

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 عمّار ثليجي بالأغواط  
Université Amar Telidji de Laghouat



كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الهندسة المدنية  
Département de génie civil

**Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil**

- **Présenté par :**

- **Maamar DLIOUAH**
- **Kaddour FEDDA**

**Thème :**

**Développement d'un logiciel d'acquisition de l'agitateur  
Heidolph RZR 2102 pour l'estimation des paramètres  
rhéologiques des mortiers et bétons frais**

Devant le Jury composé de :

<b>Mr. FERHAT Ahmida</b>	<b>MAA</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Laghouat</b>
<b>Mr. BOUKHELKHAL Aboubakeur</b>	<b>MAA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Laghouat</b>
<b>Mr. BOUZIANI Tayeb</b>	<b>MCA</b>	<b>Encadreur</b>	<b>Université de Laghouat</b>

**2016/2017**

## DEDICACES

### بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

أهدي هذا العمل إلى والدتي ووالدي، وإخوتي: مصطفى، هشام ولطفي.  
وجميع أبناء عائلتي دليوح وكركب.

إلى كل أساتذتي في كل مراحل الدراسة، خاصة الشيخ محمد نوري.

وإلى كل الأصدقاء، خاصة أحمد، عبد الرحمن، بلخير، إبراهيم، عمار، نبيل،  
نور الدين، بولرباح، لمين، عبد الجليل، لخضر، وبوسحابة.

### معمر دليوح

أهدي هذا العمل إلى والدتي ووالدي، وإخوتي، وزوجتي وأبنائي:  
"يوسف عبد القادر"، "ياسمين إيمان"، "علاء الدين يونس"، "جمانة".

وجميع أبناء عائلة فضة وجنيدي ورزقي.

وإلى جميع الأصدقاء خاصة، إبراهيم، عبد الرحمن، عثمان، حسن، لخضر.

### قدور فضة

كما يود كلا الطالبين إهداء هذا العمل إلى كل طلبة سنة ثانية ماستر هندسة  
مدنية، تخصص مواد بناء، في جامعة الأغواط، خاصة، خالد، بودربالة، الطاهر،  
حميد، بركاتي، نحوي، وبلحسين.

## REMERCIEMENTS

---

Nous remercions avant tout Allah de nous avoir gardés en bonne santé afin de mener à bien ce projet de fin d'étude. Nous remercions également nos familles pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que nous terminions nos études.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre encadreur **Mr. Bouziani Tayeb** qui nous a témoigné de sa confiance, de son aide scientifique et par son expérience et sa compétence.

Nous remercions les membres de jury **Mr. Ferhat Ahmida** et **Mr. Boukhelkhal Aboubakeur**, qui ont accepté de juger ce travail. Nous remercions aussi tous nos amis pour leur aide, leur patience, leur compréhension et leur encouragement.

Nous remercions aussi **Mr. Sahraoui Mohamed** pour son aide.

Maamar et Kaddour

## ملخص

---

تمثل هذه المذكرة حلاً لمشكلة قائمة، حيث من خلال هذا العمل وفرنا برنامجاً يعالج المعطيات الأولية لتجربة ريولوجية المحصل عليها من جهاز " Heidolph - RZR 2102 Control Z"، وارجاع الخصائص الريولوجية للملاط والخرسانة.

لقد قدمنا التعريفات والمفاهيم الأساسية لعلم الريولوجيا والخصائص والنماذج الريولوجية. ومن ثم قدمنا الأدوات والمواد المستعملة، وفي الأخير بينا الخوارزميات التي طورناها باستعمال لغة البرمجة C#. إن تجريب هذا البرنامج أظهر نتائج يمكن اعتبارها مرضية.

## RESUME

---

Ce travail présente une solution à un problème existant, avec ce travail, nous fournissons un logiciel qui traite les données brutes d'un essai de rhéologie à partir d'un agitateur " Heidolph - RZR 2102 Control Z " et renvoie les paramètres rhéologiques du mortier ou du béton.

Nous avons présenté la définition et les notions nécessaires de rhéologie et de modèles et de paramètres rhéologiques. Ensuite, nous avons présenté les outils et les matériaux utilisés, et enfin nous avons montré les algorithmes que nous avons développé avec langage de programmation C#. La validation du logiciel a montré des résultats satisfaisants.

## ABSTRACT

---

This work presents a solution to an existing problem, with this work we provide a software that processes the raw data of a rheology test from a " Heidolph - RZR 2102 Control Z " agitator, and give back the rheological parameters of the mortar or concrete.

We presented the necessary definition and notions of rheology and rheological models and parameters. Then we presented the tools and materials, and finally we showed the algorithms we developed using C#. The validation of the software showed satisfying results.

## LISTE DES SYMBOLES

---

- dF : Projection de la force de frottement tangentielle.  
dS : Surface élémentaire d'une couche cisillée.  
 $\tau$  : Contrainte de cisaillement [Pa].  
 $\tau_0$  : Seuil de cisaillement [Pa].  
 $\dot{\gamma}$  : Taux de cisaillement [1/s].  
 $\mu$  : Viscosité plastique [Pa.s].  
k : L'indice de cohérence (Herschel-Bulkley)  
n : L'indice de flux (Herschel-Bulkley)  
A : Paramètre rhéologique de Robertson-Stiff  
B : Paramètre rhéologique de Robertson-Stiff  
C : Paramètre rhéologique de Robertson-Stiff  
 $\Omega$  : vitesse de rotation de l'outil vane du rhéomètre (rad.s<sup>-1</sup>)  
M : Moment de rotation de l'outil vane du rhéomètre (N.m)  
CaO : Oxyde de calcium  
SiO<sub>2</sub> : Silice  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Alumine  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : Oxyde de fer  
MgO : Oxyde magnésium  
Na<sub>2</sub>O : Oxyde de sodium  
K<sub>2</sub>O : Oxyde de potassium  
SO<sub>3</sub> : Trioxyde de soufre  
C<sub>3</sub>S : Silicate tricalcique (Aalite)  
C<sub>2</sub>S : Silicate bicalcique (bélite)  
C<sub>3</sub>A : Aluminate tricalcique (célite)  
C<sub>4</sub>AF : Alumino-ferrite tétracalcique

## TABLE DES MATIERES

---

Dédicaces .....	ii
Remerciements .....	iii
ملخص.....	iv
Résumé .....	iv
Abstract .....	iv
Liste des symboles .....	v
Table des matières .....	vi
Liste de figures .....	x
Liste de tableaux.....	xii
Introduction .....	1
Chapitre I. Synthèse bibliographique .....	3
I.1 Introduction .....	3
I.2 Rhéologie .....	3
I.2.1 Définition de la rhéologie.....	3
I.2.2 Comportements rhéologiques.....	3
I.3 Classification des fluides.....	4
I.3.1 Fluide Newtonien .....	4
I.3.2 Fluides non newtoniens .....	4
I.3.3 Rhéofluidifiant ou pseudo-plastique .....	5
I.3.4 Rhéoépaississant ou dilatant.....	5
I.3.5 Fluide à seuil .....	5
I.3.6 Thixotropie .....	5
I.3.7 Rhéopéctie (anti-thixotropie) .....	5
I.3.8 Fluides viscoélastiques .....	6

I.3.9	Contrainte de cisaillement $\tau$ [Pa] .....	6
I.3.10	Taux de cisaillement (ou vitesse de cisaillement) $\dot{\gamma}$ [1/ s] .....	6
I.3.11	Viscosité .....	7
I.3.12	Seuil de cisaillement $\tau_0$ [Pa] .....	7
I.4	Rhéologie des matériaux cimentaires à l'état frais .....	7
I.4.1	Importance .....	8
I.4.2	Facteurs influençant la rhéologie des matériaux cimentaires .....	9
I.4.3	Modèles rhéologiques .....	10
I.5	Rhéomètres .....	12
I.5.1	Définition .....	12
I.5.2	Types des rhéomètres .....	13
Chapitre II.	Matériaux, Matériels et Méthodes .....	15
II.1	Introduction .....	15
II.2	Matériaux .....	15
II.2.1	Eau .....	15
II.2.2	Ciment .....	15
II.2.3	Granulats .....	16
II.2.4	Adjuvants .....	16
II.2.5	Essais de caractérisation des matériaux utilisés .....	16
II.2.6	Résultats des essais de caractérisation des matériaux .....	23
II.2.7	Formulation .....	26
II.3	Matériels .....	27
II.3.1	Rhéomètre Heidolph- RZR 2102 Control Z .....	27
II.4	Méthodes .....	29
II.4.1	Essai au rhéomètre .....	29

II.4.2	LANGAGE UTILISE POUR LA PROGRAMMATION .....	32
Chapitre III.	Développement du logiciel .....	36
III.1	Introduction.....	36
III.2	Données de l'essai .....	36
III.2.1	Les données d'après le logiciel « Hei-Control Software ».....	36
III.2.2	Traitement préliminaire des données.....	37
III.2.3	Traitement de données initiales .....	37
III.3	Développement des solutions numériques pour les modèles rhéologiques	39
III.3.1	Bingham .....	39
III.3.2	Bingham Modifiée .....	41
III.3.3	Herschel-Bulkley.....	42
III.3.4	Casson.....	43
III.3.5	Robertson-Stiff .....	44
III.4	Résultats.....	47
III.4.1	Présentation numérique .....	47
III.4.2	Présentation visuelle .....	47
Chapitre IV.	Validation du logiciel .....	49
IV.1	Introduction.....	49
IV.2	Comparaison des résultats .....	49
IV.2.1	Comparaison avec les résultats d'Adjoudj .....	49
IV.2.2	Comparaison avec les résultats de Soualhi, et al.....	50
IV.3	Application de logiciel sur des essais réalisés au laboratoire .....	52
IV.3.1	Essais sur mortiers autoplaçants.....	53
IV.3.2	Essais sur béton auto-plaçant .....	53
IV.3.3	Commentaire .....	53

Conclusion Générale .....	54
Recommandations .....	54
Annexes .....	55
Utiliser Visual Studio .....	55
Créer un projet.....	55
Analyse rapide de l'environnement de développement et du code généré .....	57
Ecrire du texte dans notre application.....	60
L'exécution du projet.....	61
Bibliographie .....	65

## LISTE DE FIGURES

---

Figure I-1 Classification des fluides selon leur comportement rhéologique (Chekireb, 2015) .....	4
Figure I-2 Schéma de la déformation de cisaillement .....	7
Figure I-3 Classification des types de recherche sur le béton frais d'après (Roy et al. 1982) (Hoang, 2015) .....	8
Figure I-4 Représentation schématique d'une cellule de Couette et d'un outil vane .....	14
Figure II-1 Equipement nécessaire de l'essai .....	17
Figure II-2 Equipement nécessaire de l'essai perméabilité Blaine. ....	18
Figure II-3 Schéma d'un perméabilimètre de Blaine à mesure manuelle .....	19
Figure II-4 Essai d'équivalence de sable .....	20
Figure II-5 Moule et dame pour coefficient d'absorption.....	22
Figure II-6 Sac de ciment nous utilisé.....	23
Figure II-7 Courbe granulométrique de sable utilisé. ....	25
Figure II-8 Rhéomètre .....	28
Figure II-9 Agitateur .....	28
Figure II-10 Croisillon .....	28
Figure II-11 Récipient. ....	28
Figure II-12 Schéma descriptif du rhéomètre .....	29
Figure II-13 Profil de vitesse.....	31
Figure III-1 Organigramme de traitement de données initiales .....	39
Figure III-2 Algorithme du modèle Bingham .....	40
Figure III-3 Algorithme de modèle Bingham modifié .....	41
Figure III-4 Code d'algorithme.....	43

Figure III-5 Algorithme de modèle Casson.....	44
Figure III-6 Code d'algorithem.....	46
Figure III-7Les courbes .....	48
Figure IV-1 Résultats d'essai d'Adjoudj selon RhéoGraph .....	50
Figure IV-2 Correlation des résultats de $\tau_0$ de Soualhi en fonction des résultats de RheoGraph .....	51
Figure IV-3 correlation des résultats de $\mu$ de Soualhi en fonction des résultats de RheoGraph .....	51
Figure IV-4 résultats d'essai de Soualhi, et al.....	52
Figure Annexes-1 Page d'accueil de Visual Studio Express 2013 for Windows Desktop .....	55
Figure Annexes-2 Création d'un projet Application console .....	56

## LISTE DE TABLEAUX

---

Tableau II-1 Exigences chimiques. ....	24
Tableau II-2 Exigences minéralogiques. ....	24
Tableau II-3 Résultats d'essais de caractérisation de ciment .....	24
Tableau II-4 Analyse granulométrique pour de sable alluvionnaire utilisé. ....	25
Tableau II-5 Propriétés physiques de sable .....	25
Tableau II-6 Propriétés physiques des granulats.....	26
Tableau III-1 Exemple d'un fichier d'essai.....	36
Tableau IV-1 Les résultats d'Adjoudj .....	49
Tableau IV-2 Comparaison des résultats avec Adjoudj .....	50
Tableau IV-3 Les résultats des essais rhéologiques sur BO1.....	51
Tableau IV-4 Les résultats des essais rhéologiques sur BO2.....	52
Tableau IV-5 Résultats de mortier .....	53
Tableau IV-6 Compositions des bétons auto-plaçant.....	53
Tableau IV-7 Résultats de bétons auto plaçant .....	53

## INTRODUCTION

---

L'évolution rapide du domaine de construction dans ces dernières décennies a conduit au développement de nouveaux bétons, tel que les bétons fluides. Ces bétons ont des caractéristiques à l'état frais très particulières, intéressantes et parfois compliquées. La caractérisation de ces types de bétons, à l'état frais, est généralement effectuée par des essais classiques (tel que l'essai d'étalement au cône d'Abrams, essai d'écoulement au V-funnel etc...). Cependant, la compréhension du comportement des bétons à l'état frais est actuellement mieux décrite par l'utilisation des rhéomètres et viscosimètres. Plusieurs auteurs ont travaillé sur ce sujet et ont trouvé différentes méthodes et modèles de comportement rhéologiques des bétons.

Vue l'importance de la caractérisation rhéologique des bétons fluides, notre département a mis à la disposition de l'ensemble des étudiants et des enseignants un agitateur de type (Heidolph - RZR 2102 Control Z). Cet agitateur permet la récolte des informations de base (Moments et vitesse de rotation) utilisé pour le calcul des paramètres rhéologiques. Toutefois, nous n'avons pas de moyen d'acquisition (logiciel spécial) pour traduire les informations obtenues à des résultats rhéologiques (seuil de cisaillement et viscosité plastique). La procédure de calcul des paramètres rhéologiques n'est pas simple et peut être très compliquée, en particulier avec les différents modèles connus dans le domaine des bétons fluides et les bétons autoplaçants.

Notre travail consiste à proposer et développer un outil d'acquisition numérique (un logiciel **RheoGraph**) à l'aide du langage de programmation **C#** ; pour la traduction des résultats de base du béton frais, issus de l'agitateur Heidolph - RZR 2102 Control Z, à plusieurs paramètres rhéologiques selon les différentes méthodes et modèles rhéologiques connus dans la littérature.

Le présent mémoire est organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est intitulé : Synthèse bibliographique. Dans ce chapitre, on présente la définition générale de la rhéologie et autre conception rhéologiques

importantes. Aussi on parle sur la rhéologie des matériaux cimentaires et les modèles rhéologiques. Enfin on aborde les différents types des rhéomètres.

Dans le deuxième chapitre, on présente les matériaux, les matériels et les méthodes utilisés dans notre travail. Nous décrivons les matériaux de construction utilisés, comme le ciment, le sable, le gravier, l'eau et les adjuvants et les essais pour définir leurs propriétés. Nous présentons aussi l'agitateur Heidolph- RZR 2102 Control Z, utilisé pour obtenir les informations de base (couples et vitesse de rotation) et nous décrivons aussi la procédure des essais de rhéologie. Nous parlons finalement de l'outil de développement et du langage de programmation C#, utilisé pour le développement de l'application **RheoGraph**.

Le troisième chapitre est consacré au développement analytique du logiciel proposé. Nous parlons du développement des solutions numériques des modèles rhéologiques. D'abord, nous décrivons la méthode de transformation du couple (vitesse de rotation, moment) au couple (taux de cisaillement, cisaillement). Ensuite, nous parlons du développement des algorithmes pour résoudre les équations des modèles. Et enfin de chapitre, nous parlons de la présentation des résultats dans le logiciel.

Une validation des résultats avec des travaux effectués avec le même agitateur est présentée dans le quatrième chapitre. Nous présentons aussi quelques résultats sur des essais réalisés en laboratoire.

Enfin, nous présentons les résultats trouvés à l'issu de ce travail dans une conclusion générale et nous donnons aussi des recommandations pour le développement de l'application proposée dans le futur.

# Chapitre I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

---

## I.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons étaler quelques notions et définitions des différents aspects de la rhéologie en général. Ensuite, nous allons parler de la rhéologie des matériaux cimentaires et présenter quelques modèles de rhéologie. Et enfin nous décrirons les principaux types de rhéomètres à béton.

## I.2 RHEOLOGIE

### I.2.1 Définition de la rhéologie

La rhéologie est la science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux sous l'influence des forces qui leur sont appliquées. La déformation et l'écoulement sont en fait les conséquences de mouvements relatifs des particules d'un corps les unes par rapport aux autres (Hu, 1995). Elle donne une meilleure définition des propriétés d'écoulement des matériaux cimentaires et fournit les grandeurs rhéologiques fondamentales (seuil d'écoulement, viscosité plastique) qui permettent de tracer des courbes d'écoulement caractéristiques des différents types de mélanges (Adjoudj, 2015).

