

# Assainissement de barrages en béton au moyens de résines époxy

Autor(en): **Bremen, Roger**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **96 (2004)**

Heft 5-6

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-939565>

## **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.

# Assainissement de barrages en béton au moyens de résines époxy

■ Roger Bremen

## 1. Introduction

La fissuration des barrages en béton est une pathologie fréquemment observée. Son origine et son évolution dans le temps ainsi que ses conséquences sur le comportement et la sécurité de l'ouvrage sont parfois difficiles à évaluer, même pour un ingénieur expérimenté.

De ce fait, la nécessité ou l'opportunité d'intervenir sur un ouvrage fissuré font souvent l'objet d'expertises et de discussions qui peuvent s'étendre sur plusieurs années, voire décennies avant qu'une éventuelle intervention sur l'ouvrage soit réalisée.

Une approche simple et univoque du problème n'est souvent pas possible en raison des spécificités de chaque ouvrage et de la multitude de situations qui peuvent se présenter. Toutefois certains éléments de démarche et de résolution des problèmes associés à la fissuration semblent pouvoir s'appliquer à de nombreux barrages. Ces aspects seront traités par la suite, précédés par quelques considérations concernant la détection et la caractérisation des fissures.

L'analyse de l'origine des fissures et de leur développement ainsi que des conséquences sur l'ouvrage constituent la base pour la définition de la nécessité et des objectifs d'un éventuel assainissement au moyen de résines époxy.

La deuxième partie de l'article concerne essentiellement les aspects associés au choix, à la mise en œuvre et aux limites posées par l'utilisation de résines époxy. Cette deuxième partie sera illustrée au moyen de quelques exemples de travaux réalisés récemment.

Le présent article résume le contenu d'une conférence tenue au Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL le 26 février 2004 dans le cadre du Cycle postgrade en aménagements hydrauliques.

## 2. Détection et caractérisation de fissures

Lorsque l'ingénieur se trouve face à un barrage fissuré la première difficulté consiste dans le relevé de l'état de l'ouvrage. A l'exception de quelques cas très particuliers, la détection des fissures se fait tout d'abord, par inspection visuelle directe des parements et des galeries de visite. Elle peut éventuellement être complétée ou rendue plus efficace par l'emploi de moyens vidéo.

A mentionner à cet égard une solution novatrice comportant l'utilisation d'un hélicoptère miniaturisé muni d'un émetteur GPS, sur lequel est installée une caméra digitale à haute résolution.

Si les relevés de la position et de l'ouverture en surface d'une fissure s'avèrent relativement simple, la mesure de sa profondeur est par contre bien plus complexe. En effet, sauf si une percolation d'eau indique une communication de la fissure avec la retenue, la détermination de la profondeur de celle-ci demande un effort d'investigation considérable avec des résultats parfois décevants.

Pour l'investigation des fissures en profondeur on distingue en général entre les méthodes destructives et non destructives.

Seules les méthodes destructives (perforations à destruction ou carottages) généralement combinées avec une inspection du forage par caméra, permettent la caractérisation fiable d'une fissure en profondeur. A relever à ce propos la disponibilité de caméras digitales de petites dimensions qui permettent le développement sur un plan de l'image du forage tel qu'illustré par la figure 1. L'analyse des images vidéo permet une appréciation assez fiable de l'ouverture en profondeur de la fissure ce qui n'est en général pas possible sur les carottes.

Les méthodes d'investigation non destructives se basent essentiellement sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes élastiques (de compression ou de ci-

saillement) dans plusieurs directions ceci afin de mettre en évidence l'anisotropie du béton. Pour les barrages en béton les investigations à faible profondeur se font fréquemment au moyen de radars à très haute fréquence. Lorsque les reconnaissances doivent s'étendre à des profondeurs supérieures à 1-1,5 m, la technique utilisée est souvent celle de la tomographie. Toutefois, les images fournies par ces méthodes demandent une interprétation qui est parfois subjective et qui dépend de l'opérateur. La distinction entre une inhomogénéité du béton, tel qu'un nid de gravier ou un joint de bétonnage, et une fissure est très difficile sinon impossible si on ne considère que l'image fournie par l'investigation sonique.

