

Retour d'expérience d'un grand chantier d'écran mince au canal de dérivation EDF de Strasbourg

Patrick Bonnet et Jean-Marc Riesterer

La digue rive droite du canal d'amenée, objet des travaux (figure 1), se situe sur la dérivation amont de l'aménagement hydroélectrique de Strasbourg exploité par EDF GEH Rhin¹. Elle relie le barrage à la centrale et borde la zone de rétention des crues, dite du barrage agricole de Kehl-Strasbourg (BKS).

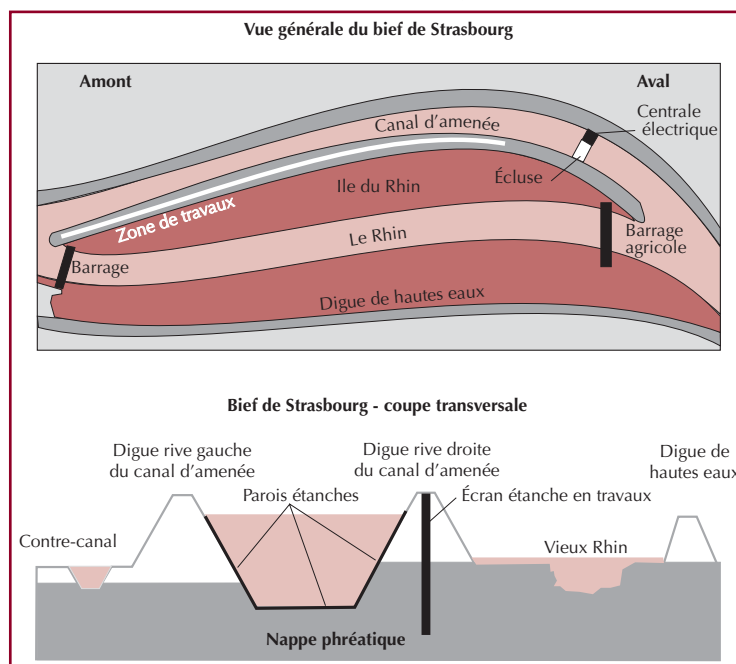
Cette zone de rétention de Strasbourg, disposée à cheval sur le tronçon court-circuité du Rhin, s'est trouvée mis en eau partiellement pour la première fois en 1999. Des remontées intempestives de nappe phréatique côté français ont imposé l'arrêt du remplissage. Cet article décrit le processus de décision et de réalisation d'un écran mince de 58 000 m², capable de s'opposer à ces remontées.

Présentation des ouvrages

Caractéristiques physiques

La digue en rive droite de canal d'amenée est d'une constitution hétérogène. Un noyau terreux compacté de forme trapézoïdale, réalisé à partir des terres de découverte, a été posé sur une assise de terres et sablons restés en place. L'ensemble est recouvert d'une recharge de matériaux sablo-graveleux d'origine locale. La crête de digue est calée 1,20 m au-dessus du niveau normal du canal. Les talus du noyau ont une pente de 2 pour 1. Ceux des recharges 2,5 pour 1 côté canal et 2 pour 1 côté talus aval. Le pied de digue, côté talus aval, est

▼ Figure 1 – Plan de localisation du chantier (d'après document EDF).



épaulé par un cavalier terreux de 4 m environ de largeur, sur toute la longueur de la digue. Le talus amont, côté canal, est protégé par des dalles en béton de ciment (section courante) ou en béton bitumineux (garage amont écluses), étanchées par des joints bitumineux. Ce masque amont contribue à l'étanchéité et constitue surtout une protection mécanique pour l'ouvrage. Le fond du canal n'est pas protégé.

1. GEH : groupe d'exploitation hydraulique Rhin.

Les contacts

EDF, Centre d'ingénierie hydraulique, 73373 Le Bourget-du-Lac Cedex

Caractéristiques géologiques du site

Le site de Strasbourg appartient au « Graben » du Rhin Supérieur qui, de Bâle à Francfort, comprend le fossé rhénan – étroit bassin sédimentaire formé à l'ère tertiaire – et ses deux grandes failles latérales. Le *substratum* ancien est constitué de formations sédimentaires d'âge secondaire, que sont venus recouvrir les dépôts tertiaires après le début de l'effondrement du fossé rhénan. Le fond de vallée est caractérisé par les vestiges des nombreuses divagations du lit principal du Rhin, avec d'anciens méandres comblés d'alluvions récentes mal consolidées et plutôt perméables. Les dépôts alluvionnaires sont réputés ici dépourvus de boules morainiques.

Les motifs de réalisation du chantier de paroi

La justification du chantier est double : améliorer la protection contre les crues du Rhin et garantir la sûreté des ouvrages hydrauliques d'EDF.

Améliorer la protection contre les crues du Rhin

Les États français et allemand ont à partir des années 1980 établi des infrastructures de protection contre les grandes crues du Rhin, comportant des ouvrages de prise sur le Rhin endigué, des barrages et des polders endigués pour la rétention des crues. Une convention franco-allemande de 1982 constitue le fondement de cette organisation.

Le barrage agricole (BKS) et quatre zones de rétention (polders) contribuent, ensemble, à l'écrêtement des grandes crues du Rhin à hauteur de 37 % environ du dispositif global. La zone de rétention du BKS mise en service en 1983 joue clairement un rôle prépondérant.

Les digues, dénommées « Ouest », ont une double fonction :

- d'une part, elle assurent l'endiguement permanent du Rhin et du canal avec une mise en charge de celle-ci de l'ouest vers l'est ;
- d'autre part, elles sont soumises à une contre-pression dans le sens est-ouest, sur les talus « aval » d'habitude « à sec », lors de la mise en eau des polders.

