

Chapitre 1 : Généralité sur le béton précontraint

1.1. Introduction :

Ce chapitre a pour but de présenter une synthèse bibliographique sur le béton précontraint, les différents modes de mise en tension et les domaines d'utilisation de ce type du béton. Les deux méthodes de précontrainte (mise en tension par pré-tension et par post-tension) vont être exposées en détail avec l'explication des différentes étapes d'exécution et de fabrication des éléments en béton précontraint.

1.2. Définition du béton armé

Le béton armé est un matériau de construction dans lequel des barres d'armature ou d'autres types de renforcement ont été intégrés pour améliorer une ou plusieurs propriétés du béton. Depuis de nombreuses années, il est utilisé comme matériau de construction économique dans les bâtiments, les ponts et de nombreux autres types de structures à travers le monde. Une grande partie de son attrait mondial est due au fait que les matériaux constitutifs de base (ciment, sable, agrégats, eau et barres d'armature) sont largement disponibles et qu'il est possible de construire une structure par l'utilisation des sources, de main-d'œuvre et de matériaux locaux..

1.3. Mécanique du béton armé

Le béton est un matériau composite qui se caractérise par leur fragilité importante avec une faible résistance à la traction et une bonne résistance à la compression. La fissuration se produit lorsque la contrainte de traction du béton dans un élément atteint la résistance à la traction en raison de charges appliquées de l'extérieur, de changements de température ou d'un retrait. Les éléments en béton qui ne contiennent aucun type de renfort ont subi une rupture, généralement très soudainement une fois que les premières fissures de traction se produite, car rien n'empêche les fissures de se propager au sein du matériau en béton.

Considérez la poutre en béton non renforcée à appui simple illustrée à la Fig. 1.1 qui est soumise à une charge concentrée P à mi- portée. D'après la résistance des matériaux, la contrainte de flexion en traction maximale se produit dans les fibres inférieures de la section de poutre à mi- portée et la contrainte de flexion en compression maximale se produit dans les fibres supérieures. Le béton étant plus résistant en compression qu'en traction, la poutre pourra supporter la charge concentrée et son poids propre tant que la

contrainte de flexion maximale est inférieure à la résistance à la traction du béton en flexion (Fig. 1.1a). Si la contrainte de flexion est égale ou supérieure à la résistance à la traction, une fissure se formera immédiatement dans la fibre inférieure de la poutre et se propagera instantanément vers la fibre supérieure (Fig. 1.1b).

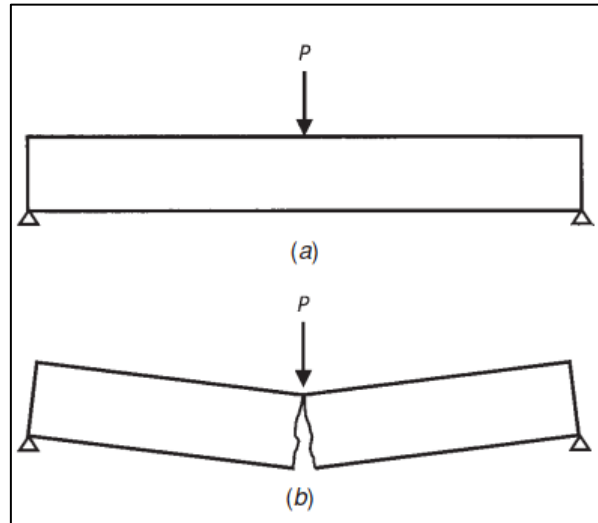


Figure 1.1 Poutre simplement soumise au chargement externe. (a) Contrainte de flexion $<$ la résistance à la traction du béton en flexion. (b) Contrainte de flexion $>$ à la résistance à la traction du béton en flexion.

