

# Réalisation de tranchées couvertes: tendances internationales

Autor(en): **Charif, Hazem / Ponti, Jérôme**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **124 (1998)**

Heft 26

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79422>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Réalisation de tranchées couvertes

## Tendances internationales

Par Hazem Charif  
Ingénieur civil  
EPFL-SIA,  
Dr ès sc. techn. ESM,  
Charif & Mivelaz,  
St-Sulpice  
et  
Jérôme Ponti,  
ingénieur civil  
EPFL-SIA,  
ESM- Ponti & Morel,  
Genève

### Introduction

De plus en plus de tranchées couvertes et autres ouvrages enterrés sont construits en Suisse et dans le monde. Ce type d'ouvrage offre en effet une bonne solution de compromis pour la réalisation de réseaux de transport modernes et performants face à des contraintes écologiques de plus en plus sévères – en particulier en ce qui concerne le bruit et autres nuisances dans les zones urbaines. De tels ouvrages renchérissent toutefois considérablement le coût kilométrique des infrastructures de transport, ce qui tend à en freiner le développement ou l'amélioration. La question se pose également de savoir quelle charge financière leur maintenance représentera à terme.

Notre article passe en revue les principales exigences attachées à la conception et à la réalisation de tranchées couvertes, suivies d'un tour d'horizon des options prises dans plusieurs pays européens, spécialement en ce qui concerne le problème de l'étanchéité. Sur ce point, on peut d'ores et déjà affirmer que des choix technologiques, portant notamment sur des formulations adéquates de béton, ainsi que des mesures de cure et de traitements thermiques visant à supprimer l'étanchéité influencent grandement la conception globale de l'ouvrage. Grâce à ces options, on peut s'attendre à des économies importantes durant le cycle de vie de l'ouvrage tout en lui assurant une bonne durabilité.

### Exigences attachées aux tranchées couvertes

En dehors des aspects en rapport avec la sécurité structurale, le problème de l'étanchéité des tranchées couvertes constitue une donnée primordiale. L'humidité et les infiltrations ont en effet une influence directe sur l'aptitude au service et la durabilité de tels ouvrages. Elles sont en particulier susceptibles d'altérer le fonctionnement de toutes sortes d'équipements électriques, mécaniques ou

autres, de même qu'elles tendent à accélérer les mécanismes d'altération de la structure. Selon l'environnement dans lequel la tranchée se trouve, des problèmes de résistance aux eaux sulfatées peuvent en outre se poser pour le parement externe, ainsi que des problèmes de résistance aux cycles de gel-dégel en présence ou non de sels pour le parement interne, principalement aux extrémités de l'ouvrage.

Traditionnellement, l'étanchéité d'une tranchée couverte est assurée par une couche spécifique mise en place sur le parement externe et constituée de tôles en acier ou de membranes synthétiques. La mise en place de ces couches demande toutefois beaucoup de soins et complique les détails de construction et les phases de réalisation d'un ouvrage. Non seulement, elles sont donc souvent sources de difficultés, mais leur longévité est bien inférieure à la durée de vie espérée de l'ouvrage. Quant à leurs défauts, elles conduisent à des infiltrations – difficiles à réparer – au niveau des fissures, des joints et d'autres singularités de l'ouvrage.

### Réalisation de tranchées couvertes sans étanchéité spécifique

Tant les problèmes posés par les membranes d'étanchéité, que les progrès aujourd'hui acquis dans le domaine de l'analyse et de la modélisation du comportement des structures en béton conduisent de plus en plus à renoncer à ces membranes [1]<sup>1</sup>. La structure en béton assure alors seule la fonction d'étanchéité (étanchéité dans la masse). Cette option a déjà fait ses preuves pour des tranchées couvertes dans de nombreux pays, en particulier aux Pays-Bas, au Danemark et en Grande-Bretagne. Une étanchéité dans la masse présente l'avantage de simplifier la construction, ce qui a un effet positif sur sa réalisation, sa fiabilité et

finalement son bilan économique. Des gains significatifs sur les délais de réalisation d'un ouvrage sont en outre possibles, ce qui peut constituer un avantage décisif, surtout en milieu urbain.

