

LE BÉTON À HAUTES PERFORMANCES

Comment concilier l'exigence de réduction de la quantité d'eau – synonyme de résistance et de durabilité accrues – avec l'exigence d'un surcroît d'eau – synonyme d'ouvrabilité facilitée ? Pour répondre à cette question propre au béton, de nombreuses années de recherche ont été nécessaires. La découverte de superplastifiants très performants a constitué un véritable tournant dans l'histoire des bétons : est de rendre le béton nettement plus fluide, sans ajouter d'eau. Les superplastifiants ont créé la base du développement des bétons hautes performances (BHP), dont les applications se retrouvent principalement dans le secteur du béton préfabriqué.

Les bétons à hautes performances présentent une durabilité améliorée et une résistance accrue. Ils peuvent supporter des charges supérieures ou permettre des constructions plus élancées. Ils peuvent également présenter des formes plus complexes et permettent de réaliser de plus grandes portées.

Le présent bulletin examine des nouveaux développements observés dans le domaine de la technologie du béton. Il aborde ensuite la composition, la mise au point et les propriétés du béton à hautes performances. Enfin des applications potentielles sont commentées au moyen de quelques exemples.

1. Le béton à haute résistance

La résistance à la compression est généralement considérée comme la principale propriété caractéristique du béton. Depuis la découverte du béton armé, les études ont été axées sur la recherche de méthodes permettant de renforcer cette résistance. Des progrès considérables ont été enregistrés dans ce domaine au cours de ces dernières décennies. Aux États-Unis, durant les années 1950, une résistance à la compression de 35 MPa était considérée comme une résistance élevée. Dans les années 1970, la limite a été portée à 70 MPa, alors qu'en 1990, la notion de béton à haute résistance était réservée à un béton d'une résistance à la compression comprise entre 80 et 100 MPa. Et cette évolution n'est pas terminée ! Des résistances à la compression supérieures à 120 MPa ont été réalisées lors de constructions récentes. La notion de 'haute résistance' est dès lors très relative et, de toute évidence, évolutive. Il n'est dès lors pas étonnant que coexistent plusieurs définitions du 'béton à haute résistance'.

Selon la norme européenne EN 206-1, le béton est considéré comme un 'béton à haute résistance' à partir d'une classe de résistance de C55/67. Le premier nombre derrière la lettre C fait référence à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cylindres de 300 mm de hauteur et d'un diamètre de 150 mm, et le deuxième nombre, à la résistance à la compression caractéristique mesurée sur des cubes de 150 mm de côté. La définition ne précise aucune classe de résistance maximale. Elle peut cependant être de facto déduite de la liste des classes de résistance possibles allant jusqu'à la classe C 100/115 (tableau 1).

2. Béton à hautes performances (BHP)

L'augmentation de la résistance à la compression du béton s'accompagne fréquemment de l'amélioration d'autres propriétés, comme la résistance à la traction, la rigidité, la résistance à l'usure, la durabilité, etc. Pour certaines applications, ces propriétés peuvent même être plus essentielles que le niveau de résistance atteint. Dans pareil cas, le choix des composants et de la composition ne doit pas être axé sur l'obtention d'une résistance maximale, mais davantage sur l'obtention d'une prestation optimale des propriétés souhaitées. La résistance supérieure obtenue est – pour ainsi dire – une incidence de second ordre.

Dans ce cadre, le contenu de l'expression 'béton à haute résistance' s'avère insuffisant. Nous lui préférons dès lors l'appellation 'béton à hautes performances', qui est clairement plus générale. Il est parfaitement possible d'obtenir un béton présentant des hautes performances pour une propriété donnée, tout en ne possédant pas une résistance nettement supérieure. C'est ainsi que le béton autocompactant a été initialement décrit au Japon comme un béton à hautes performances, en raison de son ouvrabilité exceptionnelle et de sa (très probable) amélioration au niveau de la durabilité. Le béton autocompactant ne doit cependant pas nécessairement être un 'béton à haute résistance'.

3. Délimitation du sujet

La question du béton à hautes performances est très vaste ; elle recouvre tous les aspects le différenciant du béton traditionnel, c-à-d. des changements relatifs tant aux composants, à la composition, à la mise en œuvre qu'aux propriétés.

Chacun de ces quatre volets sera examiné ci-après dans le détail. Au préalable, les nouvelles perspectives et les nouveaux développements dans le domaine de la technologie du béton, permettant la production de béton à hautes performances, passeront la revue.

Vu l'ampleur du sujet, l'approche sera volontairement synthétique. En raison de la très grande spécificité du concept du béton autocompactant, ce sujet ne sera pas abordé dans le présent bulletin (voir *Dossier Ciment - bulletin n° 36*).

4. Généralités : les nouveaux développements dans le domaine de la technologie du béton

Le dilemme : plus ou moins d'eau ...

Des années durant, la fabrication du béton n'a nécessité que des granulats, du ciment et de l'eau. Ce dernier composant remplit un double rôle : il permet l'hydratation du ciment et confère au béton frais sa nécessaire ouvrabilité. Cette ouvrabilité nécessite cependant une quantité d'eau supérieure à ce qui est strictement nécessaire pour l'hydratation. Une partie de cette eau – pour un rapport eau-ciment de 0,5, elle équivaut à environ la moitié de l'eau de gâchage – reste dans le béton au terme du processus de prise et de durcissement. Elle se répand dans tout le béton et cause l'apparition d'un réseau de pores et de vides. L'augmentation de l'excédent en eau est proportionnelle au diamètre moyen des pores ainsi que de leur volume. Un nombre accru de pores de plus grandes dimensions affaiblit la structure du matériau et réduit dès lors la résistance du béton.

Tableau 1 – Caractéristiques de résistance et de déformation suivant la norme EN 1992-1-1:2004

	Classes de résistance													
	→ bétons à haute résistance													
f_{ck} résistance caractéristique en compression sur cylindre [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ résistance caractéristique en compression sur cube [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} résistance moyenne en compression [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} résistance moyenne en traction directe [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
E_{cm} module d'élasticité secant [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ϵ_{c1} déformation au pic de contrainte [‰]	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8

Nous observons donc un lien direct entre la résistance à la compression et l'eau de gâchage ajoutée au béton ou – formulé de manière plus scientifique – entre la résistance à la compression et le rapport entre la quantité d'eau et de ciment, que l'on appelle le rapport eau-ciment, E/C. En fonction de l'augmentation ou de la diminution de ce rapport, la résistance du béton diminuera ou augmentera. Ce constat n'est pas neuf. Dès 1894, le Français René Feret avait postulé cette conclusion de manière empirique (fig. 1). L'augmentation de la résistance est cependant limitée. À partir d'un rapport eau-ciment trop faible, le béton ne peut plus être mis en œuvre. Les vides et les pores qui en résultent réduisent à nouveau la résistance, comme précisé dans l'illustration.

Progressivement, les chercheurs ont découvert qu'il existait également un lien entre le rapport eau-ciment et la durabilité. Le volume de pores est réparti sur un réseau de vides infiniment nombreux et de formes très variables. La plupart de ces vides ou pores présentent un diamètre de 10^{-9} à 10^{-8} m – les pores de gel – et sont si petits que le transport de molécules (vapeur, gaz, etc.) en devient impossible. Nous observons cependant aussi des pores de plus grandes dimensions – les pores dit capillaires – dont le diamètre varie de 10^{-7} à 10^{-5} m. Leur quote-part dépend du rapport eau-ciment et de la façon dont le ciment est hydraté, exprimée par le taux d'hydratation. Plus le taux d'hydratation augmente, plus le ciment est hydraté, plus la quantité d'eau liée croît et, par conséquent, plus la quantité d'eau libre diminue. La figure 2 montre comment le volume de pores capillaires diminue en cas de baisse du rapport eau-ciment et de hausse du taux d'hydratation. L'humidité, la vapeur d'eau, les gaz et toutes sortes de substances nocives peuvent pénétrer assez facilement dans les pores capillaires, y migrer, voire détériorer le matériau de l'intérieur. La durabilité du béton augmente donc avec la réduction du volume des pores (porosité réduite, compacité accrue) et du rétrécissement des pores (réduction de la perméabilité). Il s'ensuit que le rapport eau-ciment doit être le plus faible possible ...

