

LEUVREY Jean-Pascal
Elève Ingénieur de 5^{ème} année INSA Strasbourg
GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDES

La nouvelle norme des bétons NF EN 206-1
Application pratique sur un chantier de bâtiment

Enseignant superviseur : M. Feugeas,
Tuteur de PFE : M. Basso, Ingénieur Travaux, Demathieu et Bard



JUIN 2006



SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
I. La nouvelle norme NF EN 206-1	9
I.1 - Incidence de la norme sur les BPE (Bétons Prêts à l'Emploi)	9
a. La clarification des responsabilités des différents intervenants :	9
b. Types de béton	10
c. Classes d'exposition	10
c.1) Classe d'exposition en fonction du type d'ouvrage.....	12
c.1.1) Fondations	12
c.1.2) Voiles et planchers intérieurs.....	13
c.1.3) Dalle de parking.....	13
c.1.4) Voiles extérieurs bruts de décoffrage	13
c.2) Synthèse	14
d. Résistance caractéristique en compression à 28 jours	14
e. Classes de résistance à la compression.....	14
f. Classes de consistance	15
g. Dimension des granulats	16
h. Classes de chlorures	17
i. Contrôles.....	18
i.1) Contrôles de production	18
i.2) Contrôles en cours de travaux.....	18
I.2 - Incidence de la norme sur les bétons de chantier	19
I.3 - Cas pratique : chantier de la DRDE	21
a. Présentation succincte du chantier	21
b. Mise en pratique de la norme sur le chantier de la DRDE	22
b.1) Classe d'exposition suivant la partie d'ouvrage.....	22
b.2) Contrôles réalisés sur le chantier.....	22
II. Critères de choix entre BPE et bétons faits par une centrale sur chantier	23
II.1 - Formulation de bétons faits sur chantier en fonction de la partie d'ouvrage concernée.....	24
a. Méthodes de formulation	24
a.1) Résistance souhaitée	24
a.2) Dosage en ciment	24
a.3) Dosage en eau.....	26
a.4) Dosage des granulats	26
a.5) Coefficient de compacité	27
a.6) Dosage des granulats	28
b. Parties d'ouvrage	28
b.1) Fondations	28
b.1.1) Dosage en ciment.....	28
b.1.2) Dosage en eau	29
b.1.3) Dosage des granulats.....	29

b.2) Remplissage des prémurs.....	30
b.2.1) Formulation d'un béton pour le remplissage de prémurs dans des conditions climatiques normales.....	30
b.2.1.1 Dosage en ciment	30
b.2.1.2 Dosage en eau.....	30
b.2.1.3 Dosage des granulats	30
b.2.2) Formulation d'un béton pour le remplissage de prémurs en hiver	31
b.2.2.1 Dosage en ciment	31
b.2.2.2 Dosage en eau.....	32
b.2.2.3 Dosage des granulats	32
b.3) Poutres, poteaux, murs	33
b.3.1) Formulation d'un béton pour les poutres tradi, poteaux, murs extérieurs comme intérieurs	33
b.3.1.1 Dosage en ciment	33
b.3.1.2 Dosage en eau.....	33
b.3.1.3 Dosage des granulats	33
b.3.2) Formulation d'un béton pour les poutres tradi, poteaux, murs extérieurs comme intérieurs en hiver	34
b.3.2.1 Dosage en ciment	34
b.3.2.2 Dosage en eau.....	35
b.3.2.3 Dosage des granulats	35
c. Synthèse	36
II.2 - Coût des bétons	37
a. Coûts des bétons provenant d'une centrale à béton.....	37
b. Coût des bétons faits par une centrale à béton sur chantier.....	37
b.1) Prix des constituants	37
b.1.1) Granulats.....	38
b.1.2) Ciment	38
b.2) Prix de la centrale à béton.....	38
b.3) Coût électrique	39
b.4) Synthèse des consultations.....	39
II.3 - Synthèse des prix.....	45
II.4 - Critères de choix BPE et bétons faits sur chantier	45
II.5 - Evaluation des solutions.....	47
II.6 - Grille multicritères.....	48
II.7 - Analyse de cette grille multicritères	49

III. Etude spécifique : critères de choix entre voile banché coulé en place et voile préfa prémur	51
III.1 - Les enjeux.....	51
III.2 - Description sommaire de chacune des 2 techniques	51
a. Voile banché coulé en place	51
b. Voile préfa prémur	53
b.1) Définition	53
b.2) Mise en œuvre	54

III.3 - Avantages et inconvénients de chaque méthode	56
III.4 - Critères de choix	59
a. Liste des critères.....	59
III.5 - Grille multicritères.....	60
III.6 - Synthèse	61
CONCLUSION.....	62
ANNEXE : la norme NF en 206-1	

Table des figures

Figure 1 - carte des zones de gel définies par la norme NF EN 206-1	11
Figure 2 - Organigramme du choix de la classe d'environnement pour les fondations	12
Figure 3 - Schéma de synthèse des classes d'exposition	14
Figure 4 – Classes de résistance minimale en fonction de la classe d'environnement	15
Figure 5 – Classes de consistance (au cône d'Abrams)	16
Figure 6 - Dimensions des tamis pour la spécification des classes granulaires	17
Figure 7 – Classes de chlorure	17
Figure 8 – Contrôles de production des BPS	18
Figure 9 – Critères pour une bonne ouvrabilité et une bonne résistance des bétons	23
Figure 10 - Valeurs approximatives du coefficient granulaire G	25
Figure 11 - Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'affaissement	25
Figure 12 - Correction sur le dosage en eau	26
Figure 13 - Terme correcteur K	27
Figure 14 - Coefficient de compacité	27
Figure 15 - Eléments constitutifs d'une banche	52
Figure 16 - Schéma d'un prémur	54
Figure 17 – Pose et stabilité d'un prémuur	55
Figure 18 – Coffrage de rive des voiles coulés en place	57
Figure 19 – Coffrage de rive des voiles coulés en place	57
Figure 20 – Prix de revient prémur/voile coulé en place	58

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier M. Balliet, directeur de l'agence Bâtiment Est, à Duppigheim, de m'avoir intégré au sein de son agence et de m'avoir placé sur un chantier aussi important que le chantier des DRDE et de m'avoir proposé un sujet de PFE très intéressant qui m'a permis d'être autonome.

Je remercie mon tuteur de PFE M Basso, Ingénieur travaux, pour m'avoir toujours très bien encadré tout au long de mon PFE et de m'avoir toujours donné de très bons conseils dans le déroulement de mes démarches. Je remercie également M. Schwab, conducteur de travaux, d'avoir toujours été à mon écoute et d'avoir pris le temps de répondre à mes questions.

Je remercie les chefs de chantier, M. Heili et M. Rodriguez ainsi que tous les compagnons pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur sympathie.

Je tiens également à remercier Mme. Feugeas, enseignante responsable de mon projet, pour avoir répondu à toutes mes questions très rapidement et d'avoir encadré de façon très régulière mon travail.

INTRODUCTION

Au courant de l'année 2004, la norme NF EN 206-1 a été publiée en France afin de remplacer l'ancienne norme expérimentale XP P 18-305, concernant la fabrication des bétons de structure. Cette norme a entraîné des modifications au niveau des critères de résistance, des contrôles à effectuer, des classes d'environnement des bétons.

En ce qui concerne les bétons de structure, 3 types de production de produits béton existent : les BPE (Bétons Prêts à l'Emploi faits par les centrales à bétons), les bétons faits par une centrale sur chantier et enfin les éléments en béton préfabriqués.

Suite à l'application de cette norme, l'entreprise Demathieu et Bard pour sa filiale bâtiment est intéressée de savoir quelles incidences cette norme va entraîner sur la fabrication de ces trois types de bétons, notamment en terme de compétences, de matériel, de produit, de contrôles, de résistance.

Ainsi l'étude qui m'a été demandée est tout d'abord de relever les incidences impliquées par l'application de cette norme en ce qui concerne les bétons BPE, les bétons faits sur chantier et les bétons préfabriqués.

Dans une première partie, je me suis tout d'abord procuré les deux textes relatifs à l'ancienne norme XP P 18 305 et à la nouvelle norme NFEN 206-1. Dans le cadre de mes études, j'ai eu l'opportunité d'acquérir certaines notions vis-à-vis de la norme XP P 18-305. Je me suis donc intéressé aux modifications ou évolutions qu'apportaient la norme NF EN 206-1 par rapport à la précédente norme XP P 18-305. J'ai donc réalisé l'inventaire des critères fondamentaux qui ont changé notamment en ce qui concerne les BPE (Bétons Prêts à l'Emploi), les bétons faits par une centrale sur chantier et les produits béton manufacturés.

Au-delà de l'aspect théorique des textes normatifs, je me suis demandé quels impacts pratiques cette norme a pu avoir sur les différentes entreprises au sens large. J'ai donc voulu savoir si cette norme avait provoqué un grand bouleversement dans le monde du BTP ou non. (Centrales à bétons, entreprises de BTP, bureaux de contrôles, maîtrise d'ouvrage). Je me suis procuré les réponses à mes diverses questions en prenant contact avec les acteurs de ces entreprises ou de ces organismes.

Grâce au chantier de la DRDE où j'ai réalisé mon PFE, j'ai pu vivre concrètement l'application pratique de cette nouvelle norme, NF EN 206-1.

Dans le cadre de mon étude sur la nouvelle norme des bétons, il m'a été demandé de mettre en évidence les critères de choix entre la technique BPE et la méthode du béton fait par une centrale sur chantier. Ainsi afin de pouvoir comparer notamment ces deux techniques en termes de prix, j'ai proposé des formulations de bétons qui pourront être exploités sur des chantiers courants de bâtiment. M'étant documenté sur la méthode de formulation des bétons, je me suis aperçu que la méthode de Dreux Gorisse apparaît être la méthode la plus pratique et est basée sur des résultats expérimentaux. Ainsi cette méthode permet d'aboutir à des résultats cohérents et exploitables.

Connaissant la composition de ces bétons, j'ai réalisé des consultations auprès d'entreprises de ciment, de granulats et de matériel de chantier afin d'évaluer le prix de revient de ces bétons et de les comparer au coût d'un BPE livré sur chantier. Afin de comparer ce qui est comparable, je suis parti sur la base d'un chantier de bâtiment de 5000 m³ de béton.

Outre le critère financier, j'ai listé l'ensemble des paramètres et des critères qui influent sur le choix du BPE ou la technique des bétons faits sur chantier. Afin de faciliter le choix, j'ai réalisé une grille multi-critères permettant de mettre en évidence quelle méthode est la plus appropriée selon les conditions.

Dans la continuité de mon étude sur le matériau béton, une étude spécifique m'a été confiée sur la réalisation des voiles. En effet, il m'a été demandé de faire une étude sur les critères de choix entre les solutions voile banché coulé en place et voile préfa type prémur. Ma présence sur le chantier de la DRDE m'a permis de bien comprendre la technique et les enjeux du prémur étant donné que cette solution a été retenue pour l'ensemble du bâtiment.

I. La nouvelle norme NF EN 206-1

La norme NF EN 206-1 s'applique aux bétons de structure qu'ils soient des bétons prêts à l'emploi ou des bétons réalisés sur chantier par l'utilisateur du béton, destinés aux bâtiments et aux ouvrages de génie civil.

Pour les bétons utilisés dans les produits structurels préfabriqués en usine et couverts par une norme, les conditions particulières d'application sont définies dans la norme NF EN 13369.

Cette norme ne s'applique pas aux bétons qui ne sont pas structuraux (béton de remplissage, béton de calage pour les bordures de trottoir, béton de propreté...) ainsi qu'à des bétons spéciaux tels que les bétons aérés, les bétons mousses, les bétons caverneux, les bétons réfractaires, les bétons réalisés avec des granulats non minéraux ou les bétons de masse volumique inférieure à 800kg/m^3 .

I.1 - Incidence de la norme sur les BPE (Bétons Prêts à l'Emploi)

Pour le BPE, la norme NF EN 206-1 remplace la norme expérimentale XP P18-305 parue en août 1996. Elle annule et remplace les champs traités du matériau béton de l'ancien DTU 21 (norme NF P 18-201) qui a été révisé du fait de l'obligation de mise en conformité avec la norme NF EN 206-1.

Pour les BPE, la norme NF EN 206-1 présente des évolutions par rapport à la norme XP P 18-305 mais n'introduit pas de nouveautés fondamentales.

Les évolutions apportées par cette norme sont :

a. La clarification des responsabilités des différents intervenants :

Le prescripteur est responsable de la spécification du béton, c'est à dire qu'il doit s'assurer de prendre bien en compte tous les paramètres nécessaires pour définir le type de béton à utiliser. A partir du cahier des charges, il formule la spécification du béton et la fournit au producteur. En ce qui concerne le BPE, l'acheteur du béton frais est le prescripteur. (Notion de client prescripteur).

Le producteur est responsable de la conformité du béton livré avec les spécifications indiqués par l'acheteur et du contrôle de production. Ainsi avant la mise en vente d'une formule il doit s'assurer de la validité d'une formule et du respect des critères initiaux.

L'utilisateur est responsable de la mise en place du béton dans la structure

b. Types de béton

Conservation des notions de béton à la résistance et de béton à la composition.

Béton à Caractères Normalisés (**BCN**) → Béton à Propriété Spécifiée (**BPS**)
Béton à Caractères Spécifiés (**BCS**) → Béton à Composition Prescrite (**BCP**)

Les BPS sont les produits principalement commercialisés par le BPE.

c. Classes d'exposition

11 classes d'environnement de la norme XP P 18-305



18 classes d'exposition pour la norme NF EN 206-1

Les appellations Non-armé, Armé et précontraint de la XP P 18-305 sont abandonnées car le type d'armatures est implicite dans les classes d'exposition.