En cas de rétention, l'eau d'infiltration ré-alimente la nappe phréatique : le relèvement est actuellement limité côté français par des mesures de rabattement par pompages dans la zone industrielle, en rive gauche du canal EDF.

Garantir la sûreté des ouvrages hydrauliques d'EDF

La zone de rétention du BKS n'avait encore jamais été remplie (cote R.N. : 146), jusqu'aux crues puissantes du Rhin en février et mai 1999 durant lesquelles le BKS a été utilisé. Par deux fois, EDF a alors observé en rive gauche du canal des remontées de nappe, suffisantes pour créer des désordres significatifs dans le contre-canal.

Les mesures d'urgence post-crués et l'exploitation provisoire du BKS

La partie allemande a mis en place rapidement, sur tout le tronçon concerné de la berge rive droite du contre-canal rive gauche, un renforcement en enrochements. Les possibilités d'utilisation du BKS ont été momentanément limitées (cote maximale provisoire : 142,50). Les deux États ont décidé d'engager aussitôt l'étude puis la réalisation de travaux, susceptibles de permettre au plus tôt la libre utilisation du BKS pour la gestion des crues. L'État allemand a choisi de piloter les études du projet qu'il devrait ensuite financer. EDF n'est pas intervenu dans cette recherche de solution.

La solution proposée par la partie allemande

Ici, la nappe alluviale est très puissante (plus de 200 m d'épaisseur). La perméabilité des alluvions anciennes y est assez homogène. Le lit du Rhin a laissé en surface des traces de divagations « récentes » sous le canal EDF avec un remplissage plutôt perméable sur 5 à 8 m d'épaisseur.

Les études de nappe conduites par la BAW³ ont montré qu'il fallait construire une paroi étanche continue dans la digue rive droite du canal de dérivation, entre le barrage EDF de Strasbourg et la zone du poste haute tension de l'usine EDF.

La géométrie proposée pour l'écran

La définition de l'ouvrage proposé se traduit par un écran d'une longueur totale de 2 870 m environ, une surface de près de 60 000 m² et une hauteur de 22 m sous la crête de digue. L'écran pénètre d'environ 15 m dans la plaine alluviale du Rhin et recoupe ainsi tous les méandres « récents » du fleuve.

3. Bundesanstalt für Wasserbau : institut fédéral de recherche et d'ingénierie pour les voies d'eau.

La technique de construction de la paroi n'est pas imposée par la BAW, qui s'est bornée à en donner une définition fonctionnelle (géométrie, continuité, pérennité, perméabilité).

Au sud, la paroi vient se raccorder contre le barrage, se refermant sur la structure du mur amont du barrage. Au nord, elle se raccorde dans le corps d'une digue du réseau VNF⁴ qui contourne le poste haute tension de l'usine EDF. L'écran passe sous une ligne 225 kV au sud, avec un tirant d'air limité à 21 m pour l'exécution des travaux.

Le tracé en plan est indifférent, mais doit prendre en compte diverses contraintes liées à la présence de réseaux électriques enterrés, d'une ligne aérienne 20 kV, d'un siphon de ré-alimentation du polder, d'un limnimètre et de plusieurs points de mesures répartis le long de la digue.

Le contexte du chantier et les enjeux

La phase de réalisation de la paroi a été initiée dans l'urgence et s'est trouvée assujettie à diverses contraintes politiques, financières et environnementales.

Le contexte politique – financier – environnemental

Pour la partie allemande, il s'agissait de retrouver au plus tôt une liberté de manœuvre pour la gestion des situations de crues ; les travaux devaient garantir lors des crues la préservation des activités économiques dans le secteur du Rhin Inférieur, mais aussi limiter le coût de la politique de défense contre les crues.

Pour la partie française, il importait de mieux contrôler les risques imposés aux riverains et aux infrastructures. EDF craignait notamment une fragilisation de la dérivation amont, susceptible d'entraîner des conséquences désastreuses.

La zone du chantier borde, sur toute sa longueur, la zone naturelle classée du Rohrschollen, qui est étroitement surveillée. Le chantier a également pris en compte l'existence d'un passage transfrontalier (piétons et cyclistes) le long de l'écran en construction. La navigation sur le canal n'a pas été inquiétée.

Le contexte technico-administratif – Règles de procédure applicables

Au vu des enjeux de cette opération, EDF a souhaité prendre en charge la construction de

cette paroi étanche, sur la base de l'étude de définition produite par des organismes allemands. Une convention franco-allemande spécifique de décembre 2000 a défini le cadre de ces futurs travaux réalisés en territoire français et assujettis au droit français.

Les intervenants du chantier et leurs rôles

Maîtrise d'ouvrage – Maîtrise d'œuvre

La partie allemande a financé à 100 % les études et les travaux de l'opération, le financement étant partagé entre l'État allemand, représenté par son Service de la navigation, et la région de Bade-Wurtemberg. Par convention entre les parties, EDF en tant que concessionnaire des ouvrages concernés, occupait également une position de maître d'ouvrage. Le concept de maîtrise d'œuvre est ici retenu, non pas au sens juridique mais suivant les pratiques issues de l'organisation interne d'EDF. La réalisation des travaux d'écran a été confiée au bureau d'ingénierie intégrée d'EDF.

Choix du titulaire : procédure « achat » utilisée

La partie allemande a demandé qu'il soit procédé à une consultation « européenne » ouverte et a voulu participer à l'ensemble du processus de consultation et d'attribution du marché, piloté par EDF dans un cadre de « mieux-disance » technique et financière. Le marché a été attribué aux entreprises Soletanche-Bachy (mandataire) et Zublin, agissant au sein d'un groupement momentané d'entreprises (GME). Zublin s'est assez rapidement retirée de l'affaire, limitant ainsi sa contribution à la mise à disposition de la centrale de fabrication du coulis.