Faire cumuler les fonctions d'enveloppe étanche et de structure porteuse à un ouvrage en béton n'est naturellement pas sans effets sur sa conception et sa réalisation. Le béton en soi peut, d'un point de vue pratique, être considéré comme étanche à l'eau. Les problèmes résident essentiellement dans la fissuration traversante et sur le plan de la conception et de la réalisation des points singuliers de la structure (joints, changements de section, détails de la cage d'armature, etc.). Pour maîtriser le problème de la fissuration, deux tendances se dégagent :

- la première consiste à limiter l'ouverture des fissures traversantes en mettant en place une armature passive renforcée ;
- la seconde réside dans les mesures prises, au niveau de la conception et de la réalisation de l'ouvrage, dans le but de réduire au maximum le risque d'apparition de fissures traversantes.

En soi, l'armature passive ne permet pas d'éviter l'apparition de fissures, mais d'en réduire l'ouverture, en répartissant la fissuration. Or pour assurer l'étanchéité, il est généralement recommandé de limiter l'ouverture moyenne des fissures traversantes à une valeur de l'ordre de 0,1 mm. Cette exigence conduit, sous déformation imposée, à devoir mettre en place une quantité d'armature élevée [2]. Cela est d'autant plus contraignant, que les éléments d'ouvrages enterrés présentent des épaisseurs importantes. Par ailleurs, des essais [3] ont montré que des fissures de l'ordre de 0,05 mm d'ouverture présentent déjà des infiltrations d'eau significatives. Les fissures tendent certes à s'auto-colmater avec le temps et, dans les cas les plus favorables,

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

elles peuvent complètement cesser de fuir, autrement dit, ne plus laisser apparaître de taches d'humidité à l'intrados de l'ouvrage. Cela étant, le résultat n'est de loin pas assuré et l'expérience montre qu'il subsiste toujours un certain nombre de fissures traversantes qu'il est nécessaire de traiter pour les étancher. De plus, ces travaux doivent souvent être répétés durant l'exploitation de l'ouvrage. L'observation de réalisations existantes a en outre montré que ce sont les fissures traversantes à travers lesquelles l'eau s'écoule, qui sont les plus nuisibles du point de vue de la corrosion des barres d'armature.

Au vu de ce qui précède, l'option consistant à prendre d'emblée des mesures pour réduire le risque d'apparition des fissures traversantes afin d'assurer l'étanchéité d'un ouvrage semble donc promise à un plus grand avenir. Elle évite en effet de mettre en place de grandes quantités d'armature non nécessaires à la sécurité structurale de l'ouvrage et pouvant poser des problèmes de bétonnage. La limitation de la densité de fissuration, plutôt qu'un contrôle de l'ouverture des fissures a également un effet concomitant favorable sur la durabilité de l'ouvrage, en réduisant en particulier le risque d'infiltration persistante demandant des travaux d'étanchement.

#### *Fissuration des ouvrages enterrés*

Dans une tranchée couverte, la principale cause de fissuration traversante apparaît au jeune âge de l'ouvrage. Compte tenu du caractère relativement massif de ce type de réalisation, l'élévation de la température au moment de l'hydratation du ciment peut en effet être importante et, selon le degré d'entrave des dilatations thermiques qui en résultent, des contraintes de traction élevées peuvent être générées et conduire à la fissuration de l'ouvrage. Ces fissures thermiques sont souvent traversantes et leur risque d'occur-

rence dépend avant tout des propriétés du béton (en particulier de ses propriétés au jeune âge), de l'épaisseur des éléments, des étapes de bétonnage, du climat et des mesures de cure. Or ces aspects sont maîtrisables et des outils d'analyse numérique adaptés aux besoins de la pratique sont aujourd'hui disponibles [4]. Ces outils permettent d'évaluer le risque de fissuration et de définir les mesures appropriées pour réduire le risque de fissuration thermique au jeune âge. Il est ainsi envisageable de refroidir le béton frais avant sa mise en place ou d'en abaisser la température dans la masse par le biais de circuits de refroidissement qui réduisent l'élévation de la température liée à l'hydratation du ciment.