Des filtres ont été développés qui permettent de mieux mettre en évidence des anomalies du béton. Un exemple d'une image filtrée d'un radar à très haute fréquence est illustrée à la figure 2.

Outre une caractérisation géométrique des fissures, il s'avère important de connaître l'état des deux épontes. Il est utile en particulier de déceler la présence d'humidité, de dépôts de calcite, de dépôts de percolations ou de poussières résultant du broyage des agrégats du béton.

En conclusion, la définition de l'état de fissuration d'un barrage pose par elle-même de nombreuses difficultés dont on sous-estime souvent l'importance.

## 3. Origines de la fissuration

Une fois établie l'image plus au moins détaillée de l'état de la fissuration, il s'agit naturellement d'en rechercher les causes. On observe parfois la tendance à rechercher les causes de la fissuration avant de disposer d'une image suffisamment complète de son étendue ce qui peut conduire à des conclusions erronées ou partielles.

Il faut relever en premier lieu qu'une fissure dans le béton trouve toujours son origine par le dépassement de la résistance à la traction. L'orientation des fissures permet donc souvent de déterminer le plan des contraintes principales, ce qui peut représenter un indice fort utile.

D'une manière générale les causes de la fissuration de barrages en béton sont à rechercher parmi les situations suivantes ou leurs combinaisons:

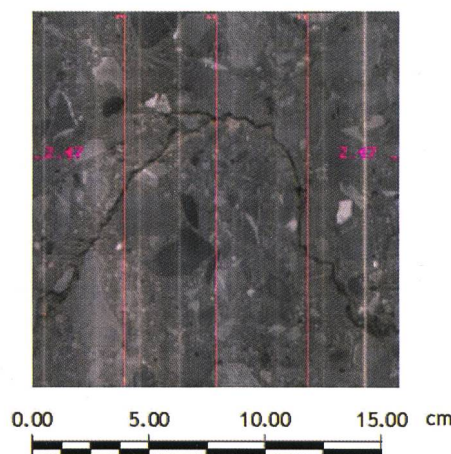


Figure 1. Développement en plan de l'image d'un forage fournie par une caméra digitale (Ø 5 cm, barrage de Ancipa (Italie), image ISMES).

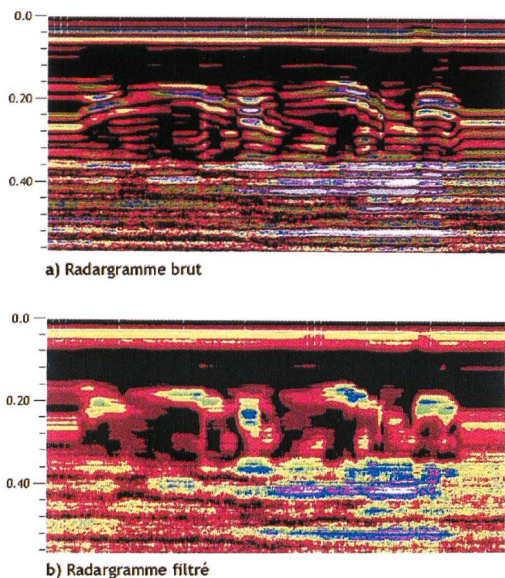


Figure 2. Images brute et filtrée de radar à très haute fréquence (1,5 GHz) d'une fissure du barrage de Pannecière, France (Image R3I).

- charges statiques ou dynamiques (charges externes),
- déformations des appuis,
- phénomènes thermiques,
- retrait du béton,
- phénomènes de gonflement.

Parmi les phénomènes thermiques, il s'agit de distinguer entre la dissipation de la chaleur d'hydratation au moment de la construction de l'ouvrage et les sollicitations d'origine thermique associées aux variations saisonnières et journalières.

L'identification de l'origine de la fissuration est souvent difficile. Quelques fois la disposition des fissures permet, suivant le type d'ouvrage, de dresser la liste des hypothèses qu'il s'agit de confirmer par la suite par des investigations et/ou des analyses numériques souvent laborieuses. Dans certains cas l'approche plus efficace est celle «par exclusions» successives des différentes causes possibles.

A relever que les analyses numériques visant à prévoir le développement

d'une fissuration au moment de la dissipation de la chaleur d'hydratation sont très complexes et associées à de nombreux paramètres et hypothèses.

