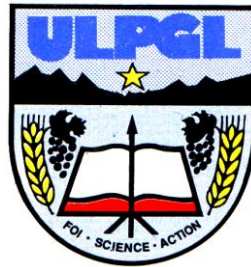


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**CONCEPTION ET IMPLEMENTATION
D'UN OUTIL INFORMATIQUE D'AIDE A
LA FORMULATION DU BETON BASE SUR
LA METHODE ACI**

Par **TSONGO MBEHO Patrick**

Travail présenté et défendu en vue de l'obtention du
Diplôme de Bachelor en Sciences de l'Ingénieur

Option : Génie Civil

Directeur : Prof. Dr. Ir AKWIR NKIEDIEL Alain

Encadreur : Ir CIRHUZA BADESIRE Paterne

ANNEE ACADEMIQUE 2024 – 2025

Epigraphe

« Le génie, c'est un pour cent d'inspiration et quatre-vingt-dix-neuf pour cent de transpiration »

Thomas Edison

Dédicace

A mon grand-père, KAMATE MBEHO Alexis, enseignant pendant plus de soixante années, dont la perspicacité, l'érudition et le sens du devoir ne cesseront de nous inspirer et de nous guider.

TSONGO MBEHO Patrick

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu pour nous avoir caché les choses tout en nous rendant capables de les trouver par nous-même. Cette marche vers la connaissance fut pour nous à la fois une épreuve, un privilège et une joie profonde.

En second lieu, nos remerciements s'adressent à notre université, l'ULPGL/Goma, qui nous a encadrés durant cette partie de notre quête des connaissances.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre directeur, le Professeur AKWIR NKIEDEL Alain, et à notre encadreur, l'Ir CIRHUZA BADESIRE Paterne. Par leur patience, leur rigueur et leur disponibilité, ils nous ont appris que guider ne consiste pas à imposer un chemin, mais à éclairer la route afin que l'étudiant apprenne à marcher par lui-même.

Nous saluons également l'ensemble de nos professeurs, et plus particulièrement notre directeur, ainsi que le professeur BARAKA MUSHAGE et le Dr ALINABIWE Ally, dont l'enseignement nous a rappelé que la connaissance n'a de valeur que lorsqu'elle élève l'esprit.

Nos pensées les plus profondes se tournent vers nos parents, Roger KIVUSA et Espérance TIMA, dont l'amour inconditionnel et les sacrifices ont été le socle de notre réussite.

Nous adressons également notre gratitude aux équipes GESI-TECH, RTI-TECH et Engineer Forever. Une pensée particulière va à Chris NSANZU et Gaël MESSO, dont l'engagement a profondément marqué notre parcours.

Enfin, nos remerciements vont à nos amis et camarades, dont en particulier Adonis RWABIRA, Noé KIMATE, Naomi MATUMO, Yvon LUVAO, Rosalie MUHYA, Gaddiel M, Anuarite M, Georges M, Samy KASEKWA, Jessica KYAS, Gulain SHANG, Juliette ANSIMA, Fiston NGAB, Josette BALALUKA, Tatiana Mwesha, Jospin M, BUSOGA Alua, Avanna DYCK, Elie RAHA, ainsi qu'à tous ceux dont la bienveillance a nourri notre chemin.

TSONGO MBEHO Patrick

Résumé

L'application des méthodes de formulation reste souvent complexe et exigeante, en particulier lorsqu'elle est réalisée manuellement. Parmi ces méthodes, celle de l'American Concrete Institute (ACI) est reconnue pour sa rigueur et sa fiabilité, mais son application manuelle demeure lourde et sujette aux erreurs. L'objectif principal de ce travail est de concevoir et implémenter un outil informatique capable d'automatiser la méthode ACI afin de faciliter la détermination des dosages des constituants du béton. Pour atteindre cet objectif, la méthode ACI a d'abord été analysée et structurée sous forme d'un organigramme décrivant l'ensemble des étapes de la formulation. Sur cette base, un algorithme de calcul a été développé à l'aide du langage Python, puis intégré dans une application web locale appelée *BétonForm*. L'architecture hexagonale a été adoptée afin d'isoler la logique métier des interfaces et des composants techniques. Les résultats obtenus montrent que l'outil *BétonForm* permet de générer des formulations de béton conformes à celles obtenues par les calculs manuels de la méthode ACI, avec des écarts faibles et négligeables. L'outil permet ainsi de réduire le temps de calcul, de limiter les erreurs humaines et de rendre la méthode ACI plus accessible aux étudiants et aux praticiens.

Mots-clés : *Méthode ACI, BétonForm, Application web, Python, Architecture hexagonale.*

Abstract

The application of mix design methods often remains complex and demanding, especially when performed manually. Among these methods, the American Concrete Institute (ACI) method is recognized for its rigor and reliability, but its manual application remains cumbersome and prone to errors. The main objective of this work is to design and implement a computer tool capable of automating the ACI method to facilitate the determination of concrete constituent proportions. To achieve this objective, the ACI method was first analyzed and structured as a flowchart describing all the steps of the mix design. Based on this, a calculation algorithm was developed using the Python language and then integrated into a local web application called *BetonForm*. The hexagonal architecture was adopted to isolate the business logic from the interfaces and technical components. The results obtained show that the *BetonForm* tool can generate concrete mix designs that conform to those obtained by manual calculations using the ACI method, with small and negligible discrepancies. The tool thus reduces calculation time, limits human error, and makes the ACI method more accessible to students and practitioners.

Keywords: *ACI method, BetonForm, Web application, Python, Hexagonal architecture*

Table des matières

Epigraphe	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table des matières	vi
Liste des abréviations et notations	ix
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xii
0. Introduction générale	1
0.1. Contexte	1
0.2. Identification et formulation du problème	1
0.3. Questions de recherche.....	2
0.4. Formulation des hypothèses	2
0.5. Justification du choix du sujet et motivations	3
0.6. Objectifs de la recherche	4
0.6.1. L'objectif général	4
0.7. Méthodologie et délimitation du travail	4
0.8. Subdivision du travail.....	5
Chapitre 1 Généralités sur le béton et revue des outils de formulation.....	6
1.1 Introduction partielle	6
1.2 Description du béton	6
1.3 Constituants du béton.....	6
1.3.1 Liant	7

**CONCEPTION ET IMPLEMENTATION D'UN OUTIL INFORMATIQUE D'AIDE A
LA FORMULATION DU BETON BASE SUR LA METHODE ACI**

1.3.2	Eau de gâchage	10
1.3.3	Granulats	10
1.3.4	Adjuvants	15
1.4	Propriétés du béton.....	16
1.4.1	Propriétés à l'état frais	16
1.4.2	Propriétés à l'état durci	16
1.5	Quelques méthodes de formulation du béton.....	17
1.5.1	Méthode de Dreux – Gorisse	17
1.5.2	Méthode de Bolomey	18
1.5.3	Méthode de Faury	19
1.5.4	Méthode britannique standard de conception de mélange (DOE)	19
1.5.5	Méthode de Baron et Lesage.....	20
1.5.6	Méthode Américaine (ACI 211.1) [27]	20
1.5.7	Comparaison des méthodes de formulation	21
1.6	Revue des outils de formulation.....	22
1.6.1	Logiciel Concrete Mix Software v.01 [28]	22
1.6.2	Logiciel BétonLab Pro [29]	23
1.6.3	Quelques langages de programmation	24
1.6.4	Comparaison des langages de programmation	27
1.7	Conclusion partielle.....	27
Chapitre 2 Méthodologie de formulation et conception de l'outil		29
2.1	Introduction partielle	29
2.2	Caractérisation des constituants	29
2.2.1	Ciment.....	29
2.2.2	Granulats	30
2.3	Présentation et définition.....	35
2.3.1	Principe général de la méthode ACI	35
2.3.2	Procédure détaillée de la méthode ACI	36
2.4	Conception de l'architecture globale.....	42

**CONCEPTION ET IMPLEMENTATION D'UN OUTIL INFORMATIQUE D'AIDE A
LA FORMULATION DU BETON BASE SUR LA METHODE ACI**

2.4.1	Spécifications de l'outil	42
2.4.2	Justification des choix technologiques.....	45
2.4.3	Architecture globale de l'outil	45
2.5	Conclusion partielle.....	47
Chapitre 3 Implémentation, test et validation de l'outil		49
3.1	Introduction partielle	49
3.2	Réalisation et présentation de l'outil.....	49
3.2.1	Environnement de développement.....	49
3.2.2	Présentation des interfaces et guide utilisateur	50
3.3	Présentation des résultats fournis par l'outil	59
3.3.1	Description des cas d'étude	59
3.3.2	Résultats numériques fournis par l'outil	61
3.4	Validation et vérification de l'outil	62
3.4.1	Résultats de formulation issus de la littérature	62
3.4.2	Résultats de formulation obtenus par calcul manuel	62
3.4.3	Comparaison des résultats de formulation.....	63
3.5	Conclusion partielle.....	69
Conclusion générale.....		70
Bibliographie.....		73
Annexes.....		77

Liste des abréviations et notations

Ab	:	Absorption d'eau
ACI	:	American Concrete Institute
AFNOR	:	Association Française de Normalisation
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
CHF	:	Ciment de Haut Fourneau
CLC	:	Ciment au Laitier et Clinker
CMS v.01	:	Concrete Mix Software version 01
CPA	:	Ciment Portland Artificiel
CPJ	:	Ciment Portland Composé
CPZ	:	Ciment Pouzzolanique
CSS	:	Cascading Style Sheets
Cu	:	Coefficient d'Uniformité
Cz	:	Coefficient de Courbure
D_{max}	:	Diamètre maximale des grains
d	:	Diamètre minimum des grains
E/C	:	Rapport Eau Ciment
EN	:	European Norm
Ep	:	Effet paroi
HTML	:	HyperTexte Markup Language
IDE	:	Integrated Development Environment
Kg/m³	:	Kilogramme par mètre cube
LCPC	:	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
M_f	:	Module de finesse
M_{pa}	:	Mégapascal
NF	:	Norme Française
ORM	:	Object – Relationnel Mapping
PDF	:	Portable Document Format

**CONCEPTION ET IMPLEMENTATION D'UN OUTIL INFORMATIQUE D'AIDE A
LA FORMULATION DU BETON BASE SUR LA METHODE ACI**

PME	:	Petites et Moyennes Entreprise
SQL	:	Structured Query Language
SSS	:	Saturé Surface Sèche
UI	:	User Interface
ULPGL	:	Université Libre des Pays des Grands Lacs
VBA	:	Visual Basic for Applications
W	:	Teneur en eau

Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 : Différents types de ciments courants normalisés [15]</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 1.2 : Classification des ciments selon la résistance [16]</i>	<i>9</i>
<i>Tableau 1.3 : Classification des granulats selon la masse volumique [12]</i>	<i>11</i>
<i>Tableau 1.4 : Classification suivant la grosseur de granulats [12]</i>	<i>12</i>
<i>Tableau 2.1 : Affaissement recommandés par divers types de construction [44]</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 2.2 : Résistance moyenne cible à la compression [45].....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 2.3 : Dosage en eau et teneur en air selon D_{max} et l'affaissement [45].....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 2.4 : Le rapport E/C par masse [46]</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 2.5 : Rapport E/C maximal pour les bétons exposés aux conditions sévères [5].....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 2.6 : Volume apparent du gros granulat compacté à l'état sec [45].....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 3.1 : Dosages unitaires du béton fournis par l'outil.....</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 3.2 : Dosages unitaires du béton issus de la littérature</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 3.3 : Dosages unitaires du béton obtenus par calcul manuel.....</i>	<i>63</i>

Liste des figures

<i>Figure 1.1 : Interface graphique du logiciel CMS v.01 [28].....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 1.2 : Interface du logiciel BétonLab Pro [29]</i>	<i>24</i>
<i>Figure 2.1 : Architecture globale de notre outil.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure 3.1 : Editeur Visual Studio Code</i>	<i>50</i>
<i>Figure 3.2 : Page d'accueil de l'outil BétonForm</i>	<i>51</i>
<i>Figure 3.3 : Page du laboratoire des matériaux</i>	<i>52</i>
<i>Figure 3.4 : Fiche d'essai du ciment</i>	<i>53</i>
<i>Figure 3.5 : Fiche d'essai des graviers</i>	<i>53</i>
<i>Figure 3.6 : Interface de saisie pour l'analyse granulométrique du sable</i>	<i>54</i>
<i>Figure 3.7 : Page de saisie des données et sélection des matériaux</i>	<i>55</i>
<i>Figure 3.8 : Page de formulation du béton.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 3.9 : Page historique des formulations</i>	<i>58</i>
<i>Figure 3.10 : Comparaison du rapport eau/ciment.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 3.11 : Comparaison des dosages en ciment.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 3.12 : Comparaison des quantités de graviers</i>	<i>66</i>
<i>Figure 3.13 : Comparaison des quantités de sable</i>	<i>67</i>
<i>Figure 3.14 : Comparaison des quantités d'eau</i>	<i>68</i>

0. Introduction générale

0.1. Contexte

Le béton, composé de granulats, de ciment, d'eau et parfois d'adjuvants, est le matériau le plus largement utilisé dans le monde moderne. Essentiel dans notre société actuelle, il est omniprésent dans divers domaines tels que les infrastructures routières, les bâtiments, les ouvrages d'art et bien d'autres [1].

La qualité et la performance du béton sont directement liées à sa composition, c'est-à-dire du bon dosage de ses différents constituants, mais aussi du savoir-faire de sa fabrication, incluant le malaxage, le transport et la mise en place dans le coffrage [2].

Faces aux exigences croissantes en matière de performance, de durabilité et de rentabilité, une approche scientifique et reproductible de la formulation du béton est devenue indispensable. Une formulation adéquate est primordiale, car elle a un impact sur l'obtention d'un matériau présentant les caractéristiques souhaitées [3].

Dans ce cadre, plusieurs méthodes et normes ont été développées pour encadrer le processus de conception des mélanges de béton. Parmi les plus reconnues et appliquées mondialement figure la méthode de l'American Concrete Institute (ACI) qui propose une démarche claire et structurée pour déterminer les proportions idéales des matériaux.

L'avènement de l'informatique moderne ouvre des perspectives significatives pour automatiser et améliorer ces processus, notamment par le développement d'outils numériques qui peuvent réaliser les calculs et organiser les données, simplifiant ainsi grandement la tâche des professionnels du domaine [4].

0.2. Identification et formulation du problème

Bien que des méthodes rigoureuses telles que celle de l'ACI existent, la formulation du béton demeure exigeante et souvent complexe. Elle nécessite une série de calculs itératifs,

l'intégration de nombreux paramètres (la résistance à la compression requise, l'affaissement, la taille maximale nominale des granulats, la classe d'exposition, etc.) [5], ainsi qu'une bonne compréhension de la méthode.

Le défi majeur consiste donc à appliquer efficacement la méthode ACI dans diverses situations sans être freiné par la lourdeur de calculs manuels ou le besoin constant de consulter des tables à tout moment. La question essentielle est de savoir comment rendre ce processus plus rapide, plus accessible et moins sujet aux erreurs humaines, tout en assurant la conformité avec les principes de la méthode ACI.

Ainsi, il devient nécessaire de développer un outil informatique d'aide à la formulation du béton, capable d'assister les ingénieurs et les techniciens dans cette tâche cruciale.

0.3. Questions de recherche

Vue le problème que nous venons de présenter, une question se pose :

Est-il possible de mettre au point un outil informatique capable de faciliter la formulation du béton basé sur la méthode ACI ?

La précédente question nous amène aussi à nous demander ceci :

- Quelles sont les étapes à prendre en compte pour la mise au point d'un outil d'aide à la formulation du béton selon la méthode ACI ?
- Quel langage de programmation serait le plus approprié pour implémenter efficacement un tel outil numérique ?
- Quelle architecture logicielle serait adaptée pour garantir la flexibilité et la maintenance évolutive de cet outil ?

0.4. Formulation des hypothèses

A la suite des questions que nous venons de soulever, nous postulons que :

- Une application efficace de la méthode ACI nécessiterait l'élaboration d'un organigramme structuré regroupant les différentes étapes du processus de formulation, telles que définies dans ladite méthode.

- Le langage python serait le plus adéquat pour implémenter l'outil, compte tenu de sa simplicité syntaxique, de la richesse de son écosystème, ainsi que de sa compatibilité multiplateforme.
- Une architecture logicielle hexagonale serait adaptée pour assurer la maintenance évolutive et la flexibilité de l'outil.

0.5. Justification du choix du sujet et motivations

La formulation du béton repose sur le respect de proportions bien définies entre les différents constituants, tels que le ciment, les granulats, l'eau et éventuellement les adjuvants [6]. Dans ce contexte, la méthode ACI constitue une référence reconnue pour établir ces dosages.

Cependant, l'application manuelle de cette méthode peut s'avérer fastidieuse et sujette à des erreurs humaines, notamment en raison de la répétition des calculs. Face à ces limites, la conception d'un outil informatique capable d'automatiser l'application de la méthode ACI apparaît comme une nécessité. Un tel outil constituerait non seulement un gain de temps substantiel, mais aussi un moyen efficace de réduire les erreurs liées aux calculs manuels, tout en garantissant la cohérence et la reproductibilité des résultats.

Il a été constaté qu'actuellement, les solutions logicielles existantes sont souvent onéreuses, complexes ou ne sont pas spécifiquement conçues pour la méthode ACI dans un format didactique et accessible. Les travaux antérieurs, notamment ceux présentés dans [7] [8] [9] [10] et [11], démontrent la faisabilité et l'intérêt d'intégrer des approches numériques dans la conception des mélanges de béton. Ces recherches confirment la pertinence de la démarche adoptée dans ce travail et témoignent de l'évolution croissante vers la numérisation des procédés de formulation, dans le but d'améliorer les pratiques de conception des bétons.

Socialement, la mise au point de cet outil sera d'une très grande importance. Cela dans plusieurs axes dont principalement :

- Pour les ingénieurs et techniciens, l'outil proposé simplifiera les étapes de la formulation du béton, en fournissant des résultats rapides et conformes à la méthode ACI ;
- Pour les étudiants, Il constituera un support pédagogique interactif facilitant l'apprentissage de la méthode, tout en offrant une meilleure compréhension des relations entre les paramètres de formulation ;
- Pour les entreprises (PME et Centrales à béton), l'outil représente une opportunité d'améliorer la productivité.

0.6. Objectifs de la recherche

0.6.1. L'objectif général

Cette recherche a pour objectif principal de concevoir et implémenter un outil informatique d'aide capable d'automatiser la méthode ACI.

0.6.2. Les objectifs spécifiques

Pour arriver à bout de notre travail nous comptons :

- Analyser en profondeur les étapes et les exigences de la méthode ACI pour la formulation du béton.
- Concevoir une architecture logicielle pouvant garantir la flexibilité et la maintenance évolutive de l'outil ;
- Développer un algorithme qui intègre l'ensemble des règles et des formules de la méthode ACI ;
- Réaliser une interface web intuitive et mettre au point une base de données pour stocker les données saisies et les résultats.

0.7. Méthodologie et délimitation du travail

Pour la mise au point du système, nous comptons utiliser la méthode *documentaire*, afin d'analyser en profondeur les étapes et les exigences de la méthode ACI relatives à la formulation du béton, à partir des ouvrages, normes et documents scientifiques de référence.

Pour la réalisation de l'outil, nous allons recourir à *une approche expérimentale*, appliquée au développement informatique des modèles de calcul issus de la méthode étudiée(ACI). Enfin, pour la validation de l'outil, nous utiliserons *la méthode comparative*, consistant à confronter les résultats fournis par l'outil avec ceux obtenus par calculs manuels et cela à partir de cas issus de la littérature.

Ce travail se focalise uniquement sur l'implémentation de la méthode ACI. Nous n'aborderons pas d'autres méthodes de formulation, ni le suivi de la performance du béton frais ou durci.