### I.2.2 Comportements rhéologiques

La rhéologie est utilisée dans plusieurs domaines industriels, notamment les matériaux cimentaires (pâte, mortier et béton de ciment) afin de comprendre et d'identifier leur comportement à l'état frais. Le comportement rhéologique des matériaux cimentaires est variable et dépend de la composition de la pâte (type de liant, adjuvant chimique, rapport E/L), de la nature et de la teneur des granulats (sable, gros granulats), des différentes interactions entre les particules (colloïdales, hydrodynamiques, frictionnelles...etc.) et des conditions expérimentales. À travers la, on peut classer les fluides selon leurs comportements rhéologiques (Figure I-1). À savoir que les matériaux cimentaires sont considérés comme des suspensions de particules de tailles différentes dans un fluide de viscosité variable. (Chekireb, 2015)

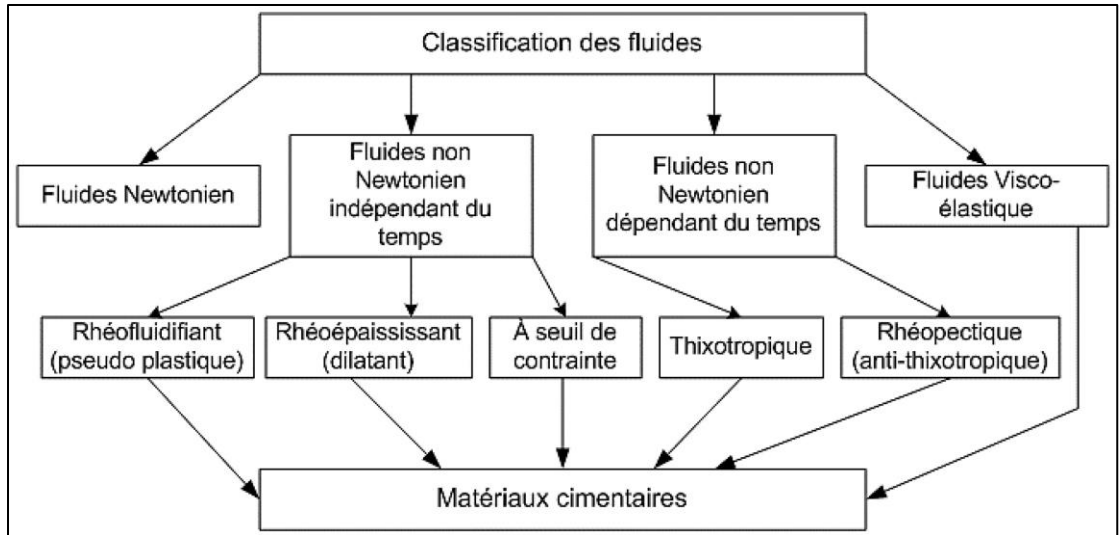


Figure I-1 Classification des fluides selon leur comportement rhéologique  
(Chekireb, 2015)

### I.3 CLASSIFICATION DES FLUIDES

#### I.3.1 Fluide Newtonien

On appelle liquide Newtonien un fluide dont le rapport entre la contrainte de cisaillement à la vitesse de déformation reste constant. Ce rapport exprime la viscosité, elle est indépendante du cisaillement. (Chekireb, 2015)

#### I.3.2 Fluides non newtoniens

Si le modèle de fluide newtonien décrit bien la très grande majorité des fluides composés de molécules simples, il existe un bon nombre de fluides, dont certains sont d'usage très courant, qui ont un comportement sous écoulement plus complexe. La définition d'un fluide newtonien est assez restrictive : les contraintes de cisaillement sont proportionnelles au gradient de vitesse, ce qui implique que :

- Dans un écoulement de cisaillement simple, les seules contraintes créées par l'écoulement sont des contraintes de cisaillement.
- La viscosité est indépendante de la vitesse de cisaillement.
- La viscosité est indépendante du temps et les contraintes s'annulent immédiatement lorsque l'écoulement est arrêté.

Toute déviation de ces règles est le signe d'un comportement non-newtonien. La description de ces comportements et leur interprétation en relation avec la structure microscopique du fluide constitue la discipline appelée rhéologie. Cette discipline est assez récente ; elle a connu un développement considérable avec l'apparition des polymères synthétiques. (Clanet, 2009)

### 1.3.3 Rhéofluidifiant ou pseudo-plastique

Un fluide est dit rhéofluidifiant quand la viscosité apparente diminue avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement. (Chekireb, 2015)

### 1.3.4 Rhéoépaississant ou dilatant

Un fluide est dit rhéoépaississant quand la viscosité apparente croît avec l'augmentation de la vitesse de cisaillement. (Chekireb, 2015)

### 1.3.5 Fluide à seuil

On appelle un fluide à seuil quand il nécessite une contrainte minimale au-delà de laquelle il peut s'écouler. (Chekireb, 2015)

### 1.3.6 Thixotropie

Un fluide est dit thixotrope quand sa viscosité diminue avec le temps pour une contrainte de cisaillement donnée. Cela est réversible, le fluide se restructure, c'est-à-dire, que sa viscosité augmente après un temps de repos suffisant. (Chekireb, 2015)

### 1.3.7 Rhéopéctie (anti-thixotropie)

La rhéopéctie est le contraire de la thixotropie. La viscosité d'un fluide rhéopéctique augmente avec le temps en appliquant une vitesse de cisaillement constante. Ce phénomène est réversible, au repos il y a une déstructuration du fluide, la viscosité diminue. (Chekireb, 2015)

### I.3.8 Fluides viscoélastiques

La viscoélasticité linéaire caractérise un comportement intermédiaire du matériau entre un solide élastique de Hooke (les déformations sont proportionnelles aux contraintes) symbolisé par un ressort de module  $E$  (ou  $G$ ) et un fluide visqueux Newtonien (vitesses de déformations proportionnelles aux contraintes) symbolisé par un amortisseur de viscosité  $\mu$ .

L'élasticité d'un matériau traduit sa capacité à conserver et restituer l'énergie après déformation, la viscosité traduit sa capacité à dissiper l'énergie. (Chekireb, 2015)

### I.3.9 Contrainte de cisaillement $\tau$ [Pa]

Au cours d'un mouvement laminaire de cisaillement, les couches sont animées d'un mouvement relatif les unes par rapport aux autres : deux couches successives, au contact l'une de l'autre, se déplacent relativement l'une par rapport à l'autre. On peut ainsi dire que la contrainte de cisaillement est la force que l'on exerce par unité de surface du fluide :

$$\tau = \frac{dF}{dS} \quad (\text{Eq I-1})$$

Où :

- $dS$  : surface élémentaire d'une couche cisillée.
- $dF$  : projection de la force de frottement tangentielle. (Hoang, 2015)

### I.3.10 Taux de cisaillement (ou vitesse de cisaillement) $\dot{\gamma}$ [1/ s]

Souvent appelée gradient de vitesse, il s'agit de la vitesse de déformation de deux couches successives de matériau cisillé, qui représente donc la dérivée par rapport au temps de la déformation de cisaillement (Figure I- 2) donnée par l'équation suivante :

$$\gamma = \frac{dx}{dz} \quad \text{Eq I-2 (Hoang, 2015)}$$

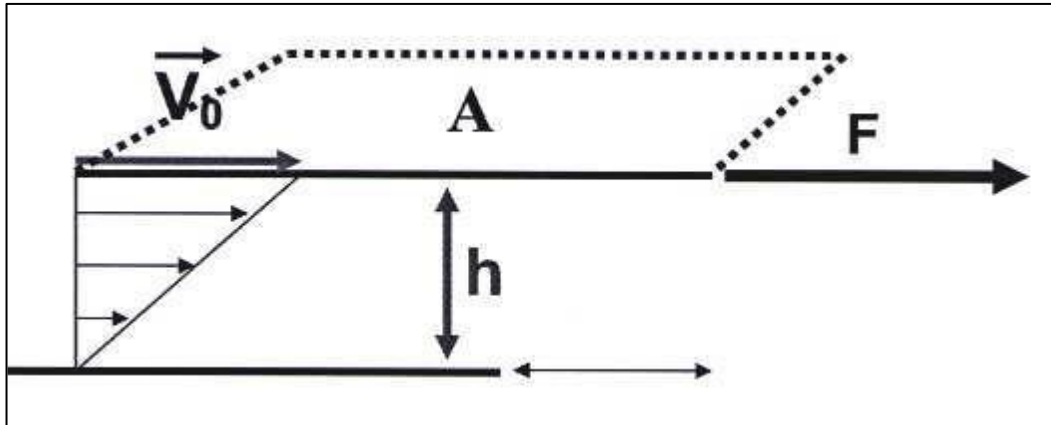


Figure I-2 Schéma de la déformation de cisaillement

La vitesse de cisaillement, appelée également gradient de vitesse ou taux de cisaillement :

$$\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dx}{dz} \right) = \frac{d}{dz} \left( \frac{dx}{dt} \right) = \frac{dv}{dz} \quad \text{Eq I-3 (Hoang, 2015)}$$

### I.3.11 Viscosité

La viscosité est une grandeur physique qui traduit la résistance à l'écoulement uniforme de la matière. La viscosité peut aussi être définie comme étant le frottement interne d'un fluide dû aux interactions moléculaires. (Chekireb, 2015)

### I.3.12 Seuil de cisaillement $\tau_0$ [Pa]

Le seuil de cisaillement représente la contrainte minimale appliquée au fluide afin d'initier un écoulement. En dessous de cette contrainte, aucune déformation ne se produit. (Chekireb, 2015)

## I.4 RHEOLOGIE DES MATERIAUX CIMENTAIRES A L'ETAT FRAIS

Les matériaux cimentaires sont composés essentiellement d'un liant hydraulique qui est le ciment auquel on rajoute de l'eau avec une certaine quantité pour former une pâte cimentaire appelée également un coulis sous certaines conditions. Si du sable est introduit on parle de mortier. Le terme béton est utilisé lorsque des

granulats sont rajoutés. En fonction de la taille des granulats donc on passe par trois échelles différentes : coulis/pâte, mortier et béton. (Hoang, 2015)

Les propriétés à l'état frais jouent un rôle majeur sur la qualité des bétons à l'état durci et sur leur durabilité. En effet, les caractéristiques du béton à l'état durci, par exemple, dépendent souvent de celles que possédait le béton frais durant son transport, sa mise en place et sa finition. Le coût de mise en place du béton (main d'œuvre, équipements) est aussi important que celui du matériau lui-même. D'ailleurs, la maniabilité du béton frais est souvent un facteur décisif qui affecte les profits ou les pertes associées à la production ou à la mise en place du béton. De plus la maniabilité a une grande influence sur la qualité et les performances du matériau à l'état durci. (Hoang, 2015)

L'étude des propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais implique plusieurs concepts (stabilité, compacité, mobilité) représentés sur la Figure I- 3. (Hoang, 2015)

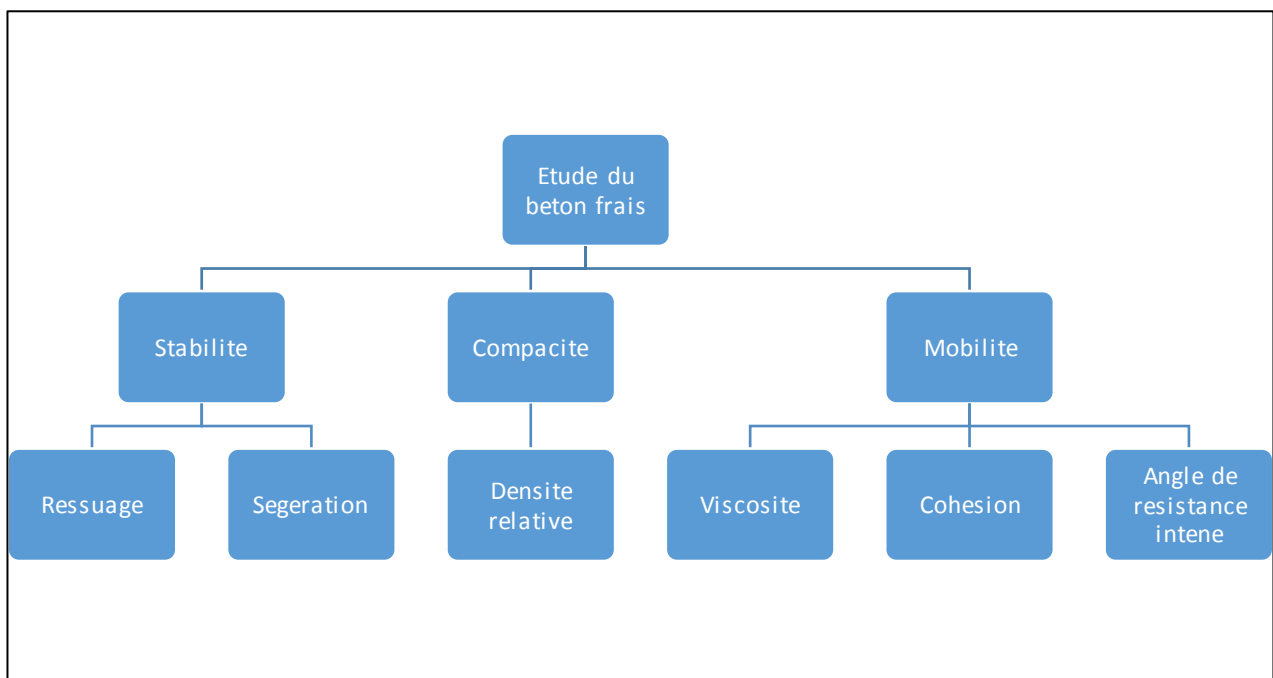


Figure I-3 Classification des types de recherche sur le béton frais d'après (Roy et al. 1982) (Hoang, 2015)

### 1.4.1 Importance

Bien que les propriétés du béton à l'état durci soient plus évoquées pour les bétons d'aujourd'hui, il s'avère que si un béton ne peut pas être mis en place correctement, ses propriétés désirées ne seront pas obtenues. Pour chaque application,

les caractéristiques requises pour le béton frais sont différentes et définissent si un béton a de bonnes propriétés à l'état frais telles que les besoins de finition, de mise en place, de pompabilité, de résistance à la ségrégation etc... Aujourd'hui, le développement des nouveaux bétons intensifie le besoin de caractériser encore mieux le comportement du béton et son écoulement. De nombreux ajouts cimentaires et adjuvants organiques ont fait leur apparition et viennent apporter des modifications importantes au béton. L'importance de la maniabilité et de sa mesure ont pris du même coup une importance primordiale. Auparavant, un béton plus fluide était automatiquement associé aux problèmes de ségrégation et une faible résistance à la compression. De nos jours, il est maintenant possible de produire un béton très fluide ayant d'excellentes propriétés mécaniques.

Les tests empiriques conventionnels ne suffisent plus pour certains cas à bien caractériser le comportement lors de l'écoulement et de la mise en place du béton frais. Le développement de nouveaux appareils basés sur une approche plus fondamentale et rhéologique donne des résultats plus adéquats et reflète bien l'aptitude physique du matériau à se déplacer sous son propre poids. (Adjoudj, 2015)

### 1.4.2 Facteurs influençant la rhéologie des matériaux cimentaires

Le changement dans les paramètres de formulation d'un matériau cimentaire à une grande influence sur les paramètres rhéologiques. Parmi les facteurs les plus influençant on peut citer :

- L'eau et le rapport eau-ciment.
- Les caractéristiques chimiques et physiques du ciment.
- La présence d'additions minérales.
- Les adjuvants.
- La proportion de chacun des constituants dans le mélange.
- Le temps écoulé depuis le contact eau-ciment (histoire du coulis).
- La vibration ou mise en œuvre particulière.

### 1.4.3 Modèles rhéologiques

Les modèles rhéologiques sont des outils mathématiques utilisés pour caractériser le comportement d'un matériau lors de son écoulement. Le choix du modèle est justifié par le type de matériau étudié ainsi que la vitesse de déformation à laquelle le matériau est soumis. De nombreux modèles rhéologiques ont été proposés depuis le début de l'étude de la rhéologie. Plusieurs études ont permis de lier divers modèles rhéologiques déjà existants aux matériaux cimentaires. (Crépault, 2012)

La courbe d'écoulement du béton et mortier frais a été rapportée pour s'adapter à différentes formes mathématiques différentes, ce qui indique l'existence d'une contrainte seuil de cisaillement en exigeant une interception sur l'axe de contrainte de cisaillement (Banfill, 2006). Ceux-ci sont répertoriés comme suit :

#### 1.4.3.1 Le modèle Bingham

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad (\text{Eq I-4}) \quad (\text{Banfill, 2006})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement (Pa),  $\tau_0$  le seuil de cisaillement (Pa),  $\mu$  la viscosité en plastique (Pa/s) et  $\dot{\gamma}$  le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ). L'équation de Bingham a été utilisée par Tattersall et Banfill pour décrire le comportement des suspensions de ciment à faible taux de cisaillement. (Papo, 1988)

#### 1.4.3.2 Le modèle Bingham modifié

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2 \quad (\text{Eq I-5}) \quad (\text{Banfill, 2006})$$

Où  $\tau$  est la contrainte de cisaillement (Pa),  $\tau_0$  le seuil de cisaillement (Pa),  $\mu$  la viscosité en plastique (Pa/s) et  $\dot{\gamma}$  le taux de cisaillement ( $s^{-1}$ ) et  $c$  est un constant de correction. (Banfill, 2006)

#### 1.4.3.3 Le modèle Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (\text{Eq I-6}) \quad (\text{Banfill, 2006})$$

Où  $\tau_0$  est le stress élastique,  $K$  est l'indice de consistance (en  $\text{Pa}\cdot\text{s}^n$ ) et  $n$  est l'indice d'écoulement, qui représente l'écart par rapport au comportement newtonien.

Ce modèle conduit à la loi de Newton lorsque  $\tau_0 = 0$  et  $n = 1$ , à l'équation de Bingham lorsque  $n = 1$  et à une loi de puissance quand  $\tau_0 = 0$ .

L'équation de Herschel-Bulkley a été appliquée aux pâtes de ciment de Jones et Taylor pour corrélérer les données obtenues par des mesures effectuées avec un viscosimètre à cône et à plaque et, avec un grand succès, par Attenir et al. (Papo, 1988)

#### 1.4.3.4 Le modèle de Casson

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu\dot{\gamma}} \quad (\text{Eq I-7}) \text{ (Banfill, 2006)}$$

Où  $\tau_0$  et  $\mu$  sont la valeur de seuil de cisaillement et la Viscosité plastique, respectivement.

« Cette équation a été obtenue en supposant l'agrégation des particules de la phase dispersée en chaînes hypothétiques ayant leur longueur en fonction des forces d'interaction entre les particules et de la contrainte de cisaillement. »

L'équation de Casson ne devrait pas être valable pour des suspensions très concentrées en ce sens qu'elle ne tient pas compte des interactions entre les chaînes. Il a été insatisfaisamment appliqué aux pâtes de ciment par Atzeni et al. (Papo, 1988)

#### 1.4.3.5 Le modèle Robertson-Stiff

$$\tau = A(B + \dot{\gamma})^C \quad (\text{Eq I-8}) \text{ (Banfill, 2006)}$$

Ce modèle semble être très flexible en ce sens que les constantes A et C sont semblables aux paramètres de la loi de puissance, alors que B est de la nature d'un terme de correction du contrainte de cisaillement Binghamian.

Lorsque  $C = 1$ , l'équation Eq I-8 devient l'équation de Bingham :  $\tau = AB + A\dot{\gamma}$  ( $\tau_0 = AB$  et  $\mu = A$ ).

