

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MANAGEMENT
ENSM - KOLEA**

MASTER EN MANAGEMENT PAR LA QUALITE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

THEME

**ESTIMATION DES INCERTITUDES DE MESURE POUR L'ESSAI :
« RÉSISTANCE A LA COMPRESSION DES EPROUVETTES DE
BÉTON »**

**AU LABORATOIRE DE DÉVELOPPEMENT DE LA CONSTRUCTION
(CDL)**

Présenté par : MANSOURI Meriem Encadré par : Dr. CHAHED Amina

ANNEE 2014-2015

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon tuteur de stage Hichem KHEDIM. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé. Je souhaite également remercier Jean-Michel PONS pour m'avoir accueilli au sein de son centre de l'innovation.

J'adresse mes sincères remerciements à mon professeur, Amina CHAHED et intervenants CDL Amal GHAZI qui ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions.

Je remercie mes très chers parents et ma sœur qui me soutiennent constamment ainsi que mes amis.

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel du CDL à savoir Amel BOUKARI, Amal BENAÏSSA, Hakim OUMACHICHE, Tewfik KHECHAI, Omar AIB, Rafik DAHAKOUMIANE pour leur amitié, leur soutien inconditionnel et leur encouragement.

Enfin, je remercie grandement Abdelmalek HADADA, mon binôme de toujours, pour sa sincère amitié et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance pour le travail réalisé ensemble.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

LEXIQUE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

ABREVIATIONS ET SYMBOLES

RESUME

INTRODUCTION GENERALE.....1

Chapitre 1 : PRESENTATION DU LABORATOIRE ET CADRE GENERALE DE LA MISSION

1. PRESENTATION DU LABORATOIRE 5

2. CADRE GENERALE DE LA MISSION 12

1. PRESENTATION DE LA NORME ISO 17025: 2005 16

Chapitre 2: INCERTITUDES DE MESURE: INTRODUCTION AUX CALCULS

2. LA METROLOGIE..... 21

3. CONCEPT D'INCERTITUDE DE MESURE 30

Chapitre 3: EVALUATION DE L'INCERTITUDE DE MESURE DE L'ESSAI

1. DESCRIPTION DE LA METHODE D'ESSAI (NORME NA 5075 :2006) 38

2. EVALUATION DE L'INCERTITUDE DE MESURE DE L'ESSAI 41

3. ESSAI EXPERIMENTAL 58

CONCLUSION GENERALE.....66

BIBIOGRAPHIE

ANNEXES

LEXIQUE

➤ Grandeurs et unités

Grandeur :

Propriété d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, que l'on peut exprimer quantitativement sous forme d'un nombre et d'une référence.

Unité de mesure (Unité) :

Grandeur scalaire réelle, définie et adoptée par convention, à laquelle on peut comparer toute autre grandeur de même **nature** pour exprimer le rapport des deux grandeurs sous la forme d'un nombre.

Système international d'unités (SI) :

Système d'unités, fondé sur le **Système international de grandeurs**, comportant les noms et symboles des unités, une série de préfixes avec leurs noms et symboles, ainsi que des règles pour leur emploi, adopté par la Conférence générale des poids et mesures (CGPM)

Valeur d'une grandeur :

Ensemble d'un nombre et d'une référence constituant l'expression quantitative d'une **grandeur**.

➤ Mesurages

Mesurage :

Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs **valeurs** que l'on peut raisonnablement attribuer à une **grandeur**.

Métrologie :

Science des **mesurages** et ses applications

- **NOTE** La métrologie comprend tous les aspects théoriques et pratiques des mesurages, quels que soient l'**incertitude de mesure** et le domaine d'application.

Mesurande :

Grandeur que l'on veut mesurer

Méthode de mesure :

Description générique de l'organisation logique des opérations mises en œuvre dans un **mesurage**.

Procédure de mesure :

Description détaillée d'un **mesurage** conformément à un ou plusieurs **principes de mesure** et à une **méthode de mesure** donnée, fondée sur un **modèle de mesure** et incluant tout calcul destiné à obtenir un **résultat de mesure**.

Résultat de mesure ou résultat d'un mesurage :

Ensemble de **valeurs** attribuées à un **mesurande**, complété par toute autre information pertinente disponible.

Valeur mesurée :

Valeur d'une grandeur représentant un **résultat de mesure**

Valeur vraie :

Valeur d'une grandeur compatible avec la définition de la **grandeur**.

Exactitude de mesure (Exactitude) :

Etroitesse de l'accord entre une **valeur mesurée** et une **valeur vraie** d'un **mesurande**.

Justesse de mesure (Justesse) :

Etroitesse de l'accord entre la moyenne d'un nombre infini de **valeurs mesurées** répétées et une **valeur de référence**.

Fidélité de mesure (fidélité) :

Etroitesse de l'accord entre les **indications** ou les **valeurs mesurées** obtenues par des **mesurages** répétés du même objet ou d'objets similaires dans des conditions spécifiées.

Erreur de mesure (erreur) :

Différence entre la **valeur mesurée** d'une **grandeur** et une **valeur de référence**.

Erreur systématique :

Composante de l'**erreur de mesure** qui, dans des **mesurages** répétés, demeure constante ou varie de façon prévisible.

Condition de répétabilité:

Condition de **mesurage** dans un ensemble de conditions qui comprennent la même **procédure de mesure**, les mêmes opérateurs, le même **système de mesure**, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période de temps.

Répétabilité de mesure (répétabilité) :

Fidélité de mesure selon un ensemble de **conditions de répétabilité**.

Condition de reproductibilité :

Condition de **mesurage** dans un ensemble de conditions qui comprennent des lieux, des opérateurs et des **systèmes de mesure** différents, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires.

Reproductibilité de mesure (Reproductibilité) :

Fidélité de mesure selon un ensemble de **conditions de reproductibilité**.

Incertitude de mesure (incertitude) :

Paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des **valeurs** attribuées à un **mesurande**, à partir des informations utilisées.

Évaluation de type A de l'incertitude (évaluation de type A) :

Évaluation d'une composante de l'**incertitude de mesure** par une analyse statistique des **valeurs mesurées** obtenues dans des conditions définies de **mesurage**.

Évaluation de type B de l'incertitude (évaluation de type B) :

Évaluation d'une composante de l'**incertitude de mesure** par d'autres moyens qu'une **évaluation de type A de l'incertitude**.

Incertitude-type :

Incertitude de mesure exprimée sous la forme d'un écart-type.

Incertitude-type composée :

Incertitude-type obtenue en utilisant les incertitudes-types individuelles associées aux **grandeurs d'entrée dans un modèle de mesure**.

Incertitude-type relative :

Quotient de l'**incertitude-type** par la valeur absolue de la **valeur mesurée**.

Bilan d'incertitude :

Formulation d'une **incertitude de mesure** et des composantes de cette incertitude, ainsi que de leur calcul et de leur combinaison.

Incertitude élargie :

Produit d'une **incertitude-type composée** et d'un facteur supérieur au nombre un.

Intervalle élargi :

Intervalle contenant l'ensemble des **valeurs vraies** d'un **mesurande** avec une probabilité déterminée, fondé sur l'information disponible.

Probabilité de couverture :

Probabilité que l'ensemble des **valeurs vraies** d'un **mesurande** soit contenu dans un **intervalle élargi** spécifié.

Facteur d'élargissement :

Nombre supérieur à un par lequel on multiplie une **incertitude-type composée** pour obtenir une **incertitude élargie**.

Chaîne de traçabilité métrologique (Chaîne de traçabilité) :

Succession d'**étalons** et d'**étalonnages** qui est utilisée pour relier un **résultat de mesure** à une référence.

Traçabilité métrologique à une unité de mesure (Traçabilité métrologique à une unité) :

Traçabilité métrologique où la référence est la définition d'une **unité de mesure** sous la forme de sa réalisation pratique.

- **NOTE** L'expression «traçabilité au SI» signifie la traçabilité métrologique à une unité de mesure du **Système international d'unités**.

Vérification :

Fourniture de preuves tangibles qu'une entité donnée satisfait à des exigences spécifiées.

Validation :

Vérification, où les exigences spécifiées sont adéquates pour un usage déterminé.

Modèle de mesure (modèle) :

Relation mathématique entre toutes les **grandeurs** qui interviennent dans un **mesurage**.

- **NOTE** Une forme générale d'un modèle de mesure est l'équation $h(Y, X_1, \dots, X_n) = 0$, où Y , la **grandeur de sortie dans le modèle de mesure**, est le **mesurande**, dont la **valeur** doit être déduite de l'information sur les **grandeurs d'entrée dans le modèle de mesure** X_1, \dots, X_n .

Fonction de mesure :

Fonction de **grandeurs**, dont la valeur, lorsqu'elle est calculée en utilisant des **valeurs** connues pour les **grandeurs d'entrée dans le modèle de mesure**, est une **valeur mesurée** de la **grandeur de sortie dans le modèle de mesure**.

Grandeur d'entrée dans un modèle de mesure (grandeur d'entrée) :

Grandeur qui doit être mesurée, ou grandeur dont la **valeur** peut être obtenue autrement, pour calculer une **valeur mesurée** d'un **mesurande**.

Grandeur de sortie dans un modèle de mesure (grandeur de sortie) :

Grandeur dont la **valeur mesurée** est calculée en utilisant les **valeurs** des **grandeurs d'entrée dans un modèle de mesure**.

Grandeur d'influence :

Grandeur qui, lors d'un **mesurage** direct, n'a pas d'effet sur la grandeur effectivement mesurée, mais a un effet sur la relation entre l'**indication** et le **résultat de mesure**.

Correction :

Compensation d'un effet systématique connu.

➤ **Dispositifs de mesure**

Instrument de mesure (appareil de mesure) :

Dispositif utilisé pour faire des **mesurages**, seul ou associé à un ou plusieurs dispositifs annexes.

Résolution :

Plus petite variation de la **grandeur** mesurée qui produit une variation perceptible de l'**indication** correspondante.

Système de mesure :

Ensemble d'un ou plusieurs **instruments de mesure** et souvent d'autres dispositifs, comprenant si nécessaire réactifs et alimentations, assemblés et adaptés pour fournir des informations destinées à obtenir des **valeurs mesurées** dans des intervalles spécifiés pour des **grandeurs de natures** spécifiées.

Erreur maximale tolérée (limite d'erreur) :

Valeur extrême de l'**erreur de mesure**, par rapport à une **valeur de référence** connue, qui est tolérée par les spécifications ou règlements pour un **mesurage**, un **instrument de mesure** ou un **système de mesure** donné.

➤ **Étalons**

Étalon :

Réalisation de la définition d'une **grandeur** donnée, avec une **valeur** déterminée et une **incertitude de mesure** associée, utilisée comme référence.

Étalon international :

Étalon reconnu par les signataires d'un accord international pour une utilisation mondiale.

Étalon national :

Étalon reconnu par une autorité nationale pour servir, dans un état ou une économie, comme base à l'attribution de **valeurs** à d'autres étalons de **grandeurs** de la même **nature**.

Étalon primaire :

Étalon établi à l'aide d'une **procédure de mesure primaire** ou créé comme objet choisi par convention.

Étalon de référence :

Étalon conçu pour l'**étalonnage** d'autres étalons de **grandeurs** de même **nature** dans une organisation donnée ou en un lieu donné.

Étalon de travail :

Étalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des **instruments de mesure** ou des **systèmes de mesure**.

➤ Statistique

Ecart-type :

Racine carrée de la variance, l'écart-type mesure l'étalement ou la dispersion par rapport à la moyenne d'un ensemble de données. C'est la mesure de l'étalement la plus utilisée.

Estimation :

Recherche de la valeur d'un ou de plusieurs paramètres d'une loi statistique à partir d'observations ou de sondages sur un ou plusieurs échantillons d'une population.

Intervalle de confiance :

L'intervalle de confiance est un intervalle de valeurs qui a, à un certain pourcentage de chance, de contenir la vraie valeur du paramètre estimé.

Loi de probabilité :

Une **loi de probabilité** décrit le comportement aléatoire d'un phénomène dépendant du hasard.

Moyenne :

Mesure la plus courante de la tendance centrale, la moyenne est la moyenne arithmétique d'un ensemble de nombres.

Modélisation mathématique :

Le procédé par lequel nous utilisons des expressions mathématiques pour décrire une situation quantitative réelle.

Observations :

Données recueillies pour une variable quelconque.

Paramètre :

Un paramètre est une donnée (grandeur, variable, coefficient ou quantité) qui est considérée nécessaire pour analyser ou valoriser une situation.

Probabilité :

Rapport du nombre de cas favorables au nombre de cas possibles.

Variable aléatoire :

Une **variable aléatoire** est une application définie sur l'ensemble des éventualités, c'est-à-dire l'ensemble des résultats possibles d'une expérience aléatoire.

Variance :

Mesure de l'étalement équivalant au carré moyen de l'écart de chaque nombre par rapport à la moyenne d'un ensemble de données.

LISE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Actions menées au CDL	13
Tableau 2 : Exigences relatives au management de la norme ISO 17025.....	19
Tableau 3: Les exigences techniques de la norme ISO 17025	20
Tableau 4 : Lois de probabilité usuelles pour l'évaluation des incertitudes de Type B.....	49
Tableau 5: les sources d'incertitude associées à la mesure du diamètre de l'éprouvette (D)...	51
Tableau 6 : les sources d'incertitude associées à la mesure de la charge (F)	52
Tableau 7 : valeurs usuelles du facteur d'élargissement	56
Tableau 8 : bilan des incertitudes	62
Tableau 9 : Valeurs et incertitudes pour la résistance	63

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte des implantations de Lafarge dans le monde.....	6
Figure 2 : Organigramme du CDL	10
Figure 3 : Pyramide de raccordement au SI	25
Figure 4 : Pyramide de raccordement des équipements du CDL	26
Figure 5 : Procédure de gestion d'un équipement	27
Figure 6 : Processus de validation d'une méthode d'essai (Norme ISO/CEI 17025)	29
Figure 7 : Rôles des erreurs aléatoires et systématiques	33
Figure 8 : Processus de mesure	34
Figure 9 : Processus de mesure (Méthode 5M)	35
Figure 10 : les sources d'incertitudes de l'essai « Résistance à la compression des éprouvettes de béton »	36
Figure 11 : Approche Interlaboratoire et Intralaboratoire	42
Figure 12 : Intervalle de confiance pour une loi normale.....	56
Figure 13 : Préparation des éprouvettes pour l'essai résistance à la compression	58

ABREVIATIONS ET SYMBOLES

5M : main d'œuvre, milieu, méthode, matière, matériel.

AIGERAC : Organisme Algérien d'accréditation.

BIPM : Bureau International des Poids et Mesures.

BPE : Béton Prêt à l'Emploi.

BTP : Bâtiment et Travaux Publics.

CDL: Centre de Développement Laboratoire.

CETIM : Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction.

GICA : Groupement Industriels des Cimenteries d'Algérie.

CNERIB : Centre National d'Etudes et de Recherches intégrées du Bâtiment.

COFRAC : Comité Français d'Accréditation.

COLPA : Cosider Lafarge Plâtre Algérie.

CTC : Organisme National de Contrôle Technique de la Construction.

EMT : Erreur Maximale Tolérée.

ENPO : Ecole Nationale Polytechnique d'Oran.

ENP : Ecole Nationale Polytechnique.

GUM : Guide pour l'expression de l'Incertitude de Mesure.

IANOR : Institut Algérien de Normalisation.

ISO/CEI: International Organization for Standardisation/International Electrotechnical Commission.

LCR : Lafarge Centre de Recherche.

LNE : Laboratoire Nationale de Métrologie et d'Essais.

N.A : Norme Algérienne.

N.F : Norme Française.

PAC : Pied à Coulisse.

R&D : Recherche et Développement.

S.A : Société Anonyme.

SAV : Service Après Vente.

S.I : Système International d'unités.

USTHB : Université des sciences et de la Technologie Houari-Boumediene.

USTO-MB : Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf.

VIM : Le Vocabulaire international de métrologie.

VIML : Le Vocabulaire international de métrologie légale.

A_c : Section de l'éprouvette

D: Dimension de l'éprouvette

a: la longueur d'une arête d'un cube

MPa : Méga pascals

mm² : Millimètres carrés

N : Newton

f_c : Résistance à la compression.

F : La charge

Y : Mesurande (grandeur de sortie)

y: Valeur numérique du mesurande

u(Y) : Incertitude-type composée

$U(Y)$: Incertitude élargie

K : Facteur d'élargissement

x_i : Grandeurs d'entrée

\bar{x} : La moyenne de x_i

$\sigma^2(\bar{x})$: Variance de la moyenne des observations x_i

$\sigma^2(x)$: La variance des observations x_i

$\sigma(\bar{x})$: Ecart-type de la moyenne.

Résumé

Cette recherche a pour but d'estimer les incertitudes de mesures liées à l'essai « Résistance à la compression des éprouvettes de béton ». Une méthode analytique d'évaluation des incertitudes de mesures : Guide pour l'Expression des Incertitudes de mesure (GUM) est recommandée. Cette méthode se résume en quatre (04) étapes qui consistent à : Analyser le processus de mesure, quantifier les sources d'incertitude qui influencent l'essai, combiner les sources d'incertitudes (Formule de propagation de l'incertitude) et exprimer le résultat finale. Pour se faire, le guide se base sur l'analyse statistique en tenant compte des erreurs produites par les conditions ambiantes, les opérateurs, les équipements de mesure, etc. Subséquemment, la méthode a été validée par des mesures expérimentales réalisées sur des éprouvettes de béton cylindriques.

Mots-clés : Incertitude, GUM, erreurs, source d'incertitude, équipement de mesure, méthode.

Abstract

This research aims to estimate the uncertainties of measures related to the test "Compressive strength of concrete specimens." An analytical method for assessing measurement uncertainties: Guide of Uncertainty of Measurement (GUM) is recommended. This method can be summarized in four (04) steps of: Analyzing the measurement process, quantify sources of uncertainty that influence the test, combine the sources of uncertainty (uncertainty propagation formula) and express the final result. To do so, the guide is based on statistical analysis taking into account the errors produced by ambient conditions, operators, measuring equipment, etc. Subsequently, the method was validated by experimental measurements on cylindrical concrete specimens.

Keywords: Uncertainty, GUM, mistakes, uncertainty, measuring equipment, method.

ملخص

يهدف هذا البحث إلى تقدير أوجه عدم اليقين من التدابير المتصلة مقال "قوة ضاغطة من عينات ويوصى دليل التعبير الخرسانة". طريقة تحليلية لتقييم الشكوك القياس. هذه الطريقة يمكن تلخيصها في: (GUM) عن عدم اليقين في القياس أربعة (04) خطوات : تحليل عملية القياس ، قياس مصادر عدم اليقين التي تؤثر على الاختبار، والجمع بين مصادر عدم اليقين (صيغة انتشار عدم اليقين) ، وأعراب عن النتيجة النهائية. للقيام بذلك، ويقوم دليل على التحليل الإحصائي مع الأخذ بعين الاعتبار الأخطاء التي تنتجها الظروف المحيطة، والمشغلين، وأجهزة قياس، الخ وفي وقت لاحق، تم التحقق من صحة الطريقة التي القياسات التجريبية على عينات الخرسانة الأسطوانية.

كلمات البحث: عدم اليقين، علكة، والأخطاء، وعدم اليقين، ومعدات القياس والأسلوب.

Introduction Générale

Au cours de ces dernières années, l'interconnexion mondiale, généralement désignée par le terme de mondialisation a connu un très grand essor. Des facteurs tels que la modernisation du transport, la révolution numérique ainsi que la libre circulation des biens, des personnes et des services suite à la libéralisation du commerce ont contribué à l'accélération de ce processus.

Cependant, l'élimination des barrières commerciales doit nécessairement reposer sur la certitude que les services et les biens échangés répondent aux normes internationales. De ce fait, la métrologie et l'accréditation jouent un rôle important, bien qu'encore en partie méconnu, dans ce processus général d'interconnexion et de rapprochement.

En effet, le besoin en métrologie dans le monde s'est rapidement amplifié en raison de la progression accrue de la pression concurrentielle, où des résultats de mesures fiables, reconnus et comparables sur le plan international présente un enjeu stratégique et constitue un des axes d'amélioration des entreprises.

A présent, pratiquement aucune industrie ne peut fonctionner valablement sans faire des mesures exactes, que ce soit au niveau de la production, de la gestion de la qualité ou des essais de conformité. C'est pourquoi, les entreprises sont amenés à disposer d'une fonction métrologie non seulement performante et adaptée aux besoins, mais aussi apte à prouver aux clients l'exactitude des mesures et le bien-fondé des méthodes.