0.8. Subdivision du travail

Excepté l'introduction et la conclusion générales, ce travail est ainsi constitué :

1. Au premier chapitre, *Généralités sur le béton et revue des outils de formulation*, nous passons en revue toute la théorie nécessaire à la compréhension de notre travail.
2. Au second chapitre, *Méthodologie de formulation et conception de l'outil*, ce chapitre détaille la caractérisation des constituants et les étapes de calcul de la méthode ACI, et y concevons progressivement l'outil informatique d'aide à la formulation du béton.
3. Au troisième chapitre, *Implémentation, test et validation de l'outil*, ce chapitre détaillera l'implémentation, test et la validation de l'outil par comparaison avec des calculs manuels et des cas issus de la littérature.

Chapitre 1

Généralités sur le béton et revue des outils de formulation

1.1 Introduction partielle

Dans ce chapitre, nous allons présenter les notions fondamentales relatives au béton, nécessaires à la compréhension et à la mise en œuvre de l'outil. Nous y décrirons le béton et ses principaux constituants, ses propriétés, ainsi que quelques méthodes de formulation du béton. En complément, nous présenterons également une revue de littérature sur quelques outils d'aide à la formulation du béton, notamment CMS v.01 et BétonLab Pro, ainsi qu'un aperçu général de quelques langages de programmation.

1.2 Description du béton

Le béton est une pierre artificielle obtenue grâce au durcissement d'un mélange de liant, d'eau, de granulats avec éventuellement des adjuvants choisis de façon rationnelle. Lorsqu'il ne comporte pas les graviers, il est appelé mortier. Ce mélange, mis en place sur le chantier ou en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il peut être moulé; et puis durcir progressivement pour former finalement un monolithe [12].

Les performances et la souplesse d'emploi permettent au béton d'être présent dans tous les domaines du bâtiment et du génie civil. Ainsi, le béton fait partie de notre vie, car il participe à l'architecture, permet de franchir de longues portées et entre dans la construction des routes.

1.3 Constituants du béton

Comme ci-haut défini, le béton est une pierre artificielle obtenue grâce au durcissement d'un mélange de liant, de granulats, d'eau avec éventuellement des adjuvants choisis de façon rationnelle [13].

1.3.1 Liant

On distingue deux grands groupes de liants : les liants minéraux (liants hydrauliques et liants aériens) et les liants organiques [12].

Les liants minéraux sont des poudres finement broyées qui, mélangées à l'eau, forment une pâte plastique qui à son tour durcit pour former un matériau solide, véritable roche (pierre) artificielle. On peut y citer :

- *Les liants hydrauliques* sont des poudres fines qui ont la propriété de durcir (passer à l'état pierreux), se conservent pendant longtemps aussi bien à l'air que sous l'eau. Les exemples les plus courants sont les ciments Portland et leurs variétés, ...
- *Les liants aériens* sont ceux qui se conservent pendant une longue durée et augmentent de résistance uniquement dans l'air. Parmi les exemples les plus courants, on peut citer les plâtres et la chaux aérienne.

Les liants organiques sont des substances, généralement à base de composés de carbone, utilisées pour lier des particules entre elles. Contrairement aux liants minéraux (ciments, chaux), ils ne durcissent pas toujours par réaction avec l'eau. Les liants organiques comprennent les polymères, les résines et les bitumes, et sont souvent employés dans les adhésifs, les peintures et les revêtements routiers.

1.3.1.1 Types de ciments courants

Selon les constituants, autres que le gypse, ajoutés ou non au clinker lors des opérations de fabrication, on obtient différents types de ciments définis par la norme NF-EN 197-1 (2012). Les ciments sont actuellement classés sous la dénomination CEM suivi d'un chiffre romain allant de I à V suivi d'une lettre majuscule en fonction de leur teneur en clinker et d'autres composants. Il est le résultat d'une réaction endothermique entre du calcaire et de l'argile [14].

Le tableau 1.1 présente les différents types de ciments courants normalisés, en précisant pour chacun leur désignation ainsi que les pourcentages respectifs des constituants qui les composent [15].

Tableau 1.1 : Différents types de ciments courants normalisés [15]

Désignation des différents types de ciments courants	Types de ciments	Teneur en Clinker	Teneur des constituants secondaires
CPA-CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	0 à 5 %
CPJ-CEM II / A	Ciment portland composé	80 à 94 %	0 à 5 %
CPJ-CEM II / B		65 à 79 %	0 à 5 %
CHF-CEM III / A	Ciment de haut fourneau	35 à 64 %	0 à 5 %
CHF-CEM III / B		20 à 34 %	0 à 5 %
CLK-CEM III / C		5 à 19 %	0 à 5 %
CPZ-CEM IV / A	Ciment pouzzolanique	65 à 95 %	0 à 5 %
CPZ-CEM IV / B		45 à 64 %	0 à 5 %
CLC-CEM V / A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	0 à 5 %
CLC-CEM V / B		20 à 39 %	0 à 5 %

1.3.1.2 Classes de résistance

Les ciments sont répartis en trois classes de résistance : 32,5 – 42,5 – 52,5, définies par la valeur de la résistance normale du ciment à 28 jours.

**CONCEPTION ET IMPLEMENTATION D'UN OUTIL INFORMATIQUE D'AIDE A
LA FORMULATION DU BETON BASE SUR LA METHODE ACI**

Pour chaque classe de résistance, deux sous-classes de performance au jeune âge sont définies : une classe à résistance ordinaire (indiquée par la lettre N pour « Normal ») et une classe à résistance élevée (indiquée par la lettre R pour « Rapide »). Ces dénominations précisent la vitesse à laquelle le ciment gagne sa solidité initiale, généralement mesurée à 2 ou 7 jours.

La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours, conformément à la norme NF-EN 196-1, et exprimée en Mpa.

Pour les ciments des classes 32,5 et 42,5, une valeur maximale de la résistance normale à 28 jours est fixée [16] et est indiquée dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Classification des ciments selon la résistance [16]

Désignation de la classe	Résistance à la compression à court terme (en Mpa)		Résistance courante à la compression (en Mpa)	
	à 2 jours	à 7 jours	à 28 jours	
32,5 N	-	> 16	>32,5	<52,5
32,5 R	>13,5	-		
42,5 N	>12,5	-	>42,5	<62,5
42,5 R	>20	-		
52,5 N	>20	-	>52,5	-
52,5 R	>30	-		

1.3.2 Eau de gâchage

Les caractéristiques de l'eau de gâchage sont normalisées par les normes NF P 18-303 de 1941 et NF EN 1008.

L'eau de gâchage est un élément indispensable dans la confection du béton ; elle permet d'hydrater le ciment, ce qui libère ses capacités de liant, et facilite également la mise en place du béton.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton, car certaines contiennent un excès d'impuretés pouvant altérer ses propriétés, notamment physiques et mécaniques (prise et résistance), esthétiques (taches, efflorescences), ou encore sa durabilité (corrosion des armatures, stabilité du béton). Ces impuretés, éventuellement contenues dans l'eau de gâchage, peuvent être soit d'origine naturelle, soit des composés chimiques actifs.

L'origine des eaux de gâchage peut être extrêmement variée ; et la plus couramment utilisée et prise comme référence est l'eau potable distribuée par le réseau de service public. Parmi les autres eaux fréquemment utilisées, on trouve les eaux de pompage issues des nappes phréatiques ou des réservoirs.

Parmi tous les constituants du béton, l'eau reste l'ingrédient qui peut nuire le plus, car c'est grâce à elle que le béton peut être manipulé [17].

1.3.3 Granulats

On appelle « granulats » les matériaux inertes, sables, graviers ou cailloux, qui entrent dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant du recyclage. Ces matériaux sont quelque fois encore appelés « agrégats », cependant cette appellation est abandonnée depuis longtemps car en réalité ce terme signifie tout simplement une réunion de substances diverses format un tout non homogène [18]. Les propriétés du béton frais et celles du béton durci, comme la résistance à la compression et la durabilité, dépendent des propriétés des granulats utilisés.

Les granulats doivent être des matériaux de bonne qualité et satisfaire notamment deux exigences [19] :

- La propreté, particulièrement importante pour les sables : la teneur en fines argileuses doit être strictement limitée ;
- La granulométrie, propriété géométrique essentielle d'un granulat, dont le bon choix est déterminant dans la formulation d'un béton compact.

Les granulats utilisés pour réaliser un béton doivent permettre d'une part de remplir correctement et en totalité le moule ou le coffrage et, d'autre part, d'assurer un enrobage correct des armatures. Au voisinage des parois du coffrage, il est nécessaire de limiter la taille maximale des grains [19].

1.3.3.1 Classification des granulats

Les granulats sont classés suivant la provenance (on y trouve le granulat naturel et artificiel), suivant la grosseur et selon la masse volumique [12].

En ce qui concerne le granulat naturel, on distingue les granulats roulés ou de rivière et les granulats concassés ou de carrière. Pour ce qui est de la classification suivant la masse volumique et la grosseur, les granulats sont identifiés comme nous l'indique les tableaux 1.3 et 1.4.

Tableau 1.3 : Classification des granulats selon la masse volumique [12]

Nature des granulats	Masse volumique
Granulats légers	$M_{v_{abs}} < 2 \text{ t/m}^3$
Granulats courants	$2 \text{ t/m}^3 < M_{v_{abs}} < 3 \text{ t/m}^3$
Granulats lourds	$M_{v_{abs}} > 3 \text{ t/m}^3$

Tableau 1.4 : Classification suivant la grosseur de granulats [12]

Fines 0/D	Où $D \leq 0,080 \text{ mm}$
Sables 0/D	Où $D \leq 6,3 \text{ mm}$
Gravillons d/D	Où $d \geq 2 \text{ mm}$ et $D \leq 31,5 \text{ mm}$
Cailloux d/D	Où $d \geq 20 \text{ mm}$ et $D \leq 80 \text{ mm}$
Graves 0/D	Où $6,3 \text{ mm} < D \leq 80 \text{ mm}$
Ballasts d/D (concassés)	Où $d \geq 25 \text{ mm}$ et $D \leq 50 \text{ mm}$

1.3.3.2 Caractéristiques des granulats

Nous distinguons plusieurs caractéristiques des granulats qui, d'une manière générale, peuvent être groupées en trois familles dont la première est celle des caractéristiques géométriques, la deuxième concerne les caractéristiques physiques et la dernière pour les caractéristiques mécaniques.

i. Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques des granulats sont entre autres la forme, le coefficient d'aplatissement et l'angularité.

- La forme

La forme des granulats influence la maniabilité du béton. La plus favorable est celle proche de la sphère. En revanche, des formes allongées ou aplaties (en aiguilles ou en plaquettes) nécessitent une quantité d'eau plus élevée et peuvent provoquer des défauts d'aspect du béton.

La forme d'un granulat est définie par sa longueur L et son épaisseur E , cette dernière correspondant au plus petit écartement entre deux plans tangents parallèles qui touchent le granulat [18].

- Le coefficient d'aplatissement

Il caractérise la forme des granulats à partir de leur plus grande dimension et de leur épaisseur. Il est par définition le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1,58$ (G représentant en fait la dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément). Le coefficient d'aplatissement est déterminé par un double tamisage, d'abord au travers la série de tamis à mailles carrées utilisée pour l'étude de la granulométrie, puis par un second tamisage des refus retenus sur les différents tamis sur une série de grilles à fentes parallèles, le rapport entre les dimensions des tamis et des grilles étant de 1,58 [18].

- L'angularité

L'angularité d'un granulat est conventionnellement estimée par les valeurs des indices et des rapports de concassages. Une angularité assez forte favorise l'adhérence mécanique entre les granulats et le mortier. Par contre, chaque fois qu'on recherche un angle de frottement interne élevé, on préfère employer des particules angulaires de faible sphéricité [20].

ii. Caractéristiques physiques

Parlant des caractéristiques physiques des granulats, nous pouvons citer la masse volumique, la porosité, la teneur en eau, le taux d'absorption d'eau et la propreté des granulats.

- La masse volumique

Les masses volumiques des granulats sont définies et déterminées suivant les normes : NF P 18-554, 18-555, EN 1097-3, EN 1097-6.

Nous distinguons ici la masse volumique apparente qui est la masse par unité de volume de l'échantillon de granulats, en tenant compte des vides qu'il contient. La masse volumique

apparente d'un granulat dépend de la forme, de la granulométrie des grains ainsi que du degré de compactage et d'humidité.

La masse volumique absolue d'un granulat est la masse par unité de volume de celui-ci, sans tenir compte des vides qu'il contient. La détermination de la masse volumique absolue s'effectue sur des granulats [21].

- La porosité

La porosité d'un granulat se définit comme le rapport du volume des vides pouvant être remplis d'eau au volume total d'un échantillon de celui-ci. La présence de pores internes dans les sables est en rapport direct avec la densité de ceux-ci. Certains pores sont complètement à l'intérieur des granulats et d'autres débouchent à la surface. La porosité d'un sable est liée au processus de formation de sa roche mère [12].

- La teneur en eau

La teneur en eau d'un granulat est le rapport du poids d'eau contenu au poids des grains composant le granulat. Les granulats utilisés pour la confection du béton contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques. L'eau de gâchage réellement utilisée est par conséquent égale à la quantité d'eau théorique moins l'eau contenue dans les granulats. Il faut par conséquent disposer de moyens pour mesurer combien il y a d'eau dans les granulats [12].

- Le taux d'absorption

L'absorption d'eau ($Ab\%$) des granulats est par définition le quotient de la masse d'un échantillon immergé dans l'eau pendant 24 heures à 20°C et à la pression atmosphérique, par sa masse sèche. Le taux d'absorption des graviers est déterminé par un essai normalisé (NF P 18-555, Décembre 1990). L'essai consiste à exprimer le rapport d'augmentation de la masse de l'échantillon de gravier en pourcentage après imbibition dans l'eau, à la masse sèche de l'échantillon [12].

- La propreté des granulats

Les granulats employés pour le béton peuvent contenir des impuretés (Argile, matières organiques, etc) qui perturbent l'hydratation du ciment et entraînent une mauvaise adhérence entre les granulats et la pâte. Ceci se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on les frotte entre les mains. Le degré de propreté est déterminé à l'aide de l'essai d'équivalent de sable. Les granulats qui ne sont pas propres doivent être lavés avant l'utilisation. Les graviers étant facilement lavables, les impuretés semblent être plus courantes dans le sable. Les normes utilisées pour l'évaluation de la propreté des granulats sont : la norme NF EN 933-8 (1999) pour le sable et la norme NF P18-591 pour la propreté des graviers [12].

iii. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des granulats sont déterminées par des essais tentant de reproduire certaines sollicitations propres à des usages spécifiques des granulats, par exemple le degré d'usure pour les granulats utilisés pour les bétons routiers. La résistance mécanique des granulats dépend des caractéristiques intrinsèques de la roche d'origine.

Nous distinguons entre autres la résistance à la fragmentation déterminée par l'essai Los Angeles suivant les normes NF P 18-573, XP P 18-540 et ASTM C-33 ainsi que la résistance à l'attrition (frottement entre grains) et à l'usure qui à son tour est déterminée par l'essai Micro-Deval suivant les normes NF P18-577, NF EN 1097-1 et XP P 18-540 [21].

1.3.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors du malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5% du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés ou du comportement de ceux-ci. Pour des raisons de commodité d'utilisation, la plupart des adjuvants commercialisés se présentent sous forme liquide. Certains adjuvants existent également en poudre, enfin de réduire leur coût de transport.

Les adjuvants modifient les propriétés des bétons et des mortiers auxquels ils sont ajoutés. Par exemple, l'emploi des plastifiants-réducteurs d'eau et de super plastifiants facilite la mise

en place du béton dans les pièces minces fortement armées, ainsi que la réalisation des bétons à hautes performances. On distingue également des adjuvants retardateurs de prise, ainsi que des accélérateurs de prise [13].

1.4 Propriétés du béton

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés. Le béton possède deux comportements : l'état frais et l'état durci.

1.4.1 Propriétés à l'état frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés.

L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages ou les moules et à enrober convenablement les armatures. De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : nature et dosage en ciment, forme et dimensions des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu le dosage en eau.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur le chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « Slump test », qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique (norme d'essai NF EN 12350-2). L'ouvrabilité d'un béton est sa capacité à maintenir, durant un temps déterminé, une fluidité compatible avec les caractéristiques du coffrage ou du moule et les moyens de mise en place prévus [16].

1.4.2 Propriétés à l'état durci

Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul de dimensionnement des ouvrages. Assez souvent, beaucoup de professionnels du béton considèrent que la propriété essentielle

du béton durci est sa résistance mécanique en compression à 28 jours d'âge. Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance en compression.

De nos jours, il est aussi important de se soucier d'autres propriétés telles que la perméabilité et la porosité. Pour maximiser la résistance du béton, on doit lui assurer un murissement adéquat [22].

1.5 Quelques méthodes de formulation du béton

L'étude de la composition d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et eau, afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage.

Les méthodes proposées sont nombreuses et il n'est pas possible de toutes les citer. Elles aboutissent à des dosages « volumétriques » ou de préférence « pondéraux ». Le passage de l'un à l'autre peut toujours se faire, si nécessaire, en connaissant la densité apparente des granulats en vrac [18].

1.5.1 Méthode de Dreux – Gorisse

La méthode de Dreux offre une approche pratique de la composition du béton répondant à des objectifs déterminés, moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois cette composition déterminée, elle devra, ainsi qu'il a été souligné, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués.

En général, les données suivantes sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux : il s'agit entre autres de la résistance à la compression du béton ainsi que de la maniabilité du béton.

Le domaine d'application des abaques est celui des bétons courants présentant une résistance à 28 jours, comprise entre 15 Mpa et 40 Mpa.

En fonction des caractéristiques de l'ouvrage et des moyens du chantier, on fixe pour le béton une maniabilité caractérisée par sa consistance et mesurée par l'essai au cône d'Abrams [23].

1.5.2 Méthode de Bolomey

La méthode de Bolomey a le mérite d'avoir ouvert la voie aux études de béton. Toutes fois, elle ne peut être appliquée qu'aux granulats dont la masse volumique absolue est comprise entre 2,5 et 2,7 t/m³ ; ce sont d'ailleurs les granulats les plus courants.

Par une formule appropriée, on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser, avec des granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est donnée par la relation 1.1 :

$$P = A + (100 - A) \times \left(\sqrt{\frac{d}{D}} \right) \quad (1.1)$$

Avec:

- ❖ **P** : Pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d ;
- ❖ **D** : Diamètre des plus gros grains ;
- ❖ **A** : la valeur de A dépendra de :
 - La consistance souhaitée de béton ;
 - La provenance des granulats.

Elle varie de 6 à 16, étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est important. Cette méthode aboutit, théoriquement du moins, à une granularité continue [23].

1.5.3 Méthode de Faury

Cette méthode a été introduite en 1941 pour compléter la méthode de Bolomey. La méthode de Faury permet d'obtenir des bétons contenant moins de sable et plus de gravier. Ces bétons sont plus raides et conviennent à des travaux pour lesquels une très bonne maniabilité n'est pas indispensable. Les bétons formulés selon la méthode de Faury présentent généralement une résistance mécanique supérieure à celle des bétons équivalents réalisés avec la méthode de Bolomey [24].

Cette méthode présente des particularités du fait qu'elle est applicable à tous les granulats, quelle que soit leur masse volumique, Faury étudie l'effet des vides, lesquels varient avec $\sqrt[5]{D}$.

Pour tenir compte de l'effet du coffrage et des armatures, Faury introduit la notion d'effet de paroi et de rayon moyen du moule [23].

L'effet de paroi (E_p) est déterminé à l'aide de la relation 1.2 et le rayon moyen du moule (R) par la relation 1.3.

$$E_p = \frac{D}{R} \quad (1.2)$$

$$R = \frac{\text{volume du béton (aciers déduits)}}{\text{surface de tout ce qui est en contact du béton (coffrage + aciers)}} \quad (1.3)$$

1.5.4 Méthode britannique standard de conception de mélange (DOE)

La méthode de formulation DOE a été publiée pour la première fois en 1975 et révisée en 1988. Elle constitue une amélioration de la méthode Road Note No. 4. Il s'agit d'une méthode générale mise au point par le ministère de l'environnement qui peut être appliquée pour produire un béton conçu, en utilisant du ciment et des granulats conformes aux normes britanniques en vigueur. Les mélanges sont spécifiés par la masse des différents matériaux contenus dans un mètre cube.

