

Formulation des bétons

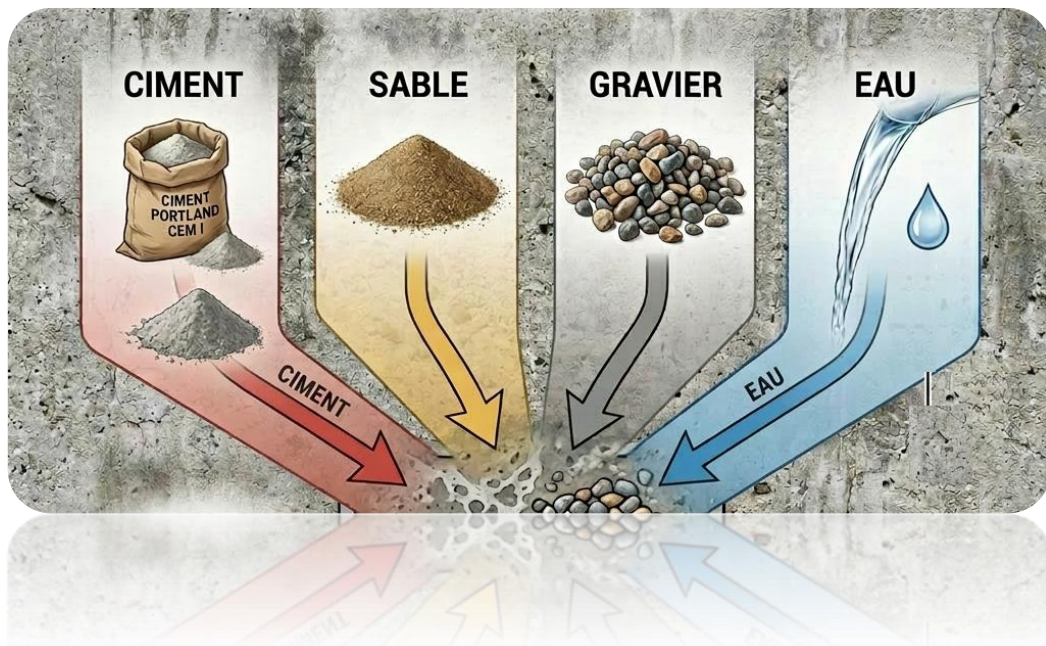


Table des matières

Introduction.....	3
1 Propriétés des bétons	4
1.1 Résistance	4
1.2 Ouvrabilité	5
1.3 Compacité	5
2 Composants du béton	7
2.1 Ciment	7
2.2 Eau	10
2.3 Granulats.....	11
2.4 Adjuvants, additifs	13
3 Formulation d'un béton : méthode de « Dreux – Gorisse ».....	15
3.1 Introduction.....	15
3.2 Données d'entrée : cahier des charges, conditions de mise en œuvre, matériaux à disposition.....	15
3.3 Dosage en ciment C	16
3.4 Dosage en eau E.....	17
3.5 Volumes et masses des granulats (squelette granulaire)	18
4 Désignation des bétons	24
Références bibliographiques	26
Pour aller plus loin	27
Glossaire	28
Annexe : un aperçu général de quelques normes	30

Introduction

On propose dans ce document d'apporter quelques éclairages sur la composition des bétons, sur leurs propriétés, et sur la méthode de détermination d'une formulation de béton appelée méthode « Dreux-Gorisse ».

On a choisi de commencer par les propriétés des bétons. Elles auront l'avantage d'être nommées et expliquées quand il s'agira de détailler les composants du béton et donc leur influence sur ces dernières.

Principales références [1], [2], [3] :

- G. Dreux et J. Festa, Nouveau guide du béton: composants et propriétés, composition et dosage, fabrication, transport et mise en oeuvre, contrôle et normalisation, 7e éd. 1995 rev. et Augm. Paris: Eyrolles, 1995.
- Bernier, « C2210 v2 Formulation des bétons », Techniques de l'Ingénieur, mai 2004, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr>
- F. Dubois, *Béton écologique et construction durable ; l'essentiel à savoir pour réussir la transition*. S.l.: EYROLLES, 2023

Quelques dates

- 1818 Louis Vicat, bases de la compréhension de l'hydraulicité des ciments
- 1868 Joseph Monier : caisses à fleurs et récipients de jardinage en enrobant un treillis dans du mortier de ciment afin de réduire l'épaisseur (1^{ère} application industrielle)
- 1906 Premier règlement de calcul en béton armé
- 1928 Béton précontraint, Brevet Eugène Freyssinet

1 Propriétés des bétons

1.1 Résistance

La première propriété à laquelle on pense est la résistance mécanique du béton. Le béton a une bonne résistance en compression mais une très faible résistance en traction (Tableau 1).

	Béton ordinaire	Béton à hautes performances	Béton fibré à ultra-hautes performances
Résistance caractéristique en compression f_{ck} (MPa) Mesurée sur éprouvette cylindrique, à 28 jours	16-50	55-120	150-250
Résistance moyenne en traction f_{ctm} (MPa)	1,9-4,1	4,2-5	8-12
Module d'élasticité moyen E_{cm} (MPa)	20 000-37 000	38 000-44 000	45 000-70 000

Tableau 1. Résistances mécaniques des bétons [3]

1.1.1 De l'influence de l'âge du béton

Après élaboration du béton, l'hydratation se produit, le béton durcit et sa résistance augmente fortement dans les premiers jours. C'est finalement la résistance à la compression à 28 jours qui nous intéresse.

A titre d'exemple, l'Eurocode 2 – Calcul des structures en béton, propose la formule suivante, pour une température moyenne de 20°C et une cure conforme à l'EN 12390 :

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm}$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}}\right)}$$

Avec

- t : âge du béton en jours
- f_{cm} : résistance moyenne du béton en compression à 28 jours
- $f_{cm}(t)$: résistance moyenne du béton en compression à l'âge de t jours (après t jours de séchage)
- s : coefficient dépendant du type de ciment ($s = 0,20$ à $0,38$)

On a tracé ci-dessous le coefficient β_{cc} en fonction du temps t .

On voit qu'avant 28 jours, $\beta_{cc} < 1$ donc $f_{cm}(t) < f_{cm}$.

Après 28 jours, $f_{cm}(t) > f_{cm}$. Quand $t \rightarrow \infty$, β_{cc} tend vers e^s . Par exemple, β_{cc} tend vers 1,22 pour $s = 0,20$.

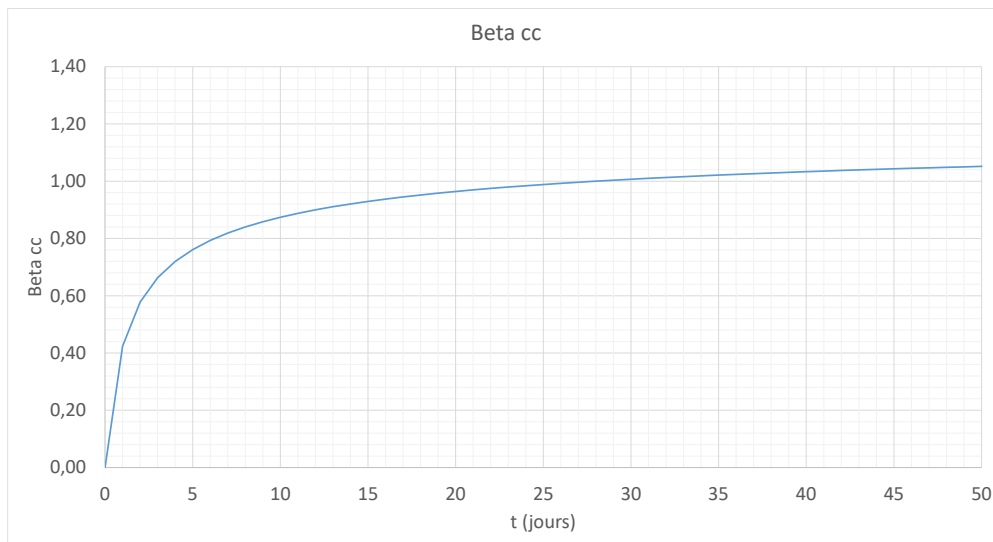


Figure 1. Coefficient β_{cc} en fonction du temps t , $s = 0,20$

1.2 Ouvrabilité

L'ouvrabilité est la capacité du béton à « couler » pour remplir le coffrage. On parle aussi de consistance. L'ouvrabilité du béton a une influence sur de nombreuses propriétés comme la compacité, la résistance, et dans le cas du béton armé, l'enrobage et l'adhérence des armatures.

Il existe plusieurs essais permettant de caractériser l'ouvrabilité d'un béton : affaissement au cône d'Abrams, étalement par écoulement, plasticimètre à rotation...

On détaillera le test d'affaissement au cône d'Abrams (auss appelé slump test). Cet essai est détaillé dans la norme NF EN 12350-2 [4]. Le béton frais est compacté dans un cône tronconique. Lorsque le cône est retiré à la verticale, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.

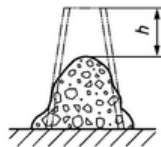
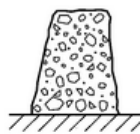
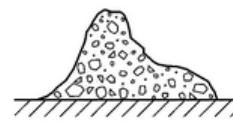


Figure 1 - Mesure de l'affaissement



a) Affaissement valide



b) Affaissement avec cisaillement

Figure 2 - Types d'affaissement

Figure 2. Test d'affaissement au cône d'Abrams [4]

Liens utiles

<https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/lessai-daffaissement-au-cone-dabrams/>

1.3 Compacité

Les granulats et le ciment ne peuvent pas occuper entièrement le volume de béton. Le volume de béton contient donc aussi de l'eau et de l'air.

On définit le coefficient de compacité γ tel que

$$\gamma = \frac{V_g + V_s + V_c}{1000}$$

Avec V_g : volume de gravier, V_s : volume de sable, V_c : volume de ciment.

Pour des bétons courants, γ vaut en moyenne 0,82.