A long terme, des fissures traversantes sont également susceptibles de se former sous l'effet des variations de température ou en raison de tassements des appuis. En revanche, le retrait de dessiccation du béton s'avère rarement critique, car le sol humide et l'épaisseur des sections limitent grandement son ampleur. Ce sont en général les ouvrages d'accès et les extrémités des tranchées couvertes qui posent le plus de problèmes: en effet, ceux-ci se trouvent souvent dans de mauvais sols ou dans une alternance de mauvais et de bons sols et sont, de surcroît, sujets à des variations de température plus importantes que le reste de l'ouvrage. Cela implique des mesures particulières, propres à ces parties d'ouvrages (précontrainte, joints permanents, isolation thermique, etc.).

#### **Etudes de cas dans divers pays européens**

##### *Danemark*

Au Danemark, la conception des ouvrages enterrés est beaucoup plus influencée par l'expérience des entreprises de construction que par les maîtres d'ouvrages et les règlements et codes en vigueur. Ces entreprises, qui possè-

dent également des bureaux d'études et des conseillers ont développé un grand nombre de techniques de construction novatrices et proposent des mesures constructives pour limiter le risque de fissuration au jeune âge et assurer l'étanchéité de l'ouvrage par le béton lui-même. A titre d'exemple, on présente le tunnel immergé de Drogden à Øresund réalisé par un consortium international d'entreprises. La conception du tunnel de Drogden est caractérisée par l'absence de toute étanchéité extérieure.

#### *Tunnel de Drogden à Øresund (en cours de construction)*

Le tunnel de Drogden est un ouvrage immergé destiné à un trafic mixte route/rail<sup>2</sup>. Sa section transversale est un caisson rectangulaire multiple: deux tubes à deux voies de circulation chacun sont destinés au trafic routier (avec entre eux une galerie de service pourvue de sorties de secours) tandis que deux autres tubes abritant chacun une ligne de chemin de fer accommoderont le trafic ferroviaire. La largeur totale du caisson est de 42 m et sa hauteur de 8,50 m. Quant à la longueur totale immergée de l'ouvrage, elle est de 3510 m à une profondeur d'environ 22 m.

La structure du tunnel est composée de vingt éléments en béton armé de 175,2 m de long, dont chacun est bétonné en huit étapes d'environ 22 m de long sur un site au nord du port de Copenhague. Le bétonnage s'effectue à l'intérieur d'une enceinte dont la température est contrôlée en permanence. Après une cure de 24 heures, l'étape réalisée est poussée en dehors de l'enceinte à la manière d'un pont poussé. Une fois le bétonnage des huit étapes effectué, l'élément entier subit une cure de dix jours sous une couverture isolante, avant d'être poussé dans un bassin d'eau pour être remorqué

<sup>2</sup> Voir IAS 26/1996, Pierre Boskovitz: «Traversée des détroits: Øresund»

jusqu'à la mer. Ce bassin intermédiaire fonctionne de la même façon que l'écluse d'un canal. L'élément est déposé sur un lit de gravier prévu à cet effet et la mise en place des éléments s'effectue à l'aide d'un ponton.

Aucune membrane d'étanchéité n'a été prévue pour ce tunnel, dont l'imperméabilité est assurée par la structure en béton armé. Les contraintes d'origine thermique au jeune âge sont contrôlées et réduites grâce à un choix judicieux des étapes de bétonnage et un contrôle précis des températures ambiantes pendant les premières heures après le bétonnage. Ces mesures ont rendu superflu tout refroidissement artificiel du béton [5].

#### *Pays-Bas*

Beaucoup de tranchées couvertes et de tunnels immergés en béton ont été construits aux Pays-Bas, le premier étant celui de Maas à Rotterdam, construit durant les années 40 et dont on vient de fêter les cinquante ans.