Fig. 1 – Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C

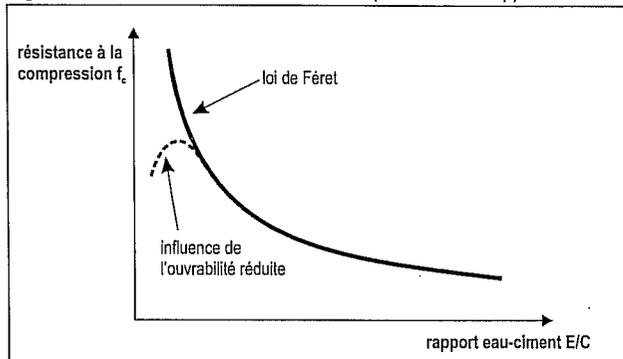
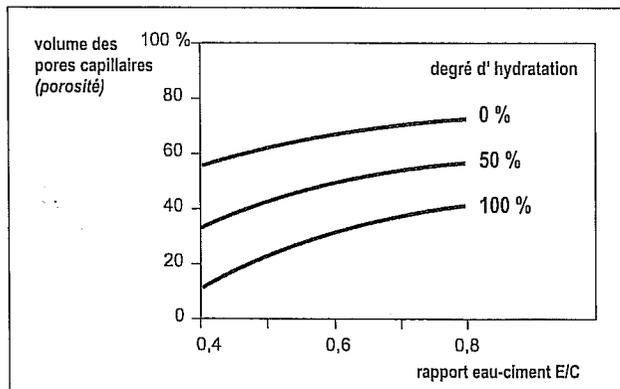


Fig. 2 – Relation entre la porosité et le rapport E/C pour différents degrés d'hydratation



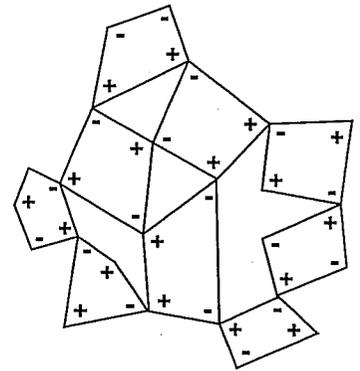
Mais qu'en est-il de l'ouvrabilité ? Comment concilier deux exigences contradictoires : réduire la quantité d'eau pour obtenir une résistance et une durabilité accrues, et ajouter de l'eau pour faciliter l'ouvrabilité ? De nombreuses années ont été consacrées à la recherche d'une réponse à ce nœud gordien...

Découverte des superplastifiants

La découverte des plastifiants – et, plus particulièrement, de superplastifiants très puissants dans les années 1970 – a constitué un véritable tournant. L'effet de ces adjuvants est de rendre le béton nettement plus liquide, sans ajouter d'eau.

La surface de chaque grain de ciment contient des charges électriques libres. Les charges opposées s'attirent mutuellement. Au contact de l'eau, les grains s'agglomèrent alors en flocculats. L'eau de gâchage qui se trouve entre ces flocculats sera toutefois emprisonnée (fig. 3). À partir de ce moment, elle ne contribuera plus à la fluidité de la pâte de ciment. L'ajout d'une quantité supplémentaire d'eau de gâchage sera nécessaire pour obtenir l'ouvrabilité souhaitée.

Fig. 3 – Des charges opposées sur la surface des grains de ciment provoquent la floculation



Les superplastifiants empêchent la formation néfaste des agglomérats (fig. 4). Les molécules du superplastifiant se fixent par adsorption sur l'interface entre le grain de ciment et l'eau de gâchage. Une fois adsorbé, le superplastifiant forme une charge négative autour de chaque grain de ciment. Ce faisant, les grains se repoussent les uns des autres. La dispersion qui en résulte réduit la viscosité de la pâte de ciment et augmente l'ouvrabilité. La structure moléculaire du superplastifiant – sous la forme de longues chaînes – renforce également cet effet. Les molécules fixées les unes aux autres pour former des spirales avec des ramifications dans différentes directions s'enroulent entre les grains de ciment et empêchent de la sorte leur rapprochement réciproque. Grâce aux structures de polymères modernes 'en forme de peigne', il est possible de réduire le rapport eau-ciment à moins de 0,3. La seule utilisation d'un superplastifiant permet également d'obtenir des résistances à la compression d'environ 80 MPa.

Fig. 4 – Les superplastifiants empêchent la floculation :

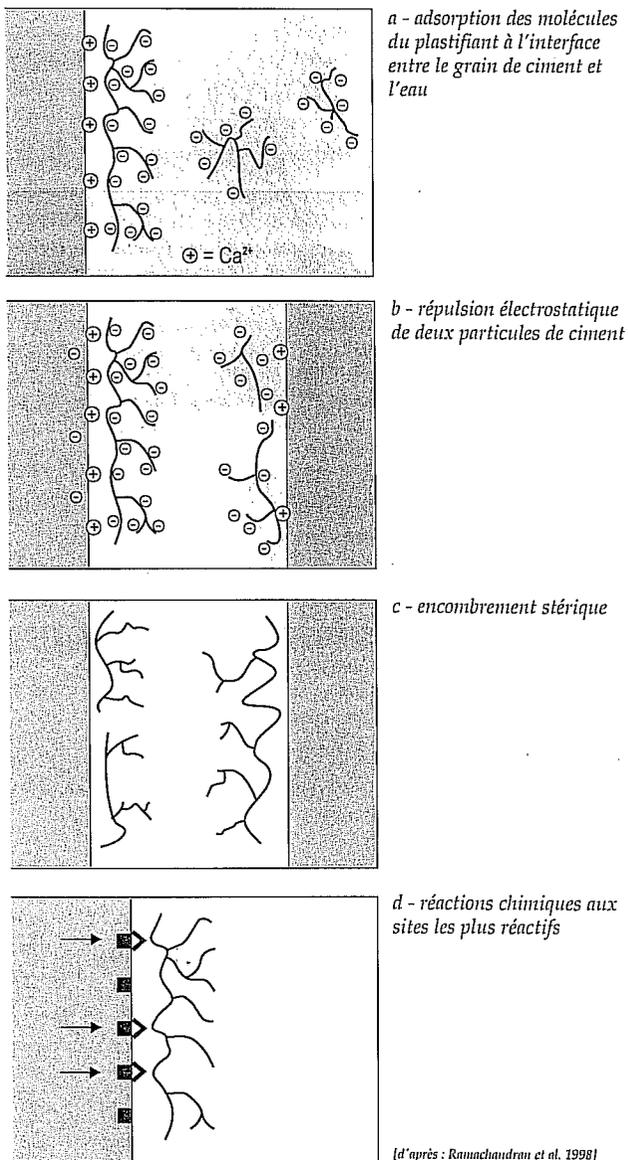
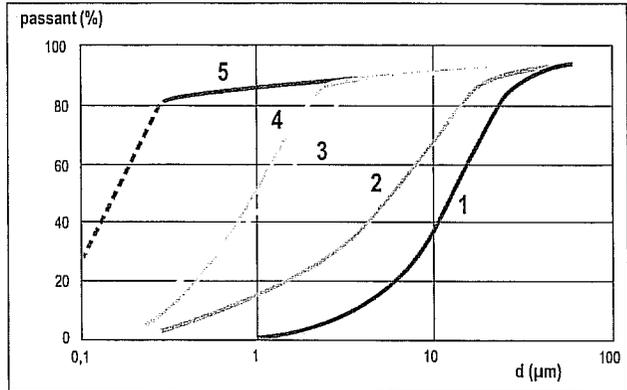


Fig. 5 – Granulométrie des matières fines:

- 1 - ciment
- 2 - fines calcaires
- 3 - ultrafines calcaires
- 4 - ultrafines siliceuses
- 5 - fumée de silice



L'incidence de particules extrêmement fines (additions)

La réduction du rapport eau-ciment par l'ajout d'un superplastifiant permet d'obtenir un béton plus compact. Des études ont cependant démontré que la composition de l'importante zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment durcie demeure inchangée – c'est-à-dire qu'elle ne devient pas plus compacte. Cette zone est très poreuse et peu résistante. Sa largeur n'est que de 40 μm , mais elle joue un rôle crucial lors de la reprise des contraintes par le béton.

