

# Stockage de l'eau : ouvrages en béton

## Traitements et revêtements

par **Bruno DUCROT**

*Ingénieur de l'École Centrale de Lyon  
Ingénieur-Conseil*

**Bernard FARGEOT**

*Ingénieur-Conseil*

et **Gérard MATHIEU**

*Chargé de recherches au Cemagref  
(Centre national du machinisme agricole du génie rural des Eaux et Forêts)*

<b>1. Classification .....</b>	<b>C 3 672 - 2</b>
1.1 Comment obtenir des ouvrages étanches ?.....	— 2
1.2 Ouvrages étanches dans la masse.....	— 2
1.3 Traitements d'imperméabilisation de surface.....	— 2
1.4 Revêtements à base de liant hydraulique .....	— 3
1.5 Revêtements à base de résines de synthèse .....	— 3
1.6 Revêtements préfabriqués à base de membranes bitumineuses .....	— 4
1.7 Revêtements préfabriqués à base de membranes de copolymères.....	— 4
<b>2. Critères de choix .....</b>	<b>— 5</b>
2.1 Critères de choix des bétons .....	— 5
2.2 Critère de choix de la technique d'étanchéité.....	— 6
<b>3. Conditions d'application - Mise en œuvre .....</b>	<b>— 8</b>
3.1 Mise en œuvre des bétons de structures étanches dans la masse.....	— 8
3.2 Qualité des bétons.....	— 8
3.3 Mise en œuvre des bétons .....	— 9
3.4 Mise en œuvre des traitements d'imperméabilisation de surface.....	— 9
3.5 Mise en œuvre des revêtements à base de liants hydrauliques .....	— 10
3.6 Revêtements à base de polymères .....	— 10
3.7 Membranes.....	— 11
3.8 Traitement des points singuliers.....	— 11
3.9 Différents essais à prévoir .....	— 12
<b>4. Essais. Contrôles. Réception .....</b>	<b>— 12</b>
4.1 Bétons et ouvrages en béton.....	— 12
4.2 Produits spéciaux pour constructions en béton .....	— 13
4.3 Produits à base de polymères de synthèse pour revêtements .....	— 13
4.4 Membranes à base de produits bitumineux et de copolymères.....	— 14
4.5 Épreuves et réception des ouvrages.....	— 14
4.6 Conditions d'exploitation des ouvrages.....	— 15
<b>Pour en savoir plus .....</b>	<b>Doc. C 3 674</b>

**L**e problème essentiel à résoudre pour un ouvrage contenant un liquide est de savoir comment obtenir l'étanchéité exigée par le maître d'ouvrage et comment, ensuite, la maintenir dans le temps.

# 1. Classification

## 1.1 Comment obtenir des ouvrages étanches ?

L'étanchéité d'un ouvrage peut être obtenue par différentes méthodes.

**L'ouvrage peut être étanche dans la masse.**

Dans ce cas, le matériau composant la structure est lui-même imperméable. Il ne se laisse pas traverser par le liquide stocké.

**L'ouvrage peut être traité par imperméabilisation de surface.**

Les parois de l'ouvrage sont traitées par des produits dits d'imprégnation appliqués sur la surface à étancher pénétrant plus ou moins profondément dans le matériau composant la structure.

**L'ouvrage peut recevoir un revêtement à base de liant hydraulique.**

Il s'agit d'un enduit à base de ciment appliqué sur la surface à étancher. Le liant hydraulique dans ce cas est généralement modifié par la présence d'un hydrofuge. L'enduit peut se présenter sous la forme d'un mortier épais, mince ou même d'un enduit type peinture à liants mixtes.

**L'ouvrage peut recevoir un revêtement à base de polymères de synthèse.**

Il s'agit d'un enduit à base de résines appliqué sur la surface à étancher. Les produits de base utilisés peuvent être des résines époxydiques, polyuréthanes, polyesters, ou vinyliques. Cette liste n'est pas exhaustive, le domaine de la chimie étant en pleine évolution.

L'enduit peut être mis en place en couche mince ou épaisse, être ou non armé de fibre. Les produits utilisés sont sans solvant, en émulsion ou en solution.

**L'ouvrage peut recevoir un revêtement de type membrane préfabriquée à base de produit bitumineux.**

**L'ouvrage peut recevoir un revêtement de type membrane préfabriquée à base de copolymères.**

Le revêtement est de type industriel adapté à la paroi intérieure sur le site lors de la mise en œuvre.

Ce type de membrane, comme le précédent, est un produit industriel placé sur la totalité du parement intérieur de la paroi et du radier.

**L'ouvrage peut recevoir un revêtement préfabriqué à base de tôles d'acier revêtu et/ou inoxydable.** Cette technique est trop récente pour être traitée dans cet article.

**Certains points singuliers peuvent recevoir un traitement ponctuel particulier.**

## 1.2 Ouvrages étanches dans la masse

### 1.2.1 Principe

Dans le cas d'étanchéité dans la masse d'une structure, c'est le matériau béton constituant la structure résistante qui assure l'étanchéité.

Le béton proprement dit doit alors être particulièrement compact. Bien vibré à la mise en place, il doit rester très homogène. Les risques de ségrégation doivent être évités et les reprises de bétonnage doivent être particulièrement soignées et judicieusement orientées par rapport à la direction principale des efforts.

Les phénomènes de retrait doivent faire l'objet d'un plan précis de bétonnage pour éviter les fissurations préjudiciables ; pour les ouvrages les plus importants, des joints provisoires peuvent être envisagés à condition qu'ils soient traités en respectant des consignes précises : par exemple par remplissage ultérieur d'un vide de faible largeur bétonné quelques jours après la masse principale du béton ou injection ultérieure de la zone de reprise.

Des adjuvants, des plastifiants, fluidifiants ou hydrofuges incorporés au béton peuvent améliorer nettement l'étanchéité.

Ces conditions ne sont, cependant, pas suffisantes pour assurer l'étanchéité, il faut aussi que, sous les effets de la mise en charge, les déformations des parois des ouvrages n'entraînent pas une fissuration notable qui serait alors jugée préjudiciable. Il est donc indispensable que les armatures du béton travaillent dans des conditions plus restrictives que l'autorisent les règles BAEL et BPEL (cf. articles spécialisés dans ce traité).

D'une façon générale, cette technique est exigeante, elle suppose une réalisation très soignée car le moindre défaut peut être difficile à rattraper.

### 1.2.2 Différents produits utilisés pour améliorer l'étanchéité dans la masse

On distingue deux sortes de produits : les adjuvants et les ajouts.

#### ■ Adjuvants

Il s'agit de produits mélangés au béton en faible proportion, moins de 5 % de la masse de ciment, lors du malaxage. Les plus courants sont :

- les accélérateurs utilisés pour le bétonnage par temps froid ;
- les retardateurs qui améliorent les conditions de mise en œuvre par temps chaud ;
- les entraîneurs d'air qui améliorent la plasticité du béton et par voie de conséquence sa mise en place ;
- les hydrofuges incorporés à l'eau du béton qui limitent les pores et les capillaires, améliorant ainsi l'imperméabilisation ;
- les plastifiants (ou dans les cas de ferrailage très dense, les superplastifiants) qui permettent de réduire les teneurs en eau et favorisent la mise en place du béton tout en limitant le retrait.

#### ■ Ajouts

Il s'agit de produits inertes très fins tels les fumées de silice ou des fibres qui améliorent les caractéristiques mécaniques des bétons et jouent favorablement sur la perméabilité.

■ L'utilisation d'adjuvants ou d'ajout ne peut se faire qu'en respectant les données du fabricant, qui doit lui-même préciser les conditions d'emploi et les éventuelles incompatibilités. Dans tous les cas, des essais préalables sont nécessaires.

## 1.3 Traitements d'imperméabilisation de surface

### 1.3.1 Principe

Les traitements d'imperméabilisation de surface consistent à appliquer des produits d'imprégnation à la surface du béton, après qu'il ait fait une partie de son retrait.

Ils s'appliquent sous forme de liquides ou barbotines, pénètrent dans le béton sur une profondeur variable suivant les produits et le béton. Ils réagissent avec l'eau et les constituants du béton pour obtenir le système capillaire par formation de cristaux insolubles.

### 1.3.2 Caractéristiques des produits

La gamme de ces produits est très étendue, mais tous n'ont pas fait l'objet d'enquête officielle d'aptitude à l'emploi. L'avis des bureaux de contrôle peut être sollicité utilement.

On peut préciser qu'en général, la présence d'eau lors de l'application n'est pas un obstacle, elle est même indispensable.

La plupart de ces produits se comportent mieux avec des ciments qui produisent une grande quantité de chaux libre (CPA-CEMI et CPJ-CEMII/A).

### 1.3.3 Conditions d'utilisation

Le fabricant doit donner des consignes précises de mise en œuvre, notamment sur la préparation de surface.

Les produits d'imperméabilisation de surface sont le plus souvent appliqués à la brosse, après élimination des éventuelles traces d'huile de décoffrage.

## 1.4 Revêtements à base de liant hydraulique

### 1.4.1 Principe

Les revêtements à base de liant hydraulique sont des mortiers constitués de ciment adjuvants, d'hydrofuges de masse ou de résine de synthèse. La présence d'hydrofuges ou de résines associés au ciment induit une perte de charge qui s'oppose au passage de l'eau sous pression.