La conception de ces ouvrages a beaucoup évolué durant les dernières décennies surtout en ce qui concerne l'étanchéité [6]. Jusqu'à la fin des années 70, on a appliqué systématiquement une couche d'étanchéité extérieure sur la structure en béton. Cette étanchéité pouvait être composée de membranes en acier, en bitume, en polymère, etc. A partir des années 80, on a pratiquement renoncé à une étanchéité extérieure en faveur d'autres mesures rendant la structure en béton étanche en soi.

La liste des tranchées couvertes et des tunnels immergés réalisés aux Pays-Bas est longue. Un exemple représentatif construit après 1980 est présenté pour mettre en évidence l'évolution de leur conception vis-à-vis du problème de l'étanchéité.

Tunnel de Piet Hein  
à Amsterdam (1997)

Le tunnel immergé à travers le canal de Piet Hein à Amsterdam est

un ouvrage en béton armé construit pour un trafic mixte route/rail. Sa section transversale est un caisson multiple: deux tubes pour le trafic routier contenant chacun deux voies de circulation et un tube pour le trafic ferroviaire à deux voies. La largeur totale du tunnel est de 32 m et sa hauteur de 8 m, pour une longueur totale immergée de 1265 m à 17 m de profondeur.

La structure en béton armé est composée de huit éléments d'environ 160 m de long chacun. Après le bétonnage de chaque élément en plusieurs étapes dans une cale sèche à Verreroek – qui se trouve à 16 km d'Anvers (Belgique) –, le béton fut refroidi artificiellement pour prévenir le risque de fissuration thermique au jeune âge. Pour leur transport entre le site du chantier et le bassin d'où ils allaient être expédiés, une précontrainte provisoire fut appliquée à ces éléments dépourvus de membranes d'étanchéité. Puis, une fois le bassin inondé, les éléments devenus « flottants » ont été remorqués à travers le canal de Western Scheldt et les écluses de Ljmuidem jusqu'à Amsterdam, où ils furent immergés à leur place à l'aide de tourelles d'alignement.

Le sol de fondation est composé de sable fin et d'argile limoneuse. Des excavations ont été pratiquées pour préparer le sol d'assise des différents éléments, qui furent positionnés et placés précisément sur un « coussin » de sable (méthode du flux de sable). Reliés par des joints de type *Gina* et *Oméga*, les éléments ont ensuite été remblayés par du sable pour rétablir le fond du lit du canal.

#### *Norvège*

Lorsque leur section transversale est rectangulaire, les tranchées couvertes ont des parois dont l'épaisseur varie entre 0,5 et 1,0 m. La dalle supérieure étant en général plus épaisse que les murs, cela a posé quelques problèmes de fissuration entre la dalle et la partie supérieure des murs. Afin de li-

miter l'entrave aux déformations, on évite en principe de fonder les tranchées directement sur des roches, en interposant une couche de matériau graveleux. On réduit autant que possible le nombre de joints permanents, sauf lorsque des problèmes de tassement différentiel se posent, et il arrive que pour résoudre de tels problèmes, les parties sur sol mou soient fondées sur des pieux. Lorsque les galeries sont longues, on prévoit parfois des joints permanents afin de libérer en partie le retrait. Pour des raisons de durabilité, des bétons à hautes performances de formulations classiques sont presque systématiquement utilisés. Les dosages en ciment varient entre 320 et 370 kg/m<sup>3</sup> et des ajouts de fumée de silice sont courants; quant au rapport eau/(ciment + fumée de silice), il est en général inférieur à 0,40 (environ 0,38 le plus souvent). Avec un taux dépassant généralement 1 %, l'armature longitudinale est importante. Enfin, une couche spécifique d'étanchéité, souvent constituée de panneaux d'argile expansive, est dans la plupart des cas conservée.