De telles analyses n'aboutissent en général pas à des conclusions fermes mais souvent plutôt à des affirmations du genre «...une fissuration d'origine thermique ne peut être exclue...».

La figure 3 montre à titre d'exemple la fissuration horizontale type d'un plot du barrage-voûte de Flumendosa en Sardaigne (Italie). L'analyse des phases de construction du barrage a mis en évidence un refroidissement insuffisant du béton des arcs supérieurs au moment du clavage, ce qui, associé au surplomb prononcé des plots, a conduit à la fissuration au droit des joints horizontaux de bétonnage.

Il est également fréquent que le phénomène à l'origine de la fissuration n'est pas le même que celui qui est responsable de sa propagation ultérieure. Par exemple, une fissure induite par le retrait peut par la suite se propager en raison des variations thermiques saisonnières.

Lors de l'analyse d'un barrage fissuré il n'est donc pas suffisant de prendre en compte son état présent mais il s'avère nécessaire de parcourir toute la vie de l'ouvrage depuis sa construction jusqu'aux conditions d'utilisation actuelles.

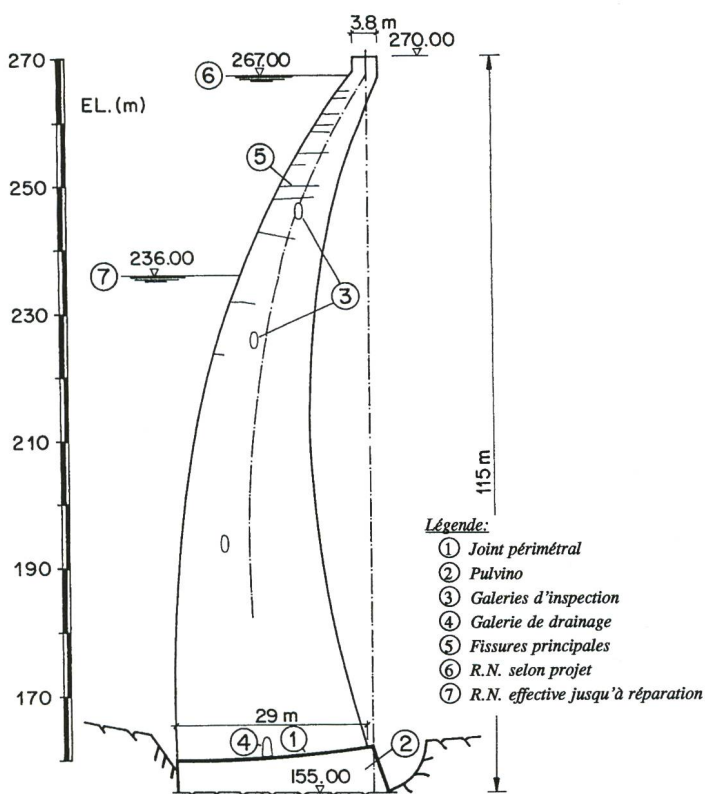


Figure 3. Fissuration du plot central du barrage-voûte de Flumendosa (Italie).

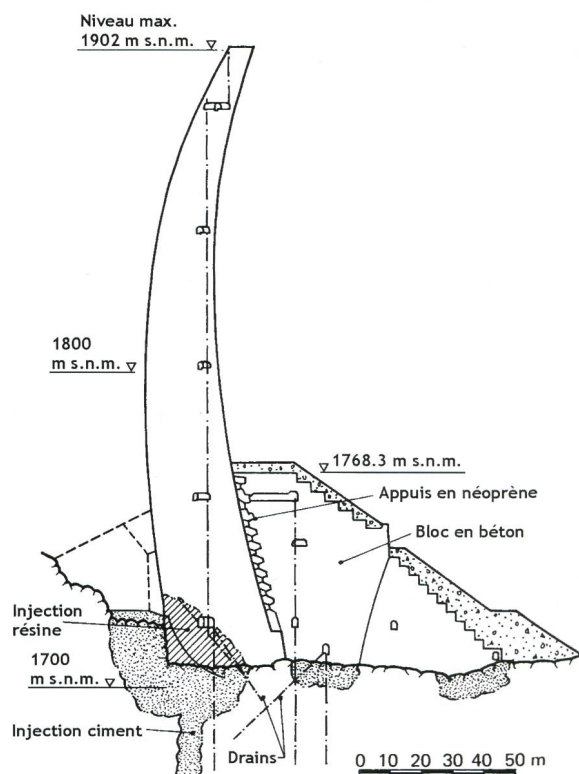


Figure 4. Section type du barrage de Koelnbrein (Autriche) après assainissement des fissures et confortement structural au moyen d'un appui aval.