Le déroulement des travaux – Retour d'expérience

Description générale des travaux et planning réalisé

La solution technique retenue à l'issue de la consultation est constituée de :

- une paroi épaisse de 60 cm d'épaisseur et de 22 m de profondeur des PM 0 (en amont) au PM 173, pour le raccordement amont au barrage et le passage sous la ligne THT ;

4. Voies navigables de France.

– un écran mince lancé par « jetting haute pression » de 10 cm d'épaisseur en moyenne, du PM 173 au PM 2870 en aval.

Le toit supérieur de l'écran a été réalisé à la cote (148,45), soit 1 m sous la crête de digue, alors que le pied d'écran varie entre les niveaux (125,50) et (130,50) hors extrémité aval et points singuliers. La reprise d'étanchéité sous la digue rive droite par un écran ancré au *substratum* a nécessité la réalisation de trois phases de travaux :

- les travaux préparatoires suivis des installations générales ;
- l'essai de démonstration de savoir faire de l'écran (EDSF) ;
- la production d'écran.

Le déroulement du chantier s'est articulé comme suit, sur une durée globale de 44 semaines.

• **Étape 1** – Études, installations et essais : 14 semaines. À noter des difficultés pour le montage de la grue et la mise au point de la technique, pendant l'essai de démonstration préalable (EDSF). Organisation du travail sur un poste de jour.

• **Étape 2** – Production de l'écran mince : 23,5 semaines effectives. Organisation du travail en postes (deux puis trois postes journaliers).

• **Étape 3** – Travaux de finitions et reconstitution de la chaussée en crête : 6 semaines après la fin de pose de l'écran. Organisation du travail sur un poste de jour.

Les descriptions ci-après se limitent aux deux phases constitutives de la confection de l'écran mince.

Installations générales et essai de démonstration de savoir-faire

LES INSTALLATIONS DE CHANTIER

Les installations ont été implantées en rive gauche du barrage sur le musoir situé en amont du chantier. Seules les installations strictement nécessaires pour l'essai préalable ont été anticipées.

L'atelier de paroi mince avec la grue Pinquely GTL175 a été monté à l'extrémité aval sur l'aire de croisement des digues EDF et VNF, car la hauteur de son mat Zeppelin (42 m) ne permettait pas le passage sous le faisceau aérien de 225 kV, situé au droit des installations de chantier.

L'ESSAI DE DÉMONSTRATION DE SAVOIR-FAIRE (EDSF) : OBJECTIF ET RÉSULTATS

Sa finalité en était – pour le commanditaire EDF – de prouver sans perte de temps en procédures et sans prise de risque financier irréaliste le bien-fondé du choix du titulaire des travaux.

La technique de la paroi mince lancée par *jetting* à plus de 20 m de profondeur n'avait jamais été validée dans les terrains alluvionnaires rhénans. Prévu initialement à 22 m de profondeur, l'essai avait pour objectif :

- de démontrer l'adéquation de la solution technique proposée par le GME avec les critères contractuels de profondeur, de continuité d'écran, d'étanchéité, de rendement en production industrielle et de consommation de coulis ;
- de démontrer ainsi la faisabilité de l'écran aux conditions prescrites tout en pérennisant les organes d'étanchéité du canal grâce à des mesures de vibrations du masque amont et de tassements de la digue.

La zone d'essai a été choisie par la BAW dans un secteur suffisamment proche de la centrale de coulis et comportant des bancs d'alluvions réputées compactes entre 18 et 22 m de profondeur, d'après les reconnaissances antérieures à l'opération effectuées par forages, essais pénétrométriques et mesures géophysiques. Deux types d'essai ont été menés :

– une boîte en forme de losange a été confectionnée pour conduire un essai de pompage. Dans la boîte « étanche » et aux abords ont été réalisés plusieurs forages et piézomètres. Un essai de pompage dans le puits et des essais d'eau Lefranc ont permis de valider les critères contractuels de perméabilité et de continuité de l'écran à l'emplacement de l'essai ;

– un écran mince continu de 25 m de longueur a ensuite été foncé pour valider les critères contractuels de profondeur, de rendement et de consommation de coulis. Sur ce tronçon de paroi mince de 25 m, l'entreprise a d'abord rencontré de grandes difficultés à descendre au-delà de 20 m de profondeur, pour 22 m prescrits.

L'impact de la géologie et les problèmes matériels rencontrés par l'entreprise ont ainsi abouti dans un premier temps à la non-validation des critères économiques et géométriques de l'écran, malgré les moyens exceptionnels mis en œuvre (charge roulante en service : 180 tonnes, empattement 6,50 m).

Sur proposition des entreprises titulaires, des adaptations techniques mineures de l'atelier assorties de nouveaux critères contractuels négociés avec le « concepteur » BAW ont permis de prolonger l'essai avec l'accord de toutes les parties et enfin de prononcer sa validation complète avec un mois de retard. Cette validation a entraîné la levée d'option prévue au marché et enclenché la phase de production de l'écran proprement dite après achèvement des installations générales.

La réalisation de l'écran mince (du PM 173 au PM 2870)

DESCRIPTION – PHASAGE

L'atelier de réalisation, pour des raisons d'organisation, a évolué de l'aval vers l'amont en deux phases.

- **Phase 1** : du plot d'essai à la jonction amont avec la paroi épaisse, soit 649 panneaux. Ils ont été réalisés, hors zone d'essai, pour une longueur de 477 m. Pour ce tronçon, la station de reprise de coulis haute pression (HP) était installée à l'entrée de la base vie (musoir amont).