Ils sont appliqués par couche soit épaisse, soit mince, mais alors un minimum de deux couches est nécessaire.

Les produits peuvent être soit prédosés en usine lorsqu'il s'agit de revêtements minces ou pelliculaires, soit préparés sur le site dans le cas de revêtement épais. Les premiers sont en général plus homogènes et plus performants.

### 1.4.2 Avantages et limites d'utilisation

Les revêtements à base de liant hydraulique acceptent une mise en œuvre sur support humide.

Ils permettent de reprendre des inégalités de surface du support.

Dans tous les cas, la préparation de surface doit parfaitement respecter les consignes du fabricant, la liaison au support comme la liaison entre couches doit être garantie.

Ces revêtements peuvent assurer l'étanchéité même en présence de sous-pressions extérieures, mais ils n'acceptent pas de microfissuration du support supérieure à 0,1 mm.

### 1.4.3 Caractéristiques des matériaux

Pour la préparation des enduits in situ, les matériaux constitutifs doivent respecter certaines règles :

- les sables doivent être propres. Les plus gros grains doivent avoir une dimension inférieure à la moitié de l'épaisseur de l'enduit ;
- la nature des ciments doit être compatible avec les caractéristiques chimiques du produit à stocker. Le dosage est fonction du niveau de l'étanchéité désiré ;
- l'eau doit être propre (eau potable) ;
- les adjuvants et additifs sont de la famille hydrofuge de masse ou résines de synthèse thermoplastiques (résines miscibles).

### 1.4.4 Conditions d'utilisation

Le cahier des charges et les notices techniques du fabricant doivent définir les modalités d'application et en particulier la nécessité ou non de mise en place d'une couche d'accrochage.

## 1.5 Revêtements à base de résines de synthèse

### 1.5.1 Principe de fonctionnement

Le revêtement est constitué soit par des couches de résines thermodurcissables, en général à deux composants, soit par des couches des résines thermoplastiques en général monocomposants solubles. Les polymères thermodurcissables sont appliqués soit en deux couches minces inférieures à 500 µm, soit en deux couches semi-épaisses inférieures à 4 mm. Les couches semi-épaisses peuvent être armées par une nappe de toile ou de mat de verre.

De la même façon, les thermoplastiques peuvent ou non être armés.

Le paragraphe 1.5.3 précise la nature de ces différentes résines.

### 1.5.2 Avantages et limites d'utilisation

L'humidité des supports ou de l'air ambiant lors de la mise en place peut être très néfaste pour l'adhérence sur le support ou celle des couches entre elles.

Lorsque le revêtement est armé, il peut supporter une faible fissuration du support.

Résistant assez bien à de nombreuses agressions chimiques, ces revêtements sont assez sensibles aux agressions mécaniques.

### 1.5.3 Caractéristiques des produits de base

#### ■ Résines époxydiques

Ce sont des résines thermodurcissables à deux composants prédosés : une base et un durcisseur. Après malaxage des composants, le liquide obtenu polymérise au bout d'un certain temps qui définit la « durée pratique d'utilisation (DPU) », temps pendant lequel le matériau peut être appliqué.

Les résines époxydiques se présentent, soit sous forme pure, elles peuvent alors être appliquées en couche mince de 200 µm, soit sous forme de résines chargées par des fines permettant la réalisation de couches supérieures à 1 mm. Si les résines sont tixotropées, elles peuvent être appliquées sur parois verticales.

Les caractéristiques mécaniques et les résistances chimiques sont fonction de la résine de base et du durcisseur. La résistance à l'usure est en général élevée.

#### ■ Résines polyuréthanes

Ce sont des résines thermodurcissables à un ou deux composants prédosés. Ces produits peuvent être prémélangés et doivent alors rester à l'abri de l'air avant leur utilisation.

C'est l'humidité de l'air qui joue le rôle de catalyseur.

Leur durée pratique d'utilisation peut aller de quelques minutes à plusieurs heures.

Les résines polyuréthanes se présentent sous la même forme que les époxydiques. Leur module d'élasticité est beaucoup plus faible ; elles peuvent même atteindre un allongement à la rupture supérieur à 100 %.

D'une façon générale, les polyuréthanes n'adhèrent pas sur support humide et exigent la mise en place d'une couche d'accrochage. Ce type de résines résiste très bien à l'abrasion, mais il reste sensible aux déchirures.

#### ■ Résines polyester

Ce sont des résines thermodurcissables composées de polyesters insaturés livrés en solution dans un monomère réticulable : du styrène en général.

Un catalyseur, ajouté en début de préparation sur le site, permet d'enclencher la réaction qui peut être plus ou moins accélérée par un « accélérateur ». L'ordre d'introduction des composants doit être scrupuleusement respecté.

Les polyesters sont très souvent associés à des mats ou tissus de verre pour former un revêtement de 1 à 5 mm d'épaisseur. Une couche d'imprégnation précède la mise en place du stratifié. L'humidité doit être modérée et la température supérieure à 10 °C pendant la polymérisation des produits.

Ce type de revêtement résiste mal aux ultraviolets et aux agents alcalins, sa résistance à l'usure est semblable à celle des époxydiques.

#### ■ Résines vinyliques

Ce sont des produits monocomposants souvent solvantés.

Associées à une nappe de fibre de verre, ces résines permettent d'obtenir des revêtements souples et très résistants d'épaisseur supérieure à 1 mm. Elles peuvent être placées sur un support faiblement fissuré.

Les applications doivent se faire sous très forte ventilation, sur support sec et en absence de condensation.

La mise en présence de liquide n'est possible que lorsque toute odeur a disparu et après une ventilation de plus de trois semaines.

### 1.5.4 Conditions d'utilisation

Tous les types de revêtements à base de résines polymères de synthèse doivent faire l'objet de justifications précises confirmant la façon de les utiliser dans l'application concernée. En particulier, le nombre de couches nécessaires, leur épaisseur, l'armature éventuelle, les compatibilités avec le support et le liquide stocké (alimentarité éventuelle), le type de préparation des surfaces et du traitement de fissures préexistantes doivent être parfaitement définis.

## 1.6 Revêtements préfabriqués à base de membranes bitumineuses

### 1.6.1 Principe

Les membranes bitumineuses sont des feuilles préfabriquées constituées d'un liant bitumineux enrobant une armature. Elles sont protégées en surface. Les feuilles sont appliquées en une ou deux couches liaisonnées entre elles par collage ou soudure.

Le revêtement réalisé peut être adhérent à la paroi ou simplement fixé en partie haute de la structure.

### 1.6.2 Avantages et limites d'utilisation

La souplesse de ces revêtements (surtout dans le cas où ils sont posés non adhérents à la paroi) les rend particulièrement bien adaptés aux parois fissurées ou fissurables.

### 1.6.3 Caractéristiques des produits

Ce type de revêtement constitue un système dont les caractéristiques doivent être très bien définies : nombre et épaisseur des couches, nature de l'armature, préparation des surfaces, traitement préalable des points particuliers, compatibilité des constituants entre eux et avec le liquide stocké. On distingue :

- les bitumes : ce sont le plus souvent des bitumes élastomères fillérisés ;

- l'armature : elle est définie par les performances attendues du revêtement. Si ce dernier doit résister à des contraintes de fissuration, on préférera un non-tissé polyester qui suit la déformation à une grille de verre qui est moins déformable. S'il doit résister à une contrainte de poinçonnement statique, on utilisera un non-tissé polyester d'au moins 180 g/m<sup>2</sup>. S'il doit résister à un poinçonnement dynamique, on incorporera une grille ou un tissu de verre. S'il doit s'opposer à un risque de déchirure, on choisira un non-tissé polyester ;

- la protection de surface : la plus courante est une feuille d'aluminium gaufrée ou un film plastique. L'auto-protection peut participer à la résistance du revêtement. Dans certains cas, les systèmes d'entretien créent des sollicitations mécaniques importantes ; on peut alors être amené à rajouter une protection spécialement adaptée à la sollicitation.

### 1.6.4 Conditions d'utilisation

Le procédé ne demande qu'une préparation sommaire du support. Il est préférable de poser les membranes sur supports secs.

Les membranes ne conviennent pas aux ouvrages soumis à des contre-pressions.

## 1.7 Revêtements préfabriqués à base de membranes de copolymères

### 1.7.1 Principe

Les membranes à base de copolymères sont constituées de feuilles préfabriquées souples à base de résines de synthèse : PVC plastifié, PVC-EVA, EPDM, BUTYL, PEhd, CSPE, polychloroprène... auxquelles peuvent être associés certains adjuvants.

Ces membranes sont calandrées en usine, parfois extrudées. Elles peuvent aussi être armées. Elles sont assemblées sur le site, puis collées ou soudées à l'air chaud. Elles peuvent aussi être vulcanisées sur place (tableau 1). Elles restent indépendantes du support et sont accrochées en tête de la structure.

Elles ne nécessitent pas, en général, de protection de surface.

### 1.7.2 Avantages et limites d'utilisation

La souplesse de ces revêtements et leur pose en indépendance les rendent particulièrement bien adaptés aux supports fissurés ou fissurables, en particulier pour les travaux de réparation.