L'expérience de certain pays développés (France, Suisse, Belgique...) dans le domaine a démontré que la métrologie est un moyen d'assurer le développement économique et industriel et contribue ainsi dans l'assurance qualité, aussi bien dans les activités de production que dans les laboratoires d'analyse et d'essais.

L'Algérie n'est pas en reste, elle est tenue à son tour d'effectuer des réformes dans son infrastructure qualité et s'ouvre à la métrologie avec la promulgation d'un ensemble de textes législatifs et règlementaires afin d'arriver à l'ouverture économique et s'intégrer dans l'économie mondiale.

Introduction Générale

A ce jour, seulement une vingtaine de laboratoires à travers le pays ont été accrédités¹ et d'autres sont en cours d'accréditation, en l'occurrence le Laboratoire de Développement de la Construction (CDL) de LAFARGE-Algérie.

La métrologie est un des facteurs le plus important pour assurer la qualité et la fiabilité des résultats d'essai. Le processus d'accréditation selon la norme ISO 17025 :2005 ne peut aboutir sans apporter la preuve d'une métrologie sûre.

La métrologie est perçue généralement comme la science de la mesure qui comprend les aspects théoriques et pratiques des mesurages².

Afin d'assurer la qualité des mesures en métrologie, l'un des critères les plus essentiels à prendre en compte est la confiance qu'on peut accorder aux résultats de mesure, qui se quantifie par l'incertitude de mesure. Cette dernière, peut être considérée comme un intervalle, centré sur la valeur mesurée, dans lequel il est fortement probable que la valeur vraie se situe.

L'évaluation des incertitudes de mesure nécessite une connaissance approfondie du processus de mesurage. Ce dernier doit être maîtrisé en intégrant la maîtrise des équipements de mesure ainsi que d'autres facteurs tels que le choix de la méthode de mesure, la qualification de l'opérateur et l'environnement.

- **Question de recherche**

Les laboratoires d'essai et d'étalonnage accrédités doivent posséder et appliquer une procédure pour estimer l'incertitude de mesure. Différentes méthodes traitent l'incertitude de mesure, deux d'entre elles sont considérées comme des méthodes de référence à savoir : la méthode « GUM » et la méthode ISO 5727³.

Comment, à partir d'une de ces méthodes, la méthode GUM, l'incertitude de mesure est estimée dans le domaine des essais mécaniques. Plus exactement, la recherche vise à la question ci-dessous :

¹ www.algerac.dz. (consultation-20/03/2015)

²BIPM *et al*, 2012, Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM), 3^e Edition, Genève.

Comment évaluer l'incertitude des résultats d'essai dans le Laboratoire de Développement de la Construction (CDL) ?

Pour répondre à notre problématique principale, notre réflexion s'achemine à travers la réponse aux questions structurées comme suit :

- Qu'est ce que l'incertitude de mesure ?
- Qu'elle est la différence entre l'erreur et l'incertitude ?
- Quels sont les facteurs qui influencent le résultat de mesure ?
- Quels sont les composantes de l'incertitude ?
- Comment assurer la maîtrise du processus de mesure ?
- Quels sont les étapes d'évaluation de l'incertitude de mesure ?

Afin de répondre provisoirement à l'ensemble de ces interrogations, nous avons émis quelques hypothèses :

- Les composantes de l'incertitude sont de deux types : aléatoires et systématiques.
- Les facteurs qui influencent le processus de mesure proviennent de différentes sources, à savoir : la méthode, la main d'œuvre, les moyens, le matériel et la matière.
- La maîtrise du processus de mesure nécessite de prendre en compte :
 - Gestion des équipements de mesure.
 - Validation de la méthode d'essai.
 - l'incertitude de mesure.

Pour vérifier ces hypothèses et répondre à notre problématique, nous avons adopté une méthodologie de travail descriptive et quantitative structuré en trois grands chapitres, à savoir :

- Un premier chapitre réservé à la présentation du laboratoire (Centre de Développement Laboratoire CDL) ainsi que le cadre générale de la mission ;
- Un second chapitre qui traitera l'incertitude de mesure ;
- Enfin, le troisième chapitre, dont il est question d'étudier les différentes étapes pour estimer l'incertitude de mesure pour en déduire l'incertitude des résultats d'essai : « Résistance à la compression des éprouvettes de béton ».

CHAPITRE 1 :
PRESENTATION DU LABORATOIRE
ET LE CADRE GENERALE DE LA
MISSION

Ce chapitre sera consacré dans un premier point, à la présentation du Laboratoire de Développement de la Construction (CDL) de Lafarge-Algérie, pour passer en suite à un deuxième point qui décrira le cadre générale de la mission au sein du CDL.

1. PRESENTATION DU LABORATOIRE

1.1. Groupe Lafarge

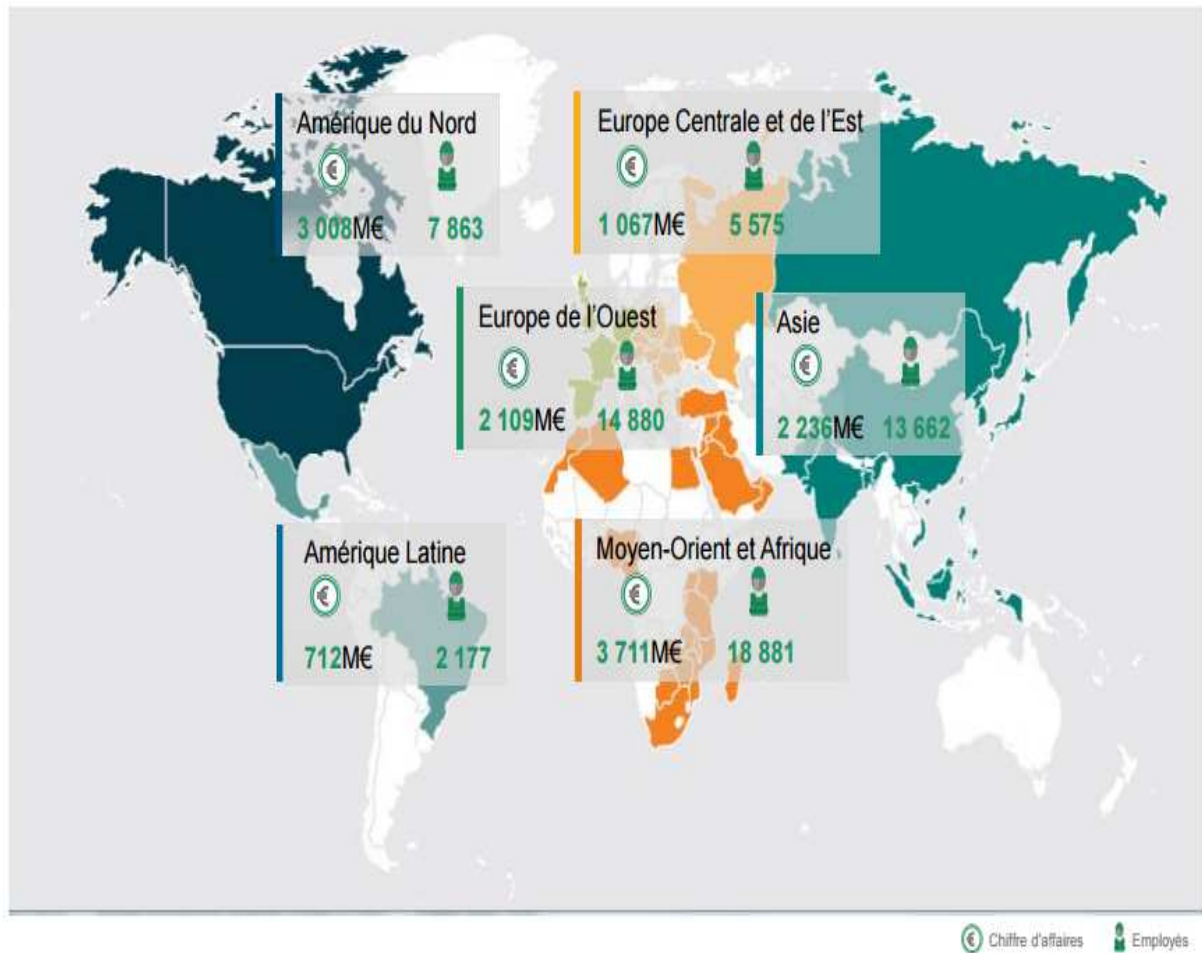
Fondée en 1833, Lafarge produit et vend principalement du ciment, des granulats et du béton prêt à l'emploi dans le monde entier. Ses produits et solutions de construction sont utilisés pour construire ou rénover des logements, bâtiments et infrastructures.

Lafarge S.A. est une société anonyme d'un capital social s'élevant à 1 150 166 736 euros et d'un effectif d'environ 63 000 personnes réparties dans 61 pays avec 1 612 sites de productions.

Au cours de l'exercice 2014 Lafarge a réalisé un chiffre d'affaires de 12 843 millions d'euros, ce qui en fait un leader mondial des matériaux de constructions et du marché du ciment, deuxième producteur mondial de granulats et quatrième producteur de BPE béton prêt à l'emploi et est coté à la bourse de Paris.

- Lafarge dans le monde

Figure 1 : Carte des implantations de Lafarge dans le monde



Source : www.lafarge.com

- Lafarge Centre de Recherche LCR

Le groupe Lafarge est doté d'un centre de recherche qui réunit les meilleures expertises techniques, les équipements les plus en pointe et les plus grands partenaires internationaux pour construire une force de R&D unique dans son secteur. Son objectif est de mettre au point des solutions constructives innovantes qui créent de la valeur pour ses clients.

❖ Organisation de la R&D locale et globale⁴

✓ **Un (01) centre de recherche mondial** (Lafarge Centre de Recherche - LCR) à Lyon, France.

✓ **Cinq (05) laboratoires de développement locaux** (CDLs) au plus près des marchés pour développer de nouvelles opportunités (applications produits, systèmes constructifs, besoins clients, modes constructifs locaux, etc.)

- Algérie
- Brésil
- Chine
- France
- Inde

1.2. Lafarge en Algérie

En Algérie, Lafarge possède 2 cimenteries, une à M'Sila, avec deux lignes de Ciment gris, une à Oggaz (une ligne Ciment blanc + une ligne Ciment gris) et une usine en construction à Biskra en Partenariat avec un opérateur économique local. La capacité de production totale dépasse les 8 méga tonnes/an. Le groupe gère en partenariat avec GICA (Groupement Industriels des Cimenteries d'Algérie) la cimenterie de Meftah (35% du capital + contrat de management), compte 22 centres de production de béton d'une capacité de 1Mm³de BPE ainsi qu'une usine de production de plâtre COLPA (Cosider Lafarge Plâtre Algérie) à Bouira en joint-venture avec Cosider (57% Lafarge).

Lafarge-Algérie compte plus de 2 600 collaborateurs et s'investit dans le développement d'actions citoyennes envers ses communautés.

Elle a aussi participé à la réalisation de plusieurs grands projets en Algérie, tels que l'Autoroute Est-Ouest, Métro d'Alger, Aéroport d'Alger et La Faculté de Droit d'Alger entre autres.

⁴www.lafarge.com (consultation- 22/03/2015)

1.3. Laboratoire de Développement de la Construction (CDL)

Devant le besoin critique en Algérie de développer des matériaux de qualité ainsi que des systèmes constructifs plus fiables et plus rapides, pour répondre à une volonté nationale de développement économique et sociale, Lafarge décide de lancer, en 2013, un pôle de recherche, de développement et d'innovation autour des matériaux de construction et des systèmes constructifs, baptisé le CDL (Laboratoire de Développement de la Construction).

Ce laboratoire, premier du genre en Afrique et quatrième dans le monde, se veut être une plateforme technologique centralisant le développement de toutes les innovations du Groupe Lafarge pour l'Algérie. Une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs, d'architectes et de techniciens y sont installés autour de cinq blocs de compétences pour mettre au point les futurs produits, systèmes et solutions pour l'ensemble des besoins de la construction.

Il permet d'introduire les nouvelles technologies de construction à base de ciment, béton et granulats pour mieux répondre aux besoins du marché algérien, favorisant ainsi l'innovation, la qualité et la construction durable.

Au plus près de l'utilisateur final, cette plateforme permet de tester à l'échelle 1 toutes les idées permettant d'améliorer la construction des logements et des infrastructures. Elle permet également la formation des maçons et autres experts de la construction à la mise en œuvre de ces nouvelles technologies.

Amenée à être pliée des échanges et des relations avec le réseau académique algérien (universités et écoles) ainsi que les institutions locales de normalisation, de certification et de contrôle, cette plateforme permettra également de mieux participer aux efforts communs de recherche & développement dans le domaine de la construction.

La réalisation des objectifs du CDL, à savoir donner une des réponses innovantes et optimales aux enjeux quotidiens, passe par l'accomplissement de plusieurs missions, il y en a quatre principales qui sont:

- **La Veille Technologique :**

Comparer et évaluer la performance des systèmes existants et des nouvelles technologies disponibles sur le marché algérien de la construction pour les comprendre et pour définir les besoins d'optimisation.

- **L'Expérimentation :**

Éprouver, en interne dans un premier temps puis via des chantiers pilotes, les matériaux innovants, les nouveaux produits et systèmes constructifs répondant au plus près aux besoins identifiés sur le marché.

- **La Démonstration et la Certification:**

Confirmer que les nouveaux produits et systèmes constructifs développés au Laboratoire répondent aux exigences normatives, aux attentes des utilisateurs sur les chantiers, et ce pour le plus grand nombre de projets.

- **La Création de la valeur:**

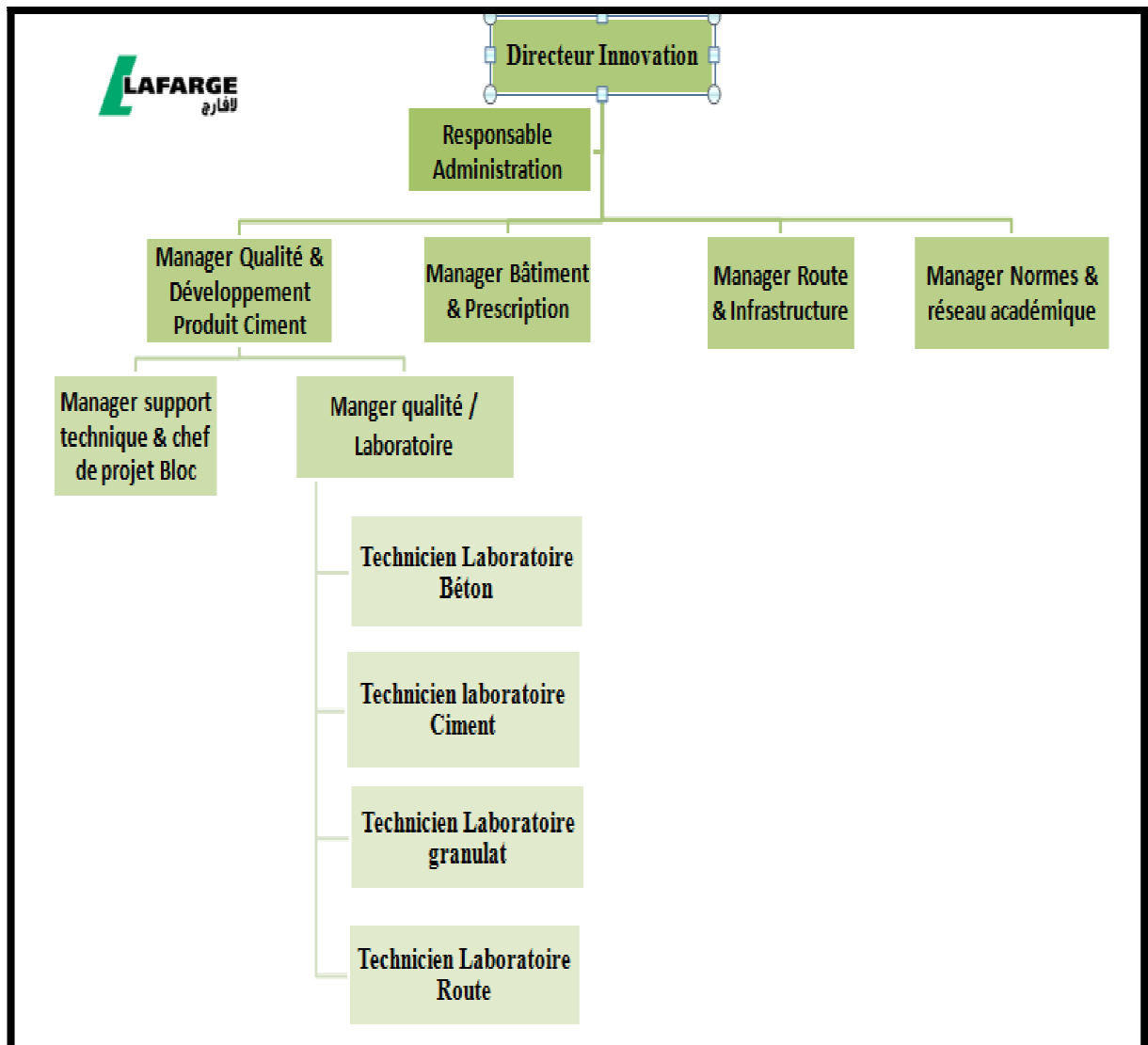
Créer de la valeur pour l'industrie algérienne du bâtiment et de l'infrastructure avec les matériaux, produits et systèmes, en favorisant l'appropriation par le marché de ces nouvelles technologies et en assurant les formations nécessaires garantissant la qualité des constructions.

1.3.1. Organisation du CDL

Le Laboratoire de Développement de la Construction est organisé autour de quatre (04) pôles d'activités agencées de manière à faciliter les interactions entre les équipes d'ingénieurs, architectes et techniciens. Ces derniers travaillent en synergie afin d'apporter aux clients publics et privés des solutions innovantes et adaptées à leurs projets.

Dans sa quête constante de performance et afin d'être au plus près de ses clients, le laboratoire est organisé de la façon suivante :

Figure 2 : Organigramme du CDL



Source : Document interne CDL

1.3.2. les Pôles d'activité du CDL

Les différents pôles, organisés en activités stratégiques, permettent de mobiliser et de coordonner les expertises nécessaires au succès d'un projet. Ces pôles sont aussi des lieux de réflexion et d'innovation nécessaires pour le renouvellement permanent des produits et services de Lafarge Algérie.

1.3.2.1. Bâtiment et Prescription

Ce pôle est formé de spécialistes de la construction (architectes et ingénieurs) pour les régions Centre, Est et Ouest. Leur but est de participer à l'intégration dans les cahiers des charges des maitres d'ouvrages et dans de nouvelles solutions techniques de construction.

Pour atteindre cet objectif, ces « prescripteurs » approchent des promoteurs privés et publiques pour comprendre les besoins de leurs projets et proposer des solutions adaptées. A la fin du processus ils font une prescription technique afin de rédiger un cahier des charges précis devant être respecté par l'entreprise de réalisation.

1.3.2.2. Infrastructures et Route

C'est un nouveau pôle composé d'un manager infrastructure et d'un responsable solution Route. Un Laboratoire dédié exclusivement aux infrastructures routières, va être introduit prochainement pour effectuer des essais de caractérisation et de formulation.

Il a pour objectif de développer des techniques innovantes de traitement des sols et béton routier au niveau local. Pour mener à bien ces objectifs, ce pôle va suivre un plan d'action similaire à celui du segment Bâtiment.

1.3.2.3. Laboratoire Ciment et Support Technique

Leader en production du ciment, pour garantir une production homogène et de bonne qualité pour la satisfaction de ses clients, Lafarge a investie dans un laboratoire avec une technologie de pointe, où toute une batterie de tests est effectuée.

Lafarge Algérie a développée une large gamme de ciments gris et blancs pour répondre aux besoins du marché Algérien destinée à la construction de maisons, d'ouvrages d'art esthétique, éléments décoratifs, de ponts, viaducs, tunnels, etc.

1.3.2.4. Réseau Académique

Ce service s'occupe des normes, le lobbying des institutions normatives comme IANOR, CETIM, CTC et le CNERIB, et des relations avec le secteur universitaire à travers la signature des conventions avec les universités et écoles d'ingénieurs algériennes les plus importantes telles que, l'USTHB, l'USTO-MB, l'ENP et l'ENPO.