Si l'on regarde de près les classes d'exposition, on peut s'apercevoir qu'elles tiennent en compte de la situation du béton (intérieur, extérieur) et des agressions auxquelles il risque d'être soumis.

La prise en compte des environnements climatiques (secs, humides) et des environnements agressifs (marins ou chimiques) permet d'obtenir des bétons adaptés à l'ouvrage et donc d'accroître sa durabilité.

Le choix de cette classe d'exposition est important pour la durabilité du béton. Ainsi le client prescripteur est responsable de la détermination de la classe d'exposition en fonction des paramètres liés chantier.

En France les classes d'exposition à prendre en compte sont les suivantes :

X0 : aucun risque de corrosion ni d'attaque : elle ne peut concerner que les bétons protégés non armés ou faiblement armés avec un enrobage d'au moins 5 cm (milieu très sec)

XC1/XC2 : béton armé, risque de corrosion par carbonatation (Bétons protégés et environnement sec ou humide en permanence)

XF1 à XF4 : attaques dues à des cycles gel/dégel sur des bétons mouillés (bétons extérieurs non protégés)

XF1 zone de gel faible ou modéré sans agent de déverglaçage

XF2 zone de gel faible ou modéré avec agent de déverglaçage

XF3 zone de gel sévère sans agent de déverglaçage

XF4 zone de gel sévère avec agent de déverglaçage

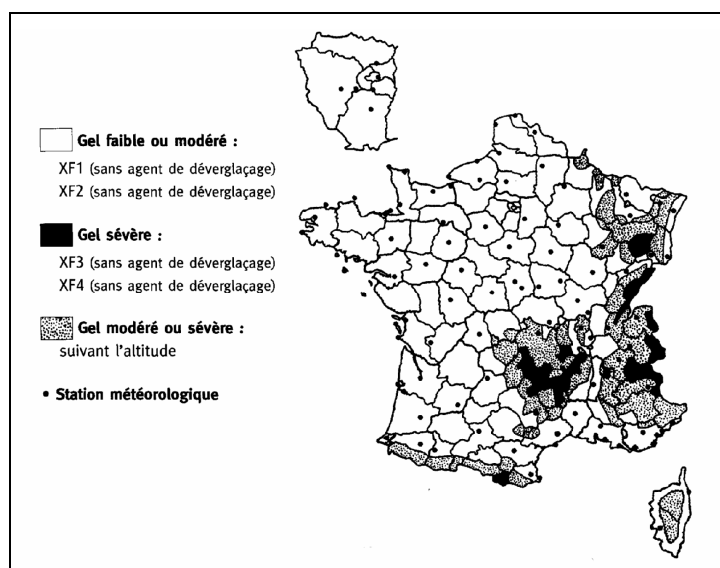


Figure 1 - carte des zones de gel définies par la norme NF EN 206-1

XS1/XS2 : corrosion induite par des chlorures présents dans l'eau de mer

XS1 le béton est exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais n'est pas en contact directement avec l'eau de mer. Cette sous-classe s'applique aux structures situées à moins de 1 kilomètre de la côte.

XS2 le béton est immergé en permanence.

XS3 le béton est situé en zone de marnage ou en zone soumise à des projections ou à des embruns

XD2/XD3 : corrosion induite par des chlorures ayant une origine autre marine (sels divers)

XD2 humide, rarement sec

XD3 alternance d'humidité et de séchage

XA1 à XA3 : attaques chimiques se produisant avec des eaux de surface ou souterraines, et des sols contenant des substances agressives

XA1 environnement à faible agressivité chimique

XA2 environnement d'agressivité chimique modérée

XA3 environnement à forte agressivité chimique

c. 1) Classe d'exposition en fonction du type d'ouvrage

Dans le cadre de mon étude, je précise ci-après la classe d'exposition à prendre en compte dans le cas d'ouvrage en situation courante.

c. 1. 1) Fondations

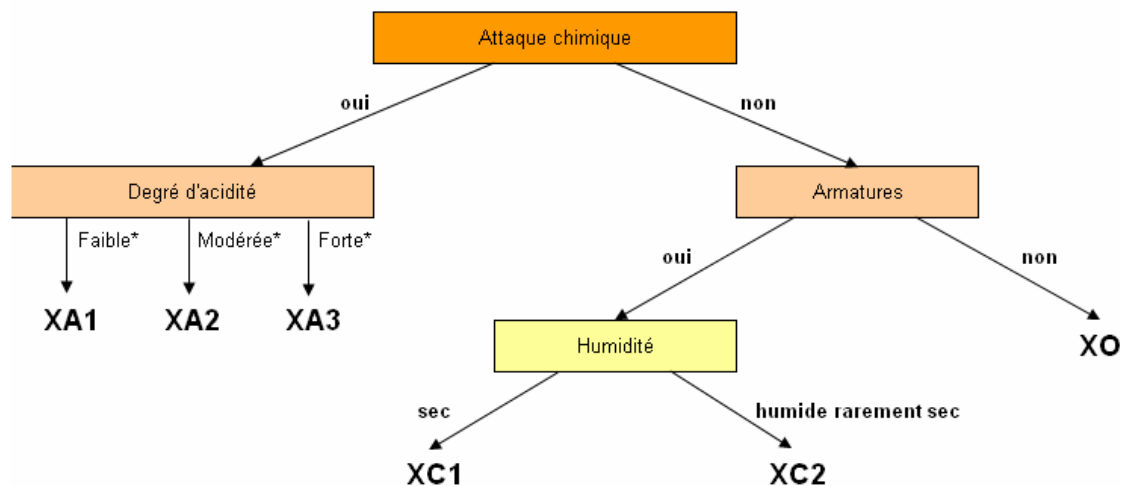


Figure 2 - Organigramme du choix de la classe d'environnement pour les fondations

Cf norme NF EN 206-1 : valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux attaques chimiques des sols naturels et eaux souterraines

c.1.2) Voiles et planchers intérieurs

Ces parties de bâtiments sont à l'abri de la pluie, que ces bâtiments soient clos ou non, la corrosion sera alors induite par carbonatation et donc la classe d'exposition sera **XC1**.

Pour les parties exposées à des condensations importantes à la fois par la fréquence et la durée, comme par exemple les buanderies, il sera nécessaire de passer en classe **XC3**.

c.1.3) Dalle de parking

Pour les parcs de stationnement des véhicules, les parties supérieures des dalles et rampes exposées directement au sel et ne comportant pas de revêtement pouvant assurer la protection du béton peuvent être considérées en **XD3**.

c.1.4) Voiles extérieurs bruts de décoffrage

- *Voile non protégé de l'humidité*

Les classes d'exposition concernant ces parties d'ouvrage peuvent être les classes XC2, XC3 ou les classes d'exposition XF.

Mais étant donné que les classes d'exposition XF priment sur les classes XC, il est donc nécessaire de choisir une classe XF pour les voiles extérieurs.

Afin de déterminer la classe d'exposition XF nécessaire suivant les conditions environnementales, il est indispensable d'utiliser la carte des zones de gel extraite de l'annexe Nationale Française de l'EN 206-1.

- *Voile protégé de l'humidité*

Lorsque les voiles sont protégés de l'humidité, on peut considérer une classe d'exposition **XC1**.

c.2) Synthèse

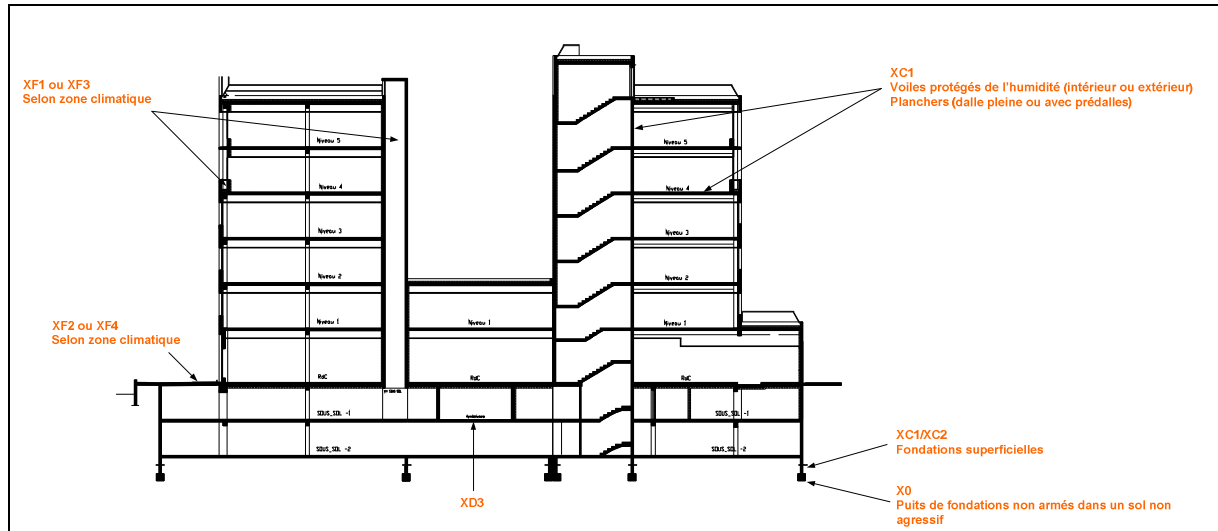


Figure 3 - Schéma de synthèse des classes d'exposition

d. Résistance caractéristique en compression à 28 jours

Norme XP P 18-305 :

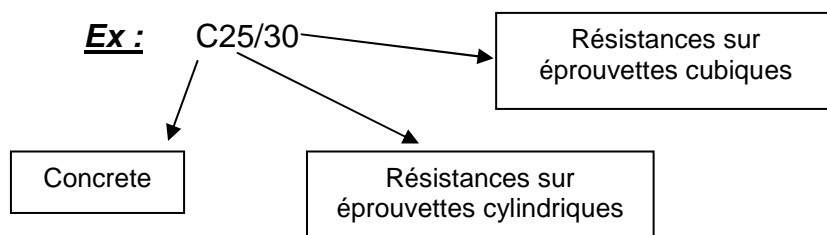
10% de résultats en dessous de la résistance caractéristique spécifiée jusqu'à 30 MPa
5% au dessus de 30 MPa (pour un nombre infini de prélèvements)

Norme NF EN 206-1 :

Résistance caractéristique définie avec une différence de 5% quelle que soit la résistance

e. Classes de résistance à la compression

Les désignations B25, B30 deviennent C25/30, C30/35...



La nouvelle norme des bétons: application sur un chantier de bâtiment

On peut s'apercevoir qu'il subsiste une différence d'environ 5 MPa entre les résistances obtenues sur éprouvettes cylindriques et sur éprouvettes cubiques.

Bien qu'en France, les essais sont généralement réalisés sur des éprouvettes cylindriques, la norme européenne intègre la culture des autres pays, notamment l'Allemagne qui utilise des éprouvettes cubiques pour réaliser leurs essais.

Selon l'environnement dans lequel on se trouve, la norme impose de respecter des classes minimales de résistance qui sont :

	Classe de résistance minimale
XO	-
XC1 (et XC2)	C 20/25
XF1	C 25/30
XF2	C 25/30
XF3	C 30/37
XF4	C 30/37
XD2	C 30/37
XD3	C 35/45
XA1	C 30/37
XA2	C 35/45
XA3	C 40/50

Figure 4 – Classes de résistance minimale en fonction de la classe d'environnement

Ces valeurs sont à appliquer en France et peuvent varier dans les autres pays de la communauté européenne, puisque ces valeurs ne sont pas les mêmes dans l'ensemble des pays couverts par l'EN 206-1 compte tenu des particularités climatiques, géologiques et des techniques de construction

f. Classes de consistance

A l'essai d'affaissement (cône d'Abrams) nous avons :

XP P 18-305 : 4 classes de consistance : F, P, TP, FI

NF EN 206-1 : 5 classes de consistance : S1 à S5

3 autres méthodes existent pour déterminer la classe de consistance.

L'essai d'affaissement (cône d'Abrams) est celui qui est couramment pratiqué en France.

Pourquoi la norme a-t-elle prise en compte d'autres essais ?

La prise en compte de 4 essais afin de caractériser la consistance permet d'améliorer la communication entre les différents pays membres. En effet, grâce à la nouvelle norme, chaque pays pratique l'essai qu'il souhaite mais les procédures d'essai, les matériels et les conditions de l'essai seront les mêmes pour les autres pays.

Je me suis demandé pourquoi une classe de consistance avait été rajoutée.

En fait, cette classe S5 prend en compte les bétons auto-plaçant ce qui n'était pas vrai auparavant.

Affaissement (mm)	XP P18 - 305	NF EN 206-1	Champs d'application
De 10 à 40	béton ferme F	S1	Escalier, accès avec fortes pentes (garage, Sous sol), glissière en coffrage coulissant
De 50 à 90	béton plastique P	S2	Dalle pleine vibrée
De 100 à 150	béton très plastique TP	S3	Fondations, dalles, voiles courants
De 160 à 210	béton fluide FI	S4	Fondations, dalles, voiles avec forte densité de ferrailage
>220		S5	Voiles complexes, dalles, fondations

Figure 5 – Classes de consistance (au cône d'Abrams)

g. Dimension des granulats

Le béton est classé selon la dimension maximale des granulats.

La classification est fonction de la dimension nominale supérieure du plus gros granulat dans le béton.

En ce qui concerne les classes granulaires une modification a été apportée.

En effet, auparavant couramment on avait une classe granulaire allant de 0 à 25. Or ce dernier tamis a été supprimé et a été ramené à 22,4. Ainsi dans les centrales à béton, une adaptation du matériel a du être faite afin de respecter les critères de la nouvelle norme. Il a fallu donc composer avec les classes granulaires du tableau ci-dessous :

Série de base mm	Série de base + série 1 mm	Série de base + série 2 mm
0	0	0
1	1	1
2	2	2
4	4	4
—	5,6 (5)	—
—	—	6,3 (6)
8	8	8
—	—	10
—	11,2 (11)	—
—	—	12,5 (12)
—	—	14
16	16	16
—	—	20
—	22,4 (22)	—
31,5 (32)	31,5 (32)	31,5 (32)
—	—	40
—	45	—
63	63	63

NOTE Les dimensions arrondies entre parenthèses peuvent être utilisées pour décrire les classes granulaires de manière simplifiée.