#### 4. Evolution des fissures dans le temps

Un autre élément de grande importance concerne le développement des fissures au cours du temps. En effet, c'est seulement la connaissance de l'origine des fissures et de leur évolution qui permet de s'exprimer sur le comportement et la sécurité d'un barrage et donc finalement de juger de la nécessité d'une intervention.

La mise en évidence de l'évolution d'une fissure se fait en général au moyen d'inspections visuelles pour ce qui concerne sa propagation et par l'installation de fissuromètres (manuels ou automatiques) pour la détermination de son ouverture en surface. Ces mesures sont relativement simples à effectuer même si la continuité des mesures sur de longues périodes demande une bonne fiabilité de l'instrumentation.

Il est assez fréquent de constater que l'ouverture d'une fissure suit un cycle réversible d'origine thermique, auquel se superpose une composante non-réversible, cause de sa progression en étendue et/ou en profondeur. L'importance relative de la composante cyclique et de la composante non-réversible peut être très variable et dépend de nombreux facteurs. En principe, toute fissure dont l'ouverture présente un cycle annuel réversible comporte également une composante non-réversible, donc une progression. En raison de la rugosité des épontes de la fissure, une fermeture complète n'est jamais possible laissant toujours une ouverture résiduelle.

#### 5. Objectifs de l'injection

De manière générale la fissuration peut conduire:

- à une augmentation des sous-pressions et/ou des percolations à travers l'ouvrage, et/ou
- à une réduction de sa rigidité et de sa résistance structurelle.

Le premier aspect peut être vérifié essentiellement par l'inspection du barrage et l'analyse des mesures d'auscultation. Par contre le deuxième aspect s'avère bien plus complexe et son appréciation se base principalement sur l'analyse structurelle du barrage fissuré.

Il est important d'identifier les conséquences de la fissuration sur le barrage. En effet, dans le cas où le comportement structurel n'est pas mis en cause par la fissuration, l'assainissement vise essentiellement une imperméabilisation des fissures. Plusieurs solutions sont alors envisageables parmi lesquelles on peut mentionner les injections de micro-ciments, de résines polyuréthanes ou de résines acryliques. Si la fissuration et donc

la perméabilité accrue est diffuse, l'utilisation d'une membrane ou bien d'un induit imperméabilisant sur le parement peut être prise en considération.

Par contre, lorsqu'une fissure ou une famille de fissures réduisent de manière sensible la résistance du barrage l'objectif de l'assainissement doit être celui de reconstituer l'intégrité structurelle de l'ouvrage. Même si les exigences peuvent varier suivant le type de barrage, la reconstitution de la continuité structurelle implique:

- l'arrêt de la propagation de la fissure,
- la transmission des contraintes de traction à travers la fissure assainie, et
- l'obtention de caractéristiques mécaniques de la section assainie voisines de celles du béton non fissuré.

Seulement les résines époxy disposent des caractéristiques d'injectabilité, d'adhérence et de dureté nécessaires pour atteindre les exigences requises. Naturellement si l'origine des fissures est à attribuer à une insuffisance structurelle de l'ouvrage, l'injection des fissures doit être accompagnée d'autres mesures comme cela a été le cas pour le barrage de Koelnbrein (figure 4). La reconstitution de la continuité structurelle d'un ouvrage au moyen d'injections est sans doute la plus exigeante des injections et c'est ce type d'assainissement qui sera présenté par la suite.

#### 6. Caractéristiques des résines époxy

Les résines époxy sont utilisées pour des applications les plus diverses ce qui a conduit à mettre au point un grand nombre de formulations visant à satisfaire les exigences spécifiques de chaque domaine d'utilisation.