2. CADRE GENERALE DE LA MISSION

2.1. Le contexte du Projet accréditation

Le CDL, est un laboratoire, parmi cinq autres dans le monde, qui travaillent étroitement avec le centre de recherche le plus compétent (LCR). Pour parvenir à un niveau de compétence similaire à l'échelle internationale, le CDL s'inscrit dans une démarche d'accréditation conformément à la norme ISO 17025 : 2005 dont l'objectif est : d'une part, acquérir une reconnaissance technique dans un marché de plus en plus exigeant, et d'autre part, améliorer la qualité des prestations du laboratoire.

En Algérie, seuls trois laboratoires publiques, dans le domaine du BTP, sont accrédités (CETIM, CNERIB et LCTP). Le CDL sera par conséquent le premier laboratoire BTP privé à demander l'accréditation.

Dans un premier temps, l'accréditation portera sur l'essai « Résistance à la compression des éprouvettes de béton », par la suite, le CDL envisage d'accréditer, essai par essai, l'ensemble des essais effectués dans le laboratoire.

2.2. Les missions dans le laboratoire

Les missions qui m'ont été confiées dans le cadre du projet d'accréditation de l'essai « Résistance à la compression des éprouvettes de béton » sont :

- l'étude des référentiels normatifs (les normes techniques : NA 5074 :2006, NA 5093 : 2007, NA 5075 :2006, NA 5076 : 2006 applicables aux essais sur béton durci et ISO 17025 : 2005),
- Mise en place d'un diagnostic de la métrologie sur la base de la norme ISO 17025 :2005,
- Identification de l'état des lieux et des écarts vis-à-vis de la norme,
- Mise en place d'un plan d'action:
 - ✓ Rédaction des méthodes d'essai et des instructions de travail,
 - ✓ Gestion de la traçabilité des étalonnages des équipements de mesure ainsi que les procédures relatives aux achats et au service client,

- ✓ L'estimation de l'incertitude de mesure des essais en appliquant les méthodes appropriées.

Le :2005

Tableau 1 permet de visualiser l'ensemble des actions menées dans le laboratoire suivant les exigences de la norme ISO 17025:2005

Tableau 1 : Actions menées au CDL

Action	Quoi	Livrable	Date cible	Statut tâche
Revue des demandes appels d'offre et contrats	le laboratoire doit établir et maintenir des procédures pour la revue des demandes, des appels d'offres ou des contrats.	procédure gestion des demandes au contrat	16/03/15	100%
Achats de services et fournitures	Le laboratoire doit avoir une politique et (une) des procédures pour la sélection et l'achat des services et fournitures qu'il achète et qui ont une incidence sur la qualité des essais.	Procédure d'achat	16/03/15	100%
Service au client	Coopération avec le client Obtenir le retour client	Procédure service à la clientèle	30/03/15	100%

<p>Méthode d'essai et instructions de travail</p>	<p>*Sélection des méthodes</p>	<p>Méthode d'essai : tout le circuit de la réception des échantillons jusqu'à établissement du rapport d'essai</p>	<p>30/04/15</p>	<p>100%</p>
		<p>Instructions d'utilisation de l'ensemble des équipements</p>	<p>10/05/15</p>	<p>100%</p>
	<p>*Estimation de l'incertitude de mesure</p>	<p>procédure d'estimation de l'incertitude de mesure : processus purement technique</p>	<p>17/06/15</p>	<p>100%</p>
<p>Manutention des objets d'essai</p>	<p>Le laboratoire doit avoir des procédures pour le transport, la réception, la manutention, la protection, le stockage et / ou l'élimination d'objets d'essai</p>	<p>procédure</p>	<p>30/04/15</p>	<p>100%</p>
<p>Rapports des résultats d'essai</p>	<p>Les résultats de chaque essai ou série d'essais, effectués par le laboratoire, doivent être rapportés de manière exacte, claire, non ambiguë, objective, et conformément aux instructions particulières données dans les méthodes d'essai</p>	<p>Rapport d'essai</p>	<p>10/06/15</p>	<p>100%</p>

Source : Elaboré par nous-mêmes

CHAPITRE 2 :
INCERTITUDE DE MESURE :
INTRODUCTION AUX CALCULS

« Si vous pouvez *mesurer* ce dont vous parlez et l'exprimer par un *nombre*, vous savez quelque chose de votre sujet ; mais si vous ne pouvez pas le mesurer, si vous ne pouvez pas l'exprimer par un nombre, vos connaissances sont d'une bien pauvre espèce et bien peu satisfaisante »⁵.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une revue littéraire sur les incertitudes de mesures qui font l'objet d'une branche de la métrologie. Pour ce faire, nous allons, dans un premier temps, donner un aperçu sur la norme ISO 17025 :2005 qui contient les exigences en matière de métrologie.

Par la suite, nous allons définir la métrologie et étudier les éléments nécessaires pour assurer la maîtrise de celle-ci.

Enfin, une dernière étape sera destinée à traiter le concept d'incertitude de mesure dans son ensemble.

1. PRESENTATION DE LA NORME ISO 17025: 2005

1.1. Définition de la norme

La norme ISO/CEI 17025 est une norme internationale qui établit les exigences générales de compétence pour effectuer des essais et/ou des étalonnages, y compris l'échantillonnage. Elle couvre les essais et les étalonnages effectués au moyen de méthodes normalisées, de méthodes non normalisées et de méthodes élaborées par les laboratoires⁶.

L'ISO/CEI 17025 remplace la norme NF 45001⁷ et le guide ISO 25⁸, elle est plus orientée vers la satisfaction du client par une meilleure distinction entre les exigences qualité et les exigences techniques.

La première édition de la norme faisait référence à l'ISO 9001 : 1994 et à l'ISO 9002 :1994. Ces normes ont été remplacées par l'ISO 9001 :2000 rendant de ce fait nécessaire d'aligner l'ISO/CEI 17025. Ainsi, la nouvelle édition de 2005 remplace l'ISO/CEI 17025 :1999.

⁵ William Thomson, Lord Kelvin alias, dans la leçon sur : unités électriques de mesure, publié en conférences populaires, Vol. I, 1883.

⁶ www.iso.org. (consultation-04/04/2015)

⁷ NF EN ISO 45001 (1989), Critères généraux concernant le fonctionnement des laboratoires d'essais

⁸ ISO 25 (1990), guide pour l'accréditation des laboratoires d'étalonnage et d'essai

L'ISO/IEC 17025 contient l'ensemble des exigences que les laboratoires doivent respecter pour démontrer à leurs clients et aux autorités réglementaires qu'ils appliquent un système de management leur permettant de maîtriser entièrement leurs processus, qu'ils ont la compétence technique et sont aptes à produire des résultats techniquement valides. Les organismes d'accréditation chargés de reconnaître la compétence des laboratoires utiliseront la norme comme base de leur accréditation⁹.

1.2. Domaine d'application

L'ISO/CEI 17025 est applicable à toutes les organisations qui procèdent à des essais et/ou des étalonnages, quels que soient leurs effectifs et l'étendue du domaine de leurs activités. Par exemple, des laboratoires de première, deuxième et tierce parties, ainsi que des laboratoires où les essais et/ou les étalonnages font partie du contrôle et de la certification de produits¹⁰.

Cette norme est destinée à être utilisée par les laboratoires désireux de mettre au point les systèmes de management de la qualité, administratif et technique régissant leurs opérations. Elle peut également être utilisée par les clients des laboratoires, les autorités réglementaires et les organismes d'accréditation engagés dans des activités de confirmation ou de reconnaissance de la compétence des laboratoires.

1.3. Objectifs de la norme

Selon **Alan Bryden**, Secrétaire général de l'ISO, « L'ISO/CEI 17025 bénéficie aux entreprises, aux gouvernements et à la société dans son ensemble. La confiance dans la compétence des laboratoires est souvent nécessaire pour les entreprises qui essaient de nouveaux produits ou veulent s'assurer que les produits finis sont prêts pour la commercialisation, pour les autorités réglementaires et les responsables du commerce qui exigent une assurance pour les produits nationaux ou importés destinés au marché, ou pour garantir la qualité et la fiabilité des essais et analyses se rapportant aux risques pour l'environnement, la santé ou la sécurité.»¹¹.

⁹ www.iso.org (consultation 06/04/2015)

¹⁰ ISO 17025 :2005, exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais

¹¹ www.iso.org (consultation 06/04/2015)

1.4. Accréditation des laboratoires**1.4.1. Définition de l'accréditation**

L'accréditation consiste en « la reconnaissance formelle de la compétence d'un organisme de procéder à des essais ou à des évaluations de la conformité »¹².

La norme ISO/CEI 1700 : 2004¹³ définit l'accréditation comme une « attestation délivrée par une tierce partie, ayant rapport à un organisme d'évaluation de la conformité, constituant une reconnaissance formelle de la compétence de ce dernier à réaliser des activités spécifiques d'évaluation de la conformité ».

Cette attestation apporte la preuve formelle de la compétence des laboratoires à réaliser des activités particulières d'évaluation de la conformité.

1.4.2. Accréditation selon la norme ISO 17025: 2005

L'accréditation est une procédure par laquelle un organisme faisant autorité reconnaît formellement qu'un organisme est compétent pour effectuer des tâches spécifiques. En Algérie cet organisme s'appelle « ALGERAC »¹⁴.

L'accréditation est effectuée par rapport à des normes différentes selon l'activité de l'organisme à accréditer:

- ISO 17021: 2011 « Exigences pour les organismes procédant à l'audit et à la certification des systèmes de management » pour les organismes certificateurs.
- ISO 17020: 2012 « Exigences pour le fonctionnement de différents types d'organismes procédant à l'inspection » pour les organismes d'inspection.
- L'ISO 17025: 2005 « Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais » pour les laboratoires d'essais d'analyses et d'étalonnages.

Le document normatif de base servant de référentiel d'accréditation pour les laboratoires d'essai et d'étalonnage est la norme ISO/CEI 17025 version 2005 « Exigences générales

¹² SUBILA-ROUGE Liliane, 2000, P.144, Aspects juridiques de l'audit environnemental, Edition : librairie Droz. Suisse.

¹³ ISO 17000 :2004 , Évaluation de la conformité -Vocabulaire et principes généraux.

¹⁴ Créé par le décret exécutif n°05-466 le 6 décembre 2005, l'Organisme Algérien d'Accréditation est un établissement public à caractère industriel et commercial, doté de la personnalité morale et de l'autonomie financière

concernant la compétence des laboratoires d'étalonnage et d'essai ». Cette norme concerne tous les laboratoires d'essais et d'étalonnage et est le référentiel utilisé lors des audits d'accréditation.

Dans le processus d'accréditation selon la norme ISO/CEI 17025: 2005, la maîtrise métrologique dans le chapitre 5 joue un rôle important. En effet, elle garantit la fiabilité et la qualité des résultats de mesure obtenus dans les laboratoires.

1.5. Exigences de la norme

Le contenu de la norme iso 17025 comprend deux chapitres clés :

1.5.1. Conditions relatives au management (chapitre 4)

Ce chapitre concerne tout ce qui touche à la qualité organisationnelle, il est fondé sur la norme ISO.

Tableau 2 : Exigences relatives au management de la norme ISO 17025

Chapitre 4 : Exigences relatives au management	
4.1. Organisation	4.7. Service au client
4.2. Système de management	4.8. Réclamations
4.3. Maîtrise de la documentation	4.9. Maîtrise des travaux d'essai et/ou
4.4. Revue des demandes, appels	d'étalonnage non conformes
d'offres et contrat	4.10. Amélioration
4.5. Sous-traitance des essais et des	4.11. Actions correctives
étalonnages	4.12. Actions préventives
4.6. Achats de services et de	4.13. Maîtrise des enregistrements
Fournitures	4.14. Audits internes

Source : Elaboré par nous-mêmes

1.5.2. Besoins techniques (chapitre 5)

Ce chapitre concerne la maîtrise métrologique en partant de la formation du personnel jusqu'au rapport d'essai en passant par la traçabilité du mesurage.

Tableau 3: Les exigences techniques de la norme ISO 17025

Chapitre 5 : Exigences techniques	
<p>5.1. Généralités</p> <p>5.2. Personnel</p> <p>5.3. Installations et conditions ambiantes</p> <p>5.4. Méthodes d'essai et d'étalonnage et validation des méthodes</p> <p>5.5. Equipement</p>	<p>5.6. Traçabilité du mesurage</p> <p>5.7. Echantillonnage</p> <p>5.8. Manutention des objets d'essai et d'étalonnage</p> <p>5.9. Assurer la qualité des résultats D'essai et d'étalonnage</p> <p>5.10. Rapport sur les résultats.</p>

Source : Elaboré par nous-mêmes

Le chapitre 5 est fondamental pour la maîtrise du processus de mesure pour les laboratoires d'essais. Ce chapitre spécifie les exigences en matière de métrologie, un levier de performance dans le processus de mesure, en effet, elle regroupe l'ensemble des techniques permettant d'effectuer des mesures fiables et d'assurer une gestion efficace des équipements de mesure.

2. LA METROLOGIE

2.1. Définition de la métrologie

La métrologie est la science des mesurages et ses applications¹⁵. Elle regroupe l'ensemble des opérations mises en œuvre permettant d'effectuer des mesures, de les interpréter et de garantir la confiance dans les résultats des processus de mesure.

Les résultats de mesure sont obtenus avec un niveau d'incertitude bien déterminé qui seront par la suite exploités dans différents domaines pour assurer la qualité des produits réalisés ou services fournis.

La métrologie comprend trois (03) axes de compétence à savoir :

- **Métrologie scientifique ou fondamentale**

La métrologie scientifique a pour mission d'organiser, de développer et de maintenir les étalons de mesure nationaux et internationaux. Elle couvre les problèmes généraux théoriques et pratiques relatifs aux unités de mesure, y compris leur réalisation et leur dissémination au moyen de méthodes scientifiques, les problèmes d'erreur et d'incertitude de mesure ainsi que les problèmes des propriétés métrologiques des instruments de mesure¹⁶.

Ces unités sont matérialisées par des références que l'on appelle « étalons primaires ». Ces références sont gardées dans des laboratoires dits primaires, tels que le LNE.

- **Métrologie appliquée ou industrielle**

La métrologie industrielle consiste à garantir le bon fonctionnement des instruments de mesure utilisés dans le processus de fabrication de l'industrie.

¹⁵ BIPM *et al*, VIM, 2012, *op cit*

¹⁶ RAMFUL *Khemraj*, Maurice, SEILER Eberhard, Gestion de la qualité des exportations, Métrologie légale et commerce international, Bulletin N° 74, Juin 2004. Suisse.

- **Métrologie légale**

Le Vocabulaire international de métrologie légale (VIML)¹⁷ donne la définition suivante du terme " métrologie légale " : "pratique et processus consistant à appliquer à la métrologie une structure législative et réglementaire, et à la faire exécuter. "

Note : La métrologie légale comprend

- l'établissement des exigences légales,
- le contrôle/l'évaluation de la conformité des produits réglementés,
- la surveillance des produits réglementés et des activités réglementés, et
- la définition de l'infrastructure nécessaire pour assurer la traçabilité des mesurages et instruments de mesure réglementés aux étalons SI ou nationaux.

Il est important pour les laboratoires d'essai et/ou d'étalonnage d'assurer la qualité des mesures. Pour les garantir, il est essentiel d'étalonner les instruments de mesure et de calculer l'incertitude associée au résultat. La fonction métrologie est une composante essentielle de l'assurance qualité dans un laboratoire d'essai.

2.2. Assurance de la qualité des mesures

L'assurance qualité c'est l' «Ensemble des activités préétablies et systématiques mises en œuvre dans le cadre du système qualité, et démontrées en tant que de besoin, pour donner la confiance appropriée en ce qu'une entité satisfera aux exigences pour la qualité. »¹⁸

Le développement de l'assurance qualité est un facteur qui a contribué à l'évolution du besoin en métrologie aussi bien dans les activités de production que dans les laboratoires d'essai et d'étalonnage.

En effet, le rôle de la métrologie est capital dans les laboratoires tel que le CDL, elle permet de gérer les risques d'obtenir des résultats de mesures incorrectes pouvant avoir un impact sur le résultat d'essai.

Pour obtenir la maîtrise du processus de mesure, la fonction de métrologie devra tenir compte des éléments suivants:

¹⁷Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML), Edition 2013, Vocabulaire international des termes de métrologie légale. France.

¹⁸ ISO 8402:1994 Management de la qualité et assurance de la qualité -Vocabulaire

- Gestion des équipements de mesure,
- Validation de la méthode d'essai,
- l'incertitude de mesure.

2.2.1. Gestion des équipements de mesure

Il est indispensable pour les laboratoires de connaître l'état des équipements utilisés dans leurs opérations de mesure et suivre leur comportement dans le temps.

La gestion des équipements revient à:

2.2.1.1. Identifier les équipements

Dès l'arrivée d'un nouvel équipement de mesure, le laboratoire doit réaliser les opérations suivantes :

- Vérification de la conformité à la commande,
- Etalonnage des équipements,
- Identification de l'équipement en attribuant à chacun un numéro d'identification par famille ou par type d'utilisation,
- Inscription de l'équipement dans l'inventaire,
- Etablissement de la fiche signalétique,
- Etablissement de la fiche individuelle appelé « fiche de vie ».

❖ Fiche signalétique

La fiche signalétique permet de décrire de façon rapide :

- L'équipement,
- Le nom du fournisseur, la garantie, et le numéro du contrat de maintenance,
- Date de réception et de mise en service,
- Contrat SAV,
- Les consommables et la documentation,
- Suivi métrologique.

❖ La fiche de vie

La fiche de vie est essentielle pour assurer la traçabilité des mesures. « Il s'agit d'un document complété chronologiquement, et prenant les résultats successifs des vérifications et des étalonnages successifs, les incidents, les interventions, la maintenance. Il permet d'apporter la preuve que le moyen est régulièrement vérifié et étalonné »¹⁹.

Les fiches de vie comportent les éléments suivant :

- Nom du laboratoire,
- Nom de l'instrument,
- Marque et type,
- Identification de l'instrument,
- Identification du certificat d'étalonnage,
- Date d'utilisation,
- Références aux procédures d'étalonnage et de vérification,
- Périodicité des opérations d'étalonnage ou de vérification,
- Dates des interventions effectuées.

Le CDL a établi des fiches de vie pour l'ensemble des équipements de mesure liées aux différents types d'essais qui existent.