Lorsque  $B = 0$ , il devient, au contraire, le modèle de loi de puissance :  $\tau = A\dot{\gamma}^C$

Selon «Jones et Taylor», cette équation semble être supérieure à celle de Herschel-Bulkley pour les données sur les suspensions de ciment. De plus, on a constaté que la constante « C » était lié au rapport E/C. (Papo, 1988)

#### 1.4.3.6 Le modèle De-Kee

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma} e^{-\alpha \dot{\gamma}} \quad (\text{Eq I-9}) \text{ (Yahia \& Khayat, 2001)}$$

Où  $\tau_0$  et  $\mu$  sont la valeur de seuil de cisaillement et la Viscosité plastique, respectivement, et  $\alpha$  est un paramètre dépendant du temps. (Yahia & Khayat, 2001)

#### 1.4.3.7 Le modèle Yahia-Khayat

$$\tau = \tau_0 + 2\sqrt{\tau_0 + \mu} + \sqrt{\mu \dot{\gamma} e^{-\alpha \dot{\gamma}}} \quad (\text{Eq I-10}) \text{ (Yahia \& Khayat, 2001)}$$

Où  $\tau_0$  et  $\mu$  sont la valeur de seuil de cisaillement et la Viscosité plastique, respectivement, et  $\alpha$  est un paramètre dépendant du temps. (Yahia & Khayat, 2001)

## 1.5 RHEOMETRES

### 1.5.1 Définition

Les rhéomètres sont des appareils utilisés pour déterminer le comportement rhéologique des matériaux. On divise généralement les rhéomètres en trois grandes classes :

- Rhéomètres à régime permanent (type Couette, type Poiseuille) qui permettent de déterminer les caractéristiques en écoulement des substances liquides.
- Rhéomètres à régime transitoire qui permettent de déterminer les caractéristiques viscoélastiques des substances liquides ainsi que des solides.
- Rhéomètres à régime dynamique (sinusoïdal) qui permettent de déterminer de manière très complète les caractéristiques rhéologiques, y compris des propriétés en régime d'écoulement et des propriétés viscoélastiques de matériaux liquides ou solides.

## 1.5.2 Types des rhéomètres

### 1.5.2.1 *Rhéomètres agitateurs-malaxeurs*

Le premier rhéomètre à bétons fut créé en 1987, il s'agit du Two-point-test. Cet appareil est en fait un malaxeur instrumenté qui permet de déterminer la relation entre le couple de malaxage et la vitesse de rotation de la pale. (Adjoudj, 2015)

### 1.5.2.2 *Rhéomètres avec disques parallèles ou plan-plan*

Dans une telle géométrie, le matériau est confiné entre deux disques circulaires de même rayons  $R$ , écartés d'une distance  $h$  (gap ou entrefer) et dont les centres sont alignés sur un même axe. Le disque inférieur étant fixe, l'écoulement est généré dans cette géométrie par la rotation du disque supérieur. (Fall, 2008)

### 1.5.2.3 *Rhéomètres à cylindres coaxiaux*

C'est un rhéomètre à cylindres coaxiaux. Le cylindre intérieur est fixe tandis que le cylindre extérieur tourne autour de l'axe à une vitesse angulaire fixe. Les cylindres sont munis de redans parallèles à leur axe. Cette configuration permet une meilleure adhérence du matériau aux outils et limite le glissement à la surface des cylindres. La géométrie de ce rhéomètre permet de développer facilement les équations et de déterminer les paramètres rhéologiques en unités fondamentales. Le pilotage (vitesse de rotation, protocole opératoire), l'acquisition des résultats de mesures (couple et vitesse de rotation) et le calcul des résultats bruts sont entièrement automatisés et réalisés en temps réel à l'aide d'un logiciel spécifique. (Adjoudj, 2015)

La géométrie se compose de deux cylindres coaxiaux : un cylindre interne de rayon  $R_i$  et une cuve de rayon  $R_o$  avec une hauteur  $H$  Fig 1-4. Le matériau est donc confiné entre un mobile fixe (la cuve) et un mobile tournant (cylindre interne). L'écoulement est généré par la rotation du cylindre interne. Un papier de verre est placé sur la cuve afin d'éviter les phénomènes de glissement. La rugosité du papier est équivalente ou supérieure aux tailles caractéristiques des particules les plus grosses. On appelle entrefer la différence entre  $R_o$  et  $R_i$ .

Le cylindre interne est souvent remplacé par un croisillon, aussi appelé outil vane. Il permet de minimiser le glissement du matériau à l'interface de la géométrie en créant un cylindre fictif avec une rugosité de la taille des particules. (Hafid, 2012)

Toutefois, lorsque la cellule de Couette présente un faible entrefer, c'est-à-dire que  $R_o - R_i \ll R_i$ , on peut confondre le comportement macroscopique donné par le rhéomètre avec les comportements rhéologiques locaux non Newtoniens. (Roussel, 2012)

On peut alors développer les équations ci-dessus au premier ordre :

- $\tau = \frac{M}{2\pi H R_i^2}$  (Eq I-11) (Roussel, 2012)
- $\dot{\gamma} = \Omega \frac{R_o^2}{R(R_o - R_i)}$  (Eq I-12) (Roussel, 2012)

Parmi ces différents types d'appareils, les rhéomètres à régime permanent de type Couette (cisaillement de la substance entre deux surfaces solides, l'une au repos, l'autre mobile) restent les plus utilisés. Ils fonctionnent en contrainte, déformation ou vitesse imposée, et les systèmes de mesure existent en différentes géométries. Le choix de la géométrie dépend des caractéristiques des particules dans la suspension, essentiellement de la taille des plus grosses entre elles et des gammes de taux de cisaillement à appliquer. Ces dernières sont en fonction de la technique de mise en œuvre à utiliser. (Hoang, 2015)

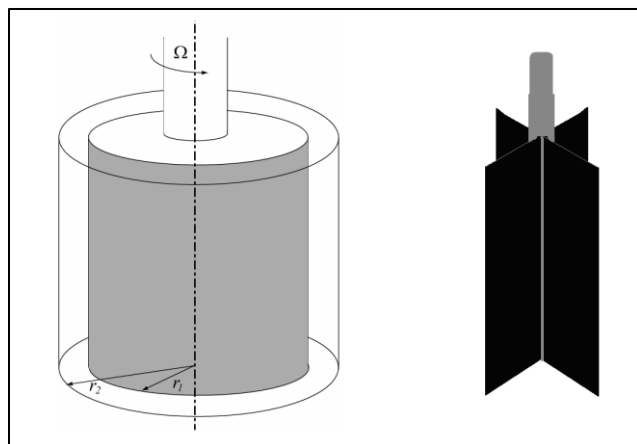


Figure I-4 Représentation schématique d'une cellule de Couette et d'un outil vane

## Chapitre II. MATERIAUX, MATERIELS ET METHODES

---

### II.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons parler des différents matériaux (sable, ciment et granulats) utilisés dans l'étude expérimentale et les procédures d'essais réalisés au niveau du laboratoire de génie civil (pédagogique) et Laboratoire de Recherche de Génie Civil (LRGC) de L'Université Ammar Telidji de Laghouat.

De plus, nous présentons le rhéomètre (Heidolph- RZR 2102 Control Z) utilisé dans cette étude et les procédures d'essai relatifs à ce rhéomètre. Et enfin nous parlerons des outils de développement de logiciel d'acquisition proposé.

### II.2 MATERIAUX

#### II.2.1 Eau

L'eau est un constituant à part entière des matériaux cimentaires. Elle intervient tout au long de la durée de vie du matériau cimentaire et conditionne les propriétés mécaniques et physico-chimiques ainsi que la durabilité. Le rôle de l'eau est double, structurer une suspension granulaire homogène et stable lors du transport et de la mise en œuvre, servir de milieu réactionnel et de consommable pour la formation des hydrates. Le rapport Eau/Ciment est très souvent employé pour décrire les formulations. (Chalencou, 2010)

#### II.2.2 Ciment

Le Ciment Portland Artificiel (CPA) est une matière première élaborée à partir de clinker (environ 95%) et de gypse (environ 5%) qui permet de régulariser la prise. Le clinker est issu de la cuisson à très haute température (1450°C), de calcaire et d'argile en proportion massique d'environ 80 % et 20 % respectivement. Cette cuisson donne naissance aux constituants du clinker, silicates de calcium ( $C_3S$  et  $C_2S$ ) et aluminates ( $C_3A$  et  $C_4AF$ ). Ces phases sont des polyèdres de tailles microscopiques qui peuvent s'agglomérer en flocons de 50  $\mu m$  à 100  $\mu m$ . Après mélange homogène avec de

l'eau, une suspension granulaire concentrée qui peut se mettre en forme est obtenue. Peu à peu la formation des hydrates permet de passer d'une phase liquide continue à un squelette granulaire lié. (Chalencon, 2010)

### II.2.3 Granulats

Les granulats constituent le squelette inerte du béton. Ils sont agglomérés par le liant pour former une « pierre artificielle » ; ils confèrent ainsi au béton sa compacité et participent à sa résistance mécanique.

Pour que le squelette soit le plus compact et le plus durable possible, il est nécessaire que les granulats satisfassent à des exigences tant au niveau de leur nature minéralogique qu'au niveau des techniques de fabrication (taille, forme, rugosité). Cependant, pour obtenir une ouvrabilité correcte, une courbe granulométrique continue est plutôt recherchée. Le but de la granulométrie est donc de remplir les trous entre les gros granulats, par d'autres granulats de plus petit diamètre c'est-à-dire de sélectionner la quantité de granulats de chaque dimension pour optimiser le remplissage et minimiser la quantité de ciment. (Benaïcha, 2013)

### II.2.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits organiques naturels, synthétiques ou recyclés qui associent souvent de multiples composants. Par définition, ils apportent une « aide » pour obtenir des propriétés, telles que l'adhérence, la rhéologie, le maintien de rhéologie, la prise accélérée, la cohésion, la durabilité au gel-dégel. L'adjuvant est un produit incorporé en faibles doses : < 5 % par rapport à la masse de ciment (A/C). Chaque adjuvant est caractérisé par des fonctions principales, des effets secondaires parfois néfastes, et des incompatibilités. (Chalencon, 2010)

### II.2.5 Essais de caractérisation des matériaux utilisés

#### II.2.5.1 Méthodes et procédures d'essais

Plusieurs essais ont été réalisés sur les matériaux (ciment et granulats). Les principaux essais sont :

Masse volumique spécifique, surface spécifique Blaine, analyse granulométrique du sable, coefficient d'absorption du sable, analyse chimique et minéralogique.

### II.2.5.2 Masse volumique spécifique

Nous avons effectué la méthode du pycnomètre de Le Chatelier pour la mesure des masses volumiques du ciment. Les équipements nécessaires à la réalisation sont :

- Un pycnomètre d'une contenance minimale 25 cm<sup>3</sup>
- Un liquide qui ne doit pas être réactif avec le clinker, par exemple le benzène.
- Une balance d'une précision adaptée à la grandeur de masse de l'échantillon utilisé.
- Un thermomètre précis à 0.1 permettant de connaître la température du laboratoire.



Figure II-1Équipement nécessaire de l'essai.

Quant au cas du sable, nous avons utilisé la méthode de l'éprouvette graduée. La masse volumique absolue est la masse par unité de volume d'un matériau (tout vide déduit) est donnée selon la norme NFP 18-555 par la relation suivante :

$$\rho = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

- $M$  : Masse des granulats (kg) ;
- $V_1$  : Volume d'eau (m<sup>3</sup>) ;
- $V_2$  : Volume totale (eau +granulats) (m<sup>3</sup>)

### II.2.5.3 Surface spécifique Blaine

Il s'agit de la surface spécifique mesurée par la méthode de Blaine, appelée finesse. Cette technique exploite la perméabilité d'un lit d'une poudre compacté dans une cellule de mesure (la technique de mesure repose sur deux principe : une porosité constante ou une masse constante)

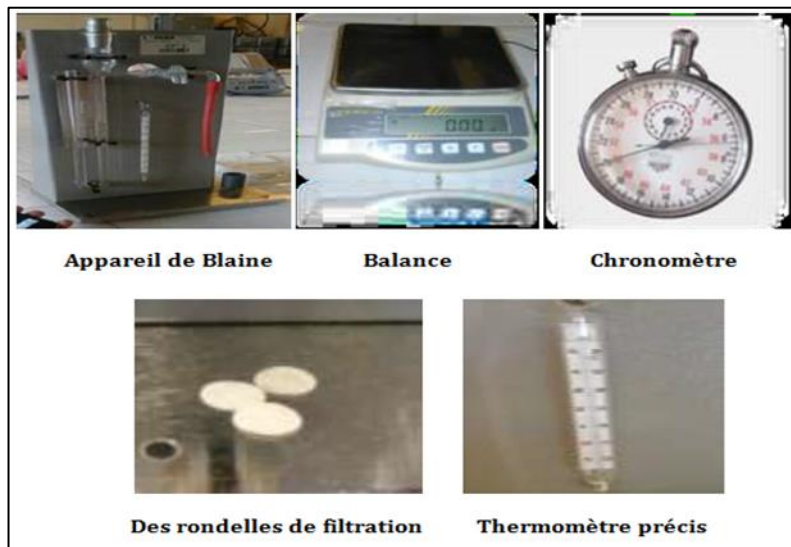


Figure II-2 Equipement nécessaire de l'essai perméabilité Blaine.

Le schéma d'un perméabilimètre Blaine est donné par la Figure II-3. Les mesures effectuées pour l'étude ont utilisé une porosité du lit de poudre  $e=0,58$ . La masse de poudre ajoutée pour les essais est calculée grâce à la relation au-dessus en fonction des paramètres géométriques de la cellule de mesure.

Le temps nécessaire à un volume d'air pour passer à travers la couche de poudre est fonction de la surface développée par celle-ci. La surface peut être déterminée grâce à la relation de dessous

$$S_p = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\sqrt{e^3}}{1-e} \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta}}$$

- $K$  : La constante de l'appareil.
- $\eta$  : La viscosité de l'air à la température de l'essai.
- $t$  : Temps mesuré en seconde.

- $e$  : La porosité.
- $\rho$  : Masse volumique absolue.

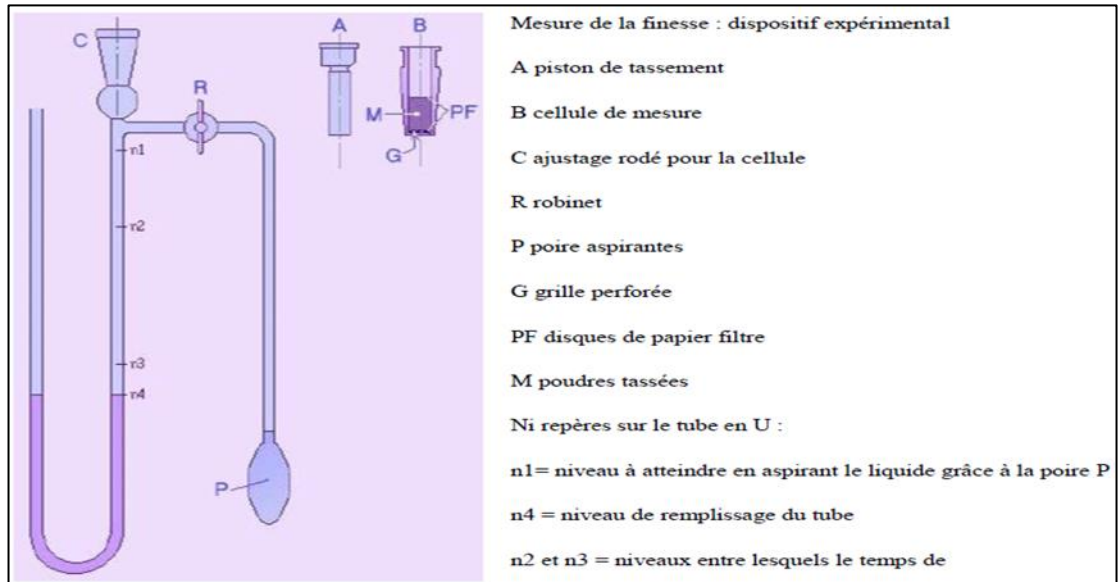


Figure II-3 Schéma d'un perméabilimètre de Blaine à mesure manuelle

La constante d'appareil,  $K$ , est mesurée grâce à l'étalonnage de l'appareil, utilisant un échantillon de poudre de finesse connue (étalant).

#### II.2.5.4 Essai d'équivalent de sable

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution floculant, après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment ( $H_1$ ) et du sédiment + floculant ( $H_2$ ), selon la norme NF P 18-598 (Figure II- 4). L'équivalent de sable est donné par les relations ci-dessous.

$$ESv = \frac{h_2}{h_1} \times 100\% \quad ES_p = \frac{h_2}{h_1} \times 100\%$$

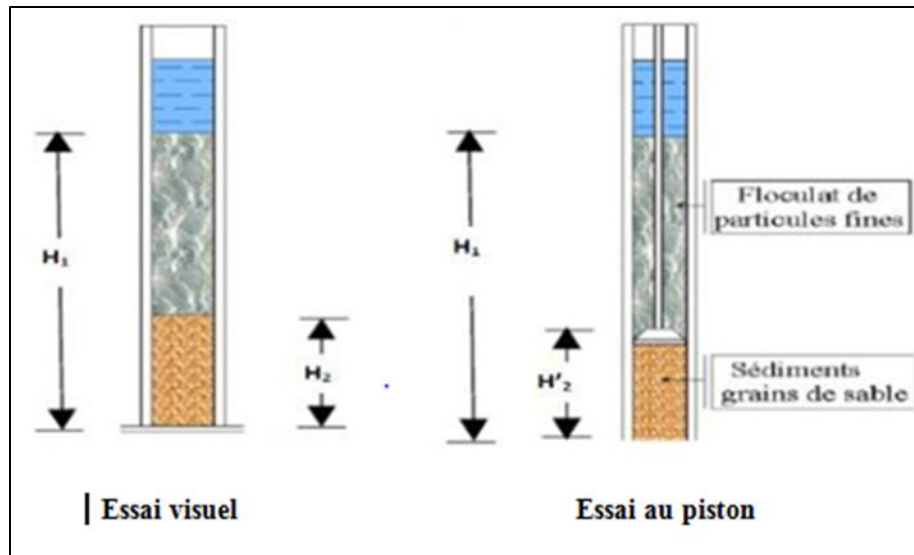


Figure II-4 Essai d'équivalente de sable

### II.2.5.5 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de déterminer et d'observer les différents diamètres de grains qui constituent un granulat. Pour cela l'analyse consiste à séparer et classer à l'aide de tamis ces grains selon leur diamètre. Les grains ainsi isolés peuvent être pesés pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de l'analyse permet d'observer et d'exploiter ces informations très simplement. Les manipulations et les conditions de manipulation sont décrites par la norme NF EN 933- 1. Elle concerne les granulats d'un diamètre supérieur à 80 micromètres (0.08mm).

Le refus désigne la partie des grains retenue dans un tamis. Le refus cumulé représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré (les grains du tamis considéré plus les grains bloqués dans les tamis de mailles supérieures). Le tamisât ou passant désigne la partie qui traverse le tamis.

Les masses cumulées des différents refus sont exprimées en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon de granulat. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités soit numériquement soit graphiquement. Cela permet d'observer la proportion de refus cumulé ou de tamisats jusqu'à un diamètre de grain par rapport au granulat. (La représentation graphique est plus explicite).