Une séquence d'évènements différente se produirait si des barres d'armature étaient présentes près de la partie inférieure de la poutre simplement appuyée. Comme dans le cas d'une poutre en béton non armé, une fissure se formera dans la fibre inférieure de la poutre en béton armé à mi-portée lorsque la contrainte de flexion est égale ou supérieure à la résistance à la traction du béton en flexion. Contrairement à la poutre non armée, la propagation des fissures sera arrêtée par la présence de l'armature, qui a une résistance à la traction beaucoup plus élevée que celle du béton. Si la grandeur de la charge concentrée augmente, la fissure à la mi-portée se propagera vers le haut de manière stable et des fissures supplémentaires se formeront à d'autres endroits le long de la travée où la contrainte de flexion dépasse la résistance à la traction du béton (voir Fig. 1.2). En supposant que la poutre possède une résistance au cisaillement suffisante, ce processus se poursuit jusqu'à ce que le béton s'écrase en compression ou jusqu'à ce que l'armature cède en traction. Les chapitres suivants de ce cours montrent qu'il est souhaitable que l'armature cède en traction avant que le béton ne cède en compression.

Ce qu'il faut retenir de cette discussion est que les armatures, qui ont une résistance à la traction bien supérieure à celle du béton, sont utilisées pour prendre les contraintes de

traction dans un élément en béton armé, et que les armatures ne deviennent efficaces pour résister à la traction qu'après l'apparition de fissures.

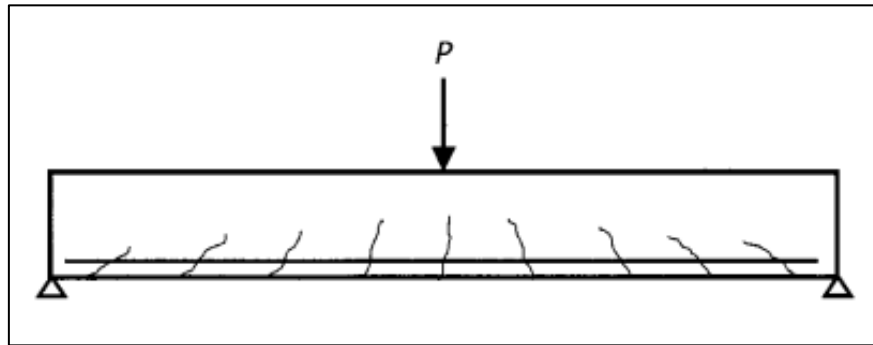


Figure 1.2 Réponse d'une poutre en béton armé simplement appuyée en raison d'une charge externe.

Les largeurs de fissures sont approximativement proportionnelles à la déformation, et donc à la contrainte de traction dans l'armature. Les contraintes de l'acier doivent donc être limitées à une valeur suffisamment faible afin d'éviter des fissures trop larges. De même, une déformation importante de l'acier est le résultat d'une courbure importante, qui à son tour est associée à une déflexion importante. Il n'y a donc que peu d'avantages à utiliser de l'acier ou du béton à plus haute résistance, car pour satisfaire aux exigences de service, la capacité de déformation accrue offerte par l'acier à plus haute résistance ne peut pas être utilisée.

Le béton précontraint est une forme particulière de béton armé. La précontrainte consiste à appliquer une charge de compression initiale sur une structure pour réduire ou éliminer les forces de traction internes et ainsi contrôler ou éliminer la fissuration. La charge de compression initiale est imposée et maintenue par des armatures en acier fortement tendues qui réagissent sur le béton. Lorsque la fissuration est réduite ou éliminée, une section précontrainte est considérablement plus rigide que la section renforcée équivalente (généralement fissurée). La précontrainte peut également imposer des forces internes qui sont de signe opposé aux charges externes et peut donc réduire considérablement, voire éliminer, les déformations de traction.

Avec l'amélioration du comportement de charge de service, l'utilisation d'armatures en acier à haute résistance et de béton à haute résistance devient à la fois économique et efficace sur le plan structurel. Comme nous le verrons plus loin, seul l'acier qui peut être tendu avec de grandes déformations élastiques initiales convient à la précontrainte du béton. L'utilisation d'acier à haute résistance n'est donc pas seulement un avantage pour le béton précontraint, c'est une nécessité. La précontrainte permet d'obtenir des

éléments plus légers, des portées plus longues et une augmentation de la gamme d'application économique du béton armé.