Figure 6 - Dimensions des tamis pour la spécification des classes granulaires

h. Classes de chlorures

On répertorie 4 classes de chlorure : 0,20 ; 0,40 ; 0,65 ; 1,0

Ces taux correspondent à la teneur maximale en ions Cl⁻ rapportée à la masse de ciment.

Classes de chlorure	Teneur maximal en ions chlorure (Cl ⁻) rapportées à la masse du ciment	
Cl 0,20	0,20%	Béton contenant des armatures de précontrainte en acier
Cl 0,40	0,40%	Bétons contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées
Cl 0,65	0,65%	Bétons contenant des armatures en acier ou des pièces métalliques noyées et formulés avec des ciments de type CEM III
Cl 1,0	1,0%	Bétons ne contenant ni armatures en acier ni pièces métalliques noyées

Figure 7 – Classes de chlorure

Ce taux en chlorure est extrêmement important dans la durabilité du béton. En effet, les chlorures jouent un rôle catalyseur dans l'oxydation des armatures.

En outre, il est strictement interdit d'utiliser des adjuvants chlorés pour la réalisation de béton armé. Ainsi à présent il est formellement interdit d'utiliser du chlorure de calcium pour accélérer la prise du béton notamment en hiver.

i. Contrôles

XP P 18-305 : le producteur devait mettre en place un contrôle de production décrit dans un Plan d'Organisation de Qualité, sans donner de spécification particulière sur les contrôles à réaliser.

NF EN 206-1 :

i.1) Contrôles de production

La norme définit très précisément la nature et la fréquence des contrôles, et les critères de conformité en fonction de la certification de la centrale.

Les contrôles prescrits s'appliquent à des familles de béton avec les fréquences du tableau ci-dessous :

Production continue	Centrale avec contrôle de production certifiée	Centrale avec contrôle de production non certifiée
Production > 50 m ³ /jour	1/semaine ou 1/400 m ³	1/jour ou 1/150 m ³
Production < 50 m ³ /jour	3/mois	1/semaine

Figure 8 – Contrôles de production des BPS

La norme NF EN 206-1 conduit à augmenter les volumes des contrôles et à renforcer les critères de conformité.

i.2) Contrôles en cours de travaux

Le DTU 21 « Exécution des ouvrages en béton » a été publié en mars 2004, après révision et mise en conformité avec la norme NF EN 206-1.

Il fixe les contrôles techniques qui incombent à l'entreprise et ne concernent pas directement le producteur de béton. Il stipule que le matériau béton utilisé doit être conforme à la norme NF EN 206-1.

Ainsi l'entreprise se doit de réaliser des contrôles en cours de travaux dans le cadre du DTU. Ces contrôles de résistance sur des BPS fournis par une centrale de BPE viennent en complément de ceux réalisés par le producteur. Pour chaque type de béton utilisé, il faut réaliser :

- un contrôle au démarrage du chantier
- un contrôle par lot de 1000 m³ pour les bétons titulaires d'une certification NF ou un contrôle par lot de 500 m³ pour les autres bétons, avec au minimum un contrôle par mois de bétonnage.

I.2 - Incidence de la norme sur les bétons faits par une centrale sur chantier

Les bétons faits sur chantier sont les BCP (Béton à Composition Prescrite).
En effet, il s'agit des bétons pour lesquels la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés par l'utilisateur.

Ces BCP peuvent soit résulter d'une étude, soit être définis dans une norme.

Les BCP résultant d'une étude engage l'utilisateur à réaliser une étude particulière, qui aboutira à une composition détaillée et à des contrôles de résistance définis par le DTU21.

Les BCP définis dans une norme impliquent des ouvrages d'importance R+2, des contrôles de résistance facultatifs, et des dosages en ciment correspondant à des résistances maximales prises en compte :

- 250 kg/m³ (≅ 8MPa)
- 300 kg/m³ (≅ 12 MPa)
- 350 kg/m³ (≅ 16 MPa)
- 400 kg/m³ (≅ 20 MPa)

Les spécifications de base sont les suivantes :

- dosage en ciment comme cité précédemment
 - type et classe de résistance du ciment
 - soit le rapport E/C soit la consistance
 - dimension nominale maximale des granulats
 - type et catégorie des granulats et leur teneur maximale en chlorure
 - le type et la quantité des adjuvants ou additions et l'indication de leur origine
- le cas échéant

En ce qui concerne les contrôles à effectuer sur ces bétons, le passage à la norme NF EN 206-1 explicite un certain nombre de dispositions qui doivent être normalement respectées pour produire un béton de chantier de qualité mais n'étaient pas décrites dans les documents réglementaires et normatifs précédents.

Les dispositions à prendre concernent notamment :

- l'édition des bons de pesée
- la réalisation d'essais périodiques sur les granulats (granulométrie, propreté)
- la mise en place d'une sonde hygrométrique sur le sable ou essai de séchage quotidien
- l'utilisation d'au moins deux coupures granulaires (un sable et un gravillon)
- l'obtention d'une résistance supérieure d'au moins 6 MPa par rapport à la résistance caractéristique lors des essais initiaux
- la prise en compte des classes d'exposition et la limitation des rapports eau sur liant équivalent

Par ailleurs, les prescriptions concernant le contrôle de résistance des BCP sont plus sévères que dans l'ancien DTU 21.

En effet, à présent les contrôles sont organisés de la manière suivante :

- un prélèvement tous les 250 m³ (ou tous les mois) au lieu de 800 m³ pour les ouvrages de moyenne importance (ou de catégorie B)

- un prélèvement tous les 150 m³ (ou tous les mois) au lieu de 500 m³ pour les ouvrages de grande importance (ou de catégorie C)

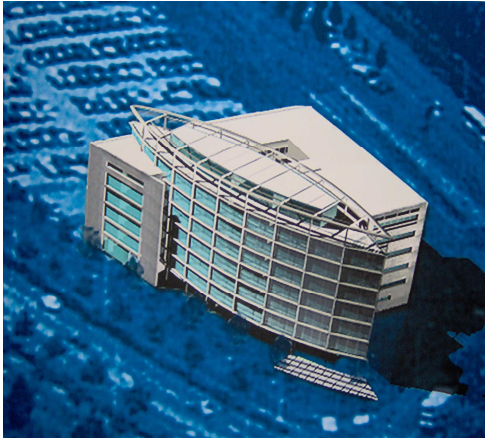
Catégorie du chantier :

Catégorie B : chantier de moyenne importance (jusqu'à 5000m³ de béton). Cette catégorie concerne en particulier les bâtiments d'au plus 16 niveaux, un ensemble pavillonnaire important ou une construction industrielle courante.

Catégorie C : chantier de grande importance ne comportant que des éléments de dimensions courantes et normalement sollicités. Cette catégorie concerne en particulier les immeubles de plus de 16 niveaux, les entrepôts industriels à fortes charges ou les complexes sportifs de grandes dimensions.

I.3 - Cas pratique : chantier de la DRDE

a. Présentation succincte du chantier



Vue 3D et aérienne du futur bâtiment



Façade Sud (Zone B)



Façade Nord (Zone A)

Description des travaux

L'ouvrage se situe à l'extrémité du parking relais Tram de la Rotonde à la jonction des routes d'Oberhausbergen et de Mittelhausbergen

Surface du terrain : 3148 m²

Surface des planchers SHON : 8871 m²

Hauteur du bâtiment : 27,90 m

Le bâtiment comporte 2 niveaux de sous sol enterré.

Il se divise en 2 parties comme suivant :

- Partie A : Pointe Nord-Ouest du bâtiment (R+5)
- Partie B : Zone Sud du bâtiment (R+7)

Les principales quantités sont les suivantes :

- déblais : 12000 m³
- voiles : 7500 m²
- dalle : 13000 m²
- béton : 5000 m³
- acier HA : 200 t

b. Mise en pratique de la norme sur le chantier de la DRDE

b.1) Classe d'exposition suivant la partie d'ouvrage

Fondations

Le chantier étant situé sur un site non soumis à des attaques acides, les bétons utilisés pour les fondations ne sont pas de classe XA.

Pour les puits ne contenant pas d'armatures les bétons utilisés sont de classe **XO**.

Pour les fondations contenant des armatures, semelles et longrines, les bétons utilisés sont de classe **XC1**, car les fondations ne sont pas dans un milieu humide.

Éléments extérieurs

Le chantier est situé à Strasbourg dans une zone classée XF1. Ainsi le béton choisi pour les éléments extérieurs est du **XF1**.

Éléments intérieurs et prémurs

Puisque ces éléments sont protégés de l'humidité, il a été décidé de choisir des bétons de classe **XC1**.

b.2) Contrôles réalisés sur le chantier

Outre les contrôles réalisés par le producteur, l'entreprise a décidé de réaliser des contrôles sur le chantier afin d'être conforme aux règles de l'art notamment par rapport au DTU.

Les contrôles ont été confiés à un laboratoire.

La nouvelle norme ne précise pas le nombre d'éprouvettes qu'il faut utiliser. Sur ce chantier, il a été décidé de réaliser 4 éprouvettes par contrôle. 1 éprouvette pour la résistance à 7 jours et 3 autres éprouvettes pour la résistance à 28 jours.

II. Critères de choix entre BPE et bétons faits par une centrale sur chantier

L'entreprise m'ayant demandé de déterminer les critères de choix entre BPE et bétons faits par une centrale sur chantier, je me suis intéressé au prix de revient de ces bétons et j'ai donc proposé des formulations de bétons afin d'établir les quantités nécessaires à l'élaboration de 5000 m³ de béton pour un chantier courant de bâtiment.

N'ayant jamais eu de cours particuliers sur la formulation des bétons je me suis documenté sur le sujet et je me suis aperçu que plusieurs méthodes existaient. Cependant la méthode de Dreux Gorisse se distingue des autres, car elle est pratique à utiliser et elle est basée sur des expériences. Ainsi il en résulte que les résultats obtenus sont à peu près cohérents.

Par ailleurs, outre la méthode que j'utilise, grâce à la formation que j'ai pu suivre à l'INSA Strasbourg je sais que l'étude de la composition d'un béton consiste à rechercher les 2 qualités : résistance et ouvrabilité. Or ces 2 critères vont varier suivant le dosage de tel ou tel constituant.

On peut synthétiser les choses de la manière suivante :

Facteurs	Pour une bonne ouvrabilité	Pour une bonne résistance
Finesse du sable	Plutôt fin	Plutôt grossier
Rapport Gravier/Sable	A diminuer	à augmenter
Dosage en eau	A augmenter	à diminuer
Granularité	Continue préférable	Discontinue légèrement préférable
Dimension max des granulats D	Plutôt petite	Plutôt forte

Figure 9 – Critères pour une bonne ouvrabilité et une bonne résistance des bétons

Je me suis principalement intéressé à des bétons qui pourraient être utilisés sur un chantier de bâtiment courant, et qui seraient facilement comparables avec les bétons proposés par les centrales de BPE.

Les formulations de béton que je propose sont adaptées à des parties d'ouvrage similaires à celles du chantier de la DRDE.

Ainsi j'ai proposé des formulations pour des fondations non armées en milieu non agressif, pour le remplissage des prémurs dans des conditions normales et en hiver et pour la réalisation de poutres, poteaux ou murs.

II.1 - Formulation de bétons faits sur chantier en fonction de la partie d'ouvrage concernée

a. Méthodes de formulation

La méthode de la formulation d'un béton consiste à déterminer le mélange optimal des différents granulats, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin d'obtenir le béton avec les caractéristiques adaptées à l'ouvrage ou à la partie d'ouvrage.

La méthode pratique permettant de déterminer la composition des bétons est la méthode de Dreux-Gorisse.

Cette méthode permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition adaptée au béton étudié. Afin d'obtenir la meilleure formule il sera nécessaire de réaliser des essais d'affaissement et de résistance. A la suite de ces essais il sera éventuellement nécessaire d'effectuer certaines modifications.

Par ailleurs, afin de respecter les spécifications imposées par la norme, les formulations que je propose ont été calculées de telle façon à obtenir une résistance supérieure de 6MPa à la résistance caractéristique souhaitée. De plus, je veille également à ce que le rapport $E_{u\text{efficace}}/L_{i\text{équivalent}}$ ne dépasse pas la valeur maximale imposée par la norme.

Méthode de Dreux-Gorisse

a.1) Résistance souhaitée

On demande une résistance f_{c28} en compression à 28 jours. En tenant compte des dispersions et des écarts quadratiques, on adoptera la règle approximative pour la résistance moyenne à viser :

$$f_c = f_{c28} + 6 \text{ MPa}$$

a.2) Dosage en ciment

On évalue approximativement le rapport C/E en fonction de la résistance moyenne souhaitée f_c :

$$f_c = GF_{CE} * (C/E - 0,5)$$

f_c : résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa
 FCE : classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa
 C : dosage en ciment (en kg/m³)
 E : dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 m³)
 G : coefficient granulaire

Valeurs approximatives du coefficient granulaire G (en supposant que le serrage du béton sera effectué dans de bonnes conditions, par vibration, en principe)

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	Fins (D ≤ 16 mm)	Moyens (20 ≤ D ≤ 40 mm)	Gros (D ≥ 50 mm)
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Figure 10 - Valeurs approximatives du coefficient granulaire G

Afin de déterminer le dosage en ciment, il faut utiliser l'abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée

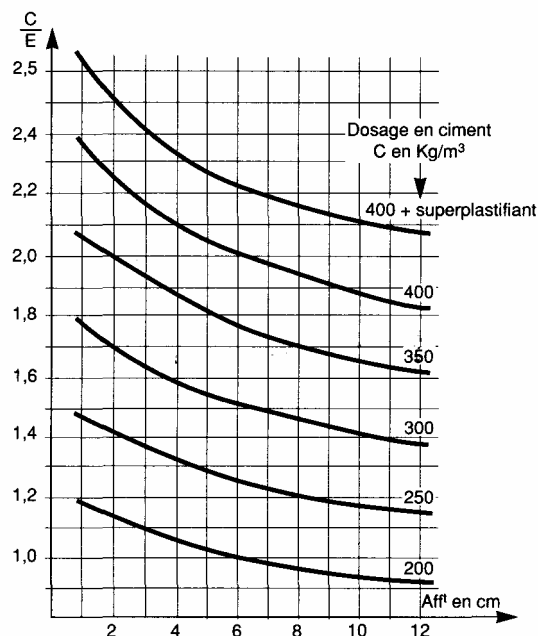


Figure 11 - Dosage en ciment en fonction de C/E et de l'affaissement

a.3) Dosage en eau

Ayant C et C/E il est facile de connaître approximativement le dosage en eau totale.