A partir de l'analyse granulométrique on peut déduire le module de finesse de sable qui définit comme le 1/100 de la somme des refus exprimés en pourcentage sur les différents tamis de la série suivante : 0.16 ; 0.315 ; 0.63 ; 1.25 ; 2.5 ; 5.

$$M_f = \frac{\sum \text{des refus sur les tamis}\%}{100}$$

#### II.2.5.6 Mesure du coefficient d'absorption des sables (NF P 18-555)

a) But de la mesure

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

b) Principe de la mesure

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

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

- Ms masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 C° ;
- Ma masse de l'échantillon imbibé,

c) Conduite de l'essai

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

non absorbante, et en le compactant légèrement. On vérifie que celui-ci s'écoule en démoulant (Figure II.5).

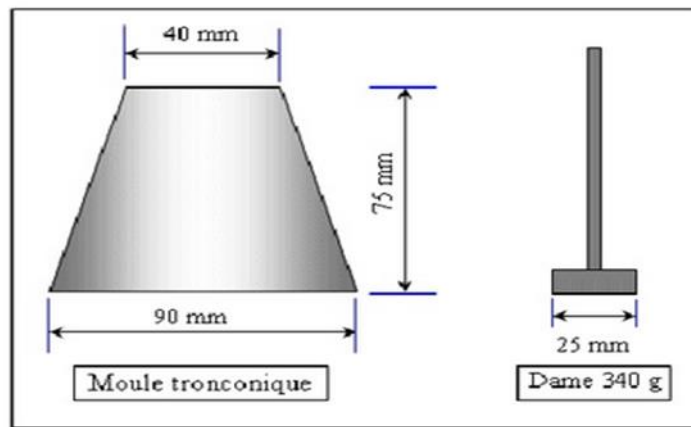


Figure II-5 Moule et dame pour coefficient d'absorption

La Capacité d'absorption d'eau de sable utilisé est égale : 1.77 %.

#### II.2.5.7 Essai de Prise

L'essai de prise du liant est un essai en laboratoire qui consiste à déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des mortiers et des bétons.

La présence de régulateur de prise dans la masse des liants hydrauliques offre à ces derniers, après gâchage, une prise qui commence après une période bien déterminée. Il est donc nécessaire de connaître la phase de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre des mortiers et des bétons dont ils sont confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'appareil de Vicat (EN 196-3).

#### d) Principe de l'essai

L'essai consiste à suivre l'évolution de l'épaississement d'une pâte de consistance normalisée : l'appareil utilisé est l'appareil de Vicat équipé d'une Aiguille de 1.13 mm de diamètre. Quand l'aiguille s'arrête à une distance  $d$ , du fond du moule telle que :  $d = 4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , On dit que le début de prise est atteint. Ce moment, mesuré à partir du début du malaxage est appelé "Temps de début de prise" Le temps de fin de prise est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm.

e) Equipement nécessaire

- L'essai doit se dérouler dans une salle dont la température est de  $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$  et dont l'humidité relative soit supérieure à 90%. A défaut d'une telle humidité relative, l'échantillon testé pourra entre deux mesures être entreposé dans de l'eau maintenue à  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
- Malaxeur à mortier normalisé.
- Appareil de Vicat équipé d'une aiguille de 1.13 mm.

## II.2.6 Résultats des essais de caractérisation des matériaux

### II.2.6.1 Ciment

Le Ciment utilisé dans notre travail est un ciment de type CEMI 42.5 CRS (SPA BISKIA CIMENT). (Figure II-6) C'est un ciment résistant aux sulfates, constitué de 95% à 100% de clinker et de 0 à 5% de calcaire, avec une résistance à court terme ordinaire.



Figure II-6 Sac de ciment nous utilisé.

Les exigences chimiques et minéralogiques du ciment utilisé sont données par le Tableau II-1 et

Tableau II-2 Tableau II-2 respectivement.

Tableau II-1 Exigences chimiques.

<b>La proportion de la magnésie (M<sub>g</sub>O) dans le ciment</b>	<b>4%</b>
<b>La teneur en (SO<sub>3</sub>)</b>	<b>2.3%</b>
<b>La teneur en (CL)</b>	<b>0.028%</b>
<b>La perte au feu</b>	<b>2.75%</b>
<b>Le résidu insoluble</b>	<b>0.75%</b>

Tableau II-2 Exigences minéralogiques.

<b>La teneur en C<sub>3</sub>S en</b>	<b>62%</b>
<b>La teneur en C<sub>3</sub>A en</b>	<b>1.5%</b>
<b>La teneur en C<sub>2</sub>S</b>	<b>13%</b>
<b>La teneur en C<sub>4</sub>AF</b>	<b>17%</b>

Les résultats des essais de caractérisation physique du ciment sont récapitulés dans le Tableau II-3 suivant :

Tableau II-3 Résultats d'essais de caractérisation de ciment

<b>Essai</b>	<b>Résultat</b>
<b>Masse volumique spécifique, g/cm<sup>3</sup></b>	3.1
<b>Surface spécifique Blaine, cm<sup>2</sup>/g</b>	3420
<b>Consistance normalisée, %</b>	25.7
<b>Début de prise, min</b>	180
<b>Expansion à chaud, mm</b>	0.5

### II.2.6.2 Sable

Le sable utilisé dans notre travail est le sable alluvionnaire de la région de Laghouat.

L'analyse granulométrique du sable utilisé est donnée par le Tableau II-4 suivant et représenté graphiquement par la Figure II-7, suivante.

Tableau II-4 Analyse granulométrique pour de sable alluvionnaire utilisé.

<b>Tamis (mm)</b>	<b>5</b>	<b>2.5</b>	<b>1.25</b>	<b>0.63</b>	<b>0.315</b>	<b>0.16</b>	<b>0.08</b>	<b>Font</b>
<b>Passants (%)</b>	100	97.9	95.3	83.5	34	4.5	1	0

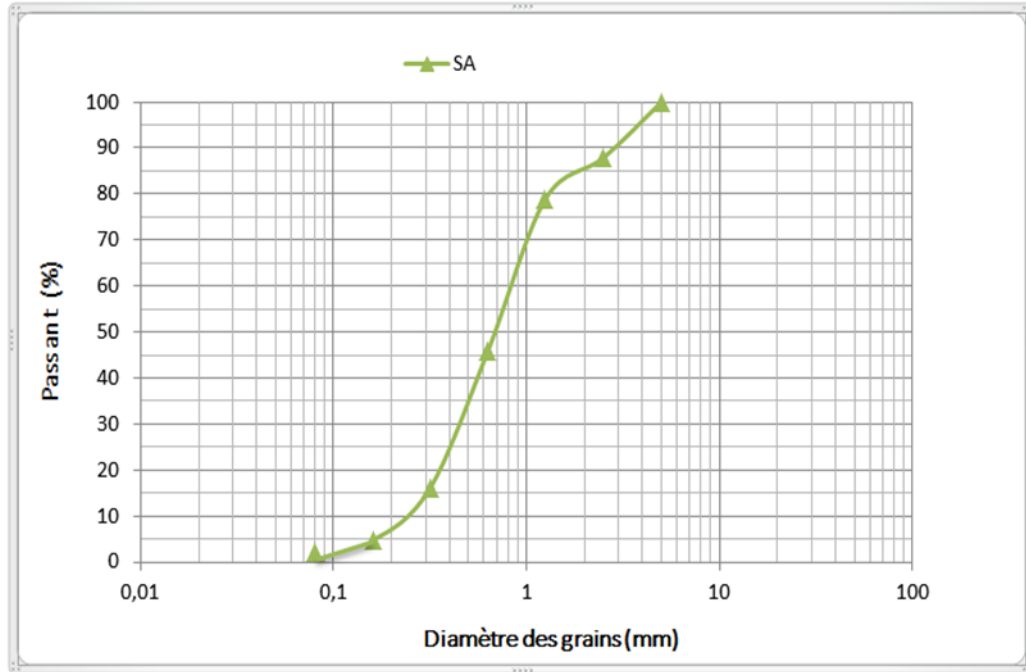


Figure II-7 Courbe granulométrique de sable utilisé.

Et on a aussi les résultats suivants :

Tableau II-5 Propriétés physiques de sable

<b>Granulat</b>	<b>Sable</b>
<b>Coefficient d'absorption (%)</b>	1.39
<b>Masse volumique Absolue (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2.69
<b>Equivalent du sable (%)</b>	71
<b>Modèle de finesse</b>	1.85

On constate que le sable utilisé est un sable fin et d'une propreté acceptable.

### II.2.6.3 Granulats

Deux gros granulats de classes différentes ont été utilisés, gravier 3/8 et gravier 8/15 de type concassé et de nature calcaire. La provenance des granulats est la région de Laghouat. Les propriétés physiques de ces granulats sont récapitulées dans le Tableau II-6.

Tableau II-6 Propriétés physiques des granulats.

Granulat	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Coefficient d'absorption	1,56	2,26
Masse volumique Absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2610	2540
Masse volumique Apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1390	1300
Teneur en eau (%)	0,17	0,13
Équivalent du sable (%)	/	/
Dureté du gravier (%)	25.5	25

#### II.2.6.4 L'eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette partie expérimentale est l'eau de robinet de laboratoire de département de Génie civil de Laghouat.

#### II.2.6.5 Superplastifiant

Le superplastifiant utilisé tout au long de cette étude est un superplastifiant haut réducteur d'eau de la troisième génération Medaflow 30. Cet adjuvant, qui a été fournie par la société Granitex (Alger-Algérie), est conçu à base de polycarboxylates qui améliorent considérablement les propriétés des bétons à l'état frais et à l'état durci. Le superplastifiant Medaflow 30 est un liquide de couleur jaunâtre, de pH égal à 6 et de densité de 1,07. L'extrait sec de cet adjuvant représente 30% de sa quantité.

### II.2.7 Formulation

La formulation du béton est une étape très importante dans le but d'obtenir un béton ouvrable, résistant et durable. En général, la formulation du béton dépend des caractéristiques souhaitées à l'état frais et à l'état durci. La formulation des bétons conventionnels dépend de deux caractéristiques qui sont choisies préalablement : La consistance souhaitée et de la résistance caractéristique (à 28 jours). Pour les BAP, la formulation semble plus complexe, puisque les BAP possèdent des propriétés spécifiques et contradictoires à l'état frais : une grande déformabilité, une grande capacité de passage et une grande résistance à la ségrégation. Ces propriétés doivent être en balance pour obtenir un bon BAP.

Grace à l'évolution du BAP à travers le monde, de nombreuses méthodes de formulation ont été publiées. La méthode de formulation qui sera utilisée dans le présent travail est la méthode basée sur les recommandations de l'Association Française de Génie Civil (AFGC).

## II.3 MATERIELS

### II.3.1 Rhéomètre Heidolph- RZR 2102 Control Z

#### II.3.1.1 Définition

Pour déterminer, expérimentalement, le comportement rhéologique des mortiers, on a utilisé un rhéomètre rotatif ; Heidolph - RZR 2102 Control Z. Ce rhéomètre présenté sur la Figure II-8 est composé d'un agitateur avec deux vitesses de rotation, un croisillon composé de deux plaques perpendiculaires de dimensions 5 x 10 (mortier) et 10.5 x 12.5 cm (béton) et d'un récipient cylindrique de dimensions 12 x 15 cm (mortier) et 30 x 30 cm (béton). Le schéma de Figure II-12 récapitule le fonctionnement de ce rhéomètre avec un système d'acquisition des données sur ordinateur. Le rhéomètre Heidolph- RZR 2102 Control Z peut fonctionner en imposant des taux de cisaillement appliqués sur le mortier d'où on obtient les contraintes de cisaillement. A partir de la courbe qui représente les contraintes de cisaillement en fonction des taux de cisaillement, on peut déterminer le comportement rhéologique de chaque mortier. Le Heidolph- RZR 2102 Control Z est piloté avec un logiciel à l'aide d'un ordinateur. Ensuite, il faut régler la température manuellement et la garder constante pour tous les essais. (Adjoudj, 2015)



Figure II-8 Rhéomètre



Figure II-9 Agitateur



Figure II-10 Croisillon



Figure II-11 Récipient.

### II.3.1.2 Logiciel

La société Heidolph fournit un logiciel pour contrôler le rhéomètre, il s'appelle "Hei-Control Software". Le «Hei-Control Software» fournit les services suivants :

- Définir et sécuriser les paramètres de processus individuels.
- Enregistrer et lire les cycles de processus.
- Régler une minuterie.

- Contrôlez jusqu'à quatre appareils simultanément. (Heidolph Instruments, s.d.)

Le logiciel peut contrôler l'agitateur et lire les résultats ou même temps, les résultats sont le moment (en N.mm) et la vitesse (en rpm). Le logiciel peut aussi exporter ces résultats comme un fichier Excel.

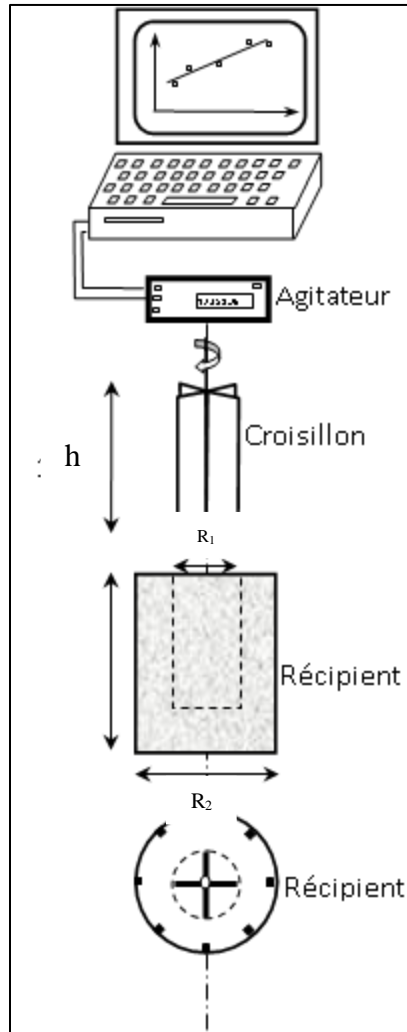


Figure II-12 Schéma descriptif du rhéomètre

## II.4 METHODES

### II.4.1 Essai au rhéomètre

Le rhéomètre utilisé est un rhéomètre de type Couette développé par l'équipe de recherche de l'université de Cergy Pontoise (Adjoudj, 2015). Ce type est

généralement considéré comme étant le mieux adapté pour des suspensions concentrées possédant un seuil de cisaillement. Le principe consiste à mettre en rotation, à différentes vitesses, un cylindre ou une pale dans un échantillon cylindrique de béton ou mortier frais et de mesurer le couple appliqué. (Adjoudj, 2015)

Après la mesure de l'affaissement, on verse le matériau préparé (béton ou mortier) dans le récipient qui sera fixé pour éviter tout mouvement. Ensuite, on fait descendre le croisillon au centre du récipient qui pénètre au centre du matériau. Il faut s'assurer que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arasé du matériau. A l'aide du logiciel et l'essai rhéométrique, on démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié. On démarre la rotation du croisillon en suivant un profil de vitesse approprié.

### *II.4.1.1 Profil de vitesse imposée.*

Le profil de vitesse utilisé est choisi sur la base d'une série d'essai qui consiste à trouver le profil de vitesse permettant d'avoir les mesures les plus stables en minimisant le phénomène de ségrégation. Le profil utilisé doit avoir suffisamment de points pour pouvoir bien caractériser le comportement du mortier. Les paliers de vitesse imposés doivent être espacés pour bien distinguer les différentes paires ( $\Omega$ ,  $M$ ). La Figure II-13 illustre le profil choisi pour le déroulement des essais. (Adjoudj, 2015)

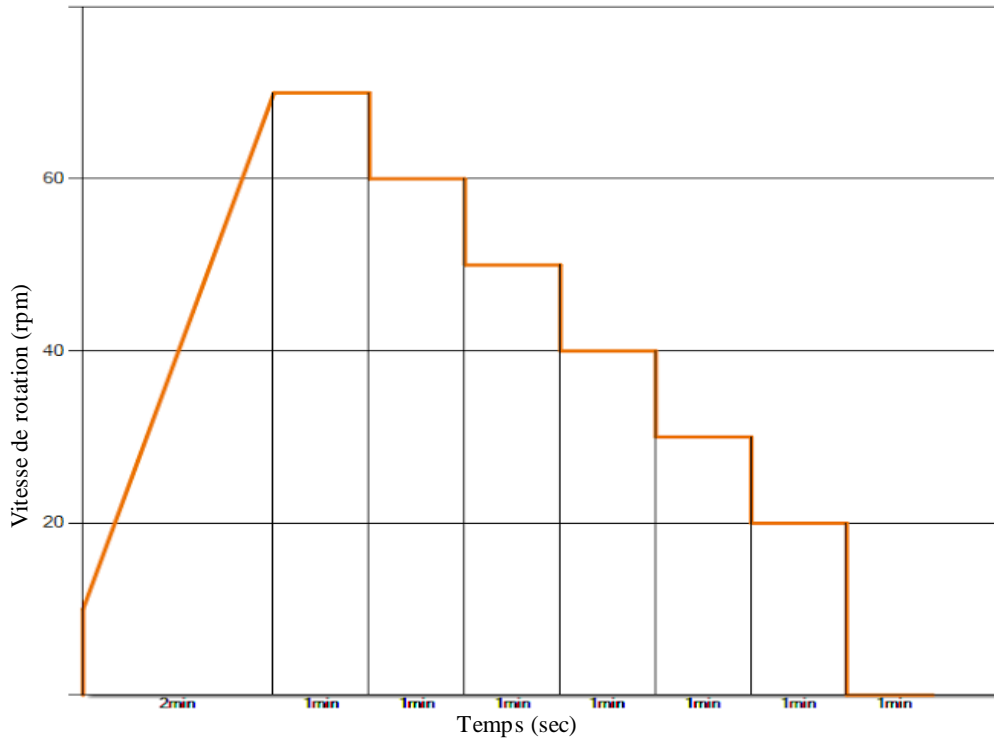


Figure II-13 Profil de vitesse

#### II.4.1.2 Déroulement de l'essai

Afin d'étudier le comportement rhéologiques des différents mortiers, on a utilisé un rhéomètre en suivant les étapes suivantes :

1<sup>ère</sup> étape : avant la réalisation des essais, il faut faire chauffer le rhéomètre en le faisant fonctionner suffisamment à la vitesse maximale de 400 tours/min.

2<sup>ème</sup> étape : mesurer ensuite les couples à vide ( $M_{vide}$ ) correspondant aux vitesses imposées selon le profil présenté sur la Figure II-8.

3<sup>ème</sup> étape : remplir le mortier jusqu'à l'arase du récipient et piquer 15 fois avec une tige à piquage du matériau ; mettre en place et centrer le croisillon de sorte que l'extrémité supérieure des ailes du croisillon se situe à l'arase du récipient ; mesurer les couples totaux correspondants aux vitesses imposées ( $M_{total}$ ).