La compacité dépend de nombreux paramètres : dimension maximale des granulats, dosage en ciment, dosage en eau, proportion de gravier et de sable, forme des granulats (roulés ou concassés), ou encore les moyens de serrage¹ (vibration, piquage). A l'issue d'une importante campagne expérimentale, consistant à élaborer des bétons en faisant varier tous ces paramètres, Dreux propose les courbes ci-dessous, donnant la compacité tracée en fonction du diamètre maximal des granulats.

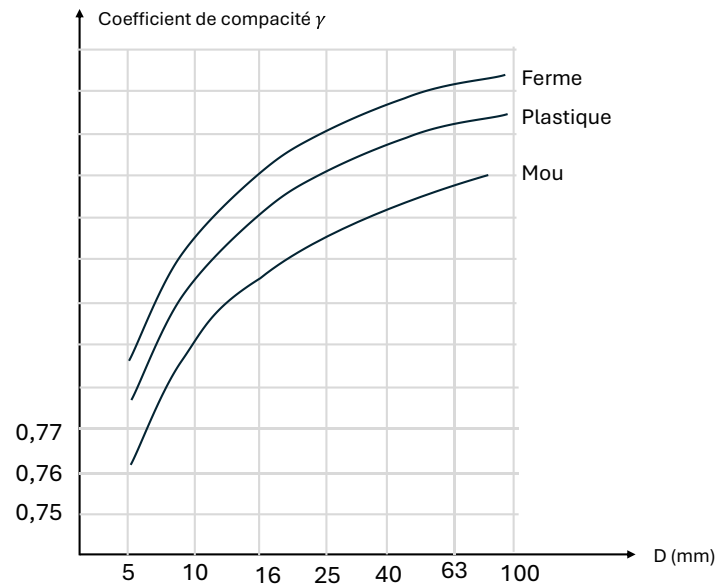


Figure 3. Variation du coefficient de compacité en fonction de la dimension maximale D des granulats et de la consistance pour des granulats roulés [1]

¹ Le serrage, ou compactage du béton, est une opération réalisée sur le béton frais (béton qui vient d'être coulé), sur chantier. Il s'effectue généralement par vibration. Il permet d'améliorer la compacité, l'adhérence aux armatures, et donc la résistance.

2 Composants du béton

Le béton est un matériau formé par mélange de ciment, de sables, de gravillons et d'eau, et éventuellement d'adjuvants, d'additions ou de fibres, et dont les propriétés se développent par hydratation [5].

A ces trois composants essentiels (eau, ciment, granulats), on ajoute souvent des produits d'origine minérale ou organique permettent de modifier les propriétés du béton frais (avant séchage), en cours de durcissement ou durci. On distingue les additions, les adjuvants, l'air (non voulu ou volontairement incorporé par malaxage) et les ajouts (tout autre type de produit).



Figure 4. « La recette du maçon ». Pour réaliser des petits travaux, on peut retenir la règle du 1-2-3 qui permet de rappeler facilement la préparation du béton [3]. On obtient tout de même une formulation un peu lourde en ciment, donc onéreuse....

2.1 Ciment

2.1.1 Définitions

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire un matériau minéral finement moulu qui, gâché avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et de processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau [6].

Le ciment durcit avec le temps et solidarise les granulats du béton.

Parmi les constituants du ciment, on trouve le clinker Portland. Il se trouve dans tous les ciments courants. Le clinker résulte de la cuisson à haute température puis le broyage d'un mélange d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile. On y trouve des oxydes tels que CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ...etc [6].

Le ciment est la constituant le plus cher dans un béton et on cherche généralement à limiter sa quantité.

2.1.2 Résistance

On définit des classes de résistance normalisées. On distingue 3 classes : 32,5, 42,5 et 52,5 MPa.

On définit aussi la classe vraie du ciment σ'_c du ciment à 28 jours. σ'_c est aussi parfois notée f_{cm28} ou F_{CE} .

La classe vraie du ciment est déterminée par des essais de compression, selon la norme NF EN 196-1 « méthodes d'essais des ciments, Partie 1 détermination des résistances » [7]. C'est la moyenne des résistances obtenues sur un mortier de référence, constitué avec le ciment à étudier, de l'eau, et un sable normalisé, sur des éprouvettes $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ préalablement rompues en flexion.

Remarque : ne pas confondre classe vraie et classe de résistance normalisée, bien qu'une correspondance existe (Tableau 2).

Classe normalisée (MPa)	32,5	42,5	52,5
Classe vraie σ'_c (MPa)	45	55	> 60

Tableau 2. Correspondance classe de résistance normalisée / classe vraie

2.1.3 Désignation des ciments

La norme NF EN 197-1 indique les désignations normalisées des ciments [6].

On donne ci-dessous un exemple. Soit le ciment :

CEM II / B – M (S-V) 42,5N NF

CEM II indique la famille de ciment.

- CEM I : ciment Portland (constitué à plus de 95% de clinker Portland)
- CEM II : ciment Portland composé (ciments les plus utilisés aujourd'hui en France)
- CEM III : ciment de haut fourneau
- CEM IV : ciment pouzzolanique
- CEM V : ciment au laitier et aux cendres

B : quantité de constituants principaux autres que le clinker

- A : 6 à 20%
- B : 21 à 35%

M : ciment avec au moins deux constituants principaux autres que le clinker

(S-V) : nom des constituants principaux

- S : laitier de hauts-fourneaux
- V : cendre volante siliceuse
- L ou LL : calcaire
- D : fumée de silice

42,5 : classe de résistance normalisée

N : sous-classe de résistance

- R : pour une résistance élevée au jeune âge (après quelques jours de durcissement)
- N : normal

NF : ciment certifié conforme norme française

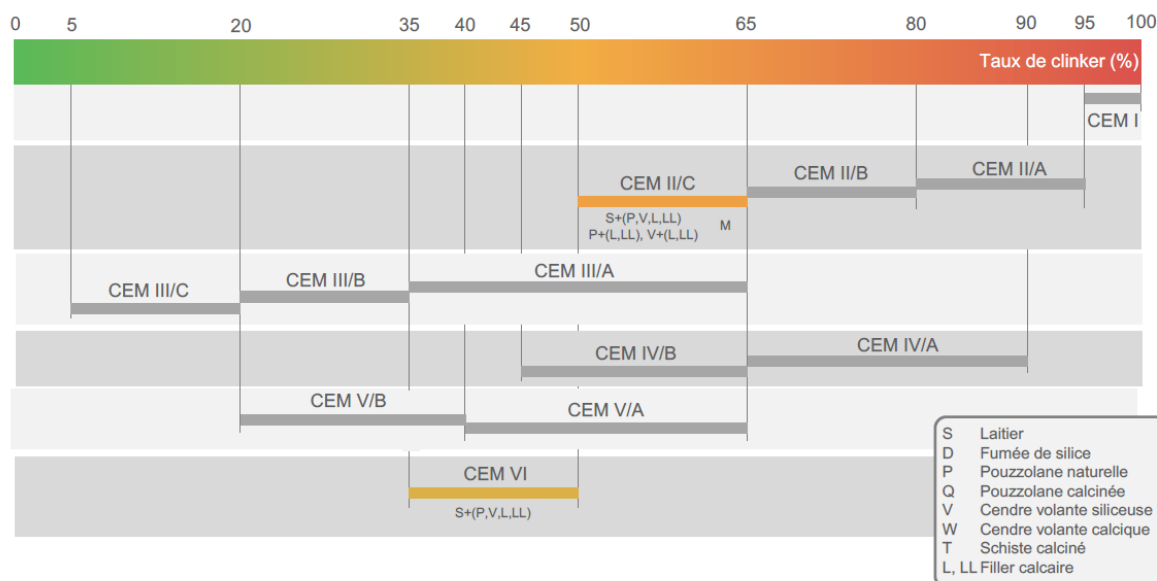


Figure 5. Ciments normalisés selon leur taux de Clinker et leurs constituants (adapté des normes EN 197-1 et EN 197-5) [8]

2.1.4 Aspects environnementaux

Le principal constituant du ciment est aujourd'hui le clinker Portland. La fabrication de ce clinker est responsable de la majeure partie des émissions de CO_2 liées au béton [8]. Un axe de recherche actuel dans le domaine des bétons est de trouver des substituts au clinker Portland : additions, liants alternatifs... L'approvisionnement en grande quantité de ces produits de substitution constitue un défi important.

Type de matériau	Quantité mobilisable (France)	Localisation géographique	Type de matériau	Quantité mobilisable (France)	Localisation géographique
Laitiers de haut fourneau	Environ 1,3 million de tonnes/an		Argiles kaoliniques	Quelques centaines de milliers de tonnes/an	
Fumées de silice	40 000 à 45 000 tonnes/an		Pouzzolanes naturelles	Quelques dizaines à centaines de milliers de tonnes/an	
Cendres volantes	Environ 400 000 tonnes/an				

Figure 6. Estimation des quantités et localisation de quelques points géographiques clés concernant les principales additions minérales en France [8]

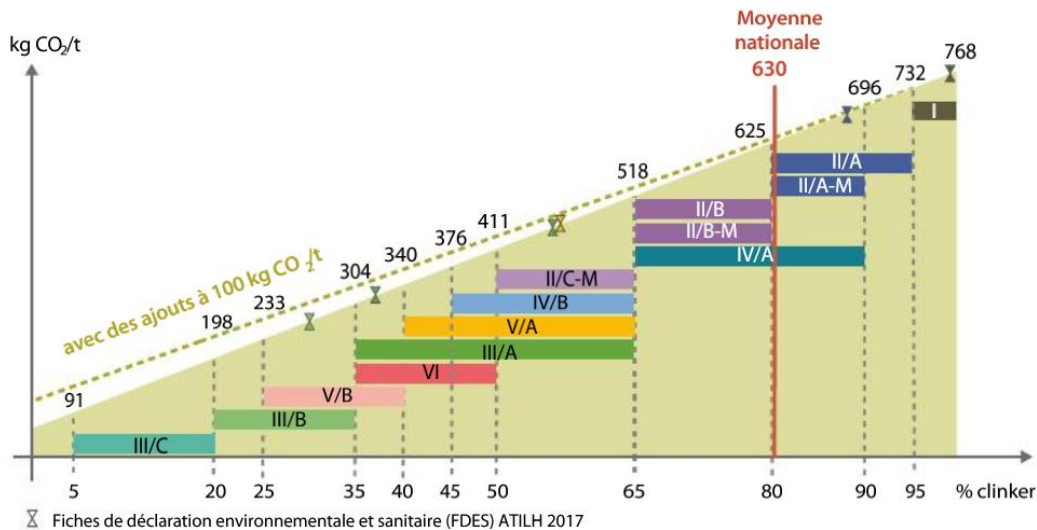


Fig. 39 – Empreinte carbone des types de ciments en fonction du taux de clinker.