En fonction de la dimension maximale D des granulats il sera bon d'appliquer une correction sur le dosage en eau totale, donnée par le graphique ci-dessous :

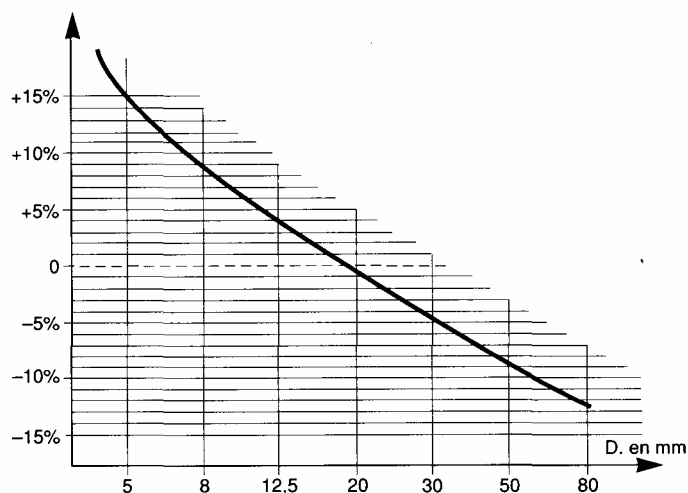


Figure 12 - Correction sur le dosage en eau

a.4) Dosage des granulats

Tracé de la courbe granulatoire de référence

Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR, on trace une composition granulatoire de référence O A B.

Point B : ordonnée : 100%, abscisse : dimension D du plus gros granulat

Point A :

Abscisse :

Si $D < 20$ mm, l'abscisse sera égale à $D/2$

Si $D > 20$ mm, l'abscisse sera située au milieu du segment gravier limité par la dimension de tamis 5 mm

Ordonnée : $Y = 50 - \sqrt{D} + K$

K : terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés et également du module de finesse du sable.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400 + Superplastifiant	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

Nota 1 : Correction supplémentaire K_s : si le module de finesse du sable est fort (sable grossier) une correction supplémentaire sera apportée de façon à relever le point A, ce qui correspond à majorer le dosage en sable et vice versa. La correction supplémentaire (sur K) peut être effectuée en ajoutant la valeur $K_s = 6 Mf - 15$ (Mf étant le module de finesse du sable qui peut varier de 2 à 3 avec une valeur optimale de l'ordre de 2,5 pour laquelle la correction préconisée est alors nulle).

Nota 2 : Correction supplémentaire K_p : si la qualité du béton est précisée « pompable » il conviendra de conférer au béton le maximum de plasticité et de l'enrichir en sable par rapport à un béton de qualité « courante ». On pourra pour cela majorer le terme correcteur K de la valeur $K_p = + 5$ à $+ 10$ environ, selon le degré de plasticité désiré.

Figure 13 - Terme correcteur K

a.5) Coefficient de compacité

Ce coefficient γ est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre.

Consistance	Serrage	γ coefficient de compacité						
		D = 5	D = 10	D = 12,5	D = 20	D = 31,5	D = 50	D = 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	0,730	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	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Ces valeurs sont convenables pour des *granulats roulés* sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = - 0,01,
- sable et gravier concassé = - 0,03.

Figure 14 - Coefficient de compacité

a.6) Dosage des granulats

La courbe granulaire OAB de référence est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants.

On trace alors les lignes de partage entre chacun des granulats, en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point 5% de la courbe du granulat suivant.

On lira alors sur la courbe de référence, au point de croisement avec les droites de partage, le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats.

Le volume absolu des grains de ciment est : $c = C/3,1$ avec C le dosage en ciment. (3,1 étant la masse spécifique admise pour les grains de sable)

Le volume absolu de l'ensemble des granulats est : $V = 1000\gamma - c$

On en déduit alors le volume absolu de chacun des granulats ainsi que les masses spécifiques de chacun des granulats.

b. Parties d'ouvrage

b.1) Fondations

Formulation d'un béton pour des puits de fondations non armées en milieu non acide.

Pour ce type d'ouvrage, un ciment de type CPJ-CEM II A ayant par prudence la caractéristique ES convient.

Par ailleurs, les faibles contraintes auxquelles sont soumis ces ouvrages ne nécessitent pas la recherche de classes élevées de ciment. Ainsi un ciment de classe 32,5 convient.

b.1.1) Dosage en ciment

La résistance souhaitée à 28 jours est de 16 MPa. Par ailleurs, on souhaite un affaissement de 10 cm.

$$f_c = 16 + 15\% = 18,4 \text{ MPa}$$

Un ciment de classe 32,5 a une classe vraie égale à 48 MPa

On peut considérer que les granulats sont de bonne qualité et puisque $D=20\text{mm}$, on trouve $G=0,50$

Ainsi on obtient : $18,4 = 0,50 * 48 (C/E - 0,5)$ et donc $C/E = 1,27$

D'après l'abaque, pour $C/E = 1,27$ et $A = 10 \text{ cm}$, on trouve un dosage en ciment de 275 kg/m^3 .

b.1.2) Dosage en eau

Le dosage en eau totale sur matériaux secs sera environ : $275/1,27 = 217 \text{ L}$

b.1.3) Dosage des granulats

D'après les courbes granulaires des différents granulats composant les bétons, on a les répartitions suivantes :

- pourcentage de sable : 35%
- pourcentage de gravier : 65%

Puisque que $D=20\text{mm}$, que le béton est plastique et que la vibration est normale, on obtient alors un coefficient de compacité égale à 0,815

Volume absolu des granulats = Volume total absolu – Volume absolu du ciment

$$\begin{aligned} &= 1000 \gamma - C/3,1 \\ &= 815 - 89 \\ &= 729 \text{ L} \end{aligned}$$

On en déduit alors que le volume absolu du sable est : $729 * 0,35 = 255 \text{ L}$

Le volume absolu du gravier est : $729 * 0,65 = 474 \text{ L}$

Or on peut supposer que la densité du sable est 2,54 et que la densité du gravier est 2,62.

Les dosages en matériaux secs seront donc :

Sable : $255 * 2.54 = 648 \text{ kg}$

Gravier : $474 * 2.62 = 1242 \text{ kg}$

Ciment : 275 kg

Eau totale : 217 kg

D'où une densité théorique du béton frais égale à 2382 kg

b.2) Remplissage des prémurs

b.2.1) Formulation d'un béton pour le remplissage de prémurs dans des conditions climatiques normales

Pour ce type d'ouvrage, un ciment de type CPJ-CEM II A convient.
On peut également prendre un ciment de classe 32,5.

b.2.1.1 Dosage en ciment

La résistance souhaitée à 28 jours est de 25 MPa (soit 31MPa afin d'avoir au moins 6Mpa de plus que la résistance caractéristique voulue). Par ailleurs, selon les recommandations de l'avis technique du préfabricant il est demandé d'avoir un affaissement supérieur à 16 cm. Choisissons donc un affaissement de 16 cm.

$$f_c = 31 \text{ MPa}$$

Un ciment de classe 32,5 a une classe vraie égale à 48 MPa

On peut considérer que les granulats sont de bonne qualité et puisqu'on choisit $D=16\text{mm}$ (en effet, pour des panneaux d'épaisseur totale supérieure ou égale à 20 cm : $D_{\max} = 16$), on trouve $G=0,45$

$$\text{Ainsi on obtient : } 31 = 0,50 * 48 (C/E - 0,45) \text{ et donc } C/E = 1,74$$

D'après l'abaque, pour $C/E = 1,74$ et $A = 16$ cm, on trouve un dosage en ciment de 370 kg/m³.

b.2.1.2 Dosage en eau

Le dosage en eau totale sur matériaux secs sera environ : $370/1,74 = 213$ L

b.2.1.3 Dosage des granulats

D'après les courbes granulaires des différents granulats composant les bétons, on a les répartitions suivantes :

- pourcentage de sable : 35%
- pourcentage de gravier : 65%

Puisque que $D=16$ mm, que le béton est plastique et que la vibration est normale, on obtient alors un coefficient de compacité égale à 0,82

Volume absolu des granulats = Volume total absolu – Volume absolu du ciment

$$\begin{aligned} &= 1000 \gamma - C/3,1 \\ &= 820 - 119 \\ &= 701 \text{ L} \end{aligned}$$

On en déduit alors que le volume absolu du sable est : $701 * 0,35 = 245 \text{ L}$

Le volume absolu du gravier est : $701 * 0,65 = 456 \text{ L}$

Or on peut supposer que la densité du sable est 2,54 et que la densité du gravier est 2,62.

Les dosages en matériaux secs pour la réalisation d'un béton destiné au remplissage de prémurs seront donc :

Sable : $245 * 2.54 = 622 \text{ kg}$

Gravier : $456 * 2.62 = 1125 \text{ kg}$

Ciment : 370 kg

Eau totale : 213 kg

On en déduit une densité théorique du béton frais égale à 2400 kg

La classe d'exposition de ce type d'ouvrage est du XC1. Or la norme impose les spécifications suivantes pour du XC1 :

- Rapport Eau eff/ Liant équ maximal = $0,65+0,02 = 0,67$

Pour cette formulation on a : $213/370 = 0,58$ **OK**

- Teneur mini en liant équivalent : 260 kg/m³

Pour cette formule, on a : 370 kg/m³ **OK**

b.2.2) Formulation d'un béton pour le remplissage de prémurs en hiver

Pour ce type d'ouvrage, un ciment de type CPA-CEM I convient.

On peut également prendre un ciment de classe 42,5 R.

b.2.2.1 Dosage en ciment

La résistance souhaitée à 28 jours est de 25 MPa. Par ailleurs, on souhaite un affaissement de 16 cm.

$$f_c = 25 + 6 = 31 \text{ MPa}$$

Un ciment de classe 42,5 a une classe vraie égale à 62 MPa

On peut considérer que les granulats sont de bonne qualité et puisqu'on choisit $D=16\text{mm}$, on trouve $G=0,45$

Ainsi on obtient : $31 = 0,50 * 62 (C/E - 0,45)$ et donc $C/E = 1,45$

On peut s'apercevoir que si on prend 1,45, on ne pourra pas respecter les spécifications de la norme, en effet $E/C = 1/1,45 = 0,69 > 0,67$. Ainsi afin de respecter la norme je décide d'avoir $E/C = 0,64$ soit $C/E = 1,56$

D'après l'abaque, pour $C/E = 1,56$ et $A = 14$ cm, on trouve un dosage en ciment de 340 kg/m^3

b.2.2.2 Dosage en eau

Le dosage en eau totale sur matériaux secs sera environ : $340/1,56 = 218 \text{ L}$

b.2.2.3 Dosage des granulats

D'après les courbes granulaires des différents granulats composant les bétons, on a les répartitions suivantes :

- pourcentage de sable : 35%
- pourcentage de gravier : 65%

Puisque que $D=16$ mm, que le béton est plastique et que la vibration est normale, on obtient alors un coefficient de compacité égale à 0,82

Volume absolu des granulats = Volume total absolu – Volume absolu du ciment

$$\begin{aligned} &= 1000 \gamma - C/3,1 \\ &= 820 - 110 \\ &= 710 \text{ L} \end{aligned}$$

On en déduit alors que le volume absolu du sable est : $710 * 0,35 = 249 \text{ L}$

Le volume absolu du gravier est : $710 * 0,65 = 461 \text{ L}$

Or on peut supposer que la densité du sable est 2,54 et que la densité du gravier est 2,62.