Assez faciles à poser, ils n'exigent pas un support très soigné et s'accommodent de la présence d'humidité. Certains d'entre eux néanmoins ne présentent pas une grande stabilité dimensionnelle et peuvent exiger des points de fixation complémentaires suivant une technologie à préciser par le fabricant.

La compatibilité entre les composants de la membrane et les liquides stockés (nature et composition chimique des effluents, température, durée de stockage, présence de micro-organismes, alimentarité, etc.) doit faire l'objet d'une étude particulière.

**Tableau 1 – Mode de pose et d'assemblage des revêtements à base de copolymères**

Type de résine	Type de membrane	Type de pose	Principe d'assemblage
PVC plastifié	Homogène armée	Indépendance + fixation mécanique	Soudure à l'air chaud
	Plusieurs membranes associées	Indépendance ou adhérence	Soudure à l'air chaud
PVC-EVA	Idem PVC plastifié	Idem PVC plastifié	Soudure à l'air chaud
PVC-CPE	Idem PVC plastifié	Idem PVC plastifié	Soudure au solvant
EPDM	Homogène	Adhérence	Collage
Butyl	Homogène	Adhérence	Vulcanisation
PEhd	Homogène	Indépendance	Soudure par air chaud + apport de matière
CSPE	Avec armature	Indépendance ou adhérence	Soudure à l'air chaud
Polychloroprène	Avec armature	Indépendance ou adhérence	Vulcanisation

## 2. Critères de choix

### 2.1 Critères de choix des bétons

Les ouvrages doivent garder leur intégrité et leurs qualités d'étanchéité pendant toute la durée prévisible de leur utilisation.

Cela concerne tant la structure que les revêtements qui peuvent en assurer l'étanchéité ou le complément d'étanchéité. En particulier ceux-ci ne doivent ni se décoller (s'ils sont adhérents) ni se détacher (s'ils sont indépendants) ; ils ne doivent pas subir de fissuration, ni être biodégradables, ni favoriser de développements biologiques nuisibles, ni induire d'effets de piles par la présence de cristaux.

Le calcul et l'exécution doivent être conformes aux conditions d'environnement définies dans le CCTP.

Pour définir les conditions d'environnement, on s'appuiera sur le fascicule de documentation P 18-011 de l'AFNOR et, à ce jour, la norme soumise à l'enquête probatoire Pr EN 206.

Pour les ouvrages concernés, le béton est le matériau constitutif de la structure porteuse et son bon comportement est donc primordial pour la sécurité de l'ouvrage. Mais on lui demande en plus, généralement, d'assurer un rôle de conteneur pour stocker ou transporter des liquides avec des exigences particulières :

- une étanchéité convenable, afin de remplir son rôle de stockage des liquides ;
- une durabilité suffisante pour les conditions particulières d'emploi, environnement fortement humide voire agressif comme c'est le cas de certaines parties de stations d'épuration.

Pour satisfaire ces exigences, les critères de choix des bétons et de leurs constituants doivent permettre d'apporter des éléments de réponse aux trois questions suivantes :

- comment formuler un béton étanche pour des structures destinées à contenir des liquides, sans entraîner des effets sur les propriétés de ceux-ci ?

— comment concevoir une structure durable au vu de la pathologie rencontrée parfois dans des milieux à forte hygrométrie (phénomènes d'alcali-réaction) ?

— comment se prémunir au mieux des attaques du béton dans un environnement agressif, du moins pour la durée de vie escomptée ?

Plusieurs éléments entrent en ligne de compte, notamment :

a) les exigences des exploitants et utilisateurs des ouvrages de stockage et de transport de l'eau ;

b) le contexte réglementaire et normatif national et européen :

- recommandations professionnelles ;
- futur fascicule 74 du CCTG ;
- fascicule 81 titre II du CCTG ;
- norme expérimentale XP 18-305 ;
- fascicule de documentation AFNOR P 18-011 ;
- guide ATILH : choix des ciments ;
- règles de calcul BAEL et BPEL ;
- norme européenne et notamment Pr ENV 206 ;

c) les données de dimensionnement des ouvrages ;

d) la durabilité en ambiance humide, la réaction alcali-granulat. Ce phénomène doit être envisagé pour les ouvrages concernés par l'adoption d'un niveau B de prévention proposé dans les recommandations du LCPC (Laboratoire central des Ponts et chaussées) de juin 1994.

Elles proposent des classes d'environnement, des catégories d'ouvrages et des niveaux de prévention.

Un projet de norme P 18-541 permet la qualification des granulats. L'influence des constituants du ciment est soulignée ;

e) la durabilité en atmosphère agressive qui se traduit par une accélération des processus de dégradation.

On peut procéder par une accélération artificielle (expérimentation).

On peut aussi consulter le fascicule de recommandations de l'AFNOR P 18-011.

Les tableaux 2 et 3 donnent les degrés d'agressivité et les niveaux de protection.

**Tableau 2 – Degrés d'agressivité des solutions et des sols (d'après P 18-011)**

Degré d'agressivité		A1	A2	A3	A4
Niveau de protection		1	2	2	3
Solutions (mg/L)	CO <sub>2</sub> agressif (1)	≤ 30	≤ 60	≤ 100	> 100
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	≤ 600	≤ 1 500 (5)	≤ 6 000	> 6 000
	Mg <sup>++</sup>	≤ 300	≤ 1 500	≤ 3 000	> 3 000
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	≤ 30	≤ 60	≤ 100	> 100
	pH	6,5 à 5,5	≤ 4,5	≤ 4	< 4
Sols secs (%) (3)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	≤ 0,6	≤ 1,2	≤ 2,4	> 2,4
Eau extraite du sol (mg/L) (4)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	≤ 2 300	≤ 3 700	≤ 6 700	> 6 700
Eau douce	TAC (2)	≤ 1 méq/L			

(1) Excès de CO<sub>2</sub> dissous par rapport au CO<sub>2</sub> nécessaire au maintien en solution des hydrocarbonates de Ca et Mg.

(2) TAC : titre alcalimétrique complet (norme NF T 90-036).

(3) Extraction par HCl à chaud.

(4) Extraction par l'eau : rapport eau/sol = 2/1.

(5) Limite fixée à 3 000 mg/L pour l'eau de mer.



Tableau 3 – Niveau de protection

Environnement	Degré d'agressivité	Mesures de protection concernant le béton	Niveau de protection
Faiblement agressif	A1	Aucune mesure spéciale, béton fait suivant les règles de l'art	1
Moyennement agressif	A2	Formulation et mise en œuvre adaptées au milieu (dosage, ciment, E/C, cure, adjuvants)	2
Fortement agressif	A3	Idem et action spécifique sur la nature du ciment et E/C	
Très fortement agressif	A4	Protection externe nécessaire (enduit, peintures) ou interne. Imprégnation et prescriptions du niveau 2	3

Tableau 4 – Recommandations particulières pour le choix du ciment (d'après P 18-011)

Niveau de protection	Choix du ciment
<b>Milieus sulfatés (sols ou solutions)</b>	
1	CPA-CEM I CPJ-CEM II/A (laitier S, cendres siliceuses V, pouzzolanes naturelles Z) ; CPJ-CEM II/B (laitier S) CHF-CEM III/A et B CLK-CEM III/C CLC-CEM V/A et B
2	CPA-CEM I dont $C_3A$ du ciment $\leq 5\%$ CHF-CEM III/A (laitier S $\geq 60\%$ ) ; CHF-CEM III/B CLK-CEM III/C CPJ-CEM II/A (laitier S, cendres siliceuses V, pouzzolanes naturelles Z) ; CPJ-CEM II/A dont $C_3A$ du clinker $\leq 5\%$ Ciments alumineux CLC-CEM V/A et B avec CaO du ciment $\leq 50\%$
3	Idem ci-dessus et protection supplémentaire si besoin
<b>Eau de mer</b>	
2 (Immersion totale)	CPA-CEM I dont $C_3A$ du ciment $\leq 10\%$ CPJ-CEM II/A dont $C_3A$ du clinker $\leq 10\%$ ; CPJ-CEM II/B (laitier, cendres, pouzzolanes) CHF-CEM III/A et B CLK-CEM III/C CLC-CEM V/A et B et ciments alumineux
3 (Zones de marnage & aspergées)	CPA-CEM I dont $C_3A$ du ciment $\leq 10\%$ CHF-CEM III/A et B CLK-CEM III/C CLC-CEM V/A et B avec CaO du ciment $\leq 50\%$
<b>Milieus acides</b>	
1	CPA-CEM I à teneur réduite en $C_3S$ et $C_3A$ CPJ-CEM II/A et B (laitier, cendres, pouzzolanes) CHF-CEM III/A et B CLK-CEM III/C CLC-CEM V/A et B
2	CHF-CEM III/A et B (laitier S $\geq 60\%$ ) ; CHF-CEM III/B, CLK-CEM III/C Ciments alumineux CLC-CEM V/A et B avec CaO du ciment $\leq 50\%$
3	Idem ci-dessus et protection supplémentaire si besoin

## ■ Prévention

La connaissance parfaite de la nature de l'eau qui sera en contact avec l'ouvrage est une nécessité absolue. Dans le cas des eaux naturelles, elle nécessite des prélèvements multiples pour analyses en fonction des saisons et des débits. Pour lutter efficacement contre les différents types d'agressions, plusieurs règles élémentaires sont à observer :

- choix des matériaux, et en particulier du ciment (tableau 4) ;
- composition du béton : dosage minimal en ciment, rapport E/C, enrobage des armatures (tableau 5) ;
- fabrication et mise en œuvre.