La description suivante se borne toutefois aux résines utilisées pour l'injection de fissures dans les structures du génie civil. Les applications les plus courantes concernent l'assainissement d'ouvrages d'art, de monuments historiques et de barrages.

Du point de vue chimique les résines époxy sont constituées de deux composantes qui réagissent en formant un matériel dur et inerte. Le composant A est une résine époxy, le composant B est un durcisseur. La résine est le résultat de la réaction entre le bisphénol A et l'épichlorohydrine. Cette réaction produit un groupe fonctionnel avec la dénomination oxyrane ou «groupe époxydique».

Le durcisseur «amine» a une structure moléculaire qui est typiquement composée de quatre «bras et jambe» d'hydrogène. Ces hydrogènes réagissent avec le groupe oxyrane aux extrémités de la résine époxy. Le résultat de cette réaction est une nouvelle jonc-

tion carbone-hydrogène, en utilisant l'hydrogène du durcisseur et libérant l'hydrogène du groupe oxyrane pour former un groupe hydroxyle (-OH). Ce groupe hydroxyle est responsable de l'adhérence exceptionnelle de la résine époxy à la grande majorité des substrats.

Du point de vue de l'utilisation des résines époxy, il s'agit de distinguer entre:

- la phase fluide, avant et pendant l'injection,
- l'étape de la polymérisation, et
- les caractéristiques après polymérisation.

Pour chacune des phases, les caractéristiques du produit doivent satisfaire les besoins du projet. De manière générale, les résines utilisées dans le cadre de l'assainissement de structures présentent les caractéristiques principales suivantes:

- Densité (résine durcie)  
 $1,05 < \gamma < 1,20$
- Viscosité (à 10 °C)  
 $500 \text{ mPa}\cdot\text{s} < \nu < 5000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$
- Durée pratique d'utilisation (DPU)  
 $20 \text{ min.} < \text{DPU} < 90 \text{ min.}$
- Module d'élasticité (durcie, 28 jours)  
 $1,0 \text{ GPa} < E < 5,0 \text{ GPa}$
- Résistance à compression  
 $40 \text{ MPa} < \sigma_c < 80 \text{ MPa}$
- Résistance à traction  
 $15 \text{ MPa} < \sigma_t < 40 \text{ MPa}$

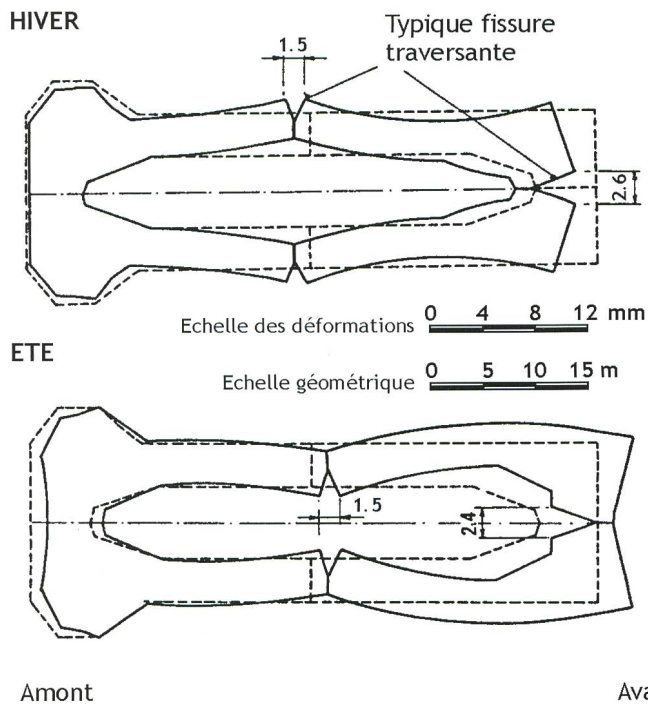
La détermination de plusieurs caractéristiques telles que la Durée Pratique d'Utilisation, DPU (ou Potlife) s'effectue actuellement selon des procédures non standardisées ne faisant pas l'objet de normes nationales ou internationales. De ce fait les conditions, dans lesquelles certains paramètres sont déterminés, doivent être spécifiées au moment des essais.