La fiche signalétique accompagnée de la fiche de vie de l'instrument de mesure correspondant à l'essai « Résistance à la compression des éprouvettes de béton » figure en « **Annexe A** »

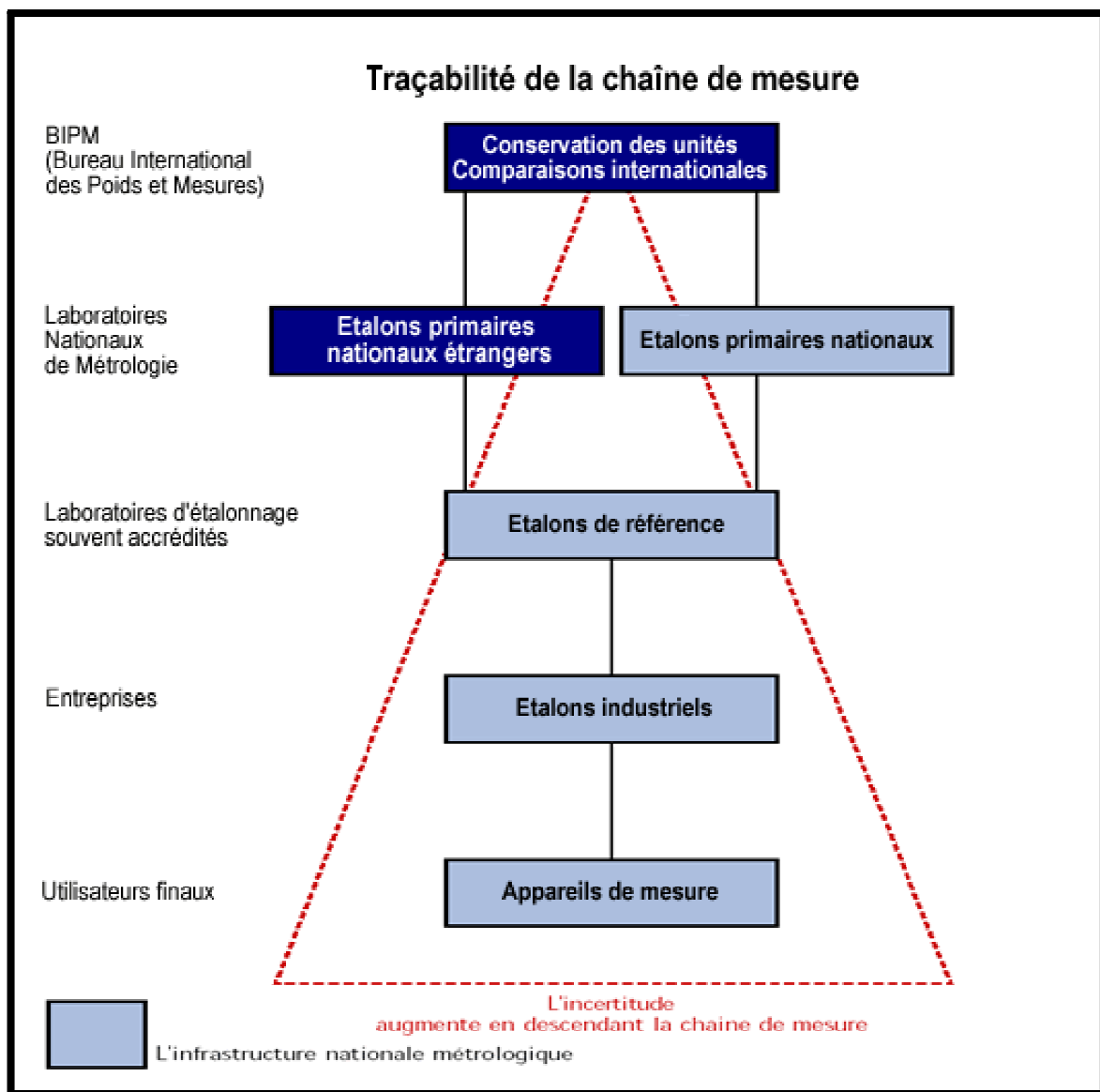
2.2.1.2. Assurer la traçabilité et le raccordement au Système International d'unités (SI)

La norme ISO 17025 : 2005 exige que les mesures effectuées par les appareils soient traçables au SI. Cela signifie que le laboratoire doit démontrer que les résultats d'un mesurage ont pour référence les unités fondamentales mises en œuvre par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Cette démonstration est assurée par une chaîne ininterrompue de comparaison appelée « chaîne de raccordement aux étalons » ou chaîne d'étalonnage ».

¹⁹ <http://www.mpq-electronique.fr/page30.php>, (consultation - 15/05/2015).

Pour raccorder un instrument de mesure, on effectue un étalonnage qui consiste à le comparer à des étalons connus afin de déterminer l'écart par rapport aux étalons. Bien souvent, pour des raisons de facilité d'utilisation, les entreprises ont besoin d'une vérification de leurs instruments de mesure, consistant à comparer les résultats d'étalonnage à des prescriptions qui peuvent provenir d'une norme, d'une réglementation ou de règles prédéfinies propres à l'entreprise²⁰.

Figure 3 : Pyramide de raccordement au SI

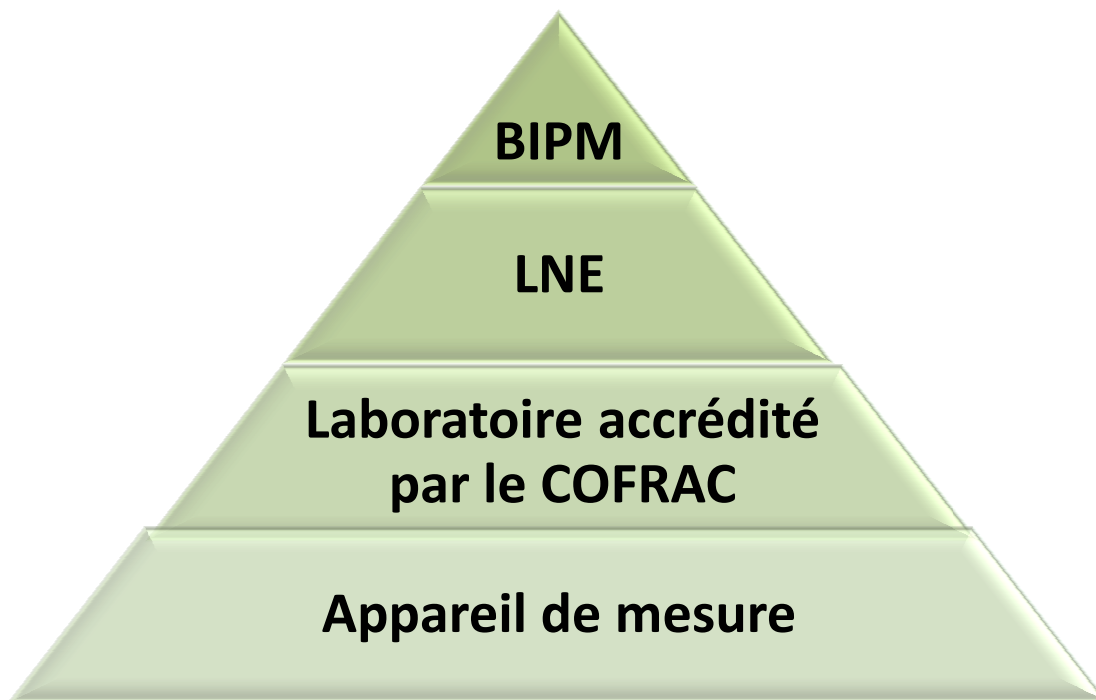


Source : http://www.bogmisailac.org/index.php?p=1_124 (consultation-21/05/2015)

²⁰ http://www.bogmisailac.org/index.php?p=1_124 (consultation - 21/05/2015).

L'étalonnage des équipements d'essais du CDL est réalisé par un laboratoire externe accrédité COFRAC. Le raccordement au système international d'unités est représenté par la pyramide suivante :

Figure 4 : Pyramide de raccordement des équipements du CDL



Source : Elaboré par nous-mêmes

2.2.1.3. Maîtriser l'utilisation de ses équipements (instructions de travail).

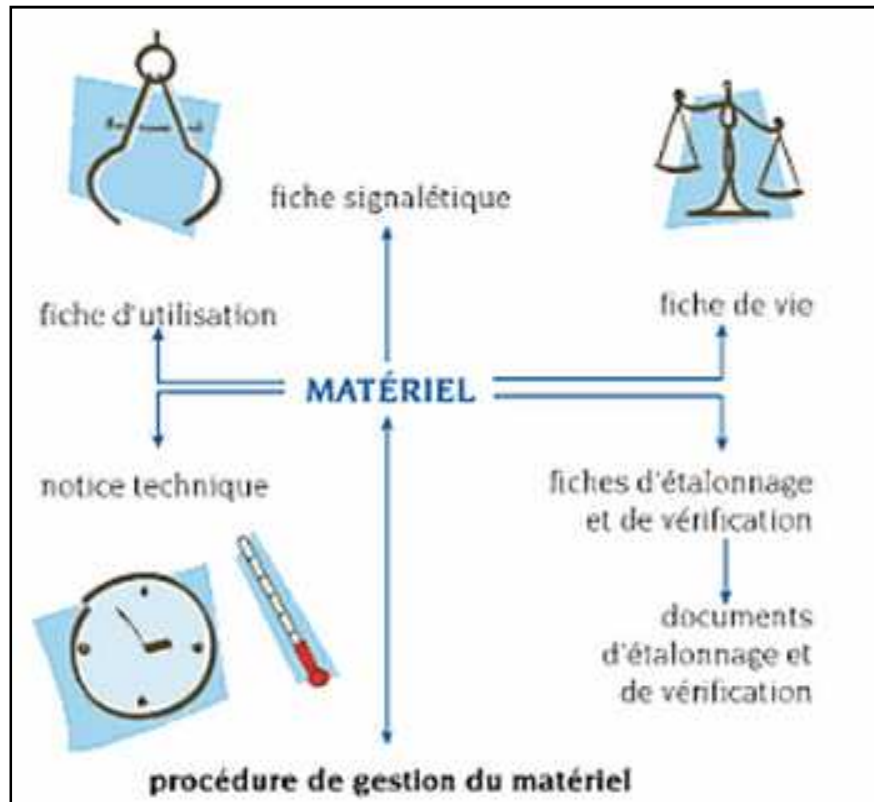
Le laboratoire doit établir un document précisant les détails des actions à réaliser pour une utilisation efficace d'un équipement de mesure. Ce document est appelé « instruction de travail ».

le CDL a établi, pour l'ensemble des instruments de mesure utilisés pour effectuer l'essai des, instructions de travail. Un exemple d'instruction de travail est représenté en « **Annexe B** » : instruction de travail de la presse 3R ».

Les équipements de mesure doivent être utilisés par du personnel formé à son utilisation et précisément les mesures pour lesquels ils sont destinés.

La Figure ci-après représente un schéma qui résume la procédure de gestion des équipements de mesure.

Figure 5 : Procédure de gestion d'un équipement



Source : BRANGER Alain, MARIE RICHER Madeleine, ROUSTEL Sébastien, 2007, P.63, Alimentation, sécurité et contrôles microbiologiques, Edition : Educagri. France.

❖ Périodicité des vérifications ou des étalonnages (confirmation métrologique)

L'intervalle de confirmation métrologique (périodicité) détermine la fréquence à laquelle les contrôles auront lieu, cette fréquence est définie grâce à plusieurs paramètres comme l'historique de contrôle, l'EMT²¹, la technologie du matériel, la criticité de l'instrument²².

²¹Erreur Maximale Tolérée notée EMT : c'est une zone de tolérance où doit se trouver l'erreur de justesse et son incertitude pour déclarer la conformité.

²² AUTHOUART Frédéric, LE DUFF Ronan, 2014, P.105, La métrologie ? Mais c'est très simple, Edition print book. France.

L'intervalle entre chaque étalonnage et/ou vérification des instruments d'essais au niveau du CDL est déterminé selon les paramètres suivants :

- La précision du travail qui lui est demandé, en appliquant une pondération allant par exemple, de 1 pour la mesure la plus grossière à 3 pour la mesure la plus rigoureuse.
- La fréquence de son utilisation, avec une pondération allant de 1 pour une utilisation occasionnelle à 3 pour une utilisation fréquente.
- Les conditions dans lesquelles il est employé, en pondérant de 1 si les conditions sont idéales à 3 pour des conditions d'utilisation particulièrement contraignantes.

En faisant la somme des valeurs affectées à chacun de ces trois paramètres, il est alors possible d'attribuer à chaque moyen de mesure ou de contrôle un poids P, poids qui pourrait varier dans les conditions de notre exemple entre 3 et 9. La valeur de ce poids permet de fixer la périodicité des étalonnages et/ou des vérifications, ce qui donne par exemple :

- Si $P < 4$: étalonnage tous les ans.
- Si $4 \leq P < 7$: étalonnage tout six mois.
- Si $P \geq 7$: étalonnage tous les trois mois.

Cette méthode nécessite d'être validée en interne après application.

2.2.2. Validation de la méthode d'essai

La validation est la confirmation par examen et l'apport de preuves objectives de fait que les prescriptions particulières en vue d'une utilisation prévue déterminée sont remplies²³.

Le VIM définit la méthode de mesure comme la « description générique de l'organisation logique des opérations mises en œuvre dans un mesurage ».

la démarche de validation de méthode commence par l'expression du besoin du client. Si le client ne précise pas la méthode, il appartient au laboratoire de choisir la méthode la plus adaptée, dans ce cas, deux méthodes peuvent se présenter :

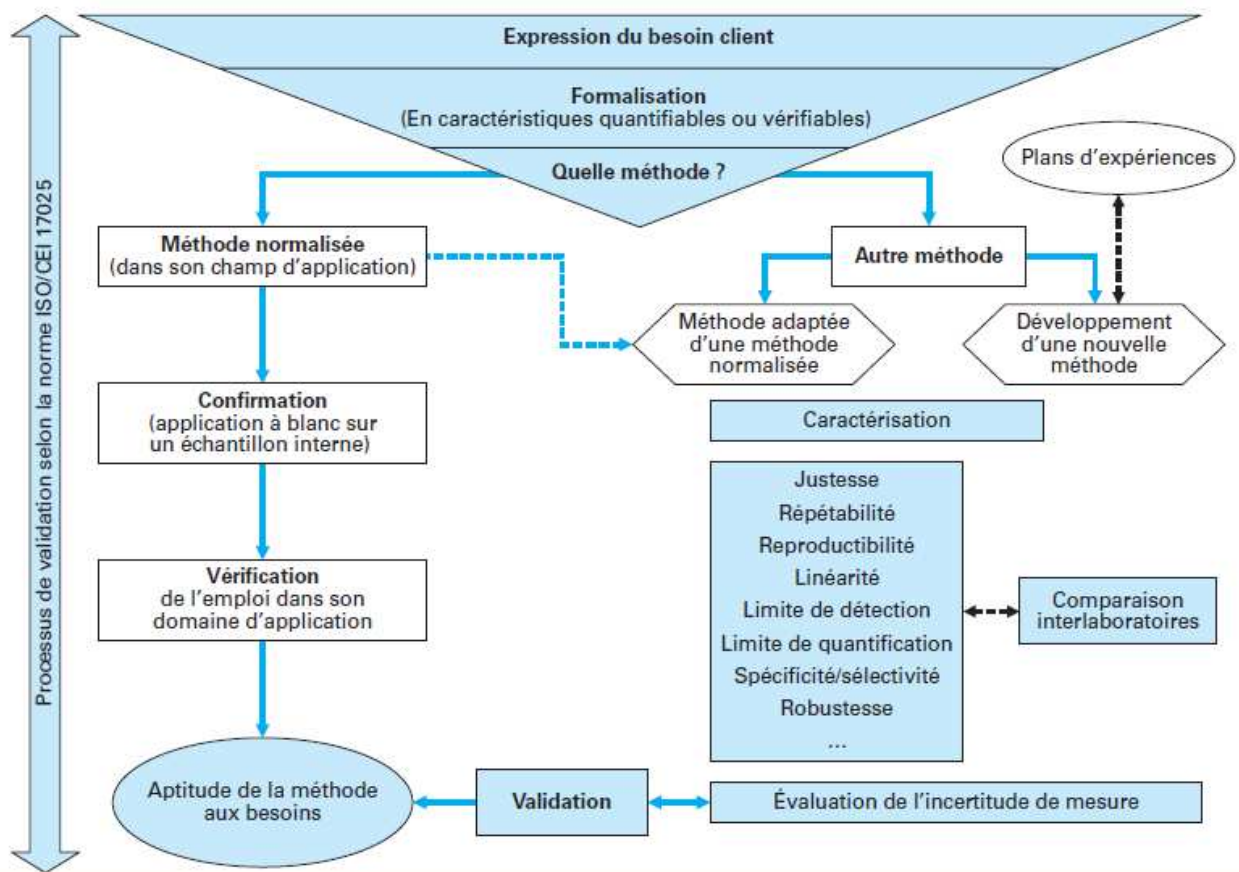
- Adapter une méthode normalisée existante
- Développer une nouvelle méthode

²³ ISO 17025 :2005 , *op cit.*

Les méthodes normalisées n'ont pas à être validées, le laboratoire peut, avec l'accord du client, utiliser les méthodes publiées par des organismes techniques. Et pour ce qui est des méthodes non normalisées, ces dernières doivent être validées en respectant des caractéristiques, il s'agit de :

- la répétabilité ;
- la reproductibilité ;
- la justesse ;
- la linéarité ;
- la limite de détection/limite de quantification.

Figure 6 : Processus de validation d'une méthode d'essai (Norme ISO/CEI 17025)



Source : AMAROUCHE Soraya, technique de l'ingénieure, caractérisation d'une méthode de mesure : étape clé dans le processus de validation, SL 1040, 2010. France.

Le CDL se base sur une méthode d'essai normalisée. La norme qui lui sert de référence est la NA 5075²⁴, elle spécifie la méthode de détermination de la résistance à la compression d'éprouvettes de béton durci.

2.2.3. Incertitude de mesure

Les résultats des essais ne sont jamais certains, ils sont souvent entachés d'une incertitude sur la valeur que l'on annonce. Dans un processus de mesure, plusieurs facteurs peuvent influencer l'exactitude des résultats, parmi eux, le facteur humain, la dérive des équipements et la méthode de mesure. Il est nécessaire de quantifier cette incertitude pour utiliser les résultats, pour cela, il faut effectuer une estimation en appliquant des lois statistiques.

De nombreuses décisions sont prises en utilisant les résultats de mesure, par exemple la vérification de conformité, il est donc important qu'elles soient fiables et de qualité. L'incertitude est l'indicateur de cette fiabilité et assure ainsi la qualité des mesures.

3. CONCEPT D'INCERTITUDE DE MESURE

3.1. Définition

La définition du terme « incertitude de mesure » fait l'objet d'un consensus international. Celle-ci figure dans le VIM : c'est « Paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées »

On peut également traduire l'incertitude comme étant un paramètre, associé à un résultat de mesure, qui caractérise l'ensemble des valeurs au sein duquel doit se trouver la valeur vraie avec une probabilité déterminée.

Remarque 1 : Le paramètre peut être, par exemple, un écart-type (ou un multiple de celui-ci) ou la demi-largeur d'un intervalle de niveau de confiance déterminé.

Remarque 2 : L'incertitude de mesure comprend, en général, plusieurs composantes. Certaines peuvent être évaluées à partir de la distribution statistique des résultats de séries de mesurages et peuvent être caractérisées par des écarts-types expérimentaux. Les autres

²⁴ NA 5075, 2006, Essai pour béton durci – Résistance à la compression des éprouvettes.

composantes, qui peuvent aussi être caractérisées par des écarts-types, sont évaluées en admettant des lois de probabilité, d'après l'expérience acquise ou d'après d'autres informations. L'incertitude de mesure n'implique pas un doute affectant la validité de la mesure, au contraire la connaissance de l'incertitude implique une confiance accrue dans la validité du résultat de la mesure.

3.2. Erreur et incertitude

Il est important de ne pas confondre entre « erreur » et « incertitude », ce sont deux concepts différents. L'incertitude est une quantification du doute que l'on a sur le résultat de mesure. Elle décrit la fourchette dans laquelle il y a une forte probabilité que la valeur « vraie » se situe.

L'erreur quant à elle est définie comme étant la différence entre un résultat individuel et la valeur exacte ou valeur vraie de la grandeur que l'on cherche mesurer. .

Généralement, on essaie de corriger les erreurs connues en appliquant des corrections, par exemple l'erreur de justesse d'un instrument sera corrigée en appliquant aux lectures la correction indiquée dans le certificat d'étalonnage. Confondre erreur et incertitude, c'est faire la même confusion qu'entre moyenne et écart type. Les erreurs modifient la moyenne, et l'incertitude est de même nature qu'un écart type, c'est un paramètre qui caractérise une dispersion.

Les causes d'erreur dans un processus de mesure sont partagées en deux types, à savoir une erreur aléatoire et une erreur systématique.

3.2.1. Les erreurs aléatoires

L'erreur aléatoire provient probablement des variations temporelles et spatiales non prévisibles ou stochastiques de grandeurs d'influence. Les effets de telles variations appelés effets aléatoires entraînent des variations pour les observations répétées du mesurande²⁵ .

- Bien qu'il ne soit pas possible de compenser l'erreur aléatoire d'un résultat de mesure, elle peut être réduite en augmentant le nombre d'observations.

²⁵ BIMP, *et al*, 2008, Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.

3.2.2. L'erreur systématique

Composante de l'erreur de mesure qui, dans des mesurages répétés, demeure constante ou varie de façon prévisible²⁶. Cependant, plusieurs causes peuvent être à l'origine de cette erreur : l'opérateur dans sa façon d'opérer, un appareil de mesure (déréglée), méthode expérimentale.

Deux caractéristiques importantes peuvent être attachées à ce type d'erreur²⁷ :

- L'erreur commise est toujours dans le même sens

Cela signifie en particulier qu'elle ne pourra jamais être éliminée en répétant plusieurs fois l'expérience dans les mêmes conditions. Cette remarque est très importante car une erreur systématique peut perdre son caractère pour peu que quelques paramètres changent dans le protocole opératoire.