**Nota :** La dégradation des bétons par l'action des eaux agressives est bien connue mais encore mal maîtrisée.

La réalisation d'un béton durable vis-à-vis de ces agressions est tout à fait possible dès lors que projeteur et constructeur en ont pris conscience et ont mis en œuvre les moyens correspondants.

Ces moyens sont souvent élémentaires et peu coûteux et dans tous les cas sans commune mesure avec les coûts de réparation voire de reconstruction des ouvrages.

Tableau 5 – Composition des bétons

Degré d'agressivité	A2	A3	A4
Dosage du ciment (1) (kg/m <sup>3</sup> )	550/D <sup>1/5</sup>	700/D <sup>1/5</sup>	700/D <sup>1/5</sup> éventuel
E/C (2)	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,50$ éventuel
Granulats	Granulométrie conforme aux règles de composition des bétons		
Ouvrabilité	Consistance compatible avec une bonne mise en place et conduisant à la compacité maximale du béton. Vibration et usage éventuel d'adjuvants		
Enrobage des aciers	$\geq 30$ mm	$\geq 40$ mm	$\geq 40$ mm
Protection supplémentaire	Non nécessaire		Enduit, peinture, revêtement imprégnation

(1) D : dimension maximale des granulats (en mm). Le dosage minimal dans le cas du béton précontraint et de l'eau de mer est toujours 700/D<sup>1/5</sup>.

(2) Valeurs E/C données à titre indicatif ; ne sont pas indépendantes de la catégorie de ciment.

## 2.2 Critère de choix de la technique d'étanchéité

De l'analyse des différentes techniques d'étanchéité des ouvrages, trois conceptions majeures se dégagent :

- la première consiste à compter sur la seule étanchéité de la structure : c'est l'étanchéité dans la masse. Le matériau constitutif de la structure s'oppose à la traversée du liquide contenu. Cette technique s'accommode assez mal des effets du vieillissement naturel ;
- la deuxième consiste à appliquer un enduit adhérent à la paroi intérieure de la structure qui sert de barrière à la pénétration du liquide : il s'agit d'enduits à base de liants hydrauliques ou de produits à base de résines synthétiques. Ce type de protection supporte mal les mouvements du support, en particulier dans les zones fissurées. L'enduit ou le revêtement n'a pas, en général, une déformabilité suffisante compatible avec les ouvertures des fissures. Il peut alors se fissurer lui-même au droit des fissures du support ; par contre si les fissures restent très locales, une réparation locale peut être efficace, car l'adhérence de l'enduit ou du revêtement sur le support évite les fuites en dehors de la zone fissurée ;
- la troisième consiste à revêtir la paroi d'une membrane en général non adhérente ; cette membrane est déformable et s'adapte très bien à tous les mouvements du support. Par contre si un défaut

Tableau 6 – Critères de choix de la technique d'étanchéité

Exigences de l'utilisateur		Nature du traitement ou du revêtement				
		Ouvrage étanche dans la masse	Traitement d'imperméabilisation de surface	Revêtement d'imperméabilisation à base de liants hydrauliques	Revêtement d'imperméabilisation ou d'étanchéité à base de résines de synthèse	Revêtement d'étanchéité à base de membranes
Classe d'étanchéité (1)	A	Dépend de la conception de l'ouvrage	Complément d'imperméabilisation total ou partiel			
	B	Résultat très lié à la qualité du béton, aux dispositions constructives et à l'exécution	Améliore l'imperméabilité de l'ouvrage étanche dans la masse	Sans problème autre que la qualité du support	Dépend essentiellement du choix du procédé et de la qualité de son application en fonction du support	Dépend essentiellement du choix du procédé et de la qualité de son application en fonction du support
	C					
Compatibilité chimique et biologique	Eaux potables (alimentaires)	Bon après lavage	À justifier	À justifier à cause de certains additifs	À justifier	À justifier
	Eaux usées	Dépend du choix du ciment Peut nécessiter un revêtement	À justifier en fonction des exigences	La composition du revêtement peut être adaptée aux sollicitations par adjonction d'additif approprié	Bonne. Vérifier les sollicitations chimiques	Choix du produit en fonction des sollicitations
	Eaux peu minéralisées, minéralisées ou peu agressives	Nécessité d'un revêtement ou ciment spécial	À justifier en fonction des exigences	Insuffisant sauf justification	Bonne	Bonne
	Eaux chimiquement agressives	Nécessité d'un revêtement ou ciment spécial	À justifier en fonction des exigences	Insuffisant. Protection complémentaire généralement nécessaire	Bonne, mais la résine doit être adaptée à la sollicitation chimique	Choix du produit en fonction des sollicitations
Résistance aux sollicitations mécaniques et physico-chimiques	Adhérence au support		Bonne : (procédé d'imprégnation)	Bonne avec préparation de surface	Très variable	Sans objet pour les systèmes non adhérents Les autres nécessitent un support sec
	Résistance à la fissuration	Dépend des règles de calcul $\alpha = 240$	Permet de traiter certaines microfissurations	Permet de recouvrir des microfissurations < 0,1 mm. Les revêtements pelliculaires armés et à bas module peuvent résister à des fissurations plus importantes	Certaines résines peuvent absorber une fissuration quand l'épaisseur est suffisante	Très bonne
	Résistance à la sous-pression	Voir DTU 14.1 avec $\alpha = 240$	À justifier	Bonne	Liée à l'adhérence. Très variable	Nécessite un contre-cuvelage
	Résistance à l'usure	Bonne tenue dans le cas général. Traitement de surface pour sollicitations répétées	Améliore la résistance	Bonne et ajustable aux degrés de sollicitations	Convenable avec adhérence et épaisseur adaptée et choix du produit en fonction de la sollicitation	Nécessite une protection
	Résistance aux UV	Bonne	Bonne	Bonne	Formulations spéciales pour résistance aux UV (Essai)	Formulations spéciales pour résistance aux UV
	Résistance à la corrosion des aciers	Risques de corrosion des aciers (par défaut d'enrobage et fissuration)	Pas d'action	Améliore la protection des aciers contre la corrosion	Agit comme une barrière anticorrosion	Agit comme une barrière anticorrosion

(1) Classe A : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure seule.

Classe B : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure complétée par un revêtement d'imperméabilisation.

Classe C : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par un revêtement d'étanchéité, adhérent ou indépendant du support, la structure assurant uniquement une fonction mécanique.

Tableau 6 – Critères de choix de la technique d'étanchéité (suite)

Exigences de l'utilisateur		Nature du traitement ou du revêtement				
		Ouvrage étanche dans la masse	Traitement d'imperméabilisation de surface	Revêtement d'imperméabilisation à base de liants hydrauliques	Revêtement d'imperméabilisation ou d'étanchéité à base de résines de synthèse	Revêtement d'étanchéité à base de membranes
Comportement faisabilité	Aptitude à la mise en œuvre	Entreprises qualifiées	Facile mais mise en œuvre précise à respecter	Entreprises qualifiées	Entreprises qualifiées Mise en œuvre délicate	Entreprises qualifiées Mise en œuvre difficile et nécessairement soignée
	Aptitude à l'entretien	Facile et bonne si le parement est lisse	Bonne	Facile et bonne si le parement est lisse	Bonne, mais précautions à observer	Précautions à observer
	Aptitude à la réparation	Facilement réparable mais la réparation peut être longue	Bonne	Facilement réparable	Délicate	De facile (membranes bitumineuses) à délicat (PVC) dans la mesure où le défaut est localisé
	Durabilité fiabilité	Bonne	Améliore la durabilité	Très bonne	Liée à l'épaisseur du produit	Bonne
Principaux avantages et limites d'utilisation		Solution la plus classique qui nécessite parfois des traitements complémentaires	Simplicité de mise en œuvre très adaptée aux compléments d'imperméabilisation partiels Limité par les problèmes de fissuration	Systèmes ayant fait leur preuve et fiables de par le principe d'imperméabilisation basé sur une perte de charge Nécessite un traitement des fissures	Possibilités de couleurs et grandes possibilités de protections chimiques Il peut y avoir risque de cloquages	Permet de résister à la fissuration de toute nature et permet d'étancher des structures défailtantes Dans les systèmes indépendants, la localisation d'une fuite éventuelle est très difficile, voir impossible si protection lourde

(1) Classe A : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure seule.

Classe B : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par la structure complétée par un revêtement d'imperméabilisation.

Classe C : ouvrages dont l'étanchéité est assurée par un revêtement d'étanchéité, adhérent ou indépendant du support, la structure assurant uniquement une fonction mécanique.

d'étanchéité même très local apparaît sur la membrane, l'étanchéité de l'ensemble peut s'en trouver compromise, le liquide pouvant cheminer entre la membrane non adhérente et la paroi. Le point faible de la membrane est alors difficile à localiser.

La solution idéale qui ferait la synthèse des trois différentes solutions proposées (par exemple une membrane localement très déformable collée sur une structure étanche dans la masse) n'existe pas encore. Il faut donc faire des choix raisonnés qui conduisent au tableau 6.