Tranchée couverte de Ryenkryset  
à Oslo (1996)

La tranchée couverte de Ryenkryset est un élément de la voie périphérique E6 autour d'Oslo. Sa section transversale est un caisson à deux tubes contenant chacun deux voies de circulation. La largeur du caisson est de 24 m, sa hauteur de 5 m, pour une longueur totale de l'ouvrage de 154 m. L'épaisseur du radier est de 0,50 m, celle des deux murs latéraux varie de 0,50 à 0,60 m, celle du mur central de 0,37 à 0,57 m et celle de la dalle de 0,8 à 1,0 m. Le sol de fondation est rocheux. Afin de réduire les frottements entre l'ouvrage et la roche, cette dernière a été excavée sur environ 1 m de profondeur par rapport au niveau du radier et remplacée par du sable. Aux endroits où le plafond de la roche est plus profond, des pieux forés supportent la

structure et empêchent les tassements différentiels.

La structure de cette tranchée couverte est en béton armé. Le radier a été bétonné dans un premier temps, ensuite les murs et finalement la dalle supérieure, selon des étapes de bétonnage dont la longueur a varié entre 10 et 15 m. Il n'y a pas de joints de dilatation permanents et le béton employé est un béton à hautes performances (BHP) de formulation classique dont la composition est la suivante :

- dosage en ciment : 350 kg/m<sup>3</sup>
- fumée de silice : 18 kg/m<sup>3</sup>
- quantité d'eau : 154 l/m<sup>3</sup>
- plastifiant : 3 kg/m<sup>3</sup>
- superplastifiant : 4 kg/m<sup>3</sup>
- entraîneur d'air : 0,4 à 0,6 % du poids du ciment.

Le béton présentait un Slump de 16 cm et un rapport eau/liant de 0,42. La résistance moyenne à la compression à 28 jours est égale à environ 60 N/mm<sup>2</sup>.

Le béton choisi présentait un fort dégagement de chaleur pendant son hydratation. Afin de réduire les contraintes d'origine thermique pendant les premières heures qui suivent le bétonnage, des corps chauffants ont été placés dans les masses de béton déjà en place et notamment dans le radier, qui était ainsi chauffé au moment du bétonnage des murs. La même mesure fut prise pour le bétonnage de la dalle.

Or cette mesure ne s'est pas avérée très efficace : plusieurs centaines de fissures sont en effet apparues quelques jours, voire quelques semaines, après le bétonnage. Mais grâce au taux d'armature longitudinale relativement important placé dans l'ouvrage (~1 %), ces fissures sont plutôt fines, l'armature étant capable d'en contrôler l'ouverture qui varie entre 0,05 à 0,15 mm.

Enfin, l'étanchéité de l'ouvrage est assurée par des panneaux d'argile expansive, quant à l'enrobage des barres d'armature, il s'élève à 70 mm.

#### Grande-Bretagne

En Grande-Bretagne, on observe depuis quelques années une nouvelle tendance à construire les tunnels et les tranchées couvertes en béton. Ce pays s'inspire beaucoup, dans ce domaine, des techniques néerlandaises et scandinaves (en particulier danoises), si bien que des entreprises de construction britanniques ont à leur tour acquis un grand savoir-faire dans la réalisation des ouvrages enterrés sans étanchéité et, en particulier, des tunnels immergés. Cela étant, la prudence est demeurée de mise puisque l'étanchéité est souvent conservée, malgré l'introduction de mesures novatrices visant à prévenir la fissuration précoce comme, par exemple, le refroidissement à l'azote liquide, qui a été utilisé à grande échelle lors de la construction du tunnel immergé de Conwy au pays de Galles. D'autres ouvrages en béton armé ont toutefois été réalisés sans joints de dilatation et sans étanchéité, à l'instar de la tranchée couverte construite sous le bassin de Limehouse à l'Est de Londres.

#### Tranchée couverte de Limehouse (1993)

Partie d'un tunnel autoroutier de 1800 m de long, reliant la City aux Docklands à l'Est de Londres [7], les 470 m de la tranchée couverte de Limehouse, qui passe sous le bassin du même nom, sont composés d'un double caisson monolithique en béton armé construit à l'intérieur d'un batardeau provisoire.