Par exemple, un ciment de type CEM II/C-M comprend, d'après la norme NF EN 197-5, de 50 à 65 % de clinker et une empreinte carbone que l'on peut estimer entre 410 et 520 kg CO₂/t, avec un clinker moyen. Selon le mode de production des ajouts au clinker (laitier de haut fourneau, argiles calcinées...), l'empreinte carbone peut être supérieure (voir focus technique 7.2).

Figure 7. [3]

2.2 Eau

2.2.1 Rôle de l'eau dans le mélange

L'eau permet l'hydratation du liant (formation des hydrates) et apporte au béton l'ouvrabilité nécessaire à sa mise en œuvre.

On montre ci-dessous l'influence du dosage en eau sur l'affaissement au cône d'Abrams.

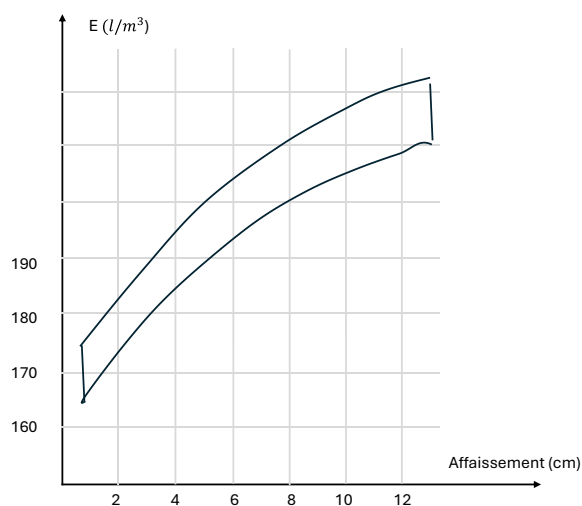


Figure 8. Influence de la teneur en eau totale sur l'affaissement au cône d'Abrams [1, p. 161]

Remarque : l'eau qui ne participe pas à la formation des hydrates augmentera la porosité du matériau et diminuera donc sa résistance. Il faut donc suffisamment d'eau, mais pas trop !

2.2.2 D'où vient l'eau contenue dans le béton ?

La principale source d'eau dans la composition du béton vient de l'eau directement apportée lors de son élaboration. L'eau apportée est appelée eau de gâchage.

Cependant, les granulats, les sables, et tout composant ajouté dans le mélange, peuvent contenir de l'eau car ils sont rarement totalement secs.

La quantité totale d'eau dans le béton, que l'on appellera E_{totale} , vient donc de l'eau de gâchage et de l'eau apportée par les autres constituants.

Une partie de cette eau totale, que l'on appellera E_{ab} , sera absorbée par ces mêmes constituants et par les adjuvants. Cette partie absorbée ne sera pas disponible pour l'hydratation du ciment. La partie de l'eau totale disponible pour l'hydratation du ciment est appelée eau efficace E_{eff} . Ainsi

$$E_{totale} = E_{eff} + E_{ab}$$

Remarque

La quantité d'eau apportée par les granulats peut devenir conséquente, et dépend fortement des conditions de stockage des granulats.

2.3 Granulats

2.3.1 Définition

Les granulats sont des sables, graviers ou cailloux utilisés dans la composition du béton.

Un granulat peut être naturel, artificiel ou recyclé.

2.3.2 Granulométrie

On distingue les granulats par leur taille, on parle de granularité. Elle est évaluée par granulométrie ; on procède par tamisage. On utilise des tamis, réalisés avec des fils métalliques tressés ou des tôles perforées et présentant des ouvertures carrées de côté d (Figure 9).



Figure 9. Tamis et colonne de tamis utilisée pour le tamisage mécanique

Quand on tamise un granulat avec un tamis d'ouverture d , une partie du granulat ne passe pas à travers les ouvertures, c'est le refus. Les particules qui ne passent pas ont donc une dimension supérieure à d . L'autre partie est passée à travers les ouvertures, c'est le passant. Les particules qui sont passées ont donc une dimension inférieure à d . En analysant le granulat avec des tamis de différentes tailles, on peut alors créer la courbe granulométrique du granulat, qui nous donne la distribution de dimension du granulat (voir exemple Figure 10).

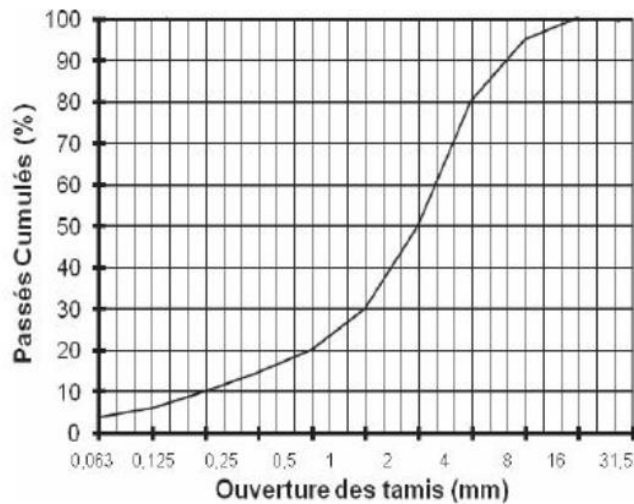


Figure 10. Granularité d'un matériau analysé par tamisage [9]

La courbe d'analyse granulométrique de la Figure 10 doit respecter la norme NF EN 933-1 [10] : son échelle doit être linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats.

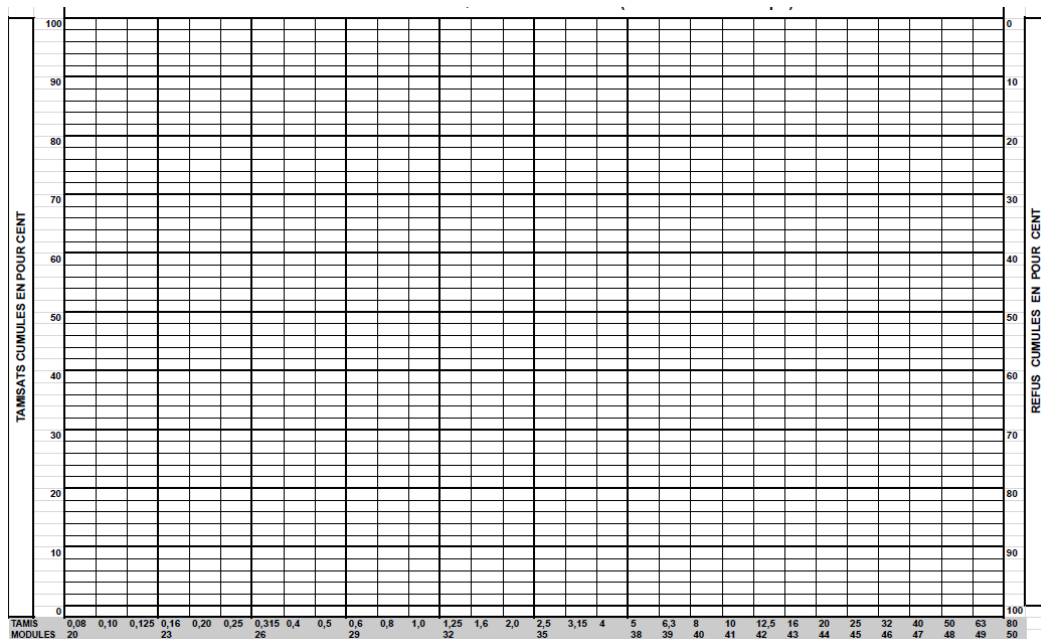


Figure 11. Courbe d'analyse granulométrique

On définit finalement des classes granulaires : désignation d'un granulat en termes de dimensions inférieure (d) et supérieure (D), exprimée en d/D .

2.3.3 Module de finesse d'un granulat

Le module de finesse m_f est défini par

$$m_f = \frac{\sum \text{refus cumulés à } 0,16 \text{ mm, à } 0,315 \text{ mm, à } 0,63 \text{ mm, à } 1,25 \text{ mm, à } 2,5 \text{ mm, à } 5 \text{ mm}}{100}$$

Le module de finesse s'interprète comme l'aire de la surface hachurée au-dessus de la courbe d'analyse granulométrique du granulat.

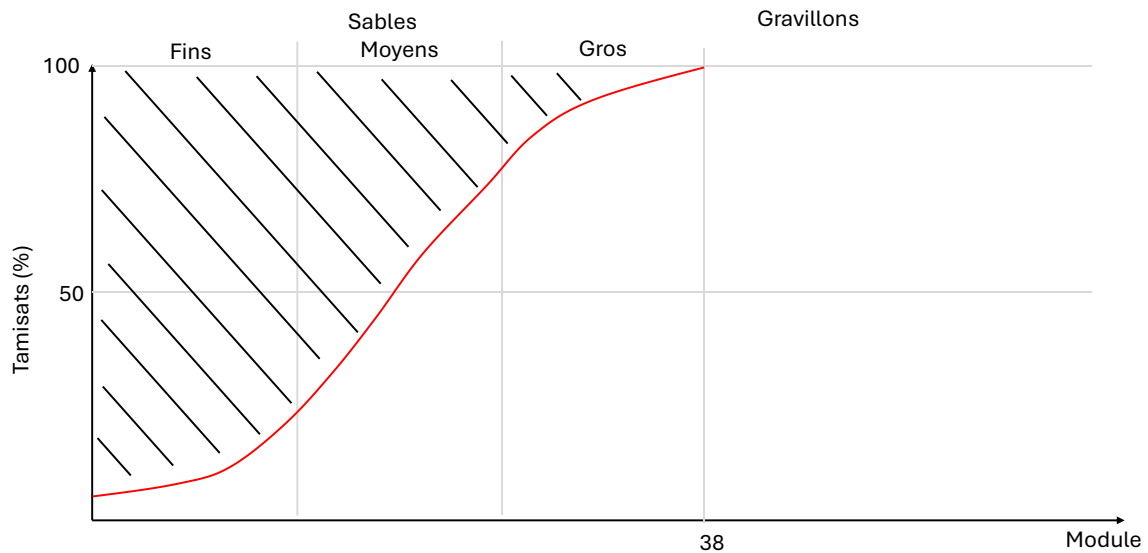


Figure 12. Interprétation graphique du module de finesse d'un granulats. Le module de finesse s'interprète comme l'aire de la surface hachurée au-dessus de la courbe d'analyse granulométrique du granulats.