1.4. Principe de la précontrainte

La précontrainte a pour objectif, en imposant aux éléments un effort de compression axial judicieusement appliqué, de supprimer (ou fortement limiter) les sollicitations de traction dans le béton

Cette précontrainte peut être :

- **Une précontrainte partielle** : autorisation des contraintes de traction limitées.
- **Une précontrainte totale** : élimination totale des contraintes de traction

1.5. Méthodes de précontrainte

Comme mentionné dans la section précédente, la précontrainte est généralement conférée à un élément en béton par une armature en acier fortement tendue (fil, toron ou barre) réagissant sur le béton. L'acier de précontrainte à haute résistance est le plus souvent tendu à l'aide de vérins hydrauliques. L'opération de mise en tension peut avoir lieu avant ou après la coulée du béton et, en conséquence, les éléments précontraints sont classés comme pré-tension ou post-contraints.

1.5.1 Mise en tension par Pré-tension

Les câbles de précontrainte sont initialement tendus entre des culées fixes et ancrés. Une fois le coffrage en place, le béton est coulé autour des câbles en acier fortement sollicité et durci. Lorsque le béton a atteint la résistance requise, les câbles sont coupés ou libérés des culées. Lorsque l'acier fortement sollicité tente de se contracter, le béton est comprimé. La pré-tension est conférée par la liaison entre l'acier et le béton.

Les éléments en béton précontraint sont souvent préfabriqués dans des lits de précontrainte suffisamment longs pour accueillir plusieurs unités identiques simultanément. Pour réduire la durée du cycle de construction, le durcissement à la vapeur peut être utilisé pour faciliter un gain rapide de résistance du béton puisque la précontrainte est effectuée dans les 24 heures suivant le coulage. Étant donné que le béton est généralement mis sous tension à un âge aussi précoce, le raccourcissement élastique du béton et les déformations de fluage ultérieures ont tendance à être élevés. Ce raccourcissement relativement élevé du béton en fonction du temps entraîne une réduction significative de la contrainte de traction dans l'acier de précontrainte collé et une perte de précontrainte relativement élevée.

- **Etapes de mise en œuvre de la précontrainte par post tension interne (Figure 1.3) :**

La précontrainte est transmise au béton par les câbles, en raison de la liaison entre eux. Lors du transfert de la précontrainte, l'élément subit un raccourcissement élastique. Si les câbles sont situés de manière excentrée, l'élément est susceptible de se plier et de se déformer (flèche). Les différentes étapes de l'opération de précontrainte sont résumées comme suit :

- A. Mise en tension des câbles par les vérins
- B. Coulage du béton
- C. Relâchement et découpage des câbles (la précontrainte de compression est transmise au béton par adhérence).