Les dosages en matériaux secs seront donc :

Sable : $249 * 2,54 = 632 \text{ kg}$

Gravier : $461 * 2,62 = 1208 \text{ kg}$

Ciment : 340 kg

Eau totale : 218 kg

D'où une densité théorique du béton frais égale à 2398 kg

La classe d'exposition de ce type d'ouvrage est du XC1. Or la norme impose les spécifications suivantes pour du XC1 :

- Rapport Eau eff/ Liant équ maximal = $0,65+0,02 = 0,67$

Pour cette formulation on a : $218/340 = 0,64$ **OK**

- Teneur mini en liant équivalent : 260 kg/m^3

Pour cette formule, on a : 340 kg/m^3 **OK**

b.3) Poutres, poteaux, murs

b.3.1) Formulation d'un béton pour les poutres tradi, poteaux, murs extérieurs comme intérieurs

Pour ce type d'ouvrage, un ciment de type CPJ-CEM II
Un ciment de classe 32,5 convient

b.3.1.1 Dosage en ciment

La résistance souhaitée à 28 jours est de 25 MPa. Par ailleurs, on souhaite un affaissement de 10 cm.

$$f_c = 25 + 6 = 31 \text{ MPa}$$

Un ciment de classe 32,5 a une classe vraie égale à 48 MPa

On peut considérer que les granulats sont de bonne qualité et puisque $D=20\text{mm}$, on trouve $G=0,50$

$$\text{Ainsi on obtient : } 31 = 0,50 * 48 (C/E - 0,5) \text{ et donc } C/E = 1,79$$

D'après l'abaque, pour $C/E = 1,79$ et $A = 10 \text{ cm}$, on trouve un dosage en ciment de 370 kg/m^3 .

b.3.1.2 Dosage en eau

Le dosage en eau totale sur matériaux secs sera environ : $370/1,79 = 216 \text{ L}$

b.3.1.3 Dosage des granulats

D'après les courbes granulaires des différents granulats composant les bétons, on a les répartitions suivantes :

- pourcentage de sable : 35%
- pourcentage de gravier : 65%

Puisque que $D=20\text{mm}$, que le béton est plastique et que la vibration est normale, on obtient alors un coefficient de compacité égale à 0,815

Volume absolu des granulats = Volume total absolu – Volume absolu du ciment

$$\begin{aligned} &= 1000 \gamma - C/3,1 \\ &= 825 - 119 \\ &= 706 \text{ L} \end{aligned}$$

On en déduit alors que le volume absolu du sable est : $706 * 0,35 = 247$ L
Le volume absolu du gravier est : $706 * 0,65 = 459$ L
Or on peut supposer que la densité du sable est 2,54 et que la densité du gravier est 2,62.

Les dosages en matériaux secs seront donc :

Sable : $247 * 2.54 = 627$ kg

Gravier : $459 * 2.62 = 1202$ kg

Ciment : 370 kg

Eau totale : 216 kg

D'où une densité théorique du béton frais égale à 2406 kg
La classe d'exposition de ce type d'ouvrage est du XF1. Or la norme impose les spécifications suivantes pour du XF1 :

- Rapport Eau eff/ Liant equ maximal = $0,60+0,02 = 0,62$

Pour cette formulation on a : $207/370 = 0,56$ **OK**

- Teneur mini en liant équivalent : 280 kg/m³

Pour cette formule, on a : 370 kg/m³ **OK**

b.3.2) Formulation d'un béton pour les poutres tradi, poteaux, murs extérieurs comme intérieurs en hiver

Pour ce type d'ouvrage, un ciment de type CPA-CEM I

Un ciment de classe 42,5 convient

b.3.2.1 Dosage en ciment

La résistance souhaitée à 28 jours est de 25 MPa. Par ailleurs, on souhaite un affaissement de 10 cm.

$$f_c = 25 + 6 = 31 \text{ MPa}$$

Un ciment de classe 2,5 a une classe vraie égale à 62 MPa

On peut considérer que les granulats sont de bonne qualité et puisque $D=20\text{mm}$, on trouve $G=0,50$

Ainsi on obtient : $31 = 0,50 * 62 (C/E - 0,5)$ et donc $C/E = 1,5$

D'après l'abaque, pour $C/E = 1,5$ et $A = 10$ cm, on trouve un dosage en ciment de 315 kg/m³.

b.3.2.2 Dosage en eau

Le dosage en eau totale sur matériaux secs sera environ : $315/1,5 = 210$ L

b.3.2.3 Dosage des granulats

D'après les courbes granulaires des différents granulats composant les bétons, on les répartitions suivantes :

- pourcentage de sable : 35%
- pourcentage de gravier : 65%

Puisque que $D=20\text{mm}$, que le béton est plastique et que la vibration est normale, on obtient alors un coefficient de compacité égale à 0,815

Volume absolu des granulats = Volume total absolu – Volume absolu du ciment

$$\begin{aligned} &= 1000 \gamma - C/3,1 \\ &= 825 - 102 \\ &= 723 \text{ L} \end{aligned}$$

On en déduit alors que le volume absolu du sable est : $723 * 0,35 = 253$ L

Le volume absolu du gravier est : $723 * 0,65 = 470$ L

Or on peut supposer que la densité du sable est 2,54 et que la densité du gravier est 2,62.

Les dosages en matériaux secs seront donc :

Sable : $253 * 2.54 = 643$ kg

Gravier : $470 * 2.62 = 1231$ kg

Ciment : 315 kg

Eau totale : 210 kg

D'où une densité théorique du béton frais égale à 2400 kg

La classe d'exposition de ce type d'ouvrage est du XF1. Or la norme impose les spécifications suivantes pour du XF1 :

- Rapport Eau eff/ Liant equ maximal = $0,60+0,02 = 0,62$

Pour cette formulation on a : $210/315 = 0,67$ **OK**

- Teneur mini en liant équivalent : 280 kg/m³

Pour cette formule, on a : 315 kg/m³ **OK**

c. Synthèse

Pour un volume de 5000 m³ de béton représentant un chantier de taille moyenne, j'en déduis qu'il sera nécessaire d'avoir approximativement les volumes suivants de matériaux :

- 3250 tonnes de sable
- 6000 tonnes de gravier
- 1750 tonnes de ciment

Bien entendu, les formulations trouvées ne doivent en aucun cas être utilisées telles quelles. En effet, ces formulations se doivent d'être vérifiées à l'aide d'éprouvettes.

Seule la confection d'éprouvettes permettra d'ajuster au mieux la composition à adopter en fonction des qualités souhaitées et des matériaux effectivement utilisés.

Ainsi lors des résultats obtenus on s'assurera que les résistances obtenues sont supérieures de 6 MPa par rapport à ce qui était souhaité afin de respecter la norme.

Par ailleurs, le rapport Eeff/Liant équ devra également être vérifié lors de la production du béton afin de respecter les critères imposés par la norme. Ainsi on comprend mieux que la teneur en eau du sable et du gravier stockés à proximité de la centrale sur chantier doit être évaluée à l'aide de sondes afin de connaître la teneur exacte en eau du béton produit.

En analysant les spécifications imposées par la norme concernant les BPS, on se rend compte que pour un béton XC1 ayant pour classe de résistance C25/30, on se rend compte que la teneur en liant équivalent est aux alentours de 260 kg/m³. Ainsi on pourra certainement après les études faites sur ces bétons en laboratoire diminuer la quantité de ciment, et donc diminuer le prix de revient d'un béton car le prix d'un béton est principalement déterminé par sa teneur en ciment.

II.2 - Coût des bétons

a. Coûts des bétons provenant d'une centrale à béton

Après négociations les prix provenant de la centrale à béton ont été fixés pour le chantier de la DRDE à :

DESIGNATION DES BETONS	OUVRAGES REALISES	Prix €/m ³
X0 CEMII C16/20	GROS BETON + BETON DE PROPRETE + PUIT	57,90
XC1 CEMII C25/30	DALLES + POTEAUX + POUTRE TRADI + CLAVETAGES	61,50
XC1 CEMII C25/30 D=16	PREMURS	67,00
XC1 CEMI C25/30	DALLES + POTEAUX + POUTRE TRADI + CLAVETAGES (HIVER)	66,00
XC1 CEMI C25/30 D=16	PREMURS (HIVER)	71,50
XF1 CEMII C35/45	POTEAUX (VOIR PLANS)	71,50
XF1 CEMI C35/45	POTEAUX (VOIR PLANS) HIVER	76,00
XF1 CEMI C50/60	POTEAUX (VOIR PLANS)	115,00

b. Coût des bétons faits par une centrale à béton sur chantier

Afin d'établir le prix de revient du béton (au m³) produit par une centrale sur chantier de bâtiment, je me suis demandé quels paramètres entraînent en compte pour déterminer le plus précisément possible le prix de revient de ces bétons.

Ainsi les paramètres qu'il faut considérer sont :

- le prix des constituants (ciment, gravier, sable, eau)
- le prix de la fourniture et de l'installation de la centrale à béton
- la consommation électrique de la centrale
- l'amortissement voulu de la centrale à béton

b.1) Prix des constituants

Après avoir déterminé les quantités nécessaires pour une production totale de 5000 m³ de béton, j'ai entrepris des consultations auprès de fournisseurs afin d'obtenir un prix des différents constituants.

b.1.1) Granulats

Pour obtenir les prix du sable et du gravier, j'ai recherché les sablières à proximité de Strasbourg et j'ai contacté les entreprises suivantes :

- Woerth à Grunder
- Werny Ballastières à Marckolsheim

Lors de la demande de prix, je leur ai demandé de me donner leurs tarifs pour du sable 0/5 et des graviers 5/16 et 5/20, en sachant qu'il devrait fournir 4000 tonnes de sable et 6000 tonnes de gravier.

b.1.2) Ciment

En ce qui concerne le ciment, j'ai entrepris la même démarche, et j'ai donc contacté les entreprises suivantes :

- Holcim ciment à Altkirch
- Vicat ciment à Xeuilley
- Calcia à Metz

Je leur ai demandé de me faire une offre pour des ciments CEM I et CEM II, pour une fourniture totale de 2000 tonnes.

b.2) Prix de la centrale à béton

Avant de contacter une entreprise afin qu'il me donne un prix pour une centrale à béton je devais déjà fixer certaines hypothèses. En effet, je devais savoir quelle production horaire j'avais besoin avec cette centrale à béton. Après réflexion et conseils auprès des professionnels du bâtiment (notamment chefs de chantier), une centrale à béton avec une cadence de 20m³/h semblait être intéressante. (Production mensuelle 500 m³/mois)

Afin d'obtenir une offre concernant cette centrale à béton, j'ai fait appel aux entreprises suivantes :

- FTB Matériels
- Imer Groupe division béton

Afin d'obtenir tous les renseignements nécessaires, je leur ai demandé si le béton produit par la centrale peut être facilement récupéré à l'aide de la grue, si un technicien est nécessaire en permanence, quel est le coût du déplacement, de l'installation, du démontage.

b.3) Coût électrique

Après avoir fait une enquête sur le prix au kW .h facturé aux entreprises par Electricité de Strasbourg, il en est sorti que ce prix s'élève à 11 cents/kWh

Par ailleurs, je suppose que la cadence journalière sur chantier sera de 25 m³/j soit 500 m³/mois

Je prends pour chaque béton une production de 1000 m³

b.4) Synthèse des consultations

Par souci de confidentialité, j'ai pris la décision de ne pas faire apparaître les prix exercés par les différents fournisseurs mais plutôt de faire apparaître un prix moyen.

D'après les consultations que j'ai pu entreprendre, il s'est avéré que les prix sont les suivants :

Sable : 10 €

Gravier : 8 €

Centrale de chantier : 70000 €

Essais en labo : 180€ pour 4 éprouvettes

Pour 5000 m³, 20 contrôles devront être effectués soit un coût de 3600€.

Donc la part des essais sera de 0,72 €/m³

Electricité : 11 cents / kWh + 1500 €

1 personne : 35h sur 10 mois à 20€/h soit un coût de 5.60 €/m³.

A partir de ces chiffres, j'ai réalisé des fiches synthèse détaillant le calcul du prix de revient de chacun des bétons. Ces fiches pourront être utilisées par l'entreprise pour la fabrication éventuelle de béton sur chantier.

Béton dosé à 275 kg/m³ de CPJ CEM II 32,5

Fondations non armées en milieu non acide

Matériaux

	Prix unitaire €/t	Quantité (t)	Masse volumique (t/m ³)	Total (€/m ³)
Sable	10	0.648	2,54	2.55
Gravier	8	1.242	2,62	3.79
Ciment	103	0.275	0.70	40.46
Eau	0.8	0.217	1	0.17

le m³ = 46.97 €

Matériel

Centrale à béton 70 000 €

Amortissement

Sur 5 ans : Prix d'achat 70 000
 Entretien (10%) 7 000

$$\frac{77000}{5 \times 12 \text{ mois}} = 1283 \text{ €/mois}$$

le m³ 2.57 €

Installation du matériel

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Transport	1 000	1	1000
Mécanicien	30	8	240
Total			1240

Démontage et mise en dépôt

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Mécanicien	30	8	240
Transport	1000	1	1000
Total			1240

Montage, démontage et transport pour un chantier de 10 mois
 (1240+ 1240) / (500 * 10) = 0.50

le m³ 0.50 €

Consommation horaire de la centrale

Puissance totale * prix du kW,h = 15 kW * 0.11 = 1.65 €/h

Soit au m³ 1.65/20 + 1500/ 5000

le m³ 0.38 €

56.74 €/m³

La nouvelle norme des bétons: application sur un chantier de bâtiment

Béton dosé à 360 kg/m³ de CPJ CEM II 32,5

Remplissage prémur dans des conditions normales

Matériaux

	Prix unitaire €/t	Quantité (t)	Masse volumique (t/m ³)	Total (€/m ³)
Sable	10	0.622	2,54	2.45
Gravier	8	1.125	2,62	3.43
Ciment	103	0.370	0.70	54.44
Eau	0.8	0.213	1	0.17

le m³ = 60.49 €

Matériel

Centrale à béton (production horaire) 70 000 €

Amortissement

Sur 5 ans : Prix d'achat 70 000
 Entretien (10%) 7 000

Amortissement mensuel $\frac{77000}{5 \times 12 \text{ mois}}$ 1283 €/mois

le m³ 2.57 €

Installation du matériel

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Transport	1000	1	1000
Mécanicien	30	8	240
Total		1240	

Démontage et mise en dépôt

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Mécanicien	30	8	240
Transport	1000	1	1000
Total		1240	