On présente ci-dessous l'allure des courbes de granularité pour différents sables, et le module de finesse associé.

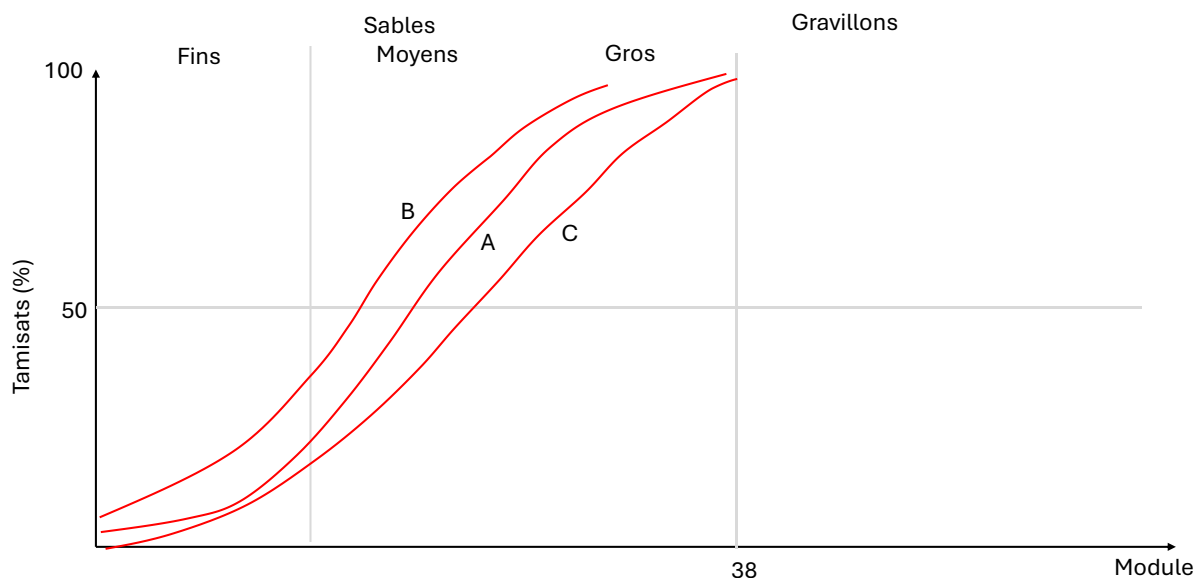


Figure 13. Représentation de la granularité de plusieurs sables et leur module de finesse associé [1]. A : module de finesse entre 2,20 et 2,80, préférentiel. B : module de finesse entre 1,80 et 2,20 un peu trop fin. C : module de finesse entre 2,80 et 3,20 un peu trop grossier

2.4 Adjuvants, additifs

Les adjuvants sont des produits ajoutés lors du mélange, de dosage inférieur à 5% de la masse de ciment, et permettant de modifier les propriétés du béton frais ou durci (plasticité, temps de prise, temps de durcissement, porosité, ...).

Exemples d'adjuvants :

- Entraîneur d'air : adjuvant introduit dans l'eau de gâchage, qui provoque la formation de micro-bulles d'air. Distribuées de façon uniforme dans le mélange, elles améliorent la résistance au gel du béton
- Hydrofuge de masse : adjuvant utilisé pour diminuer l'absorption d'humidité

- Plastifiant : augmente l'ouvrabilité du mélange. Pour augmenter l'ouvrabilité de béton, on augmente la teneur en eau. Mais la teneur en eau diminue la résistance du béton. Avec un plastifiant, on peut diminuer la teneur en eau sans diminuer son ouvrabilité, et par conséquent obtenir un béton à la fois de bonne ouvrabilité et de plus grande résistance.
- Retardateur de prise : ajouté à l'eau de gâchage. Augmente le temps de début et fin de prise du ciment.

Les adjuvants sont généralement liquides. On parle d'additions ou additifs s'ils sont solides.

3 Formulation d'un béton : méthode de « Dreux – Gorisse »

3.1 Introduction

La détermination d'une formulation de béton poursuit deux objectifs en termes de propriétés : une bonne résistance mécanique et une bonne ouvrabilité. Malheureusement, ces deux propriétés varient en sens inverse et la recherche d'une formulation adéquate sera toujours un compromis.

L'origine de la méthode exposée ici peut paraître bien énigmatique, notamment pour la définition du squelette granulaire (proportions des granulats).

Elle repose en fait sur une étude empirique, et les mots de l'auteur lui-même seront les mieux adaptés pour expliquer la démarche qui a abouti à cette méthode [1] :

« Une enquête a été menée auprès d'entreprises, d'administrations, de laboratoires et de centrales de béton prêt à l'emploi qui ont accepté de nous fournir l'ensemble des données relatives à des bétons mis en œuvre sur de très nombreux chantiers, comprenant les courbes granulométriques [...], les natures de granulats utilisés, les dosages et formulations des bétons, les natures d'ouvrages auxquels ils étaient destinés et les résistances obtenues.

Disposant de cet ensemble de résultats, nous avons cherché à définir statistiquement sous forme de règles simples et pratiques une méthode globale permettant d'aboutir aux dosages en question, compte tenu des données de chaque cas d'espèce. Assez rapidement nous avons vu apparaître [...], des constantes, des similitudes, des lois de variation de forme simple, des fuseaux granulaires préférentiels, etc.

Nos recherches ont donc finalement conduit à la définition d'une méthode simple qui, à partir des données de base essentielles, permet d'aboutir approximativement, mais rapidement, aux compositions qui ressortent en moyenne de l'examen statistique des bétons les plus couramment utilisés actuellement dans la pratique. »

3.2 Données d'entrée : cahier des charges, conditions de mise en œuvre, matériaux à disposition

La formulation des bétons dépend des propriétés de résistance et ouvrabilité qui lui seront demandées, et de l'environnement auquel le béton sera exposé.

Cahier des charges

- Résistance caractéristique en compression sur cylindre à 28 jours (exemple $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ donc un béton de classe C20/25)
- Ouvrabilité recherchée (affaissement au cône d'Abrams). Une étude préalable aura été menée pour déterminer l'ouvrabilité recherchée, en fonction de la nature de l'ouvrage (ses dimensions, épaisseurs, ferrailage), en fonction du mode de vibration sur chantier et si l'on veut un béton pompable (Tableau 3).

Plasticité	Serrage	Affaissement (cm)
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9
Béton mou	Piquage	10 à 13
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14

Tableau 3. Ouvrabilité désirée du béton

On aura besoin de connaître les matériaux à disposition :

- Type de ciment (CEM I, CEM II..etc. Classe de résistance normalisée, densité)
- Courbes granulométriques des granulats
- Qualité des granulats, masse volumique des granulats

3.3 Dosage en ciment C

3.3.1 Formule de Bolomey : calcul de C/E

On admet expérimentalement que

$$f_c = G \cdot F_{CE} \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

- f_c résistance moyenne en compression désirée à 28 jours (MPa)
- F_{CE} classe vraie du ciment à 28 jours (MPa)
- C dosage en ciment (kg/m^3)
- E dosage en eau totale sur matériaux secs (L/m^3)
- G coefficient granulaire

Cette formule nous donnera le rapport C/E.

Remarque 1

Au lieu de C, quantité de ciment, on trouve parfois la variable L_{eq} , donnant le dosage en liant équivalente. Le liant étant constitué du ciment et d'éventuelles additions minérales considérées pour leur réactivité équivalente au ciment, on parle de « liant équivalent » dont la résistance caractéristique est équivalente à celle d'un ciment Portland [3].

Remarque 2

Pour des raisons notamment de coût et d'empreinte écologique, on cherchera le plus faible rapport E/C possible tout en gardant une ouvrabilité conforme à celle demandée. De cette manière, on obtiendra la résistance recherchée avec la juste quantité de ciment C.

3.3.2 Quelques éclairages sur la formule de Bolomey

La résistance σ'_{28} du béton augmente avec le dosage en ciment C, et diminue avec le dosage en eau E.

On peut donc supposer que σ'_{28} dépend de C/E .

$$\sigma'_{28} = K \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

Le coefficient K est supposé représenter l'influence de nombreux paramètres : nature et classe du ciment, qualité des granulats, sable.....etc.

Or on observe que la résistance σ'_{28} du béton augmente linéairement avec la classe vraie σ'_c du ciment, donc en introduisant un autre coefficient que l'on nommera G , on peut écrire

$$\sigma'_{28} = G \cdot \sigma'_c \cdot \left(\frac{C}{E} - 0,5 \right)$$

G , coefficient granulaire, représente l'influence de la qualité et de la taille des granulats sur la résistance du béton.

Qualité des granulats	Fins $D \leq 16 \text{ mm}$	Moyens $25 \leq D \leq 40 \text{ mm}$	Gros $D \geq 63 \text{ mm}$
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Tableau 4. Coefficient granulaire G . On suppose que le serrage est effectué dans de bonnes conditions (par vibration) [1]

3.3.3 Qu'est-ce que la qualité d'un granulat ?

Pour les graviers, il s'agit avant tout de leur dureté et leur propreté.

Pour le sable, il s'agit de la propreté, de la friabilité et d'un module de finesse adapté ($2,2 \leq M_f \leq 2,8$).

3.3.4 Dosage en ciment : C : estimation finale

On connaît maintenant C/E .

Cependant, on ne peut pas décider au hasard de la valeur de C puis en déduire E . En effet si l'on choisit une valeur trop faible de C , on obtiendra une valeur trop faible de E et le béton sera trop sec.