- **Phase 2** : de l'extrémité aval jusqu'à la boîte d'essai, soit 3 166 panneaux pour un linéaire de 2 216 m. Pour cette phase, l'atelier a basculé à l'extrémité aval de l'écran. La centrale de relaiage HP a été installée en crête de digue en 4 points à l'avancement, toujours en amont de l'atelier. L'approvisionnement en coulis se faisait par un camion nourrice. Une tranchée en tête de paroi, utilisée comme réservoir, était creusée à l'avancement dans l'axe de la digue, par tronçons de 20 m environ.

DISCONTINUITÉS OBSERVÉES

Deux discontinuités ont été traitées : la première lors de la rencontre d'un obstacle de la digue VNF, à - 9 m de profondeur, et la seconde pour le contournement d'un siphon existant.

RACCORDEMENTS AUX OUVRAGES EXISTANTS

Le raccordement amont a été réalisé par injections de clavage au tube à manchettes : six forages injectés ont été réalisés en deux phases à - 22 m. Le raccordement aval à la digue VNF a été assuré par simple croisement et recouvrement d'écrans existants dans ce secteur aval.

Les points particuliers pour la réalisation de l'écran mince

Des modes opératoires spécifiques ont été appliqués pour la fabrication des coulis, la fabrication et l'accrochage des profilés et l'exécution de la paroi mince par lançage haute pression.

LA FABRICATION DES COULIS (PHOTO 1)

Cette fabrication comportait deux phases distinctes : un mûrissement de la boue bentonitique pendant 4 heures et son stockage en silo, puis la fabrication du coulis par reprise de la boue mûrie et malaxage en continu avec le ciment. Après fabrication, le coulis était livré directement par pompage : envoyé sous conduite, si l'atelier de production était à moins de 500 m (essai préalable et étape 1) ; transporté par camions-nourrices, avec des bacs de reprises pour les distances supérieures à 500 m.

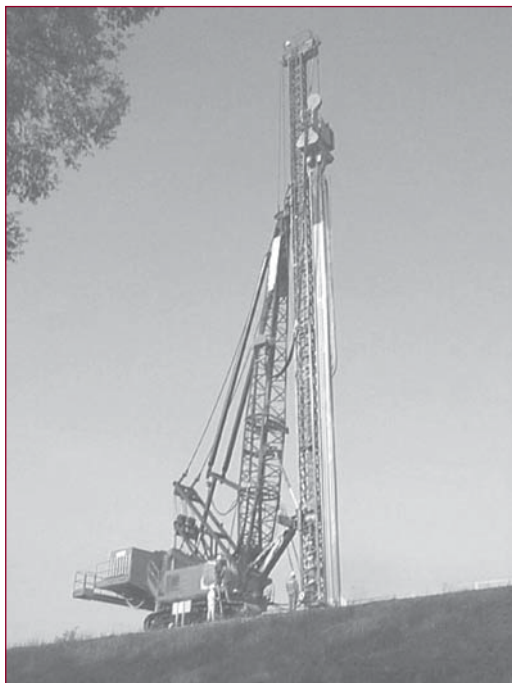
LA FABRICATION ET L'ACCROCHAGE DES PROFILÉS

Le profilé d'essai de type HEB 700 a été rapidement remplacé par trois profilés HEM 700 (photo 2). Ces profilés, de 26 m de longueur au lieu de 24 m, ont été assemblés par éclissage et dotés de têtes et de sabots de pied calculés par éléments finis avec une conception spécifique pour lutter contre la fissuration et l'abrasion de l'âme des profilés. Les assemblages sur le profilé étaient soudés à l'arc électrique avec des éclisses ovoïdales (pas de coupe droite) pour une meilleure répartition des contraintes, notamment en tête sous les pinces du vibrofonçeur.

▼ Photo 1 – Centrale de fabrication du coulis avec son isolation pour travaux hivernaux (photo EDF).



► Photo 2 – L'atelier vu de la piste de pied : le profilé HEM 700 est entièrement relevé. L'atelier pour paroi mince occupe toute la largeur de la crête (photo EDF).



Tous les profilés ont été élaborés puis maintenus par la suite en état dans l'atelier ad-hoc du chantier, leur permutation en haut du mat constituant chaque fois une opération délicate.

L'EXÉCUTION D'UN PANNEAU DE PAROI MINCE LANCÉE

La technique de la paroi mince avec lançage haute pression consiste à foncer un profilé métallique à l'aide d'un vibreur hydraulique en injectant simultanément un coulis auto-durcissant à base de bentonite-ciment. Le coulis sert de lubrifiant pour le profilé et de stabilisant des parois de forage après extraction du profilé.

Le lançage est un système de jet haute-pression encore appelé *jetting*, situé au pied du profilé qui permet d'améliorer la pénétration dans les terrains compacts. Ici, le profilé comprenait 3 buses de *jetting* : une vers l'arrière (rétro-jet), et deux dans le sens de progression de l'écran. Le fonçage se fait jusqu'à la cote prévue. La remontée se fait en maintenant un remplissage « suffisant » en coulis dans l'empreinte laissée dans le terrain.

La paroi continue est réalisée par une succession d'empreintes sécantes. La continuité de l'écran est assurée par un aileron de recouvrement guidé par l'empreinte précédente. La machine progresse à reculons. Le pas d'exécution était ici de 700 mm.

À la descente, de 0 à 3 m, le profilé descend en vitesse contrôlée avec un *jetting* à 100 bars. Au-delà de 3 m d'enfoncement, les pinces de maintien du profilé sur le mat sont ouvertes, la puissance du vibreur (PTC 100 HD) est augmentée et le *jetting* atteint 400 bars, ceci jusqu'à l'atteinte des critères de fin d'exécution de panneau (vitesse et ancrage). Pendant la descente, le profilé s'enfonce ainsi gravitairement, en fonction de la dureté du terrain.

Avant d'exécuter la remontée, le coulis doit refluer en tête de forage. La remontée s'effectue alors avec un treuil limité à 90 t de traction. Elle se fait à vitesse régulière sous l'injection de 45 l/m² de coulis, à une pression comprise entre 400 et 300 bars. Le vibreur est arrêté à - 4 m et le *jetting* est interrompu à - 2,5 m sous la crête.