- L'erreur commise peut être corrigée

Une erreur systématique est le résultat d'un défaut constant et connu. Elle est donc susceptible d'être détectée si une analyse approfondie de l'ensemble du protocole opératoire est effectuée. A l'issue de cet examen, les erreurs détectées seront alors traitées pour éliminer leur rôle.

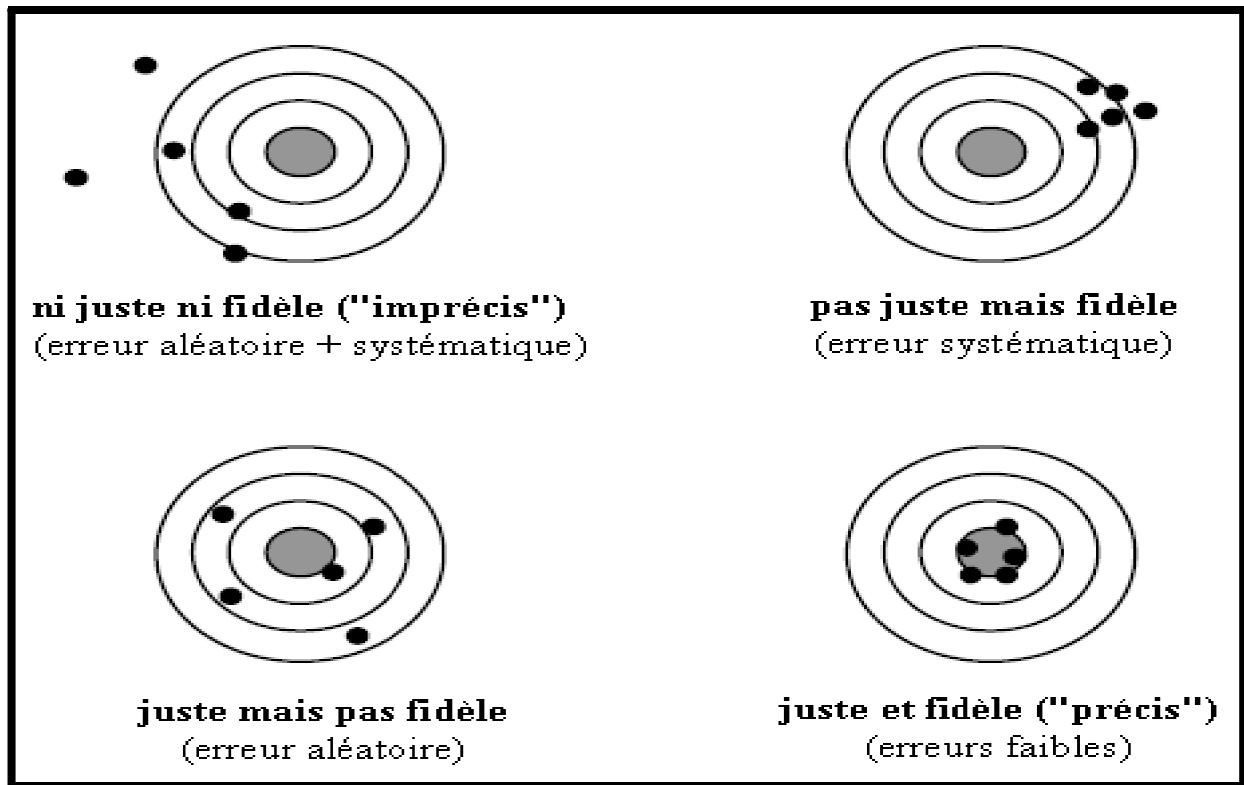
- L'erreur systématique d'un résultat de mesure ne peut être réduite en augmentant le nombre d'observations, mais par l'application d'une correction.

On peut illustrer ces notions d'erreurs systématique et aléatoire par le tir dans une cible.

²⁶ BIPM, *et al*, VIM, *op cit*.

²⁷ JOURNAUX Roger, 2009, P. 52, traitement des mesures interprétation, modélisation, outil statistique, Edition Ellipses. France.

Figure 7 : Rôles des erreurs aléatoires et systématiques



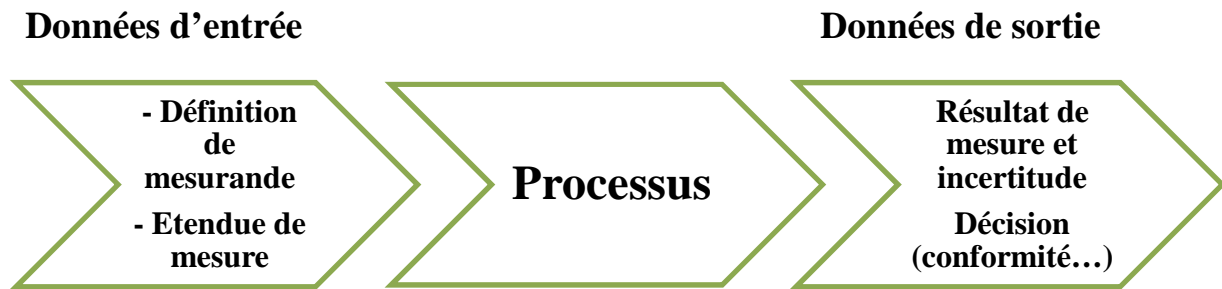
Source : EDUSCOL, Ressources pour le cycle terminal général et technologique, Mesures et incertitudes, 2012.

- **La fidélité** est la faculté d'un instrument à donner des mesures répétables. Un résultat d'une telle mesure est plus ou moins précis selon que les erreurs aléatoires sont plus ou moins faibles.
- **La justesse** est la faculté d'un instrument à donner des mesures dont la moyenne est proche de la valeur vraie. Elle représente la reproductibilité d'un instrument dont les erreurs systématiques sont mises jeu.

3.3. Identification des sources d'incertitudes

Un processus de mesure est comme tous les processus, il transforme des éléments d'entrée en éléments de sortie.

Figure 8 : Processus de mesure



Source : Elaboré par nous-mêmes

Tout processus de mesure est entaché d'erreurs appelées « facteurs d'influence » qui proviennent de différentes sources possibles. Ces facteurs d'influence sont dus à : la méthode de mesure, les conditions d'environnement, méthode d'échantillonnage, la fiabilité des appareils de mesure, mesurande mal défini

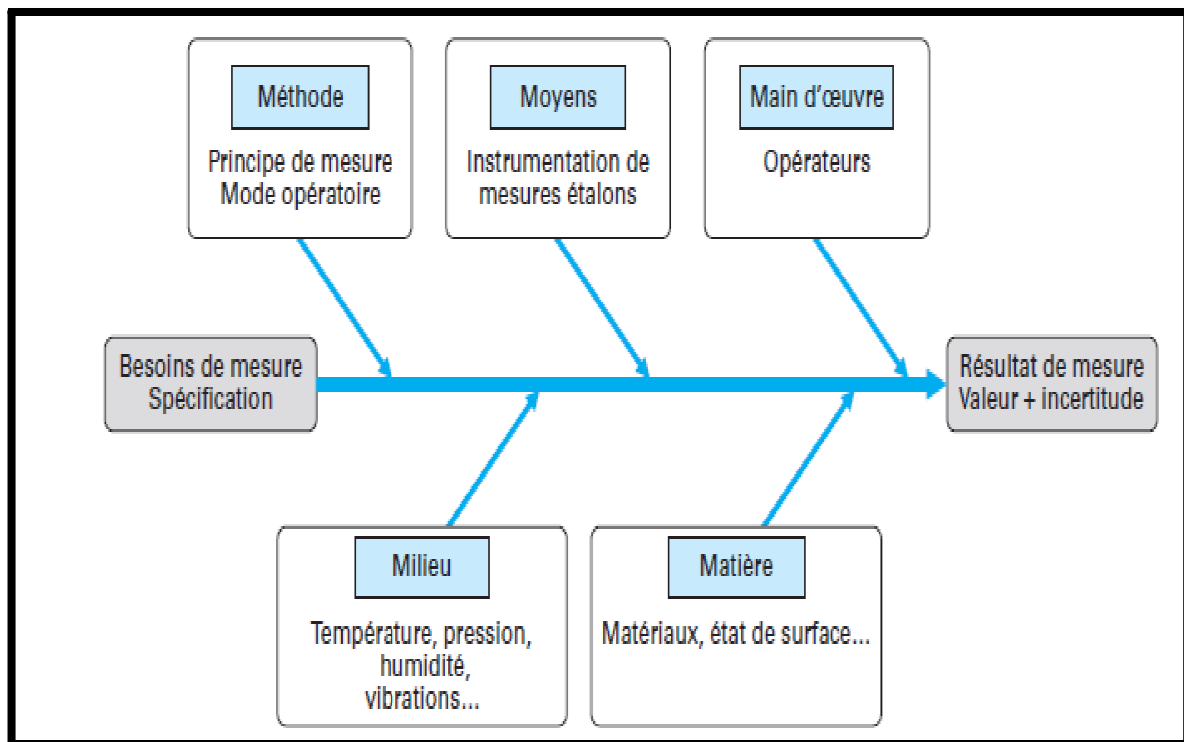
Afin d'identifier les causes potentielles d'incertitudes, il existe un outil dit « Diagramme d'Ishikawa »²⁸ ou « diagramme de causes et effets » ou encore 5M. Cette méthode consiste à rechercher l'ensemble des causes possibles à l'origine d'une défaillance ou d'un défaut classées en 5 catégories et représentées graphiquement sous la forme d'un diagramme en d'Ishikawa appelé diagramme arrête de poisson en raison de sa graphie.

La technique des "5 M" permet, à partir d'une réflexion approfondie et d'une très bonne connaissance du processus de mesurage, de recenser toutes ces causes²⁹.

²⁸ Le diagramme d'ISHIKAWA, ou diagramme de cause à effet, est une représentation structurée de toutes les causes qui conduisent à une situation.

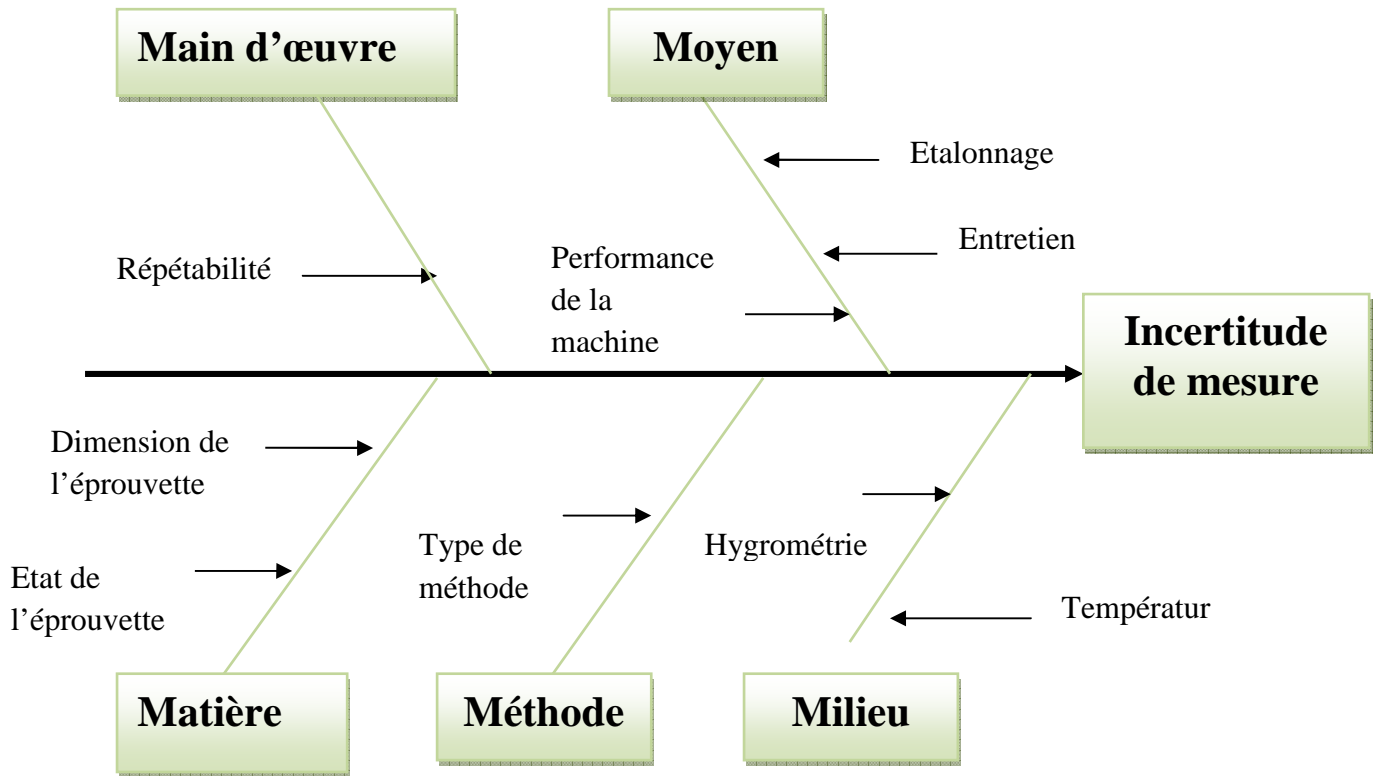
²⁹ Guide pratique d'utilisation pour l'estimation de l'incertitude de mesure des concentrations en polluants dans l'air ambiant, 2006, partie 1 : généralités, version 5.

Figure 9 : Processus de mesure (Méthode 5M)



Source : FARGIER Eric, PRIEL Marc, techniques de l'ingénieur, Organisation d'un laboratoire d'étalonnage, r1215, 2007. Paris, France.

Figure 10 : les sources d'incertitudes de l'essai « Résistance à la compression des éprouvettes de béton »



Source : Elaboré par nous-mêmes.

CHAPITRE 3 :

**Estimation de l'incertitude de mesure des
résultats de l'essai**

1. DESCRIPTION DE LA METHODE D'ESSAI (NORME NA 5075 :2006)

La méthode d'essai adoptée au niveau du CDL est une méthode normalisée suivant la norme NA 5075³⁰, elle spécifie la méthode de détermination de la résistance à la compression des éprouvettes de béton.

1.1. Objectif de l'essai

L'essai a pour but de connaître la résistance à la compression du béton mesurée dans le CDL sur des éprouvettes.

1.2. Principe de l'essai

- Soumettre l'échantillon d'éprouvettes à une charge croissante jusqu'à rupture.
- Calculer la résistance à la compression.

1.3. Les équipements nécessaires pour réaliser l'essai

- Machine d'essais mécaniques ou presse de capacité 3 000 kN, asservie en force avec logiciel de pilotage, conforme à la norme NA 5076 :2006³¹.
- Gabarit de centrage pour éprouvette cylindrique ou cubique.

1.4. Mode opératoire

1.4.1. Caractéristiques des échantillons

Echantillons cylindriques ou cubiques issus de la même gâchée.

³⁰ NA 5075, 2006, *op cit.*

³¹ NA 5076, 2006, Essais pour béton durci – Résistance en compression – Caractéristiques des machines d'essai

1.4.2. Préparation de surface

Dans le cas d'éprouvettes cylindriques les surfaces d'appuis nécessitent une préparation. Il existe plusieurs modes : le surfaçage (utilisant le ciment calcium-alumineux), la rectification, le surfaçage (méthode au mortier de soufre) et le surfaçage (méthode des boîtes à sable. Le mode disponible au CDL est la rectification, cette technique est décrite dans l'instruction de travail de la rectifieuse en « **Annexe C** »

1.4.3. Déroulement de l'essai

1.4.3.1. Préparation et positionnement des éprouvettes

Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai. Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui seront en contact avec eux.

Enlever tout appareillage, autre que les plateaux auxiliaires ou éléments d'espacement entre l'éprouvette et les plateaux de la machine d'essai.

Positionner les éprouvettes cubiques de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage.

Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur avec une précision de ± 1 % de la dimension nominale pour les éprouvettes cubiques ou du diamètre pour les éprouvettes cylindriques.

Si des plateaux auxiliaires sont utilisés, les aligner avec la face supérieure et la face inférieure de l'éprouvette.

Avec des machines d'essai à deux colonnes, il convient de placer la surface moulée des éprouvettes cubiques en face de l'un des montants.

1.4.3.2. Mise en charge

Vérifier que le logiciel de pilotage soit configuré pour effectuer un asservissement en force.

Calcul de la surface A_C : en mm² :

- Echantillon cylindrique :

$$A_C = \frac{(\pi * D^2)}{4} \quad \text{Équation 1}$$

Avec D : le diamètre de l'éprouvette

- Echantillon cubique:

$$A_C = 6 * a^2 \quad \text{Équation 2}$$

a : étant la longueur d'une arête.

Sélectionner une vitesse constante de chargement dans la plage 0,2 MPa/s (N/mm². s) à 1,0 MPa/s (N/mm². s).

Appliquer la charge sans choc et l'accroître de façon continue à la vitesse constante sélectionnée ± 10 % jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La charge maximale doit être enregistrée.

1.4.3.3. Démarrer l'essai à l'aide du logiciel de pilotage.

1.4.3.4. Relever la valeur de la charge à la rupture F et vérifier la valeur de résistance f_c indiquée par le logiciel en divisant la force F par la section de l'éprouvette A_C

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_C} \quad \text{Équation 3}$$

Avec :

f_c : est la résistance en compression, exprimée en méga pascals (Newtons par millimètres carrés) ;

F : est la charge maximale, provoquant la rupture de l'éprouvette, exprimée en Newtons ;

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

1.4.3.5. Nettoyer le matériel

1.4.4. Expression des résultats

La résistance à la compression d'une gâchée doit être déterminée à l'aide d'au moins trois éprouvettes.

L'incertitude de mesure de la presse est indiquée dans le certificat d'étalonnage.

2. EVALUATION DE L'INCERTITUDE DE MESURE DE L'ESSAI

L'évaluation de l'incertitude de mesure est une exigence de la norme ISO/CEI 17025 : 2005, (chapitre 5.4.6.2)

« Les laboratoires d'essais doivent aussi posséder et appliquer des procédures pour estimer l'incertitude de mesure. ».

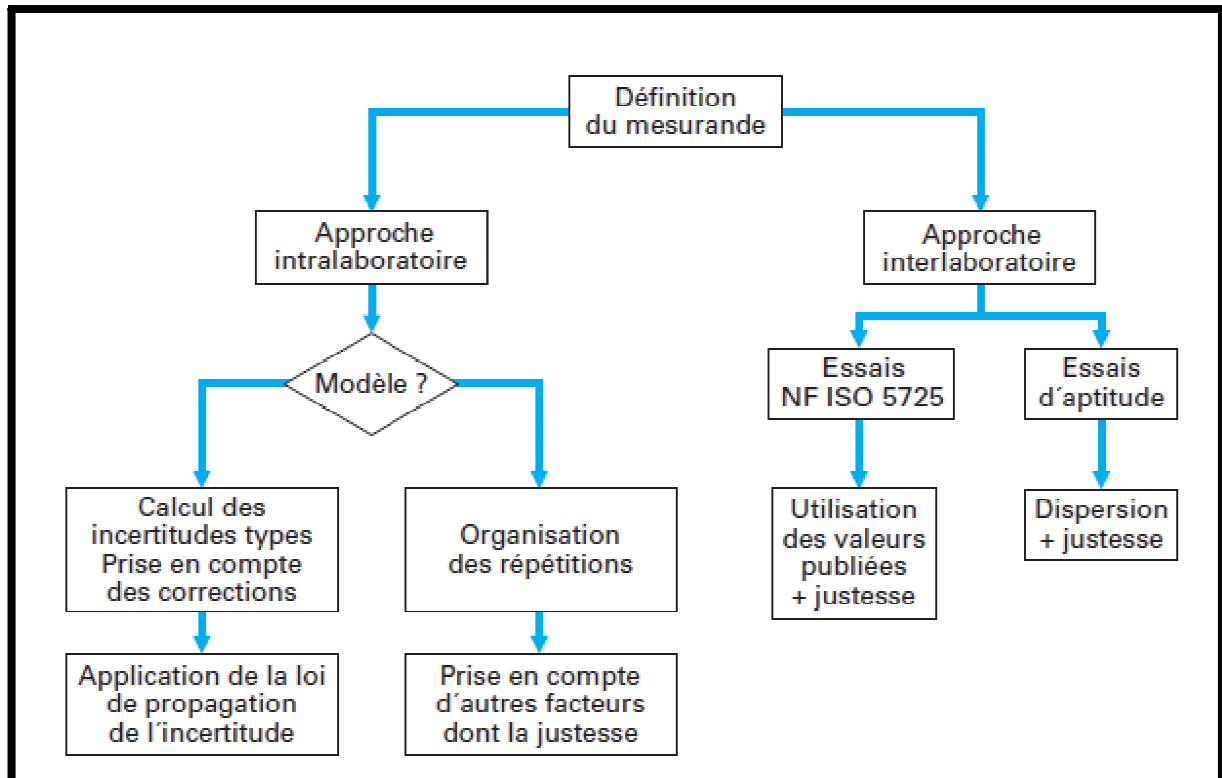
2.1. Méthodes d'évaluation des incertitudes de mesure

Il existe différentes méthodes pour évaluer l'incertitude de mesure³²:

- **approches intralaboratoire** : le laboratoire est seul et va utiliser ses propres données pour évaluer l'incertitude de ses résultats.
- **approche interlaboratoire** : un travail collaboratif entre plusieurs laboratoires, en mettant en commun leurs données afin d'évaluer l'incertitude.