Les propositions du tableau 6 sont liées aux exigences de l'utilisateur ce qui implique bien évidemment qu'elles aient été clairement définies dans le cahier des charges.

### 3. Conditions d'application - Mise en œuvre

#### 3.1 Mise en œuvre des bétons de structures étanches dans la masse

La mise en œuvre des bétons fait l'objet de nombreux règlements, recommandations ou normes. Le présent document se limite donc à donner les seules indications propres à favoriser l'obtention de l'étanchéité.

#### 3.2 Qualité des bétons

La résistance caractéristique à la traction à 28 jours ne peut en aucun cas être inférieure à 2,1 MPa, même si aucune exigence particulière sur cette caractéristique n'est précisée.

##### ■ Ciments

Les ciments sont conformes à la norme NF P 15-301 et sont choisis en fonction des caractéristiques chimiques du liquide contenu. Ceux à faible chaleur d'hydratation sont en général bien adaptés.

Le dosage ne doit pas être inférieur à 350 kg/m<sup>3</sup>.

##### ■ Granulométrie

Le sable doit avoir un module de finesse inférieur à 2,5 et le rapport G/S (gravillon/sable) doit être inférieur à 2,20.

##### ■ Eau de gâchage

L'eau de gâchage doit être conforme à la norme NF P 18-303.

Le rapport E/C doit être aussi faible que possible, en particulier pour réduire les phénomènes de retrait.

##### ■ Adjuvants

Les adjuvants sont déjà évoqués au paragraphe 1.2.2.

Les adjuvants plastifiants réducteurs d'eau sont très souvent utiles.

Les superplastifiants peuvent être utilisés compte tenu de la forte densité du ferrailage en place et de la faiblesse des épaisseurs de la structure. Les bétons sont alors dits fluidifiés.



Les hydrofuges peuvent être incorporés pour obtenir des bétons dits hydrofugés, en général plus imperméables.

#### ■ Maniabilité des bétons

L'affaissement au cône d'Abrams doit être inférieur à 7 cm avant mise en place d'un plastifiant.

### 3.3 Mise en œuvre des bétons

Le béton peut être mis en œuvre par déversement, par pompage, par projection.

Son homogénéité et sa compacité sont des qualités essentielles.

#### ■ Quelques précautions particulières à prendre lors du bétonnage

Le béton doit être déversé d'une manière très progressive à l'avancement, de façon à éviter bullage, ségrégation et hétérogénéité. La hauteur de déversement doit être inférieure à 1,50 m. Pour réduire cette hauteur, une goulotte avec manchette peut être nécessaire.

Le béton doit être placé par couches de faible épaisseur et sensiblement horizontales.

La vibration doit être soignée ; dans le cas le plus courant où des aiguilles de vibration sont utilisées, elles doivent être déplacées lentement et intéresser toute la masse du béton (figure 1).

#### ■ Arrêts de bétonnage

Les arrêts de bétonnage doivent être le moins nombreux possible, car les zones de reprise manquent très souvent d'homogénéité et la forte densité de fines peut entraîner un fort retrait. Ils doivent se situer dans les zones fortement tendues.

Les zones d'arrêt doivent être bien ferrillées.

#### ■ Reprises de bétonnage

Après un arrêt de bétonnage, la zone de reprise doit être très propre. Le béton au droit de la reprise doit être enrichi de liant et de fines. On peut même envisager d'utiliser un produit de collage, mais l'emploi de ce type de produit exige un personnel qualifié.

#### ■ Cure du béton

Les structures contenant des liquides sont en général de faible épaisseur, elles sont souvent exposées au moment de leur construction aux effets du vent, de l'humidité ou à des conditions thermiques sévères.

L'eau nécessaire à une bonne hydratation ne doit pas disparaître pour assurer prise et durcissement du béton. La cure du béton est faite pour le protéger dans son jeune âge et pour réduire les risques d'évaporation. Plus le ciment contient d'ajouts, plus il est sensible à la dessiccation. Des produits particuliers peuvent assurer cette cure, mais, dans bien des cas, de simples paillasons humides peuvent suffire. Par contre une humidification par intermittence est à proscrire.

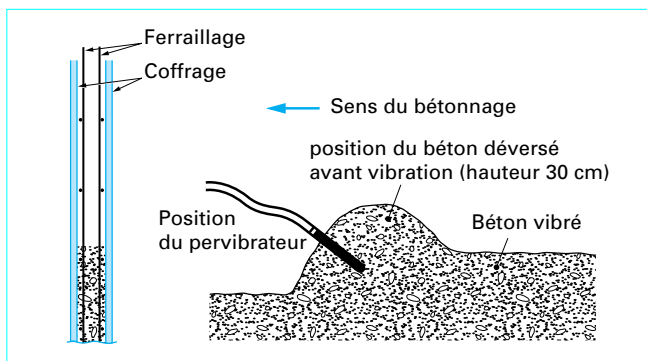


Figure 1 – Pervibration dans une paroi verticale mince

#### ■ Bétonnage par temps froid ou par temps chaud

Les structures contenant des liquides sont sensibles lors de leur construction aux conditions atmosphériques : leurs parois sont minces, leur situation très exposée (altitude, ensoleillement...). Les conditions de bétonnage doivent en tenir compte. Il est donc vivement conseillé de se reporter aux articles spécialisés de la rubrique *Béton hydraulique* dans ce traité, qui précisent les précautions à prendre pour le bétonnage par temps froid comme par temps chaud.

#### ■ Exécution des ouvrages

L'exécution d'un ouvrage contenant des liquides ne peut débuter qu'après mise au point d'un programme précis définissant les phases d'exécution, les zones de reprises admissibles, les recouvrements d'armatures et les enrobages à respecter. Les coffrages doivent être eux-mêmes conçus pour que leur déformation, quand ils sont mis en charge, soit compatible avec ce que peut accepter le béton frais. Il faut garder bien présent à l'esprit que le risque de fissuration est toujours présent et qu'il est particulièrement préjudiciable à ce type de structure.

#### ■ Finitions

Il peut arriver que la surface des parois au décoffrage laisse apparaître certains défauts mineurs : quelques zones réduites avec des nids de cailloux ou des excès de sable, des balèvres, des bullages, etc. Il est facile de remédier à ces défauts locaux soit par piquage et ragréage (nid de cailloux et bullage inférieurs à 1,5 cm<sup>3</sup>), soit par ponçage (balèvres et arêtes irrégulières). La surface peut, comme il est indiqué au paragraphe 1, recevoir une couche d'imprégnation sur la zone limitée à la partie retouchée de la surface.

#### ■ Joints

Lorsque certaines dimensions de la structure sont très importantes (> 50 m), on peut être amené à prévoir des joints de dilatation.

Un joint est toujours un point faible des constructions étanches ; il n'existe pas de solution standard à proposer pour le traiter et tout joint doit faire l'objet d'une étude particulière. On doit toutefois préciser qu'une mise en précontrainte de la structure peut apporter une solution très efficace, les joints ne devenant plus nécessaires. Les cuves de grands réservoirs sont toujours précontraintes.

### 3.4 Mise en œuvre des traitements d'imperméabilisation de surface

Une fois choisi, le produit doit être mis en place dans des conditions bien définies.

#### 3.4.1 Travaux préparatoires

##### ■ Qualité du support

Avant toute application, il faut :

- vérifier la conformité et la compatibilité du support avec les exigences définies par le fabricant du produit ;
- vérifier l'absence de fissures ou, en cas d'existence de fissures, préciser la façon de les traiter ;
- relever la présence des joints en distinguant ceux qui sont actifs et ceux qui restent inertes.

Une planéité très soignée de la paroi n'est, en général, pas exigée.

##### ■ Mise en état de la surface

Aucune préparation spéciale n'est, en général, nécessaire. Toutefois, il faut vérifier l'absence de traces d'huiles de décoffrage et de souillures éventuelles.

Certains types de traitements exigent que l'on supprime la laitance superficielle pour favoriser la pénétration du produit d'imperméabilisation.

### 3.4.2 Application du produit

Comme on l'a vu précédemment, le produit se présente sous forme de liquide.

Il peut être appliqué sous trois formes différentes :

- par pulvérisation, une ou plusieurs couches jusqu'à saturation ;
- par dépôt à la surface à l'aide d'une brosse ou d'un rouleau, toujours jusqu'à saturation ;
- par injection dans la masse à partir d'injecteurs sous pression. La répartition des injecteurs doit assurer une présence très homogène du produit.

Un traitement par enduction d'une couche de revêtement mince à base de liants hydrauliques complète parfois l'application du produit.

Les joints de construction et les joints inertes sont traités par pontage ou calfeutrement.

Les joints ou les fissures actives sont traités suivant les indications du tenant du procédé.

## 3.5 Mise en œuvre des revêtements à base de liants hydrauliques

### 3.5.1 Précisions à obtenir sur le procédé retenu

Chaque procédé doit préciser dans un document :

- les domaines d'application ;
- les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques des composants ;
- les caractéristiques des supports compatibles ;
- les travaux préparatoires particuliers en complément des indications du paragraphe 3.5.2 ;
- le matériel à utiliser ;
- les détails d'exécution ;
- le traitement des joints et fissures ;
- les contrôles à exercer ;
- les possibilités de réparation ponctuelles.

