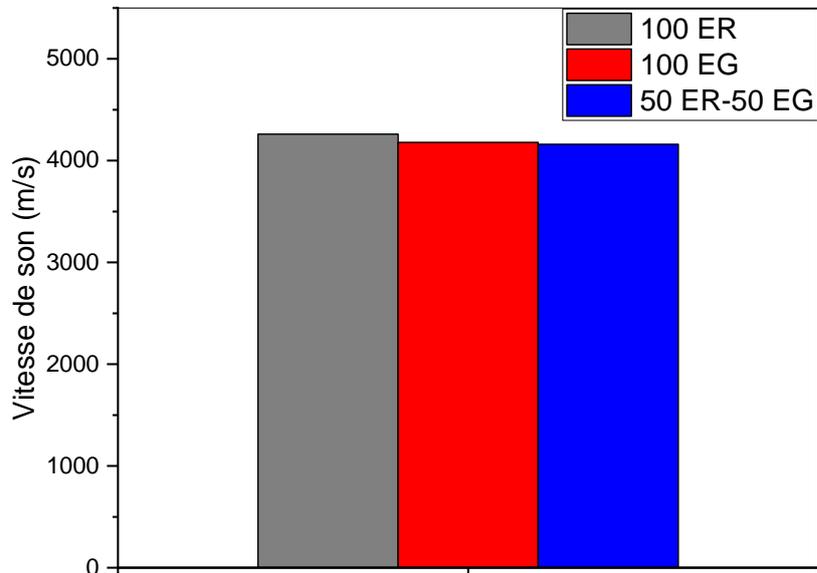


Figure 3.3 Effet des eaux grises sur la vitesse de son à 28 jours

### 3.8. Résultats des mesures de perméabilité du béton

Le Tableau 3.6 présente les résultats du coefficient d'absorption des différents bétons étudiés à 56 jours d'âge.

Tableau 3.6 Effet des eaux grises sur la perméabilité du béton

Type d'eau	Perméabilité (cm)
<b>100 ER</b>	10
<b>100 EG</b>	7
<b>50 ER-50EG</b>	8.5

D'après les résultats de Tableau 3.6, on remarque que les éprouvettes préparées avec 100% et 50% de l'eau grise présentent une faible profondeur de perméabilité par rapport aux éprouvettes témoins. Cela explique que les bétons contenant de l'eau grise sont moins poreux.

Cet effet est attribué aux fines particules ajoutées par l'eau grises qui peuvent être considérés comme des fillers. Dans cette optique, la perméabilité des bétons contenant de l'eau grise est diminuée et la durabilité est augmentée, car plusieurs propriétés sont liées à la perméabilité des bétons.

### **3.9. Conclusion**

L'analyse globale des résultats des essais en laboratoire montrent clairement que le remplacement de l'eau de robinet par de l'eau grise n'a pas d'effet négatif sur les propriétés du béton frais et durci.

Les bétons malaxés avec les eaux grises présentent une profondeur de perméabilité plus faible que ceux avec l'eau de robinet. Ceci pourrait démontrer qu'une porosité accessible à l'eau est moins développée avec les eaux grises ce qui influence de manière positive sur la durabilité de béton.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce travail de recherche consiste à étudier la possibilité de remplacement partiel ou total de l'eau de robinet par de l'eau grise, afin de contribuer, d'une part aux efforts permettant d'économiser l'eau potable dans l'industrie du béton, et d'autre part à l'amélioration de la performance environnementale de l'industrie du béton prêt à l'emploi.

Pour répondre aux objectifs de la recherche, trois séries de de béton ont été coulés. La première série est malaxée avec 100% de l'eau de robinet (100 ER) et considérée comme témoin, la deuxième série est coulée en utilisant 100% de l'eau grise (100 EG), tandis que la troisième série est malaxée avec 50% eau de grise + 50% eau de robinet (50 ER-50 EG).

Dans cette étude, nous avons étudié l'effet des eaux grises sur la vitesse d'hydratation du ciment (à travers l'essai de temps de prise) et sur le développement de la résistance mécanique du béton (à travers les essais de la résistance mécanique à la compression, scléromètre et la vitesse de son), ainsi que leur influence sur la durabilité de béton (à travers l'essai de perméabilité de béton).

Les résultats expérimentaux de cette étude ont permis de tirer les conclusions suivantes:

- ✓ Les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau grise utilisée pour cette étude étaient conformes aux spécifications des normes EN 1008-2002 et ASTM C1602.
- ✓ L'utilisation de l'eau grise engendre un effet relativement faible sur les propriétés du béton frais.
- ✓ Le remplacement de l'eau du robinet par de l'eau grise a peu d'effet sur la résistance mécanique, quel que soit l'âge du béton.
- ✓ Au terme de la résistance à la compression à 7 jours et au temps de prise du ciment, les bétons préparés avec 100% et 50% de l'eau grise présentent des résultats acceptables selon les exigences des normes EN 1008-2002 et ASTM C1602.
- ✓ À travers le contrôle de la perméabilité de béton, les bétons préparés avec les eaux grises présentent une meilleure durabilité par rapport aux bétons témoins.
- ✓ L'utilisation des eaux grise ayant une teneur en solides moins de 50 000 ppm pour le gâchage de béton est tout à fait possible.
- ✓ La réutilisation des eaux grises dans l'industrie de béton est possible et pour y parvenir les propriétés physiques et chimiques de cet effluent doivent être contrôlées au préalable.