L'approche de base pour la formulation du mélange est la même et repose sur l'approche par valeurs caractéristiques : la résistance, l'affaissement et la teneur en air cibles, ainsi que la teneur minimale en ciment, et le rapport E/C (eau-ciment) maximal [25].

1.5.5 Méthode de Baron et Lesage

Cette méthode n'est pas en soi une méthode de formulation, mais plus une technique pour optimiser le squelette granulaire d'un béton.

La méthode LPC de composition des bétons est expérimentale. Elle conduit en général à fabriquer plusieurs centaines de litres de béton et une règle de similitude qui permet d'établir un lien entre la mise en œuvre du béton dans les éprouvettes et dans l'ouvrage.

Le meilleur béton est celui qui, à un dosage en eau constant est plus maniable, cette condition permet de déterminer expérimentalement les proportions relative de constituants solides [26].

1.5.6 Méthode Américaine (ACI 211.1) [27]

Cette méthode (ACI 211.1) est probablement l'une des plus populaires au monde. Elle est essentiellement basée sur les travaux de chercheurs américains (ABRAMS et POWERS) et s'applique en huit étapes. Cette méthode permet de formuler le béton sur base des étapes suivantes :

- Étape 1 : Choix de l'affaissement
- Étape 2 : Choix de la taille maximale des granulats (D_{max})
- Étape 3 : Estimation de la quantité d'eau et d'air. L'eau est déterminée en fonction de D_{max} et de l'affaissement requis, tandis que la teneur en air dépend de D_{max} .
- Étape 4 : Sélection du rapport E/C. Ce rapport est choisi en tenant compte de la durabilité (valeur maximale spécifiée) et de la résistance à la compression. Pour cette

dernière, un tableau est fourni pour déterminer le rapport eau/ciment en fonction de la résistance requise.

- Étape 5 : Calcul de la quantité de ciment. Ce calcul est effectué simplement à partir de la quantité d'eau et du rapport eau/ciment déterminé précédemment.
- Étape 6 : Estimation de la quantité de gravillon. La masse volumique en vrac du gravillon, mesurée selon une méthode normalisée (piquage à sec), est d'abord déterminée. Elle est ensuite multipliée par un coefficient tabulé, dépendant de la taille maximale des granulats et du module de finesse du sable.
- Étape 7 : Calcul de la quantité de sable. Cette quantité est obtenue par différence entre le volume unitaire du gâchage et les autres volumes calculés précédemment.
- Étape 8 : Ajustement finaux.

1.5.7 Comparaison des méthodes de formulation

Lorsqu'il s'agit de concevoir un outil informatique pour la formulation du béton, la facilité d'implémentation des différentes méthodes constitue un critère déterminant.

La méthode de Dreux-Gorisse, considérée comme la référence française, offre une grande rigueur scientifique [18], mais la multitude de paramètres qu'elle exige le rend complexe à automatiser. De même l'approche de Faury, centrée sur la compacité optimale des granulats [23], et de Baron et Lesage, axée sur la recherche systématique des dosages en fonction des performances mécaniques et rhéologiques visées [15], demandent la gestion de nombreux paramètres, ce qui alourdit leur implémentation algorithmique. A l'inverse, les méthodes de Bolomey [23] et DoE britannique [25] se distinguent par leur simplicité, car elles s'appuient sur des relations empiriques limitées, respectivement une loi fondamentale reliant le rapport eau/ciment à la résistance et des données expérimentales. Cette approche rend leur implémentation relativement aisée, mais elle limite leur champ d'application aux bétons courants.

Enfin, la méthode ACI se présente comme une pratique standardisée, mettant l'accent sur la simplicité et l'universalité [6]. Ses étapes sont clairement définies et se basent sur des paramètres facilement mesurables tels que la consistance, la résistance caractéristique et le rapport eau/ciment. Ces atouts justifient son choix dans le cadre de ce travail, car elle est facile à implémenter.

1.6 Revue des outils de formulation

Dans le cadre de cette étude, nous allons évoquer de manière générale quelques outils existants, tels que les logiciels Concrete Mix Software v.01 et BétonLab Pro, ainsi que quelques langages de programmation, qui feront l'objet de notre revue sur les outils.

1.6.1 Logiciel Concrete Mix Software v.01 [28]

L'approche de l'intelligence artificielle a été utilisée pour l'élaboration d'un logiciel de formulation des bétons avec ajouts cimentaires. Ce développement repose sur un système combinant les techniques des réseaux de neurones artificiels et des algorithmes génétiques.

Le logiciel CMS v.01 « Concrete Mix Software v.01 » est destiné à la formulation du béton, en prédisant ses propriétés ou en optimisant sa composition. Il s'applique aux bétons contenant de la pouzzolane naturelle ou des cendres volantes.

Deux propriétés essentielles du béton, l'ouvrabilité et la résistance à la compression à un âge donné, sont prises en compte pour la conception des modèles.

1.6.1.1 Interface adoptée pour le modèle développé

Afin que le modèle développé dans la présente étude soit utile et pratique, et pour en faciliter l'utilisation, un prototype de logiciel de prévision et de formulation des bétons ordinaires avec ajouts cimentaires a été conçu.

L'interface graphique proposée regroupe les trois approches. L'utilisateur peut ainsi choisir entre la prévision de la résistance à la compression du béton (modèles M1 et M2) ou la formulation des bétons contenant des cendres volantes (modèle M3).

Le logiciel se présente sous la forme d'un fichier exécutable fonctionnant sous Windows. Lors du démarrage du système, la page d'accueil du logiciel s'affiche, comme illustré à la figure 1.1.



Figure 1.1 : Interface graphique du logiciel CMS v.01 [28]

Après que l'utilisateur a fait son choix, une deuxième fenêtre apparaît pour donner accès soit aux modèles de prévision M1 et M2, soit au modèle de formulation M3.

1.6.2 Logiciel BétonLab Pro [29]

Le logiciel BétonLab Pro a été développé par le LCPC « Laboratoire Central des Ponts et Chaussées » pour l'aide à la formulation du béton. Il permet de mettre en œuvre les modèles, à partir de la définition des constituants utilisés et de la description de la combinaison envisagée par l'utilisateur, ce qui correspond à la fonction simulation.

A l'inverse, le logiciel peut rechercher automatiquement une formulation satisfaisant à un certain nombre de contraintes (cahier des charges), en optimisant un critère.

Lors de l'utilisation du système, l'interface du logiciel s'affiche, comme illustré à la figure 1.2.

The screenshot shows a software window titled "Propriétés du ciment". It features a tabbed interface with the following tabs: "Général", "Composition", "Propriétés", "Squelette", and "Coupure 1". The "Propriétés" tab is currently selected. The main area contains several input fields for cement properties:

- Classe vraie à 1 jour (MPa)
- Classe vraie à 2 jours (MPa)
- Classe vraie à 3 jours (MPa)
- Classe vraie à 7 jours (MPa)
- Classe vraie à 28 jours (MPa) [60]
- Classe vraie à 90 jours (MPa)
- Classe vraie à 360 jours (MPa)
- Masse volumique (kg/m3) [3100]
- Capacité thermique (kJ/K/Kg) [.76]
- Dosage de saturation (%) [.8]
- Retrait endogène
 - Kc (Mpa)

On the right side of the window, there are three buttons: "Enregistrer", "Annuler", and "Outils".

Figure 1.2 : Interface du logiciel BétonLab Pro [29]

Le logiciel dispose d'une base de données regroupant les principaux matériaux du béton tels que les granulats, ciments, additions et fillers. Ces informations permettent d'alimenter les calculs et d'assurer la cohérence des simulations.

L'utilisateur peut procéder à une simulation de gâchées, en définissant les compositions de mélange et en évaluant l'influence des différents paramètres sur le comportement du béton.

Enfin, grâce à la fonction d'optimisation automatique, le logiciel propose une organisation non linéaire des matériaux permettant de déterminer la composition la plus appropriée tout en respectant les contraintes imposées.

1.6.3 Quelques langages de programmation

Dans le domaine de l'informatique, plusieurs langages de programmation ont été développés pour répondre à des besoins variés, allant de l'automatisation de tâches simples au développement d'applications et de système complexe. Dans cette section, nous présentons quelques-uns de ces langages.

1.6.3.1 Langage Java [30]

Java est un langage de programmation très utilisé, notamment par un grand nombre de développeurs professionnels, ce qui en fait un langage incontournable. Développé par Sun Microsystems et aujourd'hui racheté par Oracle, il ne faut pas le confondre avec JavaScript, car ils n'ont rien à voir.

Java est un langage compilé dont le fonctionnement repose sur trois grandes phases : l'écriture du code source, la compilation et l'exécution.

Sa particularité réside dans le fait que le résultat de la compilation n'est pas directement utilisable par l'ordinateur. Contrairement à d'autres langages compilés comme le C ou le C++, java utilise une machine virtuelle qui se charge de rendre le programme exécutable sur différentes plateformes sans que le développeur ait à se préoccuper des spécificités de chaque système d'exploitation.

1.6.3.2 Langage Visual Basic for Applications

Visual Basic for Applications « VBA » est un langage de programmation dérivé de Visual Basic, intégré dans la suite Microsoft Office. Il permet d'automatiser les tâches répétitives, de personnaliser les fonctionnalités des logiciels (notamment Excel, Word et Access) et de développer des applications adaptées aux besoins spécifiques des utilisateurs [31].

Grace à son intégration directe dans Excel, VBA est largement utilisé en génie civil et dans d'autres domaines techniques pour automatiser les calculs et la manipulation de données, développer des interfaces personnalisées, interagir avec les feuilles de calcul pour effectuer des traitements complexes et générer des rapports automatisés, ainsi que pour relier Excel à d'autres logiciels et bases de données.

Visual basic Editor est l'environnement de développement intégré dans les applications Office. Il permet de visualiser et de gérer les projets VBA, d'écrire, de modifier et de déboguer les macros existantes, ainsi que de voir comment les commandes propres à une application

office sont traduites en langage Visual Basic, et inversement. Cet environnement intègre des outils très intuitifs, spécialement conçus pour le développement d'interfaces graphiques [31].

1.6.3.3 Langage JavaScript [32]

JavaScript est un langage de programmation de scripts orienté objet. Il est majoritairement utilisé sur internet, conjointement avec les pages web HTML dans lesquelles il est inclus. JavaScript permet de dynamiser une page HTML en ajoutant des interactions avec l'utilisateur, des animations, de l'aide à la navigation.

Le JavaScript est un langage dit client-side, c'est-à-dire que les scripts sont exécutés par le navigateur de l'internaute (le client). Chaque navigateur possède un interpréteur JavaScript propre : pour internet Explorer, il s'agit de Chakra ; pour Mozilla Firefox, il s'agit de SpiderMonkey et pour Google chrome, il s'agit de V8.

Créé en 1995 par Brendan Eich chez Netscape, le langage a été standardisé sous le nom d'ECMAScript afin de permettre une meilleure interopérabilité entre navigateurs. Aujourd'hui, le JavaScript s'est considérablement étendu et peut être utilisé non seulement pour le web mais aussi pour réaliser des applications avec des environnements comme Node.js ou Electron.

1.6.3.4 Langage Python [33]

Le langage de programmation python, créé en 1989 par Guido van Rossum, est un langage multiplateforme, gratuit, de haut niveau, interprété, orienté objet et relativement simple à prendre en main. C'est aujourd'hui le langage de programmation le plus utilisé au monde et il est très utilisé en Bio-informatique, en Chimie-informatique et en analyse de données.

L'apprentissage d'un langage informatique comme python va nécessiter d'écrire des lignes de codes à l'aide d'un éditeur de texte tels que Visual Studio Code, Sublime Text, Emacs, vim, geany, etc.

1.6.4 Comparaison des langages de programmation

Le choix du langage de programmation doit s'appuyer sur des critères liés à la performance, la clarté syntaxique et la disponibilité de bibliothèques spécialisées.

Le langage Java est reconnu pour sa robustesse et son caractère orienté objet [30], mais il requiert un code relativement long, ce qui complique la mise en œuvre rapide. Le VBA s'intègre facilement à Excel et permet l'automatisation de calculs répétitifs [31], mais son potentiel est limité pour des développements évolutifs. Le JavaScript, incontournable dans le domaine du web [34], présente des atouts en visualisation interactive, mais son usage pour des calculs scientifiques lourds demeure restreint.

En revanche, Python constitue un compromis idéal. Son interprétation simple et sa syntaxe claire le rendent accessible [35]. De plus, il dispose de bibliothèques puissantes telles que NumPy et Pandas, qui facilitent le calcul scientifique et la manipulation de données [36].

Associé à Matplotlib, il permet également de générer des représentations graphiques, ce qui en fait un langage particulièrement adapté pour ce travail.

1.7 Conclusion partielle

Au terme de ce chapitre, nous avons présenté les notions fondamentales relatives au béton. Dans cette continuité, nous avons également introduit les différentes approches de formulation du béton, en soulignant les principes généraux qui les caractérisent. Une comparaison succincte de ces méthodes a montré que, si certaines comme Bolomey ou DoE sont faciles à implémenter mais limitées, et que d'autres comme Dreux-Gorisse, Faury ou Baron et Lesage offrent une précision, tout en étant plus complexes à mettre en œuvre, la méthode ACI constitue le meilleur compromis entre rigueur, clarté et simplicité. C'est sur cette base que nous l'avons retenue comme référence pour ce travail.

En complément, nous avons présenté une revue des outils de formulation, dans laquelle nous avons évoqué de manière générale quelques logiciels existants, tels que CMS v.01 et

BétonLab Pro. Cette revue a également intégré une ouverture sur certains langages de programmation liés à la conception de tels outils. Une comparaison a montré que si Java, VBA et JavaScript présentent des avantages spécifiques, ils demeurent soit complexes, soit peu adaptés aux calculs scientifiques. En revanche, Python, grâce à sa clarté et à son écosystème riche, s'est révélé être le plus adapté pour ce travail.

Ce qui précède nous conduit donc à aborder, dans le chapitre suivant, les essais normés et leurs résultats. Ces données permettront d'appliquer la méthode ACI et de détailler ses étapes, posant ainsi les bases nécessaires à la conception de l'outil à développer.

Chapitre 2

Méthodologie de formulation et conception de l'outil

2.1 Introduction partielle

La formulation du béton étant le sujet principal de ce travail, nous débutons cette partie par la caractérisation des constituants du béton à travers les essais normés, dont les résultats conditionnent l'application de la méthode ACI (module de finesse, masse volumique, teneur en eau, etc). Ensuite, nous présenterons les principes essentiels de cette méthode et les paramètres nécessaires à la détermination des proportions des constituants.

Enfin, nous allons réaliser une conception rapide mais suffisante de l'architecture globale de notre outil, que nous appellerons *BétonForm*, tout en précisant le rôle des différents composants qui le constituent.

2.2 Caractérisation des constituants

Avant de présenter la méthode ACI, il convient d'examiner la composition du béton à travers sa caractérisation, qui passe par des essais normés. Les résultats de ces essais servent de paramètres essentiels à son application.

2.2.1 Ciment

La masse volumique absolue du ciment (ρ_{ab}) est déterminée par un essai normalisé [37]. On détermine la masse volumique absolue (g/cm^3) à l'aide de la relation 2.1.

$$\rho_{ab} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (2.1)$$

Avec :

- ❖ V_1 : Volume initial de la solution seule dans le pycnomètre ;

- ❖ M_1 : Masse du pycnomètre contenant uniquement la solution ;
- ❖ V_2 : Volume final de la solution + le ciment dans le pycnomètre ;
- ❖ M_2 : Masse du pycnomètre contenant la solution + le ciment.

2.2.2 Granulats

La détermination de certaines caractéristiques des granulats entrant dans les bétons est effectuée à travers des essais normalisés notamment, l'analyse granulométrique, l'essai de la masse volumique apparente, l'essai de la masse volumique absolue, etc [37].

2.2.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a pour objectif de déterminer la répartition pondérale des grains d'un granulat en fonction de leurs dimensions, par traçage de la courbe granulométrique.

i. Expression des résultats

Les résultats de l'analyse granulométrique s'expriment sous forme des courbes, dites *courbes granulométriques* dont les abscisses comportent les dimensions des tamis en module Afnor et les ordonnées comportent les tamisât cumulés en pourcentage, notés P_j (%). Les tamisât cumulés en pourcentage sont obtenus pour le tamis j (numéro des tamis du haut vers le bas) par la relation 2.2.

$$P_j(\%) = \left(1 - \frac{\sum M_i^r}{M_s} \right) \times 100 \quad (2.2)$$

Avec :

- ❖ M_s : masse de l'échantillon sec ;
- ❖ M_i^r : masse du refus sur le tamis i , avec $1 \leq i \leq j$.

ii. Caractéristiques liées à la granulométrie

Les caractéristiques associées à la granulométrie sont utilisées pour caractériser les granulats en fonction de leur taille de grains. Parmi ces caractéristiques, on trouve le module de finesse, le coefficient d'uniformité et le coefficient de courbure.

- Module de finesse

Le module de finesse (M_f) est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Il est obtenu en divisant par 100 la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage, sur le tamis de la série suivante : 0.16 – 0.315 – 0.63 – 1.25 – 2.5 – 5 mm, conformément à la norme française NF P18-560 [38].

La relation 2.3 permet de déterminer le module de finesse :

$$M_f = \frac{1}{100} \times \sum_{i=1}^6 R_i \quad (2.3)$$

Avec :

❖ R_i : refus cumulés en % sur le tamis i .

Le module de finesse permet d'évaluer la granularité du sable. Un bon sable pour le béton présente un module de finesse compris entre 2.2 et 2.8, garantissant un équilibre entre ouvrabilité et résistance mécanique. En dessous de 2.2, le sable est trop fin, ce qui augmente le besoin en eau et diminue la résistance du béton.

Au-dessus de 2.8, le sable est plus grossier, adapté aux bétons résistants mais plus difficiles à mettre en œuvre. Ce paramètre permet donc de mieux choisir les sables selon les exigences du béton.

- Coefficient d'uniformité (C_u)

La notion de granulométrie étalée ou granulométrie serrée est mise en évidence par un coefficient d'uniformité (C_u) appelé aussi coefficient de HAZEN [12].

Il est déterminé à l'aide de la formule 2.4.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.4)$$

Avec :

- ❖ **D₆₀** : dimension du tamis correspondant à 60% de tamisât ;
- ❖ **D₁₀** : dimension du tamis correspondant à 10% de tamisât.

L'analyse du coefficient d'uniformité C_u permet de caractériser le degré de répartition des grains d'un granulat.

Lorsque $C_u \leq 2$, la granulométrie est dite *serrée ou uniforme*, indiquant une faible diversité de tailles de grains. En revanche, si $C_u > 2$, la granulométrie est dite *étalée ou variée*, traduisant une large distribution des dimensions des particules.

- Coefficient de courbure (C_z)

Le coefficient de courbure (C_z) est un paramètre qui permet de caractériser la forme de la courbe granulométrique entre les diamètres effectifs D_{10} et D_{60} [39]. Il est déterminé à l'aide de la formule 2.5.

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2.5)$$

Avec :

- ❖ **D₆₀** : dimension du tamis correspondant à 60% de tamisât ;
- ❖ **D₃₀** : dimension du tamis correspondant à 30% de tamisât.
- ❖ **D₁₀** : dimension du tamis correspondant à 10% de tamisât.

Le coefficient de courbure permet d'apprécier la régularité de la répartition des grains dans un granulat. Lorsqu'il se situe entre 1 et 3, la granulométrie est *bien graduée*, traduisant une bonne répartition des différentes tailles de particules. En revanche, une valeur supérieure à 3 indique la présence d'un creux vers le bas sur la courbe granulométrique, tandis qu'une valeur inférieure à 1 traduit un creux vers le haut. Dans les deux cas, cela révèle une irrégularité dans la distribution des grains, et donc une granulométrie *mal graduée*.