Montage, démontage et transport pour un chantier de 10 mois
 (1240+1240) / 500 * 10 = 0.50

le m³ 0.50 €

Consommation horaire de la centrale

Puissance totale * prix du kW,h = 1.65 €/h

le m³ 0.38 €

69.54 €/m³

La nouvelle norme des bétons: application sur un chantier de bâtiment

Béton dosé à 310 kg/m³ de CPA CEM I 42,5

Remplissage prémur en hiver

Matériaux

	Prix unitaire €/t	Quantité (t)	Masse volumique (t/m ³)	Total (€/m ³)
Sable	10	0.632	2,54	2.49
Gravier	8	1.208	2,62	3.69
Ciment	106	0.340	0.70	51.49
Eau	0.8	0.218	1	0.17

le m³ = 57.84 €

Matériel

Centrale à béton (production horaire : m³/h) 70000€

Amortissement

Sur 5 ans : Prix d'achat 70 000
 Entretien (10%) 7 000

77000

Amortissement mensuel $\frac{77000}{5 \times 12 \text{ mois}}$ 1283€/mois

le m³ 2.57 €

Installation du matériel

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Transport	1000	1	1000
Mécanicien	30	8	240
Total			1240

Démontage et mise en dépôt

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Mécanicien	30	8	240
Transport	1000	1	1000
Total			1240

Montage, démontage et transport pour un chantier de 10 mois
 (1240+1240) / 500 * 10 =

le m³ 0.50 €

Consommation horaire de la centrale

Puissance totale * prix du kW,h = 1.65 €/h

le m³ 0.38 €

66.89 €/m³

La nouvelle norme des bétons: application sur un chantier de bâtiment

Béton dosé à 370 kg/m³ de CPj CEM II 32,5

Poutres, poteaux, murs int et ext

Matériaux

	Prix unitaire €/t	Quantité (t)	Masse volumique (t/m ³)	Total (€/m ³)
Sable	10	0.627	2,54	2.47
Gravier	8	1.202	2,62	3.67
Ciment	103	0.370	0.70	54.44
Eau	0.8	0.216	1	0.17

le m³ = 60.75 €

Matériel

Centrale à béton (production horaire : m³/h) 70000€

Amortissement

Sur 5 ans : Prix d'achat 70000
 Entretien (10%) 7000

Amortissement mensuel $\frac{77000}{5 \times 12 \text{ mois}}$ 1283€/mois

le m³ 2.57 €

Installation du matériel

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Transport	1000	1	1000
Mécanicien	8	30	240
Total			1240

Démontage et mise en dépôt

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Mécanicien	30	8	240
Transport	1000	1	1000
Total			1240

Montage, démontage et transport pour un chantier de 10 mois
 (1240+1240) / 500 * 10 =

le m³ 0.50 €

Consommation horaire de la centrale

Puissance totale * prix du kW,h =1.65 €/h

le m³ 0.38 €

69.62 €/m³

La nouvelle norme des bétons: application sur un chantier de bâtiment

Béton dosé à 315 kg/m3 de CPA CEM I 42.5

Poutres, poteaux, murs int et ext en hiver

Matériaux

	Prix unitaire €/t	Quantité (t)	Masse volumique (t/m3)	Total (€/m3)
Sable	10	0.643	2,54	2.53
Gravier	8	1.231	2,62	3.76
Ciment	103	.315	0.70	46.35
Eau	0.8	.210	1	0.17

le m3 = 52.81 €

Matériel

Centrale à béton (production horaire) 70000€

Amortissement

Sur 5 ans : Prix d'achat 70000
 Entretien (10%) 7000

77000

Amortissement mensuel $\frac{77000}{5 \times 12 \text{ mois}}$ 1283€/mois

le m3 2.57 €

Installation du matériel

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Transport	1000	1	1000
Mécanicien	30	8	240
Total			1240

Démontage et mise en dépôt

	Prix unitaire	Qté	Total (€)
Mécanicien	30	18	240
Transport	1000	1	1000
Total			1240

Montage, démontage et transport pour un chantier de 10 mois

$$(1240 + 1240) / 500 * 10 =$$

le m3 0.50 €

Consommation horaire de la centrale

Puissance totale * prix du kW,h =

le m3 0.38 €

61.86 €/m3

La nouvelle norme des bétons: application sur un chantier de bâtiment

II.3 - Synthèse des prix

Partie d'ouvrage	BPE (prix franco chantier)	Bétons faits sur chantier
Fondations	XO CEM II 42.5 C16/20 : 57,90 €	56.74
Prémurs	XF1 CEM II 42.5 C25/30 : 67,00 €	69.54
Prémurs hiver	XC1 CEM I 42.5 C25/30 : 71,50 €	66.89
Poteaux poteaux poutres (extérieur)	XF1 CEM II 42.5 C25/30 : 61.50	69.62
Poteaux poteaux poutres (intérieur)	XC1 CEM II 42.5 C25/30 : 61.50	69.62
Poteaux poteaux poutres (extérieur) hiver	XF1 CEM I 42.5 C25/30 : 66.00	61.86
Poteaux poteaux poutres (intérieur) hiver	XC1 CEM I 42.5 C25/30 : 66.00	61.86

On peut s'apercevoir en termes de prix que pour un chantier moyen de bâtiment (5000 m³ de béton) l'utilisation d'une centrale sur chantier n'est vraiment pas intéressante puisque les prix de revient sont assez proches des prix proposés par les centrales BPE, voire plus élevés.

Cependant ce qui détermine en grande partie le prix d'un béton est son dosage en ciment. Ainsi à l'aide des essais de résistance on pourra peut être s'apercevoir que le dosage proposé en ciment est plus faible et donc ceux-ci entraînera une diminution du cout de revient des bétons faits sur chantier.

II.4 - Critères de choix BPE et bétons faits sur chantier

Après recherche personnel, discussion auprès de chefs de chantier, de conducteurs de travaux, j'ai listé les points particuliers, notamment avantages et inconvénients de chaque solution afin de déterminer les critères de choix qui me permettent de choisir telle ou telle solution.

Ainsi les critères qui doivent être prises en compte sont :

- l'environnement : il est très important de savoir si le chantier se trouvera en zone urbaine ou rurale, s'il s'agit d'une zone commerciale, industrielle, ou résidentielle. En effet, les bruits occasionnés par une centrale sur chantier pourraient entraîner des soucis de voisinage. Il serait possible de prévoir des capotages ou des matériels plus silencieux mais ceux ci provoqueraient de façon inévitable une plus value.

- Le délai du Gros-Oeuvre. En effet, si le délai est très court et qu'il est nécessaire d'avoir rapidement et de façon continue du béton, une centrale foraine (ou centrale sur chantier) permet plus de flexibilité comparé à une centrale BPE. En effet, en cas de retard dû à des intempéries ou des imprévues sur le chantier, la centrale sur chantier pourrait être utilisée le samedi et donc produire et couler du béton le samedi.
- La situation géographique du chantier. En effet, il est important de savoir si le chantier est situé à proximité d'une centrale BPE ou si au contraire le chantier est éloigné de ces centrales ce qui entraînerait un coût supplémentaire au niveau de la livraison de BPE. Par ailleurs, si le chantier est situé dans une grande ville où de nombreux chantiers sont en cours, il est possible d'avoir de l'attente dans la livraison du béton ce qui peut entraîner des retards sur le chantier et perturber le planning. De plus, en ville, des problèmes de circulation et notamment de bouchons peuvent entraîner de nombreux retards pour la livraison du béton
- La quantité totale de béton à couler sur le chantier
- Le coût du BPE proposé par les centrales aux alentours du chantier et le coût de revient d'un béton fait par une centrale foraine
- Les zones de stockage sur le chantier. Il est important de connaître l'emprise qu'aura le bâtiment et quelle place il restera sur le chantier. En effet, si le site est trop exigu il ne sera pas possible d'implanter une centrale foraine qui demande une certaine place
- La résistance de béton souhaitée et la qualité voulue. Bien que les contrôles soient à présent obligatoires pour les centrales foraines, la qualité sera meilleure pour les bétons BPE d'une centrale certifiée NF où les contrôles sont renforcés
- La capacité de levage de la grue
- La production journalière de béton
- Préférences de la maîtrise d'œuvre
- Les contraintes environnementales du chantier (notamment si le chantier est classé HQE et où alors le respect des normes liées à l'environnement est particulièrement sévère)

II.5 - Evaluation des solutions

Dans cette partie, je vais tenter de mettre en évidence quelle solution est la plus adéquate selon les critères définis auparavant.

Ainsi j'ai établi une grille multicritères.

Explications de la grille :

Dans cette grille multicritères, j'ai recensé l'ensemble des critères de choix qui me paraissaient pertinents.

Pour chacune des 2 solutions (centrale sur chantier et BPE), j'attribue une note en fonction du critère. Cette note est pondérée afin de mettre en évidence l'importance ou non du critère de choix.

Les pondérations s'échelonnent de 1 à 5 :

1 : peu important 2 : nécessaire 3 : important 4 : très important 5 : primordial

Les notes vont de 1 à 3 suivant le principe suivant :

1 : douteuse 2 : moyenne 3 : bien adaptée

II.6 - Grille multicritères

Critères	Pondération	Solutions			
		BPE		Centrale sur chantier	
		Note	Total	Note	Total
Environnement					
Zone résidentielle	4	3	12	1	4
Zone industrielle ou commerciale	1	3	3	2	2
Délai du GO	4	3	12	3	12
Situation géographique du chantier					
Zone où les centrales BPE sont rares	4	1	4	3	12
Région riche en centrale BPE	4	3	12	1	4
Volume total de béton à couler					
<10000 m3	4	3	12	1	4
>10000 m3	4	2	8	3	12
Coût du béton	4	2	8	3	12
Zones de stockage sur chantier	5	3	15	1	5
Qualité du béton	4	3	12	1	4
Capacité de levage de la grue	3	3	9	2	6
Production journalière de béton	3	2	6	3	9
Préférences de la maîtrise d'œuvre	1	3	3	1	1
Contraintes environnementales	3	3	9	1	3

TOTAL pondéré		125	90
----------------------	--	-----	----

Note minimale	1	1
----------------------	---	---

La nouvelle norme des bétons: application sur un chantier de bâtiment

II.7 - Analyse de cette grille multicritères

Tout d'abord, au vu de ce tableau on peut dire que d'après les critères qui me paraissent primordiaux dans le choix de la fabrication du béton, le BPE se révèle être la solution la plus satisfaisante globalement.

En effet, on peut constater que le total pondéré du BPE est 30% plus élevé que le béton fait par une centrale sur chantier.

Par ailleurs, on peut également s'apercevoir que le béton fait par une centrale sur chantier affiche de nombreuses notes égales à 1, contrairement au BPE qui n'obtient qu'une seule note égale à 1.

Ainsi ces nombreuses notes égales à 1 mettent en évidence que la solution du béton fait par une centrale sur chantier présente de nombreuses faiblesses latentes voire rédhibitoires. La norme NF EN 206-1 ayant renforcé la qualité du béton notamment en ce qui concerne la résistance, fragilise le béton fait sur chantier. D'autant plus que le béton fait sur chantier va alors nécessiter l'emploi d'une personne qualifiée afin de ne pas commettre d'erreur lors de la réalisation du béton, pour gérer de façon précise les stocks en granulats et en ciment, d'entretenir le matériel qui lui est confié.

Ainsi la prise de risque pour assurer un béton de bonne qualité ou de qualité comparable à celui d'une centrale BPE est beaucoup plus importante. En effet, la norme NF EN 206-1 ayant renforcée les critères de qualité et de durabilité à atteindre, il sera plus facile pour une entreprise de garantir à son client les qualités du béton coulé en décidant de se fournir auprès d'une centrale BPE. En effet, les centrales BPE ont quoiqu'il arrive une meilleure gestion de la qualité en élaborant des plans qualité et qui sont en totale conformité avec les exigences de la nouvelle norme.

En terme de responsabilité, il est préférable pour une entreprise d'avoir recours au béton BPE surtout si elle n'a pas cette habitude de faire soi-même son béton sur chantier et donc d'avoir déjà établi un plan qualité.

Un des critères les plus importants lors du choix de telle ou telle solution se révèle être les zones de stockage sur le chantier. En effet, si le chantier présente très peu d'aires de stockage ou de circulation, il sera très difficile de pouvoir implanter une centrale sur chantier. En effet, avec une centrale sur chantier, il faut prévoir la place pour stocker les granulats, le ciment et la place pour implanter l'appareil. Ainsi sur un chantier de bâtiment comme celui de la DRDE à Strasbourg, il n'aurait pas été possible de pouvoir implanter un tel dispositif étant donné le peu de place qu'il y a sur le site. En effet, le peu de place qu'il pouvait y avoir était principalement destiné au stockage des certains éléments préfab, et à la circulation de la grue mobile en périphérie du bâtiment.

Par ailleurs, les contraintes environnementales se font de plus en plus rudes et une centrale sur chantier présente de nombreux inconvénients en termes d'environnement. En effet, tout d'abord, une centrale sur chantier est très bruyante. Or dans un cadre urbain ce type d'installation est très mal perçu par le voisinage.

Finalement, bien que le béton fait par une centrale sur chantier présente des coûts de revient moins élevés que le BPE lorsqu'on atteint des volumes importants de béton (10000 m³), cette solution présente de très nombreux inconvénients qui au final peuvent s'avérer très pénalisants pour un chantier.

Cependant, une centrale sur chantier peut se révéler être complémentaire au BPE dans le cas de très gros chantiers et donc de réduire les coûts liés au béton. Il est peut également être très pratique dans le cas de gros chantiers implantés en ville et où les conditions d'accès sont réduites dues à une forte densité de circulation qui provoquerait des retards de livraison.

III. Etude spécifique : critères de choix entre voile banché coulé en place et voile préfa prémur

III.1 - Les enjeux

Dans un monde de plus en plus concurrentiel et où la concurrence est rude, il est important pour une entreprise de BTP d'être compétitive et de satisfaire les exigences du client. Dans la majorité des constructions, les exigences premières du client sont le respect du planning, la durabilité et la qualité de l'ouvrage réalisé, et le coût final.

Dans le cadre du Gros-Œuvre, l'entreprise se doit de choisir les méthodes et les techniques qui lui permettront de réaliser les ouvrages stipulés dans son marché tout en respectant les conditions imposées par son client.

Plus particulièrement, on peut s'apercevoir que les voiles occupent une place importante dans l'infrastructure ou la structure d'un bâtiment.