On doit donc choisir un dosage en ciment C permettant un dosage en eau E suffisant pour assurer une ouvrabilité suffisante. On rappelle que l'ouvrabilité peut se mesurer à l'aide du test d'affaissement au cône d'Abrams. Il nous faudrait en fait un graphique permettant d'obtenir le dosage en ciment C , connaissant l'ouvrabilité désirée et le rapport C/E donné par la formule de Bolomey, C'est l'abaque ci-dessous.

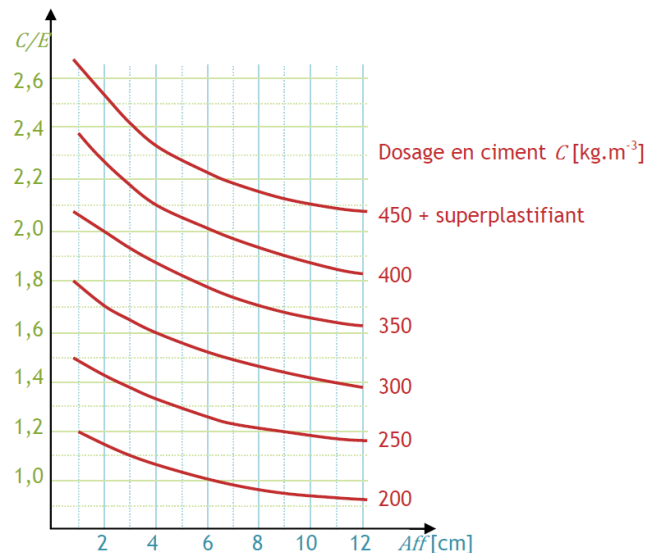


Figure 14. Abaque pour l'estimation de la quantité de ciment [1], [11]

Remarque

On illustre ci-dessous l'influence de la quantité de pâte (liant + eau efficace + air) sur l'affaissement au cône d'Abrams.

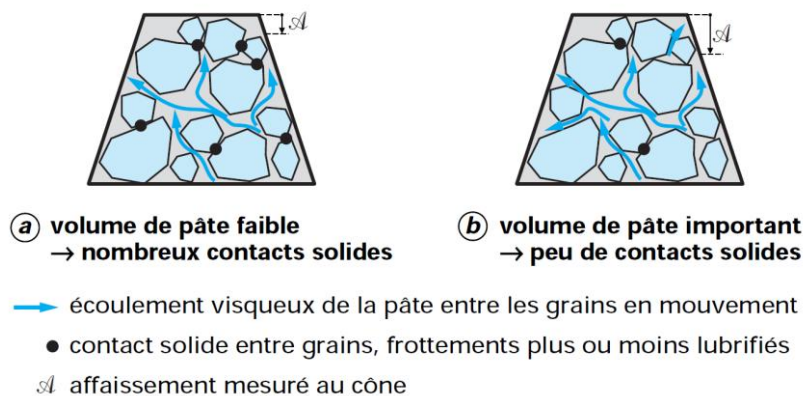


Figure 15. Influence de la quantité de pâte sur l'ouvrabilité mesurée au cône d'Abrams [2]

3.4 Dosage en eau E

Le rapport C/E et le dosage en ciment C fournissent directement le dosage en eau E .

Il faut cependant apporter une correction, fonction de la dimension des plus gros granulats. En effet, si la dimension maximale des granulats diminue, la surface de contact entre les granulats et l'eau augmente, et ces derniers absorberont plus d'eau. Il faut donc corriger le dosage E en fonction de la dimension des granulats (Figure 16, Tableau 5).

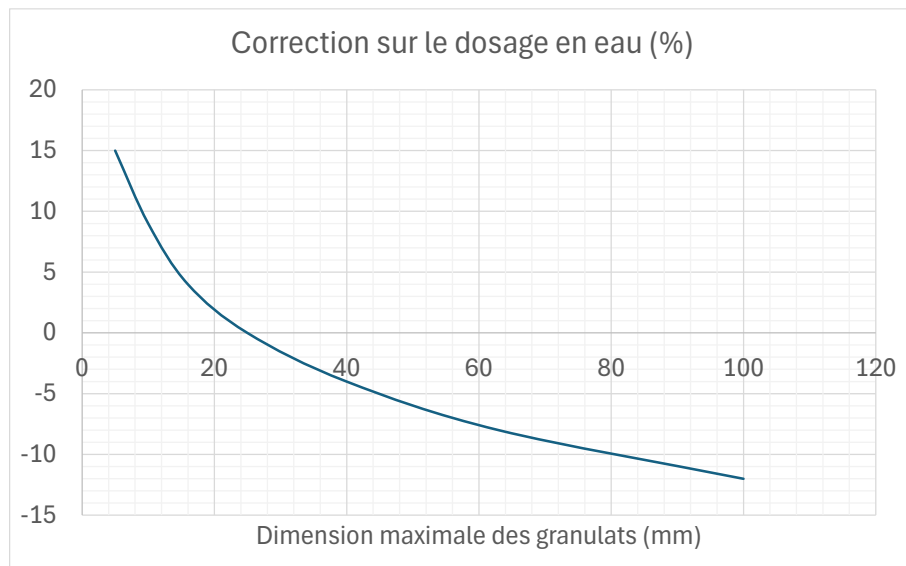


Figure 16. Correction à apporter au dosage en eau en fonction de la dimension maximale des granulats [1, p. 161]

Dimension maximale D des granulats (mm)	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau (en %)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Tableau 5. Exemple de correction sur E, fonction de la dimension maximale D des granulats [1]

3.5 Volumes et masses des granulats (squelette granulaire)

3.5.1 Origine de la méthode proposée

Dreux et son équipe ont tracé, pour tous les bétons qu'ils ont étudiés, les courbes granulométriques du mélange des granulats seuls (sans ciment), car ils connaissaient la proportion de chacun d'eux et leur courbe granulométrique respective. Dans la plupart des cas, la courbe obtenue peut être approchée par deux droites (voir exemple Figure 17).

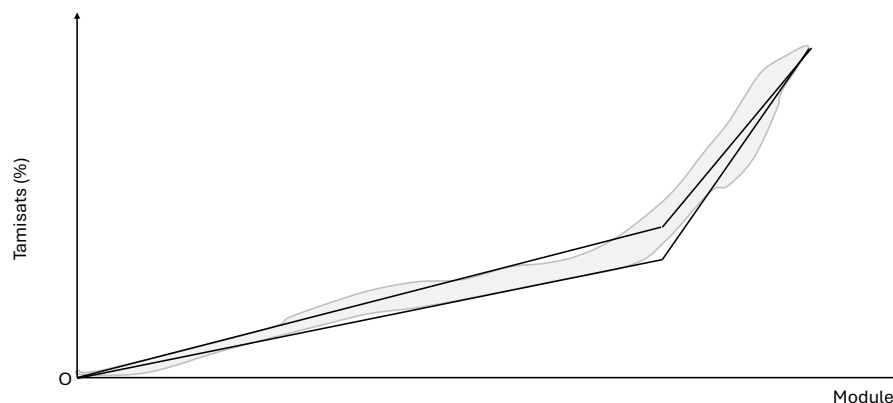


Figure 17. Exemple granulométrique, fuseau enveloppe pour 6 bétons D=100 mm

C'est à partir de cette constatation que Dreux décide d'utiliser ces droites OAB pour définir la composition granulaire de référence. (Figure 18).

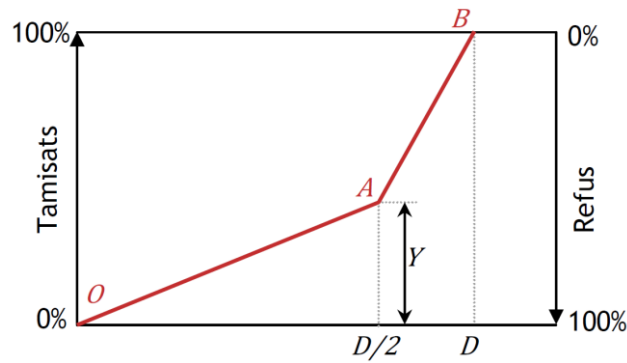


Figure 18. Composition granulaire de référence [1], [11]

Le point O est directement défini, c'est l'origine.

Le point B aura pour coordonnées $(D ; 100\%)$ avec D dimension maximale des granulats.

Une étude plus fine a été nécessaire pour le point A de coordonnées $(X ; Y)$.

Abscisse X

Pour l'abscisse X , Dreux constate que pour $D \leq 25 \text{ mm}$, on a globalement $X = D/2$.

Pour $D > 25 \text{ mm}$, Dreux voit que X augmente avec D et propose

$$\text{Module}(X) = \frac{\text{module}(D) + 38}{2}$$

Ordonnée Y

Dreux présente l'exemple suivant. Il a étudié un béton binaire (béton constitué de deux types de granulats) composé de sable 0/5 mm et de gravier 5/25 mm dosé en ciment 300 kg/m^3 , utilisé pour un tablier en béton armé [1, p. 140]. La masse de sable est de 765 kg et celle de gravier de 1070 kg.

Dreux considère que les granulats ont globalement la même masse volumique, donc, en volume, le pourcentage de sable est

$$\frac{765}{765 + 1070} = 42\%$$

Le pourcentage de gravier est donc de 58%. Dreux considère que le module 38 (diamètre 5mm) est la ligne de partage entre le sable à gauche et le gravier à droite, alors sur la composition granulaire du mélange, à l'abscisse de module 38 l'ordonnée doit être 42%. Par conséquent, sur la composition granulaire du mélange représentée par la droite brisée, 42% des granulats ont un diamètre inférieur à 5 mm. Si on prolonge la droite jusqu'au point de brisure A d'abscisse $D/2=12,5\text{mm}$, on obtient une ordonnée $Y = 48\%$ pour A.