2.2.2.2 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue correspond à la masse d'un matériau par unité de volume de matière solide, c'est-à-dire sans aucun vide entre les grains. L'essai est réalisé conformément à la norme NF P18-554 pour les graviers et NF P18-555 pour les sables [40].

La masse volumique absolue (ρ_{abs}) sera ainsi déterminée à partir de la relation 2.6.

$$\rho_{abs} = \frac{M_s}{V_2 - V_1} \quad (2.6)$$

Avec :

- ❖ **M_s** : Masse sèche de l'échantillon, à noter qu'elle doit être obtenue après un passage à l'étuve à 105 °C jusqu'à l'élimination totale de l'humidité pour ne comptabiliser que la matière solide réelle ;
- ❖ **V₂** : Volume d'eau avec les granulats ;
- ❖ **V₁** : Volume d'eau dans l'éprouvette gradué.

2.2.2.3 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est la masse d'un corps par unité de volume total, c'est-à-dire en tenant compte des vides entre les grains. L'essai est réalisé conformément à la norme NF P18-554 pour les graviers et NF P18-555 pour les sables [40].

La masse volumique apparente (ρ_{app}) est alors calculée à partir de la relation 2.7.

$$\rho_{app} = \frac{M_s}{V} \quad (2.7)$$

Avec :

- ❖ **M_s** : Masse sèche du matériau ;
- ❖ **V** : Volume du récipient.

2.2.2.4 Taux d'absorption d'eau

Le taux d'absorption d'eau d'un granulat (sable ou gravier) correspond à la quantité d'eau que peut absorber un matériau poreux lorsqu'il est immergé, par rapport à la masse sèche. Cet essai, normalisé selon la NF P18-555 [40], permet de déterminer la capacité d'imbibition du granulat, c'est-à-dire la proportion d'eau retenue dans les pores accessibles à l'eau.

Le taux d'absorption d'eau (**A_b**) est donné par la relation 2.8.

$$A_b = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.8)$$

Avec :

- ❖ **M_a** : La masse humide (après immersion et essuyage) ;
- ❖ **M_s** : La masse sèche (après séchage à 105°C ± 5°C).

2.2.2.5 Teneur en eau

La teneur en eau d'un granulat représente la quantité d'eau contenue dans celui-ci au moment de son utilisation. L'essai de détermination de la teneur en eau est réalisé conformément à la norme NF EN 1097-5 [41].

La teneur en eau **W** est donnée par la relation 2.9.

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.9)$$

Avec :

- ❖ M_h : La masse du granulat à l'état humide ;
- ❖ M_s : La masse du granulat à l'état sec.

2.3 Présentation et définition

Selon l'American Concrete Institute (ACI), la formulation d'un béton consiste à déterminer de manière rationnelle et progressive les proportions des différents constituants (ciment, granulats, eau et éventuellement des adjuvants) afin d'obtenir un mélange répondant à la fois aux exigences de résistance mécanique, de durabilité et de maniabilité [6]. En d'autres termes, il s'agit de fixer la composition appropriée qui permet d'assurer les performances du béton dans des conditions données d'utilisation.

De même, en tant que démarche scientifique et pratique, la méthode ACI repose sur des règles empiriques issues d'un grand nombre d'essais et d'expériences [2]. Elle vise à fournir un dosage initial théorique qui pourra ensuite être ajusté par des essais de convenance afin de garantir la conformité du béton aux spécification du projet.

2.3.1 Principe général de la méthode ACI

La méthode ACI est fondée sur l'établissement d'un rapport eau/ciment (E/C) déterminé à partir de la résistance à la compression recherchée [42]. Une fois ce rapport fixé, la procédure s'appuie sur des tables normatives pour quantifier le volume d'eau de gâchage ainsi que les proportions de granulats grossiers et fins.

En définitive, la méthode ACI offre une approche normée, pratique et adaptable, permettant d'obtenir un béton conforme aux exigences mécaniques et de mise en œuvre, tout en servant de base à d'éventuelles corrections expérimentales [43].

2.3.2 Procédure détaillée de la méthode ACI

La mise en œuvre de la méthode ACI repose sur une succession d'étapes rigoureuses qui permettent d'établir la composition théorique du béton ; Ces étapes sont présentées comme suit :

2.3.2.1 Choix de l'affaissement

Généralement, l'affaissement sera spécifié pour un travail particulier, afin de prendre en compte les méthodes prévues de malaxage et de mise en place du béton [5]. Cependant, lorsque l'affaissement n'a pas été spécifié, des valeurs appropriées peuvent être choisies dans le tableau 2.1, qui s'applique lorsque le béton doit être consolidé par vibration.

Tableau 2.1 : Affaissement recommandés par divers types de construction [44]

Construction en béton	Affaissement en mm	
	Maximum	minimum
Murs de fondation renforcés et semelles	75	25
Semelles simples, caissons et murs de sous - structure	75	25
Poutres et murs renforcés	100	25
Colonne de bâtiment	100	25
Pavages et dalles	75	25
Béton de masse	75	25

2.3.2.2 Choix du diamètre maximal (D_{max}) des gros granulats

La grosseur maximale utilisable dépend à la fois des dimensions, de la forme de l'élément à couler, de la disposition des armatures et de l'épaisseur des dalles. La taille maximale des granulats [5] :

- Pour le béton armé ou précontraint, le diamètre maximal ne devrait pas dépasser le un – cinquième (1/5) de la dimension minimale entre les formes ($D_{\max} \leq d/5$), les trois-quarts (3/4) de l'espacement entre les armatures.
- Pour les dalles, la taille maximale ne devrait pas excéder le un-tiers (1/3) de l'épaisseur de la dalle.
- En plus de ces limitations, il a été déterminé expérimentalement que, lorsque le diamètre maximal des granulats excède 40 mm, la résistance du béton diminue en raison de la diminution de la force de liaison (adhérence) entre le granulat et la matrice.

Une fois la taille maximale des granulats déterminée, la norme ACI exige que la résistance moyenne à la compression du béton obtenue lors des essais de formulation doit être égale ou supérieure à la résistance moyenne cible [45] , exprimée par :

$$f_{cr} = f_c + (1,34 \times S) \quad (2.10)$$

Avec :

- ❖ f_c : résistance à la compression spécifiée du béton ; S : l'écart-type.

En absence de données de chantier, l'écart-type peut être sélectionné à partir du tableau 2.2 ;

Tableau 2.2 : Résistance moyenne cible à la compression [45]

Résistance spécifiée, f_c (en M_{pa})	Résistance moyenne cible, f_{cr} (en M_{pa})
Moins de 21	$f_c + 7,0$
De 21 à 35	$f_c + 8,5$
Plus de 35	$f_c + 10,0$

2.3.2.3 Estimation de l'eau de gâchage et de teneur en air

L'ouvrabilité du béton dépend principalement de la teneur en pâte de ciment, de la quantité d'air entraîné, du diamètre maximal, ainsi que de la granulométrie et de la forme des granulats [5].

Une estimation de la quantité d'eau requise pour obtenir différents affaissements, que ça soit pour un béton à air entraîné peut être établie à partir du tableau 2.3.

Tableau 2.3 : Dosage en eau et teneur en air selon D_{max} et l'affaissement [45].

Affaissement en mm	Eau, kg/m ³ du béton pour D_{max} du granulat donné							
	10 mm	12.5 mm	20 mm	25 mm	40 mm	50 mm	80 mm	150 mm
	Béton sans air entraîné							
25-50	207	199	190	179	166	154	130	113
75-100	228	216	205	193	181	169	145	124
150-175	243	228	216	202	190	178	160	-
Quantité d'air approximative en (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
	Béton à air entraîné							
25-50	181	175	168	160	150	142	122	107
75-100	202	193	184	175	165	157	133	119
150-175	216	205	197	184	174	166	154	-
Teneur en air totale moyenne recommandée pour (%)								
Exposition légère	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposition modérée	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposition extreme	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

2.3.2.4 Choix du rapport eau/ciment (E/C)

La sélection du rapport E/C approprié est guidée par les exigences de résistance ou de durabilité [5].

- La résistance : elle est inversement proportionnelle au rapport E/C. Pour un béton bien compacté et fabriqué avec des granulats propres de bonne qualité, la résistance ainsi que les autres propriétés du mélange sont déterminées, dans des conditions de chantier données, par la quantité d'eau de gâchage par unité de masse de ciment.

Pour un rapport E/C constant, la résistance peut toutefois varier en fonction de la distribution granulométrique et de la texture des granulats, ainsi que du type et du dosage de ciment. En l'absence de données précises sur la relation entre la résistance et le rapport E/C, il est possible d'estimer la résistance à la compression à 28 jours en utilisant le tableau 2.4.

Tableau 2.4 : Le rapport E/C par masse [46]

Résistance à la compression à 28 jours, Mpa	Rapport E/C par masse	
	Béton non entraîné	Béton à air entraîné
45	0.38	0.30
40	0.42	0.34
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.97	0.70

- Durabilité : S'il y a des conditions d'expositions sévères telles que le gel-dégel, ou l'exposition à l'eau de mer ou aux sulfates, le tableau 2.5 pourrait être utilisé pour estimer le rapport E/C.

Tableau 2.5 : Rapport E/C maximal pour les bétons exposés aux conditions sévères [5]

Type de structure	Structure constamment ou fréquemment mouillée et exposée au gel et au dégel	Structure exposée à l'eau de mer ou aux sulfates
Sections minces et sections avec moins de 3 cm de recouvrement sur l'armature	0.45	0.4*
Toutes les autres sections	0.5	0.45*

2.3.2.5 Calcul du dosage en ciment [5]

Une fois que l'eau de gâchage et le rapport E/C sont déterminés, la quantité de ciment par unité de volume de béton est déterminée par la relation 2.11.

$$C = \frac{E}{E/C} \quad (2.11)$$

Avec, - E : l'eau de gâchage ; E/C : le rapport eau-ciment.

2.3.2.6 Estimation de la teneur en gros granulats [5]

Pour une même ouvrabilité, le volume de gros granulats dépend de leur diamètre maximal et du module de finesse de granulat fin. La masse à l'état sec des gros granulats requis par m³ de béton est simplement égale à la valeur indiquée dans le tableau 2.6, multipliée par la masse volumique compactée des granulats en kg/m³.

2.3.2.7 Estimation de la teneur en granulat fin [5]

Une fois que les volumes de ciment (v_c), d'eau (v_e), d'air (v_a) et de gros granulats déterminés (v_g), on les soustrait du volume total de béton (généralement 1m^3 dans les calculs de formulation). Le volume restant correspond au volume de sable (granulat fin). La formule pour déterminer le volume de sable (V_s) est donnée par la relation 2.12.

$$V_s = V_{\text{total}} - (V_c + V_e + V_a + V_g) \quad (2.12)$$

Ensuite, le poids de ce sable est obtenu en multipliant ce volume par sa masse volumique réelle.

Tableau 2.6 : Volume apparent du gros granulat compacté à l'état sec [45].

Grosseur maximale des granulats, en mm	Volume du gros granulat compacté à l'état sec par unité de volume de béton pour différents modules de finesse des granulats fins			
	2.40	2.60	2.80	3.00
10	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
20	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
40	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
80	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

2.3.2.8 Ajustement pour l'humidité des granulats [5]

La teneur réelle en humidité des agrégats affectera la teneur en eau du mélange de béton. Si l'agrégat est à l'état naturellement sec (séchage naturel à l'air), il absorbera une partie de l'eau de gâchage, réduisant ainsi le rapport E/C effectif et l'ouvrabilité. D'un autre côté, si le

granulat est à l'état saturé surface humide, l'eau à la surface des granulats contribuera à l'eau de gâchage, augmentant ainsi le rapport E/C et l'ouvrabilité mais réduisant la résistance.

Par conséquent, ces effets doivent être pris en compte dans les calculs des mélanges des bétons.

2.4 Conception de l'architecture globale

Il existe un large éventail des méthodes de développement des outils informatiques mais, en règle générale, toutes suivent les étapes suivantes [47] :

1. Spécifications : on définit avec précision ce que fera l'outil (à quoi est-il destiné ?) ;
2. Conception et mise en œuvre : on conçoit et on réalise l'outil ;
3. Validation : on teste l'outil pour voir s'il correspond aux objectifs précisés dans les spécifications ;
4. Evolution : cela correspond à tout ce qui vient après la livraison du produit (*versionning, maintenances, ...*).

Ici, on ne va pas utiliser une méthode de conception particulière. Pour pouvoir tout de même y aller méthodiquement, nous nous inspirerons de ces étapes classiquement suivies.

2.4.1 Spécifications de l'outil

Les spécifications de l'outil définissent les exigences techniques et fonctionnelles nécessaires pour garantir l'efficacité de la solution et sa réponse aux besoins des utilisateurs.

2.4.1.1 Utilisateurs cibles

L'outil *BétonForm* est conçu principalement pour les ingénieurs en matériaux, techniciens de laboratoire et bureaux d'études intervenant dans le domaine du génie civil. Il vise à automatiser l'ensemble de processus de formulation selon la méthode ACI, depuis les essais jusqu'à la génération du rapport final.

L'outil sera également utile aux étudiants et aux enseignants en tant qu'outil pédagogique, leur permettant de comprendre et d'appliquer la formulation du béton selon la méthode ACI.

2.4.1.2 Exigences fonctionnelles

L'outil *BétonForm* doit être simple d'utilisation. Voici les principales fonctionnalités attendues :

1. Gestion des lots de matériaux

L'utilisateur peut créer, modifier et gérer les lots de ciment, sable ou gravier à tester. Chaque lot est identifié par un nom, un type de matériau et une date de réception. Cette fonctionnalité permet de suivre l'avancement des essais (en cours, terminés, validés).

2. Exécution des essais numériques

L'outil permet d'importer les données brutes d'essai (depuis Excel pour le cas de l'analyse granulométrique) ou de les saisir manuellement. Il exécute automatiquement les calculs (granulométrie, masses volumiques, etc.) et affiche les résultats finaux.

3. Création de matériaux validés

Lorsque tous les essais d'un lot sont complétés, l'outil permet de « Valider » le matériau. Ces matériaux certifiés rejoignent alors la bibliothèque des matériaux validés, prêt à être utilisé pour la formulation.

4. Définition des paramètres de formulation

Avant le calcul, l'utilisateur saisit les paramètres cibles du béton à produire notamment, la résistance caractéristique souhaitée, l'affaissement, les conditions d'exposition, etc.

5. Calcul de formulation ACI

Une fois les matériaux sélectionnés et les paramètres définis, l'outil exécute automatiquement le calcul séquentiel ACI 211.1. Le moteur détermine les dosages (eau,

ciment, sable, gravier) en appliquant les règles de durabilité et de résistance, puis affiche les résultats.

6. Visualisation et archivages des résultats

Les résultats de formulation (masses sèches, masses humides, rapport E/C, etc.) sont clairement présentés. L'utilisateur peut sauvegarder chaque formulation avec ses paramètres, ses matériaux utilisés et ses résultats pour une réutilisation future.

7. Génération de rapports

L'outil génère deux rapports, à savoir un rapport de formulation et une note de calcul contenant l'ensemble des informations du projet notamment les paramètres cibles, résultats du calcul et les courbes granulométriques, etc.

2.4.1.3 Exigences non fonctionnelles

Les exigences non fonctionnelles définissent les critères de performance et les contraintes techniques de l'outil *BétonForm*. Elles visent à garantir la stabilité de l'outil, rapidité et ainsi que sa maintenabilité à long terme.

1. Performance

L'outil doit offrir une interface utilisateur fluide et réactive.

2. Fiabilité et robustesse

L'outil doit être stable et robuste, minimisant les bugs et les erreurs pour offrir un service fluide et sans interruption.

3. Utilisabilité

L'outil, doit être simple à utiliser et rapidement maîtrisable.

4. Maintenabilité et évolutivité

L'outil doit être facile à entretenir, à tester et à faire évoluer.

2.4.2 Justification des choix technologiques

Le choix des technologies utilisées pour le développement de l'outil *BétonForm* résulte d'une analyse des besoins fonctionnels et non fonctionnels du projet.

Python a été retenu comme langage principal en raison de sa lisibilité, de sa large communauté et surtout son écosystème particulièrement riche.

Le framework Dash a été choisi pour le développement de l'interface utilisateur. Il permet de concevoir des applications web interactives et analytiques entièrement en python.

Pour la persistance des données, le système de gestion de base de données SQLite s'est imposé comme la solution la plus adaptée. Son fonctionnement « serverless » garantit une autonomie complète de l'application sans dépendance à un serveur externe. L'accès à la base de données est assuré par SQLAlchemy, un ORM qui permet de manipuler les données sous forme d'objets python, rendant le code plus propre, plus sûr et plus facilement testable.

L'aspect visuel de l'interface est renforcé par l'utilisation de Bootstrap, un framework CSS moderne reposant sur une approche *component-first*. Il permet de concevoir une interface cohérente, réactive et esthétiquement soignée, tout en garantissant une homogénéité visuelle.

De plus, Bootstrap facilite la maintenance et l'évolution de l'interface au fil du temps, grâce à une structure claire et à des composants réutilisables.

Pour la génération des rapports, le projet adopte Weasyprint, une bibliothèque permettant de transformer des templates HTML/CSS en documents PDF de haute qualité.

2.4.3 Architecture globale de l'outil

L'architecture de l'outil repose sur une structure hexagonale, également appelée architectures Ports et Adaptateurs. Cette approche constitue une forme avancée d'architecture

modulaire [48], visant à séparer la logique métier de l'outil de ses dépendances techniques, afin d'assurer une plus grande flexibilité, une meilleure testabilité et une maintenance facile.

Au cœur de cette architecture se trouve le module central (core), qui représente la partie purement logique de l'outil. Il intègre deux moteurs de calcul principaux :

- Formulation-engine, dédié à la formulation du béton selon la méthode ACI ;
- Lab-test engine, chargé des calculs liés aux essais de laboratoire.

Ce module central constitue le socle fonctionnel de l'outil, tout en restant totalement indépendant des technologies externes.

Autour de ce noyau gravitent plusieurs adaptateurs qui assurent la communication entre le cœur et les différents environnements techniques :

- L'adaptateur persistance (SQLAlchemy) gère les interactions avec la base de données à travers un gestionnaire de sessions et des modèles ORM, permettant de découpler le stockage de la logique métier.
- L'adaptateur reporting (WeasyPrint) se charge de la génération automatique des rapports, tels que la note de calcul, le rapport synthétique de formulation à partir des données traitées par le cœur.
- L'adaptateur Web_ui (Flask/Dash) assure la présentation et l'interaction avec l'utilisateur à travers des vues et des interfaces dynamiques, tout en assurant la restitution visuelle des résultats.