Ainsi on est en droit de se demander quelle technique de conception des voiles est à privilégier suivant les conditions de la construction afin d'aboutir au meilleur compromis. Les deux méthodes permettant de réaliser des voiles sont :

- les voiles banchés coulés en place
- la technique du prémur

III.2 - Description sommaire de chacune des 2 techniques

Afin de pouvoir comparé et comprendre les critères qui permettent de choisir telle ou telle technique, il me paraît judicieux de décrire chacune de deux méthodes.

a. Voile banché coulé en place

L'ensemble des professionnels du BTP connaisse la façon de procéder pour réaliser des voiles coulés en place mais il est bon de rappeler brièvement cette technique.

Ainsi les banches de fabrication industrielle sont des coffrages outils qui, accouplés face à face, permettent de réaliser des murs d'une hauteur de 1 à 3 mètres. Réalisés en un panneau, munies de tous les équipements nécessaires à leur utilisation, elles constituent un poste de travail et doivent assurer la sécurité du personnel affecté à leur mise en œuvre.

Les banches sont insérées dans un train de banches au cours de cycles.

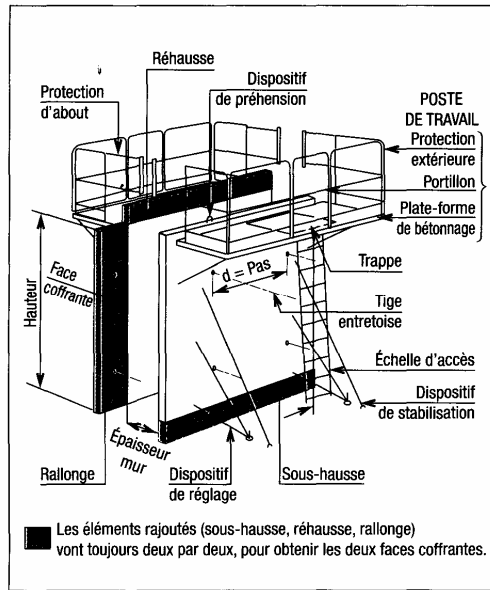
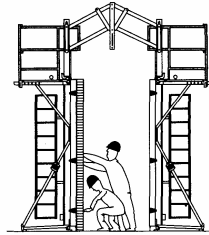


Figure 15 - Eléments constitutifs d'une banche

Les étapes dans la réalisation d'un voile banché sont :

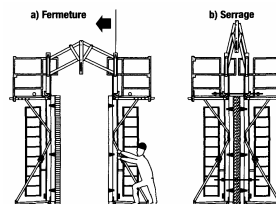
- Mise en place des banches



- Mise en place des réservations et mannequins

- Mise en place des armatures

- Fermeture et serrage du coffrage



- Mise en place du béton en n'oubliant pas de vibrer le béton par passe

- Stabilisation des banches

- Décoffrage des voiles réalisés

b. Voile préfa prémur

b.1) Définition

Le prémur courant est destiné à la réalisation de murs, porteurs ou non porteurs, de sous-sol, de murs intérieurs de refends, de poutres voiles ou de murs de façades. Ils peuvent être associés à des éléments structuraux complémentaires tels que poteaux et poutres, préfabriqués ou coulés en place.

Ils sont utilisables en locaux d'habitation, bureaux, établissements recevant du public ou autres locaux de type industriel.

Le prémur courant est constitué de deux parois minces préfabriquées en béton armé, généralement sans acier en attente, maintenues espacées par des raidisseurs métalliques verticaux et servant de coffrage en œuvre à un béton prêt à l'emploi (ou fait sur chantier).

Des aciers de liaison sont insérés entre les deux faces du prémur et lient les panneaux entre eux. Les prémurs peuvent être associés à des éléments structuraux complémentaires coulés sur place ou préfabriqués auxquels ils peuvent être reliés par des cadres en acier de continuité.

Le prémur est composé de deux parois dont l'épaisseur varie entre 5.00 et 6.00 cm reliées entre elles par des raidisseurs espacés de 60 cm.

La fabrication se déroule en trois étapes principales :

- 1^{er} jour : bétonnage de la 1^{ère} paroi de 5cm puis séchage à l'étuve,
- 2^{ème} jour : bétonnage de la 2^{ème} paroi, retournement de la 1^{ère} paroi sur la 2^{ème} puis séchage à l'étuve,
- 3^{ème} jour : décoffrage et stockage du murs sur box ou palettes.

Le béton des parois préfabriquées est du C40/50 alors que le béton de remplissage de la paroi intérieure est du BPE C25/30 - 0/16

En ce qui concerne le ferrailage, les peaux sont armées avec des barres HA (Fe 500) dont la section et l'espacement sont adaptés afin de respecter les sections définies par le BET Structure

Chaque paroi du prémur comporte au minimum les armatures suivantes :

Armatures verticales : HA 6 e=20cm

Armatures horizontales : HA 6 e=20cm

On prendra en compte un poids maximum de 280 kg/m² pour avoir une idée approximative du poids des panneaux.

Les dimensions maximales du prémur correspondent à un rectangle de 11.86 x 2.99m avec des épaisseurs courantes allant de 18 cm à 40 cm. On prendra en compte un poids maximum de 280 kg/m² pour avoir une idée approximative du poids des panneaux.

L'aspect du parement courant du prémur correspond à une paroi brute de décoffrage contre moule. Cependant l'intégration d'une matrice particulière peut être envisagée.

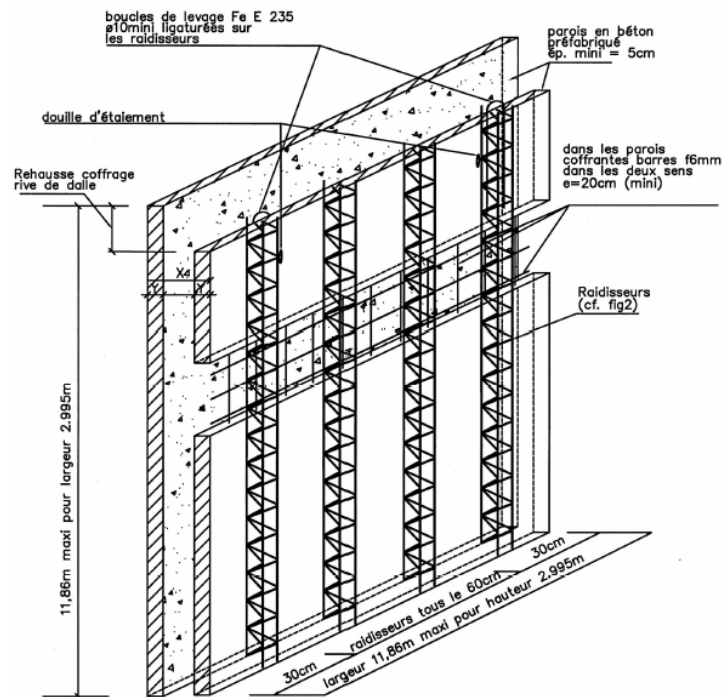


Figure 16 - Schéma d'un prémur

b.2) Mise en œuvre

Il faut 3 jours pour fabriquer un prémur en usine et la livraison sur chantier peut donc avoir lieu à partir du 4^{ème} jour. Ils arrivent par camion sur chantier à raison de 1 à 2 camions par jour suivant les cadences de pose et les stocks à prévoir en cas de fermeture de l'usine. Les prémurs sont déchargés à l'aide de la grue à tour par l'intermédiaire de 2 boucles de levage incorporées dans chaque prémur. Ils sont disposés à la verticale dans des racks ou boxes fournis par le préfabriquant ce qui permet de pouvoir, par la suite, prendre n'importe lequel des panneaux très rapidement.

Avant de poser le prémur, il faut vérifier que les attentes des fondations ou des voiles inférieurs soient bien disposées entre les deux parois du prémur.

Il faut ensuite préparer l'implantation du prémur, son alignement, son calage et mettre les lestes en place.

Deux ou trois hommes avec un grutier sont nécessaires à la pose d'un prémur qui dure entre 10 et 30 minutes en général. Les opérations de pose sont les suivantes :

1. Présenter le prémur
2. Descendre jusqu'au dessus des armatures en attentes
3. Caler le prémur contre le prémur précédemment posé
4. Descendre le prémur sur ces cales (le calage assure le remplissage du joint du pied de mur par le béton).

5. Fixer les étais tire pousse sur les douilles du prémur prévues à cet effet et sur les lests béton (ou directement sur un plancher ou une fondation).

6. Régler le prémur

7. Serrer et bloquer les points de fixations avant de décrocher les élingues.

Une fois la pose terminée, une autre équipe s'occupe de glisser les HA filants de liaison et de glisser les aciers de coutures à la jonction de deux prémurs.

Le bétonnage par niveau sera réalisé à l'aide de PIRL (Passerelle Individuelle Roulante Légère).

Un autre prémur peut maintenant être posé et ainsi de suite.

Le chef de chantier et le RCT décident des longueurs à couler au fur et à mesure de l'avancement. Un arrêt de bétonnage est réalisé aux 2 extrémités de la longueur définit avec du nergalto et le bétonnage peut avoir lieu.

Avant le bétonnage il faut mettre en place un cordon de mousse polyuréthane entre les panneaux ou en rive basse pour éviter les coulées de laitance.

Le bétonnage sera réalisé à la benne à béton.

Enfin, il restera les finitions et le traitement des joints.



Figure 17 – Pose et stabilité d'un prémur

III.3 - Avantages et inconvénients de chaque méthode

Dans un premier temps on peut s'intéresser au ratio mains d'œuvre. En ce qui concerne le ratio main d'œuvre, le prémur se révèle être meilleur comparativement aux voiles banchés.

En effet, on peut estimer que pour un voile courant sans réservations, le ratio est à 1,15h/m² (coffrage/décoffrage : 0,70h/m², ferrailage : 0,15h/m², bétonnage : 0,3h/m²), tandis que pour un prémur, le ratio serait plutôt de 0,65h/m² (pose : 0,40h/m², ferrailage clavetage : 0,10h/m², bétonnage : 0,15h/m²).

On peut également préciser que plus le prémur sera long et plus le ratio sera bas. En effet, il faudra le même temps de pose pour une surface beaucoup plus importante.

Ainsi la technique du prémur va permettre de gagner en productivité et de réduire la durée du chantier. Par exemple, pour le chantier de la DRDE, une étude avait été menée pour comparer les deux méthodes. Il s'est avéré que l'utilisation des prémurs permettait de gagner 1 mois sur le planning.

Puis, on peut dire que l'espace de travail avec les prémurs va pouvoir être diminué et donc cette diminution de l'espace de travail va entraîner de façon inévitable une diminution des terrassements et des remblais. Cette diminution des terrassements et des remblais va impliquer une baisse des coûts.

Par ailleurs, grâce aux prémurs on aura une plus grande constance de qualité liée à l'industrialisation du chantier.

Cette qualité se traduit tout d'abord par la qualité du parement qui est réalisé à l'aide de béton de classe C40/50, et donc le béton est plus serré (plus de fines et plus de ciment et moins de pores). Par ailleurs, les parois d'une épaisseur d'environ 5 cm sont réalisées de façon consécutive (et non simultanément) et sont vibrées sur des tables de vibration ce qui accroît l'homogénéité de la vibration, ce qui rend le parement plus lisse et donc augmente la qualité du parement.

Dans certains cas, les voiles seront enterrés (notamment dans le cas de parkings souterrains). Or afin d'imperméabiliser les voiles en contact avec le sol environnant il est indispensable d'appliquer sur des murs banchés une couche extérieure d'imperméabilisation du type Aquanol. Or avec des prémurs, étant donné que le béton est plus serré au niveau de ses deux parois, la couche d'imperméabilisation s'en retrouve réduite.

Prenons pour exemple le chantier de la DRDE, ce chantier présente deux niveaux de sous-sol. Avec des voiles banchés il aurait été nécessaire de réaliser l'imperméabilisation des voiles sur une hauteur de 6 m. Mais grâce aux prémurs qui ont été mis en place, l'imperméabilisation ne s'est faite que sur 2 m de haut.

L'imperméabilisation s'élève à 9 €/m² HT. Ainsi sur les 200 m linéaires l'économie fut d'environ 7000 €.

Cependant les prémurs présentent des problèmes liés à la conception et à la réalisation des joints de construction entre panneaux. En effet, le bétonnage correct du nœud implique certaines précautions.

On rencontre deux types de traitement de joints :

- le traitement des joints enterrés : il faut fermer le joint au mortier de résine puis appliquer une bande adhésive de type Bâtibande ou Soprasolin.
- Le traitement des joints extérieurs non enterrés, par l'application d'un primaire 1^{ère} catégorie, puis le marouflage du joint avec filet et traitement par un RPE en façade

En ce qui concerne les façades, et notamment la présence de joints décoratifs en façade, la technique du prémur va permettre d'obtenir des joints beaucoup plus soignés sans nécessité de finitions. En effet, ceux-ci seront directement réalisés en usine.

De plus, l'utilisation de prémurs va permettre de supprimer les coffrages en rive de dalle. En effet, la peau extérieure du prémur va être surélevée et va donc servir de coffrage perdu.