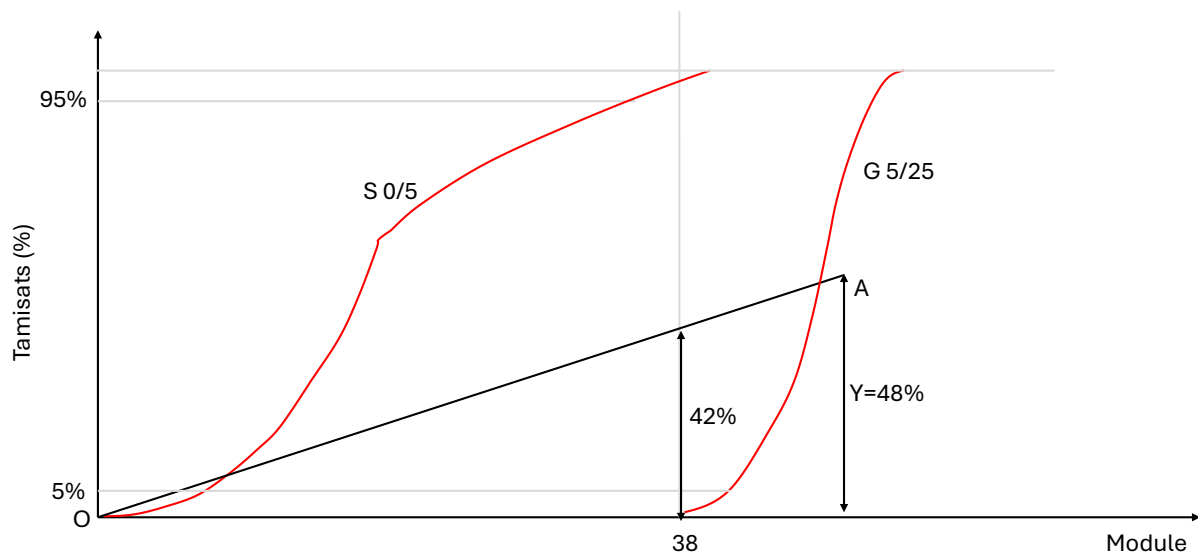


Figure 19. Analyse granulométrique. Béton binaire 0/5 et 5/25 mm [1]

Il reste cependant à définir l'ordonnée Y de A. Pour les 106 bétons de son étude, Dreux a tracé l'ordonnée Y de A en fonction de D (Tableau 6), et constate que l'on peut approcher la courbe obtenue par la formule $Y = 50 - \sqrt{D}$ (Figure 20).

Nombre de bétons étudiés	D (mm)	Y moyen
6	100	40
3	80	40
8	63	45
11	50	46
11	40	44
13	31,5	44
28	25	47
18	20	46
3	16	49
2	12,5	47
3	5	48

Tableau 6. Influence de D sur l'ordonnée Y du point de brisure A

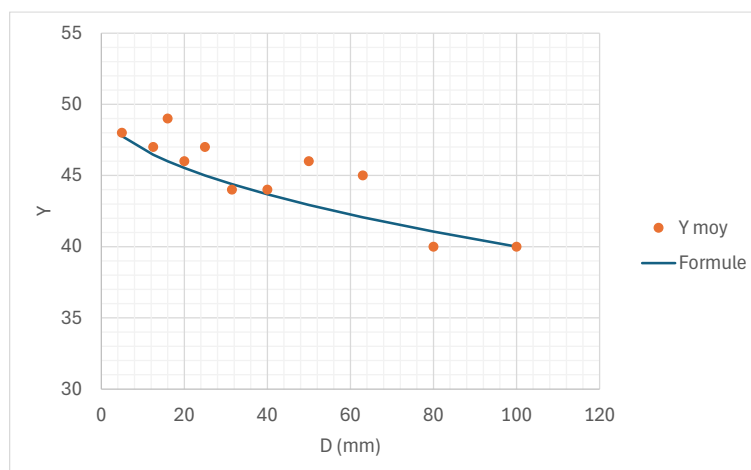


Figure 20. Tracé des données expérimentales, formule $Y = 50 - \sqrt{D}$ [1]

La méthode de Dreux consistera alors à réaliser le raisonnement inverse.

Soit un béton à réaliser avec deux granulats 0/5 et 5/25. On trace la composition OAB, et l'ordonnée du point d'abscisse de module 38 donnera le pourcentage de sable. Cependant les courbes représentatives des granulats ne sont pas toujours très précises entre 95% et 100% et entre 0% et 5%, donc on reliera les points à 95% de sable et à 5% de gravier, et on cherchera le point d'intersection avec la ligne OAB. L'ordonnée de ce point d'intersection donnera le pourcentage de sable. Elle ne correspond pas exactement à 42%, mais la méthode est jugée suffisamment précise.

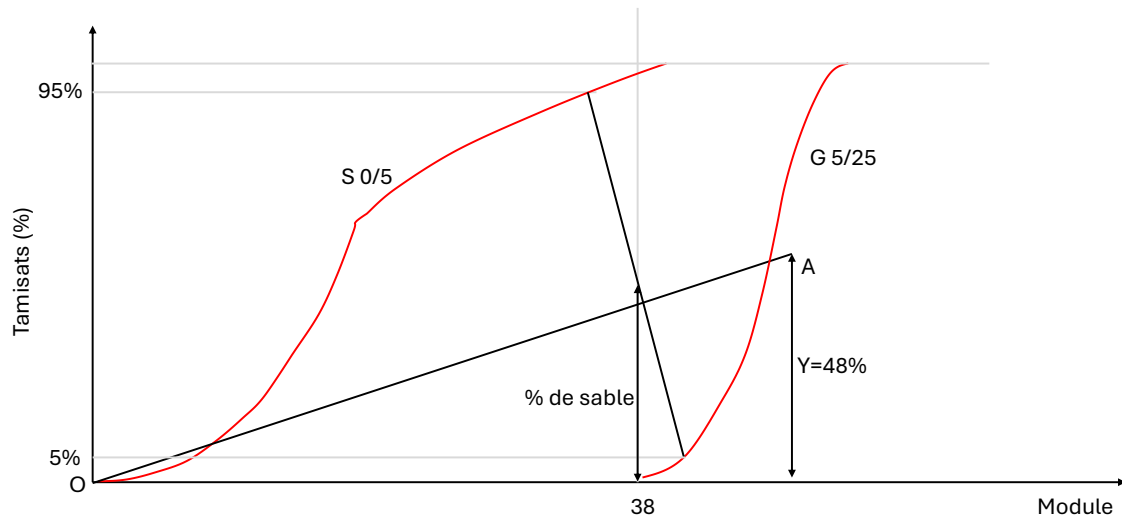


Figure 21. Détermination du pourcentage de sable

3.5.2 Estimation du squelette granulaire : présentation de la méthode

On va maintenant résumer comment déterminer le squelette granulaire, c'est-à-dire la proportion en volume de chaque granulat.

Cas d'un mélange avec deux types de granulats

Le point A a pour coordonnées :

Abcisse X

$$\begin{cases} \text{Si } D \leq 25 \text{ mm}, X = \frac{D}{2} \\ \text{Si } D > 25 \text{ mm}, X = \frac{D - 5}{2} \end{cases}$$

Si l'on raisonne en module,

$$\begin{cases} \text{Si } D \leq 25 \text{ mm}, X = \frac{D_{max}}{2} \\ \text{Si } D > 25 \text{ mm}, \text{Module}(X) = \frac{\text{module}(D_{max}) + 38}{2} \end{cases}$$

Ordonnée Y

On prendra : $Y = 50 - \sqrt{1,25 \cdot D} + K + K_s + K_p$

Avec

- D : diamètre maximal des granulats (en mm)
- K : correction représentant l'influence du dosage en ciment, de la forme des granulats (concassés ou roulés) et de la puissance de serrage (intensité des vibrations).
- K_s : correction dépendant du module de finesse du sable. Si le module de finesse du sable est élevé (sable grossier), cette correction relève le point A, ce qui augmente ou diminue le dosage en sable.

- On prendra $K_s = 6.M_f - 15$ avec M_f module de finesse du sable.
- K_p : correction à apporter si l'on souhaite augmenter l'ouvrabilité du béton pour obtenir un béton dit « pompable ». Cette correction permet d'augmenter la proportion de sable. La valeur de K_p dépendra du degré de plasticité désiré.

Les lignes de partage des composants sont obtenues comme ci-dessous :

On relie le point à 95% de la courbe granulométrique du premier granulat (sable) A' au point à 5% du granulat suivant B'.

Au point de croisement de cette ligne avec la ligne OAB (point O' Figure 22), l'ordonnée correspond au pourcentage g_1 de sable, en masse. Dreux considère que les granulats ont globalement la même masse volumique, donc g_1 est aussi le pourcentage du volume de sable par-rapport au volume absolu de granulats.

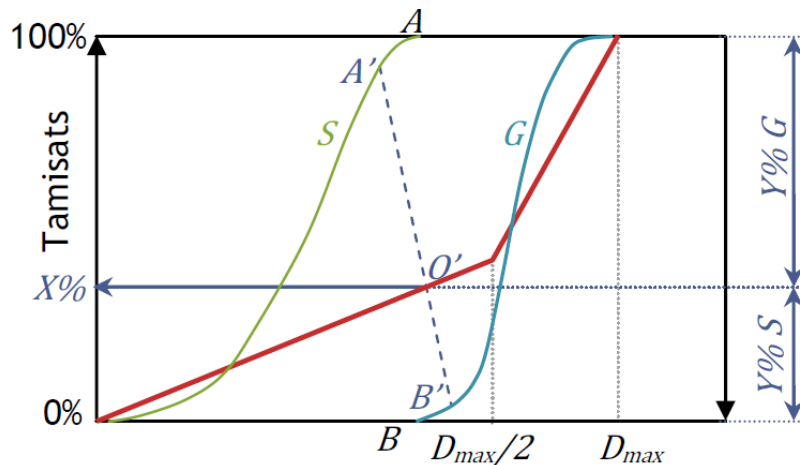


Figure 22. Lignes de partage des granulats et lecture de la proportion optimale de granulats [11]

Le volume absolu de granulat est donné par

$$V_g = 1000 \cdot \gamma - V_c$$

Avec

- γ coefficient de compacité
- V_c volume absolu de ciment en l/m^3 de béton ; $V_c = C/\rho_{ciment}$; C dosage en ciment et ρ_{ciment} masse volumique du ciment. (on admet généralement $\rho_{ciment} = 3,1 \text{ kg/l}$)

Sur la base de résultats expérimentaux, Dreux propose le tableau ci-dessous pour l'estimation de γ .