- ✓ D'un point de vue environnemental, l'utilisation de l'eau grise à la place de l'eau de robinet dans le béton permet d'économiser l'eau potable et d'éviter les rejets d'eau dans les réseaux d'assainissements municipaux.

Suite à ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées:

- Finaliser les résultats expérimentaux en utilisant les différentes techniques d'analyses (MEB, DRX,...) et d'autres essais physiques et mécaniques (porosité, retrait, carbonatation,...).
- Étudier l'influence des eaux grises ayant des teneurs de solides en suspension supérieures à 50 00 ppm sur la qualité de béton.
- Étudier l'effet de l'eau grise sur les performances des adjuvants utilisés dans le mélange du béton.

# **BIBLIOGRAPHIE**

## Bibliographie

- [1] A.R. Chini, L.C. Muszynsk, M. Bergin, B.S. Ellis, Reuse of wastewater generated at concrete plants in Florida in the production of fresh concrete, *Mag. Concr. Res.* 53 (5) (2001) 311–9.
- [2] F. Sandrolini, E. Franzoni, Waste wash water recycling in ready-mixed concrete plants, *Cem. Concr. Res.* 31 (3) (2001) 485–489.
- [3] S.M. Bergeron, Optimisation de l'adjuvantation des bétons fabriqués avec de l'eau recyclée traitée, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, 2009.
- [4] D.A. Abrams, Tests of impure waters for mixing concrete, *Jour. Amer. Conc. Inst.* 20 (1924).
- [5] S.C. Blanchar, Caractéristiques des eaux recyclées traitées, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, 2008.
- [6] R. Gagné, S. Blanchard, Influence de l'eau recyclée traitée sur les propriétés des bétons, in: *Proceeding of septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)<sup>2</sup>B*, 2006, pp. 132–146.
- [7] Agence de l'eau seine Normandie, Les centrales de production de béton prêt à l'emploi du bassin seine-Normandie, l'eau et l'industrie livret n°3, 2007, Tiré de [https://www.graie.org/graie/graiedoc/doc\\_telech/biblio\\_hors\\_graie/racc-biblio/cisalb2010fiches/06-BTP/bibliographie/06.05\\_SeineNormandie\\_CentraleBeton.pdf](https://www.graie.org/graie/graiedoc/doc_telech/biblio_hors_graie/racc-biblio/cisalb2010fiches/06-BTP/bibliographie/06.05_SeineNormandie_CentraleBeton.pdf)
- [8] B. Chatveera, P. Lertwattanaruk, N. Makul, Effect of sludge water from ready-mixed concrete plant on properties and durability of concrete, *Cem. Concr. Compos.* 28 (5) (2006) 441–450.
- [9] J. Borger, R.L. Carrasquillo, D.W. Fowler, Use of recycled wash water and returned production of fresh concrete, *Advn. Cem. Bas. Mat.* 1 (6) (1994) 267–274.
- [10] EN 1008-2002, Mixing water for concrete — Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete, BSI: British Standard, 2002.
- [11] ASTM C1602/C1602M – 12, Standard specification for ready-mixed concretes. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Material, 2012.
- [12] N. Sue, B. Miao, F.S. Liu, Effect of wash water and underground water on properties of concrete, *Cem. Concr. Res.* 32 (5) (2002) 777–782.
- [13] N. Smaoui, M.A. Bérubé, B. Fournier, B. Bissonnette, B. Durand, Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete, *Cem. Concr. Res.* 35 (2005) 203–212.

- [14] NA 442, Ciment - Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, 2006.
- [15] NA 2607, Essai pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1: essai analyse granulométrique, aout 1992.
- [16] NA 255, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, 2006.
- [17] NA 455, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Evaluation des fines, 2006.
- [18] NA 1948, Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Qualification des fines/ Essai au bleu de méthylène, 2006.
- [19] NA 463, Granulats - Détermination de la propreté superficielle, 1990.
- [20] NA 458, Granulats - essai LOS ANGLES, 1990.
- [21] NA 457, Granulats – Essai micro Deval, 1990.
- [22] NA 2606, Bétons - Mise en œuvre des bétons de structure, octobre 1992.
- [23] NA 2600, Bétons - Moulent pour éprouvettes cylindriques et prismatiques, octobre 1992.
- [24] NA 2598, Bétons - Mise en place par micro table vibrante, octobre 1992.
- [25] NA 5093, Essai pour béton durci - Confection et conservation des éprouvettes pour essais de résistance, novembre 2007.
- [26] NA 230, Ciments - Détermination du temps de prise et de la stabilité, 2010.
- [27] NA 5102, Essai pour béton frais détermination la consistance essai d'affaissement, novembre 2007.
- [28] NA 5075, Essai pour béton durci – Résistance à la compression des éprouvettes, 2006.
- [29] NA 5027, Béton - Auscultation sonique - Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton, 1997.
- [30] NA 17004, Evaluation de la résistance à la compression sur site des structures et des éléments préfabriqués en béton, 2007.
- [31] NF EN12390-8, Essai pour béton durci profondeur de pénétration d'eau sous pression , 2009.