4<sup>ème</sup> étape : exploiter les mesures des couples ( $M$ ) en fonction de vitesse imposée. Les couples  $M$  sont obtenus en faisant la différence entre  $M_{total}$  et  $M_{vide}$ . (Adjoudj, 2015)

## II.4.2 LANGAGE UTILISE POUR LA PROGRAMMATION

Pour développer le logiciel, nous avons besoin de nombreux outils, en tant que langage de programmation, environnement de développement intégré et bibliothèques mathématiques.

Pour ce travail, nous avons choisi le langage de programmation *C#*, "Visual Studio Community" et la bibliothèque "Math.Net".

### II.4.2.1 Définition du langage *C#*

Le langage *C#* (C Sharp) est un langage objet créé spécialement pour le framework Microsoft .NET. L'équipe qui a créé ce langage a été dirigée par Anders Hejlsberg, un informaticien danois qui avait également été à l'origine de la conception du langage Delphi pour la société Borland (évolution objet du langage Pascal).

Le Framework .NET est un environnement d'exécution (CLR Common Language Runtime) ainsi qu'une bibliothèque de classes (plus de 2000 classes). L'environnement d'exécution (CLR) de .NET est une machine.

Le runtime fournit des services aux programmes qui s'exécutent sous son contrôle : chargement/exécution, isolation des programmes, vérification des types, conversion code intermédiaire (IL) vers code natif, accès aux métadonnées (informations sur le code contenu dans les assemblages .NET), vérification des accès mémoire (évite les accès en dehors de la zone allouée au programme), gestion de la mémoire (Garbage Collector), gestion des exceptions et adaptation aux caractéristiques nationales (langue, représentation des nombres).

Les classes .NET peuvent être utilisées par tous les langages prenant en charge l'architecture .NET. Les langages .NET doivent satisfaire certaines spécifications : utiliser les mêmes types CTS (Common Type System), les compilateurs doivent générer un même code intermédiaire appelé MSIL (Microsoft Intermediate Language). (Cottenceau, 2012-2013)

#### II.4.2.2 Environnement de développement Visual Studio 2013

Visual Studio est un ensemble complet d'outils de développement pour la construction d'applications. La partie la plus importante est l'environnement («IDE : environnement de développement intégré»), qui permet l'écriture de code et la conception d'interface graphique.

Visual Studio est créé et publié par Microsoft. Il existe de nombreuses versions pour les entreprises, les professionnels et les étudiants (Visual Studio Community). (Microsoft, s.d.)

Dans ce projet, nous avons utilisé « Visual Studio Community ».

Visual Studio est livré avec les concepteurs de GUI attendus, le support d'extraits de code, les outils de manipulation de base de données, les utilitaires de navigation d'objets et de projet et un système d'aide intégré. Contrairement à beaucoup d'IDE que nous avons déjà examiné, Visual Studio offre de nombreux ajouts. Voici une liste partielle :

- Editeurs / concepteurs Visual.
- Prise en charge du développement de Microsoft Office
- Support intégré pour la refactorisation de code.
- Outils de concepteur de classe visuelle. (Troelsen, 2010)

#### II.4.2.3 Bibliothèque numérique Math.Net

"Math.NET Numerics" est une bibliothèque open source pour C #, qui fournit des méthodes et des algorithmes pour les calculs numériques en sciences, ingénierie et utilisation quotidienne. Les sujets couverts comprennent des fonctions spéciales, l'algèbre linéaire, les modèles de probabilité, les nombres aléatoires, l'interpolation, l'intégration, la régression, les problèmes d'optimisation et plus encore. (Math.NET Numerics Official website, s.d.)

Cette bibliothèque permet d'optimiser les opérations mathématiques pour des précisions maximales, notamment en régression linéaire.

#### II.4.2.4 Travailler avec C#

#### II.4.2.5 Types primitifs du C# (alias de types .NET)

Le framework .NET fournit les types utilisables, et ce quel que soit le langage utilisé (VB.NET, C#, C++.NET). Dans C#, les types élémentaires sont nommés comme suit :

- **char** : caractère Unicode 16bits,
- **sbyte/byte** : entier 8 bits signé/non signé,
- **short/ushort** : entier 16 bits signé/non signé,
- **int/uint** : entier 32 bits signé/non signé,
- **long/ulong** : entier 64 bits signé/non signé,
- **float** : flottant 32 bits,
- **double** : flottant 64 bits,
- **decimal** (128 bits) : entier multiplié par une puissance de 10,
- **string** : chaîne de caractères. Type référence qui s'utilise comme un type valeur. (Cottenceau, 2012-2013)

#### II.4.2.6 Classes et structs

Les classes et structs sont deux des constructions de base du système de type commun dans le .NET Framework. Chacun est en substance une structure de données qui encapsule un ensemble de données et de comportements constituant une unité logique. Les données et comportements sont les membres de la classe ou du struct, et ils incluent ses méthodes, propriétés, événements, etc., comme indiqué plus loin dans cette rubrique.

Une déclaration de classe ou de struct est comme un plan utilisé pour créer des instances ou des objets au moment de l'exécution. Si vous définissez une classe ou un struct nommé Person, Person est le nom du type. (Microsoft, s.d.)

#### II.4.2.7 Méthodes et fonctions

Une méthode est un bloc de code qui contient une série d'instructions. Un programme provoque l'exécution des instructions en appelant la méthode et en

spécifiant les éventuels arguments de méthode requis. En C#, chaque instruction exécutée est effectuée dans le contexte d'une méthode.

Les méthodes sont déclarées dans une `classe` ou un `struct` en spécifiant le niveau d'accès, comme `public` ou `private`, des modificateurs facultatifs, comme `abstract` ou `sealed`, la valeur de retour, le nom de la méthode et les éventuels paramètres de la méthode. Ces parties forment ensemble la signature de la méthode.

Les paramètres de méthode sont placés entre parenthèses et séparés par des virgules. Des parenthèses vides indiquent que la méthode ne requiert aucun paramètre.

L'appel d'une méthode sur un objet revient à accéder à un champ. Après le nom de l'objet, ajoutez un point, le nom de la méthode et les parenthèses. Les arguments sont répertoriés entre les parenthèses et séparés par des virgules. (Microsoft, s.d.)

### *11.4.2.8 Tableau (array)*

En informatique, un tableau (array en anglais) est une structure de données qui consiste en un ensemble d'éléments ordonnés accessibles par leur indice (ou index). C'est une structure de données de base que l'on retrouve dans chaque langage de programmation. (Microsoft, s.d.)

## Chapitre III. DEVELOPPEMENT DU LOGICIEL

### III.1 INTRODUCTION

Le calcul des paramètres rhéologiques n'est pas une tâche facile. Il existe de nombreuses méthodes et procédures pour aider à faire cette tâche, et dans ce chapitre, nous présentons les méthodes que nous avons utilisées.

### III.2 DONNEES DE L'ESSAI

#### III.2.1 Les données d'après le logiciel « Hei-Control Software »

Le logiciel « Hei-Control Software » enregistre les valeurs de couple (M) et de vitesse ( $\Omega$ ) à chaque seconde. Ces valeurs peuvent être enregistrées en tant que fichier Excel.

Tableau III-1 Exemple d'un fichier d'essai

Time [hh:mm:ss]	Set speed [rpm]	Real Speed	Torque[Nmm]
00:00:00	10	0	0
00:00:01	11	0	0
00:00:02	10	0	0
00:00:03	12	0	0
00:00:04	12	0	0
00:00:05	13	0	0
00:00:06	13	0	0
00:00:07	14	0	0
00:00:08	14	0	0
00:00:09	15	0	0
00:00:10	15	0	9
00:00:11	16	1	340
00:00:12	16	6	1727
00:00:13	17	10	2088
00:00:14	17	10	888
00:00:15	18	10	888
00:00:16	18	10	375
00:00:17	19	10	339
00:00:18	19	10	339
00:00:19	20	10	264
00:00:20	20	10	194

### III.2.2 Traitement préliminaire des données

Avant de commencer le traitement des données du fichier Excel, nous devons faire ce qui suit :

1. Supprimer les données inutiles (time, set speed) et conserver uniquement les valeurs de vitesse et de couple.
2. Calculer la moyenne des valeurs de couple pour des valeurs de vitesse similaires.
3. Enregistrer les nouvelles données dans un nouveau fichier texte (.txt).

### III.2.3 Traitement de données initiales

Lorsque le logiciel importe les données du fichier « .txt », il doit transformer les valeurs de vitesse en taux de cisaillement et les valeurs de couple en contrainte de cisaillement.

Le logiciel donne à l'utilisateur deux choix pour les méthodes de transformation des données :

#### III.2.3.1 Méthode présentée par Lanos & Estelle

D'après cette méthode la relation contrainte-vitesse de cisaillement dans une géométrie Couette est établie en considérant localement le fluide en écoulement comme étant un fluide de Bingham. Pour un tel fluide, l'expression de la vitesse de cisaillement dépend du régime d'écoulement dans l'entrefer. Ainsi, la vitesse de cisaillement s'exprime par les équations (Eq III-1) et (Eq III-2), lorsque respectivement le fluide est partiellement cisailé, complètement cisailé dans l'entrefer. (Lanos & Estelle, 2009)

- $\dot{\gamma} = 2M \frac{d\Omega}{dM}$  (Eq III-1)

- $\dot{\gamma} = 2 \frac{M \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_1^2}{R_2^2}\right)} - \frac{\Omega - M \frac{d\Omega}{dM}}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}$  (Eq III-2)

Où  $R_1$  et  $h$  désignent le rayon et la hauteur du cylindre interne, et  $R_2$  est le rayon externe.  $\Omega$  et  $M$  représentent respectivement la vitesse de rotation du cylindre interne et son couple.

Le principe de maximisation de la dissipation d'énergie au sein de l'écoulement permet de distinguer la vitesse de cisaillement caractéristique entre les équations (Eq III-1) et (Eq III-2), sans une évaluation préalable du seuil d'écoulement du matériau lorsque celui-ci en possède un. Ainsi à partir d'une rampe croissante et/ou décroissante en vitesse de rotation  $\Omega_j$ , on peut calculer la vitesse de cisaillement, ainsi que la contrainte correspondante à partir de l'équation (Eq III-3). (Lanos & Estelle, 2009)

$$\tau = \frac{(\tau_j + \tau_{j-1})}{2} \quad (\text{Eq III-3})$$

$$\text{Avec } \tau_j(M) = \frac{M_j}{2\pi H R_b^2} \quad (\text{Eq III-4})$$

Notons que la dérivée  $\frac{d\Omega}{dM}$  est simplement approchée par  $\frac{\Omega_j - \Omega_{j-1}}{M_j - M_{j-1}}$

### III.2.3.2 Méthode classique

Cette méthode a été déjà présente dans le chapitre I.5.2.3, avec les équations suivantes :

$$\tau = \frac{M}{2\pi H R_1^2} \quad (\text{Eq III-4}) \quad (\text{Roussel, 2012})$$

$$\dot{\gamma} = \Omega \frac{R_2^2}{R(R_1 - R_2)} \quad (\text{Eq III-5}) \quad (\text{Roussel, 2012})$$

Les valeurs de  $(\dot{\gamma})$  et  $(\tau)$  seront enregistrées dans deux tableau (Arrays) « shearRate » et « shearStress » respectivement.

On peut résumer cette étape par l'organigramme suivant :

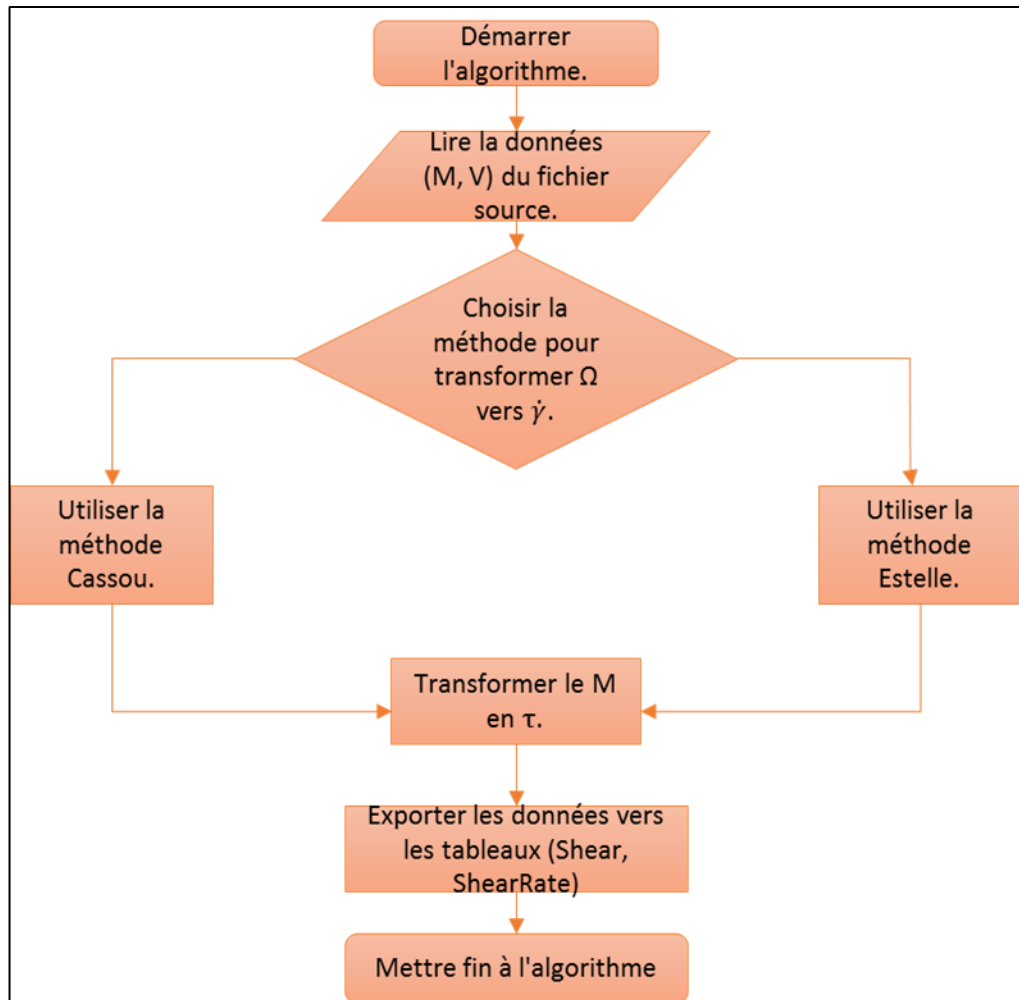


Figure III-1 Organigramme de traitement de données initiales

### III.3 DEVELOPPEMENT DES SOLUTIONS NUMERIQUES POUR LES MODELES RHEOLOGIQUES

Les modèles sont développés par « **méthode des moindres carrés** ».

#### III.3.1 Bingham

Le modèle Bingham ( $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}$ ) est le modèle le plus simple, de sorte que les paramètres rhéologiques peuvent être calculés par régression linéaire, pour cette tâche, nous avons utilisé la bibliothèque Math.Net pour une régression linéaire optimisée.

La méthode responsable de cette action, calcul aussi le coefficient de détermination  $R^2$  pour vérifier l'ajustement des données par l'équation :

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_u)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (\text{Eq III-6})$$

- $y_i$  : les valeurs des mesures,
- $\hat{y}_i$  : les valeurs prédites,
- $\bar{y}_i$  : la moyenne des mesures.

L'algorithme de calcul est présenté dans l'organigramme suivant :

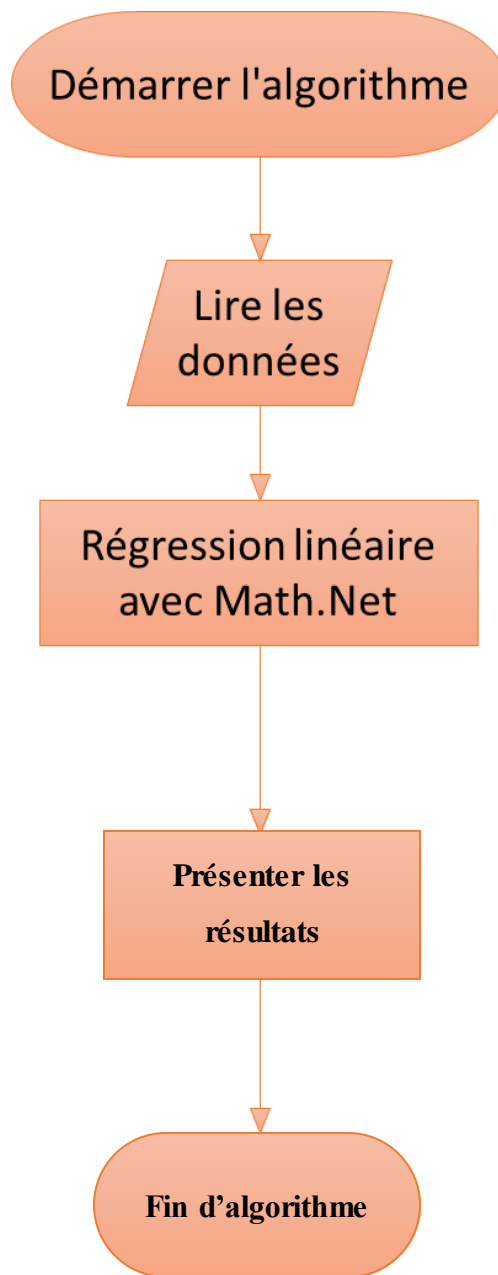


Figure III-2 Algorithme du modèle Bingham

### III.3.2 Bingham Modifiée

Le modèle Bingham modifié ( $\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} + c\dot{\gamma}^2$ ), est un modèle polynomiale, de sorte que les paramètres rhéologiques peuvent être calculés par régression polynomiale, pour cette tâche, nous avons utilisé la bibliothèque Math.Net pour une régression linéaire optimisée.