Une étroite collaboration avec le fournisseur de résines s'avère donc importante afin de bien cerner l'ensemble des propriétés et les limites d'utilisation de chaque produit.

A relever que la température influence de manière très sensible les propriétés des résines avant et pendant la polymérisation. De manière indicative, une température minimale de 5–6 °C est nécessaire afin que la polymérisation puisse se produire.

Les résines époxy durcies présentent un module d'élasticité sensiblement inférieur à celui du béton, mais une résistance à la traction bien supérieure. La résistance à la traction après injection du béton est donc dictée par la résistance du béton ou bien de celle du contact béton-résine.

Enfin, l'adjonction de cendres ou de filler aux résines pour en améliorer les propriétés après polymérisation était fréquente par le passé mais est actuellement de moins en moins utilisée.



**Figure 5. Section horizontale type du barrage à contreforts de Ancipa (Italie). Déformation de la structure et ouverture des fissures en fonction des conditions thermiques.**

## 7. Planification des travaux d'injection

La conception de l'assainissement d'un barrage avec des résines époxy demande en premier lieu une bonne connaissance de son état et de son comportement. En effet il s'agit de déterminer les conditions optimales dans lesquelles doit se trouver le barrage au moment des travaux d'injection. Après l'injection, l'intégrité de la structure doit être assurée dans toutes les conditions de service. Cette situation optimale pour les travaux dépend de nombreux facteurs tel que:

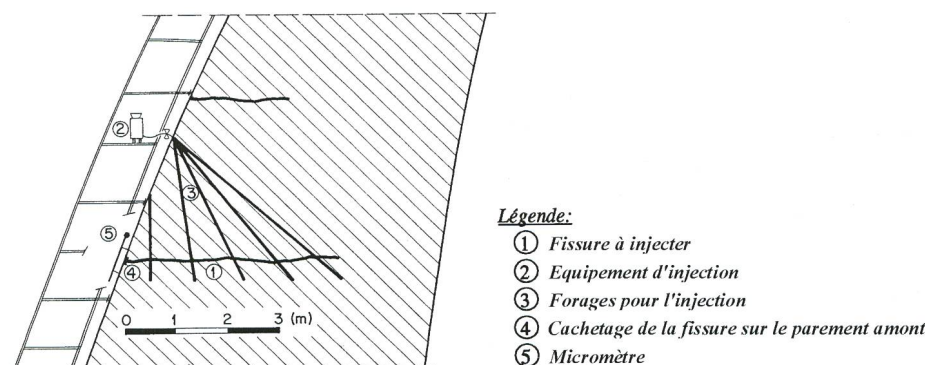
- le type de barrage,
- l'origine des fissures,
- l'amplitude du cycle annuel de l'ouverture/fermeture des fissures,
- les caractéristiques de la résine après polymérisation, et
- les pressions maximales que l'ouvrage peut supporter.

En général l'injection des fissures devrait être réalisée au moment d'une ouverture relativement importante mais, en tout cas pour les fissures principales, pas à l'instant

de leur ouverture maximale. En effet outre le critère de pénétrabilité de la résine, il s'agit d'éviter qu'à la suite de l'injection des tractions excessives puissent se produire dans la structure. La figure 5 illustre à titre d'exemple l'évolution de l'ouverture des fissures du barrage de Ancipa (Italie) en fonction de la saison.

Le projet doit donc permettre d'identifier les conditions thermiques et du niveau de la retenue optimales pour procéder aux travaux d'assainissement. En général une telle situation ne se présente que pendant une durée relativement limitée et une seule fois par année. Les difficultés les plus communes qu'il s'agit de surmonter sont en général:

- les basses températures qui augmentent la viscosité des résines et qui pénalisent sensiblement la pénétrabilité,
- la dispersion incontrôlée de la résine dans les nids de gravier ou les reprises de bétonnage, et
- la présence d'humidité ou d'eau dans les fissures à injecter qui diminue l'adhérence de la résine au béton.



**Figure 6. Disposition schématique des forages de reconnaissance et d'injection pour le traitement des fissures du barrage de Flumendosa (Italie).**

La réalisation d'essais d'injection avant de procéder aux travaux dans leur ensemble est donc indispensable afin d'optimiser le choix des produits et des procédures d'injection. Les essais permettent également de déterminer les quantités de résine absorbées et de vérifier l'efficacité du traitement.