### 3.5.2 Les travaux préparatoires

#### ■ Qualité du support

Avant toute application du revêtement, il faut procéder à une reconnaissance de l'état du support et en particulier :

- vérifier la conformité et la compatibilité du support avec les exigences du procédé ;
- relever les joints et les fissures ;
- vérifier la planéité, la flèche sous la règle de 2 m doit être inférieure à 7 mm, celle rapportée à la flèche de 0,22 m doit être inférieure à 2 mm ;
- préciser les zones de ragréages indispensables ainsi que la méthode à appliquer pour les réaliser.

#### ■ Mise en état des surfaces

Les arêtes doivent être rabattues pour éviter tous les angles vifs. La surface doit être nettoyée, sans poussières, laitance ou traces polluantes.

La rugosité doit être conforme aux exigences du fabricant. Elle peut être obtenue par sablage, grenailage, décapage à l'eau sous pression limitée, bouchardage.

### 3.5.3 Application

#### ■ Cas des revêtements épais

Le mortier est en général préparé sur place juste avant d'être appliqué.

Deux couches sont nécessaires sur parois horizontales. Sur parois verticales, une couche d'accrochage doit être prévue. L'épaisseur totale doit être supérieure à 25 mm.

#### ■ Cas des revêtements minces

Les mortiers pour revêtements minces sont préparés en usine.

Le revêtement doit comprendre une couche d'accrochage et une couche d'imperméabilisation.

L'épaisseur totale doit dépasser 4 mm. De tels revêtements ne doivent pas être appliqués sur des supports trop jeunes (attendre que le béton du support ait 28 jours).

## 3.6 Revêtements à base de polymères

### 3.6.1 Précisions à obtenir sur le procédé retenu

Le fabricant doit fournir un document précisant :

- le domaine d'emploi du produit ;
- les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques du produit ;
- les qualités mécaniques et physiques demandées au support et les éventuelles incompatibilités ;
- les possibilités de réparation et les travaux d'entretien éventuels.

### 3.6.2 État du support

#### ■ Cas de bétons bruts de décoffrage

Le béton ne doit pas présenter d'arêtes vives, ni de balèbres supérieures à 3 mm.

Le bullage doit être limité, les bulles ne doivent pas dépasser en surface 1 cm<sup>2</sup> et en profondeur 5 mm.

La surface ne doit présenter aucune fissure.

Du point de vue planéité, la flèche sous la règle de 2 m doit être inférieure à 7 mm.

Les ségrégations et les défauts locaux doivent être traités avant toute application du revêtement.

#### ■ Revêtements sur chape

Le revêtement peut être appliqué sur une chape en ciment. La surface doit être propre, sans laitance, soufflures, cloques ou gerçures. Elle doit être régulière ; la flèche admissible sous la règle de 2 m est inférieure à 10 mm.

### 3.6.3 Essais particuliers

Le produit de revêtement doit faire l'objet de deux séries d'essais :

- a) des essais de base :
  - adhérence sur le support ;
  - perméabilité ;
  - comportement sur support fissuré ou fissurable ;
- b) des essais complémentaires :
  - alimentarité ;
  - vieillissement ;
  - résistances au liquide contenu et aux agents agressifs.

### 3.6.4 Préparation des surfaces

Le soin à apporter à la préparation des surfaces est particulièrement important avec ce type de revêtement.

Il est fonction de la position de l'élément de structure concerné.

Tableau 7 – Préparation des surfaces avant revêtement à base de polymères

Position de subjectile	Brossage	Lessivage	Meulage Ponçage Rabotage	Projection d'abrasifs	Séchage	Dépoussiérage
Parois et couvertures	X		X	X		X
Radiers			X	X		X
Fonds anciens		X	X	X	X	X

Dans le cas où les surfaces sont déjà revêtues (réparation), on élimine l'ancien revêtement pour s'approcher du cas de revêtement neuf.

Le tableau 7 permet de préciser les techniques de préparation conseillées.

### 3.6.5 Application

L'application ne peut se faire que sur support sec.

Le nombre de couches est précisé par le fabricant.

En général, le produit est appliqué :

- à la pompe, pour les revêtements non renforcés ;
- au rouleau ou à la machine de projection si le revêtement est renforcé par une toile.

Le préchauffage ne peut être envisagé que sur avis du fabricant.

## 3.7 Membranes

### 3.7.1 Précisions à obtenir sur le procédé

Un document émanant du fabricant doit définir :

- les domaines d'application ;
- les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques du produit ;
- celles du support ;
- les détails techniques d'exécution.

### 3.7.2 Préparation du support

Le support doit être propre et lisse ; il doit être brossé et ne pas présenter de défauts de planéité supérieurs localement à 3 mm.

Dans le cas le plus courant de pose indépendante du support, la pose d'un non-tissé anti-poinçonnement est nécessaire.

### 3.7.3 Mise en œuvre

Chaque procédé doit préciser :

- le mode de liaison à la structure (à chaud, à froid, par soudage, collage ou fixations mécaniques). Dans ce dernier cas, des essais de déchirure au clouage sont nécessaires ;
- la largeur des bandes ;
- le nombre et le type de fixations nécessaires. En paroi verticale ou inclinée, les systèmes non adhérents doivent être fixés en tête et éventuellement à mi-hauteur si la hauteur excède 5 m. En radier, les fixations ne sont pas exigées pour les systèmes indépendants qui se trouvent plaqués au sol par la pression.

Les systèmes adhérents n'exigent aucune fixation complémentaire.

Les jonctions paroi-radier des membranes soumises à des phénomènes de retrait doivent être aménagées en forme de lyre, les joints de dilatation aussi.

## 3.8 Traitement des points singuliers

Toutes les structures contenant des liquides comportent un certain nombre de points singuliers à traiter de façon spécifique ; il en va ainsi des reprises de bétonnage, des émergences, des points de pénétration de canalisations et de sortie d'évacuation et des zones de fuites localisées.

### 3.8.1 Traitement des lignes de fuite

Par ligne de fuite, on entend généralement :

- les joints de retrait ou de construction ;
- les fissures de retrait ou autres ;
- les reprises de bétonnage.

Les traitements possibles sont les suivants :

- le calfeutrement ;
- le pontage ;
- l'injection.

#### ■ Calfeutrement des fissures

Le calfeutrement consiste à élargir les lèvres des fissures pour introduire dans la saignée ainsi créée un produit assurant l'étanchéité.

Des produits de remplissage dits « raides » sont utilisés lorsque les fissures sont inertes. Il s'agit alors de produits à base de liants hydrauliques modifiés ou à base de résines synthétiques.

Des produits de remplissage dits « souples » sont utilisés lorsque les fissures sont vivantes. Il s'agit alors de mastics polymères, de mastics polysulfures, de mastics bitumineux ou de mastics silicones.

On se reportera à l'article *Calfeutrement des joints dans le bâtiment* du présent traité.

#### ■ Pontages

Lorsque le souffle des fissures ou des joints est important, le pontage permet de rétablir l'étanchéité par la mise en place d'une bande étanche collée sur le support sain de part et d'autre des lèvres de la fissure ou du joint.

Les bandes utilisées sont des élastomères (PVC, polychloroprène, polyéthylènes, bitumes élastomères), des toiles ou mats de verre, des non-tissés de polyesters associés à un complexe à base de résines. Les colles sont à base de résine époxyde ou polyuréthane avec ou sans primaire.

#### ■ Injection des fissures ou des zones de reprise

L'étanchéité des fissures est réalisée par injection d'un produit remplissant le vide créé par la fissure et adhérent au support.

Les produits d'injection sont choisis en fonction de la largeur de la fissure, de son « activité » et du besoin ou non de rétablir une fonction mécanique dans la zone fissurée. Les produits les plus courants sont les résines époxydes, les polyuréthanes, les silicates, les résines acryliques. Les fabricants doivent donner les caractéristiques physiques, mécaniques et chimiques ainsi que les incompatibilités de leurs produits pour permettre un choix raisonné.

### 3.8.2 Émergences.

#### Passages des tuyauteries diverses

Les traversées de tuyauteries doivent être étanchées par un dispositif spécial.

Les tuyauteries peuvent être fixées :

- par un mortier de scellement imperméable dans le cas où elles ne sont soumises à aucun mouvement ;
- par l'intermédiaire de plusieurs gorges et de mastics souples si des mouvements sont à prévoir ;
- soit enfin par des brides et contre-brides ou colliers de serrage associés éventuellement à des mastics.

Tous les scellements doivent être noyés dans la masse et réalisés avec des produits imperméables.

### 3.8.3 Obturations de fuites localisées

Deux méthodes de colmatage sont envisageables :

- si la fuite est faible et diffuse, on peut appliquer avec force un produit colmatant jusqu'à la prise et l'adhérence du produit sur le support ; les produits recommandés sont alors des liants hydrauliques à base d'alumine, des liants à prise très rapide ou même des résines rapides acceptant la présence d'eau ;
- si la fuite est plus importante, on peut être amené à sceller un petit tuyau dans la zone de fuite, à attendre la prise du produit de scellement (le tuyau permettant l'évacuation sans mise en charge de l'eau), puis à obturer le tuyau scellé.