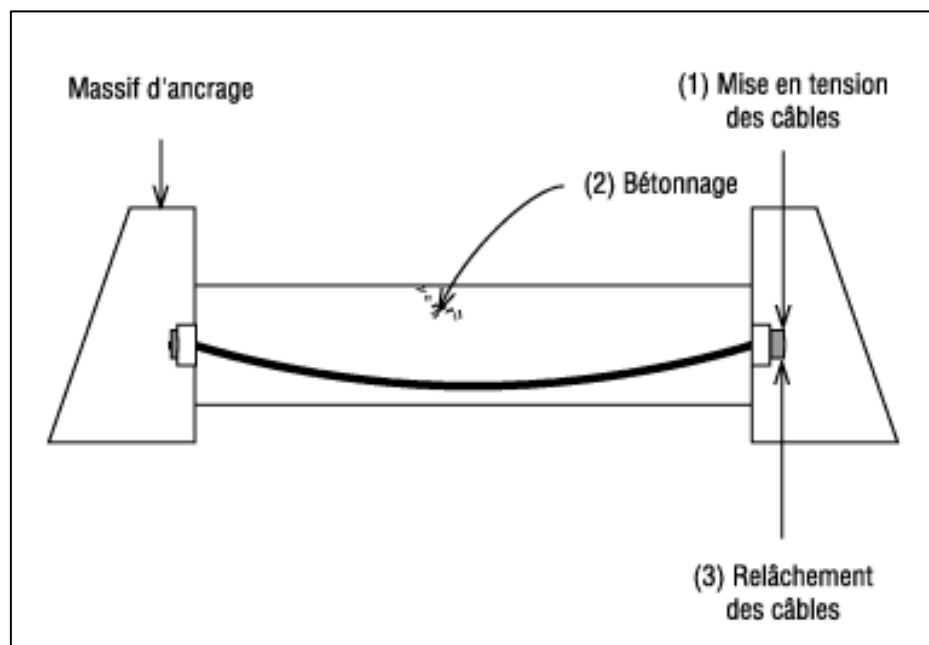


Figure 1.3. Procédure de mise en tension par pré-tension

1.5.2 Mise en tension par poste-tension :

Les procédures de post-tension d'un élément en béton sont illustrées à la figure 1.4. Une fois le coffrage en place, le béton est coulé autour des gaines qui sont fixées à n'importe quel profil souhaité. Les câbles en acier sont généralement en place, sans contrainte dans les conduits pendant le coulage du béton, ou peuvent être enfilés à travers les conduits ultérieurement. Lorsque le béton a atteint la résistance requise, les câbles sont tendus. Les câbles peuvent être tendus d'une extrémité (l'autre extrémité est fixe) ou peuvent être tendus des deux extrémités, comme illustrer à la figure 1.4b. Le béton a subi des

contraintes de compression pendant l'opération de mise en tension et la précontrainte est maintenue après l'ancrage des câbles sur l'extrémité. Les câbles post-tendus imposent également une force transversale à l'élément partout où la direction du câble change.