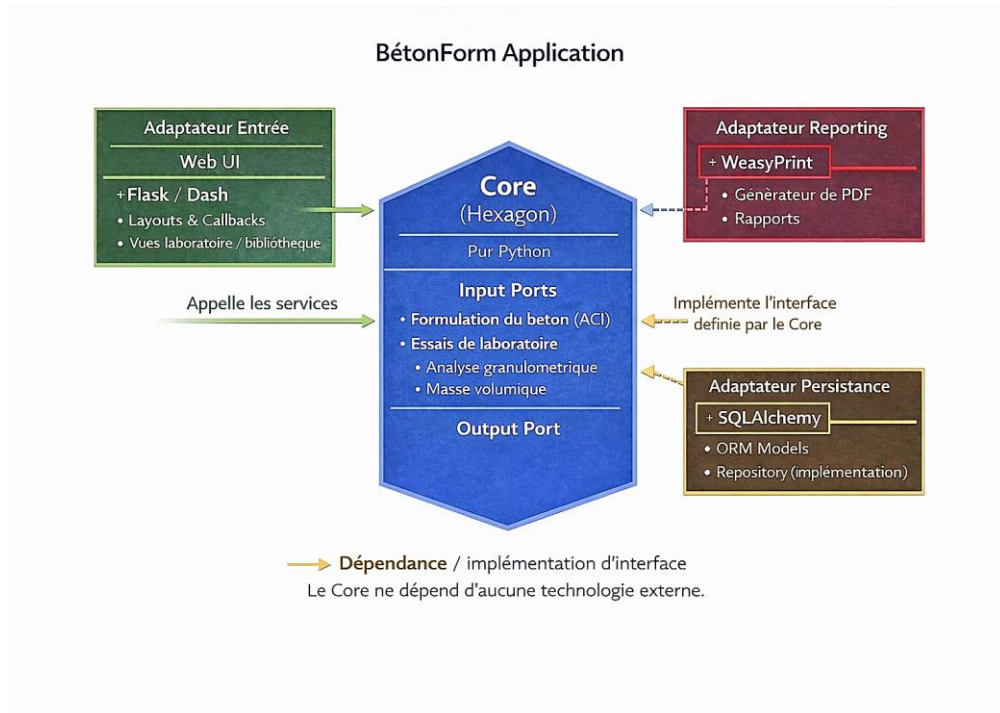


Figure 2.1 : Architecture globale de notre outil

2.5 Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de poser les bases méthodologiques et technologiques de la conception de l'outil *BétonForm*. Dans un premier temps, la caractérisation des constituants du béton a été présentée à travers divers essais normalisés dont les résultats constituent les paramètres essentiels à l'application de la méthode ACI.

La méthode ACI a ensuite été présentée en détail afin d'exposer les principes et étapes clés de la formulation du béton selon une approche rationnelle et conformes aux exigences normatives.

Enfin, la conception de l'outil *BétonForm* a été abordée en considérant les différentes technologies mobilisées pour le développement de l'outil. Parmi celles-ci, *le langage python* a été retenu comme langage principal en raison de sa lisibilité, de sa large communauté et surtout son écosystème particulièrement riche. Le choix de *l'architecture logicielle Hexagonale* a également été adopté afin de garantir la maintenabilité et l'évolutivité de l'outil.

Ainsi, ce chapitre a permis de définir le cadre méthodologique et technologique de l'outil, posant les bases nécessaires pour le chapitre suivant, qui sera consacré à l'implémentation, test et à la validation des fonctionnalités de l'outil *BétonForm*.

Chapitre 3

Implémentation, test et validation de l'outil

3.1 Introduction partielle

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté les bases théoriques et méthodologiques de la formulation du béton, ainsi que la conception de l'outil *BétonForm*. Le présent chapitre est consacré à l'implémentation, aux tests et à la validation de cet outil.

Il portera sur la réalisation de l'outil, la présentation des résultats obtenus et la vérification de leur fiabilité à travers des cas documentés. Cette validation s'appuiera sur des comparaisons avec des calculs manuels ainsi que ceux issues de la littérature.

3.2 Réalisation et présentation de l'outil

La présente partie est consacrée à la réalisation de l'outil d'aide à la formulation du béton selon la méthode ACI, en se limitant à l'environnement de développement, aux interfaces et à son utilisation.

3.2.1 Environnement de développement

Pour l'implémentation de l'outil *BétonForm*, l'IDE « Visual Studio Code » a été utilisé. Ce choix est justifié par le fait qu'il s'agit d'un éditeur gratuit, pratique et disponible sur les systèmes Windows, MacOS et Linux [49]. Sa grande flexibilité permet notamment l'ajout de nombreux plugins afin de personnaliser l'environnement selon les besoins spécifiques et les usages du projet.

L'interface de l'outil se distingue par une organisation ergonomique facilitant le flux de travail, avec une barre d'outils en partie haute et des icônes sur la gauche permettant l'accès aux fonctionnalités clés. Celles-ci incluent notamment la gestion de l'arborescence du dossier ouvert, un outil de recherche performant, ainsi qu'un système de suivi Git directement intégré.

La figure 3.1 présente l'environnement Visual Studio Code.

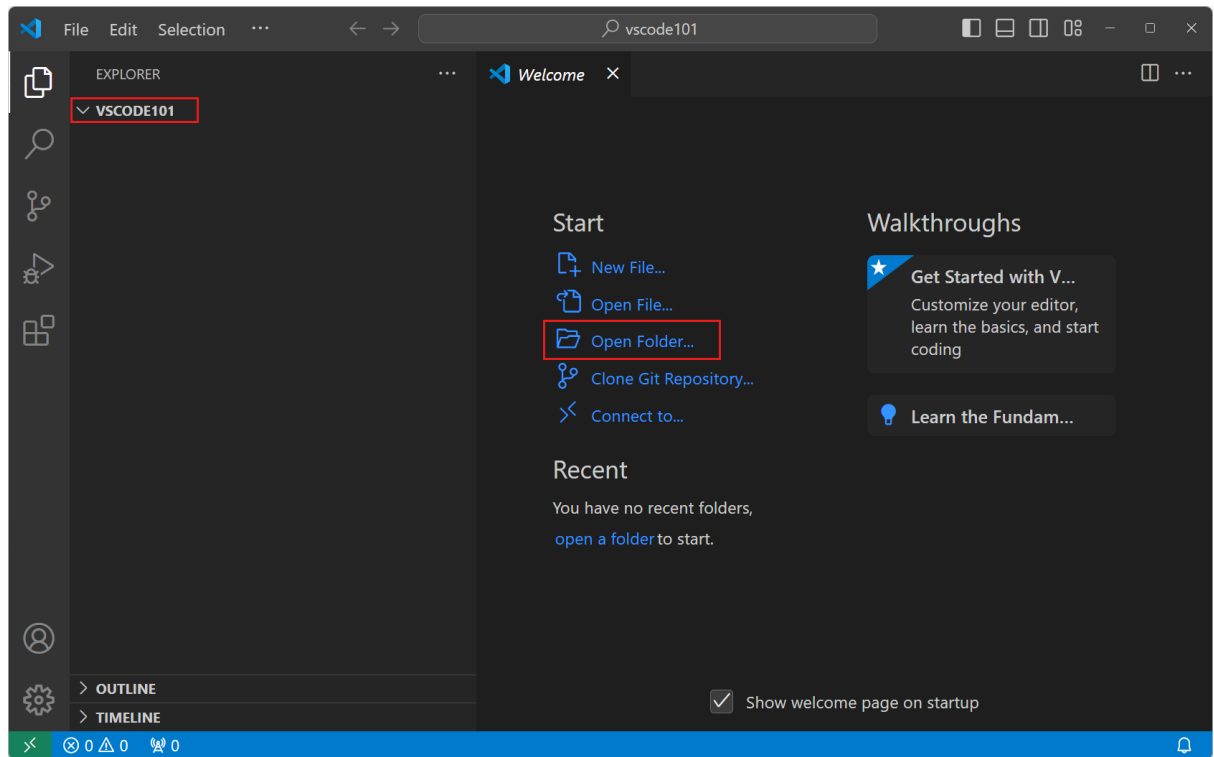


Figure 3.1 : Editeur Visual Studio Code

3.2.2 Présentation des interfaces et guide utilisateur

L'outil *BétonForm* a été conçu pour offrir une expérience utilisateur simple et intuitive. Grâce à une interface fluide et accessible, elle permet aux utilisateurs de réaliser la formulation en seulement quelques minutes.

Les principales interfaces de l'outil présentées dans les sections suivantes, décrivent à la fois leur rôle et le parcours utilisateur nécessaire pour saisir les données, lancer les calculs et consulter les résultats :

3.2.2.1 Page d'accueil

La page d'accueil de l'outil *BétonForm* représente le point d'entrée principal. Elle joue le rôle du tableau de bord, en fournissant à l'utilisateur une vision globale et synthétique de l'état des activités liées à la formulation du béton.

Cette interface présente des indicateurs de suivi essentiels, notamment le nombre de lots en cours de traitement, les matériaux validés ainsi que les formulations archivées. Ces informations permettent à l'utilisateur d'évaluer rapidement l'avancement des travaux et l'état des données disponibles dans le système.

En outre, la page d'accueil intègre une section dédiée aux actions rapides, facilitant l'accès direct aux principales fonctionnalités de l'outil, notamment la gestion du laboratoire, la création de formulations et la consultation de l'historique, facilitant ainsi une navigation intuitive et efficace au sein de l'outil.

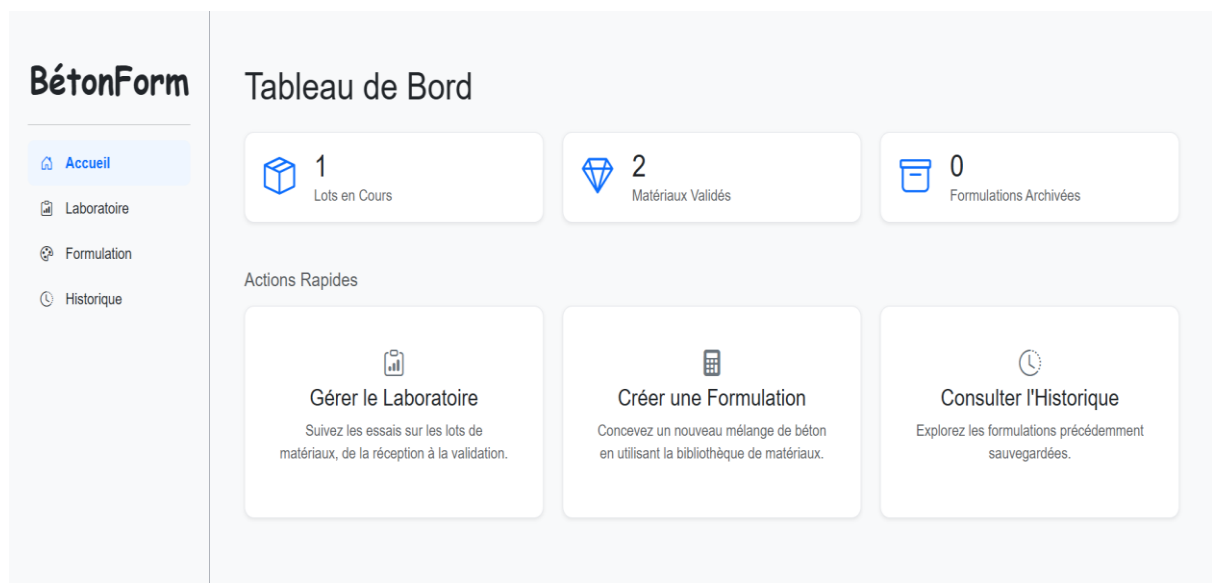


Figure 3.2 : Page d'accueil de l'outil BétonForm

3.2.2.2 Page du laboratoire des matériaux

La page du laboratoire des matériaux constitue le point central de gestion des lots dans l'outil *BétonForm*. Elle permet à l'utilisateur de créer un nouveau lot en renseignant les informations essentielles, notamment le nom du lot, type de matériau et la date de réception. Tous les lots apparaissent ensuite dans un tableau récapitulatif, avec un statut indiquant leur état (validé ou en attente).

Cette interface agit comme une page de supervision, permettant à l'utilisateur de visualiser rapidement quels matériaux sont prêt à l'emploi et quels matériaux nécessitent encore des essais complémentaires. Par exemple, comme illustré à la figure 3.3, les matériaux ciment portland et sable roulé apparaissent avec le statut validé comme matériau, indiquant que l'ensemble des essais requis a été réalisé et que ces matériaux sont disponibles pour la formulation du béton. En revanche, le gravier concassé apparaît avec un statut en attente, ce qui s'explique par le fait que sa fiche d'essai n'a pas encore été complétée et que le matériau n'est pas encore créé ni validé dans l'outil.

Laboratoire des Matériaux

Nom du lot (ex: Sable de Seine Lot 1) Type de matériau 31-12-2025 **Ajouter**

Lots existants

#	Nom	Type	Date de Réception	Statut		Actions
1	Ciment portland	CEMENT	31-12-2025	Validé comme matériau	✓	Gérer les essais
2	Gravier concassé	GRAVEL	31-12-2025	En attente	✓	Gérer les essais
3	Sable roulé	SAND	31-12-2025	Validé comme matériau	✓	Gérer les essais

Figure 3.3 : Page du laboratoire des matériaux

L'utilisateur peut accéder à la fiche d'essai de chaque matériau via l'action « Gérer les essais ».

Chaque lot de matériau dispose d'une fiche d'essai dédiée, accessible depuis la page du laboratoire des matériaux. Les figures 3.4, 3.5, et 3.6 présentent ces différentes fiches d'essais.

Fiche d'essai : Ciment portland Type : CEMENT Matériau Créé

- ✓ Masse Volumique Absolue

Figure 3.4 : Fiche d'essai du ciment

La fiche d'essai du ciment est exclusivement consacrée à la détermination de la masse volumique absolue, seule grandeur intervenant dans la méthode de formulation ACI. L'accès à la saisie de données s'effectue en déroulant l'icône située à droite de l'interface.

Fiche d'essai : Gravier concassé Type : GRAVEL Valider et Créer le Matériau

- Analyse Granulométrique À faire
- Absorption d'Eau À faire
- Masse Volumique Absolue À faire
- Masse Volumique Apparente À faire
- Teneur en Eau À faire

Figure 3.5 : Fiche d'essai des graviers

La fiche d'essai des graviers regroupe l'ensemble des essais nécessaires à sa caractérisation dans le cadre de la formulation du béton selon la méthode ACI. Les essais disponibles sont directement visibles sur l'interface illustrée dans la figure 3.5. L'accès à la saisie de données s'effectue en déroulant les icônes situées à droite de l'interface.

Sur la figure 3.5 présentée, le matériau gravier apparait avec un statut non validé ; cette situation s'explique par le fait que l'utilisateur n'a pas encore renseigné l'ensemble des données nécessaires à la réalisation des essais, ce qui empêche la validation et la création effective du matériau dans le système. Tant que ces essais ne sont pas complétés, le matériau reste indisponible pour la formulation.

The screenshot shows a web interface titled "Fiche d'essai : Sable roulé" with a subtitle "Type : SAND". A green button "Valider et Créer le Matériau" is in the top right. Below the title is a blue bar with "Analyse Granulométrique" and a button "À faire". The main content area has two tabs: "Saisie Manuelle" (selected) and "Importer Fichier". Under "Saisie Manuelle", there are two columns of input fields for sieve sizes and retained mass. The left column has sieve sizes 4 mm, 2 mm, 1 mm, and 0.5 mm, with the 4 mm field containing the value 500 and the 1 mm field containing 200. The right column has sieve sizes 0.25 mm, 0.125 mm, and 0.063 mm. Below these is a section "Ajouts Manuels" with a "Taille (mm)" field and a "Masse Retenue (g)" field. A link "Ajouter une ligne de tamis" is below this section. At the bottom is a large blue button "Lancer le Calcul".

Sieve Size (mm)	Retained Mass (g)
4 mm	500
2 mm	Masse Retenue (g)
1 mm	200
0.5 mm	Masse Retenue (g)
0.25 mm	Masse Retenue (g)
0.125 mm	Masse Retenue (g)
0.063 mm	Masse Retenue (g)

Figure 3.6 : Interface de saisie pour l'analyse granulométrique du sable

La fiche d'essai permet de caractériser le sable via différentes sections, comme celle de l'analyse granulométrique. L'utilisateur renseigne les données soit par import Excel, soit par saisie manuelle en ajoutant ses propres tamis et les masses correspondantes.

3.2.2.3 Page de formulation du béton

La page de formulation du béton représente l'interface principale de calcul de l'outil BétonForm. Elle permet à l'utilisateur de définir les paramètres nécessaires à la formulation, de sélectionner les matériaux et d'obtenir automatiquement la composition du béton selon la méthode ACI. La page de formulation est structurée en deux zones principales :

i. Zone paramètre

La zone paramètre est organisée sous forme de sections déroulantes, accessibles en déroulant les icones situées à droite de chaque rubrique. Cette organisation permet une saisie progressive et structurée des données.

Elle comprend notamment :

- La rubrique **donnée de base**, destinée à la saisie des paramètres généraux nécessaires à la formulation du béton ;
- La rubrique **sélection des matériaux**, dédiée au choix des constituants entrant dans la composition du béton ;
- La rubrique **Calcul**, permettant de lancer le processus de formulation après vérification des données saisies.

The image shows a screenshot of a software interface for concrete formulation. It is divided into two main panels. The left panel, titled 'Données de base' (Basic Data), contains several input fields and a toggle switch. The right panel, titled 'Sélection des matériaux' (Material Selection), contains a dropdown menu for cement and several input fields for material properties.

Données de base	Sélection des matériaux
Résistance Cible (f_c) en MPa 35	Ciment Sélectionner un ciment... [Valeurs manuelles...] Ciment portland [Valeurs manuelles...]
Écart-type, S (MPa) - Optionnel ex: 3.5 Laisser vide pour utiliser la méthode standard ACI.	Diamètre Maximal (mm) 25
Affaissement Cible (Slump) en mm 75	Masse Volumique Apparente (kg/m³) 1600
☒ Béton à Air Entraîné	Masse Volumique Absolue (kg/m³) 2680
Paramètres de durabilité (pour béton à air entraîné)	Teneur en Eau (%) 2
Niveau d'Exposition Sévère	Taux d'Absorption (%) 0.5
Type de section de la structure Toutes les autres sections	
☐ Utilisation d'un ciment résistant aux sulfates (type V)	

Figure 3.7 : Page de saisie des données et sélection des matériaux

Dans la rubrique sélection des matériaux, l'outil offre deux possibilités distinctes :

- Soit effectuer une saisie manuelle des valeurs numériques demandées ;
- Soit sélectionner un matériau existant dans la bibliothèque des matériaux.

A titre d'exemple, sur la figure 3.7, concernant le ciment, l'utilisateur peut soit choisir le ciment Portland disponible dans la liste proposée, soit saisir directement la valeur numérique requise pour la formulation. Cette flexibilité permet à l'outil de s'adapter aussi bien aux situations où les matériaux sont déjà disponibles qu'aux cas où l'utilisateur souhaite introduire manuellement ses propres données (notamment pour le ciment, gravier et sable).

La section donnée de base permet à l'utilisateur de saisir les informations générales requises pour la formulation (type d'ouvrage, conditions d'exposition, résistance souhaitée, ouvrabilité, etc).

ii. Zone résultats

La zone résultats affiche de manière synthétique les paramètres issus du calcul de formulation. Elle présente notamment :

- Le rapport eau/ciment maximal (E/C max) ;
- Le dosage en ciment exprimé en kg/m^3 ;
- La quantité d'eau à ajouter, exprimé en L pour un mètre cube de béton.

Dans cette zone, nous avons un champ qui permet également de nommer la formulation, facilitant ainsi l'archivage et la consultation ultérieure. L'outil joue ici un double rôle :

- Celui d'une calculatrice de formulation ;
- Et celui d'un outil de conservation des résultats, grâce aux fonctionnalités de sauvegarde et de génération de rapports (Rapport de formulation et note de calcul).

iii. Dosages par mètre cube

La partie inférieure de la page de reformulation présente un tableau récapitulatif des dosages par mètre cube de béton, distinguant la masse sèche et la masse humide des constituants. Cette distinction permet de tenir compte de l'état hydrique réel des granulats lors de la mise en œuvre du béton.

Constituant	Masse sèche	Masse humide
Sable	587.5 kg	599.3 kg
Gravier	1072.0 kg	1093.4 kg

Figure 3.8 : Page de formulation du béton

3.2.2.4 Page historique des formulations

La page historique des formulations permet à l'utilisateur de consulter l'ensemble des formulations précédemment réalisées et sauvegardées dans l'outil. Elle présente, sous forme de tableau, les principales caractéristiques de chaque formulation, notamment le nom, la date de création, la résistance caractéristique à la compression, le rapport Eau/Ciment ainsi que la quantité de ciment utilisée.

Après la sauvegarde d'une formulation, l'utilisateur dispose de plusieurs actions. Il peut générer un rapport de formulation ou une note de calcul, puis télécharger ces documents au

format PDF afin de faciliter leur archivage, leur impression ou leur partage. La page offre également la possibilité de supprimer une formulation devenue inutile ou erroné, assurant ainsi une gestion efficace et organisée des données.