L'ajout de particules extrêmement fines (fig. 5) permet de combler les minuscules vides dans cette zone de transition. La présence du superplastifiant est en outre essentielle pour éviter la formation de conglomerats. Parmi ces substances, citons notamment les cendres volantes, le filler calcaire, le quartz concassé, les laitiers de haut fourneau broyés et les fumées de silice. En raison de leurs petites dimensions et de leur immense surface spécifique, les fumées de silice sont les plus efficaces. La surface spécifique des fumées de silice oscille entre 15 000 et 25 000 m^2/kg et est nettement supérieure à celle du ciment, comprise entre 350 et 500 m^2/kg . Les fumées de silice disposent en outre de propriétés pouzzolaniques. Elles se lient à la chaux libérée lors de l'hydratation du ciment et contribuent de la sorte au développement de la résistance.

Outre le compactage de la pâte de ciment durcie autour des granulats, ces particules ultrafines assurent également un remplissage généralement plus homogène du squelette granulaire dans la zone la plus fine. La compacité augmente, ce qui améliore la durabilité. Un autre effet positif de ces additions est leur influence favorable sur la stabilité du béton frais. Cette influence est particulièrement utile lors de la fabrication de bétons à très haute ouvrabilité. La résistance d'un béton obtenue grâce à un superplastifiant et à des fumées de silice peut excéder 100 MPa.

5. Composition

Le béton à haute résistance, ou plus généralement le béton à hautes performances, se compose de granulats, d'eau, de ciment, de superplastifiant, et éventuellement d'une addition (souvent, des fumées de silice). Un retardateur de prise y est parfois ajouté pour augmenter le temps de mise en œuvre. Le superplastifiant et le retardateur doivent être réciproquement compatibles, ainsi qu'avec le ciment utilisé. Etant donné que la résistance du béton dépend bien évidemment aussi de la résistance du ciment, un ciment de la classe 52,5N est la plupart du temps utilisé pour du béton à haute résistance, voire du 52,5R si une résistance initiale très élevée est souhaitée.

Les granulats connus pour les bétons ordinaires conviennent en principe également pour un béton à haute résistance. Si une résistance supérieure est souhaitée, la résistance mécanique du granulat est d'autant plus importante. C'est ainsi que des résistances supérieures à 100 MPa peuvent difficilement être obtenues avec du calcaire, mais peuvent l'être avec du porphyre ou du gravier. La forme joue également un rôle : les granulats concassés permettent d'obtenir un gain de résistance supérieur à 10 MPa. En outre, le diamètre maximal du grain ne peut pas être trop grand. En règle générale, le module d'élasticité des granulats est en effet supérieur à celui de la pâte de ciment durcie, de telle sorte que des concentrations de contraintes apparaissent au niveau des granulats. Le choix d'un grain de plus petite dimension permet d'abaisser les concentrations pour obtenir de plus petits pics. Dans le même temps, l'effet d'adhérence moyen entre les granulats et la pâte de ciment durcie diminue, car la surface spécifique et la quantité de mortier nécessaire à l'enveloppement de tous les grains augmentent. Il va de soi que le diamètre maximal des grains ne peut pas se réduire trop fortement, car, à défaut, la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation des granulats augmentera trop fortement. La plupart du temps, le diamètre maximal des grains sera compris entre 10 et 20 mm, par exemple 16 mm.

La composition doit être optimisée de telle sorte que la granulométrie, des gros grains aux très fins, soit la plus compacte possible. Ce n'est qu'en réduisant au minimum le volume de vides entre les grains que la combinaison idéale entre la résistance et l'ouvrabilité souhaitées, avec un minimum de pâte de ciment et d'eau, peut être réalisée. La multiplicité des composants ne facilite guère la détermination de la composition optimale. Une composition typique contient 450 kg de ciment, un rapport eau-ciment de 0,30, un maximum de 10 % de fumées de silice en fonction de la masse de ciment et 10 litres de superplastifiant par m³ de béton. En règle générale, le diamètre maximal des grains ne dépassera pas 16 mm.

6. Mise en œuvre

Sensible ...

La composition et les propriétés des différents composants ne sont pas constantes, mais varient généralement dans une fourchette de tolérance. De petites divergences ou irrégularités lors du pesage, du mélange, du transport, du coulage et du compactage sont également inévitables. En fonction de l'ampleur de toutes ces différences et de leurs interactions, les propriétés du béton frais et durci varient plus ou moins autour d'une valeur moyenne.

Les principales variables sont la teneur en eau et la quantité de ciment. Le rapport eau-ciment réel différera de la valeur pré-supposée et fluctuera dans une fourchette donnée, appelée intervalle de variation $\Delta_{E/C}$. Il existe également un lien entre le rapport eau-ciment et la résistance à la compression, tel que présenté dans la figure 6. Cette illustration montre également que, pour un $\Delta_{E/C}$ donné, l'intervalle de variation correspondant à la résistance à la compression augmentera en fonction de la réduction du rapport eau-ciment. En d'autres termes, les différences dans la teneur en eau et le dosage du ciment induisent une variation supérieure de la résistance en cas de rapport eau-ciment faible. Le BHP y est dès lors nettement plus sensible que le béton doté d'une résistance normale. Le pesage, le mélange, la mise en œuvre, etc. doivent dès lors s'effectuer de manière extrêmement méticuleuse, dans des marges de tolérance les plus faibles possibles.

Cure

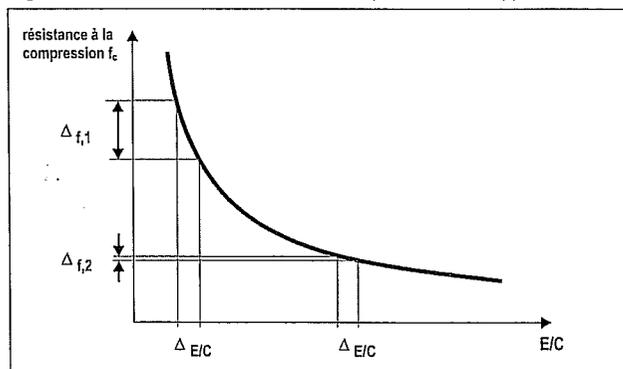
La faible quantité d'eau présente dans le béton à hautes performances, en raison du faible rapport eau-ciment, doit demeurer dans le béton après sa mise en œuvre lors du stade de la réaction avec le ciment. Les particules extrêmement fines qui comblent le squelette granulaire pour former un ensemble très compact et très dense empêchent la migration de l'eau du noyau vers la surface. L'eau à la surface peut s'évaporer, mais n'est pas renouvelée depuis le noyau. Les capillaires de la zone superficielle se vident dès lors progressivement et sont soumis à des contraintes de contraction sans cesse accrues, qui induisent le retrait du béton en surface. La résistance à la traction encore minime du béton jeune ne peut pas absorber les contraintes apparues, ce qui induit l'apparition de fissures. Le béton à haute résistance est donc plus sensible que le béton ordinaire au phénomène que nous appelons la fissuration plastique. La cure du béton fraîchement coulé est dès lors indispensable, par exemple en humidifiant les surfaces non protégées, en apposant des produits de cure pour éviter l'évaporation, ou en le couvrant d'un film...

7. Propriétés

7.1 Effets de la température sur le béton en cours de durcissement

En raison de la teneur élevée en ciment et de l'utilisation de ciment fin (classe 52,5), la production de chaleur, inhérente au processus de l'hydratation, s'intensifie dans le béton à hautes performances par rapport au béton ordinaire. Ce phénomène peut dès lors induire, même dans des éléments qui ne pourraient pas être spontanément qualifiés de 'massifs', des contraintes thermiques relativement élevées. Même si le béton à haute résistance absorbe mieux les contraintes de traction, le risque de fissuration est cependant nettement supérieur. Lors de la conception et de l'exécution, il convient donc d'accorder à ce phénomène une attention suffisante. Des mesures destinées à exclure au maximum le retrait empêché s'imposent dès lors. Les calculs des contraintes en fonction du développement calorifique escompté et des propriétés du béton en phase de durcissement sont souhaitables.

Fig. 6 – Relation entre la résistance à la compression et le rapport E/C



7.2 Comportement en compression

Lorsqu'un béton doté d'une résistance normale est comprimé, les fissures d'adhérence entre la matrice de mortier et le granulat se propageront autour des granulats. A un niveau proche de la résistance à la compression, ces fissures d'adhérence se propageront à toute la matrice de mortier, entraînant l'apparition de fissures dans le mortier. En définitive, le béton cèdera sous l'effet de tout un réseau de fissures ininterrompues dans le mortier, alors que les granulats ne subiront aucun dommage (fig. 7).