À la descente, comme à la remontée, les paramètres relatifs à l'exécution de panneaux sont enregistrés en temps réels avec un appareil de type LUTZ CL 88 et affichés en cabine devant l'opérateur.

La continuité de l'écran mince au passage d'obstacles enterrés

LE SIPHON DE BAUERNGRUNDWASSER

À l'origine, cet ouvrage devait être démonté pour permettre la continuité de l'écran. L'entreprise a proposé une variante sans démontage. Le franchissement a été traité comme un obstacle simple dont le processus d'exécution était prévu au marché. Il a consisté à foncer au plus près, de part et d'autre du tube Ø 500 mm. L'aileron de recouvrement de 30 cm de largeur a permis de ne laisser sous le tube qu'une bande de terrain non perforée de 20 cm de largeur. Son injection s'est faite en injectant par saturation, avec le retro-jet situé sous l'aileron. De plus, le panneau amont a fait ici l'objet d'une double perforation. La première avec les 3 buses, la seconde avec la buse centrale obturée. La remontée du coulis par le panneau précédent a permis de valider la continuité de l'écran.

AUTRES OBSTACLES ENTERRÉS

À la rencontre d'obstacles enterrés non identifiés, le processus contractuel de traitement comprenait trois degrés de traitement.

- **Degré 1** – Obstacle sur un panneau isolé : le traitement consistait à saturer les panneaux encadrants.

• **Degré 2** – Obstacle concernant plusieurs panneaux jointifs : le traitement prévoyait le contournement de l'obstacle.

• **Degré 3** – Obstacle et contournement impossible : le traitement prévoyait une injection par *jet-grouting* (qui n'a de fait jamais été mis en œuvre sur ce chantier).

Un seul obstacle été rencontré sur le chantier, hormis le siphon. Il a été jugé de « degré 1 » et traité conformément au processus contractuel.

Les outils spécifiques employés

Le vibreur PTC 100 HD a dû être modifié pour optimiser son efficacité et éviter le phénomène de rebond constaté initialement. La modification a consisté à l'équiper de masses additionnelles d'un poids de 3 200 kg pour mobiliser la puissance maximale du vibreur à 400 bars.

Le profilé HEB 700 a d'abord été doté d'une buse additionnelle au centre du profilé, sous l'âme, pour tenir compte du rayon d'action réduit du jet dans les terrains compacts.

Le groupe hydraulique embarqué sur la GTL 175 était un prototype PTC 100 à double fonction. Il assurait à la fois l'hydraulique du vibreur mais aussi celle du mat Zeppelin, support du vibreur.

Fournitures et contrôles effectués

LES CONTRÔLES EFFECTUÉS POUR LE COULIS

• Suivi de la qualité de production du Procrete (par contrôle interne) : teneur des composants, module chimique, perte au feu, surface blaine, teneur en chlorure.

• Suivi qualité du coulis sur éprouvette (par contrôle externe) : compression : $R > 1$ Mpa ; perméabilité : $R > 1,1 \cdot 10^{-10}$ m/s.

LES CONTRÔLES EFFECTUÉS POUR L'ÉCRAN MINCE

De nombreux paramètres ont été contrôlés lors de la réalisation de chaque panneau d'écran :

- le positionnement en X à ± 2 cm ;
- la verticalité du mat à $\pm 0,2^\circ$;
- le temps de forage en descente ;
- le temps d'injection ;
- l'heure de démarrage et l'heure de fin ;
- le volume injecté à la descente et à la remontée ;
- la profondeur du panneau ;
- la pression hydraulique sur le vibreur ;
- la vitesse d'avancement du profilé ;
- le débit d'injection à la descente et à la remontée ;
- la pression d'injection à la descente et à la remontée ;
- le temps cumulé à la descente ;
- la profondeur d'ancrage en pied.

Tous ces paramètres ont été enregistrés en temps réel et imprimés sur une fiche d'identification pour chaque panneau. En dehors des essais, 3 815 fiches ont ainsi été établies.

LES CONTRÔLES EFFECTUÉS

POUR LA STABILITÉ DE LA DIGUE

La réalisation de ce type de chantier faisait craindre de nombreux risques :

- risque d'instabilité de la digue par grand glissement et/ou poinçonnement du fait de la présence d'un atelier de 180 t en crête de digue ;

	Matériau	Dosage
Coulis écran	Ciment Procrete (Heidelberger Zement de Heidelberg)	160 kg/m ³ de coulis
	Bentonite CTN2 (Soc. Ibeco)	32 à 40 kg/m ³ de coulis
Profilés HEB puis HEM	HEB et HEM 700 (Soc. Arcelor)	
Protection base des profilés	Plaques bimétalliques (Soc. Contex)	
Eau pompée dans le Rhin		933 l/m ³ de coulis

▲ Tableau 1 – Principales fournitures pour l'écran mince.

- risque de tassement sous l'effet des vibrations engendrées par le vibro-fonçage d'un profilé de grandes dimensions ;

- risque de claquage du sol sous l'effet des pressions d'injections élevées (400 bars) et des matériaux fins rencontrés à certaines altitudes du fonçage.

Pour les instabilités par glissement ou poinçonnement, une vérification de la stabilité de la digue a été produite par Soletanche-Bachy. Pour le tassement de la digue, un contrôle topographique et géophysique a été mis en place en crête de digue. La phase de validation de ces contrôles a eu lieu pendant les essais de démonstration de savoir-faire.