Historique des Formulations

Nom	Date	f _c (MPa)	E/C	Ciment (kg/m³)	Actions
Béton très maniable	02/01/2026 19:31	25	0.61	316.4	  
Béton pour une colonne extérieure	02/01/2026 19:23	35	0.39	430.8	  
Béton pour une chaussée	02/01/2026 17:37	35	0.31	560.9	  

Figure 3.9 : Page historique des formulations

3.2.2.5 Mise en service de l'outil

Pour utiliser l'outil, l'utilisateur aura juste besoin d'avoir le fichier avec l'**extension .EXE** c'est-à-dire le fichier contenant le programme compilé, ensuite il faudra l'installer comme d'autres applications sur son PC.

Les sections suivantes ont pour objectif de mettre en évidence la fiabilité et la pertinence de l'outil informatique d'aide à la formulation du béton, basé sur la méthode ACI, en illustrant sa capacité à fournir des résultats précis et cohérents. À travers la présentation des cas d'étude sélectionnés, nous démontrons comment cet outil peut faciliter le processus de conception en fournissant des résultats numériques concrets, permettant ainsi d'évaluer efficacement ses performances et sa pertinence dans le contexte de la formulation du béton.

3.3 Présentation des résultats fournis par l'outil

Cette section décrit les cas d'étude considérés et présente de manière concise, les résultats numériques produits par l'outil d'aide à la formulation du béton basé sur la méthode ACI.

3.3.1 Description des cas d'étude

Pour la formulation de bétons selon la méthode ACI, plusieurs cas d'application sont recensés dans la littérature. Trois cas d'étude représentant différentes résistances visées et conditions d'exposition ont été retenus. Ceux-ci servent de base pour une première évaluation de la performance de l'outil, par la comparaison des résultats numériques fournis par l'outil et ceux présentés dans la littérature pour ces cas d'études.

i. Béton pour des conditions normales

Pour ce premier cas, destiné à des conditions normales sans air entraîné, les caractéristiques des matériaux et les paramètres de formulation sont définis comme suit [50] :

- **Ciment** : CEM II (Ciment Portland composé), masse volumique absolue = 3,01 g/cm³.
- **Gros granulat (gravier)** :
 - Masse volumique absolue = 2,273 g/cm³
 - Masse volumique apparente = 1 g/cm³
 - Dimension du plus gros granulat (D_{max}) = 25 mm
- **Granulat fin (Sable)** :
 - Masse volumique absolue = 2,536 g/cm³
 - Module de finesse = 2,67
- **Affaissement désiré** : 75 mm
- **Résistance à la compression souhaitée** : 23 Mpa
- **Le béton sera sans air entraîné**

ii. Béton pour des conditions sévères

Dans ce deuxième cas, correspondant à des conditions d'exposition sévères (cycles gel-dégel, contact avec l'eau de mer), les caractéristiques des matériaux et les paramètres de formulation sont définis comme suit [45] :

- **Ciment** : Ciment Portland ordinaire (Type I), densité relative = 3,15.
- **Gros granulat (gravier) :**
 - Densité relative = 2,68
 - Masse volumique apparente = 1,520 g/cm³
 - Dimension du plus gros granulat (D_{max}) = 25 mm
- **Granulat fin (Sable) :**
 - Densité relative = 2,64
 - Module de finesse = 2,80
- **Affaissement désiré : (25 à 50) mm**
- **Résistance à la compression souhaitée : 21 Mpa**
- **Le béton sera à air entraîné**

iii. Béton avec une résistance caractéristique élevée

Pour ce troisième cas, destiné à un béton de résistance plus élevée et exposé à des conditions sévères, les caractéristiques des matériaux et les paramètres de formulation sont définis comme suit [5] :

- **Ciment** : Ciment Portland normal (Type I), densité relative = 3,15.
- **Gros granulat (gravier) :**
 - Densité relative = 2,70
 - Masse volumique apparente = 1,6 g/cm³

- Capacité d'absorption = 1 %
- Teneur en eau = 2,5 %
- Dimension du plus gros granulat (D_{max}) = 20 mm
- **Granulat fin (Sable) :**
 - Densité relative = 2,65
 - Module de finesse = 2,70
 - Capacité d'absorption = 1,3 %
 - Teneur en eau = 5,5 %
- **Affaissement désiré : (25 à 50) mm**
- **Résistance à la compression souhaitée : 35 Mpa**
- **Le béton sera à air entraîné**

3.3.2 Résultats numériques fournis par l'outil

Le tableau 3.1 présente les résultats numériques obtenus par l'outil pour chaque cas de formulation. Ces résultats correspondent aux dosages des constituants du béton calculé automatiquement par l'outil à partir des données d'entrée définies pour chaque cas. Les captures d'écran des résultats générés par l'outil sont montrées dans l'Annexe D.

Tableau 3.1 : Dosages unitaires du béton fournis par l'outil

Dosage pour 1 m ³ de béton					
Paramètres	E/C max	Ciment (kg)	Gravier (kg)	Sable (kg)	Eau (L)
1. Béton pour des conditions normales					
Résultats	0,64	300,6	683	993,2	193
2. Béton pour des conditions sévères					
Résultats	0,5	320	1018,4	787,8	160
3. Béton avec une résistance caractéristique élevée					
Résultats	0,39	430,8	1033,2	732	123,7

3.4 Validation et vérification de l'outil

Cette section est consacrée à la validation et à la vérification de l'outil informatique d'aide à la formulation du béton développé dans ce travail. La démarche adoptée consiste à reprendre les trois cas issus de la littérature et à comparer les résultats fournis par l'outil avec ceux obtenus par un calcul manuel selon la méthode ACI, réalisé à partir des tables présentées au chapitre précédent, ainsi qu'avec ceux issus de la littérature.

Cette approche permet d'évaluer la cohérence et la fiabilité des résultats générés par l'outil *BétonForm*.

3.4.1 Résultats de formulation issus de la littérature

Le tableau 3.2 présente les résultats de formulation rapportés dans la littérature pour chacun des cas étudiés. Ces résultats correspondent aux dosages des constituants du béton tels qu'ils ont été calculés dans les documents [45], [5] et [50] en utilisant les tables de la méthode ACI.

Tableau 3.2 : Dosages unitaires du béton issus de la littérature

Dosage pour 1 m ³ de béton					
Paramètres	E/C max	Ciment (kg)	Gravier (kg)	Sable (kg)	Eau (L)
1. Béton pour des conditions normales					
Résultats	0,658	293,3	683	1001,72	193
2. Béton pour des conditions sévères					
Résultats	0,5	320	1018	786	160
3. Béton avec une résistance caractéristique élevée					
Résultats	0,39	423	1033	729	120

3.4.2 Résultats de formulation obtenus par calcul manuel

Les dosages des constituants du béton pour chacun des trois cas ont été calculés manuellement en utilisant les tables présentées au chapitre précédent. Le détail complet de ces procédures de calcul, incluant les étapes intermédiaires pour chaque cas d'étude, est présenté

dans l'Annexe B. Ces résultats constituent la référence principale pour comparer et valider les résultats générés par l'outil.

Le tableau 3.3 présente ces dosages pour chacun des trois cas étudiés.

Tableau 3.3 : Dosages unitaires du béton obtenus par calcul manuel

Dosage pour 1 m³ de béton					
Paramètres	E/C max	Ciment (kg)	Gravier (kg)	Sable (kg)	Eau (L)
1. Béton pour des conditions normales					
Résultats	0,642	300,623	683	993,22	193
2. Béton pour des conditions sévères					
Résultats	0,5	320	1018,4	787,82	160
3. Béton avec une résistance caractéristique élevée					
Résultats	0,39	430,769	1033,2	732,262	123,728

3.4.3 Comparaison des résultats de formulation

Cette section présente la comparaison des résultats de formulation du béton obtenus par la littérature, le calcul manuel et l'outil développé pour les trois cas étudiés. Les valeurs issues de la littérature sont fournies à titre illustratif, car les trois cas proviennent de références bibliographiques distinctes et différents auteurs ajustent les tables ACI selon leur contexte. De plus, la méthode ACI étant initialement basée sur le système anglais, la conversion vers le système métrique peut introduire de légères variations.

Pour cette raison, les résultats obtenus par calcul manuel, à partir des tables présentées dans le chapitre précédent, sont considérés comme référence principale.

3.4.3.1 Comparaison des rapports eau/ciment

Le rapport eau/ciment est un paramètre clé dans la formulation du béton selon la méthode ACI, car il influence directement la résistance mécanique et la durabilité.

La figure 3.10 présente les valeurs du rapport eau/ciment obtenues à partir de la littérature, du calcul manuel et de l'outil développé pour les trois cas étudiés.

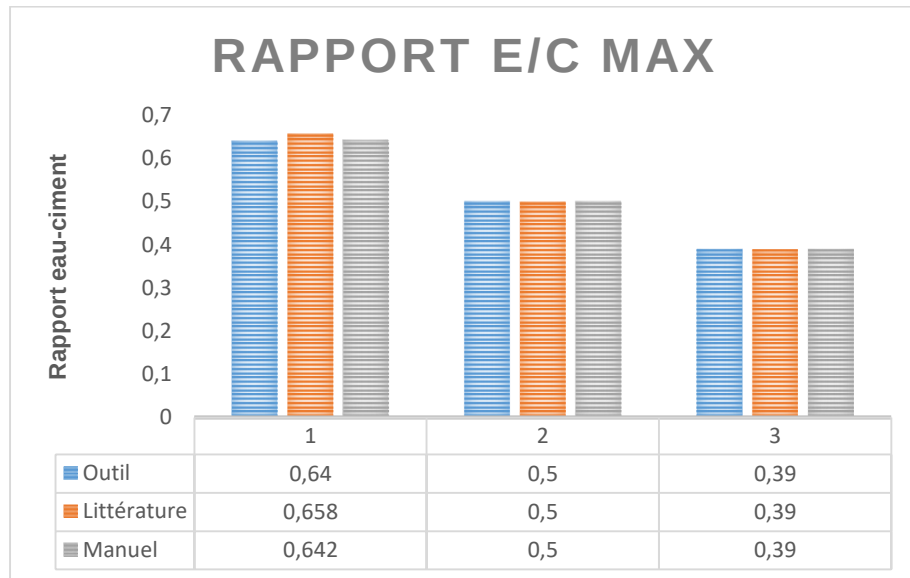


Figure 3.10 : Comparaison du rapport eau/ciment

i. Analyse des écarts

Afin d'évaluer la cohérence de l'outil, les écarts ont été calculés par rapport au calcul manuel, considéré comme valeur de référence. L'écart relatif en pourcentage a été déterminé à l'aide de la relation classiquement utilisée en analyse numérique [51] :

$$Ecart (\%) = \frac{|valeur\ étudiée - valeur\ de\ référence|}{valeur\ de\ référence} \times 100 \quad (3.1)$$

L'analyse des écarts met en évidence une bonne concordance entre les résultats fournis par l'outil et ceux issus du calcul manuel. Pour le premier cas, l'écart entre l'outil et la référence est de 0,31%, tandis que l'écart par rapport à la littérature est de 2,49%.

Pour le deuxième cas, aucun écart n'est observé, les valeurs étant identiques pour l'outil, le calcul manuel et la littérature. De même, pour le troisième cas, les trois approches conduisent à la même valeur, ce qui se traduit par un écart de 0%.

L'écart observé dans le premier cas s'explique par la nécessité d'interpoler lorsque la valeur de la résistance visée ne figure pas directement dans le tableau 2.4, ainsi que par les arrondis effectués lors des calculs.

3.4.3.2 Comparaison des dosages en ciment

Le dosage en ciment constitue un paramètre essentiel dans la formulation du béton, car il influence directement la résistance mécanique et la durabilité du matériau [52].

La figure 3.11 présente les dosages en ciment obtenus à partir de la littérature, du calcul manuel et de l'outil développé pour les trois cas étudiés.

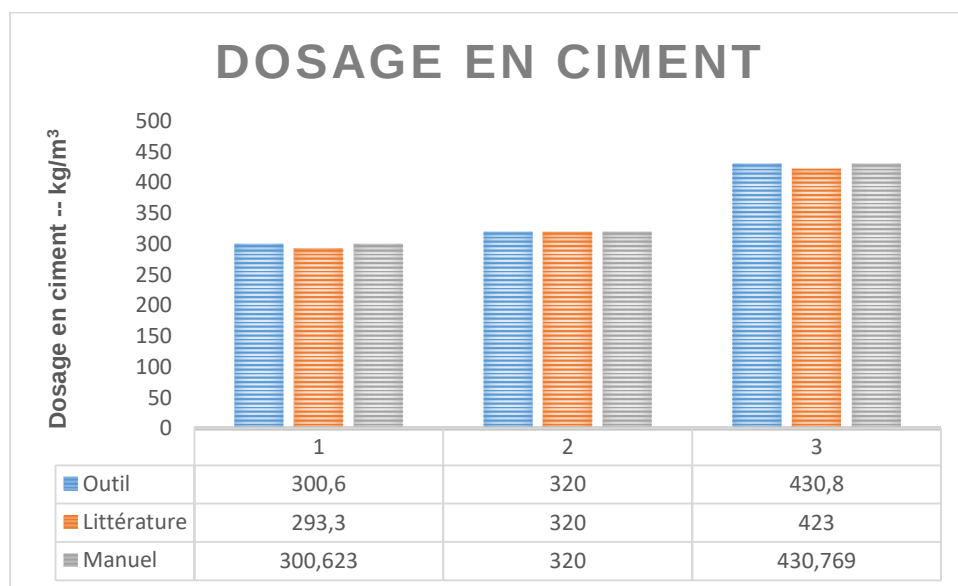


Figure 3.11 : Comparaison des dosages en ciment

i. Analyse des écarts

L'analyse des écarts montre que l'outil reproduit avec une très bonne cohérence les résultats du calcul manuel.

Pour le premier cas, un écart minime de l'ordre de 0,01 % est observé, imputable aux arrondis effectués lors des calculs, tandis que l'écart par rapport à la littérature atteint environ 2,43 %, dû aux différences dans le tableau 2.3, utilisé par l'auteur. Dans le deuxième cas,

aucune différence n'est relevée entre l'outil et le calcul manuel, confirmant une parfaite cohérence.

Pour le troisième cas, l'écart entre l'outil et le calcul manuel est de l'ordre de 0,01 %, également dû aux arrondis, tandis que l'écart avec la valeur issue de la littérature est d'environ 1,8 %, en raison du tableau 2.3, légèrement différent de celle utilisé par l'auteur.

3.4.3.3 Comparaison des quantités de graviers

La quantité de graviers constitue un paramètre important du béton, car elle influence directement la résistance, la maniabilité et la compacité du mélange [52].

La figure 3.12 présente les quantités de graviers obtenues pour les trois cas étudiés, à partir de la littérature, du calcul manuel et de l'outil développé.

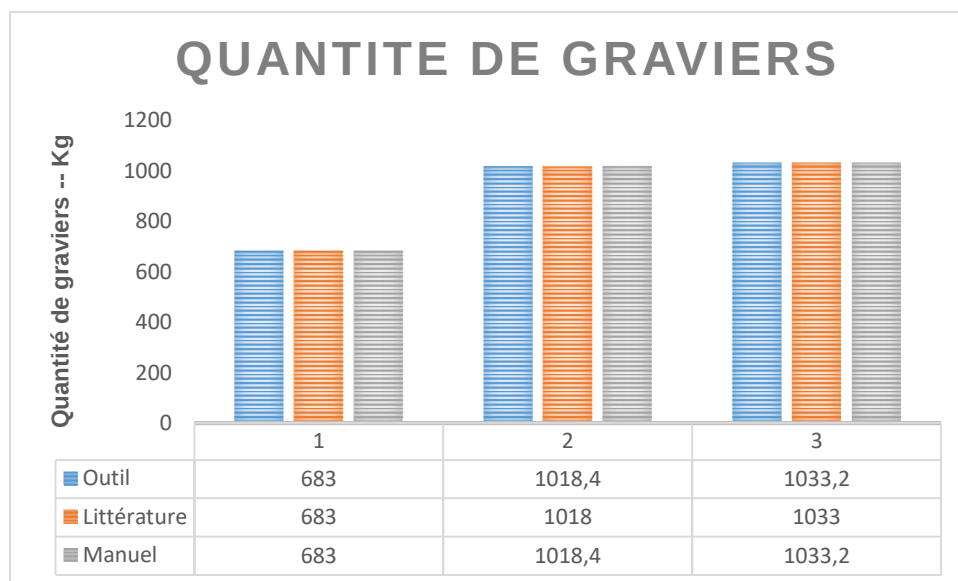


Figure 3.12 : Comparaison des quantités de graviers

i. Analyse des écarts

Les écarts observés entre *l'outil* et *le calcul manuel* sont nuls pour tous les cas. Les différences avec les valeurs issues de la littérature s'expliquent principalement par les arrondis appliqués lors des calculs.

3.4.3.4 Comparaison des quantités de sable

La quantité de sable constitue un paramètre essentiel dans la formulation du béton, car elle influence la maniabilité, la cohésion et la résistance du béton [52].

La figure 3.13 présente les quantités de sable obtenues pour les trois cas étudiés, à partir de la littérature, du calcul manuel et de l'outil développé.

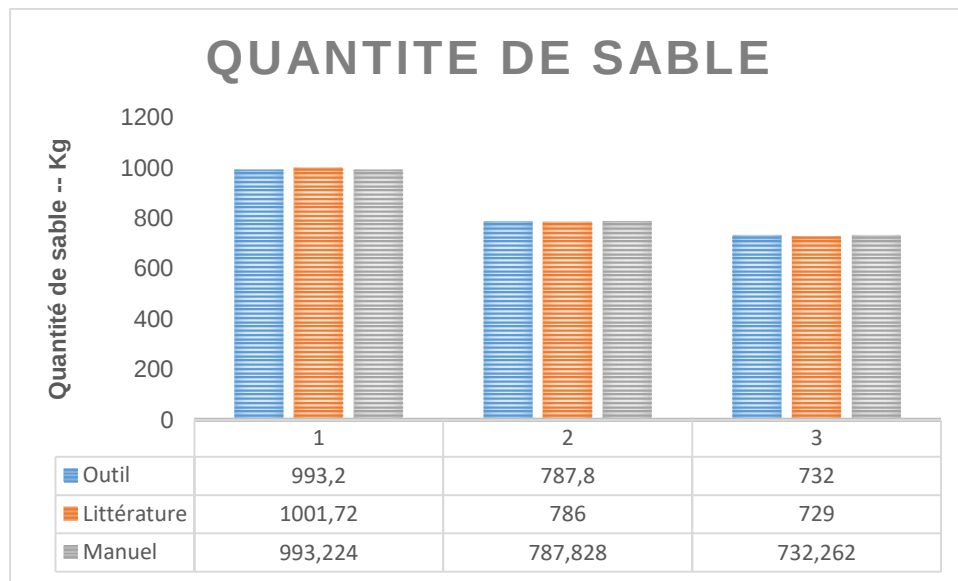


Figure 3.13 : Comparaison des quantités de sable

i. Analyse des écarts

L'analyse des écarts met en évidence une cohérence entre les résultats fournis par l'outil et ceux issus du calcul manuel. Pour le premier cas, l'écart entre l'outil et le calcul manuel est de l'ordre de 0,002 %, tandis que la valeur issue de la littérature présente un écart d'environ 0,86%. Pour le deuxième cas, l'écart entre l'outil et le calcul manuel est d'environ 0,003 %, alors que la littérature montre un écart d'environ 0,23 %. Enfin, pour le troisième cas, l'écart entre l'outil et le calcul manuel est de 0,035 %, tandis que l'écart par rapport à la littérature atteint environ 0,45 %.

Les faibles écarts entre l'outil et le calcul manuel sont dus essentiellement aux arrondis lors des calculs. En revanche, les écarts observés avec les valeurs de la littérature s'expliquent par l'utilisation de la méthode volumique pour le calcul du sable, laquelle dépend directement des dosages initiaux en ciment, en eau et en autres constituants, déjà légèrement différents en amont.