## 8. Procédures d'injection

Les méthodologies et les procédures d'injection à adopter pour atteindre les objectifs différent sensiblement d'un ouvrage à l'autre. D'une manière générale, la définition de la procédure d'injection requiert la détermination des éléments suivants:

- le schéma des forages et d'avancement des injections,
- les pressions et les débits d'injection,
- les critères d'arrêt, et
- les contrôles à effectuer pendant et après l'injection.

Le schéma des perforations et d'avancement des injections dépend en particulier de la profondeur de la fissure et de sa configuration. De manière indicative la distance entre les points d'injection se situe généralement entre 0,5 m et 2,0 m.

Les forages d'injection ont souvent également une fonction de reconnaissance en cours de travaux. Enfin, des forages de contrôle ou des événements s'avèrent généralement nécessaires pour mieux maîtriser la propagation de la résine à l'intérieur de la fissure.

La figure 6 illustre à titre d'exemple la disposition des forages de reconnaissance et d'injection prévus pour le traitement des fissures du barrage de Flumendosa.

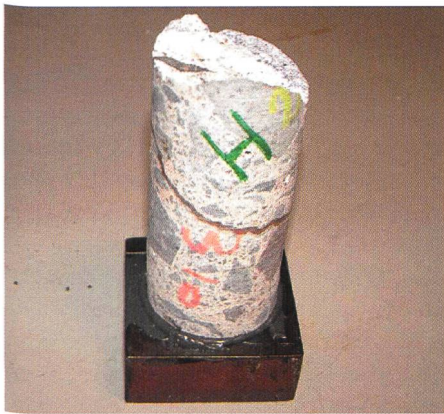
Les pressions et les débits d'injection à utiliser varient sensiblement et dépendent fortement de la méthodologie adoptée. Une fissure superficielle peut être injectée avec une pression de 1,0 bar, tandis qu'une fissure fine et profonde peut demander une pression allant jusqu'à 60–80 bar.

En ce qui concerne les critères d'arrêt, les situations à prendre en compte sont:

- la résine atteint un événement (souhaitable),
- la pression maximale est atteinte avec un débit d'injection pratiquement nul,
- une quantité maximale de résine est injectée (nid de gravier, joint de reprise, etc.),
- suintement incontrôlé de la résine (à éviter).

Il est souvent difficile de prévoir l'ensemble des situations qui peuvent se présenter au moment de la réalisation des travaux. Une optimisation de la procédure d'injection et donc souvent nécessaire dans la phase initiale du chantier.

Enfin, pendant et après les travaux il semble opportun de procéder aux mesures et aux contrôles suivants:



**Figure 7. Carotte prélevée au barrage à voûtes multiples de Pannecière (France). Pression d'injection env. 1,0 bar, viscosité 550 mPa.s à 20 °C, rigidité 3,1 GPa.**

a) Pendant les travaux:

- mesure des températures (air, béton),
- relevé des volumes injectés par forage,
- suivi de la pression d'injection à chaque forage,
- inspections visuelles en continu, et
- prise d'échantillons de résine pour essais en laboratoire.

b) Après les travaux:

- inspection détaillée de l'ouvrage,

- carottages (3–4 semaines après injection),
- installation de micromètres sur fissures injectées,
- essais au laboratoire (traction, module d'élasticité, etc.).

L'installation de fissuromètres sur une fissure injectée doit permettre de vérifier l'absence de toute variation de l'ouverture de la fissure après injection et donc de la réussite de l'intervention.

La figure 7 illustre une fissure injectée avec une résine fluide au barrage de Pannecière (France).

## 9. Conclusions

L'utilisation de résines époxy permet de reconstituer l'intégrité structurelle d'un barrage fissuré. Toutefois, afin d'atteindre un résultat satisfaisant et de garantir la durabilité de l'intervention, il est nécessaire de prendre en compte et d'analyser de nombreux aspects liés à l'étude, la planification et à la réalisation des travaux.