## 3.9 Différents essais à prévoir

### 3.9.1 Essais de base

#### ■ Adhérence

Les normes NF P 18-852, NF P 18-853 et NF P 18-858 sont applicables pour vérifier l'adhérence d'un revêtement quand elle est requise. On admet couramment les valeurs d'arrachement suivantes en fonction des classes de la structure choisies :

- classe A : adhérence supérieure à 2 MPa ;
- classe B : adhérence entre 1 et 2 MPa ;
- classe C : adhérence entre 0,5 et 1 MPa ;
- classe D : adhérence entre 0,2 et 0,5 MPa.

#### ■ Perméabilité

Un mode opératoire a été mis au point par EDF et son Centre d'études des matériaux (CEMETE) pour mesurer la perméabilité hydraulique sous gradient de pression.

Un autre mode opératoire mis au point par le CEMAGREF, IRIGM (Institut de recherches interdisciplinaires de géologie et de mécanique), définit un essai de perméabilité des membranes.

La norme NF P 84-451 définit l'essai de perméabilité à l'eau des revêtements à base de liants hydrauliques.

La norme NF P 18-855 définit l'essai de perméabilité aux liquides des produits à base de liants hydrauliques ou de résine de synthèse sur supports secs ou humides.

Dans tous les cas, les essais doivent donner le volume de liquide ayant traversé l'échantillon ainsi que les équations définissant le volume en fonction du temps et en fonction de la pression, de façon à déduire le débit de fuite caractéristique.

### 3.9.2 Comportement sur support fissuré ou fissurable

Deux types d'essais sont conseillés :

- essai de tenue d'un revêtement d'étanchéité au droit d'une fissure respirante. L'essai consiste à appliquer le revêtement sur une

zone présentant une fissure de largeur connue et à faire varier l'ouverture initiale sous des cycles définis soit de 0,1 à 0,5 mm soit de 0,1 à 1 mm. Le support ne doit pas se fissurer dans les conditions de l'essai ;

- essai de tenue à la sous-pression d'un revêtement sur support fissuré. Dans l'essai, le revêtement est appliqué sur un support présentant une fissure de 1 mm.

Le revêtement doit résister à une sous-pression de 0,1 bar sans perte de ses qualités ni craquelures apparentes.

### 3.9.3 Alimentarité

Dans le cas où le liquide stocké est destiné à la consommation humaine, les matériaux et revêtements utilisés pour la construction doivent être vérifiés par des laboratoires agréés très spécialisés.

### 3.9.4 Vieillesse

Un essai de vieillissement peut être conduit par application de la norme NF T 30-049 ou par les normes NF P 18-853 et 18-854 concernant la tenue de l'adhérence sous un cycle gel-dégel ou sous choc répété.

### 3.9.5 Résistance aux liquides et aux agents agressifs

La norme NF T 30-053 permet de définir le comportement du revêtement en contact avec les liquides à stocker.

## 4. Essais. Contrôles. Réception

### 4.1 Bétons et ouvrages en béton

Les ouvrages conçus et réalisés pour un système de distribution d'eau (destinée à la consommation humaine) doivent être en mesure d'assurer à l'eau qu'ils contiennent la conservation rigoureuse de toutes ses qualités.

Les ouvrages destinés au stockage, au traitement et au transit des eaux usées et des eaux pluviales doivent être en mesure d'assurer la protection de l'environnement et de résister aux actions éventuelles des eaux qu'ils contiennent.

La nature particulière de ces ouvrages et leurs missions spécifiques nécessitent de souligner certains points essentiels et d'apporter quelques compléments aux dispositions contenues dans le Fascicule n° 65 A du CCTG « Exécution des ouvrages de génie civil en béton armé et en béton précontraint par post-tension ».

#### 4.1.1 Essais

Les essais de béton ont pour but de s'assurer que le béton fabriqué et mis en œuvre a les caractéristiques requises. Trois types de contrôles sont à distinguer :

- contrôles amont, sur les matériaux constitutifs du béton et sur les matériels de dosage et de malaxage ;
- contrôles de fabrication, sur bétons frais et sur bétons durcis, prélevés à la centrale du chantier, à la centrale de béton prêt à l'emploi, ou à la livraison du béton sur chantier ;
- contrôles sur ouvrages, après durcissement.

La majeure partie de ces essais doit être faite par un laboratoire de contrôle agréé, qui est équipé du matériel approprié.

#### 4.1.1.1 Contrôles amont

Ce sont des contrôles préventifs qui portent sur les approvisionnements. On fera appel aux normes AFNOR suivantes :

- granulats : normes NF P 18-101, P 18-301, P 18-304 ;
- ciment : norme NF P 15-301 ;
- eau : norme NF P 18-303 ;
- béton : normes NF P 18-010, P 18-011, P 18-305 ;
- adjuvants : norme NF P 18-103 ;
- acier : normes NF A 35-015, A 35-016, A 35-017, A 35-018, A 35-019.

Les essais, ainsi que les épreuves d'étude, de convenance, et de contrôle du béton, doivent avoir pour objectif principal d'aboutir à la mise en place d'un béton frais suffisamment maniable pour obtenir un béton durci satisfaisant aux caractéristiques suivantes :

- compacité ;
- faible perméabilité ;
- insensibilité à l'action de l'eau qui est contenue dans l'ouvrage et qui se trouve au contact de la structure soit sous forme de liquide, soit sous forme de vapeur ;
- bullage très limité en parement.

Les contrôles amont portent également sur l'état du matériel de dosage et de fabrication du béton (état mécanique du matériel, fiabilité des dosages, enregistrement des paramètres de fabrication).

#### 4.1.1.2 Contrôles de fabrication

Le prélèvement est la pierre d'achoppement du contrôle du béton : il faut qu'il soit représentatif. Seule la norme NF P 18-404 fixe les modalités des prélèvements de béton effectués au camion malaxeur à la livraison sur chantier.

##### ■ Essais sur béton frais

La norme NF P 18-451 codifie la mesure de la plasticité par un essai d'affaissement au cône d'Abrams. La plasticité recherchée pour obtenir la maniabilité convenable est déterminée par les épreuves d'étude et de convenance du béton. D'autres méthodes existent, moins bien adaptées aux petits chantiers.

##### ■ Essais sur béton durci

On fera appel aux normes suivantes : NF P 18-400, NF P 18-405, NF P 18-406.

La valeur de la résistance caractéristique à 28 jours est contractuelle. La connaissance rapide de cette valeur, sans attendre l'échéance des 28 jours, peut être utile : certains laboratoires ont mis au point une méthode accélérée.

On peut réaliser des mesures pratiques de perméabilité à l'eau. L'essai le plus significatif consiste à mesurer la pénétration de l'eau sous pression dans la masse du béton d'une éprouvette de béton durci. Il n'existe pas de codification pour ce type d'essai mais on pourra s'inspirer des normes NF P 18-855 et NF P 18-451. De tels essais peuvent être utilement mis en œuvre pour l'étude de composition et la mise au point de la formule nominale du béton destiné à la cuve. De nouveaux essais seront nécessaires en cas de changement de la formule nominale au cours des travaux.

On peut prescrire également un examen des parements et du bullage (annexe T 24-1 du fascicule 65 du CCTG), qui doivent nécessairement être compatibles avec la méthode choisie pour l'étanchéité de l'ouvrage.

#### 4.1.2 Contrôles des tolérances dimensionnelles

Les tolérances dimensionnelles des divers ouvrages de bâtiment et de génie civil sont souvent à l'origine de litiges entre maître d'ouvrage, maître d'œuvre et entreprise titulaire du marché.

La plupart de ces tolérances ont fait l'objet de codifications, soit dans la norme NF P 01-101, soit dans les DTU, mais elles sont en général mal connues. Certaines tolérances ne sont pas codifiées et doivent être fixées par le maître d'ouvrage.

Les DTU et règlements fixent les valeurs minimales. Les documents particuliers du marché peuvent prescrire des tolérances plus sévères, qui doivent, en conséquence, être respectées.

Un tableau de synthèse des tolérances codifiées (document Véritas) a été publié dans les « Cahiers du Bâtiment (cf. Doc. C 3 674) » pour le cas particulier des châteaux d'eau, réservoirs et cuves, ainsi que pour les piscines.

## 4.2 Produits spéciaux pour constructions en béton

### 4.2.1 Normes et essais

Il existe une marque NF produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. La commission de normalisation des produits spéciaux a rédigé des normes qui sont publiées ou sur le point de l'être. Certaines sont de portée générale, d'autres plus spécifiques concernent les familles de produits suivants :

- produits de calage et de scellement ;
- produits ou systèmes de produits destinés aux réparations de surface sur béton durci ;
- produits de collage structural ;
- produits d'injection ;
- essais d'identification.

On trouvera en Doc. C 3 674 la liste des normes applicables aux produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique.

### 4.2.2 Contrôles sur chantier

Les contrôles sur chantier de ces produits font actuellement l'objet de la norme P 18-802.

Cette norme a pour rôle de guider le maître d'œuvre et l'utilisateur dans le choix des moyens lui permettant de contrôler à la réception, lors de la mise en œuvre, ou après application, les produits livrés et utilisés sur un chantier, aux différents stades de déroulement des travaux.

Cette norme s'applique à tous les produits qui répondent à un problème de réparation structurale (injection, ragréage, calages), ou à un problème complémentaire (scellements, collages, protection de surface).