Consistance	serrage	Coefficient de compacité γ						
		$D_{max}=5$	$D_{max}=10$	$D_{max}=12,5$	$D_{max}=20$	$D_{max}=31,5$	$D_{max}=50$	$D_{max}=80$
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,780	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Tableau 7. Estimation du coefficient de compacité γ [1], [11]

Les volumes absolus de chaque granulat sont alors donnés par

$$V_i = g_i \cdot V$$

$$V_2 = g_2 \cdot V$$

Les masses des granulats sont ensuite données par

$$m_i = V_i \cdot \rho_i$$

Avec ρ_i masse volumique du granulat i (sable, gravier.....etc.).

Cas d'un mélange avec trois types de granulats

S'il y a trois types de granulats, on répète l'opération comme sur la figure ci-dessous.

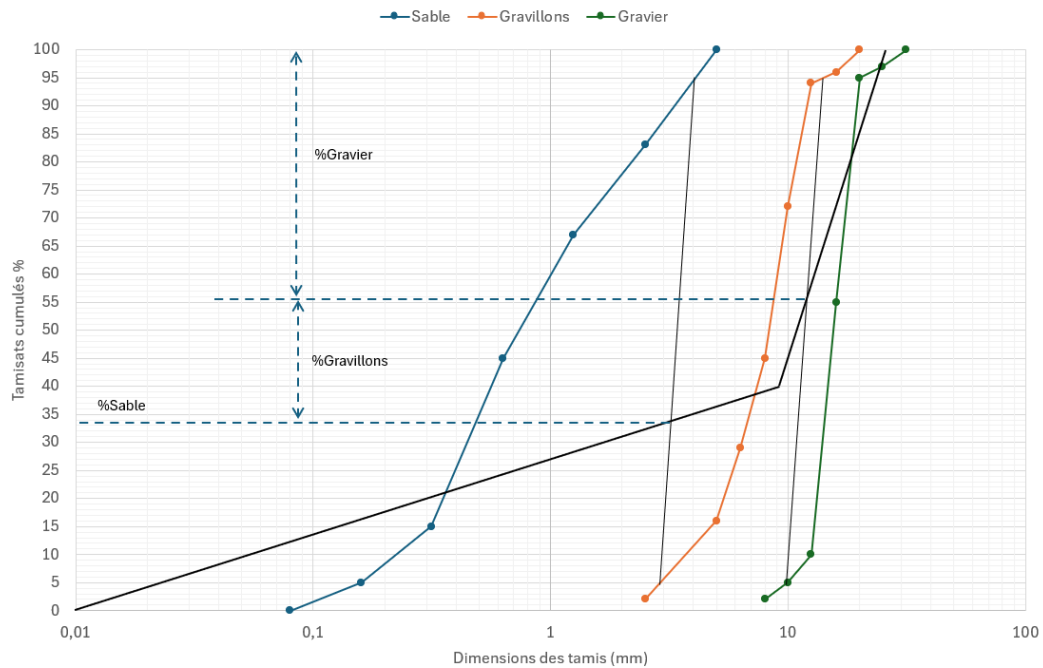


Figure 23. Cas d'un mélange avec trois types de granulats

4 Désignation des bétons

Elle obéit à la norme NF EN 206-1 [5]. On donne un exemple ci-dessous [12] :

BPS NF EN 206-1 XC1 (F) C20/25 Dmax 22,4 S3 Cl 0,40

BPS : béton à propriétés spécifiques

NF EN 206-1 : référence à la norme

XC1 : classes d'exposition (F) : France

- X0 : aucun risque de corrosion ni d'attaque (par exemple intérieur d'un bâtiment, air faiblement humide)
 - XC 1 à 4 : corrosion par carbonatation
 - XF 1 à 4 : attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage
 - XS 1 à 3 : corrosion par les ions chlorure (eau de mer). Structures marines ou proches de la mer
 - XD 1 à 3 : corrosion par les ions chlorure autres que l'eau de mer (exemple : sels de déglacage)
 - XA 1 à 3 : attaque chimique
-

C20/25 : résistance caractéristique à la compression à 28 jours (20 : testée sur cylindre ; 25 : testée sur cube)

Dmax 22,4 : dimension maximale des granulats en mm

S3 : consistance, affaissement au cône d'Abrams en mm

- S1 : 10 à 40
 - S2 : 50 à 90
 - S3 : 100 à 150
 - S4 : 160 à 210
 - S5 $\geq$ 220
-

Cl 0,40 : teneur maximale (en %) en ions chlorure rapportée à la masse de liant. La teneur maximale est fixée par la norme NF EN 206 [5]. On a :

- Béton ne contenant ni armatures en acier, ni pièces métalliques noyées Cl 1,00
 - Béton contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées Cl 0,10 à 0,40
 - Béton contenant des armatures précontrainte en acier en contact direct avec le béton Cl 0,10 à 0,20
-

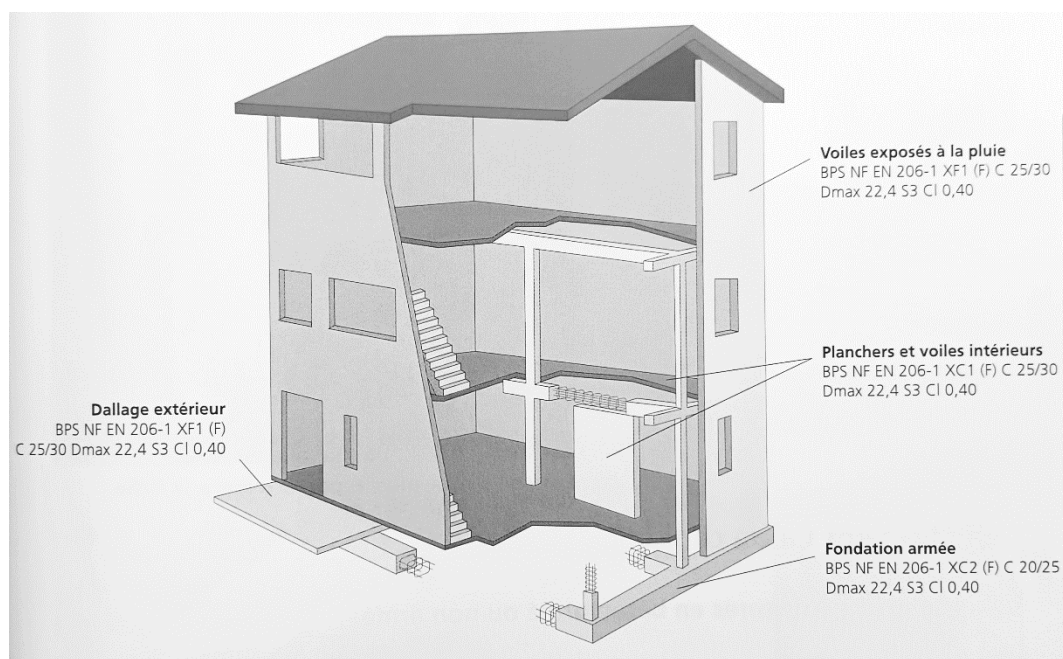


Figure 24. Classes d'exposition dans le bâtiment. Exemples. [12]

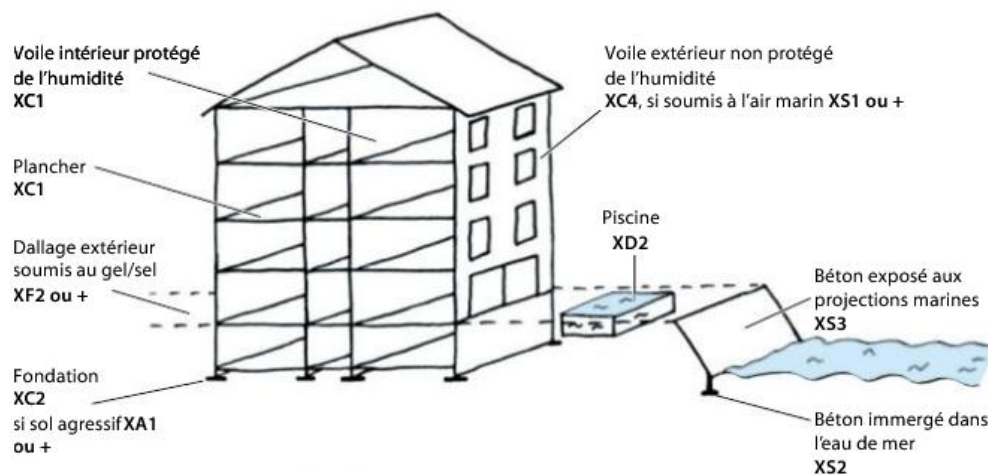


Figure 25. Classes d'exposition dans le bâtiment. Exemples [3]

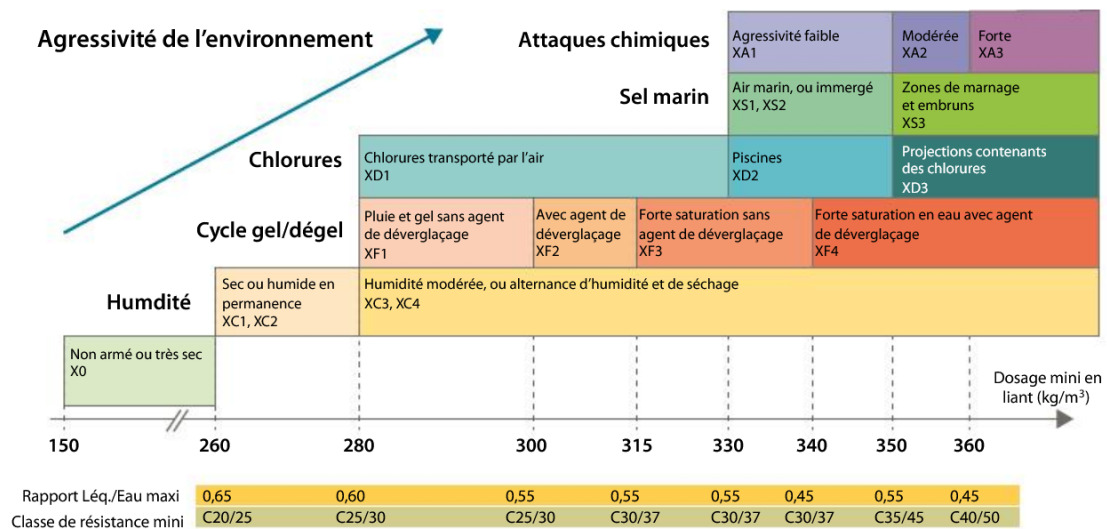


Fig. 23 – Dosage minimal en liant équivalent croissant en fonction de l'agressivité de l'environnement du béton, d'après la norme NF EN 206/CN. Par exemple, pour assurer la durabilité du béton armé de piscines, le dosage minimal en liant doit être supérieur à 330 kg/m^3 , le dosage en eau inférieur à $330 \times 0,55 = 181,5 \text{ l/m}^3$ et la résistance caractéristique du béton supérieure à 30 MPa mesurée sur éprouvette cylindrique.