Parmi les difficultés à surmonter dans la phase du projet il s'agit notamment de mentionner:

- la connaissance de l'état de fissuration du barrage,

- la compréhension de l'origine des fissures, et
- l'analyse de l'influence à court et moyen terme de la fissuration sur le comportement et la sécurité structurelle de l'ouvrage.

Parmi les difficultés principales à surmonter lors de la réalisation des travaux il s'agit de relever:

- le respect des conditions de projet en termes d'ouverture des fissures, températures, etc.,
- la perte et suintement incontrôlés de la résine,
- la présence d'eau ou d'humidité à l'intérieur des fissures.

L'établissement d'un projet qui tient compte de l'ensemble des spécificités de chaque intervention accompagné d'une réalisation soignée des travaux permettent toutefois d'espérer et d'obtenir un résultat fort satisfaisant dans la reconstitution structurelle d'un ouvrage fissuré.

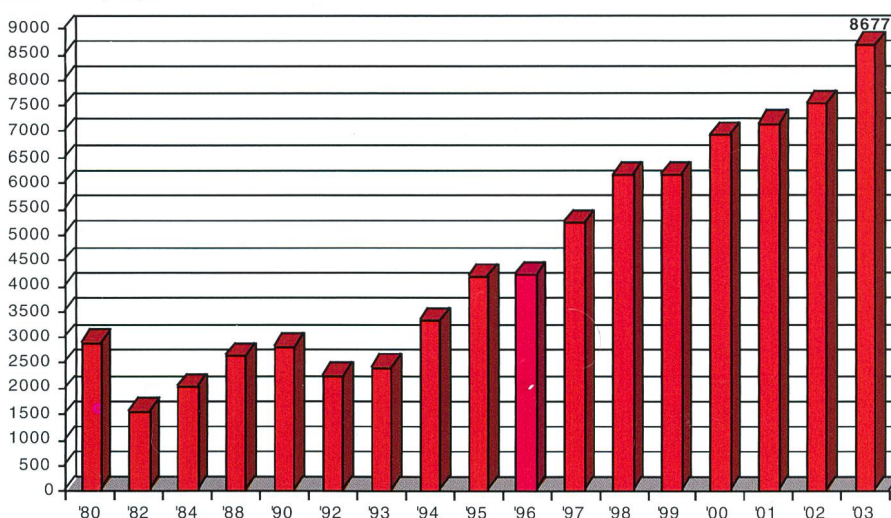
Adresse de l'auteur

Dr. Roger Bremen, Lombardi SA, Via R. Simen 19, CH-6648 Minusio.

# Wärmepumpen ersetzen immer häufiger Feuerungsanlagen und Elektroheizungen

8677 verkaufte Wärmepumpen im Jahr 2003: Das entspricht einer Steigerung von 14,9% gegenüber dem – ebenfalls erfolgreichen – Vorjahr. Rund ein Viertel der 2003 verkauften Wärmepumpen wurden bei der Heizungssanierung eingesetzt. Dort haben sie Feuerungsanlagen, Elektroheizungen und vermehrt auch alte Wärmepumpen ersetzt. Gründe für die wachsende Popularität der Wärmepumpe auch im Sanierungsbereich sind nicht nur neue Produkte mit hohen Vorlauftemperaturen und günstigere Preise, sondern auch der Wunsch vieler Hausbesitzer nach einer zukunftsorientierten Lösung.

Anzahl Wärmepumpen



**Bild 1. Wärmepumpenverkäufe in der Schweiz.**

Die Verkaufsstatistik für das Jahr 2003 zeigt klar, dass die umweltfreundlichen Wärmepumpen weiter auf dem Vormarsch sind – in einigen Bereichen sogar ganz markant. Insgesamt wurden im vergangenen Jahr 8677 Wärmepumpen verkauft – das sind 14,9%

mehr als im Vorjahr. Rund ein Viertel der verkauften Wärmepumpen wurden bei der Sanierung von alten Heizungen eingesetzt. Gegenüber dem Vorjahr wurden 60% mehr Wärmepumpen im Sanierungsbereich installiert.

Gründe für den Verkaufserfolg sind unter anderem neue Geräte für höhere Vorlauftemperaturen, die hohe Qualität der Produkte und die Tatsache, dass Wärmepumpen heute generell bis zu 30% günstiger sind als noch vor ein paar Jahren.