³² <http://www.bivi.metrologie.afnor.org/ofm/metrologie/iii/iii-20/iii-20-12> (consultation- 29/05/2015)

Figure 11 : Approche Interlaboratoire et Intralaboratoire



Source : DÉSENFANT Michèle, PRIEL Marc, RIVIER Cédric, technique de l'ingénieur, évaluation des incertitudes des résultats d'analyse, p 105, 2005. Paris, France.

2.1.1. L'approche intralaboratoire

L'approche interlaboratoire se subdivise de la manière suivante :

2.1.1.1. Approche analytique

Procédure proposée dans le GUM. L'expression de l'incertitude repose sur l'écriture d'un modèle physique puis l'application de la loi de propagation des incertitudes ou de la propagation des distributions.

2.1.1.2. Approche « caractéristiques de la méthode »

Elle consiste à composer les incertitudes estimées à partir des caractéristiques de la méthode : répétabilité, linéarité, robustesse, contamination ...

Utilisation des données de validation de la méthode.

2.1.2. L'approche interlaboratoire

L'approche interlaboratoire se subdivise de la manière suivante :

2.1.2.1. Approche « performance de la méthode » (ISO 5725 et FD ISO/TS 21748)

Il s'agit d'utiliser les valeurs de fidélité (répétabilité / reproductibilité) d'une méthode publiées à l'issue d'une comparaison interlaboratoire, où tous les laboratoires mettent en œuvre la même méthode.

2.1.2.2. Approche « essais d'aptitude » (NF ISO 17043 et NF ISO 13528)

Cette approche consiste à utiliser les résultats d'intercomparaisons pour déterminer la performance d'un laboratoire. Ce dernier doit simplement réaliser une mesure avec un échantillon de référence, un organisme se charge de toute la logistique pour que la comparaison interlaboratoire se déroule dans les mêmes conditions pour les différents laboratoires.

2.2. Evaluation de l'incertitude des résultats d'essai

Le document servant de référence pour l'évaluation de l'incertitude de mesure de l'essai « Résistance en compression d'éprouvette de béton » est le guide GUM³³ (approche intra laboratoire). Il propose une démarche d'estimation en quatre (04) étapes, ces étapes sont résumées de façon simplifiée ci-dessous :

- **La modélisation du mesurage**

Cette étape consiste à définir la valeur à mesurer et les grandeurs qui interviennent dans le processus de mesure. Pour ce faire, une liste des sources potentielles d'incertitudes doit être dressée afin d'écrire une relation fonctionnelle reliant la valeur du mesurande aux paramètres dont il dépend, cette relation est exprimée sous forme d'un modèle mathématique décrivant le processus de mesurage.

³³BIMP, *et al*, 2008, Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.

- **Le calcul des composantes d'incertitudes**

Après avoir modélisé le processus, chaque source d'incertitude du modèle est estimée soit de façon statistique à partir d'observations répétées (évaluation de type A), soit au moyen d'autres sources d'informations, par exemple à partir des certificats d'étalonnage, de spécifications de constructeurs sur le matériel, des connaissances acquises ou de l'expérience (évaluation de type B).

- **Le Calcul de l'incertitude composée (Propagation des incertitudes)**

L'incertitude composée est obtenue par combinaison des composantes individuelles de l'incertitude en utilisant la loi de propagation des incertitudes. Les contributions doivent être exprimées sous forme d'écart-type appelés « incertitude-type ».

- **Expression du résultat de mesure et de son incertitude élargie U :**

Une fois l'incertitude-type composée est évaluée, une « incertitude élargie » sera calculée en multipliant l'incertitude-type par un facteur d'élargissement qui dépend du niveau de confiance requis. Généralement le facteur d'élargissement est fixé à 2, ce qui correspond à un niveau de confiance de 95%.

2.2.1. Etape 1 : modélisation du mesurage

Pour déterminer l'incertitude de mesure associée à un résultat, l'approche GUM part du principe qu'un modèle mathématique qui relie la valeur mesurée du mesurande aux différentes informations qui interviennent dans le processus doit être établi. Ces informations appelées aussi grandeurs d'entrées peuvent être, par exemple, des instruments de mesure utilisés, des corrections d'erreurs systématiques, des valeurs de constantes physiques...

Le modèle mathématique s'écrit comme suit :

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$$

Équation 4

x_i : Grandeurs d'entrée

Y : Mesurande (grandeur de sortie)

Chacune des grandeurs ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$) est composée d'une incertitude-type notée $u(x_i)$. Les incertitudes-type sont obtenues à partir d'une loi des valeurs possibles de la grandeur d'entrée, cette loi de probabilité est basée soit, sur une série d'observation, on parlera alors d'évaluation de type A ou bien sur une loi à priori correspondant à une évaluation de type B.

❖ Modélisation du mesurage de l'essai

Le mesurande est la résistance à la compression sur éprouvettes de béton. La mesure est indirecte, elle est déterminée à partir de deux grandeurs:

- ✓ La force ;
- ✓ La surface de l'éprouvette

Le calcul de la résistance est donné par l'

Équation 3.

La surface de l'éprouvette : $A_C = \frac{(3,14 \cdot D^2)}{4}$

Le calcul de la résistance sera donné alors par l'équation suivante :

$f_c = \frac{4F * 10^3}{\pi D^2}$	Équation 5
-----------------------------------	-------------------

Le modèle mathématique est formulé comme suit :

$$f_c = f(F, D) \qquad \text{Équation 6}$$

2.2.2. Etape 2 : Le calcul des composantes d'incertitudes (Incertitudes-types)

2.2.2.1. Evaluation de type A

Nous allons supposer qu'une grandeur physique est mesurée un grand nombre de fois dans le but de réduire l'influence des erreurs aléatoires.

Le problème qui se pose alors dans l'évaluation de type A est le suivant : compte tenu des mesures effectuées, Quelle est la meilleure estimation que l'on puisse donner pour la grandeur inconnue ?

La solution est apportée par les Statistiques en calculant deux grandeurs essentielles à partir des résultats obtenus à savoir : un indice de tendance centrale, qui est le meilleur résumé de ce qu'on a obtenu, et un indice de dispersion qui conduit à la confiance qu'on peut accorder à l'indice précédent.

➤ Estimation de la moyenne

Soit $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ les résultats obtenus par l'opérateur en réalisant une série de mesures dans des conditions de répétabilité.

La moyenne arithmétique est obtenue par l'équation :

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad \text{Équation 7}$$

L'Équation 7 utilisée est considérée comme la meilleure estimation de la grandeur d'entrée x_i .

➤ Estimation de la variance

La valeur des observations individuelles x_i diffèrent en raison des variations aléatoires des grandeurs d'influences ou des effets aléatoires.

Etant donnée un échantillon de n mesures, il faut maintenant estimer l'indice de dispersion le plus utilisé « la variance »

La variance expérimentale des observations, qui estime la variance σ^2 de la loi de probabilité de x , est donnée par :

$$\sigma^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Équation 8}$$

Cette estimation de la variance et sa racine carrée $\sqrt{\sigma^2(x_i)}$, appelée **écart-type expérimental** caractérisent la variabilité des valeurs observées x_i ou, plus spécifiquement, leur dispersion autour de leur moyenne.

On prend $n - 1$ degrés de liberté car il y a n valeurs moins une corrélation (correspondant à la moyenne).

➤ **Variance de la moyenne**

Si on refait d'autres séries de n mesures les moyennes et les écarts-types auront des valeurs dispersées. Si l'on fait une étude statistique sur les moyennes obtenues on obtiendra une valeur de la variance qui sera forcément plus petite.

La meilleure estimation de la variance est :

$$\sigma^2(\bar{x}) = \frac{\sigma^2(x)}{n} \quad \text{Équation 9}$$

La variance de la moyenne donnée par l'

Équation 9 est appelée « écart-type expérimentale de la moyenne ».

Quand on a une série de valeurs ($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$) on n'a, a priori, pas de préférence pour une valeur plutôt qu'une autre. Si l'on en prend une au hasard comme estimation de la valeur du mesurande, l'incertitude associée sera $\sigma(x)$. En revanche, si l'on choisit la moyenne pour estimer la valeur du mesurande, l'incertitude associée $\sigma(\bar{x})$, est plus petite. C'est pourquoi on utilise la moyenne.

L'estimation de type A ne contient pas toute l'incertitude. Si chaque mesurage est fait avec le même instrument de mesure, l'incertitude sur l'instrument n'est pas incluse. En revanche, si

l'on en change à chaque fois, elle l'est. Dans le premier cas, il faut l'ajouter en prenant en compte par exemple les incertitudes liées à l'instrument de mesure.

L'évaluation de type A de l'incertitude, obtenue en répétant le même mesurage, devra être combinée avec les autres sources d'incertitudes. Il faut donc bien définir la frontière entre ce qui est pris en compte dans un mesurage et ce qui doit être ajouté par ailleurs.

2.2.2.2. Evaluation type B

Seules les incertitudes de type A sont susceptibles d'être traitées par des méthodes statistiques ont été jusqu'à présent prises en compte. Les incertitudes type B (systématiques) nécessitent une analyse particulière pour estimer leur valeur.

Dans tous les cas, il faut utiliser des données soit mesurées, soit données par le constructeur ou les certificats d'étalonnage. Cela signifie que la correction apportée au résultat est elle-même connue avec une incertitude qu'il faut chiffrer : c'est l'incertitude liée à une erreur systématique.

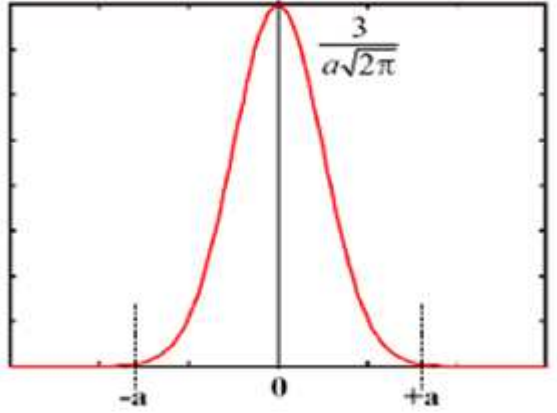
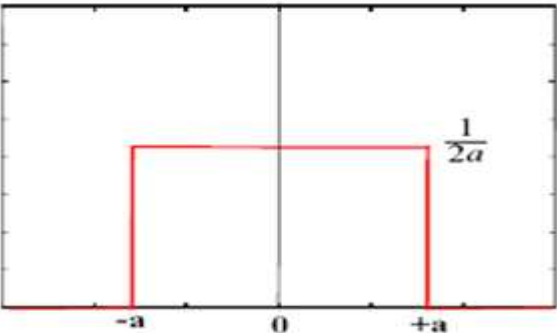
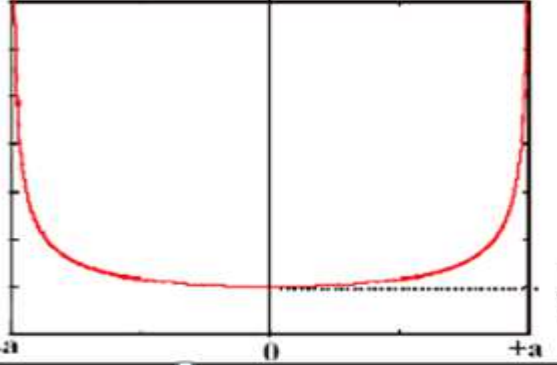
Les sources d'information pour estimer les incertitudes-types de type B sont multiples, l'ensemble des informations peut comprendre :

- Les résultats de mesures antérieurs,
- L'expérience ou la connaissance générale du comportement et des propriétés des matériaux et instrument utilisés,
- Les spécifications du fabricant,
- Les données fournies pour les certificats d'étalonnage,
- L'incertitude assignée à des valeurs de référence provenant d'ouvrages.

Pour arriver à exprimer l'incertitude de Type B sous forme d'un écart-type, il faut recourir à des lois de probabilité dont les plus employées sont rassemblées dans le tableau ci-dessous.

À noter qu'elles se rapportent ici à une distribution de valeurs d'une variable aléatoire de moyenne $\mu = 0$ et d'étendue $[-a; +a] = 2$

Tableau 4 : Lois de probabilité usuelles pour l'évaluation des incertitudes de Type B

Loi	Représentation graphique	Ecart-type
<p>Normale ou gaussienne</p> <p>$a = 3\sigma$</p>		$\frac{a}{3}$
<p>Uniforme ou rectangulaire</p>		$\frac{a}{\sqrt{3}}$
<p>Dérivée d'arc sinus</p>		$\frac{a}{\sqrt{2}}$

Source : www.optique-ingenieur.org (22/05/2015)

En « Annexe D », on trouvera un rappel des lois de probabilités contenant d'autres lois usuelles pour l'évaluation de l'incertitude type B.

❖ Exemple pour déterminer l'incertitude de type B : variation de température

La température de l'environnement (local, salle climatisée, etc.) est l'un des principaux facteurs d'influence de la mesure. Dans une salle climatisée telle que la salle d'essai mécanique du CDL tempérée à $20^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, la variation de température est de $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$, on considère que la loi de probabilité correspondante est rectangulaire, l'incertitude type est alors égale à : $\frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,11$.

2.2.2.3. Quantification des composantes d'incertitude de l'essai « Résistance à la compression »

Les sources d'incertitude liées à l'essai sont identifiées dans la Figure 10 du chapitre précédent.

2.2.2.3.1. Evaluation de l'incertitude type du diamètre de l'éprouvette (D)

La procédure de mesure du diamètre de l'éprouvette consiste à effectuer trois (03) mesures et calculer la moyenne.

Le diamètre dépend de quatre (04) sources d'incertitude :

- La répétabilité ;
- La reproductibilité ;
- Le certificat d'étalonnage du pied à coulisse (PAC) ;
- La température.

La formule de calcul de l'incertitude associée à la mesure du diamètre de l'éprouvette est la suivante :

$$u(D) = \sqrt{u^2(\text{rep}) + u^2(\text{repr}) + u^2(\text{pied à coulisse}) + u^2(\text{température})}$$

Tableau 5: les sources d'incertitude associées à la mesure du diamètre de l'éprouvette (D)

Source d'incertitude	Description	Type d'évaluation
$u^2(\text{rép})$	Incertitude de répétabilité de la mesure	Type A
$u^2(\text{pied à coulisse})$	incertitudes données par le certificat d'étalonnage $u^2(\text{pieds à coulisse}) = u^2(\text{étalonnage})$	Type B
$u^2(\text{température})$	Incertitude donnée par le certificat d'étalonnage $u^2(\text{température}) = u^2(\text{étalonnage})$	Type B
$u^2(\text{repro})$	Incertitude de reproductibilité de la mesure	Type A

Source : Elaboré par nous-mêmes.

2.2.2.3.2. Evaluation de l'incertitude type de la charge (F)

La charge sous laquelle l'éprouvette sera soumise dépend, elle aussi, de quatre (04) sources d'incertitudes, à savoir :

- La répétabilité ;
- La reproductibilité ;
- Le certificat d'étalonnage de la presse ;
- La température.

La formule de calcul de l'incertitude associée à la mesure de la charge est la suivante :

$$U(F) = \sqrt{u^2(\text{rép}) + u^2(\text{repro}) + u^2(\text{presse}) + u^2(\text{température})}$$

Tableau 6 : les sources d’incertitude associées à la mesure de la charge (F)

Source d’incertitude	Description	Type d’évaluation
$u^2(rep)$	Incertitude de répétabilité de la mesure	Type A
$u^2(presse)$	incertitudes données par le certificat d’étalonnage $u^2(presse) = u^2(étalonnage)$	Type B
$u^2(température)$	Incertitude donnée par le certificat d’étalonnage $u^2(température) = u^2(étalonnage)$	Type B
$u^2(repro)$	Incertitude de reproductibilité de la mesure	Type A

Source : Elaboré par nous-mêmes.

2.2.3. Etape 3 : Le Calcul de l’incertitude-type composée (Propagation des incertitudes)

A partir du modèle mathématique écrit dans l’étape 1 du processus de mesure :

$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N)$, et après avoir estimé les incertitudes individuelles des grandeurs d’entrée, dans l’étape qui suit, il faut calculer l’incertitude-type composée de Y noté $u(Y)$ suivant deux cas :

➤ **Grandeurs d’entrée non corrélées**

Lorsque toutes les grandeurs d’entrée $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ sont indépendantes, c’est à dire lorsque la covariance $u(x_i, x_j)$ et les coefficients de corrélation r_{ij} sont nuls, l’incertitude-type composée $u(y)$ la variance $u^2(y)$ donnée par :

$$u^2(Y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad \text{Équation 10}$$

Cette équation est appelée « loi de propagation des incertitudes ». Elle montre comment se composent les incertitudes $u(x_i)$ des grandeurs d'entrée x_i pour donner l'incertitude $u(Y)$ de la grandeur de sortie Y .

f : est la fonction donnée dans la modélisation du mesurage.

$u(x_i)$: incertitude-type sur x_i .

Les dérivées partielles $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ sont appelées coefficients de sensibilité. Elles décrivent comment varie l'estimation de sortie y en fonction des variations dans les valeurs des estimations d'entrée $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$.

Le coefficient de corrélation $r(x_i, x_j)$ est tel que $\frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)}$ où $u(x_i, x_j) = E[(x_i - \mu_i)(x_j - \mu_j)]$ (la covariance de x_i et x_j).

L'expression ci-dessus s'écrit également

Avec : $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$

$$u^2(Y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i) \quad \text{Équation 11}$$

➤ Grandeurs d'entrée corrélées

Lorsque les grandeurs d'entrée sont corrélées, c'est-à-dire que les covariances $u(x_i, x_j)$ et les coefficients de corrélation $r(x_i, x_j)$ ne sont pas nuls, l'équation est donnée par :

$$\begin{aligned}
 u^2(Y) &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \\
 &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)
 \end{aligned}$$

Équation 12

Les grandeurs d'entrée du processus de mesure de l'essai « résistance à la compression » sont indépendantes.

La résistance à la compression du béton est donné par :

$$f_c = \frac{4F * 10^3}{\pi D^2}$$

Et d'après la loi de propagation des incertitudes, on a :

$$u^2(f_c) = \sum_{i=1}^2 \left(\frac{\partial f_c}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i)$$

Équation 13

2.2.4. Etape 4 : Expression du résultat de mesure et de son incertitude élargie $U(Y)$

2.2.4.1. Notion d'incertitude élargie

Dans les étapes précédentes, nous avons modélisé la mesure d'une grandeur Y et calculé l'incertitude-type composée $u(Y)$ à partir des estimations l'incertitude-type de chaque grandeur d'entrée du processus de mesure.

L'intention de départ est de donner, autour du résultat d'une mesure, un intervalle dans lequel une large section des valeurs peut se trouver et qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande Y .

D'une façon générale, les résultats de mesure se répartissent autour d'une valeur moyenne correspondant à l'estimation la plus probable du mesurande. On peut définir un intervalle $[y - U(Y), y + U(Y)]$ tel que la probabilité P que la valeur mesurée appartienne à cet intervalle est $P = 1 - \alpha$ où :

- α est appelé seuil de confiance ($0 \leq \alpha \leq 1$) et
- $1 - \alpha$ niveau de confiance.

On définit ainsi un intervalle de confiance de largeur $\pm U$ autour de la valeur moyenne du mesurande.