Ces produits peuvent être soit à base de liant hydraulique, soit à base de polymères de synthèse.

### 4.2.3 Aspect alimentaire

Il est nécessaire que le parement ait subi avec succès les tests d'alimentarité.

## 4.3 Produits à base de polymères de synthèse pour revêtements

### 4.3.1 Normes, essais et modes opératoires connus

#### ■ Adhérence

NF P 18-852 : essai d'adhérence sur surfaces sciées.

NF P 18-853 : essai d'adhérence après cycles thermiques sur surfaces sciées.



NF P 18-858 : essai d'adhérence sur surfaces rugueuses.

Les deux premiers essais s'appliquent à des revêtements à base de liants hydrauliques, ou de polymères de synthèse.

Le dernier essai concerne seulement les produits à base de liants hydrauliques.

Le principe de ces tests est un essai de traction avec l'appareil SATTEC.

#### ■ Perméabilité

NF P 18-855 : essai de perméabilité aux liquides des produits ou systèmes de produits destinés aux réparations de surface sur béton durci.

L'essai est limité à une pression de 2 MPa.

NF P 84-451 : essai de perméabilité à l'eau des revêtements intérieurs d'imperméabilisation à base de liants hydrauliques destiné aux travaux de cuvelage.

L'essai est limité à une contrepression de 0,1 MPa.

Ces deux essais s'appliquent à des revêtements à base de liants hydrauliques, le premier est applicable aux polymères de synthèses si ceux-ci ont au plus 1 cm d'épaisseur.

Remarque : il existe un test en contrepression EDF-CEMETE, plus sévère car réalisé sur un béton préfissuré.

#### ■ Porosité. Diffusion

Une mesure de la porosité et de la diffusion peut permettre la détermination des capacités de diffusion d'un type de revêtement.

Les phénomènes de cloquage et les effets de la pression osmotique peuvent correspondre à des migrations d'eau ou de vapeur d'eau à travers le revêtement, entre le support et le contenant ou vice versa, à travers le revêtement.

Le laboratoire du CENG de Grenoble utilise un essai avec passage d'eau sans pression.

#### ■ Comportement sur le support fissuré ou fissurable

Différents appareillages et modes opératoires ont été étudiés pour répondre à certains cas particuliers :

- a) fissuration instantanée (de préférence machine de traction directe du LCPC) ;
- b) fissuration progressive (de préférence machines Omega, Veritas) ;
- c) fissuration respirante et fatigue (de préférence Omega, Veritas et essai EDF CEMETE).

À noter que ces essais se déroulent en dehors de tout contact avec l'eau. De plus, ils sont réalisables à différentes températures.

### 4.3.2 Contrôles des surfaces témoins

Le titulaire du marché exécute avant le début des applications pour chaque fosse, cuve, bassin, ou réservoir traité, un revêtement témoin correspondant aux spécifications du marché.

Ce revêtement témoin s'effectue sur une plaquette en béton d'une taille au minimum de 1 m × 1 m.

Ces plaquettes témoins conservées sur le chantier, serviront d'étalon de comparaison, pour la vérification des couches intermédiaires et l'état de surface final.

### 4.3.3 Retouches en cours de travaux

Avant application d'une nouvelle couche, le titulaire du marché doit procéder aux retouches nécessaires.

Celles-ci doivent être exécutées selon les mêmes prescriptions que s'il s'agissait d'une couche complète, en particulier pour les temps de séchage.

Quand sur une zone donnée, le pourcentage des retouches à effectuer excède 20 % ; ces dernières sont remplacées par une cou-

che appliquée sur toute la surface de cette zone. Dans certains cas, il peut être nécessaire d'enlever totalement la première couche.

## 4.4 Membranes à base de produits bitumineux et de copolymères

Préalablement à tout chantier il convient de s'assurer de la neutralité chimique de l'eau stockée vis-à-vis de la membrane, ainsi que du caractère alimentaire de celle-ci (voir chapitre 8.4.1) dans le cas de ressources d'eau potable.

Quatre catégories d'essais sont à considérer :

- la mesure des caractéristiques chimiques et physicochimiques ;
- la mesure des caractéristiques mécaniques ;
- le contrôle de la qualité des assemblages ;
- le contrôle des liaisons.

## 4.5 Épreuves et réception des ouvrages

### 4.5.1 Épreuves et essais en eau

Il est indispensable de remplir et de maintenir l'ouvrage plein dès qu'il est prêt à recevoir le liquide, ou tout au moins de le maintenir humide jusqu'au premier remplissage et sa première utilisation.

Le premier remplissage est effectué suivant un programme proposé par l'entrepreneur, et accepté par le client, de manière à assurer une mise en charge par tranches partielles journalières (en général < 1 m de hauteur).

En ce qui concerne ce premier remplissage, les prescriptions suivantes doivent être respectées :

- 1) remplir d'eau la cuve, le château d'eau, le bassin, le réservoir ou l'aqueduc lentement et régulièrement. L'entrepreneur doit proposer un programme de remplissage de manière à assurer une mise en charge progressive étalée sur plusieurs jours ;
- 2) dans le cas de batteries, remplir d'eau simultanément toutes les cuves et réservoirs situés à des niveaux de fondation voisins ;
- 3) si la batterie de cuves ou réservoirs comporte plusieurs niveaux, remplir dès le premier essai toute la batterie afin de lui donner son poids maximal en charge ;
- 4) maintenir constant le niveau d'eau durant les 10 jours suivant le remplissage ;
- 5) vider les cuves ou réservoirs de façon alternée et dans un ordre quelconque pour vérifier le comportement des parois intermédiaires.

### 4.5.2 Réception. Constatation des fuites

Les fuites sont constatées contradictoirement et leur inventaire doit se faire au plus tôt 10 jours après la fin du premier remplissage.

Une simple tache humide sans suintement ne fait pas obstacle à la réception si elle est temporaire et disparaît rapidement après la mise en eau. Les ouvrages sont déclarés étanches, s'ils remplissent, lors de la réception, les conditions ci-dessus.

### 4.5.3 Conditions à respecter avant la mise en service

Pour un ouvrage enterré, la mise en place des remblais ne peut s'effectuer qu'après réception. De même, il peut être nécessaire de prévoir un drainage sous radier de ces ouvrages.

Après les essais et épreuves et jusqu'à la mise en service de l'ouvrage, celui-ci doit être maintenu en eau pour une fraction notable de sa capacité, au moins 1/4 de celle-ci.



L'entrepreneur a la charge de veiller, jusqu'à réception, à ce que cette prescription soit satisfaite.

En toute rigueur, il est préférable que l'ouvrage reste plein.

#### 4.5.4 Contrôle des systèmes à la réception des travaux

La réception des travaux a lieu après le délai de mise en service indiqué par le fabricant sur la fiche technique du produit.

Les contrôles de réception sont effectués en présence de l'applicateur, du fabricant et du titulaire du marché. On procède alors à un examen visuel approfondi.

Dans le cas d'un réservoir d'eau potable, il est également possible de procéder à une dégustation de l'eau de contact (norme NF P 90-035).

### 4.6 Conditions d'exploitation des ouvrages

#### 4.6.1 Généralités

Il est expressément recommandé :

- de remplir et de maintenir l'ouvrage plein, dès qu'il est prêt à recevoir du liquide, ou tout au moins de le maintenir humide jusqu'à sa première utilisation ;
- d'éviter des surpressions ou des dépressions supérieures à celles prévues par le maître d'œuvre ;
- d'éviter les variations brutales du niveau de charge, qu'elles soient dues au mode de remplissage ou à l'exploitation ;
- d'éviter les variations brutales de température liées soit à la modification de la température du liquide contenu, soit à la mise en chômage de l'ouvrage durant une période hivernale ;

- de prévoir une protection contre le gel ;
- d'entretenir les enduits et revêtements d'imperméabilisation ;
- d'interdire les nettoyages avec des produits agressifs pour le béton ou pour le revêtement, ainsi que l'utilisation de lances haute pression même si l'étanchéité n'est assurée uniquement que par le béton ;
- enfin, d'inspecter annuellement l'intérieur et l'extérieur de l'ouvrage et de suivre les éventuelles anomalies à l'aide de repères de mesure, ou de témoins.

#### 4.6.2 Contrôle durant la période de garantie

Durant la période de garantie, il est nécessaire de procéder à des examens périodiques. Ceux-ci doivent répondre aux conditions suivantes :

- ils sont réalisés tous les ans lors de la visite annuelle prescrite pour le nettoyage durant les quatre premières années. Ensuite, le délai entre chaque contrôle est porté à deux ans, à l'exception des ouvrages destinés à recevoir de l'eau potable ou une visite annuelle s'impose ;
- lors de chacune des visites, un contrôle visuel est effectué en comparaison avec des plaquettes témoins conservées par le maître d'ouvrage.

De plus, il est judicieux de prendre des photographies lors de chaque visite.

#### 4.6.3 Contrôles et entretien après la période de garantie

Le premier contrôle a lieu dans les deux ans maximum suivant l'expiration du délai de garantie.

Il est conseillé au maître d'ouvrage de prévoir des visites d'inspection régulières, et d'une fréquence annuelle dans le cas d'un ouvrage destiné à contenir de l'eau potable et biannuelle dans les autres cas.