On va calculer aussi le  $R^2$  pour vérifier l'ajustement des données. Les résultats sont :  $\tau_0$ ,  $\mu$ ,  $c$ , et  $R^2$ . L'algorithme de calcul est présenté dans l'organigramme suivant :

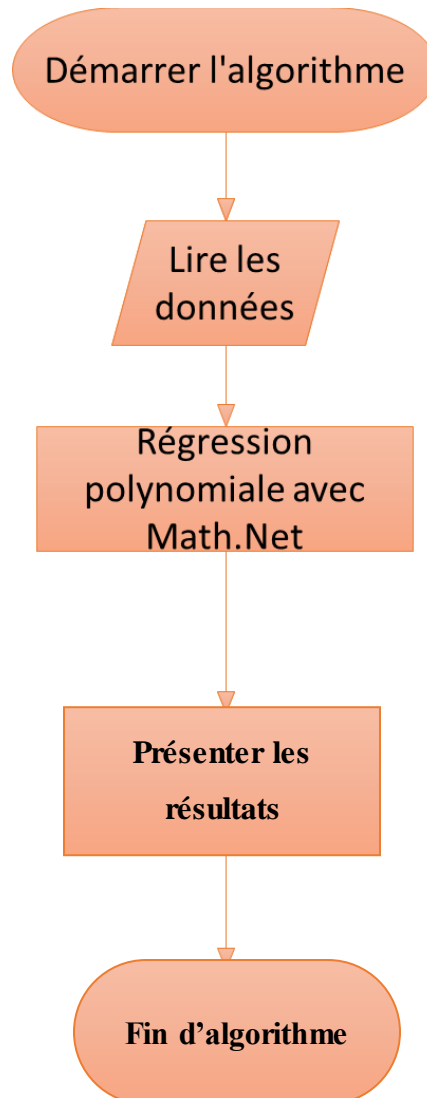


Figure III-3 Algorithme de modèle Bingham modifié

### III.3.3 Herschel-Bulkley

Ce modèle n'est pas linéaire, alors on doit trouver une autre équation linéaire avec les mêmes paramètres.

$$\text{On a : } \tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \Rightarrow \tau - \tau_0 = K\dot{\gamma}^n$$

$$\text{Alors : } \ln(\tau - \tau_0) = \ln(k) + n \ln(\dot{\gamma}) \quad (\text{Eq III-7})$$

Pour travailler avec cette équation, on doit créer un tableau « TauZeroTableau » pour les valeurs possible de  $\tau_0$  ; on commence par 0.0 à  $i = 0$  ; jusqu'à la valeur expérimentale minimale dans le tableau « shearStress » (le tableau des valeurs de  $\tau$  de l'essai).

Avec le remplacement de  $\tau_0$  par itération on va avoir une équation linéaire de la façon  $y = ax + b$  à chaque valeur de  $\tau_{0i}$  ; tel que

- $y = \tau - \tau_0$ ,
- $x = \ln(\dot{\gamma})$ ,
- $a = n$
- $b = \ln(k)$

Après ça on fait une régression linéaire pour chaque valeur  $\tau_{0i}$ , et déterminer les paramètres a et b, et calculer les paramètres rhéologique k et n avec :  $k_i = e^a$  et  $n_i = b$ .

Il faut maintenant calculer  $SCR_i$  (somme des carrés résiduels) de chaque étape avec Eq III-7, et enregistrer les valeurs dans un autre tableau (Array) « SCRTTableau ».

$$SCR = \sum(y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (\text{Eq III-8})$$

Tel que :

$y_j$  : C'est la valeur réelle qu'on a trouvé dans l'essai,

$\hat{y}_j$  : C'est la valeur qu'on a trouvé par calcul.

Dans le meilleur des cas,  $SCR_i = 0$ . Mais dans les cas réels  $SCR$  n'est jamais égale à 0. Pour ça on va déterminer « i » l'indice de la valeur  $SCR$  minimale dans le tableau  $SCRTableau$ , parce que c'est le même indice de  $\tau_0$  optimale dans  $TauZeroTableau$  qu'on doit utiliser.

Enfin, on doit remplacer  $\tau_0$  par la valeur nouvelle dans Eq III-7, et faire une dernière régression linéaire pour trouver k et n optimale.

On va calculer aussi le  $R^2$  pour vérifier l'ajustement des données. Les résultats sont :  $\tau_0$ , K, n, et  $R^2$ .

```
public static (double Tau0, double K, double N, double DeltaMin, double RSquared) HerschelBulkleyModel(double[] shear, double[] shearRate, double step = 1000.0)
{
    // Calculate the number values from 0.0 to Shear.Min;
    var sm = (int) Math.Floor(shear.Min() * step);
    // Populate the Array of Tau0 with the values from 0 to sm
    var tau0Tableau = Enumerable.Range(0, sm).Select(t => t / step).ToArray();
    var kTableau = new double[sm];
    var nTableau = new double[sm];
    var SCRTTableau = new double[sm];
    var rSquaredFull = new double[sm];
    var shearRateLn = shearRate.Select(s => Math.Log(s)).ToArray();
    for (var i = 0; i < sm; i++)
    {
        var shearLn = shear.Select(s => Math.Log(s - tau0Tableau[i])).ToArray();
        var param = Fit.Line(shearRateLn, shearLn);
        kTableau[i] = Math.Exp(param.Item1);
        nTableau[i] = param.Item2;
        var shearHerschel =
            shearRate.Select(sr => HerschelBulkley(sr, tau0Tableau[i], kTableau[i], nTableau[i])).ToArray();
        SCRTTableau[i] = Distance.SSD(shearHerschel, shear);
        rSquaredFull[i] = GoodnessOfFit.RSquared(shearHerschel, shear);
    }
    var deltaMin = SCRTTableau.Min();
    var index = Array.IndexOf(SCRTTableau, deltaMin);
    var tau0 = tau0Tableau[index];
    var k = kTableau[index];
    var n = nTableau[index];
    var rSquared = rSquaredFull[index];
    return (tau0, k, n, deltaMin, rSquared);
}
```

Figure III-4 Code d'algorithme

### III.3.4 Casson

Pout le model de Casson ( $\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu\dot{\gamma}}$ ) on a remplacé  $\sqrt{\tau}$  par y, et  $\sqrt{\dot{\gamma}}$  par x ; alors on a l'équation suivante :

$$y = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu}x \Rightarrow y = ax + b$$

Avec :

- $\sqrt{\mu} = a$
- $\sqrt{\tau_0} = b$

On va maintenant calculer a et b par régression linéaire, et on peut maintenant trouver les paramétrés rhéologiques par :

- $\mu = a^2$
- $\tau_0 = b^2$

On va calculer aussi le  $R^2$  pour vérifier l'ajustement des données. Les résultats sont :  $\tau_0, \mu$ , et  $R^2$ . Les étapes du calculs sont simplifiées dans l'organigramme suivant :

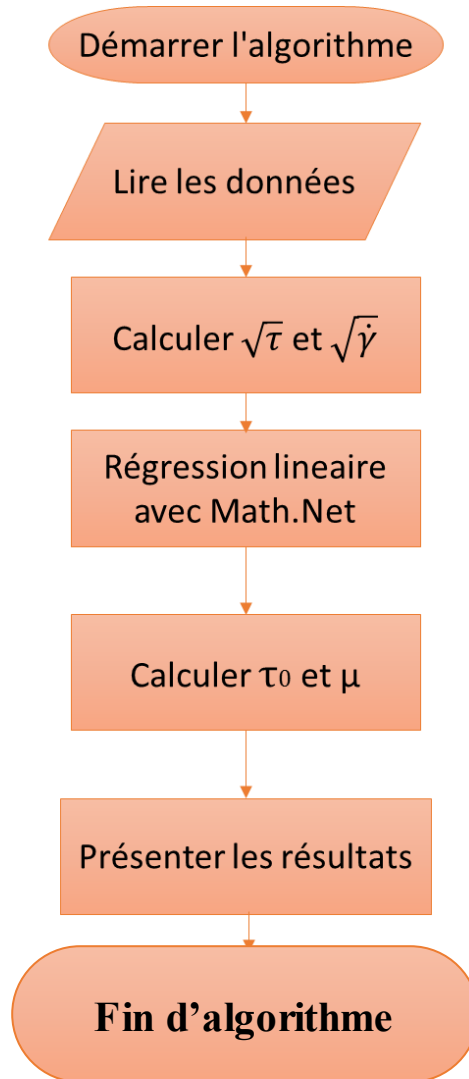


Figure III-5 Algorithme de modèle Casson

### III.3.5 Robertson-Stiff

Le modèle Robertson-Stidd ( $\tau = A(B + \dot{\gamma})^C$ ), est un modèle similaire à la loi de puissance, mais il faut calculer le paramètre B.

On remarque que les paramètres de ce mode sont les mêmes de l'équation suivante  $\log(\tau) = \log(A) + C \times \log(B + \dot{\gamma})$  (Eq III-9)

Pour déterminer la valeur initiale de  $B_0$ , on utilise la méthode suivante (Blick, 1989) :

- On doit calculer  $\bar{\tau} = \sqrt{\tau_{min} \times \tau_{max}}$
- Après ça on va déterminer la valeur  $\bar{\gamma}$  qui est équivalent à  $\bar{\tau}$  par polarisation linéaire.
- Maintenant on calcule la valeur  $B_0 = \frac{\gamma_{max} \times \gamma_{min} - \bar{\gamma}^2}{\bar{\gamma} - \gamma_{max} - \gamma_{min}}$

Après ça on va choisir un intervalle initial tel que  $B_0$  va être au milieu de ce intervalle.

Avec le remplacement de  $B$  par itération on va avoir une équation linéaire de la façon  $y = ax + b$  à chaque valeur de  $B_i$  ; tel que

- $y = \log \tau$ ,
- $x = \ln(\dot{\gamma} + B_i)$ ,
- $a = C$
- $b = \ln(A)$

Après ça on fait une régression linéaire pour chaque valeur  $B_i$ , et déterminer les paramètres  $a$  et  $b$ , et calculer les paramètres rhéologique  $A$  et  $C$  avec :  $A_i = e^a$  et  $C_i = b$ .

Il faut maintenant calculer  $SCR_i$  (somme des carrés résiduels) de chaque étape avec Eq III-10, et enregistrer les valeurs dans un autre tableau (Array) « SCRTTableau ».

$$SCR = \sum (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (\text{Eq III-10})$$

Tel que :

- $y_j$  : C'est la valeur réelle qu'on a trouvé dans l'essai,
- $\hat{y}_j$  : C'est la valeur qu'on a trouvé par calcul.

Dans le meilleur des cas,  $SCR_i = 0$ . Mais dans les cas réels SCR n'est jamais égale à 0. Pour ça on va déterminer « i » l'indice de la valeur SCR minimale dans le tableau SCRTableau, parce que c'est le même indice de B optimale dans BTableau qu'on doit utiliser.

Enfin, on doit remplacer B par la valeur nouvelle dans Eq III-10, et faire une dernière régression linéaire pour trouver A et C optimale.

On va calculer aussi le  $R^2$  pour vérifier l'ajustement des données. Les résultats sont : B, A, C, et  $R^2$ .

```
public static (double A, double B, double C, double Tau0, double DeltaMin, double RSquared) RobertsonStiffModel(double[] shear, double[] shearRate, double step = 1000.0)
{
    var tauBar = Math.Sqrt(shear.Max() * shear.Min());
    var linearParam = BinghamModel(shear, shearRate);
    var gammaBar = (tauBar - linearParam.Tau0) / linearParam.Mu;
    var b0 = (shearRate.Min() * shearRate.Max() - Math.Pow(gammaBar, 2.0)) / (2.0 * gammaBar - shearRate.Min() - shearRate.Max());
    var sm = Math.Abs((int) Math.Ceiling(b0 * 2.0 * step));
    var bTableau = Enumerable.Range(0, sm).Select(bf => bf / step).ToArray();
    var aTableau = new double[sm];
    var cTableau = new double[sm];
    var SCRTableau = new double[sm];
    var rSquaredFull = new double[sm];
    for (var i = 0; i < sm; i++)
    {
        var shearLn = shear.Select(t => Math.Log(t)).ToArray();
        var shearRateLn = shearRate.Select(g => Math.Log(g + bTableau[i])).ToArray();
        var param = Fit.Line(shearRateLn, shearLn);
        aTableau[i] = Math.Exp(param.Item1);
        cTableau[i] = param.Item2;
        var shearRobertson = shearRate.Select(sr => RobertsonStiff(sr, aTableau[i], bTableau[i], cTableau[i])).ToArray();
        SCRTableau[i] = Distance.SSD(shearRobertson, shear);
        rSquaredFull[i] = GoodnessOfFit.RSquared(shearRobertson, shear);
    }
    var deltaMin = SCRTableau.Min();
    var index = Array.IndexOf(SCRTableau, deltaMin);
    var a = aTableau[index];
    var b = bTableau[index];
    var c = cTableau[index];
    var tau0 = a * Math.Pow(b, c);
    var rSquared = rSquaredFull[index];
    return (a, b, c, tau0, deltaMin, rSquared);
}
```

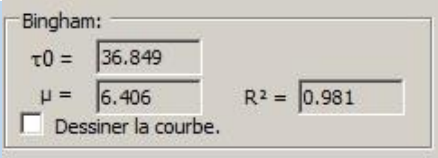
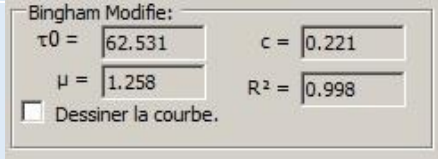
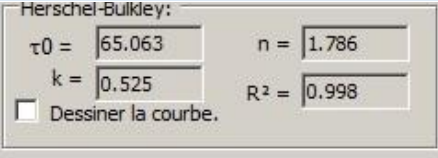
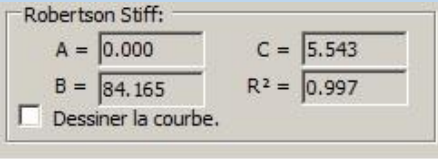
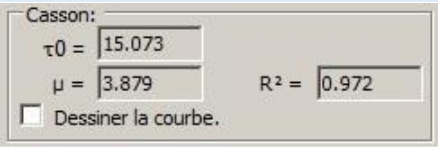
Figure III-6 Code d'algorithme

### III.4 RESULTATS

Les résultats de ce logiciel sont présentés dans deux façons différentes,

#### III.4.1 Présentation numérique

Dans la fenêtre principale de logiciel on a des boites qui représentent les résultats. Dans ces boites on trouve les paramètres rhéologiques issus de différents modèles. Par exemple, pour un béton testé nous avons trouvé les résultats suivants :

Modèles	Exemple	valeurs
<b>Bingham</b>		$\tau_0$ , $\mu$ et $R^2$
<b>Bingham Modifie</b>		$\tau_0$ , $\mu$ , $c$ et $R^2$
<b>Herschel-Bulkley</b>		$\tau_0$ , $K$ , $n$ et $R^2$
<b>Robertson-Stiff</b>		$A$ , $B$ , $C$ et $R^2$
<b>Casson</b>		$\tau_0$ , $\mu$ et $R^2$

#### III.4.2 Présentation visuelle

Le logiciel représente aussi les résultats par des courbes, et chaque modèle avec différentes couleurs :

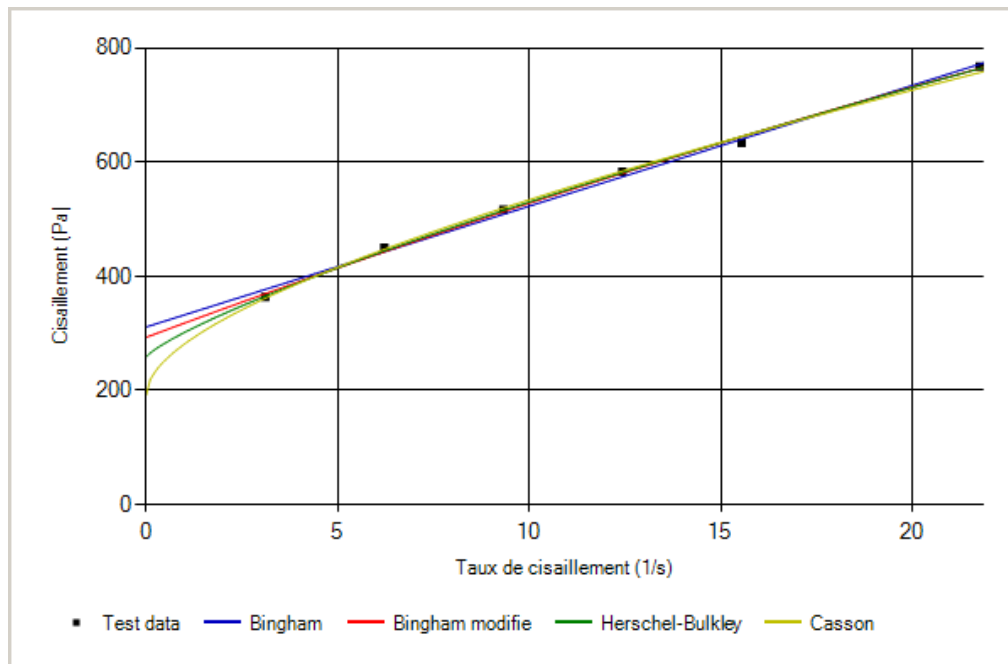


Figure III-7 Les courbes

## Chapitre IV. VALIDATION DU LOGICIEL

### IV.1 INTRODUCTION

Après le développement des solutions numériques pour les modèles rhéologiques, nous devons les essayer. Dans ce chapitre, nous essayons le logiciel de deux façons différentes, d'abord avec les résultats d'autres chercheurs, puis avec les résultats des essais effectués dans le laboratoire

### IV.2 COMPARAISON DES RESULTATS

Pour valider les résultats de notre logiciel « RheoGraph », on a utilisé les données des tests d'autres chercheurs qui ont utilisé le même type d'agitateur ou bien un agitateur similaire.

#### IV.2.1 Comparaison avec les résultats d'Adjoudj

Adjoudj a travaillé dans sa thèse de doctorat sur l'effet des additions minérales sur la rhéologie des mortiers autoplacants, et il a utilisé le même agitateur que le nôtre ; et pour obtenir les valeurs des cisaillements et les taux de cisaillement, il a utilisé la méthode de Lanos & Estelle (Adjoudj, 2015).