L'incertitude élargie $U(Y)$ est calculée comme suit :

$$U(Y) = k \cdot u(Y) \qquad \text{Équation 14}$$

K : est le Facteur d'élargissement

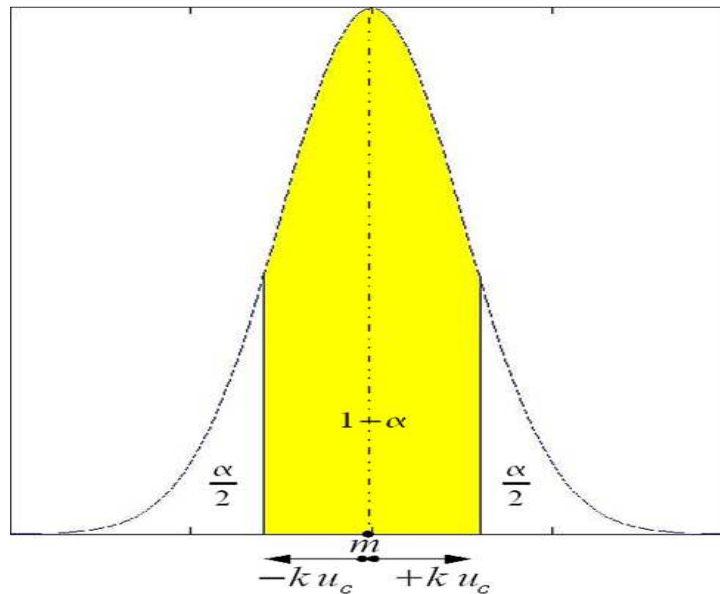
➤ Le choix d'un facteur d'élargissement

La valeur du facteur d'élargissement **K** est choisie sur la base du niveau de confiance requis pour l'intervalle $[y - U(Y), y + U(Y)]$ correspondant à un niveau de confiance particulier P . Pour obtenir ce facteur **k**, il est nécessaire d'avoir une connaissance de la loi de probabilité de la variable représentée par le résultat de mesure.

Si les résultats de mesure se répartissent suivant une loi normale autour de la valeur moyenne (cf. Figure 12), les valeurs respectives du facteur d'élargissement k et du niveau de confiance $1 - \alpha$ sont rassemblées dans le Tableau 7³⁴.

³⁴ http://www.optiqueingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M07_C01/co/Contenu_06.html
(consultation- 24/06/2015)

Figure 12 : Intervalle de confiance pour une loi normale



Source : http://www.optiqueingénieur.org/fr/cours/OPI_fr_M07_C01/co/Contenu_06.html
(consultation-22/05/2015)

Tableau 7 : valeurs usuelles du facteur d'élargissement

Facteurs d'élargissement K	Niveau de confiance $1-\alpha$
1	0,68
1,96	0,95
2	0,95
2,58	0,99
3	1

Source : http://www.optiqueingénieur.org/fr/cours/OPI_fr_M07_C01/co/Contenu_06.html
(consultation-22/05/2015)

Le plus souvent, on prend $K=2$ comme facteur d'élargissement ce qui correspond à un intervalle de confiance d'environ 95%.

2.2.4.2. Expression du résultat

Le résultat de mesure est exprimé de la façon suivante :

$$Y = y \pm U \text{ unités S.I.} \qquad \text{Équation 15}$$

Avec :

- **y**: valeur numérique du mesurande,
- **U** : incertitude élargie,
- **S.I** : unité de mesure traçable au Système Internationale d'Unité,
- **Y** : Mesurande (grandeur de sortie).

❖ Expression des résultats de l'essai

Le résultat de l'essai « résistance à la compression des éprouvettes de béton » est donné sous la forme :

$$f_c = \mathbf{f}_c \pm U \quad \text{MPa} \qquad \text{Équation 16}$$

Où :

- **f_c** : résultat de la résistance avec son incertitude,
- **f_c**: la moyenne des résistances obtenues des éprouvettes,
- **MPa (méga pascals)** : unité de mesure de la résistance à la compression,
- **U** : incertitude élargie.

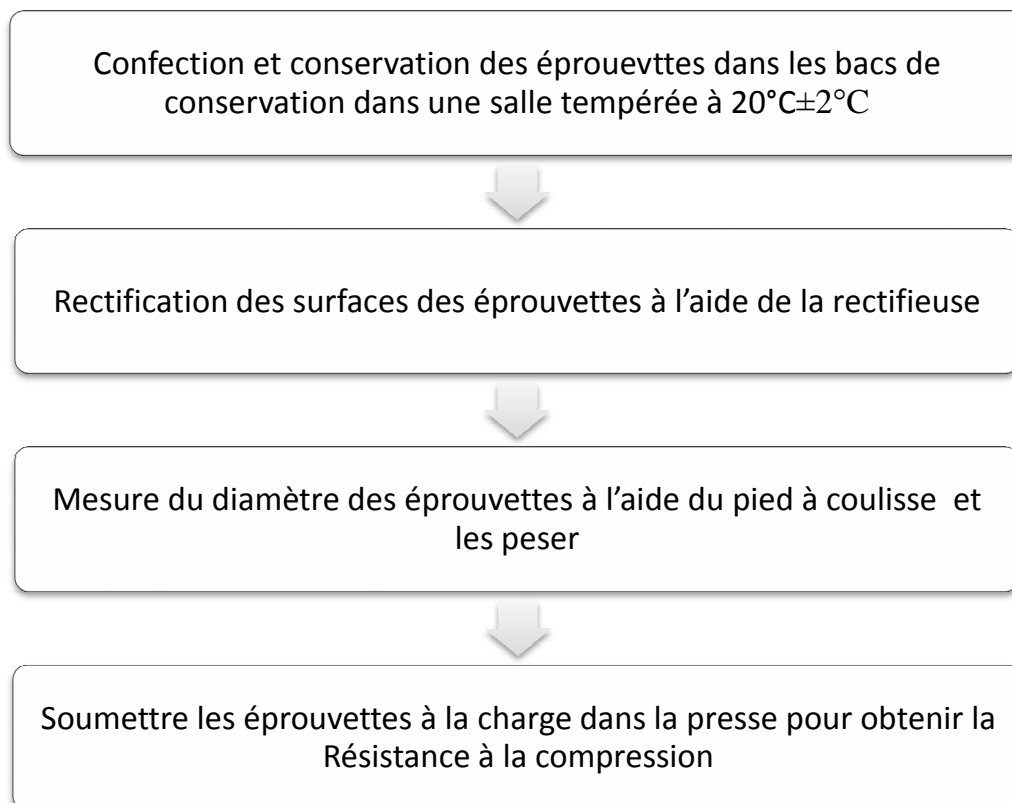
3. ESSAI EXPERIMENTAL

3.1. Etape 1 : modélisation du mesurage

Procédure

La préparation des éprouvettes pour l'essai résistance à la compression se compose des étapes suivantes :

Figure 13 : Préparation des éprouvettes pour l'essai résistance à la compression



Source : Elaboré par nous-mêmes

Calcul

- Le mesurande

La résistance à la compression est donnée par l'Équation 5.

- Identification et analyse des sources d'incertitudes

Les principales sources d'incertitude sont identifiées dans la Figure 10.

3.2. Etape 2 : Calcul des composantes d'incertitudes

Le but de cette seconde étape est de calculer les incertitudes- type pour chacun des paramètres qui affectent la valeur de la résistance.

Les valeurs obtenues lors de l'essai sont représentées en « **Annexe E** ».

Diamètre de l'éprouvette (D)

- Répétabilité :

Une série de 6 mesures de la dimension de l'éprouvette donne un écart-type de 0,547.

L'incertitude-type peut être calculée comme suit :

$$u(rep) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad u(rep) = \frac{0,547}{\sqrt{6}} = 0,223$$

- Reproductibilité

Pour effectuer un calcul de reproductibilité, le laboratoire a sélectionné 4 opérateurs, chacun effectuant une série de six (06) mesures. L'écart-type obtenu est de 0,193.

L'incertitude-type est calculée de la même manière que celle de la répétabilité :

$$u(repr) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad u(repr) = \frac{0,547}{\sqrt{4}} = 0,096.$$

- Etalonnage

Le certificat d'étalonnage du pied à coulisse (PAC) indique sur L=500mm I= ± 0 ,03mm.

On suppose que la distribution est rectangulaire. Pour obtenir l'incertitude $u(PAC)$, il faut diviser la valeur de 0,03 sur $\sqrt{3}$

$$u(PAC) = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \quad u(PAC) = \frac{0,03}{\sqrt{3}} = 0,017.$$

- Température

D'après le certificat d'étalonnage, le thermomètre a été étalonné à une température de 20°C, alors que la température de la salle mécanique varie entre les limites de ± 0,3°C.

Nous allons calculer l'incertitude-type en supposant que la distribution est rectangulaire, c'est-à-dire :

$$u(T^\circ) = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \quad u(T^\circ) = \frac{0,3}{\sqrt{3}} = 0,173.$$

Les quatre contributions sont combinées pour donner l'incertitude type $u(D)$ du diamètre de l'éprouvette

$$u(D) = \sqrt{0,223^2 + 0,096^2 + 0,017^2 + 0,173^2} = 0,297.$$

La force (F)

- Répétabilité

Une série d'écrasement de 6 éprouvettes donne un écart-type de 18,092

L'incertitude type est de :

$$u(rep) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad u(rep) = \frac{18,092}{\sqrt{6}} = 7,387$$

- Reproductibilité

Comme dans le cas précédent, les quatre (04) opérateurs effectuent une série de six (06) écrasements. L'écart-type obtenu est de 10,096.

L'incertitude-type est calculée de la même manière que celle de la répétabilité :

$$u(repr) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad u(repr) = \frac{10,096}{\sqrt{4}} = 5,048$$

- Etalonnage

Le certificat d'étalonnage de la presse indique pour une charge allant jusqu'à 3000Kn

- $\pm 0,18$ pour la répétabilité
- $\pm 0,84$ pour la justesse
- $\pm 0,12$ pour la résolution

Nous allons utiliser une distribution normale pour convertir la contribution de la répétabilité et une distribution rectangulaire pour la justesse et la résolution, les incertitudes –type sont calculées comme suit :

$$u(rep) = \frac{a}{3} = \frac{0,18}{3} = 0,06$$

$$u(justesse) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,84}{\sqrt{3}} = 0,484$$

$$u(resolution) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,12}{\sqrt{3}} = 0,069$$

En faisant la somme des résultats des incertitudes, on obtient une incertitude –type étalonnage :

$$u(etalonnage) = \sqrt{0,06^2 + 0,484^2 + 0,069^2} = 0,490$$

- Température

La température a été prise en compte précédemment dans la dimension, l'incertitude est calculée de la même manière, puisque la variation est de $\pm 0,3^\circ\text{C}$

$$u(T^\circ) = 0,173$$

Répétabilité de la résistance

L'incertitude type de la répétabilité de la résistance obtenue est :

$$u(rep) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad u(rep) = \frac{0,906}{\sqrt{6}} = 0,370$$

Bilan des incertitudes

Tableau 8 : bilan des incertitudes

variable	Sources d’incertitude		Type d’évaluation	Distribution	Formule u(x)	Incertitude -type
Diamètre de l’éprouvette D	Répétabilité		A	Normale	$u(x) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	0,223
	Reproductibilité		A	Normale	$u(x) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	0,096
	Etalonnage		B	Rectangulaire	$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$	0,017
	Température		B	Rectangulaire	$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$	0,173
$u(D) = \sqrt{(0,223)^2 + (0,096)^2 + (0,017)^2 + (0,173)^2} = 0,297$						
La Force F	Répétabilité		A	Normale	$u(x) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	7,387
	Reproductibilité		A	Normale	$u(x) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	5,048
	Etalonnage	Répétabilité	B	Normale	$u(x) = \frac{a}{3}$	0,06
		Justesse	B	Rectangulaire	$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$	0,484
		Résolution	B	Rectangulaire	$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$	0,069
Température		B	Rectangulaire	$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}}$	0,173	
$U(F) = \sqrt{(7,387)^2 + (5,048)^2 + (0,490)^2 + (0,173)^2} = 8,962$						

Source : Elaboré par nous-mêmes

3.3. Etape 3 : calcul de l'incertitude-type composée

$$f_c \text{ est donnée par : } f_c = \frac{4F^*}{\pi D^2} \text{ [MPa]}$$

Les valeurs des paramètres dans cette équation, leurs incertitudes-type et leurs incertitudes relatives sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau 9 : Valeurs et incertitudes pour la résistance

	Description	Valeur x	Incertitude-type $u(x_i)$	Incertitude-type relative $u(x_i)/x$
<i>rep</i>	Répétabilité	29,625	0,370	0,012
<i>D</i>	Dimension de l'éprouvette	159,636	8,962	0,056
<i>F</i>	Charge	592,483	0,297	5,012

Source : Elaboré par nous-mêmes

La composante prédominante de l'incertitude provient de l'incertitude sur la Force (**F**).

A l'aide des valeurs données ci-dessus :

$$f_c = \frac{4 \cdot 592,483 \cdot 10^3}{\pi \cdot 159,636^2} = 29,61 \text{ MPa}$$

Les incertitudes types sont utilisées de la manière suivante :

$$\frac{u(f_c)}{f_c} = \sqrt{\left[\frac{u(rep)}{rep}\right]^2 + \left[\frac{u(F)}{F}\right]^2 + \left[\frac{u(D)}{D}\right]^2}$$

$$\frac{u(f_c)}{f_c} = \sqrt{0,00015^2 + 0,0002^2 + 0,000034^2} = 0,018$$

$$u(f_c) = 29,636 \cdot 0,018 = 0,533$$

3.4. Expression du résultat de mesure de la Résistance

L'incertitude élargie $U(Y)$ est obtenue en multipliant l'incertitude type composée $u(f_c)$ par un facteur d'élargissement égale à 2, ce qui donne :

$$U(Y) = 2 * 0,533 = 1,066$$

Ainsi la résistance à la compression des éprouvettes de béton est :

$$f_c = 29,61 \pm 1,06 \text{ MPa} \text{ Avec un niveau de confiance de } 95\%$$

CONCLUSION GENERALE

Ce travail présente, les résultats de recherches effectuées sur l'estimation des incertitudes de mesures liées à l'essai « Résistance à la compression des éprouvettes de béton », dans le cadre du projet accréditation du Laboratoire de Développement de la Construction (CDL) du Groupe Lafarge-Algérie. Le lecteur doit retenir que la vraie valeur d'une mesure ne peut jamais être exacte, celle-ci est toujours entachée d'erreurs.

Évaluer l'incertitude sur une mesure est un domaine complexe qui fait l'objet d'une branche complète : la métrologie³⁵. L'objectif de cette évaluation est d'associer une incertitude à une valeur estimée, pour ce faire, il est essentiel de bien connaître le processus de mesure. La détermination des résultats d'essais mécaniques réalisés sur les matériaux de construction n'échappe pas à cette règle, puisque des facteurs tels que : les conditions ambiantes, l'opérateur, l'instrument de mesure ... engendrent des erreurs qui influencent les résultats des essais. Il est alors indispensable d'évaluer ces erreurs pour garantir la fiabilité et la qualité des résultats d'essais.

Il existe plusieurs méthodes pour estimer les incertitudes de mesures, une méthode analytique Guide pour l'Expression des Incertitudes de mesure (GUM) est celle utilisée dans ce mémoire pour estimer l'incertitude sur l'essai « Résistance à la compression des éprouvettes de béton ». La méthode est structurée en quatre (04) étapes :

- Etape 1 : La modélisation du mesurage ;
- Etape 2 : Le calcul des composantes d'incertitudes ;
- Etape 3 : Le Calcul de l'incertitude composée (Propagation des incertitudes) ;
- Etape 4 : Expression du résultat de mesure et de son incertitude élargie U .

Ces étapes ont été appliquées dans un essai expérimental réalisé sur un échantillon d'éprouvettes de béton dans le chapitre 3. Le résultat final du calcul de la résistance à la compression a été obtenu avec une incertitude de $\pm 3,58\%$ de la valeur estimée avec un niveau de confiance de 95% ce qui correspond à un résultat conforme par rapport aux limites déterminées dans les normes techniques relatifs au essai sur béton qui est de l'ordre de 5%.

Par conséquent, pour le traitement des causes d'erreurs dans le processus de mesure, nous recommandons au laboratoire d'utiliser le Diagramme de Pareto, un outil qualité performant basé sur le principe du 20/80 qui stipule que : 20% des causes possibles produisent à elles

³⁵ <http://www-physique.u-strasbg.fr/~udp/articles/Courssurlesincertitudes.pdf> (Consultation- 28/06/2015)

CONCLUSION GENERALE

seules 80% des effets. Il suffit donc de travailler sur 20% des causes pour éliminer 80% des effets et réduire l'incertitude.

Pour conclure, il est essentiel de ressortir que le Guide pour l'Expression des Incertitudes de mesure (GUM) spécifie entre autres que :

« L'évaluation de l'incertitude n'est ni une tâche routinière, ni purement mathématique; cela dépend de la connaissance détaillée de la nature du mesurande et de la mesure. La qualité et l'utilité de l'incertitude indiquée pour le résultat d'une mesure dépendra finalement de la compréhension, de l'analyse critique et de l'intégrité de ceux qui contribuent à l'assignement de sa valeur »³⁶.

³⁶ BIPM *et al.* GUM, 2008, *op cit*

SOURCES ET REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **Ouvrages**

AUTHOUART Frédéric, LE DUFF Ronan, 2014, P.105, La métrologie ? Mais c'est très simple, Edition print book. France.

BRANGER Alain, MARIE RICHER Madeleine, ROUSTEL Sébastien, 2007, P.63, Alimentation, sécurité et contrôles microbiologiques, Edition : Educagri. France.

JOURNAUX Roger, 2009, P. 52, nombre de pages traitement des mesures interprétation, modélisation, outil statistique, Edition Ellipses. France.

SUBILA-ROUGE Liliane, 2000, P.144, Aspects juridiques de l'audit environnemental, Edition : librairie Droz. Suisse.

- **Revues**

AMAROUCHE Soraya, technique de l'ingénieure, caractérisation d'une méthode de mesure : étape clé dans le processus de validation, SL 1040, 2010. France.

DÉSENFANT Michèle, PRIEL Marc, RIVIER Cédric, technique de l'ingénieure, evaluation des incertitudes des résultats d'analyse, p 105, 2005. Paris, France.

EDUSCOL, Ressources pour le cycle terminal général et technologique, Mesures et incertitudes, 2012.

FARGIER Eric, PRIEL Marc, techniques de l'ingénieur, Organisation d'un laboratoire d'étalonnage, r1215, 2007. Paris, France.

Guide pratique d'utilisation pour l'estimation de l'incertitude de mesure des concentrations en polluants dans l'air ambiant, 2006, partie 1 : généralités, version 5.

RAMFUL Khemraj, Maurice, SEILER Eberhard, Gestion de la qualité des exportations, Métrologie légale et commerce international, Bulletin N° 74, Juin 2004. Suisse.

William Thomson, Lord Kelvin alias, dans la leçon sur : unités électriques de mesure, publié en conférences populaires, Vol. I, 1883.

- **Textes officiels**

BIPM, JCGM, CEI, FICC, ILAC, ISO, OIML, UICPA et UIPPA, 2012, Vocabulaire international de métrologie – Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM), 3^e Edition, Genève.

BIMP, CEI, FICC, ILAC, ISO, OIML, UICPA et UIPPA, 2008, Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.

ISO 17025 :2005, exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.

ISO 17000 :2004 , Évaluation de la conformité -Vocabulaire et principes généraux.

ISO 8402:1994 Management de la qualité et assurance de la qualité –Vocabulaire.

NA 5075, 2006, Essai pour béton durci – Résistance à la compression des éprouvettes.

NA 5076, 2006, Essais pour béton durci – Résistance en compression – Caractéristiques des machines d'essai.

Organisation Internationale de Métrologie Légale (OIML), 2013, Vocabulaire international des termes de métrologie légale. France.