Le contrôle topographique

Le dispositif d'auscultation topographique comprenait deux lignes de contrôle en crête de digue :

- une, côté canal sur les dalles en béton du masque : 64 points, au pas de 50 m sauf dans la zone d'essai où les points étaient distants de 6 m ;

- une, côté talus aval, sur les 26 embases en béton de l'ancienne ligne aérienne de 20 kV tout juste déposée.

La fréquence des levés a augmenté avec la cadence de production d'écran, passant d'un rythme mensuel à un rythme bimensuel. Pendant l'essai EDSF, le nivellement des points a mis en évidence des tassements de quelques mm (1 à 12) jugés normaux dans ce type de digue. Lors des travaux, seuls quelques points ont révélé un tassement très sensible (20 à 31 mm) suite au passage de l'atelier lourd. C'est d'ailleurs ce qui a motivé la 2^e ligne de contrôle côté talus aval.

Le contrôle vibratoire de la digue

Un contrôle a été effectué pendant l'essai EDSF, par mesure des vitesses particulières avec un enregistreur LUTZ. Le seuil contractuel de vitesse était fixé à 22 mm/s, mesuré à 10 m de l'écran sur des dalles béton du masque amont du canal. Les valeurs enregistrées par les capteurs, posés à 7 m sur les dalles béton, ont été de 8 mm/s maximum dans les couches les plus compactes. Cette faible réponse vibratoire de la digue a conduit à l'abandon de ce type de contrôle pour la suite du chantier.

Les contrôles piézométriques

Pendant les travaux, quatre piézomètres de contrôle ont été disposés en pied de digue. Le suivi

piézométrique a été effectué en crête et en pied au pas hebdomadaire : les mesures n'ont pas révélé d'anomalie particulière. Les fluctuations de niveau, inférieures à 1 m, ont en fait coïncidé avec celles des débits du Rhin. Le risque de claquage était suivi en temps réel d'une part avec les enregistrements de paramètres situés dans l'enregistreur de la cabine de l'opérateur, d'autre part à l'aide de l'observation visuelle de la remontée de coulis dans la pré-tranchée de tête. Aucune anomalie n'a été constatée pendant toute la phase de production d'écran.

Les contrôles pour l'environnement et la gestion des déchets industriels

L'entreprise avait établi une notice environnementale, dont l'application s'est révélée laborieuse. Néanmoins, aucune incidence significative sur l'environnement n'est à déplorer. Tous les déblais et coulis ont été évacués et retraités dans des centres agréés, après un stockage provisoire pour décantation au musoir amont.

Les problèmes rencontrés et les solutions mises en œuvre

Le chantier de paroi mince a dû faire face à de nombreuses difficultés, principalement dues au terrain. Sur le site de Strasbourg, le *substratum* était réputé connu pour sa compacité vers 20 m de profondeur sous la crête de digue (cf. écran confectionné en 1985). Ce constat avait été confirmé par des mesures pénétrométriques (relevés joints au dossier de consultation). Lors de l'essai préalable, l'ameublissement par lançage haute pression allait finalement apparaître comme une solution plutôt bien adaptée la géologie du site. En cours de chantier, une seconde caractéristique du *substratum* a été confirmée : l'abrasivité très grande des alluvions du Rhin.

LES DIFFICULTÉS DUES À LA COMPACITÉ DU SUBSTRATUM

Constats lors de l'essai préalable (EDSF)

L'exécution de la boîte étanche, en vue de l'essai de pompage devant valider la « continuité » de l'écran, s'est révélée difficile au-delà de 18 m de profondeur et même impossible au-delà de 21,70 m. Les vitesses de descente chutaient sous 20 m/h, seuil considéré habituellement par les professionnels des palplanches comme celui du refus d'enfoncement.

De plus, le vibreur fonctionnait alors anormalement car sa partie réactive entraînait en résonance dans les horizons difficiles. Des temps de descente moyens de 20 min ont été nécessaires pour atteindre des horizons moyens à (-20,40 m) sous la crête. Les conséquences d'un tel fonctionnement ont été d'une part l'impossibilité d'atteindre le niveau (-22 m) et la réalisation de la boîte arasée à la cote (-20 m), d'autre part la production de résurgences de coulis (*spoils*) en tête de paroi mince (consommation observée : 440 l/m²).

Une première parade a consisté à augmenter la masse « fixe » du vibreur, d'abord de 1,7 tonnes (2 × 850 kg) par adjonction de masses réactives. Lors de la réalisation de la paroi plane sur 25 m, la modification du vibreur a alors apporté un bien meilleur comportement (stabilisation de la partie réactive) et une forte augmentation de sa puissance de pénétration.

L'efficacité induite a permis d'atteindre la cote de -22 m et même -23 m comme demandé contractuellement. 36 panneaux ont ainsi été réalisés avec un temps de pénétration moyen de 14 min, soit un gain de 30 %. La consommation moyenne est tombée à 261 l/m².

Ces nouvelles conditions laissent entrevoir une cadence moyenne de production d'écran de 46 m²/h en régime instantané et de 30 m²/h en régime industriel.

Devant le constat d'un rendement industriel situé pour l'essai EDSF dans la fourchette basse annoncée, une analyse des vitesses d'enfoncement prévisionnelles a été réalisée par le GME en fonction des données pénétrométriques connues, pour estimer l'influence de la géologie sur les cadences. La conséquence de cette analyse, étendue par le GME aux différents profils géologiques du chantier, a été de constater que le rendement industriel prévisionnel global en fonction du *substratum* serait proche de 31 m²/h.