3.4.3.5 Comparaison des quantités d'eau

La quantité d'eau joue un rôle déterminant dans la formulation du béton, car elle influence directement la maniabilité du mélange ainsi que le rapport eau/ciment, paramètre clé pour la résistance mécanique.

La figure 3.12 présente une comparaison des quantités d'eau obtenues pour les trois cas étudiés, à partir de la littérature, du calcul manuel et de l'outil développé.

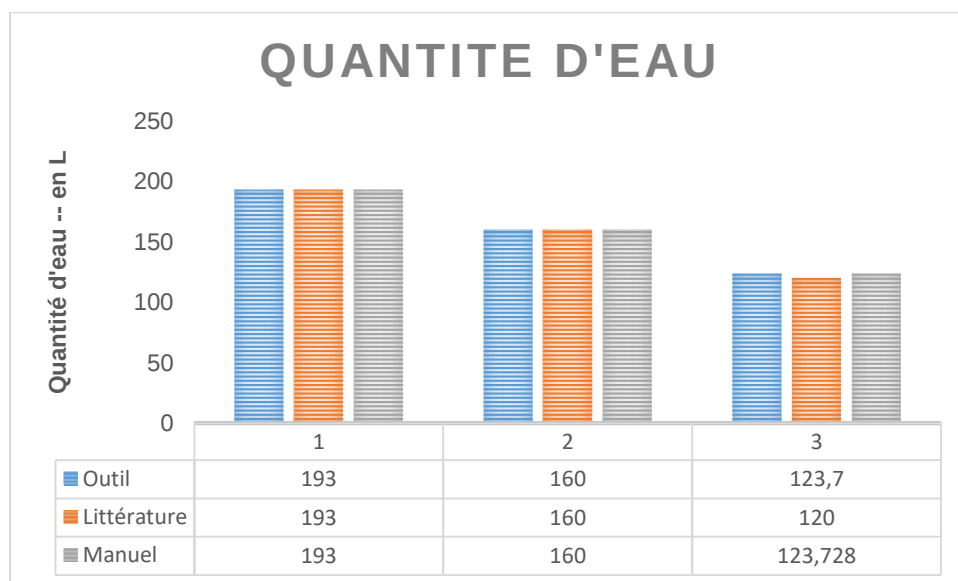


Figure 3.14 : Comparaison des quantités d'eau

i. Analyse des écarts

L'analyse des écarts met en évidence une cohérence entre les résultats fournis par l'outil et ceux issus du calcul manuel. Pour le premier cas, aucune différence n'est observée entre

l'outil, le calcul manuel et la littérature, les écarts étant donc nuls (0 %). De même, pour le deuxième cas, les résultats des trois approches sont strictement identiques, traduisant une cohérence et des écarts également nuls (0 %).

Pour le troisième cas, l'écart entre l'outil et le calcul manuel reste faible, de l'ordre de 0,02 %, attribuable uniquement aux arrondis numériques effectués lors des calculs. La valeur issue de la littérature présente un écart légèrement plus important, d'environ 3,01 %, qui s'explique par le fait que l'auteur a utilisé une table légèrement différente de celle adoptée dans ce travail pour le choix de la quantité d'eau.

3.5 Conclusion partielle

Dans ce chapitre, qui est le dernier de notre travail, nous venons de matérialiser notre recherche à travers l'implémentation et la validation de l'outil *BétonForm*. Après avoir structuré l'outil dans l'environnement Visual Studio code, nous avons soumis l'outil à une série de tests pour vérifier la fiabilité.

Dans cette démarche, nous avons délibérément choisi le calcul manuel comme valeur de référence. Ce choix se justifie par la nécessité de disposer d'un point de comparaison fixe et totalement maîtrisé. En effet, les données issues de la littérature présentent parfois des variations mineures dues aux méthodes de conversion ou aux mises à jour successives des tables de la norme ACI 211.1. En se référant au calcul manuel, nous avons pu confirmer que l'algorithme reproduit avec fiabilité la logique de formulation souhaité.

La cohérence satisfaisante observée, malgré de très légers écarts imputables aux arrondis et aux interpolations, valide techniquement notre outil.

Conclusion générale

Le présent travail de fin d'étude s'est inscrit dans une dynamique actuelle visant à intégrer les outils numériques dans les pratiques du Génie Civil, en particulier dans la formulation du béton. Partant du constat que l'application manuelle de la méthode ACI, bien que rigoureuse, demeure lourde, longue et sujette aux erreurs, ce travail s'est donné pour objectif de concevoir un outil informatique capable d'en automatiser l'usage tout en garantissant la fiabilité des résultats.

La question principale de recherche portait sur la faisabilité d'un tel outil. A cette interrogation, ce travail apporte une réponse claire et positive à travers le développement de *BétonForm*, un outil d'aide à la formulation du béton basé sur la méthode ACI. Les comparaisons effectuées entre les résultats fournis par l'outil et ceux issus des calculs manuels montrent une cohérence satisfaisante, avec des écarts faibles et maîtrisés, ce qui confirme la validité de l'algorithme implémenté.

L'étude approfondie de la méthode ACI a permis de mettre en évidence une succession d'étapes nécessaires à la mise au point de l'outil, allant du choix de l'affaissement et de la résistance jusqu'au calcul final des dosages. La structuration de ces étapes sous forme d'organigramme a constitué le socle de l'implémentation de l'outil, confirmant ainsi l'hypothèse selon laquelle une application efficace de la méthode ACI repose sur une organisation rigoureuse de ses différentes phases.

Dans cette optique, le choix du langage de programmation s'est également révélé déterminant. Le langage python, retenu pour ce travail, s'est montré particulièrement adapté grâce à sa simplicité et à la richesse de son écosystème. Le bon fonctionnement de l'outil ainsi que la facilité de mise en œuvre des calculs confirment la pertinence de ce choix.

Par ailleurs, l'identification d'une architecture logicielle appropriée a conduit à l'adoption d'une architecture hexagonale. Cette approche a permis de séparer clairement la logique de formulation des aspects techniques tels que l'interface utilisateur et la gestion des données,

assurant ainsi une meilleure organisation du système et une plus grande évolutivité de l'outil développé.

Dans l'ensemble, les objectifs de la recherche ont été atteints : la méthode ACI a été analysée, traduite en algorithmes, intégrée dans une architecture cohérente et implémentée dans outil fonctionnel, fiable et utilisable.

Bien que les objectifs initiaux aient été atteints, cette étude présente certaines limites qu'il convient de souligner. Tout d'abord, l'outil développé se concentre exclusivement sur la méthode ACI et ne prend pas encore en compte l'utilisations des adjuvants, qui sont pourtant essentiels dans la formulation moderne du béton. Ce choix délibéré restreint toutefois sa polyvalence, car il n'intègre pas d'autres standards de formulation du béton, ce qui restreint son champ d'application.

Ensuite, la fiabilité de l'outil repose intrinsèquement sur la précision de données de laboratoire fournis en entrée. L'absence de mécanismes de correction automatique signifie que toute incertitude lors des essais granulométriques ou physiques se répercute directement sur l'exactitude des dosages finaux. Enfin l'approche actuelle demeure essentiellement théorique. A ce stade, l'outil ne permet pas d'intégrer un suivi expérimental (maniabilité à l'état frais ou résistance à l'état durci), ce qui pourrait pourtant renforcer sa valeur pratique.

Ce domaine est très intéressant et surtout vaste, c'est pourquoi l'ouverture de ce sujet est très large. Ainsi, aux futurs chercheurs qui comptent améliorer ce travail ou tout simplement œuvrer dans le même domaine, nous pouvons suggérer :

- D'étendre l'outil *BétonForm* à d'autres méthodes (Dreux-Gorisse, DoE, Faury) et surtout d'ajouter la gestion des adjuvants. Cette extension permettrait d'élargir le champ d'application de l'outil.
- De développer un module de suivi expérimental permettant d'enregistrer et de comparer les résultats réels obtenus en laboratoire (mesure de l'affaissement et essai de rupture pour la résistance) avec les prévisions théoriques de l'outil.

- De réduire l'impact des erreurs liées aux données d'entrée issues des essais de laboratoire, l'outil pourrait être enrichi par des mécanismes de validation et de contrôle automatique des données.
- Par ailleurs, une évolution importante consisterait à intégrer un module de prédiction de la résistance à la compression du béton à 28 jours basé sur des techniques d'intelligences artificielles.
- Etc.

En définitif, dans l'admission de l'imperfection humaine, ce travail reste ouvert aux corrections, compléments aussi bien qu'aux propositions de ses éventuels lecteurs.

Bibliographie

- [1] S. Mindess, Developments in the formulation and reinforcement of concrete, Columbia, 2019.
- [2] A. Neville, Properties of concrete, Harlow, Royaume-Uni: Person education limited, 2012.
- [3] J. Olivier et A. Vichot, La durabilité des bétons : bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement, Paris: Presses de l'ecole nationale des ponts et chaussées, 2008.
- [4] M. Ferrry, Concevoir un outil d'ingénierie, Paris: Editions du moniteur, 2010.
- [5] D. Hatungimana, Syllabus du cours de technologie du béton, Universite du Burundi, 2023-2024.
- [6] ACI, Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete, Farmington hills: American concrete institute, 2002.
- [7] A. Mohammed, A. Abdulhameed et A. Al-Taei, «Expert system for concrete mix design,» *Journal of engineering and sustainable development*, vol. 21, n° 13, pp. 76-88, 2017.
- [8] Y. Ozturk et Z. Ozturk, «A Computer program for the design of high performance concrete mixtures,» *Computer and concrete, An International Journal*, vol. 1, n° 13, pp. 261-274, 2004.
- [9] M. Sanjuan, L. Argiz et P. Mora, «Machine learning methods for predicting concrete properties,» *Construction and building materials*, vol. 254, pp. 119-277, 2020.
- [10] O. Radjabu Matilde, Mise en place d'un outil de calcul des poutres continues en béton armé, Goma, 2022.
- [11] S. Suwitno, «Application development in python for concrete mix design according to SNI 7656-2012,» *Journal of architecture iInnovation*, vol. 8, n° 11, pp. 50-56, 2024.

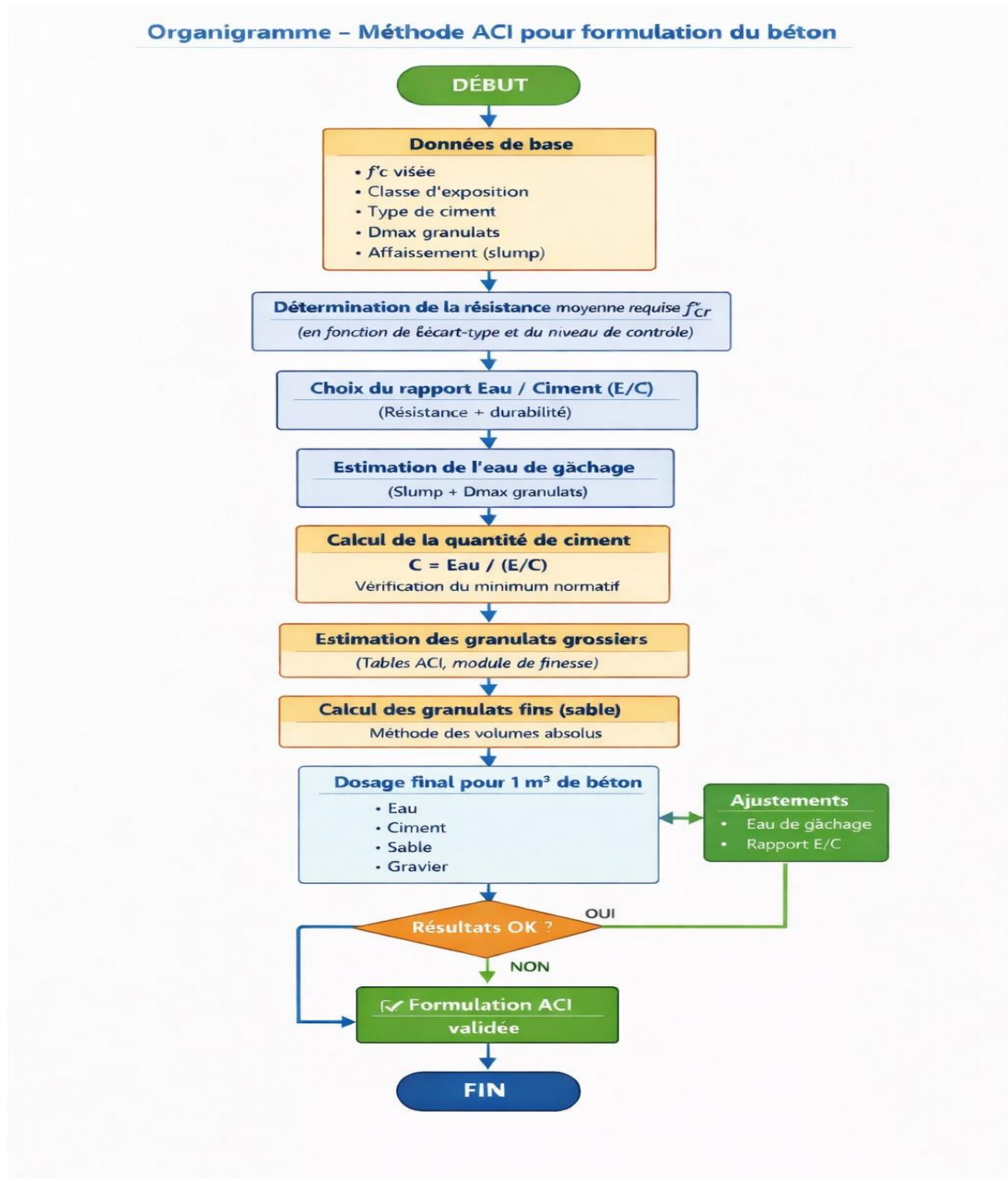
- [12] A. Alinabiwe, Support du cours de physique et technologies du béton, GOMA, 2021.
- [13] F. Ngapgue, Cours de physique et technologie du béton, GOMA, 2015-2016.
- [14] NF-EN, Composition du ciment courant, 2012.
- [15] G. Dreux, Nouveau guide du béton et de ses constituants, Paris: Eyrolles, 1998.
- [16] Cimebéton, Béton et ouvrages d'art tome 1, DBG studios - S2974, 2005.
- [17] J. Bahati, «Etude mécanique et économique du béton aux graviers concassés et du béton aux graviers tout-venants confectionnés à Goma,» 2022-2023.
- [18] G. Dreux et J. Festa, Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8 ème edition, Paris: Eyrolles, 1998.
- [19] Cimebéton, «Les bétons : formulation, fabrication et mise en oeuvre, tome 2,» Paris, 2013.
- [20] P. Aitcin, F. Génereux, G. Jolicoeur et M. Yolette, Technologies des granulats , 4ème édition, 2018.
- [21] A. Akeza, Etude de l'optimisation des propriétés des bétons issus des granulats, 2020.
- [22] S. Laldji, Cours de béton ets, Hiver 2015.
- [23] F. Ghomari, «Cours de matériaux de construction».
- [24] N. Manzekele, «Etude comparative des méthodes de formule du béton : cas des méthodes de Dreux-Gorisse, de Bolomey et de Faury,» Goma, 2022-2023.
- [25] A. Chhachhia, «Concrete mix design by Is, ACI and BS methods : A comparative analysis,» *journal of building matetial science*, vol. 02, n° 101, 2020.
- [26] J. Lesage, La composition du béton hydraulique du laboratoire au chantier, Paris: Laboratoire central des ponts et chaussées, 1976.
- [27] A. Kadi et T. Naamaoui, «Méthodes de la formulation des bétons,» 2019-2020.
- [28] R. Rebouh, «Elaboration d'un logiciel de formulation des bétons contenant des ajouts cimentaires,» 2018.
- [29] F. De Larrard et T. Sedran, «Une nouvelle approche de la formulation des bétons,» *Annales du batiment et des travaux Publics*, n° 16, pp. 39-54, 1999.

- [30] H. Cyrille, Apprenez à programmer en Java, Paris: Eyrolles, 2008.
- [31] B. Mikael, Programmation excel avec VBA, Paris: Eyrolles, 2017.
- [32] J. Pardanaud et M. Sébastien, Decouvrez le langage Javascript, Paris: Eyrolles, 2016.
- [33] P. Fuchs et P. Pierre, Introduction à la programmation python pour la biologie, Paris: Dunod, 2017.
- [34] D. Flanagan, Javascript : The definitive guide, 7e édition, USA: O'Reilly media, 2020.
- [35] A. Downey, Think python : how to think like a computer scientist, 2e édition, USA: O'Reilly Media, 2015.
- [36] O. Travis, Guide to numPy, 2e édition, USA: Continuum Press, 2006.
- [37] G. Muhiwa, Cours de laboratoire des matériaux, GOMA, 2022-2023.
- [38] F. Ghomari et A. BENDIOUIS, Sciences des matériaux de construction, Tlmcen: Université Aboubeker Belkaid, 2007-2008.
- [39] F. Ngapgue, Mécanique des sols et roches, 2024-2025.
- [40] A. NF P 18-555, Granulats : Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau du sable, Paris: AFNOR, 1990.
- [41] N. E. 1097-5, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Paris: AFNOR, 2022.
- [42] P. Aitcin, High-performance concrete, Boca raton: CRC press, 2000.
- [43] S. Mindess, J. Young et D. Darwin, Concrete, Upper saddle river: Prentice hall, 2003.
- [44] S. Kosmatka, B. Kerkhoff et W. Panarese, Design and control of concrete mixtures, USA: PCA, 2002.
- [45] K. Nanduri, Design of concrete mixes, New Delhi: CBS Publishers, 2017.
- [46] H. Kosmatka et W. Michelle, Design and control of concrete mixtures, USA: PCA, 15th édition, 2011.
- [47] B. Boudjemaa, Cours de génie logiciel (avec exercices résolus), Tiaret: Université Ibn-Khaldoun-Tiaret, 2020.

- [48] M. Robert, Clean Architecture : A craftsman's guide to software structure and design, Boston: Prentice Hall, 2017.
- [49] Numericatous.fr, «Visual studio code,» [En ligne]. Available: <https://numericatous.fr>. [Accès le 28 Decembre 2025].
- [50] V. Kabindi, Etude comparative des propriétés du béton formulé par la méthode ACI et la méthode de Dreux-Gorisse : Application au béton ordinaire, Goma, 2025.
- [51] S. Chapra et R. Canale, Numerical methods for engineers, USA: McGraw-Hill Education, 2015.
- [52] G. Dreux et F. Gorisse, Guide pratique du béton : composition, fabrication, mise en oeuvre, Paris: Eyrolles, 1998.

Annexes

Annexe A : Organigramme de la méthode ACI



Annexe B : Détails du calcul manuel des dosages du béton

1. Béton pour des conditions normales

La formulation du béton, dans ce cas de figure, repose sur un ensemble de paramètres techniques précis. Les performances attendues sont un affaissement au cône d'Abrams de 75 mm et une résistance à la compression de 23 Mpa à 28 jours, pour un béton à air non entrainé.

Les matériaux considérés comprennent un ciment CEM II de masse volumique absolue de 3,01 g/cm³, un gravier de dimension maximale 25 mm présentant une masse volumique absolue de 2,273 g/cm³ et apparente de 1 g/cm³, ainsi qu'un sable de module de finesse 2,67 et de masse volumique absolue 2,536 g/cm³.

Etape 1 : Choix de l'affaissement : la valeur de l'affaissement est de 75 mm.

Etape 2 : Taille maximale des granulats : D_{max} : 25 mm.

Etape 3 : Estimation de l'eau de gâchage et de la teneur en air : puisque le béton sera à air non entrainé. D'après le tableau 2.3, la teneur en air recommandée pour une exposition extrême est de 1,5 %, l'eau de gâchage estimée est de **193 kg d'eau pour 1 m³** de béton.