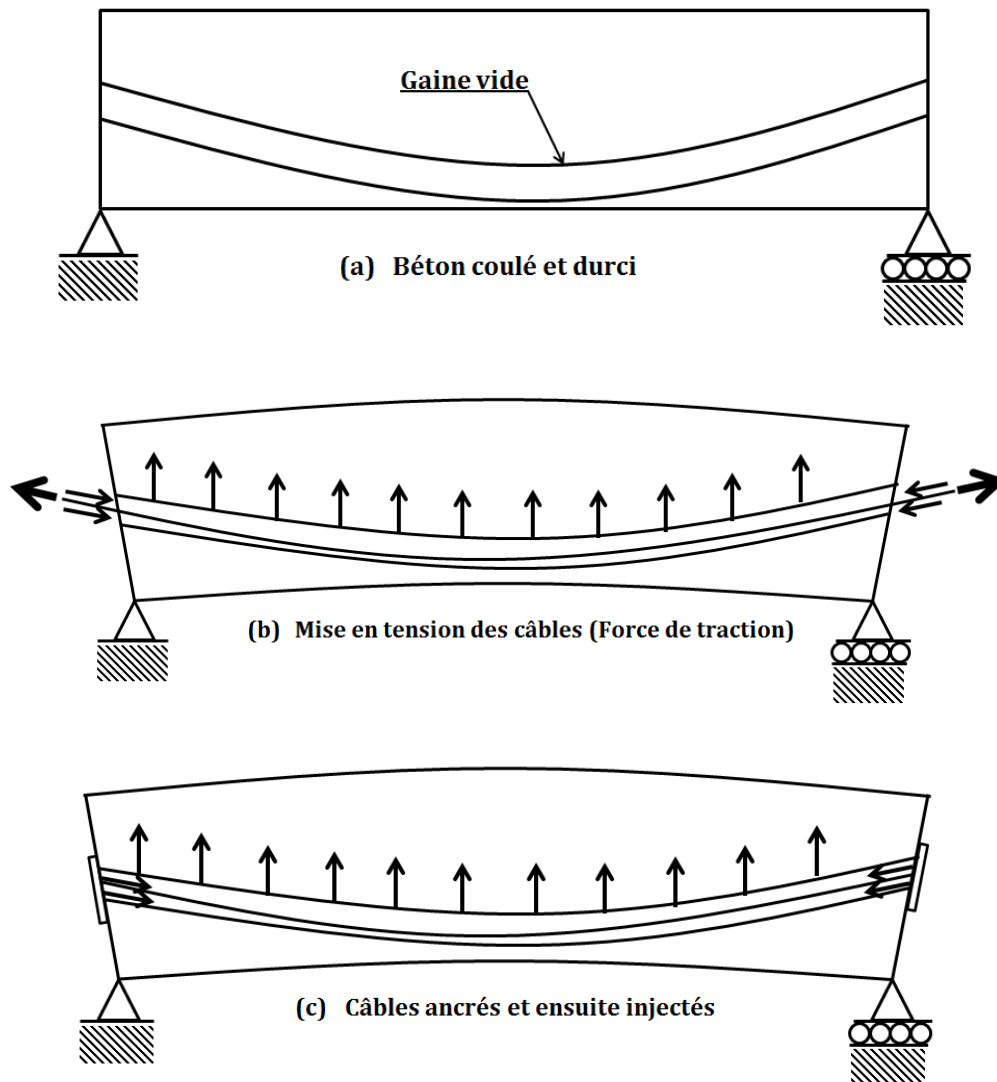


Figure 1.4. Procédure de post-tension.

Une fois les câbles ancrés et aucune contrainte supplémentaire n'est nécessaire, les gaines contenant les câbles sont souvent remplies de coulis de ciment ou mortier sous pression. De cette façon, les câbles sont liés au béton et sont plus efficaces pour contrôler les fissures et fournir une résistance ultime. Les câbles liés sont également moins susceptibles de se corroder ou d'entraîner des problèmes de sécurité si un câble est perdu ou endommagé ultérieurement. La majorité des éléments en béton précontraint fabriqués in situ sont post-tendus. Des vérins hydrauliques relativement légers et

portables font de la post-tension sur site une option attrayante. La post-tension est également utilisée pour la construction segmentaire de poutres de pont à grande portée. La précontrainte peut également être imposée sur des éléments nouveaux ou existants à l'aide de câbles externes ou de dispositifs tels que des vérins plats. Ces systèmes sont utiles pour les opérations de précontrainte temporaires, mais peuvent être sujets à des pertes élevées en fonction du temps.

- **Etapes de mise en œuvre de la précontrainte par post tension interne (Figure 1.5) :**

Dans les systèmes de précontrainte par post-tension, les gaines pour les câbles (ou torons) sont placées avec l'armature avant le coulage du béton. Par ailleurs, les câbles sont placés à l'intérieur des gaines sur toute la longueur de l'élément après le bétonnage. La gaine a pour rôle d'empêcher le contact entre le béton et les câbles pendant l'opération de la mise en tension.

Les différentes étapes de l'opération de post-tension se résument comme suit.

- A. Coulage du béton.**
- B. Mise en place des câbles.**
- C. Mise en place du massif d'ancrage et du vérin.**
- D. Mise en tension des câbles.**
- E. Découpe des câbles.**
- F. Injection de coulis dans les gaines**