Figure 26. Lien dosage E/C, résistance, classe d'exposition [3, p. 50]

Références bibliographiques

- [1] G. Dreux et J. Festa, *Nouveau guide du béton: composants et propriétés, composition et dosage, fabrication, transport et mise en oeuvre, contrôle et normalisation*, 7e éd. 1995 rev. et Augm. Paris: Eyrolles, 1995.
- [2] Bernier, « C2210 v2 Formulation des bétons », *Techniques de l'Ingénieur*, mai 2004, [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr>
- [3] F. Dubois, *Béton écologique et construction durable ; l'essentiel à savoir pour réussir la transition*. S.l.: EYROLLES, 2023.
- [4] *NF EN 12350-2 | Juin 2019 Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement*, 2019.
- [5] *NF EN 206-1 Béton - Partie 1 : spécification, performances, production et conformité*, 2026.
- [6] *NF EN 197-1 Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*.
- [7] *NF EN 196-1 méthodes d'essais des ciments, Partie 1 détermination des résistances*, 2016.
- [8] R. Idir et M. CYR, « Vers une diversification des liants et additions dans les bétons : enjeux et implications normatives », *Academic Journal of Civil Engineering*, p. 1-11 Pages, janv. 2026, doi: 10.26168/AJCE.43.5.1.
- [9] J.-P. OLLIVIER, *Propriétés Physiques du Béton et de Ses Constituants*, 1st ed. in Génie Civil Series. Montrouge: Hermes science publications, 2012.
- [10] *NF EN 933-1 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage*, 2012.
- [11] HORSIN MOLINARO et JOURDAIN, « Formulation d'un béton ordinaire ». 2018. [En ligne]. Disponible sur: Eduscol
- [12] CALCIA, « Catalogue des Ciments Calcia - le guide 2005-2006 ». 2005.
- [13] *NF EN 933-1 | Mai 2012 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage*, 2012.

Pour aller plus loin

<https://journal.augc.asso.fr/index.php/ajce/article/view/5463>

<https://journal.augc.asso.fr/index.php/ajce/article/view/5491>

Glossaire

Béton apparent : béton dont la peau n'est revêtue d'aucun parement qui viserait à occulter son aspect

Béton acidé : béton dont la peau a subi, après durcissement, un traitement chimique par application d'une solution acide, afin de modifier son aspect de surface (lisse à légèrement granuleux).

Béton autoplaçant BAP (béton autocompactant, autonivelant BAN) : béton qui s'écoule et se compacte par seul effet gravitaire, capable de remplir le coffrage avec son ferrailage, ses gaines, réservations, etc., tout en conservant son homogénéité [5]

Béton banché : béton coulé puis vibré entre deux banches de coffrage

Béton de chantier : béton produit sur le chantier de construction par l'utilisateur du béton

Banche : élément de coffrage, généralement vertical, utilisé pour réaliser des murs, voiles, refends, éventuellement des poteaux.

Béton haute performance BHP : béton qui de par sa formulation présente une résistance mécanique et une durabilité très supérieure aux bétons courants

Béton blanc : béton de teinture claire dont le liant est du ciment blanc

Béton bouchardé : béton dont la peau a subi, après durcissement, un traitement de surface mécanique par martelage à l'aide d'une boucharde (outil à pointes). Cela augmente la rugosité pour une surface antidérapante et esthétique (terrasses, allées, entrées de maisons), ainsi qu'une meilleure résistance mécanique en surface.

Béton brossé : béton dont la peau a subi, avant durcissement, un traitement mécanique par passage d'une brosse métallique dégageant les granulats. Il donne une surface antidérapante pour les sols extérieurs, allées...

Béton désactivé : béton frais sur lequel on a appliqué un produit pour retarder sa prise en surface et mettre à nu, en surface, les granulats, par lavage à l'eau et brossage

Béton étuvé : béton dont la prise et le durcissement ont été accélérés par chauffage dans une ambiance humide. Ce procédé permet de réduire les délais de décoffrage.

Béton frais : béton après malaxage et avant la prise. Il est dans un état plastique qui permet son transport et sa mise en œuvre.

Béton pompable : béton que l'on pourra transporter par pompage, par un circuit de tuyaux. Intérêt: rendement et absence de grue

https://betonlabpro.ifttar.fr/fileadmin/contributeurs/BetonlabPro/formation/betonlabpro3/leconpro_13.pdf

Béton prêt à l'emploi (BPE) : béton frais préparé dans une centrale à béton et livré sur chantier en camions toupies

Calcaire : nom général des roches sédimentaires contenant du carbonate de calcium $CaCO_3$

Coffrage : moule dans lequel est coulé le béton, retiré après prise et durcissement du béton

Compactage : opération de tassement mécanique du béton (généralement par vibration) pour éliminer les vides présents dans le mélange et donc augmenter sa compacité

Dessiccation : évaporation de l'eau contenue dans un béton. Si la dessiccation se produit vite, elle peut perturber la prise et le durcissement

Gâchée : quantité de béton frais obtenue après une seule opération de malaxage

Gypse : roche sédimentaire composée de sulfate de calcium

Hydratation : phénomène chimique par lequel un ciment fixe l'eau de gâchage et enclenche les processus de prise et de durcissement. C'est une réaction exothermique.

Liant : ciment, ou combinaison de ciments, ou combinaison de ciment(s) et d'addition(s)

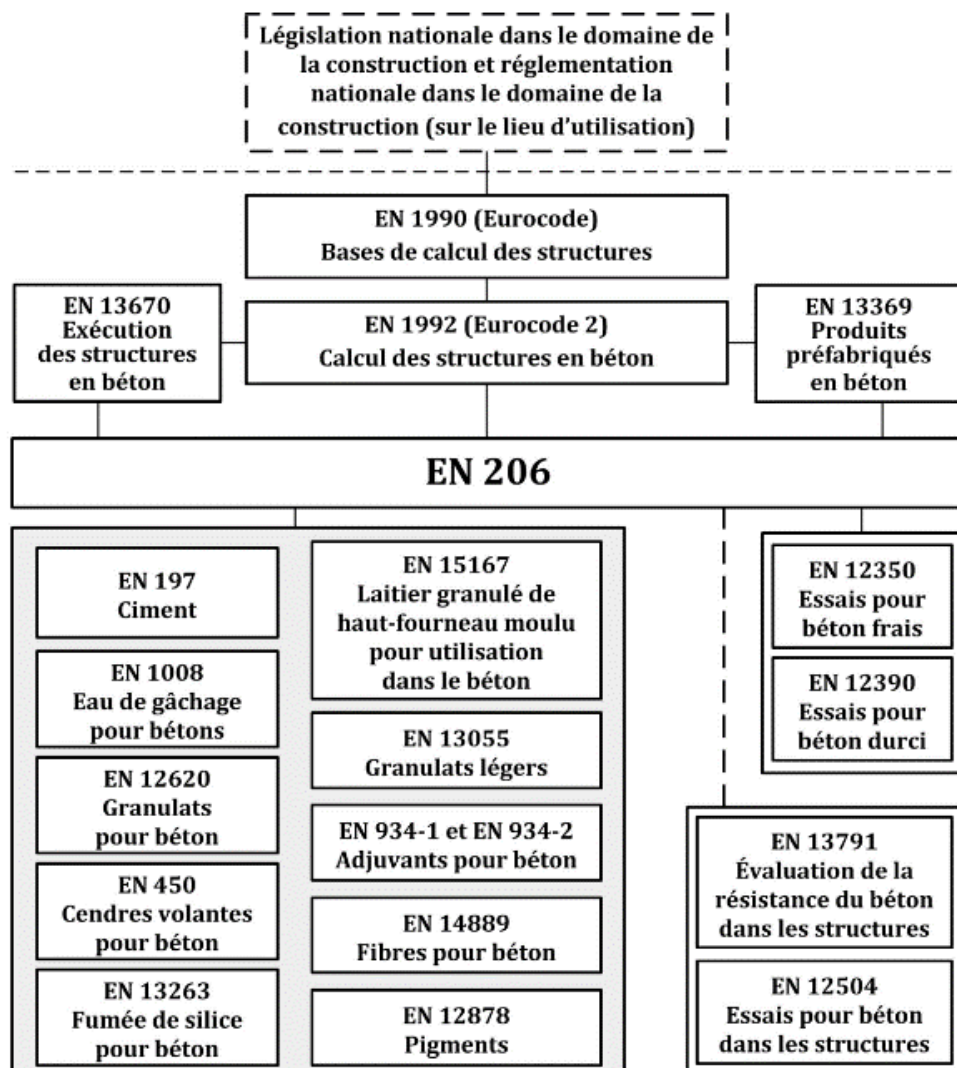
Retrait : contraction du béton au moment de sa prise, due à l'évaporation ou à l'absorption de l'eau de gâchage.

Joint de retrait : joint permettant de reprendre le retrait lié à la prise du béton en concentrant la fissuration du béton sur cette ligne de faiblesse structurelle

Malaxage : opération de mélange des constituants du béton

Mortier : mélange d'eau, de sable et de liant (ciment)

Annexe : un aperçu général de quelques normes



[5]