Le béton à hautes performances se caractérise par une meilleure adhérence entre les granulats et la matrice de ciment. En outre, la résistance de la matrice sera pratiquement égale à la résistance des granulats. Dès lors, l'apparition et le développement de fissures d'adhérence ou de microfissures seront retardés. A l'approche de la rupture, les fissures se seront désormais généralement propagées au travers des granulats (fig. 8).

Sur le diagramme contrainte-déformation (fig. 9), ce phénomène s'exprime par un comportement légèrement plus linéaire par rapport au béton de résistance conventionnelle. De même, le béton à hautes performances présente un retrait plus marqué après l'obtention de la résistance à la compression, c'est-à-dire après la rupture du béton, et la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro. Le BHP présente en d'autres termes un comportement de rupture fragile plus marqué que le béton de résistance conventionnelle.

Fig. 7 – Béton ordinaire : fissures d'adhérence et fissures dans le mortier

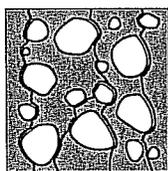


Fig. 8 – Béton à hautes performances : les granulats sont également fissurés

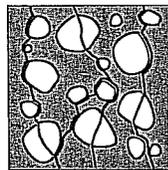
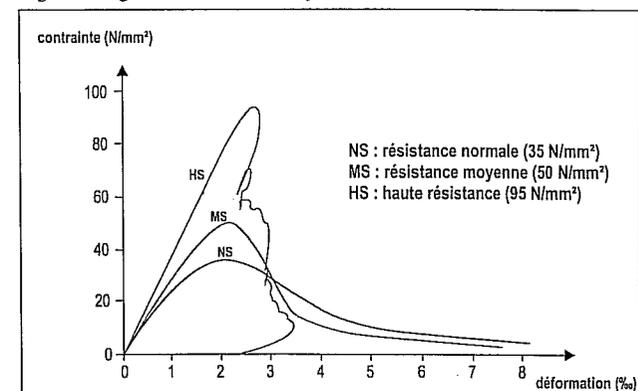


Fig. 9 – Diagramme contraintes-déformation



7.3 Comportement en traction

Généralement, la résistance à la traction du béton est liée à la résistance à la compression. En ce qui concerne le béton conventionnel, différentes formules sont appliquées. Dans la norme EN 1992-1-1:2004, une formule différente est proposée pour le béton à haute résistance par rapport au béton conventionnel (tableau 1). Un élément essentiel est cependant le caractère fragile du béton à hautes performances, signalé ci-dessus. Dès que la résistance est atteinte, la portance tendra très rapidement vers la valeur zéro.

7.4 Rigidité

Le module d'élasticité du béton est essentiellement déterminé par les propriétés des granulats et de la matrice de mortier. Au fur et à mesure que la matrice se consolide et se rigidifie, le béton présentera également une rigidité accrue. Le module d'élasticité du béton à hautes performances est dès lors toujours lié à la résistance à la compression (cfr tableau 1).

7.5 Retrait

Tant le béton à haute résistance que le béton ordinaire sont soumis à un retrait plastique (voir supra), à un retrait endogène (par auto-dessiccation) et à un retrait de dessiccation.

Retrait endogène

Le ciment réagit avec une quantité d'eau donnée. Ce processus s'accompagne d'une réduction du volume. Par rapport au volume initialement occupé par l'eau et par le ciment, le volume du produit de la réaction après hydratation complète sera réduit d'environ 10 %. Au début de la réaction, le béton encore plastique absorbe sans difficulté la réduction volumique. Dès que le béton se rigidifie, la contraction est empêchée. Ce phénomène entraîne le développement de contraintes de traction dans les espaces remplis d'eau. Ces pores en devenir se dilatent, ce qui provoque une sous-pression aspirant l'air extérieur. Dans cet espace désormais partiellement rempli d'eau, apparaissent des forces capillaires qui contractent les pores. Ce retrait interne est donc le résultat de deux processus : un processus chimique et un processus physique. Dans un béton ordinaire, caractérisé par un excédent d'eau, le retrait endogène demeure limité à environ 100×10^{-6} . En ce qui concerne le béton à haute résistance, où la quantité d'eau disponible est nettement moins importante, le ciment attire à lui cette faible quantité d'eau. Les pores s'asséchant progressivement sont soumis à des forces capillaires en augmentation constante, permettant de la sorte au retrait endogène d'atteindre des valeurs clairement supérieures. Plusieurs valeurs sont précisées au tableau 2. Il est manifeste que le retrait endogène augmente avec l'accroissement de la résistance et s'effectue essentiellement à court terme. Etant donné que le retrait endogène résulte du processus d'hydratation, il sera toujours présent, même en cas de cure parfaite du béton. Seuls de nouveaux concepts relatifs à la cure intérieure pourraient s'avérer précieux ; ils sortent cependant du cadre du présent bulletin. De toute évidence, le retrait endogène du béton à hautes performances requiert la nécessaire attention. Conjugué aux éventuelles contraintes thermiques résultant de la chaleur d'hydratation élevée, le retrait endogène pourrait en effet provoquer l'apparition d'importantes fissures dans un BHP frais.

Retrait de dessiccation

Le retrait de dessiccation se produit dans un environnement qui n'est pas saturé en eau. Dans ce cas, de l'eau peut s'évaporer des pores. Ce phénomène donne lieu à des forces capillaires qui contractent les pores et génère par voie de conséquence une réduction du volume. Le niveau du retrait de dessiccation dépend en grande partie de la quantité d'eau évaporable présente dans le béton. Dans des circonstances normales, une fraction importante ne s'évaporerait pas, car elle est liée chimiquement ou est fixée entre les produits d'hydratation.

L'eau présente dans les pores capillaires, de plus grandes dimensions, peut quant à elle s'évaporer. Le volume réduit des pores capillaires est une caractéristique typique du béton à haute résistance. Par rapport au béton ordinaire, il sera dès lors moins sujet au phénomène du retrait de dessiccation. Le *tableau 2* présente un nombre de valeurs pour différentes humidités relatives. Il en ressort que le retrait de dessiccation diminue en cas d'augmentation de la résistance. Le retrait d'un béton de 90 MPa dans un environnement affichant une humidité relative de 50 % est de moitié inférieur au retrait observé pour un béton de 30 MPa. La diminution du retrait se poursuit avec l'accroissement de l'humidité relative. L'addition de fumées de silice n'a aucune incidence sur le retrait final, mais accélère le processus. Le retrait de dessiccation peut toujours se poursuivre, même à plus long terme. L'ampleur de ce retrait peut être sensiblement influencée par des mesures de cure énergiques.

7.6 Le fluage

Le fluage du béton à hautes performances – c'est-à-dire la déformation croissante sous l'effet d'une contrainte constante – est fréquemment inférieur au fluage observé pour un béton de résistance conventionnelle. L'âge du béton au moment de la sollicitation est également extrêmement important pour le BHP. Lorsque la charge est exercée sur un béton jeune, la déformation par fluage sera plus importante que dans le cas d'un béton plus âgé. Il en va de même en ce qui concerne le béton conventionnel.

La norme EN 1992-1-1:2004 définit les formules nécessaires au calcul du fluage ; le *tableau 3* mentionne quelques résultats. Il en ressort par exemple que le coefficient de fluage d'un béton de classe de résistance C 25/30 est environ trois fois supérieur à un béton de classe de résistance C 90/115 pour une humidité relative de 50 %.

Il convient cependant de conserver à l'esprit que les contraintes observées dans le BHP sont nettement supérieures à celles inhérentes au béton conventionnel. Les déformations immédiates peuvent dès lors devenir aussi importantes – en fonction, bien évidemment, de la résistance à la flexion, dans le cas d'une poutre par exemple. Il va sans dire que ce phénomène est encore renforcé à long terme par le biais de l'utilisation d'un coefficient de retrait. En cas de constructions en BHP, la limitation des déformations et des flèches peut devenir le facteur déterminant du projet, plutôt que la portance proprement dite. Ce faisant, le matériau ne peut pas toujours être utilisé de manière optimale.