Le caisson en béton armé de 22,5 m de large et de 7,7 m de haut est divisé en deux cellules de 9,95 m de largeur par un mur central de 0,60 m d'épaisseur. Les épaisseurs des murs latéraux, du radier et de la dalle supérieure sont respectivement de 1,0, 0,90 et 1,0 m. Des goussets ont été ajoutés entre les trois murs et le radier d'une part, et entre les trois murs et la dalle supérieure d'autre part pour augmenter la rigidité du caisson.

La construction de la chaussée a été intégrée à celle du radier, ce qui offre les avantages suivants :

- l'épaisseur de la chaussée augmente sensiblement le poids propre du radier en béton armé, ce qui accroît la sécurité de la structure entière face à la poussée d'Archimède et diminue la pression sous le radier ;
- l'épaisseur ajoutée augmente le bras de levier de l'armature et, partant, la résistance ultime du radier ;
- la livraison par camions des matériaux nécessaires à la construction de la chaussée devient superflue, puisque le béton nécessaire est pompé et compacté en même temps que le bétonnage d'une étape du radier.

Sur un terrain principalement composé de plusieurs couches d'argile, la tranchée a été coulée sur place, le béton étant pompé sur une distance d'environ 800 m. Par étapes de bétonnage de 10 m de long, on a commencé par le radier, suivi du mur central et des deux murs latéraux, pour finir par la dalle supérieure. Chaque cycle de bétonnage fut réalisé en une semaine.

La structure en béton armé a été dimensionnée pour un état limite de service avec des ouvertures de fissures en flexion de 0,2 mm (fissures non traversantes). L'article du « British Standard 4500 » concernant l'armature minimale à placer dans les différents éléments de structure en fonction de leur épaisseur, a été jugé trop défavorable pour les éléments épais du caisson. En accord avec le maître de l'ouvrage, il a donc été abandonné au profit de mesures visant à réduire le risque de fissuration thermique au jeune âge. Ce risque était en effet élevé, car :

- les charges importantes appliquées sur la structure ont nécessité de grandes épaisseurs en béton,
- la méthode de construction introduisait beaucoup d'entraves aux déformations en raison des

- trois étapes de bétonnage du caisson,
- le pompage sur une longue distance augmentait la température du béton frais,
- la nécessité d'atteindre des résistances élevées à la compression au jeune âge, pour décoffrer la dalle supérieure, impliquait une augmentation du dosage en ciment.

Pour remédier à ces problèmes les mesures suivantes ont été adoptées:

- le dosage en ciment a été optimisé,
- la température des différents matériaux constitutifs a été réduite,
- les tuyaux de pompage ont reçu une isolation,
- des cures spéciales étaient appliquées par temps chaud,
- une partie du ciment a été remplacée par de la cendre volante (113 kg de cendre volante par m<sup>3</sup> de béton, soit 30 % du poids du ciment).

Inaugurée en 1993 par le Premier ministre britannique, la tranchée couverte de Limehouse a été distinguée par le prix de la construction industrielle britannique (*British Construction Industry Award*) en 1994.

#### Utilisation des BHP dans les tranchées couvertes

Actuellement et pour des raisons de durabilité, la Norvège est le seul pays au monde qui utilise des formulations classiques de BHP pour la réalisation de tranchées couvertes. Ces formulations sont caractérisées par des dosages en ciment généralement élevés (de l'ordre de 400 kg/m<sup>3</sup>), des ajouts éventuels de fumées de silice, compris entre 5 et 10 % de la masse de ciment, et des rapports eau/liant relativement faibles (de l'ordre de 0,4) obtenus grâce à de forts dosages en fluidifiant. Or de telles formulations sont peu adaptées à la réalisation de tranchées couvertes, car elles conduisent à un important dégagement de chaleur pendant l'hydratation du ci-

ment et à un risque élevé de fissuration thermique au jeune âge. Le retrait endogène (retrait d'auto-dessiccation) qui devient important pour ce type de béton constitue également un handicap, compte tenu de l'entrave des déformations au jeune âge. Ainsi, la spécificité des tranchées couvertes conduit plutôt à opter pour des formulations de béton présentant une faible chaleur d'hydratation et une prise lente, afin de réduire au maximum les effets thermiques au jeune âge et le risque de fissuration traversante qui en résulte.