Les parades du GME pour réduire les difficultés géotechniques sur le chantier ont été de deux ordres :

- améliorer encore le matériel, d'une part en augmentant l'alourdissement de la partie réactive du vibreur (jusqu'à 3 200 kg) pour mobiliser la puissance maximale du vibreur, d'autre part en systématisant la buse de *jetting* au centre du profilé pour tenir compte du rayon d'action réduit du jet dans les bancs de terrains compacts ;

- modifier le projet en suggérant l'adaptation du pied de la paroi au profil géologique rencontré. En effet, les sondages pénétrométriques à disposition faisaient apparaître un horizon alluvionnaire très compact, variable sur le profil développé entre 18 et 24 m de profondeur. Cet horizon épais, d'une granulométrie très étendue, pouvait être considéré comme peu perméable en grande masse. De plus, le GME a fait remarquer que cet horizon servait habituellement de zone d'ancrage pour les fondations profondes sur le secteur de Strasbourg.

Après un mois d'essai, le concepteur BAW – observant les améliorations et pesant les conséquences potentielles d'un échec – a admis de modifier certaines caractéristiques de son projet. Abandonnant le principe d'une coupure étanche arasée à la cote inférieure uniforme (127,50), BAW a accepté une coupure étanche de plancher variable, suivant les ondulations du toit de l'horizon géologique continu d'alluvions anciennes compactes appelé *substratum* et attendu entre les cotes 125,50 et 130,50. Cette modification s'est accompagnée bien sûr de nouveaux critères contractuels d'exécution de la paroi.

Nouveaux critères de réalisation de la paroi mince

Le nouveau principe de réalisation de l'écran consistait désormais à arrêter le pied sur la base d'un critère d'ancrage et non plus sur celui d'une profondeur fixe. Les modalités de réalisation ont été fixées comme suit : profondeur minimale de 19 m et maximale de 24 m sous la crête, ancrage compris dans les terrains compacts. Ancrage normal de 1 m de hauteur, ou de 50 cm au minimum dans les alluvions compactes et sous les conditions ci-après. Seuil d'entrée dans les couches compactes : constat d'une vitesse d'enfoncement égale à 60 m/h. Seuil d'arrêt en pied : constat d'une vitesse d'enfoncement inférieure ou égale à 20 m/h et si l'ancrage réalisé atteint 50 cm dans les couches compactes.

Ces nouveaux critères étaient censés permettre le retour à un rendement industriel proche de celui prévu à l'offre.

LES DIFFICULTÉS DUES À L'ABRASIVITÉ DES ALLUVIONS

Pendant l'essai préalable, il avait été observé une cohésion et une abrasivité forte des matériaux : le sabot de pied des HEB s'était usé fortement et prématurément, malgré l'ameublissement préa-

lable par *jetting* à 400 bars. L'âme du 1^{er} profilé HEB 700 avait ainsi été percée au-dessus du sabot de pied et le profilé lui-même s'était cintré rapidement par affaiblissement de l'âme.

La parade a consisté à changer de profilé en passant d'un profilé HEB 700 à un HEM 700, plus épais, plus lourd et donc plus résistant à l'abrasion et à la fatigue. De plus, pour lutter contre cette abrasion, une protection de la tête du sabot a été adoptée en chemisant toutes les faces d'attaque du sol, y compris les têtes de *jetting*, avec des plaques d'acier anti-usure appelé « bimétal » de la société allemande Contex. Ce bi-composant est constitué d'une tôle d'acier E36 chargé de soudure autogène. La face « soudure » constitue l'anti-abrasif et la face « acier » permet l'assemblage sur le HEM.

LES PROBLÈMES LIÉS AUX OUVRAGES EXISTANTS : PASSAGE DE ZONES INDURÉES

Entre le PM 2580 et l'extrémité aval de l'écran (digue VNF), l'écran a longé deux écrans existants : celui de la digue du BKS et celui de la digue EDF, réalisé en 1985 par Soletanche. Dans ce secteur, la production a chuté de 30 % en cadence instantanée, passant de 57 m²/h à 38 m²/h et les faibles vitesses d'enfoncement ont généré une quantité importante de *spoils* en tête de digue, qu'il a bien fallu évacuer. Aucune parade n'a été trouvée pour s'affranchir de cette difficulté.

LES PROBLÈMES LIÉS AUX MATÉRIELS

La compacité, l'abrasivité des sols et le respect des engagements contractuels sur les délais, ont eu pour conséquence de soumettre les matériels à de fortes sollicitations. D'où un accroissement important du taux de maintenance qui a concerné notamment :

- le vibreur PTC 100 HD et son groupe hydraulique. Ce dernier, nouveau prototype de chez PTC, a même subi un incendie de son moteur immobilisant l'atelier pendant 48 heures ;
- le système de lançage avec l'usure rapide de la pompe HP du type Soilmec ainsi que des barres et tubulures implantées sur le sabot des profilés. Les buses ont nécessité un assemblage par ajustage de haute précision, peu compatible avec des terrains aussi abrasifs ;
- les profilés qui, outre le changement du type HEB vers HEM dès la fin de l'essai EDSF, ont nécessité une mise au point quasi permanente des têtes et sabots de pieds, pour résister aux sollicitations.

LA MAÎTRISE DE L'ANCRAGE AU SUBSTRATUM

Le projet initial prévoyait un écran à géométrie uniforme, calée à – 22 m de profondeur. Les seuls critères techniques étaient alors la pression du lançage et le débit du coulis sur la hauteur du panneau.

L'évolution du projet vers un écran à « géométrie variable » a imposé une meilleure maîtrise de l'ancrage de pied, dont les critères de réalisation étaient très pointus et difficilement gérables par l'opérateur. Pour palier la subjectivité de l'évaluation des vitesses moyennes de descente et respecter les critères d'ancrage, suite aux premières non-conformités relevées par EDF, le GME a développé un logiciel embarqué qui traitait les informations en temps réel et indiquait à l'opérateur que l'ancrage était atteint. Ce dispositif a été mis en service après un mois de production industrielle et a donné toute satisfaction car aucune anomalie n'a plus été détectée pendant la suite des travaux.