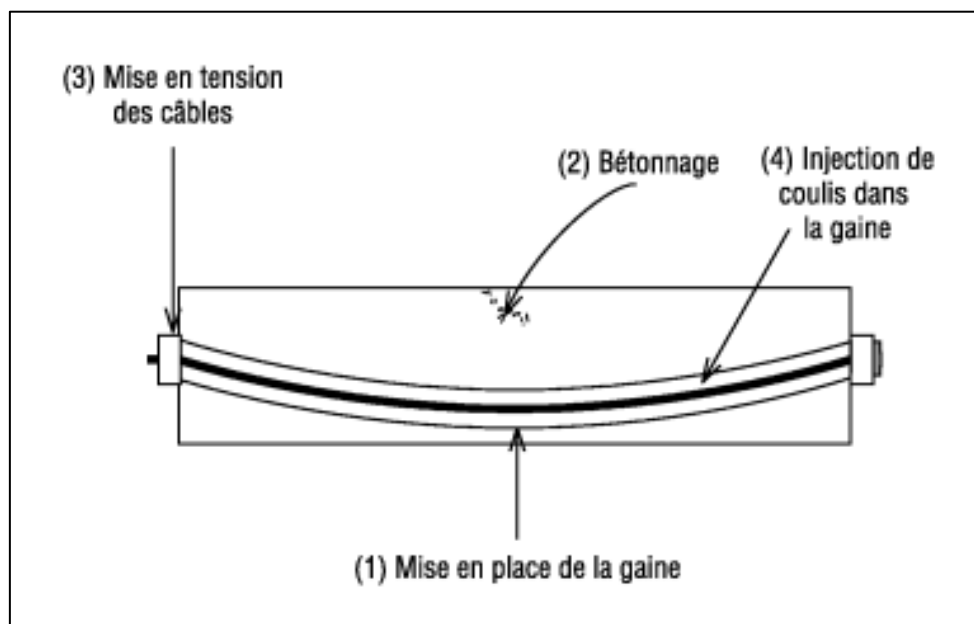


Figure 1.5. Procédure de mise en tension par post-tension

1.6. Procédés de précontrainte par post-tension

Les procédés de précontraintes les plus utilisés dans le monde sont : **Procédé Freyssinet** et **Procédé PAC**.

1.6.1. Procédé Freyssinet:

En 1908, l'Ingénieur **Eugène Freyssinet** avait fait édifier une arche expérimentale d'un pont de 50 mètres de portée et de 2 mètres de flèche dont les culées étaient reliées par un tirant en "béton précontraint" de 250 tonnes de force utile. Les câbles étaient constitués de 12 fils de 5mm de diamètre obtenus à partir de fils machine de 8mm de diamètre tréfilés et écrouis avec trempe au plomb (Figure 1.6). Actuellement, il existe d'autres dimensions des câbles tels que : de fils Ø5, Ø7 et Ø8 et de torons T13, T13S, T15 et T15S.

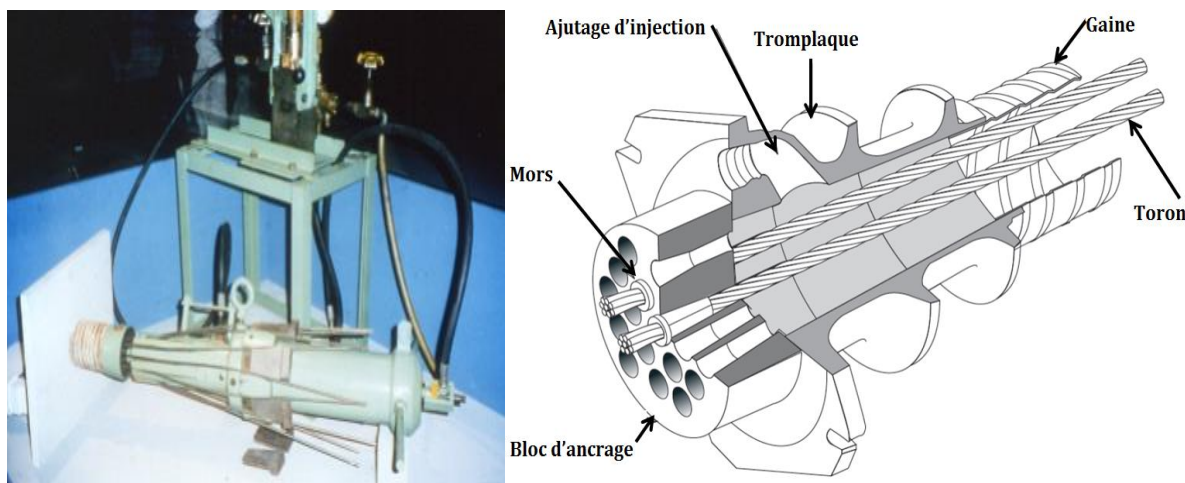


Figure 1.6. Système Freyssinet

1.6.2. Procédé PAC :

Le procédé de précontrainte PAC par post-tension permet la mise en compression du béton par câbles composés de torons parallèles logés dans des conduits étanches (gaines ondulées en feillard, tubes lisses en acier ou en matière plastique).