Tableau 2 – Retrait de dessiccation (*) et retrait endogène (**) en fonction de f_{ck} et de l'humidité relative (HR) suivant la EN 1992-1-1:2004

f_{ck}		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
retrait endogène (10^{-6})		25	38	50	63	75	88	100	113	125	150	175	200
HR = 50 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	746	706	668	632	598	566	536	507	480	430	385	345
	retrait total (10^{-6})	771	743	718	695	673	654	636	620	605	580	560	545
HR = 60 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	668	632	598	566	536	507	480	455	301	385	345	309
	retrait total (10^{-6})	693	670	648	629	611	595	580	567	426	535	520	509
HR = 70 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	560	530	501	475	449	425	402	381	361	323	289	259
	retrait total (10^{-6})	585	567	551	537	524	513	502	493	486	473	464	459
HR = 80 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	416	394	372	353	334	316	299	283	268	240	215	193
	retrait total (10^{-6})	441	431	422	415	409	403	399	395	393	390	390	393
HR = 90 %	retrait de dessiccation (10^{-6})	231	219	207	196	185	175	166	157	149	133	119	107
	retrait total (10^{-6})	256	256	257	258	260	263	266	270	274	283	294	307

(*) hypothèses pour le calcul : épaisseur fictive = 100 mm, ciment rapide (R), à long terme (**) à long terme

Tableau 3 – Coefficients de fluage (*) en fonction de f_{ck} , de l'humidité relative (HR) et du délai de mise en charge suivant la NBN EN 1992-1-1

f_{ck}		20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
HR = 50 %	mise en charge après	5 jours	3,91	3,60	3,21	2,82	2,52	2,27	2,08	1,91	1,77	1,55	1,38	1,25
		10 jours	3,62	3,34	2,97	2,61	2,33	2,11	1,92	1,77	1,64	1,44	1,28	1,16
		15 jours	3,44	3,17	2,82	2,48	2,21	2,00	1,83	1,68	1,56	1,36	1,22	1,10
		20 jours	3,30	3,04	2,71	2,38	2,12	1,92	1,75	1,61	1,50	1,31	1,17	1,05
		30 jours	3,10	2,85	2,54	2,23	1,99	1,80	1,64	1,51	1,40	1,23	1,09	0,99
		50 jours	2,84	2,62	2,33	2,05	1,83	1,65	1,51	1,39	1,29	1,13	1,00	0,91
HR = 80 %	mise en charge après	5 jours	2,69	2,48	2,24	2,00	1,82	1,66	1,54	1,43	1,34	1,20	1,08	0,99
		10 jours	2,50	2,30	2,07	1,86	1,68	1,54	1,43	1,33	1,25	1,11	1,00	0,92
		15 jours	2,37	2,18	1,97	1,76	1,60	1,46	1,35	1,26	1,18	1,05	0,95	0,87
		20 jours	2,27	2,09	1,89	1,69	1,53	1,40	1,30	1,21	1,13	1,01	0,91	0,845
		30 jours	2,13	1,97	1,77	1,59	1,44	1,32	1,22	1,14	1,06	0,95	0,86	0,78
		50 jours	1,96	1,80	1,62	1,45	1,32	1,21	1,12	1,04	0,98	0,87	0,79	0,72

(*) hypothèses pour le calcul : épaisseur fictive = 100 mm, ciment rapide (R), à long terme

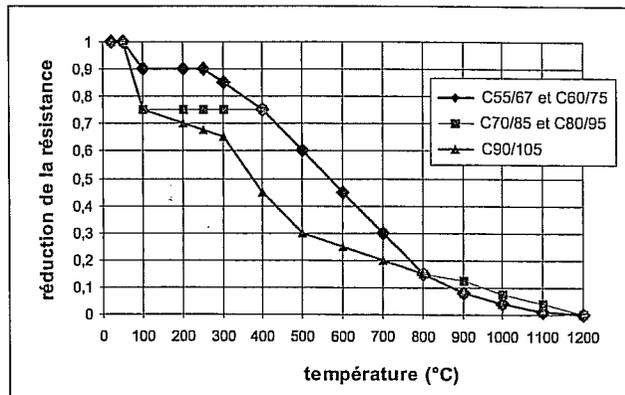
Etant donné la structure plus dense des pores du béton de hautes performances, ce matériau affiche un meilleur comportement face aux mécanismes d'agression. La plupart des processus de dégradation sont en effet causés par l'entrée de substances agressives, telles que des chlorures, du dioxyde de carbone, des acides, ... Si la pénétration de ces substances dans le béton est entravée, comme dans le cas du BHP, les processus de dégradation y afférant ne pourront bien évidemment se produire que bien plus tard. Quoi qu'il en soit, il convient toujours de veiller à la pureté des éléments constitutifs du béton, afin d'éviter toute agression par des mécanismes internes (présence de sulfates, d'alcalis, de granulats réactifs, ...).

Toutefois, la durée d'utilisation d'une construction est en grande partie également déterminée par les conditions d'exécution. Dans ce cadre, nous avons déjà fait allusion ci-dessus au risque de fissuration prématurée résultant des effets thermiques et du retrait (principalement endogène). La présence de telles fissures peut influencer sensiblement la durabilité de la construction.

7.8 Résistance au feu

Même si la durabilité du BHP est en règle générale nettement supérieure à celle du béton conventionnel, la résistance au feu est cependant un élément sur lequel il convient d'attirer l'attention. En raison de la structure très dense des pores, la pression de vapeur, qui apparaît à l'intérieur du béton à des températures excédant 100 °C, peut difficilement être réduite. La vapeur ne peut en effet pas être rapidement évacuée à l'extérieur, en raison de la structure très dense du matériau. Par rapport au béton conventionnel, la résistance du béton à haute résistance diminuera dès lors plus rapidement si la température est supérieure à 100 °C. Les renseignements à propos du facteur de réduction à appliquer figurent dans la norme NBN EN 1992-1-2 (voir également figure 10). En raison des pressions de vapeur accumulées, il convient également d'examiner les risques potentiels d'éclatement du béton. En ce qui concerne le béton des classes de résistance C 55/67 à C 80/95, les règles inhérentes au béton conventionnel suffisent pour éviter les éclatements, pour autant que la teneur en fumées de silice soit inférieure à 6 % de la masse de ciment. En cas de teneurs supérieures en fumées de silice et en cas de classe de résistance C 90/105, il sera nécessaire de prendre des mesures particulières, telles que le mélange d'au moins 2 kg/m³ de fibres de polypropylène. En cas de températures élevées, ces fibres fondront, ce qui laissera de petits canaux ouverts via lesquels les pressions de vapeur pourront être dissipées plus rapidement.

Fig. 10 – Diminution de la résistance à la compression des bétons à haute résistance selon l'EC2 Feu



8. Applications

Le BHP présente des avantages 'technologiques' intéressants par rapport au béton traditionnel :

- Durabilité améliorée face aux agressions physico-chimiques (perméabilité réduite, meilleure protection de l'armature contre la corrosion, réduction de la pénétration des ions chlore, diminution du risque de réaction alcali-silice, meilleure résistance au gel, ...). Cette durabilité améliorée présente de grands avantages en termes d'entretien à long terme.
- En règle générale, une fluidité très élevée à l'état frais. Cette caractéristique facilite la mise en œuvre du béton, même dans les zones à densité d'armature élevée.
- Résistance accrue au jeune âge. Cette propriété permet de réduire le temps de coffrage et d'accélérer la mise en précontrainte. Des délais d'exécution raccourcis sont donc envisageables.
- Une résistance finale accrue après durcissement, ce qui permet de réduire les sections du béton et, dès lors, la diminution du poids de la construction (voir également l'encadré 'Economie d'espace et d'argent' en dernière page).
- Un module d'élasticité supérieur, susceptible d'améliorer la stabilité aérodynamique de ponts élancés.
- Un retrait réduit, qui s'avère avantageux pour la maîtrise des déformations d'une construction, ainsi qu'en ce qui concerne les pertes de précontrainte.

Sur le plan architectural également, le BHP est assorti d'un certain nombre de nouvelles possibilités. C'est ainsi que le BHP permet la réalisation de constructions plus élancées. Cet atout est d'ores et déjà matérialisé dans la réalisation d'ouvrages d'art (ponts), même si ce béton pourrait tout aussi bien être utilisé pour la construction de bâtiments. A l'heure actuelle, les avantages du BHP se concrétisent principalement dans l'obtention d'un espace intérieur le plus utile possible. Nous pourrions cependant aussi songer à une nouvel aspect de l'enveloppe de la construction, avec un regain d'attention porté aux éléments architecturaux tels que les arêtes, les arcs, les voûtes, ...