- **Webographie**

www.algerac.dz (consultation-20/03/2015)

<http://www.bivi.metrologie.afnor.org/ofm/metrologie/iii/iii-20/iii-20-12>(consultation-29/05/2015)

http://www.bogmisailac.org/index.php?p=1_124(consultation-21/05/2015)

www.iso.org. (consultation-04/04/2015) (consultation 06/04/2015)

www.lafarge.com. (consultation- 22/03/2015)

<http://www.mpq-electronique.fr/page30.php>, (consultation-05/06/2015)

www.optique-ingenieur.org (consultation-22/05/2015)

http://www.optiqueingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M07_C01/co/Contenu_06.html consultation
(20/05/2015)

<http://www-physique.u-strasbg.fr/~udp/articles/Courssurlesincertitudes.pdf>(Consultation-
28/06/2015)

LISTE DES ANNEXES


Annexe A : « Fiche signalétique et fiche de vie de la Presse »

Annexe B : « Instruction de travail de la presse »


Annexe C : « Instruction de travail de la Rectifieuse 3R »

Annexe D : «Rappel sur les lois de probabilités usuelles »

Annexe A : « Fiche signalétique et fiche de vie de la Presse »

		Fiche signalétique			
CDL	DC-QU-001	V.02			1/1
Fiche N°	FS-PRE-001	N° Identification	PRE-001	Appareil	Presse
Marque Type N° Série Modèle				Fonction	Compression du béton
				Localisation	Salle essai mécanique
Fournisseur :					
Garantie : <input type="checkbox"/> Oui : <input type="checkbox"/> Hors garantie à l'acquisition					
N° du contrat de maintenance					
Date de réception :			Date de mise en service :		
Etat de réception : Neuf <input type="checkbox"/> Reconditionn <input type="checkbox"/>					
Occasion <input type="checkbox"/> Autre <input type="checkbox"/>					
Contrat SAV					
Recommandations particulières : (sécurité et précaution particulières)					
Documentation :			Emplacement :		
- Notice d'utilisation - Fiche de vie FV-PRE-001					
Consommables :					
Métrologie :					

Annexe B : « Instruction de travail de la presse »

	Procédure qualité	Ref: INS-R-BE-002
		Rév: V.0
Date de création : 13- mai -2015	Instruction de travail Presse 3R	Page: 7

1. Objet

Ce document décrit l’instruction de travail à appliquer pour l’utilisation de la presse 3R localisée au CDL dans la salle des essais mécaniques.

2. Domaine d’application

La présente instruction s’applique aux essais des résistances mécaniques à la compression, avec la presse 3R, sur les éprouvettes cubiques ou cylindriques de tailles différentes. Un tableau de paramétrage est joint en annexe.

3. Description de l’appareil

La presse se compose d’une console de commande centrale et d’un bâti d’essai :

- Le bâti d’essai : utilisé pour les résistances mécaniques à la compression supérieures à 300KN jusqu’à 3000KN (Bloc A). Le capteur du bâti est étalonné et vérifié.
- La console de commande : utilisée pour application de la charge (Bloc B).

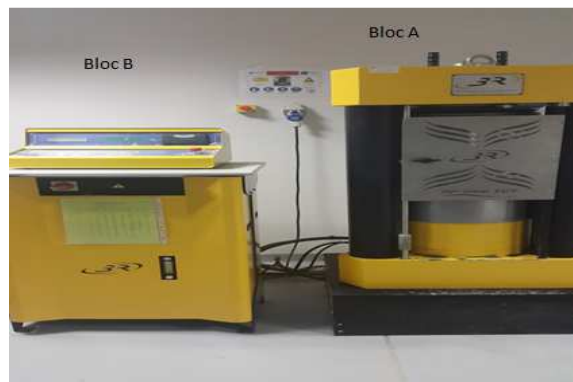


Photo 1 : Presse 3R – Bâtis Commande et Essais

4. Sécurité

Cet appareil nécessite **une formation obligatoire**. IL est classé en catégorie rouge.

DANGER et EPI :



Attentions particulières à adopter pendant l'utilisation :

- Fermer le bâti lors de l'utilisation.

Veiller au dégagement de l'espace de travail autour de la presse



Il ne faut pas :

- Mettre en chauffe la presse, car inutile (Salle tempérée à 20°C).
- Sur le bâti, dépasser le niveau maximum d'élévation du cylindre (Dans ce cas rehausse utilisée inadaptée, risque de fuite d'huile, sortie du piston du cylindre)
- Quitter la salle en cour d'utilisation.

5. Mode opératoire




5.1.Préparation













Pour les écrasements utiliser une rehausse à centrer sur le plateau :

Types de rehausses	Photos
Rehausse pour éprouvette cylindrique 11X22	
Rehausse pour éprouvette cubiques 15X15X15	

N.B : Dans le cas d'éprouvette 16x32 ne pas installer de rehausse

5.2. Paramétrage de l'essai

<p>Mettre sous tension la presse en utilisant l'interrupteur à droite derrière la console, la clé en position AUTO</p> <p>La presse sous tension affiche :</p>	 <div data-bbox="1070 1189 1305 1272" style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;"> Bienvenue sur Quantris </div>
<p>Le paramétrage s'effectue à l'aide du clavier de la console centrale :</p>	
<p>Vérifier que toute les LED du clavier sont allumées puis presser :</p>	<div data-bbox="951 1608 1066 1688" style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; width: fit-content; margin: auto;"> OK </div>
<p>Affichage sur console :</p>	

<p>1) Accès au menu, presser la touche :</p>	
<p>2) Saisir la date, valider par</p> <p>puis passer à l'opération suivante en pressant la touche</p>	 
<p>Nota : Si durant la programmation décrite ci-dessous, les valeurs affichées sont valides passer à l'étape suivante sans valider par : en appuyant directement sur.</p> <p>Vous pouvez revenir sur une valeur saisie en appuyant sur la touche précédente.</p>	  
<p>3) Saisie de la vitesse de montée en pression en KN/s :</p>	<p>Eprouvette cylindrique 11 X 22</p> <p>Saisir : 5</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;"> </p> <p>Eprouvette cubiques 15 X 15 X 15</p> <p>Saisir : 11,3</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;"> </p> <p>Dans le cas d'un autre format d'éprouvette se reporter au tableau en annexe.</p>
<p>4) Sélectionner l'unité de montée, saisir 2 pour KN/s :</p>	 

5) Saisir le numéro d'essai (Facultatif) :	<input type="text" value="OK"/> <input type="button" value="▼"/>
6) Saisir la surface de l'éprouvette :	<p>Eprouvette cylindrique 11 X 22</p> <p>Saisir : 100</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;"><input type="button" value="▼"/> <input type="text" value="OK"/></p> <p>Eprouvette cubiques 15 X 15 X 15</p> <p>Saisir : 225</p> <p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;"><input type="text" value="OK"/> <input type="button" value="▼"/></p>
7) Saisir l'âge de l'éprouvette (Facultatif) :	<input type="text" value="OK"/> <input type="button" value="▼"/>
8) Saisir le poids de l'éprouvette (Facultatif)	<input type="text" value="OK"/> <input type="button" value="▼"/>
9) Sortir du menu utilisateur, presser la touche :	<input type="text" value="menu"/>

5.2.Déroulement de l'essai







- Placer l'éprouvette à écraser dans la chambre d'essai du bâti, la centrer et vérifier son positionnement. Centrer l'éprouvette sur la rehausse lorsque cette dernière est utilisée.

- Assurer votre sécurité ainsi que celle des autres personnes présentes en respectant les instructions de sécurité affichées sur la machine (Voir également point sécurité de cette instruction de travail).

Sécurités durant l'essai :

- Si une porte est ouverte le cycle ne pourra pas démarrer.
- Si une porte est ouverte pendant le cycle, celui-ci est interrompu

Lancement de l'essai :

1) Démarrer le groupe hydraulique, presser	
2) Presser sur : afin d'approcher les plateaux de l'éprouvette avant de lancer le cycle.	
3) Lancer le cycle, presser la touche	
<p>Dés que l'éprouvette est en contact des pièces d'appui, le cycle de mise en charge commence à la vitesse et aux paliers programmés.</p> <p>Nota : A tout instant l'essai peut être arrêté en pressant la touche :</p>	
4) A la fin de l'essai le résultat est affiché en MPa et KN.	
5) A la fin de l'essai, vous pouvez imprimer le compte-rendu d'essai : presser (Papier et ruban sont disponibles chez le responsable de la presse)	

6. Entretien, maintenance et étalonnage

6.1. Entretien

- Après chaque utilisation, nettoyer les rehausses, les plateaux des bâtis et balayer le sol. Housser la console.
- Evacuer de la salle, les déchets, pour les jeter dans une zone délimitée pour "éprouvettes béton/granulats" à l'extérieur du laboratoire.


6.2. Maintenance

- Cet appareil ne nécessite aucun entretien préventif.
- En cas de dysfonctionnement prévenir le responsable technique du laboratoire ou en l'absence son suppléant.

6.3. Vérification / Etalonnage

- La presse est étalonnée et vérifiée une fois par an par un organisme d'étalonnage accrédité

Annexe C : « Instruction de travail de la Rectifieuse 3R »

	Instruction de travail	Réf. : INS-R-BT-001
		Rév:V.0
Date de création : 27- 05 - 2015	Rectifieuse 3R	Page: 4

1. Objet

Ce document décrit l’instruction de travail à appliquer pour l’utilisation de la rectifieuse 3R localisée au CDL dans la salle de conservation des éprouvettes.

2. Domaine d’application

La présente instruction s’applique aux rectifications mécaniques, avec la rectifieuse 3R, sur les éprouvettes cylindriques.

3. Description de l’appareil

La rectifieuse se compose d’un seul bâti utilisé pour rectifier la planéité et le parallélisme des extrémités des éprouvettes cylindriques.



Photo 1 : Rectifieuse 3 R

4. Sécurité

Cet appareil nécessite **une formation obligatoire**. Il est classé en catégorie rouge.

DANGER et EPI :



Attentions particulières à adopter pendant l'utilisation :

- Fermer le bâti lors de l'utilisation.
- Veiller au dégagement de l'espace de travail autour de la rectifieuse.

Il ne faut pas :

- **Quitter la salle en cour d'utilisation.**

5. Déroulement de la rectification



Placer l'éprouvette à rectifier dans la chambre du bâti et la serrer à l'aide du système de blocage.

Assurer votre sécurité ainsi que celle des autres personnes présentes en respectant les instructions de sécurité affichées sur la machine (Voir également point sécurité de cette instruction de travail).

Sécurités durant l'essai :

- Si une porte est ouverte le cycle ne pourra pas démarrer.
- Si une porte est ouverte pendant le cycle, celui-ci est interrompu.

Lancement de la rectification :

<p>1) Mettre l'appareil sous tension en tournant le bouton vers la droite.</p>	
<p>2) Activer le mode automatique ou manuel avec la prise de passe manuelle. N.B : Seul le mode automatique est utilisé par défaut.</p>	
<p>3) Vérifier le voyant qui indique que la porte est ouverte est éteint pour mettre en marche l'appareil.</p>	
<p>4) Pour lancer la rectification, presser sur les deux boutons verts, puis sur le bouton blanc.</p>	
<p>5) Dès que l'éprouvette est en contact du disque de rotation, le surfaçage commence.</p> <p> N.B : A tout instant la rectification peut être arrêtée en appuyant sur le bouton d'urgence.</p>	 
<p>6) A la fin de la rectification, appuyer sur les boutons rouges : meule et arrosage puis sur le Stop avant d'ouvrir la porte et sortir l'éprouvette.</p>	

6. Entretien, maintenance et étalonnage

6.1. Entretien

- La seule action d'entretien sur cet appareil est de changer l'eau en fonction de la propreté de ce dernier qui dépend de la fréquence d'utilisation.

6.2. Maintenance :

- En cas de dysfonctionnement prévenir le responsable technique du laboratoire ou son suppléant.

6.3. Vérification / Etalonnage

- La rectifieuse ne nécessite pas de vérification ou d'étalonnage.

Annexe D : « Rappel sur les lois de probabilités usuelles »

1. Loi normale.

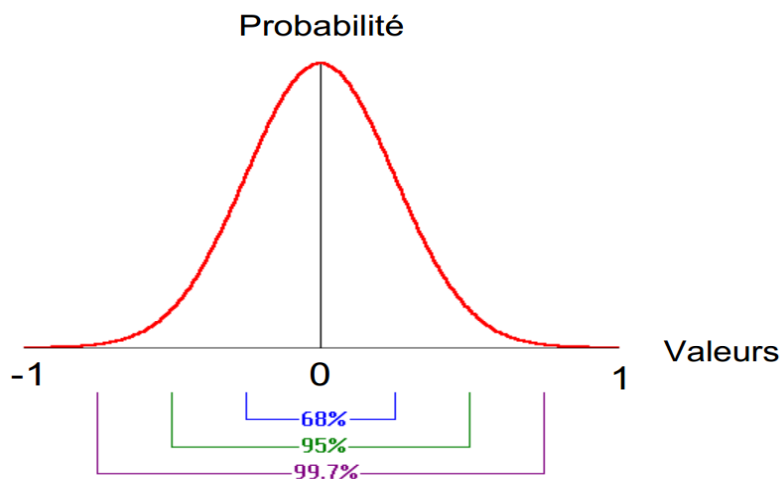
Une loi très célèbre, elle est d'une grande importance car elle se trouve être loi limites de la moyenne de variables aléatoires dans le cas de nombreuses lois, lors d'observations répétées de manière indépendante.

- L'expression de la fonction de densité est :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right]}$$

m est l'espérance et σ est l'écart-type

- La courbe de densité de probabilité :



Si une variable X suit une loi normale de moyenne m et d'écart-type σ on a alors :

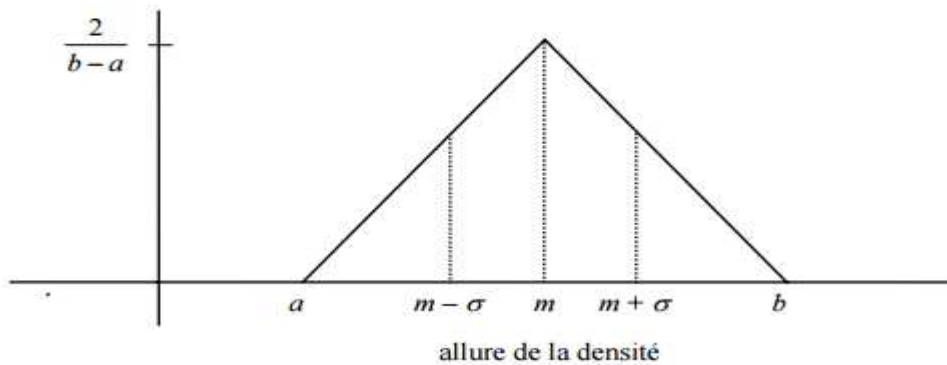
- Probabilité $(-\sigma \leq X - m \leq \sigma) \approx 0,68$
- Probabilité $(-2\sigma \leq X - m \leq 2\sigma) \approx 0,95$
- Probabilité $(-3\sigma \leq X - m \leq 3\sigma) \approx 0,997$

Cette dernière inégalité indique que quasiment la totalité des données sont situées entre -3σ et 3σ . On dit parfois que l'étendue des valeurs représente 6σ , ce qui permet de donner rapidement une estimation de l'écart-type en divisant cette étendue par 6.

2. Loi triangulaire

Une variable X suit une loi triangulaire sur un intervalle [a , b] si sa fonction de densité f est définie par :

$$f(x) = \frac{4(x-a)}{(b-a)^2} \text{ pour } a \leq x \leq \frac{b+a}{2} \quad f(x) = \frac{4(b-x)}{(b-a)^2} \text{ pour } \frac{b+a}{2} \leq x \leq b \quad \text{Sinon } f(x) = 0$$

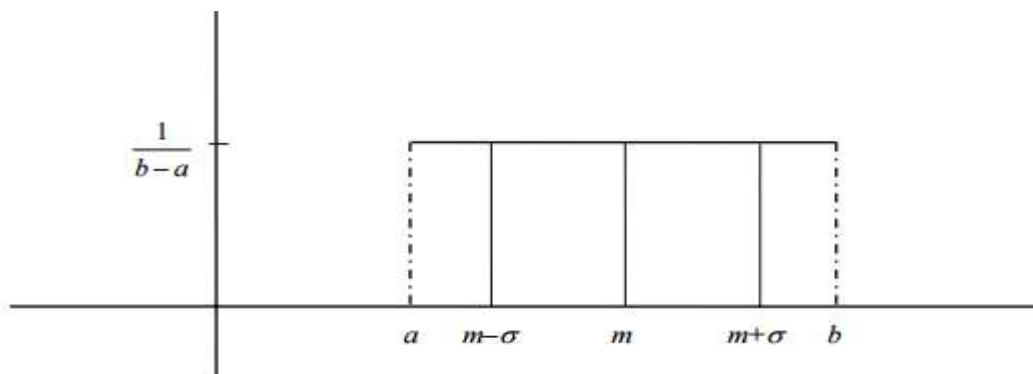


La moyenne de X est $\frac{b+a}{2}$ et son écart-type est $\sigma = \frac{b-a}{2\sqrt{6}}$

Si on suppose que la loi est triangulaire : $u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}}$

3. Loi rectangulaire

Une variable X suit une loi uniforme sur un intervalle [a, b] si sa fonction de densité f est définie par $f(x) = \frac{1}{b-a}$ pour $a \leq x \leq b$ $f(x) = 0$ sinon



La moyenne de X est $\frac{b+a}{2}$ et son écart-type est $\sigma = \frac{b-a}{2\sqrt{3}}$

Annexe E : « les valeurs de l'essai expérimental »

Calcul de la charge (F)

N° Eprouvette	OPERATEUR 1		OPERATEUR 2		OPERATEUR 3		OPERATEUR 4	
	charge KN	resistance	charge	resistance	charge	resistance	charge	resistance
1	587,5	29,37	579,6	28,98	591,6	29,58	614,7	30,74
2	581,3	29,07	582,3	29,11	578,3	28,92	601,8	30,09
3	597,1	29,86	600,3	30,02	581,2	29,06	547,3	32,37
4	601,8	30,09	595,7	29,78	590,4	29,52	632,5	31,62
5	575,9	28,8	596,8	29,84	585,5	29,27	649,6	32,48
6	624,6	31,23	605,9	30,3	627,9	31,4	636	31,8
Moyenne	594,7	29,7366667	593,433333	29,6716667	592,483333	29,625	613,65	31,5166667
Ecart-Type	17,5215296	0,87479521	10,337827	0,51963128	18,092586	0,90619534	36,5816757	0,93656109
variance	307,004	0,76526667	106,870667	0,27001667	327,341667	0,82119	1338,219	0,87714667
Reproductibilité								
		Valeur	Force	Résistance				
			1	594,7	29,736			
			2	593,433	29,671			
			3	592,483	29,625			
			4	613,65	31,516			
		Moyenne		598,5665	30,137			
		Variance		101,941196	0,84724733			
		Ecart-type		10,0965933	0,92046039			

Calcul de la dimension

N° Eprouvette	OPERATEUR 1				OPERATEUR 2				
	POINT 1	POINT 2	POINT 3	Moyenne	N° Eprouvette	POINT 1	POINT 2	POINT 3	Moyenne
1	158,98	161,34	160,21	160,176667	1	160,05	159,89	158,09	159,343333
2	160,07	160,08	160,03	160,06	2	160,04	160,12	160,1	160,086667
3	158,82	160,95	159,12	159,63	3	160,04	160,19	160,32	160,183333
4	160,02	160,05	160,83	160,3	4	160,38	160,09	160,22	160,23
5	160,39	160,18	160,1	160,223333	5	158,69	160,7	160,3	159,896667
6	158,88	160,97	160,61	160,153333	6	160,04	160,05	160,27	160,12
Moyenne				160,090556					159,976667
Variance				0,05717963					0,10940889
Ecart-type				0,23912262					0,33077015

	OPERATEUR 3				OPERATEUR 4				
N° Eprouvette	POINT 1	POINT 2	POINT 3	Moyenne	N° Eprouvette	POINT 1	POINT 2	POINT 3	Moyenne
1	160,04	158	158,7	158,913333	1	160,04	158,96	160	159,666667
2	159,55	160,8	159,8	160,05	2	158,98	160,9	160,79	160,223333
3	158,86	160,17	158,5	159,176667	3	158,87	160,04	160	159,636667
4	160,6	160,03	160,37	160,333333	4	159,41	160,28	160,94	160,21
5	160,39	158,6	159,34	159,443333	5	160,39	159,94	159,5	159,943333
6	159,6	160,1	160	159,9	6	160,44	158	160,18	159,54
				159,636111					159,87
				0,29954407					0,09010222
				0,5473062					0,30017032

Reproductibilité	
Valeur	DIMENSION
1	160,09
2	159,976
3	159,636
4	159,87
Moyenne	159,893
Variance	0,037425333
Ecart-type	0,193456283