Tous les torons sont tendus simultanément et ancrés individuellement au moyen de clavettes à trois brins logées dans les trous coniques de la tête d'ancrage.

1.7. Comparaison entre les deux modes de précontrainte

Pré-tension	Post-tension
La précontrainte est réalisée en usine et convient donc aux travaux de construction préfabriqués.	La post-tension peut être réalisée en usine ainsi que sur le chantier.
Dans ce type de béton, les câbles de précontrainte appelés torons sont tendus avant de couler le béton, puis le béton est coulé en enfermant les câbles tendus.	Dans ce type de béton, les torons sont enfermés dans un conduit dans le moule, puis le béton est coulé. Le processus de mise en tension des torons est effectué une fois que le béton a atteint sa résistance suffisante.
De petites sections doivent être construites.	La taille d'un élément n'est pas limitée, les ponts à longue portée sont construits par post-tension.
Les éléments de pré-tension sont produits dans un moule.	Des câbles sont utilisés à la place des fils et des vérins sont utilisés pour l'étirement.
Le béton est précontraint avec des tendons avant d'être mis en place.	La précontrainte est effectuée une fois que le béton a atteint une résistance suffisante.
La pré-tension est préférée lorsque l'élément structurel est petit et facile à transporter.	La post-tension est préférée lorsque l'élément structurel est lourd.

1.8. Domaines d'application:

Voici les principales applications du béton précontraint.

1.8.1. Construction de ponts :

Le béton précontraint a de nombreuses applications dans la construction des ponts. L'utilisation la plus courante est dans les ponts à poutres-caissons (Figure 1.7) en béton précontraint, où le béton est précontraint en usine avant d'être transporté sur le site du pont. Ce type de pont présente généralement une résistance élevée avec une durabilité

significative. Les poutres caissons se caractérisent par une portée importante par rapport aux autres types des ponts.



Figure 1.7. Pont à poutre caisson

Le béton précontraint est également utilisé dans la construction de ponts à haubans (Figure 1.8). Dans ce type de pont, la dalle de tablier en béton préfabriqué est soutenue par une série de câbles reliés à des pylônes. Les câbles sont précontraints en usine avant d'être installés sur le pont. Ce type de pont est très solide et peut couvrir de longues distances.

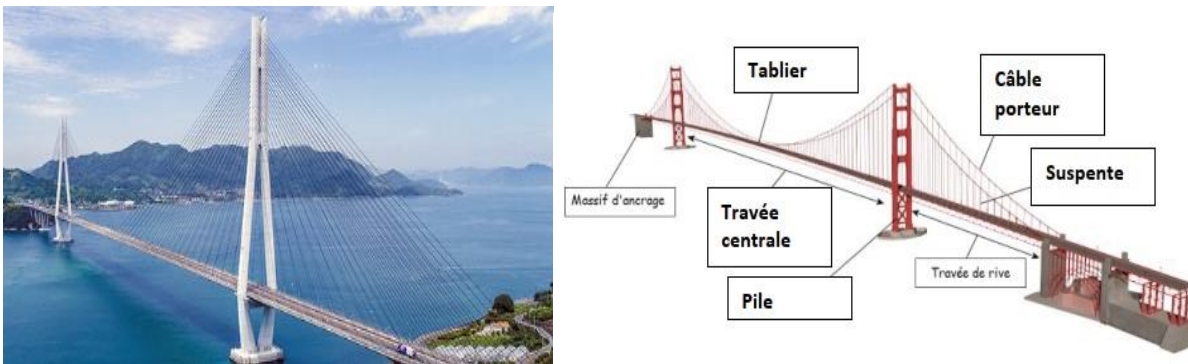


Figure 1.8. Ponts hauban

1.8.2. Construction de bâtiments :

Le béton précontraint est un matériau de construction couramment utilisé dans la construction de bâtiments (Figure 1.9). Ce type de béton est fabriqué en ajoutant de l'acier au mélange de béton, ce qui lui confère une résistance et une stabilité accrues. Le béton précontraint est souvent utilisé pour les poutres et les colonnes, ainsi que pour les dalles de plancher et de toit dans les bâtiments en béton précontraint. Il est également

couramment utilisé pour la fabrication de produits en béton préfabriqué tels que les panneaux muraux et les escaliers.