Les dernières réalisations d'enceintes de confinement de centrales nucléaires par Electricité de France (EDF) ont néanmoins montré qu'il était possible de mettre au point des formulations spéciales de BHP répondant aux exigences particulières des ouvrages massifs présentant un risque élevé de fissuration au jeune âge et devant satisfaire des exigences élevées en ce qui concerne les aspects en rapport avec l'étanchéité [8], [9]. De telles formulations sont principalement caractérisées par un dosage en ciment inférieur à 300 kg/m<sup>3</sup> et des ajouts en grande quantité de fumées de silice et de fillers, pour assurer un contenu en éléments fins comparable à un BHP classique, ainsi que de forts dosages en fluidifiant. Il en résulte des bétons à relativement faible dégagement de chaleur d'hydratation, mais dont les performances générales sont largement supérieures aux performances d'un béton ordinaire. La résistance à la traction est en particulier améliorée, ce qui a un effet favorable sur la fissuration. La maturation d'un tel béton est néanmoins plus lente que celle d'un BHP classique, ce qui peut conduire à devoir prolonger quelque peu la durée de cure et à retarder le décoffrage. Les autres avantages d'un BHP sont en revanche conservés, soit une grande ouvrabilité, un faible retrait de dessiccation, une résistance améliorée, une compacité

élevée et une faible perméabilité. Pour les ouvrages ou éléments d'ouvrage principalement sollicités en compression, l'utilisation d'un BHP permet de réduire l'épaisseur des sections, ce qui permet également de réduire l'élévation de la température pendant l'hydratation du ciment. L'amélioration de la résistance garantit aussi une réduction de l'ouverture des fissures sous charges imposées. Dans le cas des tranchées couvertes, cela s'applique aux fissures de flexion résultant des pressions de terre sur l'ouvrage. Par ailleurs, ce type de fissures non traversantes n'affectent pas l'étanchéité de l'ouvrage.

Cela dit, l'emploi de BHP à basse chaleur d'hydratation pose tout de même quelques problèmes. D'une part, de tels mélanges sont délicats à produire, car leurs propriétés rhéologiques à l'état frais sont très sensibles aux variations de dosage et aux propriétés des constituants du béton. D'autre part, l'utilisation d'un BHP dans le cas d'un tunnel ou d'une tranchée couverte pose toujours la question de sa résistance au feu. Il a en effet déjà été observé qu'un incendie dans un ouvrage réalisé en BHP occasionne de plus gros dégâts sur la structure que lorsque l'ouvrage est réalisé avec un béton ordinaire.

#### Conclusions

Des expériences rassemblées dans cet article, on peut dégager les enseignements suivants:

- Les tranchées couvertes en béton peuvent être réalisées sans membranes d'étanchéité, le béton étant susceptible d'assurer lui-même cette fonction. Des mesures doivent alors être prises pour garantir un tel résultat: elles concernent en particulier la composition du béton et les étapes de bétonnage, ainsi que les mesures de cure et les traitements thermiques aptes à réduire au maximum le risque de fissuration thermique au jeune âge.

- Pour limiter le risque de fissuration thermique au jeune âge, un refroidissement artificiel peut être envisagé soit en abaissant la température du béton frais avant le bétonnage, soit en refroidissant le béton dans la masse pendant sa prise. De simples mesures de température *in situ* permettent de surveiller l'évolution de la maturité du béton et d'intervenir rapidement en cas de problèmes.
- L'utilisation de formulations spéciales de BHP à faible dégagement de chaleur peut apporter une solution au problème de fissuration thermique au jeune âge. Leur emploi doit éventuellement s'accompagner d'autres séries de mesures pour maîtriser la fissuration, sans quoi le résultat peut s'avérer décevant.