La façade d'un bâtiment pourrait en outre être redéfinie par l'utilisation potentielle de modules de dimensions supérieures. Alors que ces dimensions sont à l'heure actuelle généralement de 6 mètres, elles pourraient être portées à 7 ou à 8 mètres, grâce au BHP. Cette augmentation pourrait faciliter l'avènement d'une autre conception de façade et donc d'un aménagement intérieur modifié, davantage en phase avec les normes internationales actuelles.

La liberté accrue obtenue pour l'aménagement intérieur d'un bâtiment vaut également pour l'aménagement de la surface horizontale utile. Grâce à la modification des dimensions du module, les espaces libres pourront être plus grands, ce qui donnera à l'architecte davantage de possibilités pour la conception et l'aménagement des espaces de vie et de bureau.

Dans l'industrie du préfabriqué, l'utilisation du BHP offre aussi de nouvelles possibilités (voir également infra). Citons notamment la possibilité de produire des cellules préfabriquées complètes, grâce notamment à l'économie de poids réalisée. Il ne paraît dès lors pas exclu qu'un bâtiment puisse évoluer dans le temps, par le biais de l'échange de cellules préfabriquées compatibles. Une chambre à coucher pourra par exemple devenir un salon, une salle de bain, une cuisine, ...

Un autre avantage du BHP par rapport au béton conventionnel est l'aspect visuel des surfaces de béton, tant coulées sur place que préfabriquées. L'apparition de petites bulles d'air à la surface est souvent très limitée. La surface présente généralement une bonne texture, notamment grâce à la haute teneur en fines du béton.

En outre, le BHP n'est guère soumis à la ségrégation, de sorte que la formation de nids de gravier est la plupart du temps évitée. La présence de fumées de silice permet d'obtenir parfois des teintes plus sombres. Tout dépend cependant des dimensions des fines particules, plus encore que de leur teneur. De beaux résultats peuvent également être obtenus grâce à l'utilisation de types de coffrage spécifiques (du bois non traité par exemple).

Historiquement, le BHP a avant tout été conçu pour des applications très particulières, comme les buildings. Il a été à maintes reprises mis en œuvre aux Etats-Unis pour la réalisation de gratte-ciel, avec des bétons présentant des résistances de 120 à 130 MPa. Cependant, comme indiqué ci-dessus, le BHP peut également être une solution alternative pour les constructions réalisées habituellement en béton conventionnel. Le recours judicieux au BHP exige de toute évidence une collaboration très étroite entre le propriétaire, l'architecte, l'ingénieur, l'entrepreneur, la centrale à béton et le laboratoire de recherche. Quelques études de cas sont commentées ci-après.

9. Etudes de cas

9.1 Le deuxième pont « Stichtse » au Pays-Bas

Le deuxième pont 'Stichtse', achevé en 1997, est le premier grand pont construit aux Pays-Bas en béton à haute résistance (fig. 11). D'une longueur totale de 320 m, ce pont est composé de trois travées. La travée principale mesure 160 m. La hauteur de construction de ce pont varie entre 2,50 m et 6,75 m. Sa superstructure a été réalisée au moyen d'une méthode de construction en saillie libre. Les voussoirs, d'une longueur de 4 à 5 m, ont été coulés en une seule fois, ce qui a nécessité le respect d'exigences très strictes en termes d'ouvrabilité du béton. L'énorme quantité de ciment et la petite quantité d'eau de gâchage pouvaient en outre générer un recul rapide de l'ouvrabilité et des fluctuations de consistance.

La composition du béton utilisé est précisée au tableau 4. Grâce à la mise en œuvre de béton à haute résistance, plusieurs modifications spécifiques ont été apportées durant la phase de conception. C'est ainsi que les parois des voussoirs et le tablier ont pu être amincis et que des économies ont pu être réalisées sur la quantité d'armatures de précontrainte nécessaire, grâce au tracé des câbles simplifié et à la réduction des pertes de retrait et de fluage. La précontrainte a pu en outre être mise en œuvre plus rapidement en raison de l'évolution plus rapide de la résistance du béton. Les résistances à la compression nécessaires avaient été très rapidement atteintes, même durant la période hivernale. Tous ces éléments ont dès lors permis de réduire le délai de construction. A long terme, le BHP présente l'avantage d'offrir une meilleure résistance du tablier supérieur vis-à-vis de l'infiltration des sels de déverglaçage.

La pratique avait montré que le BHP permet d'obtenir des surfaces lisses et planes. Il convenait cependant d'accorder toute l'attention nécessaire à la consistance précise du mélange et à un ordre de cou-

CEM III/B 42,5 LH-HS	237 kg
CEM I 52,5 R	238 kg
fumée de silice (en poudre)	25 kg
rapport eau / (ciment + fumée de silice)	0,32
sable 0-4 mm	785 kg
concassé dur 4-16 mm	960 kg
plastifiant	0,95 kg
superplastifiant	9,5 kg

Tableau 4 – Composition du béton – 2^{ème} pont 'Stichtse'

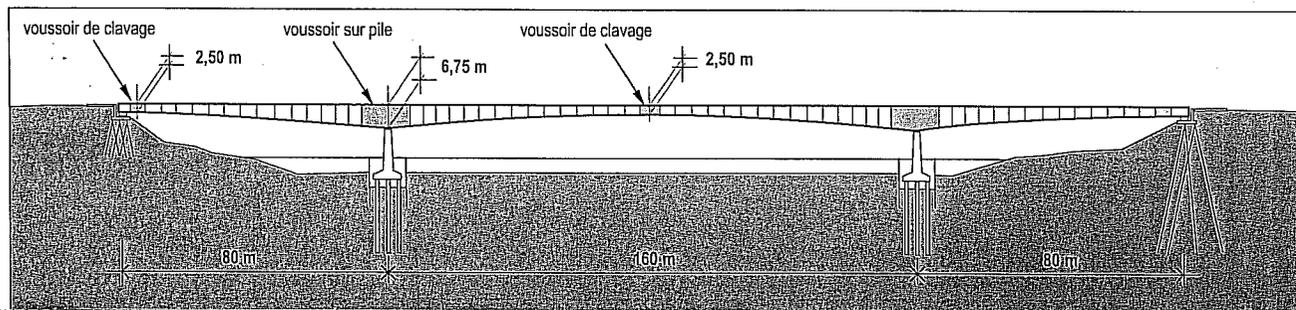
lage minutieusement planifié et exécuté. A cet effet, un contrôle et un suivi scrupuleux, en concertation entre toutes les parties concernées, ont été indispensables.

Un autre élément critique était l'accroissement impressionnant des températures du BHP. La température montait jusque 60 °C, ce qui augmentait les probabilités d'apparition de fissures. Ce risque de fissuration s'accroissait à cause du retrait endogène. Une maîtrise efficace des fissures a pu être obtenue grâce à une préparation et à un accompagnement minutieux du projet et de son exécution, via la réalisation d'essais techniques préparatoires à plus grande échelle et via l'organisation de tests d'aptitude soigneusement étudiés sur le chantier, dans divers laboratoires et dans les centrales à béton. L'expérience nous a enseigné que les incidences du retrait et de la température ne font pas obstacle à la poursuite de l'utilisation économiquement judicieuse du béton à haute résistance dans les ponts, à condition que toute l'attention requise soit accordée à ces incidences lors de la conception et de l'exécution de ces ouvrages.

9.2 Structures porteuses préfabriquées

Les conditions de production dans une usine à béton sont contrôlées et dès lors, meilleures. Elles ont permis de généraliser davantage l'utilisation du béton à haute résistance dans ce secteur. Des résistances de 55 N/mm², voire plus, sont désormais courantes pour des éléments préfabriqués. Des résistances à la compression égales à 90 N/mm² ou plus sont même fréquemment obtenues. En ce qui concerne les parkings à étages, l'utilisation de béton à haute résistance peut se traduire par une réduction des dimensions des colonnes, afin de pouvoir prévoir davantage d'emplacements de stationnement sur une surface donnée. Pour la réalisation d'immeubles de bureaux, le recours au béton à haute résistance permet d'obtenir de plus longues portées. En ce qui concerne les bâtiments industriels, des surfaces modulaires relativement grandes peuvent être réalisées sans colonnes intermédiaires. En réalité, l'utilisation du béton à haute résistance dans l'industrie des éléments préfabriqués est devenue une pratique quotidienne. Il ne doit pas nécessairement toujours s'agir d'un pont spectaculaire ou d'une tour élancée ; le béton à haute résistance peut en effet être utilement mis en œuvre dans des types de construction plus ordinaires.