Figure 1.9. Structure en béton précontraint (Poteau-Poutre)

1.8.3. Construction de structures de stationnement :

Le béton précontraint est largement utilisé dans la construction de structures de stationnement en raison des avantages qu'il offre (Figure 1.10). Ces avantages comprennent la capacité de résister à la déflexion et au mouvement lors d'évènements sismiques, la capacité de résister à la corrosion et aux dégâts causés par le vent et l'eau. De plus, le béton précontraint peut fournir une fondation permanente à la structure, ce qui élimine le besoin d'entretien régulier.



Figure. 1.10. Plancher en béton précontraint de parking de stationnement

1.8.4. Construction de réservoirs de stockage :

Le béton précontraint est couramment utilisé dans la construction de réservoirs de stockage (Figure 1.11). L'avantage d'utiliser des réservoirs en béton précontraint est qu'ils peuvent être conçus pour résister à la pression interne du contenu du réservoir.

Cela permet d'obtenir une paroi plus légère et plus fine, ce qui réduit le poids total du réservoir. De plus, les réservoirs en béton précontraint peuvent être conçus pour résister aux forces externes, telles que le vent et les tremblements de terre, qui peuvent provoquer la défaillance d'un réservoir.



Figure 1.11. Réservoir en béton précontraint

1.8.5. Voies ferrées :

Des traverses en béton précontraint sont utilisées dans les voies ferrées (Figure 1.12). Le béton précontraint présente de nombreux avantages par rapport aux autres matériaux pour la construction de voies ferrées. Il est extrêmement solide et durable et est moins susceptible d'être endommagé par les intempéries ou d'autres facteurs environnementaux. Le béton précontraint est également moins susceptible d'être endommagé par le poids des trains qui passent dessus et peut être conçu pour minimiser les effets des vibrations.



Figure 1.12. Traverses en béton précontraint

1.8.6. Égouts :

Le béton précontraint est un matériau idéal pour les égouts, car il est extrêmement solide et durable (Figure 1.13). Il peut résister aux pressions et aux charges élevées qui sont généralement exercées sur les réseaux d'égouts. De plus, le béton précontraint résiste à la corrosion et ne se dégrade pas avec le temps.



Figure 1.13. Egouts en béton précontraint

1.8.7. Stockage des céréales :

Le béton précontraint est un matériau utile pour la construction d'installations de silos de céréales (Figure 1.14). La résistance et la durabilité élevées du matériau le rendent idéal pour les structures qui doivent supporter le poids et les forces du stockage des céréales. Le béton précontraint peut être utilisé pour construire les murs, les sols et les plafonds des bâtiments en béton précontraint pour le stockage des céréales, ainsi que les structures de support des réservoirs de stockage des céréales.



Figure 1.14. Silos en béton précontraint

1.8.8. Lignes de transmission téléphonique et électrique :

Le béton précontraint est largement utilisé dans les lignes de transmission téléphonique et électrique en raison de sa résistance et de sa durabilité élevées (Figure 1.15). Le béton est capable de supporter les lourdes charges imposées par le poids des lignes de transmission et les forces générées par le mouvement des lignes.



Figure 1.15. Poteau de transmission électrique en béton précontraint

1.8.9. Pieux en béton :

Le béton précontraint est souvent utilisé dans les pieux en béton, car il peut augmenter la capacité portante des pieux (Figure 1.16). La précontrainte du béton permet un transfert plus efficace des charges du béton vers les pieux, ce qui se traduit par une capacité portante plus élevée. De plus, le béton précontraint peut aider à prévenir les fissures et autres types de dommages qui peuvent survenir dans les pieux en béton. Les pieux centrifuges préfabriqués en béton précontraint (pieux PHC) sont fabriqués à partir de béton précontraint à hautes performances.



Figure 1.16. Pieux préfabriqués en béton précontraint