LES NON-CONFORMITÉS EN PIED D'ÉCRAN

Avant la mise en service de l'appareil enregistreur, plusieurs types de non-conformités ont été observées entre les PM 360,00 et 625,00 dont les conséquences se sont traduites par des sous-profilés ou des sur-profilés et/ou sous-ancrages et sur-ancrages. Toutes ces non-conformités ont été analysées et traitées quand c'était nécessaire.

COÛT DU SYSTÈME D'ÉTANCHÉITÉ PAR ÉCRAN MINCE VIBRÉ DANS LE SOL AVEC LANÇAGE H.P.

Sur les bases des contrats passés pour les lots de génie civil, le prix moyen de l'écran hors ingénierie est proche de 52 €/m² de surface brute (valeur 2001). Il est rappelé que ce prix couvre les installations, l'essai initial, la portion amont réalisée en paroi épaisse pour environ 7 % de la surface brute ainsi que les raccordements aux ouvrages existants aux deux extrémités.

Conclusion

Pour utiliser pleinement les capacités de rétention des crues du Rhin dans la zone de Strasbourg, il a fallu construire un écran étanche de près de 58 500 m² de surface et plus de 20 m de profondeur dans les alluvions rhénanes.

Cette étanchéité est aujourd'hui réalisée mais n'a pas pu être testée faute d'une crue suffisamment puissante du Rhin, susceptible de remplir

le bassin de rétention de crues à l'origine du problème. Le contrat prévoit cinq années au plus pour effectuer ce test, dans le cadre de la garantie de parfait achèvement.

On a employé sur près de 2 700 m de long une technique particulière d'écran mince, qui associe à la descente d'un profilé vibrant de forte inertie (HEB ou HEM 700) un affaiblissement du sol par injection de coulis sous forte pression (jusqu'à 400 bars).

La remontée du profilé ménage dans le sol une empreinte qui est remplie à basse pression avec le même coulis de bentonite-ciment.

La profondeur de l'écran mince a atteint par endroits 24 m sous la crête de digue, avec une valeur minimale contractuelle de 19 m et une moyenne effective de 21,60 m. L'écran a été élaboré en 24 semaines environ de production, hors installations-replis et finitions.

Les problèmes techniques rencontrés sur ce chantier ont été :

- l'échec – dans un premier temps – de l'essai de démonstration de savoir-faire. Cet échec a

conduit à faire évoluer les critères techniques contractuels de réalisation avec l'accord des parties en présence ;

- des baisses significatives de rendement dans des horizons alluvionnaires compacts du Rhin ;

- une mauvaise appréciation initiale par le titulaire de l'abrasivité effective des alluvions du Rhin ;

- de très nombreuses pannes du matériel engendrées par la résistance du terrain.

Le titulaire a su mettre en place une organisation matérielle permettant de respecter des critères pointus d'arrêt de l'écran mince en partie basse (exprimés contractuellement à la fois en vitesse d'enfoncement instantanée et en cote effective atteinte).

Il faut considérer que l'on a poussé sur ce chantier de Strasbourg la technique de l'écran mince à ses limites effectives de performance : dans les alluvions compactes, la descente du profilé vibrant au-delà de 20 m pose vraiment problème ! □

Résumé

Certains tronçons des ouvrages de dérivation du Rhin en Alsace ont une double fonction : assurer bien sûr l'endiguement du canal de navigation, mais aussi contribuer à la fermeture de l'un des bassins de rétention dédiés au laminage des grandes crues du Rhin.

Le bassin de Strasbourg, disposé à cheval sur le tronçon court-circuité du Rhin, s'est trouvé ainsi mis en eau partiellement pour la première fois en 1999. Des remontées intempestives de nappe phréatique côté français ont imposé l'arrêt du processus de remplissage.

À l'issue d'un long cheminement d'études pilotées par les organismes allemands en charge de la gestion des crues et conduites par des spécialistes allemands, la partie allemande a proposé de construire à ses frais – sous l'endiguement rive droite du canal EDF de dérivation – une barrière d'étanchéité ancrée dans les alluvions anciennes, longue de 2,8 km, visant à recouper les remplissages alluvionnaires « récents » de plusieurs anciens méandres du fleuve. Le projet était à la fois remarquable par la hauteur de l'écran dans le sol (environ 22 m) et par la surface à traiter (58 000 m²).

Le délai de réalisation très court requis par les allemands (20 mois) incluait néanmoins la mise en œuvre d'une consultation « européenne » techniquement ouverte.

La solution retenue après cette consultation (écran mince vibré associé à une déstructuration du terrain par lancement H.P.) a été achevée au printemps 2002 et a requis l'emploi de matériels de chantier assez exceptionnels.

Abstract

Certain sections of the structures which divert the Rhine river in Alsace area have a double function: ensuring, of course, the lateral retention of water for navigation in the canal, but also contributing to the closing of several retention basins dedicated to the peak attenuation (mitigation) of large floods on the Rhine river.

The retention basin at Strasbourg, which straddles the short-circuited section of the Rhine river, experienced partial first-filling in 1999. The untimely up-welling of alluvial groundwater on the French side halted the filling process.

At the conclusion of a long process of studies, piloted by the German organisations in charge of the management of floods and lead by German specialists, the German party proposed – at his expense – the construction of an impervious barrier anchored into the ancient alluvium, 2.8 km in length, matching up the recent alluvial deposits and the more ancient river course, under the right-hand bank of the EDF diversion canal. The project was remarkable both by the height of the curtain in the ground (around 22 m) and by the area continuously treated (58,000 m²).

The very short timeframe for completion of the project required by the Germans (20 months) nevertheless included time for a European competitive bidding process technically opened.

The solution accepted after this bidding process (vibrating thin diaphragm cut-off wall combined with high pressure jetting injection) was achieved in Spring 2002 and required the use of huge site equipments.