Fig. 11 – Deuxième pont 'Stichtse' (NL)



LES TOURS 'NORTH GALAXY' A BRUXELLES

Le complexe se compose d'un parking souterrain de quatre niveaux et de deux immeubles-tours. Ces deux tours, utilisées comme espace de bureau, s'élèvent sur 30 étages. Ce complexe se compose également d'un troisième bâtiment de 6 étages et d'un socle au rez-de-chaussée.

Tant le parking que la superstructure sont en grande partie réalisés en béton préfabriqué.

1 - Projet

Initialement, la structure du complexe avait été en grande partie conçue en béton à couler sur place. Des colonnes d'acier enveloppées de béton et assurant la sécurité incendie seraient combinées à des poutres en béton armé et des hourdis, en application du système dit 'hollow-rib' (association entre coffrage en acier perdu et béton coulé sur place).

Ce bâtiment devait en effet être correctement protégé contre l'incendie et "l'effondrement progressif" ('*anti-collapse*'); les événements de New York étaient de fait encore frais dans les mémoires.

2 - Etude ultérieure

Par la suite, Ergon a conçu une variante en béton préfabriqué, avec le bureau d'études Ingénieurs Associés. L'entrepreneur pouvait également être convaincu des avantages propres à cette solution.

Il convenait cependant de tenir compte d'exigences essentielles en termes de coût et de délai d'exécution de l'ensemble. La réalisation concomitante de l'important noyau central et du reste de la structure exigeait une maîtrise scrupuleuse du planning et, plus particulièrement, de l'utilisation des grues.

3 - Solution définitive et exécution

A. STRUCTURE INFÉRIEURE - PARKING SOUTERRAIN

Le parking souterrain a été construit séparément lors d'une première phase (2001). Les colonnes utilisées à cet effet sont préfabriquées en béton à hautes performances (C 80/95) et placées dans une trame de 7,5 m sur 6,85 m. Elles se substituent aux profils en acier HEM enrobés qui avaient été initialement prévus et permettent de ce fait de réduire le coût de la méthode de construction et de la simplifier. Les colonnes d'une hauteur de 3 étages et réalisées d'un seul tenant présentent une section de 590/590 mm pour une charge maximale de 12 860 kN. Elles ont été coulées en usine en position horizontale. Afin d'améliorer la résistance au feu et de prévenir les éclatements en cas d'incendie, des fibres de polypropylène ont été ajoutées au béton.

Les solives ont été coulées sur place. L'utilisation de raccords filetés et d'orifices de passage au travers des colonnes a permis de garantir la continuité de l'armature. Les planchers sont composés de hourdis creux précontraints (résistance au feu de 2 heures), surmontés d'une chape de compression coulée sur place (C 30/37).

La superficie totale au sol est de 29 000 m² et le bâtiment se compose de 159 colonnes.

B. STRUCTURE SUPÉRIEURE

1. Bâtiment C (6 étages)

A l'instar du parking souterrain, les concepteurs ont opté pour un mélange entre, d'une part, colonnes et hourdis préfabriqués et, d'autre part, poutres coulées sur place.

L'exécution s'est déroulée durant l'année 2003.

2. Le socle

Cette partie du bâtiment ne dispose que d'un rez-de-chaussée et sert de liaison couverte et de hall d'entrée pour l'ensemble.

3. Bâtiments A et B, les tours (voir illustrations en page suivante)

Pour ces bâtiments, le principal défi consistait à faire coïncider les travaux en béton à couler sur place avec l'édification de la structure préfabriquée.

D'après le timing proposé, il convenait d'achever un étage des deux tours tous les 4 jours ouvrables. Afin de pouvoir tenir ce rythme, il était nécessaire de prévoir une deuxième équipe de travail qui se chargerait des travaux supplémentaires, tels que l'armature de la chape de compression, les liaisons soudées réciproques des hourdis TT, la pose du ferrailage continu, le bétonnage de la chape de compression, etc.

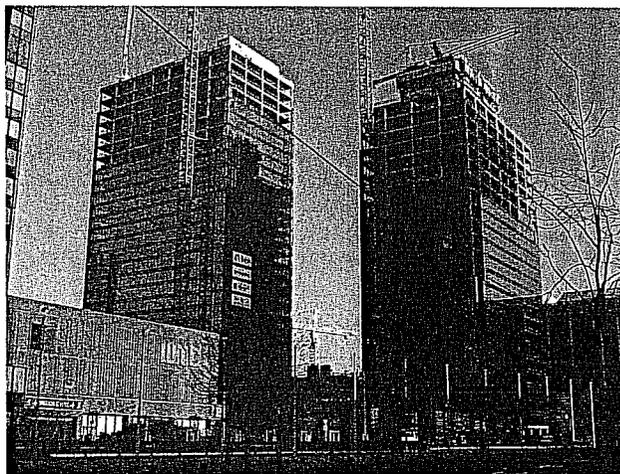
Les noyaux centraux étaient réalisés au moyen d'un système grim-pant automatique. La progression de ce coffrage précédait de deux étages le montage de la construction en préfabriqué.

Les colonnes préfabriquées d'une hauteur de deux étages (voir photo de couverture), d'une section de 600 mm, peuvent soutenir une charge maximale de 9600 kN. Elles sont réalisées en béton à hautes performances (C 60/75), coulées horizontalement dans un coffrage rond avec une fente de quelques centimètres servant d'ouverture de coulage en forme d'entonnoir.

Les planchers devaient être légers (pas plus lourds que dans le concept original), la rapidité de montage devait être élevée et l'épaisseur de construction de l'ensemble hourdis - poutre ne doit pas excéder l'épaisseur initialement prévue. Un élément en TT spécialement conçu s'est en définitive avéré la seule solution possible. Le poids des hourdis et la modulation ont débouché sur un élément de 190 mm d'épaisseur et de 2500 mm de largeur. Afin d'obtenir la résistance et les propriétés ignifuges initialement escomptées, une chape de compression de 60 mm, coulée sur place, a également été posée.

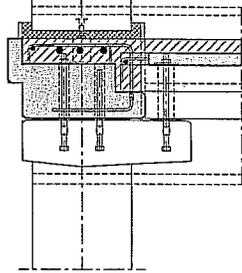
Les poutres ont été réalisées en béton précontraint. Elles présentent une section d'une épaisseur minimale et une forme spéciale qui rendait superflue l'utilisation d'un coffrage latéral pour le coulage du béton de liaison et de la chape de compression. Après la pose, l'insertion du ferrailage continu mis en œuvre en usine a été poursuivie.

En raison de l'espace disponible au-dessus du faux-plafond, les poutres ont été posées sur des consoles présentant une hauteur de construction limitée. Des évidements ont permis de placer correctement le ferrailage continu. Cette armature absorbe les charges horizontales, comme le vent et les défauts de verticalité, et empêche l'effondrement progressif en cas d'accident.