Les valeurs de l'essai de rhéologie d'un mortier d'après Adjouj sont données dans le tableau suivant :

*Tableau IV-1 Les résultats d'Adjoudj*

<b><math>\Omega</math> (rad/s)</b>	<b>M (N.m)</b>
26.91	0.074
23.77	0.069
20.63	0.064
17.49	0.059
14.35	0.054
11.21	0.049
8.06	0.044
4.92	0.039
1.78	0.034
0.00	0.031

Et après la régression linéaire de ces valeurs ; Adjoudj a trouvé les valeurs suivants pour les paramètres rhéologique, selon le modèle Binghamien :

- $\tau_0 = 7.62 \text{ Pa}$
- $\mu = 2.01 \text{ s}^{-1}$

On a pris les valeurs de  $\Omega$  et  $M$ . l'introduction de ces résultats dans notre logiciel a donné les résultats suivants :

- $\tau_0 = 8.485 \text{ Pa}$
- $\mu = 1.993 \text{ s}^{-1}$

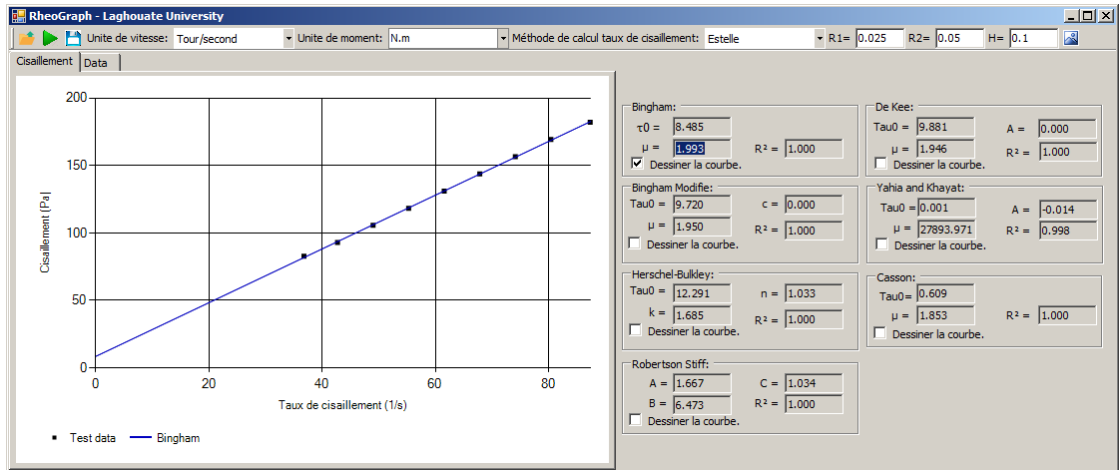


Figure IV-1 Résultats d'essai d'Adjoudj selon RhéoGraph

Pour vérifier, on a calculé la variation entre les deux résultats (Tableau suivant) :

Tableau IV-2 Comparaison des résultats avec Adjoudj

	Adjoudj	RheoGraph	Variation
$\tau_0$	7.62	8.485	11.35%
$\mu$	2.01	1.993	0.85%

D'après ce tableau, on peut dire que les résultats sont satisfaisants et que la variation est acceptable dans ce type d'essai.

#### IV.2.2 Comparaison avec les résultats de Soualhi, et al.

Soualhi et al, ont utilisé un agitateur similaire à notre rhéomètre, ils ont travaillé dans un article très récent sur le comportement rhéologique des bétons ordinaires

fluides ; et pour obtenir les valeurs des paramètres rhéologiques seuil de cisaillement et viscosité, ils ont utilisé la méthode de Reiner-Riwlin (Hamza Soualhi, et al., 2016)

La première comparaison a été faite sur les résultats des essais rhéologiques sur un béton ordinaire BO1 (3 essais), et on a trouvé les résultats représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV-3 Les résultats des essais rhéologiques sur BO1

		BO1-1	BO1-2	BO1-3	Moyen	Variation	Corrélation (R <sup>2</sup> )
$\tau_0$	Soualhi	402.000	554.000	427.000	461.000	28.03%	99.4
	RheoGraph	609.769	697.539	614.389	640.566		
$\mu$	Soualhi	23.000	19.000	22.000	21.333	52.76%	97.1
	RheoGraph	38.709	58.063	38.709	45.160		

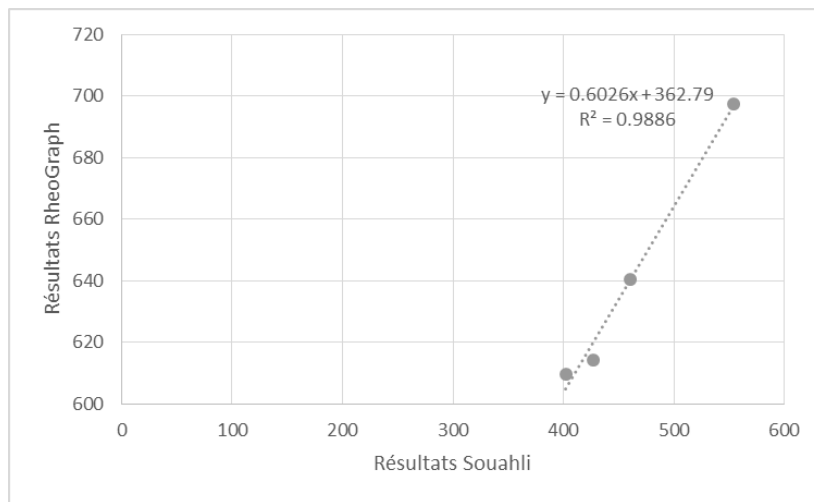


Figure IV-2 Correlation des résultats de  $\tau_0$  de Soualhi en fonction des résultats de RheoGraph

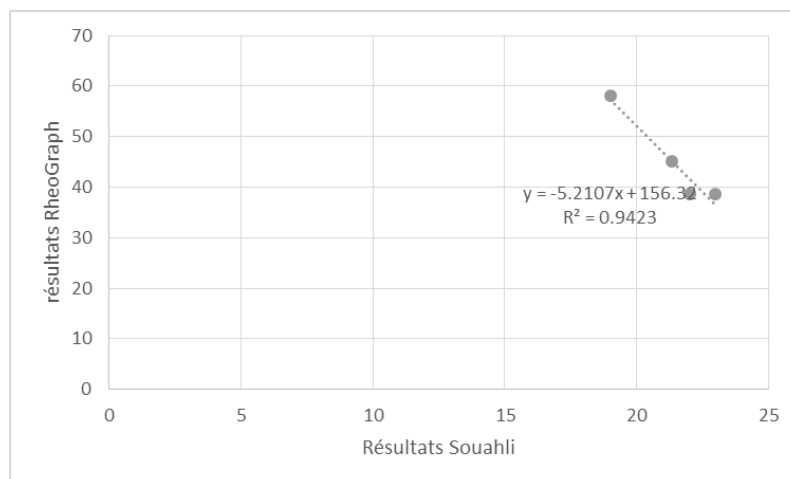


Figure IV-3 correlation des résultats de  $\mu$  de Soualhi en fonction des résultats de RheoGraph

On remarque que la variation des valeurs de seuil de cisaillement a été moyenne, et on peut dire qu'elle est acceptable pour ce genre d'essai. Mais la variation dans des valeurs de viscosités est plus grande.

La deuxième comparaison a été avec les résultats des essais rhéologiques sur un béton ordinaire BO2, ils sont 3 essais, et on a trouvé les résultats suivants :

Tableau IV-4 Les résultats des essais rhéologiques sur BO2

		BO2-1	BO2-2	BO2-3	Moyen	Variation	Corrélation (R2)
<b>Tau</b>	Soualhi	248.000	273.000	464.000	328.333	40.60%	99.3036
	RheoGraph	471.185	517.380	669.822	552.796		
<b>μ</b>	Soualhi	78.000	84.000	63.000	75.000	24.22%	99.222
	RheoGraph	96.772	84.000	116.126	98.966		

On remarque que la variation des valeurs de seuil de cisaillement a été plus grande que les valeurs de BO1, et on peut dire qu'elle est acceptable pour ce genre d'essai. Mais la variation dans des valeurs de viscosités est moyenne et peut être suffisante.

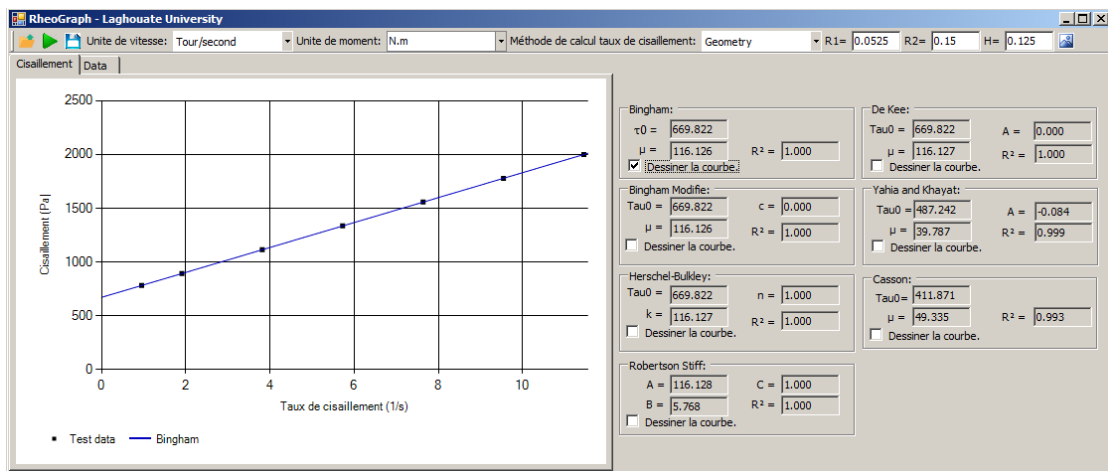


Figure IV-4 résultats d'essai de Soualhi, et al.

### IV.3 APPLICATION DE LOGICIEL SUR DES ESSAIS REALISES AU LABORATOIRE

Pour essayer les résultats de ce logiciel on a aussi fait quelques essais sur les mortiers et les bétons auto-plaçant, préparés aux laboratoires de génie civil.

### IV.3.1 Essais sur mortiers autoplaçants

On a fait un essai de rhéologie sur le mortier. Le mortier est obtenu par tamisage du mélange 5 dans Tableau IV-6 ci-après. Les résultats de caractérisation rhéologiques ont donné les valeurs suivantes :

Tableau IV-5 Résultats de mortier

Mélange	Bingham		Bingham modifié			Herschel-Bulkley			Casson		Robertson-Stiff		
	$\tau_0$	$\mu$	$\tau_0$	$\mu$	c	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	$\mu$	A	B	C
Mortier	9.45	5.683	-10.48	10.147	-0.214	0.000	8.616	0.888	1.110	5.037	8.616	0.000	0.888

### IV.3.2 Essais sur béton auto-plaçant

On a les résultats de quelques essais sur le béton auto plaçant :

Tableau IV-6 Compositions des bétons auto-plaçant

Mélanges	3,8/8,15 (%)	G/S (%)	MP (%)	E/C (%)	SP (%)
5	18.89	0.8	20.28	39.056	0.84
6	18.89	1.2	4.72	35.94	0.96
7	18.89	1.2	4.72	39.056	0.84
10	50	0.67	12.5	37.498	0.9

Les résultats sont :

Tableau IV-7 Résultats de bétons auto plaçant

Mélange	Bingham		Bingham modifié			Herschel-Bulkley			Casson		Robertson-Stiff		
	$\tau_0$	$\mu$	$\tau_0$	$\mu$	c	$\tau_0$	K	n	$\tau_0$	$\mu$	A	B	C
BAP5	44.13	11.01	74.73	4.88	0.26	81.33	2.11	1.51	14.28	7.59	0.01	28.58	2.61
BAP6	207.94	28.55	293.21	11.45	0.73	303.93	5.40	1.51	93.41	16.09	0.01	50.72	3.32
BAP7	35.38	9.27	86.02	-0.87	0.43	80.86	0.40	2.00	12.19	6.24	0.001	95.41	6.93
BAP10	36.84	6.40	62.53	1.25	0.22	65.06	0.52	1.78	15.0	3.87	0.01	84.1	5.54

### IV.3.3 Commentaire

Les résultats trouvés sont généralement logiques et en accord avec les intervalles proposées par d'autres chercheurs (Banfill, 2006).

## CONCLUSION GENERALE

---

Dans notre travail, nous avons essayé d'établir une application pour exploiter les informations de base (couple et vitesse de rotation) issues de l'agitateur de type Heidolph RZR-2102, afin de trouver le modèle qui convient au comportement rhéologique des bétons et mortiers à l'état frais.

Nous avons acquis les connaissances nécessaires de la littérature sur le sujet de la rhéologie et de rhéométrie et nous avons également présenté les outils nécessaires pour développer le logiciel proposé (C#, Visual Studio, ..).

Et finalement nous avons validé les résultats obtenus par notre logiciel, en comparant les résultats de différents auteurs qui ont travaillé avec le même type d'agitateur, et c'était très satisfaisant en général.

Nous pensons que le projet est très important et nous avons réussi de mettre un premier pas pour l'exploitation optimale de l'agitateur de type Heidolph RZR-2102.

Toutefois, nous recommandons le développement de notre application, pour qu'elle prenne en considération d'autres phénomènes dans la rhéologie des matériaux cimentaires tel que la thixotropie, la stabilité...etc.

## RECOMMANDATIONS

Nous donnons aussi les recommandations suivantes :

- Garder le projet en vie en soutenant son développement,
- Faites d'autres tests sur différents types de béton, de mortier et d'autres matériaux cimentaires, afin de construire une base de données sur leur comportement rhéologique.

# ANNEXES

## UTILISER VISUAL STUDIO

Le logiciel s'ouvre sur la page de démarrage de Visual Studio Express 2013 :

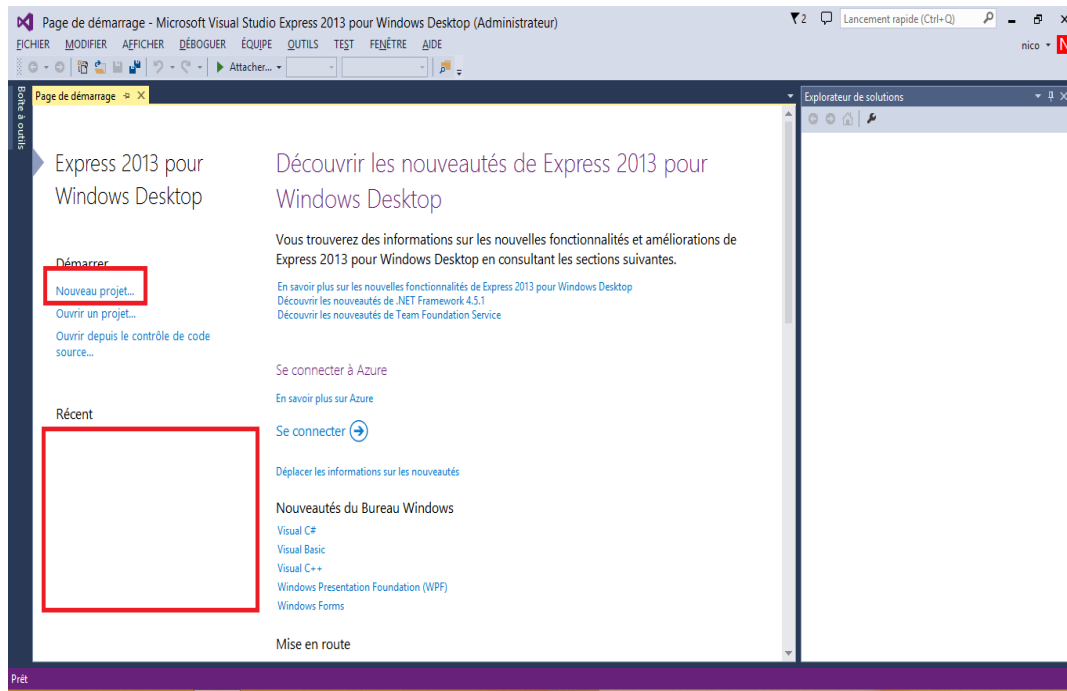


Figure Annexes-0-1 Page d'accueil de Visual Studio Express 2013 for Windows Desktop

Les deux zones entourées de rouge permettent respectivement de créer un nouveau projet et d'accéder aux anciens projets déjà créés. Dans ce deuxième cas, comme je viens d'installer le logiciel, la liste est vide.

### Créer un projet

Commençons par créer un nouveau projet en cliquant dans la zone rouge. Cette commande est également accessible via le menu Fichier > Nouveau > Projet

Un **projet** va contenir les éléments de ce que l'on souhaite réaliser. Cela peut être par exemple une application web, une application Windows, etc ...

Le projet est aussi un container de fichiers et notamment dans notre cas de fichiers en langage C# qui vont permettre de construire ce que l'on souhaite réaliser.

Le projet est en fait représenté par un fichier dont l'extension est .csproj. Son contenu décrit les paramètres de configuration correspondant à ce que l'on souhaite réaliser et les fichiers qui composent le projet.

Créons donc un nouveau projet. La fenêtre de création de nouveau projet s'ouvre et nous avons plusieurs possibilités de choix. Nous allons dans un premier temps aller dans Visual C# - Windows pour choisir de créer une Application console.

Attention, c'est Visual Basic qui est sélectionné par défaut.

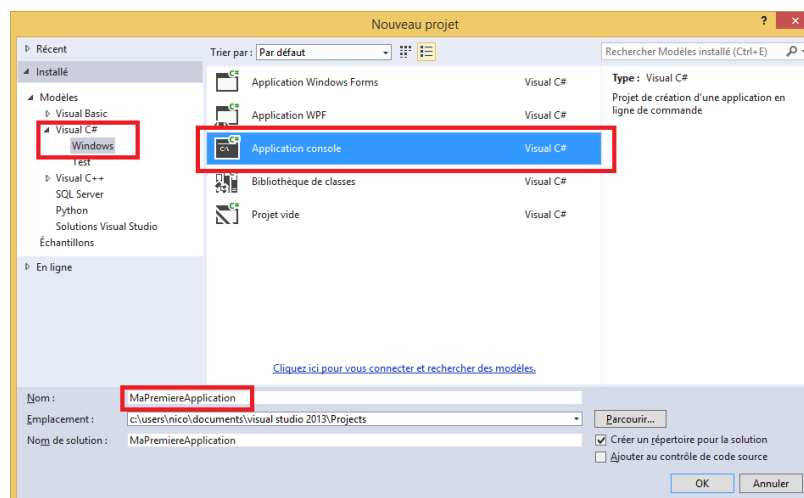


Figure 0-2 Création d'un projet Application console

À noter que si vous n'avez installé que Visual Studio Express, vous aurez la même fenêtre que moi. Si vous disposez de la version payante de Visual Studio, alors la fenêtre sera sûrement plus garnie. De même, il y aura plus de choses si vous avez installé d'autres outils de la gamme Express.

Ce que nous faisons ici, c'est utiliser ce qu'on appelle un « **modèle** » (plus couramment appelé par son équivalent anglais : « **template** ») de création de projet.

Si vous naviguez à l'intérieur des différents modèles, vous pourrez constater que Visual Studio Express for Windows Desktop nous propose des modèles de projets plus ou moins compliqués. Ces modèles sont très utiles pour démarrer un projet car toute la configuration du projet est déjà faite. Le nombre de modèles peut être différent

en fonction de votre version de Visual Studio ou du nombre de versions express installées.

**L'application Console** est la forme de projet pouvant produire une application exécutable la plus simple. Elle permet de réaliser un programme qui va s'exécuter dans la console noire qui ressemble à une fenêtre ms-dos, pour les dinosaures comme moi qui ont connu cette époque ... A noter que les projets de type « Bibliothèque de classes » permet de générer des assemblys de bibliothèques (.dll).

Dans cette console, nous allons pouvoir notamment afficher du texte simple. Ce type de projet est parfait pour démarrer l'apprentissage du C# car il n'y a besoin que de savoir comment afficher du texte pour commencer alors que pour réaliser une application graphique par exemple, il y a beaucoup d'autres choses à savoir.

En bas de la fenêtre de création de projet, nous avons la possibilité de choisir un nom pour le projet, ici ConsoleApplication1. Changeons le nom de notre application, par exemple "MaPremiereApplication", Cliquons sur OK pour valider la création de notre projet.