#### Bibliographie

- [1] CHARIF H., MIVELAZ P.: « Synthèse sur la problématique et la conception des tranchées couvertes et autres ouvrages enterrés en béton ». ESM - Charif & Mivelaz, rapport N° 497.003.1-1, St-Sulpice, janvier 1998
- [2] FAVRE R., JACCOUD J.P., BURDET O., CHARIF H.: « Dimensionnement des structures en béton - Aptitude au service et éléments de structures », volume 8 du traité de génie civil de l'EPFL, PPUR, 1997
- [3] MIVELAZ P.: « Etanchéité des structures en béton armé - Fuites au travers d'un élément fissuré », thèse de doctorat EPFL N° 1539, 1998
- [4] ROELFSTRA P.E., SALET T.A.M., KUIKS J.E.: « Defining and application of stress-analysis-based temperature difference limits to prevent early-age cracking in concrete structures », Proceedings of International RILEM Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Munich, octobre 1994
- [5] MARSHALL C., PAILLAS E.: « The Øresund Tunnel - Design and Build in Practice », IABSE Colloquium on Tunnel Structures, Stockholm, 1998
- [6] GIERUM A.: « Developments in immersed tunnelling in Holland », *Tunneling and underground space technology*, Vol. 10, N° 4, pp. 455-462, 1995
- [7] GLASS P. R., BELL B. C.: « Limehouse link cut and tunnel: design and construction through Limehouse basin », Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Maritime and Energy, Vol. 118, pp. 211-225, December 1996
- [8] DE LARRARD F., ACKER P.: « Un exemple d'ingénierie du matériau: amélioration de l'étanchéité à l'air des enceintes internes de centrales nucléaires - Intérêt de l'emploi d'un béton à hautes performances de formulation spéciale », Rapport LCPC, Série: ouvrages d'art - OA 7, octobre 1990
- [9] ITHURRALDE G., DE LARRARD F., NECTOUX J.: « Béton à hautes performances (BHP) pour l'étanchéité des structures en béton - Expérimentation ». Annales de l'ITBTP N° 502, 1992

## Soutien aux créateurs d'entreprise: la SATW/ASST ouvre un site Internet

Comment transformer une idée en produit et arriver au succès? L'Académie suisse des sciences techniques souhaite guider de jeunes entrepreneurs en phase de création d'entreprise. Elle leur propose les premiers éléments d'une réflexion à travers des questionnaires à travailler soigneusement, disponibles sur Internet. Les questions qui y sont posées visent d'une part à cadrer le projet du créateur, la valeur ajoutée du produit, la connaissance du marché, le planning de lancement.

D'autre part, l'entrepreneur est amené à se poser des questions sur ses motivations et les qualités qui l'amèneront au succès. Une fois ces questionnaires remplis, il peut, s'il le souhaite, entrer en contact avec des membres expérimentés de l'académie suisse des sciences techniques.

Une adresse Internet: <http://www.satw.ch>, sous la rubrique Commissions/Idee Umsetzung Erfolg. Ce site est en allemand.

## Remise en état de la route nationale A2 dans le canton d'Uri (suite et fin)

Dans les pages qui suivent, nos lecteurs trouveront la seconde partie de la publication consacrée à ce thème. Nous profitons de remercier ici nos collègues de *Schweizer Ingenieur und Architekt*, où la version originale allemande a paru dans le N° 16/17 du 20 avril 1998, ainsi que le Département des travaux publics du canton d'Uri, dont l'appui a permis cette importante publication.

Nos remerciements vont également à notre secrétaire de rédaction, M<sup>me</sup> Maya Haus, et à notre rédacteur d'ingénierie, M. Manfred Miehlsbradt, dont les efforts conjugués et soutenus ont permis de remettre dans une forme lisible une traduction française dont l'auteur justifie pleinement l'adage *Traduttore, traditore*.

Jean-Pierre Weibel, rédacteur en chef