Etape 4 : Détermination du rapport E/C : A partir du tableau 2.4, la valeur du rapport E/C pour une résistance à la compression à 28 jours de 23 Mpa n'étant pas directement mentionné pour un béton à air non entrainé, nous allons procéder par une interpolation linéaire entre les résistances encadrantes de 20 Mpa et 25 Mpa qui ont respectivement un rapport E/C de 0,69 et 0,61.

- Application de la formule d'interpolation

$$\frac{E}{C} = 0,69 - \left(\frac{23 - 20}{25 - 20} \right) \times (0,69 - 0,61)$$

On trouve un rapport E/C = **0,642**

Etape 5 : Calcul du dosage en ciment : A partir des résultats obtenus aux étapes 3 et 4, le dosage en ciment requis est de $193/0,642 = 300,623 \text{ kg/m}^3$

Etape 6 : Estimation de la teneur en gros granulat (gravier) : En faisant une interpolation dans le tableau 2.6 pour le module de finesse du granulat fin de 2,67, le volume du gros granulat compacté à sec par unité de volume de béton est de **0,683**. Par conséquent, le poids sec du gros granulats (à l'état sec) est de $0,683 \times 1000 = 683 \text{ kg/m}^3$.

Etape 7 : Estimation de la teneur en granulat fin (sable) : Connaissant le poids et la masse volumique absolue de l'eau, du ciment et du gros granulat et connaissant aussi le volume de l'air dans le mélange, le volume par m^3 occupé par différents ingrédients peut être déterminé comme suit :

- Eau de gâchage : $193/1000 = 0,193 \text{ m}^3$.
- Ciment : $300,623 / (3,01 \times 1000) = 0,099874 \text{ m}^3$
- Gros granulat : $683 / (1000 \times 2,273) = 0,3004839 \text{ m}^3$
- Air contenu dans 1 m^3 de béton : $1,5/100 = 0,015 \text{ m}^3$

Total : $0,608352 \text{ m}^3$, Ainsi le granulat fin devra occuper un volume de $1 - 0,608352 = 0,391648 \text{ m}^3$. Le poids du granulat fin à l'état saturé surface sèche équivaut à : $0,391648 \times 2,536 \times 1000 = 993,22 \text{ kg/m}^3$.

Etape 8 : Ajustement de l'humidité dans les granulats : Pour le présent calcul, il est considéré que les granulats sont à l'état saturé surface sèche. Par conséquent, aucune correction n'a été apportée concernant l'apport en eau ou l'absorption par les granulats.

2. Béton pour des conditions sévères

La formulation du béton dans ce deuxième cas, repose sur un ensemble de paramètres techniques précis. Les performances attendues sont un affaissement au cône d'Abrams de (25-50) mm et une résistance à la compression de 21 Mpa à 28 jours, pour un béton à air entrainé.

Les matériaux considérés comprennent un ciment Portland ordinaire (Type I) ayant une densité relative de 3,15, un gravier de dimension maximale 25 mm présentant une densité relative de 2,68 et apparente de 1,520 g/cm³, ainsi qu'un sable de module de finesse 2,80 et d'une densité relative de 2,64.

Etape 1 : Choix de l'affaissement : la valeur de l'affaissement est de (25-50) mm.

Etape 2 : Taille maximale des granulats : $D_{\max}$: 25 mm.

Etape 3 : Estimation de l'eau de gâchage et de la teneur en air : puisque le béton sera à air entrainé. D'après le tableau 2.3, la teneur en air recommandée pour une exposition extrême est de 6 %, l'eau de gâchage estimée est de **160 kg d'eau pour 1 m³** de béton.

Etape 4 : Détermination du rapport E/C : A partir du tableau 2.4, la valeur du rapport E/C pour une résistance à la compression à 28 jours de 21 Mpa n'étant pas directement mentionné pour un béton à air entrainé, nous allons procéder par une interpolation linéaire entre les résistances encadrantes de 20 Mpa et 25 Mpa, qui ont respectivement un rapport E/C de 0,61 et 0,52.

- Application de la formule d'interpolation

$$\frac{E}{C} = 0,61 - \left(\frac{21 - 20}{25 - 20} \right) \times (0,61 - 0,52)$$

On trouve un rapport E/C = **0,592**

En considérant le critère de durabilité, étant donné que la structure sera exposée à des conditions sévères, le tableau 2.5 impose un rapport **E/C max de 0,5**.

La norme ACI suggère de retenir la valeur la plus contraignante entre les deux afin de garantir la pérennité de l'ouvrage. Pour notre cas le rapport retenu est donc $E/C = 0.5$

Etape 5 : Calcul du dosage en ciment : A partir des résultats obtenus aux étapes 3 et 4, le dosage en ciment requis est de $160/0,5 = 320 \text{ kg/m}^3$

Etape 6 : Estimation de la teneur en gros granulat (gravier) : En se référant dans le tableau 2.6 pour le module de finesse du granulat fin de 2,8, le volume du gros granulat compacté à sec par unité de volume de béton est de **0,67**. Par conséquent, le poids sec du gros granulats (à l'état sec) est de $0,67 \times 1520 = 1018,4 \text{ kg/m}^3$.

Etape 7 : Estimation de la teneur en granulat fin (sable) : Connaissant le poids et la masse volumique absolue de l'eau, du ciment et du gros granulat et connaissant aussi le volume de l'air dans le mélange, le volume par m^3 occupé par différents ingrédients peut être déterminé comme suit :

- Eau de gâchage : $160/1000 = 0,16 \text{ m}^3$.
- Ciment : $320 / (3,15 \times 1000) = 0,101587 \text{ m}^3$
- Gros granulat : $1018,4 / (1000 \times 2,68) = 0,38 \text{ m}^3$
- Air contenu dans 1 m^3 de béton : $6/100 = 0,06 \text{ m}^3$

Total : $0,701587 \text{ m}^3$, Ainsi le granulat fin devra occuper un volume de $1 - 0,701587 = 0,298413 \text{ m}^3$. Le poids du granulat fin à l'état saturé surface sèche équivaut à : $0,298413 \times 2,64 \times 1000 = 787,82 \text{ kg/m}^3$.

Etape 8 : Ajustement de l'humidité dans les granulats : Pour le présent calcul, il est considéré que les granulats sont à l'état saturé surface sèche. Par conséquent, aucune correction n'a été apportée concernant l'apport en eau ou l'absorption par les granulats.

3. Béton avec une résistance caractéristique élevée

La formulation du béton dans ce troisième cas, repose sur un ensemble de paramètres techniques précis. Les performances attendues sont un affaissement au cône d'Abrams de (25-50) mm et une résistance à la compression de 35 Mpa à 28 jours, pour un béton à air entrainé.

Les matériaux considérés comprennent un ciment Portland ordinaire (Type I) ayant une densité relative de 3,15, un gravier de dimension maximale 20 mm présentant une densité relative de 2,7 ; une masse volumique apparente de 1,6 g/cm³, une capacité d'absorption de 1% et une teneur en eau de 2,5 % ainsi qu'un sable de module de finesse 2,7 ; d'une densité relative de 2,65 ; une capacité d'absorption de 1,3% et une teneur en eau de 5,5 %.

Etape 1 : Choix de l'affaissement : la valeur de l'affaissement est de (25-50) mm.

Etape 2 : Taille maximale des granulats : $D_{\max}$: 20 mm.

Etape 3 : Estimation de l'eau de gâchage et de la teneur en air : puisque le béton sera à air entrainé. D'après le tableau 2.3, la teneur en air recommandée pour une exposition extrême est de 6 %, l'eau de gâchage estimée est de **168 kg d'eau pour 1 m³** de béton.

Etape 4 : Détermination du rapport E/C : A partir du tableau 2.4, le rapport E/C requis pour donner une résistance à la compression de 28 jours de 35 Mpa est estimé à **0,39**. Cette valeur ne dépasse pas les limites basées sur la durabilité du tableau 2.5.

Etape 5 : Calcul du dosage en ciment : A partir des résultats obtenus aux étapes 3 et 4, le dosage en ciment requis est de $168/0,39 = \mathbf{430,769 \text{ kg/m}^3}$

Etape 6 : Estimation de la teneur en gros granulat (gravier) : En faisant une interpolation dans le tableau 2.6 pour le module de finesse du granulat fin de 2,7 ; le volume du gros granulat compacté à sec par unité de volume de béton est de **0,63**. Par conséquent, le poids sec du gros granulats (à l'état sec) est de $0,63 \times 1600 = \mathbf{1008 \text{ kg/m}^3}$.

Etape 7 : Estimation de la teneur en granulat fin (sable) : Connaissant le poids et la masse volumique absolue de l'eau, du ciment et du gros granulat et connaissant aussi le volume de l'air dans le mélange, le volume par m³ occupé par différents ingrédients peut être déterminé comme suit :

- Eau de gâchage : $168/1000 = 0,168 \text{ m}^3$.
- Ciment : $430,769 / (3,15 \times 1000) = 0,136752 \text{ m}^3$
- Gros granulat : $1008 / (1000 \times 2,7) = 0,37333 \text{ m}^3$
- Air contenu dans 1 m³ de béton : $6/100 = 0,06 \text{ m}^3$

Total : 0,738082 m³, Ainsi le granulat fin devra occuper un volume de $1 - 0,738082 = 0,261918 \text{ m}^3$. Le poids du granulat fin à l'état saturé surface sèche équivaut à : $0,261918 \times 2,65 \times 1000 = 694,0827 \text{ kg/m}^3$.

Etape 8 : Ajustement de l'humidité dans les granulats : Pour tenir compte de l'humidité réelle des granulats sur chantier, on convertit la masse de référence SSS en masse humide à peser :

- Masse humide de gravier = $1008 \times (1 + 0,025) = 1033,2 \text{ kg pour } 1 \text{ m}^3 \text{ de béton}$
- Masse humide de sable = $694,088 \times (1 + 0,055) = 732,262 \text{ kg pour } 1 \text{ m}^3 \text{ de béton}$

L'eau de gâchage est alors ajustée pour tenir compte de l'eau libre apportée par les granulats humides :

- Eau en excès (sable) = $\frac{5,5-1,3}{100} \times 694,088 = 29,15169 \text{ kg}$
- Eau en excès (gravier) = $\frac{2,5-1}{100} \times 1008 = 15,12 \text{ kg}$

Eau de gâchage à ajouter = $168 - (29,15168 + 15,12) = 123,72831 \text{ L}$

Annexe C : Rapports générés par l'outil

1. Rapport de formulation

Rapport de Formulation

Date de Génération: 24/01/2026

Rapport E/C Max: 0.39

Formulation: Béton avec une haute résistance caractéristique

Paramètres Cibles

Résistance Cible (f _c) 35.0 MPa	Affaissement Cible 50.0 mm	Type de Béton À air entraîné
Classe d'Exposition Sévère		

Dosages pour 1m³ de Béton

Matériau	Volume / 1 m³	Poids de la gachée par m³	
		Masse à l'état SSS	Masse à l'état humide
Eau	0.168	168.0 kg	123.7 kg
Ciment	0.137	431 kg	431 kg
Gravier	0.373	1008 kg	1033 kg
Sable	0.262	694 kg	732 kg
Air	0.060	—	—
Total		2301 kg	2320 kg

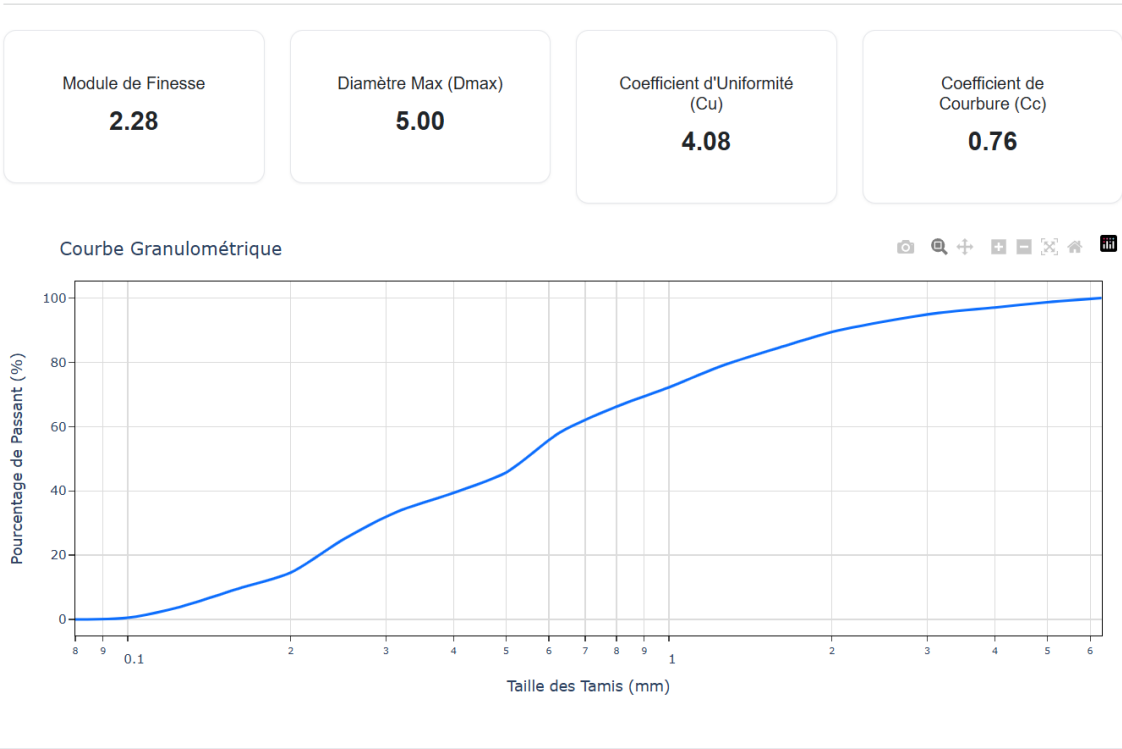
**CONCEPTION ET IMPLEMENTATION D'UN OUTIL INFORMATIQUE D'AIDE A
LA FORMULATION DU BETON BASE SUR LA METHODE ACI**

Propriétés des Matériaux Utilisés

Ciment: Densité relative: 3.150	Sable: Densité relative: 2.65 Module de Finesse: 2.70 Teneur en eau: 5.5 % Absorption: 1.3 %	Gravier: Densité relative: 2.70 Dmax: 20.0 mm Teneur en eau: 2.5 % Absorption: 1.0 %
---	---	---

Rapport généré par BétonForm v1.0 | © 2026

2. Extrait de la note de calcul



Annexe D : Résultats obtenus par l'outil

1. Béton pour des conditions normales

E/C Max 0.64	Ciment 300.6 kg/m³	Eau à ajouter 193.0 L/m³
-------------------------------	--	--

Dosages par m³

Constituant	Masse sèche	Masse humide
Sable	993.2 kg	993.2 kg
Gravier	683.0 kg	683.0 kg

2. Béton pour des conditions sévères

E/C Max 0.50	Ciment 320.0 kg/m³	Eau à ajouter 160.0 L/m³
-------------------------------	--	--

Dosages par m³

Constituant	Masse sèche	Masse humide
Sable	787.8 kg	787.8 kg
Gravier	1018.4 kg	1018.4 kg

3. Béton avec une résistance caractéristique élevée

**E/C Max
0.39**

**Ciment
430.8
kg/m³**

**Eau à ajouter
123.7 L/m³**

Dosages par m³

Constituant	Masse sèche	Masse humide
Sable	694.1 kg	732.2 kg
Gravier	1008.0 kg	1033.2 kg

Annexe E : Quelques codes python

1. Code python pour le calcul de la résistance moyenne

```
import numpy as np
from . import aci_tables

def _calculate_required_average_strength (f_c: float) -> float:
    """
    Calcule la résistance moyenne requise ( $f'_{cr}$ ) basée sur la résistance spécifiée ( $f'_c$ )
    en utilisant le tableau 2.2 , lorsque S n'est pas connu.

    Args:
        f_c (float): La résistance à la compression spécifiée ( $f'_c$ ) en MPa.

    Returns:
        float: La résistance moyenne requise pour le proportionnement ( $f'_{cr}$ ) en MPa.
    """
    if f_c < 21:
        fcr_rule = f'"f'_c ({f_c} MPa) < 21 MPa, donc f'_{cr} = f'_c + 7.0 MPa"
        f_cr = f_c + 7.0
    elif 21 <= f_c <= 35:
        fcr_rule = f'"21 <= f'_c ({f_c} MPa) <= 35 MPa, donc f'_{cr} = f'_c + 8.5 MPa"
        f_cr = f_c + 8.5
    else: # f_c > 35
        fcr_rule = f'"f'_c ({f_c} MPa) > 35 MPa, donc f'_{cr} = f'_c + 10.0 MPa"
        f_cr = f_c + 10.0
```

2. Extrait du script python pour la méthode ACI

Détermination du Slump et choix des tables

```
target_slump = params['target_slump']
dmax = params['dmax']

if 1 <= target_slump <= 60: slump_range = "25-50"
elif 61 <= target_slump <= 120: slump_range = "75-100"
elif 121 <= target_slump <= 200: slump_range = "150-175"
else: raise ValueError("L'affaissement cible est hors des plages standards de l'ACI (1-200mm).")

air_entrained_text = "Avec Air Entraîné" if params['air_entrained'] else "Sans Air Entraîné"
water_table_name = f"Table ACI 211.1-6.3.3 ({air_entrained_text})"

# Estimation de l'eau de gâchage et de la teneur en air

if params['air_entrained']:
    # 1. Déduction du niveau de sévérité pour la teneur en air
    durability_cond = params.get('durability_condition', 'none')
    if durability_cond == 'sea_water_or_sulfates':
        air_exposure_level = 'extreme'
    elif durability_cond == 'freeze_thaw':
        air_exposure_level = 'moderate'
    else: # 'none'
        air_exposure_level = 'light'
```

3. Script python : Table eau de gâchage et teneur en air

--- Tableau 2.2 : Eau de gâchage et teneur en air ---

Quantités d'eau approximatives (kg/m³) pour béton SANS air entraîné

```
WATER_CONTENT_NON_AIR_ENTRAINED = {  
    "25-50": { 10: 207, 12.5: 199, 20: 190, 25: 179, 40: 166, 50: 154, 80: 130, 150: 113 },  
    "75-100": { 10: 228, 12.5: 216, 20: 205, 25: 193, 40: 181, 50: 169, 80: 145, 150: 124 },  
    "150-175": { 10: 243, 12.5: 228, 20: 216, 25: 202, 40: 190, 50: 178, 80: 160, 150: None  
},  
}
```

Pourcentage d'air occlus approximatif pour béton SANS air entraîné

```
APPROXIMATE_AIR_NON_AIR_ENTRAINED = {  
    10: 3.0, 12.5: 2.5, 20: 2.0, 25: 1.5, 40: 1.0, 50: 0.5, 80: 0.3, 150: 0.2  
}
```

Quantités d'eau approximatives (kg/m³) pour béton AVEC air entraîné

```
WATER_CONTENT_AIR_ENTRAINED = {  
    "25-50": { 10: 181, 12.5: 175, 20: 168, 25: 160, 40: 150, 50: 142, 80: 122, 150: 107 },  
    "75-100": { 10: 202, 12.5: 193, 20: 184, 25: 175, 40: 165, 50: 157, 80: 133, 150: 119 },  
    "150-175": { 10: 216, 12.5: 205, 20: 197, 25: 184, 40: 174, 50: 166, 80: 154, 150: None  
},  
}
```

Teneur en air totale moyenne recommandée (%) pour béton AVEC air entraîné

```
RECOMMENDED_TOTAL_AIR_CONTENT = {  
    "light": { 10: 4.5, 12.5: 4.0, 20: 3.5, 25: 3.0, 40: 2.5, 50: 2.0, 80: 1.5, 150: 1.0 },  
    "moderate": { 10: 6.0, 12.5: 5.5, 20: 5.0, 25: 4.5, 40: 4.5, 50: 4.0, 80: 3.5, 150: 3.0 },  
    "extreme": { 10: 7.5, 12.5: 7.0, 20: 6.0, 25: 6.0, 40: 5.5, 50: 5.0, 80: 4.5, 150: 4.0 },  
}
```