Visual Studio Express crée alors pour nous les fichiers composant une application console vide, qui utilise le C# comme langage et que nous avons nommé MaPremiereApplication.

### Analyse rapide de l'environnement de développement et du code généré

Allons dans l'emplacement où nous avons créé notre projet, renseigné dans la fenêtre de création de l'application console (ici C:\Users\nico\Documents\visual studio 2013\Projects ), nous pouvons constater que Visual Studio Express a créé un répertoire MaPremiereApplication, c'est le répertoire pour la solution.

Dans ce répertoire, nous remarquons notamment un fichier MaPremiereApplication.sln.

Si vous ne voyez pas l'extension du fichier, il faut configurer votre explorateur de fichier pour afficher les extensions connues.

C'est ce qu'on appelle le **fichier de solution** ; il s'agit juste d'un container de projets qui va nous permettre de visualiser nos projets dans Visual Studio Express.

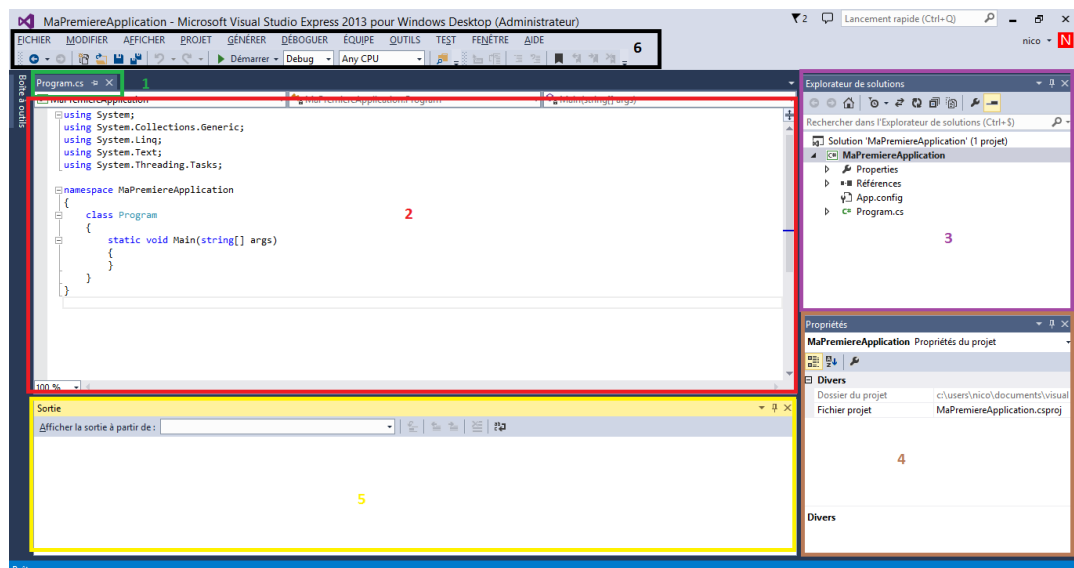
En l'occurrence, pour l'instant, nous avons un seul projet dans la solution : l'application `MaPremiereApplication`, que nous retrouvons dans le sous répertoire `MaPremiereApplication` et qui contient notamment le fichier de projet : `MaPremiereApplication.csproj`.

Le fichier décrivant un projet écrit en C# est préfixé par `cs` (`csproj`).

Il y a encore un fichier digne d'intérêt (pour l'instant) dans ce répertoire, il s'agit du fichier `Program.cs`. Les fichiers dont l'extension est `.cs` contiennent du code C#, c'est dans ce fichier que nous allons commencer à taper nos premières lignes de code ...

À noter que l'ensemble des fichiers contenant des instructions écrites dans un langage de programmation est appelé le « code source ». Par extension, le « code » correspond à des instructions écrites dans un langage de programmation.

Si nous retournons dans l'interface de Visual Studio Express, nous pouvons retrouver quelque chose comme ça :



Description de l'interface de Visual Studio Express

La zone verte numéro 1 contient les différents fichiers ouverts sous la forme d'un onglet. On voit que par défaut, Visual Studio Express nous a créé et ouvert le fichier Program.cs.

Dans la zone rouge numéro 2, c'est l'éditeur de code. Il affiche le contenu du fichier ouvert. Nous voyons des mots que nous ne comprenons pas encore. C'est du code qui a été automatiquement généré par Visual Studio Express. Nous pouvons observer que les mots sont de différentes couleurs. En effet, l'éditeur Visual Studio Express possède ce qu'on appelle une **coloration syntaxique**, c'est-à-dire que certains mots clés sont colorés d'une couleur différente en fonction de leur signification ou de leur contexte afin de nous permettre de nous y retrouver plus facilement.

La zone numéro 3 en violet est l'explorateur de solutions, c'est ici que l'on voit le contenu de la solution sur laquelle nous travaillons en ce moment. En l'occurrence, il s'agit de la solution « MaPremiereApplication » qui contient un unique projet « MaPremiereApplication ». Ce projet contient plusieurs sous éléments :

- Propriétés : contient des propriétés de l'application, on ne s'en occupe pas pour l'instant
- Références : contient les références de l'application, on ne s'en occupe pas pour l'instant
- App.config : contient de la configuration, on ne s'en occupe pas pour l'instant
- Program.cs est le fichier qui a été généré par Visual Studio et qui contient le code C#. Il nous intéresse fortement !!

La zone 4 en brun est la zone contenant les propriétés de ce sur quoi nous travaillons en ce moment. Ici, nous avons le curseur positionné sur le projet, il n'y a pas beaucoup d'informations excepté le nom du fichier de projet. Nous aurons l'occasion de revenir sur cette fenêtre plus tard.

La zone 5 en jaune n'est pas affichée au premier lancement, elle contient la liste des erreurs, des avertissements et des messages de notre application. Nous verrons comment l'afficher un peu plus bas. C'est la fenêtre de sortie.

La zone 6 en noir est la barre d'outils, elle possède plusieurs boutons que nous pourrions utiliser, notamment pour exécuter notre application.

### Ecrire du texte dans notre application

Allons donc dans la zone 2 réservée à l'édition de notre fichier Program.cs qui est le fichier contenant le code C# de notre application.

Les mots présents dans cette zone sont ce qu'on appelle des instructions de langage. Elles vont nous permettre d'écrire notre programme. Nous reviendrons plus loin sur ce que veulent dire les instructions qui ont été générées par Visual Studio, pour l'instant, rajoutons simplement l'instruction suivante après l'accolade ouvrante :

```
Console.WriteLine("Hello World !!");
```

de manière à avoir :

```
static void Main(string[] args)
{
    Console.WriteLine("Hello World !!");
}
```

Nous venons d'écrire une instruction qui va afficher la phrase "Hello World !!", pour l'instant vous avez juste besoin de savoir ça. Nous étudierons plus en détail ultérieurement à quoi cela correspond exactement.

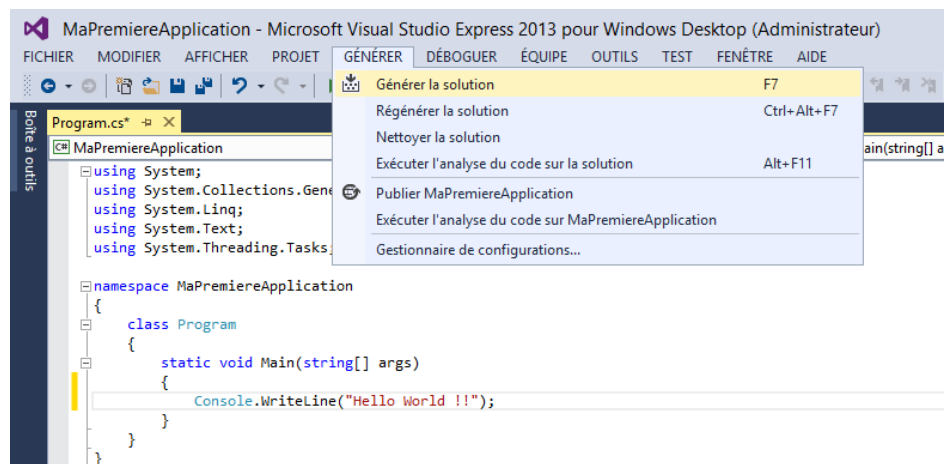
## L'exécution du projet

Ca y est ! Nous avons écrit notre premier code qui affiche un message très populaire. Mais pour le moment, ça ne fait rien. On veut voir ce que ça donne !!!

Comme je vous comprends.

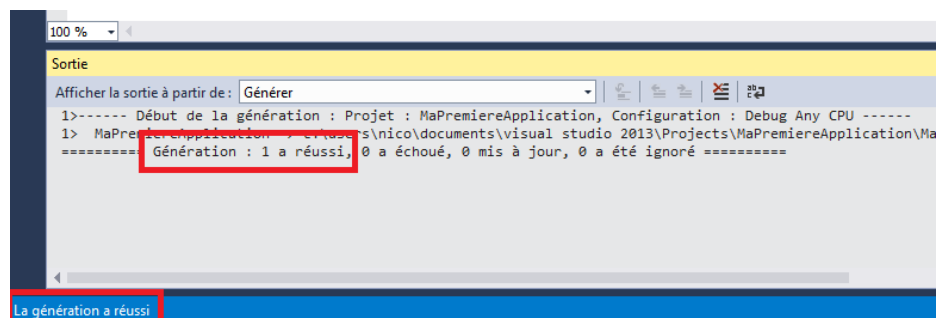
La première chose à faire est de transformer le langage C# que nous venons d'écrire en programme exécutable. Cette phase s'appelle la « génération de la solution » sous Visual Studio. On l'appelle souvent la « **compilation** » ou en anglais le « **build** ».

Allez dans le menu Générer et cliquez sur « Générer la solution » :



Compilation de notre application console

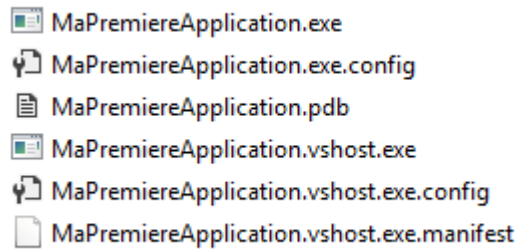
Visual Studio lance alors la génération de la solution et on voit dans la barre des tâches en bas à gauche qu'il travaille jusqu'à nous indiquer que la génération a réussi :



Affichage du résultat de la génération

Vous aurez noté à ce moment-là que la fenêtre de sortie s'affiche pour nous montrer le résultat de la compilation.

Si nous allons dans le répertoire contenant la solution, nous pouvons voir dans le répertoire `MaPremiereApplication\MaPremiereApplication\bin\debug` qu'il y a plusieurs fichiers :



Fichiers générés pour notre application console

- `MaPremiereApplication.exe`
- `MaPremiereApplication.exe.config`
- `MaPremiereApplication.pdb`
- `MaPremiereApplication.vshost.exe`
- `MaPremiereApplication.vshost.exe.config`
- `MaPremiereApplication.vshost.exe.manifest`

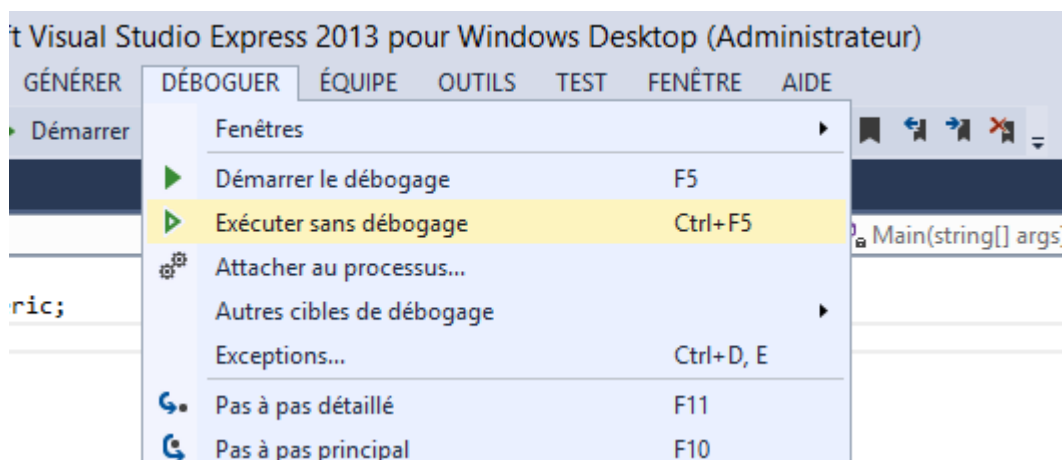
Le premier est le fichier exécutable, possédant l'extension `.exe`, qui est le résultat du processus de génération. Il s'agit bien de notre application.

Le second n'est pas utile à connaître pour l'instant, il s'agit de la configuration de l'application.

Les fichiers suivants sont des fichiers particulier qu'il n'est pas utile de connaître pour l'instant, nous allons les ignorer. (pour les curieux, ils servent pour le débogage de l'application).

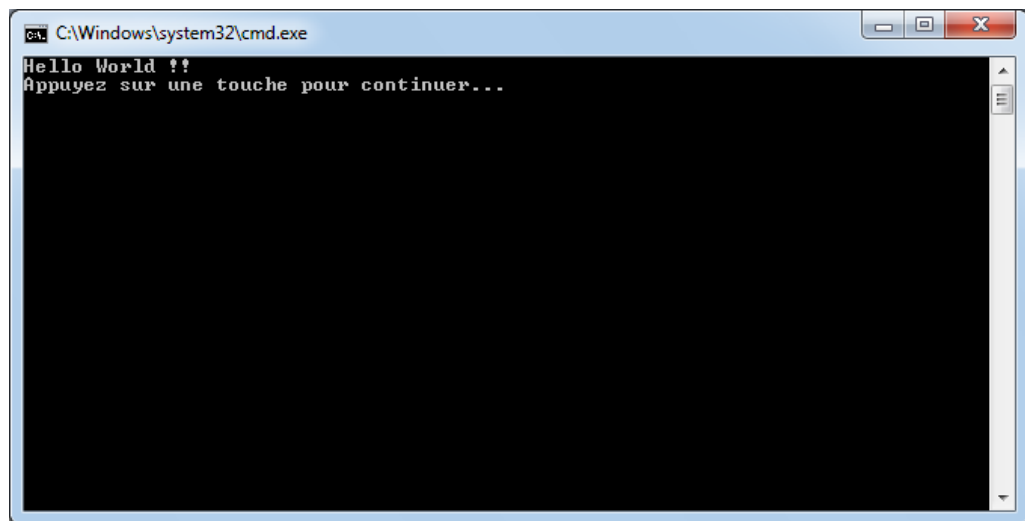
Exécutons notre application en lançant le fichier exécutable depuis l'explorateur de fichiers. Déception, nous voyons à peine un truc noirâtre qui s'affiche et qui se referme immédiatement. Que s'est-il passé ? En fait, l'application s'est lancée, a affiché notre message et s'est terminée immédiatement. Et tout ça un brin trop rapidement ... ça ne va pas être pratique tout ça.

Heureusement, Visual Studio Express arrive à la rescousse. Retournons dans notre IDE préféré et allons dans le menu Débugueur pour ensuite choisir l'élément de menu Exécuter sans débogage :



Démarrer le programme depuis Visual Studio

Vous pouvez obtenir le même résultat en utilisant le raccourci ctrl+F5. La console s'ouvre nous délivrant le message tant attendu :



Le message est désormais visible car Visual Studio nous demande d'appuyer sur une touche pour que l'application se termine, ce qui nous laisse donc le temps d'apprécier l'exécution de notre superbe programme.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Adjoudj, M. (2015). *Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton*. UNIVERSITE DE CERGY-PONTOISE (France) Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil (L2MGC) Et UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF (Algérie) Laboratoire Sciences des Matériaux et Environnement.
- Banfill, P. (2006). Rheology of fresh cement and concrete. *Rheology Reviews*, 61-130.
- Benaïcha, M. (2013). *Formulation des différents bétons (BAP, BHP et BFUP) à haute teneur en additions minérales*. Université Abdelmalek Essaâdi/Aix Marseille Université.
- Blick, H. A. (1989). Golden section search method for determining parameters in Robertson-Stiff non-Newtonian fluid model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 309-316.
- Chalencón, F. (2010). *Etude des interactions rhéologie, fissuration et microstructure pour le développement d'un outil de formulation : Application aux mortiers poreux minces fibrés dédiés à l'ITE*. Lyon: L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON.
- Chekireb, S. (2015). *Valorisation de la poudre de verre dans le béton auto-plaçant*. Sherbrooke: UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE.
- Clanet, C. (2009). *Cours Mécanique des Fluides*. ESPCI .
- Cottenceau, B. (2012-2013). *C# / .NET support de cours*. ISTIA.
- Crépault, É. (2012). *Rhéologie des bétons frais à base de ciment d'aluminates de calcium*. Québec: Université Laval.

- Fall, A. (2008). *RHEOPHYSIQUE DES FLUIDES COMPLEXES : ECOULEMENT ET BLOCAGE DE SUSPENSIONS. Analyse de données, Statistiques et Probabilités*. Paris: Université Paris-Diderot - Paris VII.
- Hafid, H. (2012). *Influence des paramètres morphologiques des granulats sur le comportement rhéologique des bétons frais : étude sur systèmes modèles*. UNIVERSITÉ PARIS-EST.
- Hamza Soualhi, El-Hadj Kadri, Tien-Tung Ngo, Adrie Bouvet, François Cussigh, & Zine-El-Abidine Tahar. (2016). Design of portable rheometer with new vane geometry to estimate concrete rheological parameters. *Journal of Civil Engineering and Management*.
- Heidolph Instruments. (s.d.). *Heidolph Instruments Official Website*. Récupéré sur <http://www.heidolph-instruments.com>
- Hoang, Q.G. (2015). *Etude de la ségrégabilité des coulis cimentaires sous cisaillement*.
- Hu, C. (1995). *Rhéologie des bétons fluides*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Lanos, C., & Estelle, P. (2009). Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 457-471.
- Math.NET Numerics Official website*. (s.d.). (Math.Net) Récupéré sur <https://numerics.mathdotnet.com/>
- Microsoft. (s.d.). *MSDN*. (Microsoft) Récupéré sur [https://msdn.microsoft.com/en-us/library/fx6bk1f4\(v=vs.100\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/fx6bk1f4(v=vs.100).aspx)
- Papo, A. (1988). Rheological models for cement pastes. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*(21), 41-46.
- Roussel, N. (2012). *Understanding the rheology of concrete*. Woodhead publishing limited.

Troelsen, A. (2010). *Pro C# 2010 and the .NET 4 Platform*. New York, New York, USA: Apress.

Yahia, A., & Khayat, K. (2001). Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudoplastic grout. *Cement and Concrete Research*, 731-738.

Yahia, A., & Khayat, K. (2001). Analytical models for estimating yield stress of high-performance pseudo-plastic grout. *Cement and Concrete Research*(31), 731-738.