Description du coffrage en rive de dalle :

Avec des voiles banchés

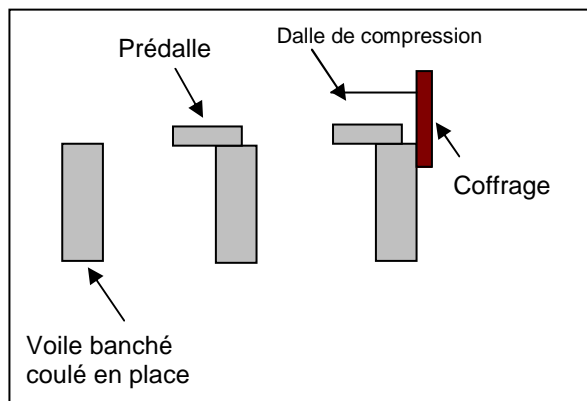


Figure 18 – Coffrage de rive des voiles coulés en place

Avec des prémurs

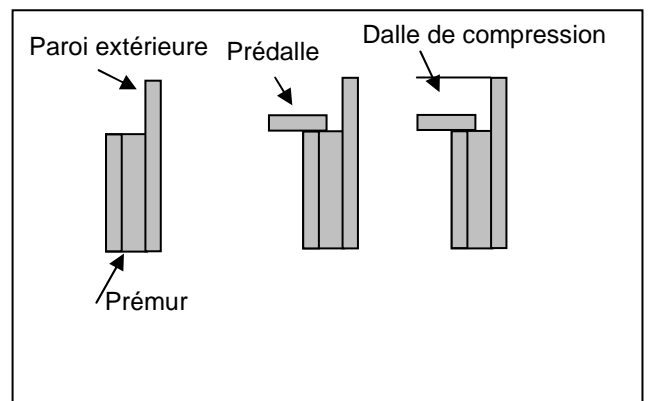


Figure 19 – Coffrage de rive des prémurs

Par ailleurs, les prémurs réduisent de façon considérable les finitions à réaliser sur les voiles, à l'intérieur et à l'extérieur. Ceci étant lié à la qualité du parement qui est meilleure que celle des voiles banchés.

Un des autres points négatifs des prémurs est que pour l'instant aucun préfabricant de panneaux ne sait réaliser de prémurs courbes. Ainsi lorsqu'un bâtiment présente de nombreuses courbes il ne sera pas possible de recourir à la technique du prémur. Or le coffrage traditionnel va permettre de réaliser toutes les formes désirées.

Enfin pour un voile courant on peut comparer le prix de revient d'un voile banché et le prix de revient d'un prémur.

	Voile banché		Prémur	
MO (tout compris)	$25\text{€}/\text{h} * 1,15\text{h}/\text{m}^2 =$	29,00 €	$25\text{€}/\text{h} * 0,65\text{h}/\text{m}^2 =$	16,00 €
Location banche		7,00 €		
Fourniture (avec 6,5kg armatures)				40,00 €
Acier	$6,5\text{kg} * 1,1\text{€}/\text{kg} =$	7,00 €		
Acier complémentaire			$1,2\text{kg}/\text{m}^2 * 1,2\text{€}/\text{kg} =$	1,50 €
Béton (ép 20 cm)	$60\text{€}/\text{m}^3 * 0,20\text{m} =$	12,00 €	$60\text{€}/\text{m}^3 * 0,10\text{m} =$	6,00 €
Surcoût lié à un béton différent (0/16)			$5\text{€}/\text{m}^3 * 0,10\text{m} =$	0,50 €
MO finition		3,00 €		

Coût 1m2 de voile

58€/m2

62€/m2

Figure 20 – Prix de revient prémur/voile coulé en place

On peut se rendre compte que la technique du prémur est plus onéreuse que celle des voiles coulés en place.

Tableau récapitulatif

	Prémurs	Voiles coulés en place
AVANTAGES	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure qualité de parement - Réduction de la durée de chantier - Pas de coffrage de rive - Limitation du stockage du matériel - Ratio mains d'œuvre meilleur - Moins de finitions - Diminution de l'espace de travail 	<ul style="list-style-type: none"> - Voiles pouvant avoir toutes les formes - Coût moins élevé - Pratique pour des voiles de grande hauteur sans réservations
INCONVENIENTS	<ul style="list-style-type: none"> - Traitement des joints horizontaux et verticaux - Pas de prémurs courbes 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreuses finitions - Aire de stockage important

III.4 - Critères de choix

a. Liste des critères

Grâce à l'expérience que j'ai pu acquérir sur le chantier de la DRDE dont les voiles ont été entièrement réalisés en prémur et à l'expérience des chefs de chantier, conducteurs de travaux, j'ai pu établir la liste des critères principaux permettant de choisir la meilleure solution.

Les critères me paraissant primordiaux dans le choix de la technique du voile coulé en place ou de la technique du prémur sont les suivants :

- Le planning : il est important pour une entreprise de respecter le planning imposé par le client. En effet, en respectant le planning, l'entreprise va contenter le client et va donc pouvoir se placer sur d'autres marchés
- La qualité du parement : pour le client, le voile se doit de présenter le moins de défauts possibles et également proposer une bonne durabilité
- La culture d'entreprise : certaines entreprises ont fait le choix de ne réaliser que des voiles coulés en place pour des soucis de rentabilité du matériel
- Les zones de stockage sur le chantier : certains chantiers sont très exigus et donc limitent les surfaces des zones de stockage
- Le ratio mains d'œuvre : ce ratio est lié indirectement au respect du délai du chantier. En effet, selon la technique le ratio n'est pas le même
- Le coût de revient
- La forme géométrique : à l'aide du coffrage traditionnel il est possible de réaliser toute sorte de forme, ce qui n'est pas encore le cas avec les prémurs qui ne peuvent qu'être plans
- L'emprise des terrassements : afin de réaliser l'infrastructure d'une construction Or en ville où la place est la plupart du temps très restreinte, il est nécessaire de limiter ces terrassements
- Présence ou non de joints creux décoratifs : dans la plupart des constructions de bâtiments, les façades afin de satisfaire à des critères architecturaux présentent des joints creux décoratifs
- Traitement des joints verticaux et horizontaux
- L'épaisseur des voiles: le coffrage permet de réaliser tout type de voiles. Le prémur permet de réaliser des voiles d'une épaisseur comprise entre 16 et 40 cm

III.5 - Grille multicritères

Grille multi-critères

Critères	Pondération	Solutions			
		Voile banché		Prémur	
		Note	Total	Note	Total
Le respect du planning	5	2	10	3	15
La qualité du parement	5	2	10	3	15
Culture d'entreprise	4	2	8	2	8
Matériel interne de l'entreprise	4	2	8	3	12
Les zones de stockage sur le chantier	5	1	5	3	15
Ratio main d'œuvre	4	1	4	3	12
Coût de revient	4	2	8	2	8
L'emprise des terrassements	3	1	3	3	9
Joints creux décoratifs	3	2	6	3	9
Traitement des joints	3	3	9	1	3
Epaisseur des voiles	2	3	9	2	4
La forme géométrique	4	3	12	1	4
Sécurité	4	2	8	3	12
TOTAL pondéré		110		126	
Note minimale		1		1	

La nouvelle norme des bétons: application sur un chantier de bâtiment

III.6 - Synthèse

Ainsi j'ai pu me rendre compte que la standardisation de la réalisation des voiles va entraîner un gain significatif sur le planning, réduire les risques d'erreurs humaines, supprimer les zones de stockage des banches, les zones de montage des banches, entraînant un gain de place sur le chantier, et un gain de productivité.

On peut donc dire que pour un chantier de bâtiment il est intéressant de choisir la technique du voile préfa prémur pour 5 raisons principales :

- une réduction de la durée du chantier par préfabrication en usine de produits manufacturés
- une plus grande constance de la qualité
- une limitation du stockage du matériel sur le chantier (coffrage, banches...)
- un ratio main d'œuvre meilleur
- une baisse des accidents du travail liée à une meilleure sécurité (liée à une baisse du matériel, des manutentions)

Cependant le coffrage traditionnel à cet avantage de pouvoir réaliser toutes les formes voulues notamment des voiles courbes. On peut également s'apercevoir que le coût de revient est moindre. Ainsi il est compréhensible que certaines entreprises fassent le choix de ne pratiquer que cette technique, dans le but d'amortir le matériel et de permettre à ses compagnons d'acquérir une réelle compétence en coffrage et donc de gagner en productivité.

Par contre, il est difficile sur un chantier de faire un compromis et de d'utiliser les deux techniques en même temps. En effet, si l'on décide de choisir en infrastructure la technique du prémur, il faudra continuer avec cette technique pour la structure. Si l'on décide de passer en coffrage traditionnel pour la structure, l'amortissement du matériel risque d'être nettement moins bon.

Enfin, à l'avenir la technique du prémur risque d'acquérir de plus en plus de part du marché puisque des prémurs avec isolation incorporée vont bientôt voir le jour.

CONCLUSION

L'étude que j'ai réalisée sur la nouvelle norme des bétons NF EN 206-1 fut très intéressante car j'ai pu acquérir des nombreuses notions et de connaître plus profondément les spécifications de cette norme qui est un texte important. Par ailleurs cette étude va également servir à Demathieu et Bard qui va pouvoir s'en servir pour expliquer à ces cadres de chantier l'importance de cette norme. Ainsi on peut dire que cette norme NF EN 206-1 est un texte majeur par l'obligation de la mise à jour des textes normatifs en vigueur (fascicule 65 A, livret 2.21 de la SNCF, DTU 21 et DTU 13.3 pour les dallages, ...). Cette norme présente des avancées importantes :

- elle favorise la sécurité et la fiabilité des bétons produits, par l'augmentation des contrôles et l'augmentation de la résistance moyenne
- elle favorise une meilleure durabilité des ouvrages, en définissant 18 classes d'exposition et en définissant 4 classes de chlorure
- elle assure la clarté et la transparence sur les résistances, puisque la commande des BPS doit indiquer la classe de résistance, la classe d'exposition, la classe de consistance, la dimension maximale des granulats et la classe de chlorure; et l'ensemble des exigences imposées par la norme en termes de conception, de fabrication et de contrôles garantit la qualité et la régularité des produits livrés.

L'incidence financière (augmentation des prix des BPE et du prix de revient des bétons faits sur chantier) provoquée par l'application de la norme NF EN 206-1 par une réorganisation de la gestion de la qualité, par l'augmentation de ciment dans les formules, par la modification du matériel, par l'augmentation des contrôles est largement compensée par l'amélioration de la durabilité des ouvrages et par l'augmentation de la qualité des bétons.

En ce qui concerne les critères de choix entre BPE et bétons faits sur chantier mon étude a montré que la solution du béton fait par une centrale sur chantier présente de nombreuses faiblesses latentes voire rédhibitoires. La norme NF EN 206-1 ayant renforcé la qualité du béton notamment en ce qui concerne la résistance, fragilise le béton fait sur chantier. D'autant plus que le béton fait sur chantier va alors nécessiter l'emploi d'une personne qualifiée afin de ne pas commettre d'erreur lors de la réalisation du béton et dans la gestion des stocks.

Ainsi la prise de risque pour assurer un béton de bonne qualité ou de qualité comparable à celui d'une centrale BPE est beaucoup plus importante. En effet, la norme NF EN 206-1 ayant renforcée les critères de qualité et de durabilité à atteindre, il sera plus facile pour une entreprise de garantir à son client les qualités du béton coulé en décidant de se fournir auprès d'un centrale BPE, qui est plus apte à certifier un béton de qualité.

Un des critères les plus importants lors du choix de telle ou telle solution se révèle être les zones de stockage sur le chantier. En effet, si le chantier présente très peu d'aires de stockage ou de circulation, il sera très difficile de pouvoir implanter une centrale sur chantier. En effet, avec une centrale sur chantier, il faut prévoir la place pour stocker les granulats, le ciment et la place pour implanter l'appareil.

Par ailleurs, les contraintes environnementales se font de plus en plus rudes et une centrale sur chantier présente de nombreux inconvénients en termes d'environnement (notamment le bruit).

Finalement, bien que le béton fait par une centrale sur chantier présente des coûts de revient moins élevés que le BPE lorsqu'on atteint des volumes importants de béton (10000 m³), cette solution présente de très nombreux inconvénients qui au final peuvent s'avérer très pénalisants pour un chantier.

Enfin dans la dernière partie de mon étude, j'ai pu me rendre compte que la standardisation de la réalisation des voiles présente de nombreux avantages. En effet, On peut donc dire que pour un chantier de bâtiment il est intéressant de choisir la technique du voile préfa prémur pour 5 raisons principales :

- une réduction de la durée du chantier par préfabrication en usine de produits manufacturés
- une plus grande constance de la qualité
- une limitation du stockage du matériel sur le chantier (coffrage, banches...)
- un ratio main d'œuvre meilleur
- une baisse des accidents du travail liée à une meilleure sécurité (liée à une baisse du matériel, des manutentions)

Cependant le coffrage traditionnel à cet avantage de pouvoir réaliser toutes les formes voulues notamment des voiles courbes. On peut également s'apercevoir que le coût de revient est moindre. Ainsi il est compréhensible que certaines entreprises fassent le choix de ne pratiquer que cette technique, dans le but d'amortir le matériel et de permettre à ses compagnons d'acquérir une réelle compétence en coffrage et donc de gagner en productivité.

Par contre, il est difficile sur un chantier de faire un compromis et de d'utiliser les deux techniques en même temps. En effet, si l'on décide de choisir en infrastructure la technique du prémur, il faudra continuer avec cette technique pour la structure. Si l'on décide de passer en coffrage traditionnel pour la structure, l'amortissement du matériel risque d'être nettement moins bon.

Enfin, à l'avenir la technique du prémur risque d'acquérir de plus en plus de part du marché puisque des prémurs avec isolation incorporée vont bientôt voir le jour.

Références bibliographiques

^I *La norme NF EN 206-1*

^{II} **FNTP**, *Etablissement des commandes de bétons prêts à l'emploi*

^{III} **Eyrolles**, *Le mémento du béton : Guide d'application pour l'exécution d'ouvrages*

^{IV} **Georges Dreux, Jean Festa**, *Nouveau guide du béton et de ses constituants*, Eyrolles

^V **CSTB**, *Avis technique 1/04-812 Prémur courant*

^{VI} **D. Didier, M. Le Brazidec, P. Nataf, J. Thisset**, *Précis de bâtiment : Conception, mis en œuvre, normalisation*, Nathan