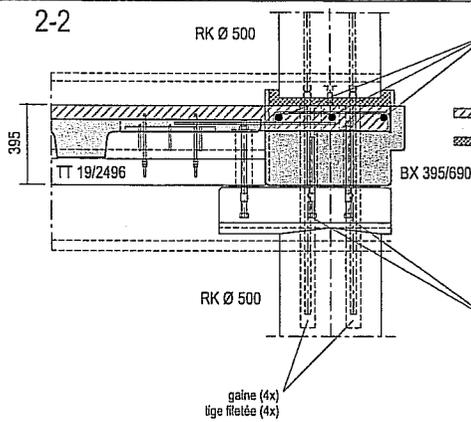


arch. J. Eijers & Partners / Samyn & Partners

1-1



2-2



armature de chaînage + 'anti-collaps'

béton coulé sur place

mortier sans retrait

néoprène

écrou M24

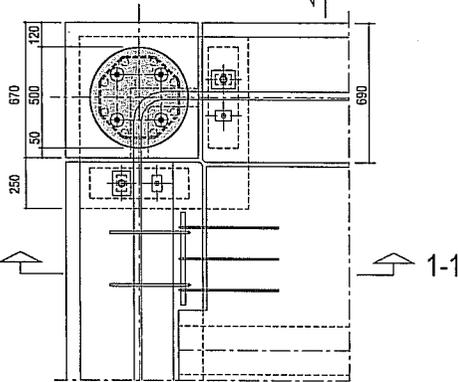
plaque métallique

tige filetée (2x)

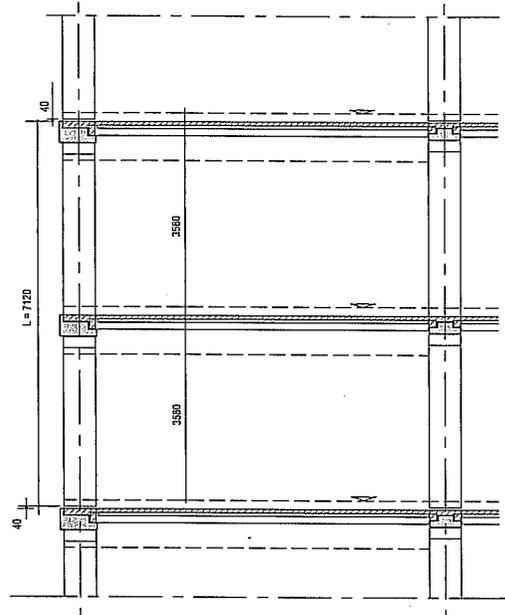
douille M24 (2x)

gaine (4x)

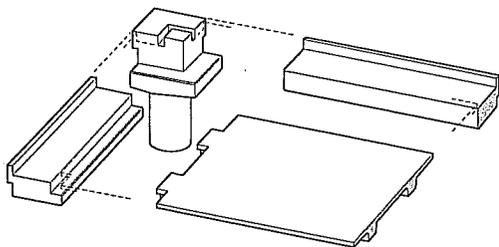
tige filetée (4x)



COUPE A-A

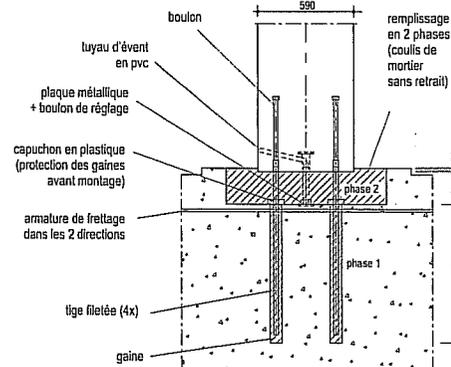
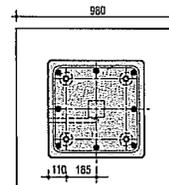
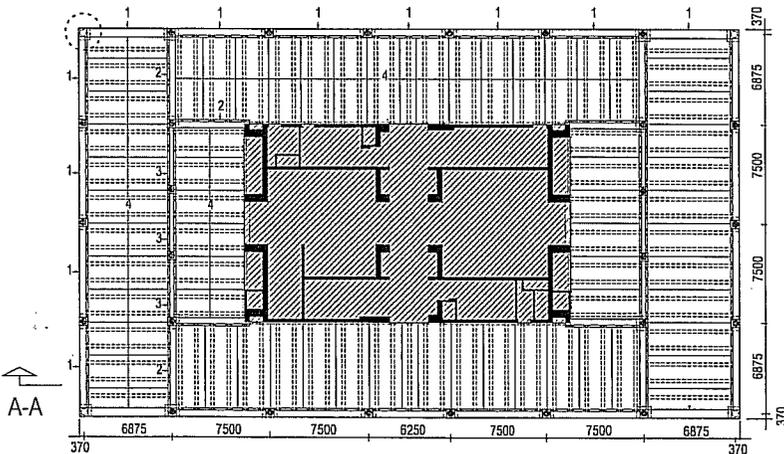


DÉTAIL



voir DÉTAIL

ÉTAGE TYPE



boulon

tuyau d'évent en pvc

plaque métallique + boulon de réglage

capuchon en plastique (protection des gaines avant montage)

armature de frettage dans les 2 directions

tige filetée (4x)

gaine

remplissage en 2 phases (coulis de mortier sans retrait)

phase 2

phase 1

Remerciements à Ir W. Riemkens et T. Mols (Ergon st)

- colonne préfabriquée RK 500/500
- colonne préfabriquée RK 600/600
- 1 poutre préfabriquée BX 395/690
- 2 poutre préfabriquée RL 200/590

BIBLIOGRAPHIE

TAERWE L.

Hogesterktebeton

Journée d'étude 'Speciale Betonsoorten', Louvain, nov. '93

SHAH S.P. ; AHMAD S.H.

High performance concretes and applications

Edward Arnold, ISBN 0-340-58922-1, 1994

RAMACHANDRAN V.S. ; MALHOTRA V.M. ;

JOLICOEUR C. ; SPIRATOS N.

Superplasticizers : properties and applications in concrete

Ottawa : CANMET, 1998

FEVRE C. (Ed.)

Projet National BHP 2000 - Les bétons à hautes performances

Guides pratiques (3 tomes)

Paris : IREX, 2002, 2003

BAROGHEL-BOUNY V.

Les spécificités des bétons à hautes performances

Paris : LCPC, 2004

Seventh International Symposium on the Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete

ACI Symposium Publication 228, Volumes 1 & 2, 2005

Hogesterktebeton : technologie, eigenschappen en rekenwaarden
Rapport CUR n° 90-9, 1990

Hogesterktebeton : interrimrapport onderzoek en aanzet tot regelgeving

Rapport CUR n° 93-7, 1993

Hogesterktebeton

Recommandation CUR n° 37, 1994

Hogesterktebeton

Recommandation CUR n° 97, 2004

Normes

NBN EN 206-1 : 2001 - Béton - Partie 1 : Spécification, performance, production et conformité

NBN B 15-001 : 2004 - Supplément à la NBN EN 206-1-Béton - Spécification, performances, production et conformité

NBN EN 1992-1-1:2005 - Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments

ECONOMIE D'ESPACE ET D'ARGENT

L'utilisation du béton à haute résistance permet d'étendre considérablement l'espace utile d'un immeuble de bureaux.

L'exemple suivant permet d'illustrer notre propos.

Supposons un immeuble de bureaux avec des colonnes rondes placées dans une trame de 7,20 m x 7,20 m.

Dans un bâtiment de dix étages, les colonnes du rez-de-chaussée devraient, en fonction de la qualité du béton (classe de résistance), présenter le diamètre suivant :

Qualité du béton	Diamètre	Economie de volume
C 30/37	700 mm	
C 40/50	600 mm	24 %
C 60/75	500 mm	49 %
C 80/95	450 mm	59 %
C 90/105	400 mm	68 %

Pour un bâtiment de 24 étages, les colonnes du rez-de-chaussée devraient présenter le diamètre suivant :

Qualité du béton	Diamètre	Economie de volume
C 30/37	1000 mm	
C 40/50	900 mm	19 %
C 60/75	800 mm	36 %
C 80/95	700 mm	51 %
C 90/105	600 mm	64 %

La section de la colonne réalisée en béton C 90/105 sera égale au tiers de la section de la colonne réalisée en béton C 30/37 et le gain en surface utile augmentera en conséquence.

Le prix du béton à haute résistance d'une classe de résistance maximale de C 80/95 est environ 1,5 fois supérieur à celui du béton de la classe de résistance C 30/37. Pour la classe de résistance 90/105, il faut compter un surcoût de l'ordre de 1,8.

Ce surcoût est négligeable par rapport aux économies réalisées grâce à la réduction de la quantité de matériau nécessaire. La quantité de béton nécessaire est en effet moindre, tout comme celle de l'acier d'armature. La réduction des quantités de matériau nécessaires induit en outre une réduction du poids et, par tant, des fondations plus légères et moins onéreuses.

bulletin est publié par:
BELCEM - Fédération de
l'industrie Cimentière Belge
Voila 8
1000 Bruxelles
02 645 52 11
02 640 06 70
www.belcem.be
@belcem.be

Directeur:
M. G. De Schutter
Directeur technique:
J. Apers
Directeur responsable:
J. Jacobs

Document légal:
007/0280/03