

Des désordres (décollement au niveau de la doucine, décollement au niveau de la plinthe inférieure, arrachement d'une partie du couvre joint) ont été observés au niveau du couvre joint en périphérie du masque (cf. photos suivantes). Les problèmes de mise en œuvre du masque en 1995 (température et compactage) avaient nécessité une nouvelle intervention l'année suivante pour le recouvrir d'un enduit d'étanchéité.



**Figure 22 : Défauts au niveau du couvre-joint**



**Figure 23 : Désordre découvert lors de l'inspection en 2020**

#### 4.2.7 DESORDRES LIES AUX CHUTES DE BLOC ET AUX TRAVAUX DE RETRAIT DES EMBACLES.

Le masque a fait l'objet de désordres liés aux chutes de blocs rocheux parfois pluridécimétriques. Ces chutes ont occasionné des poinçonnements du masque. Certains impacts ont fait l'objet de réparation entre 2013 et 2020 et leur bonne tenue a pu être confirmée lors de la dernière inspection.





**Figure 24 : Bloc rocheux tombé sur le masque**

Les travaux de retrait des embâcles présents dans la retenue ont également occasionné des désordres sur le masque. L'inspection de 2020 qualifie d'importants les dégâts liés aux impacts du godet de la pelle mécanique sur le masque lui-même. Les griffes peuvent atteindre des longueurs de l'ordre du mètre et des profondeurs de 3 cm.

Ces désordres sont principalement localisés en pied de masque, sur la partie rive gauche.



**Figure 25 : Désordres liés aux retraits des embâcles**

## 5 ANALYSE DES ESSAIS REALISES SUR LE MASQUE

### 5.1 PREAMBULE

L'objet de ce chapitre est d'évaluer, sur la base de l'ensemble des sondages et essais réalisés depuis la construction du masque jusqu'en 2020 :

- la conformité des différentes couches avec le référentiel technique de la CIGB, au moment de la construction et à ce jour,
- l'évolution des caractéristiques des couches dans le temps,
- la durabilité résiduelle du masque.

### 5.2 PRESENTATION DES CAMPAGNES D'ESSAIS

#### 5.2.1 ESSAIS REALISES LORS DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION DU MASQUE INITIAL, EN 1966

23 carottages de contrôle ont été réalisés en 1966 pendant la mise en œuvre du masque. Les données suivantes sont disponibles :

- Mesure de l'épaisseur cumulée des couches A+B,
- épaisseur de la couche support C,
- densité (la couche n'est pas précisée).

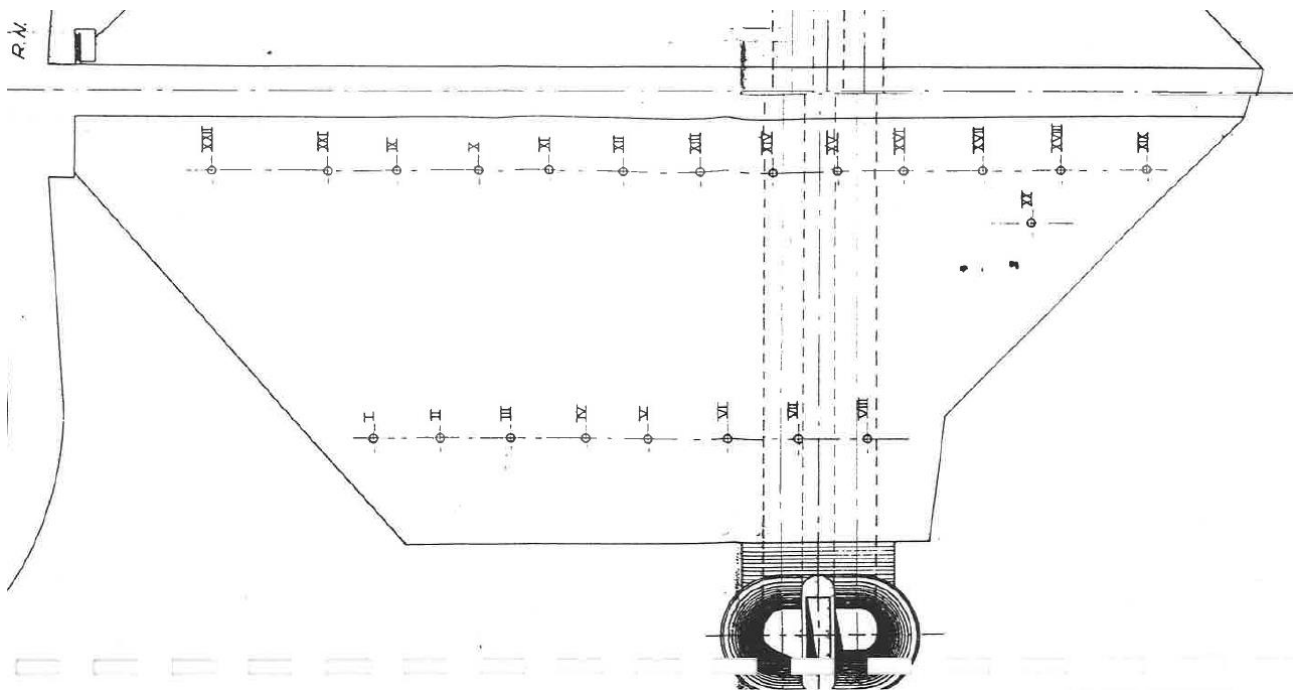


Figure 26 : Carottages de contrôle réalisés en 1966



## 5.2.2 ESSAIS REALISES DANS LE CADRE DU CONTROLE DU VIEILLISSEMENT DU MASQUE (1972 A 1992)

Suite à la recommandation du Comité Technique Permanent des Barrages de contrôler l'évolution des caractéristiques du béton bitumineux du masque par carottage tous les 5 ans, la Direction Départementale de l'Équipement (DDE) a fait procéder à des carottages et des analyses en :

- Septembre 1972 (15 carottes),
- Mars 1978 (14 carottes),
- Été 1986 (12 carottes),
- Septembre 1992 (10 carottes).

Les procès-verbaux des essais réalisés lors des trois premières campagnes ne sont pas disponibles, cependant, les principaux résultats sont résumés dans le rapport de diagnostic de 1994 [1].

Les résultats des essais réalisés sur les 10 sondages carottés de 1992, ainsi que les photos des carottes conservées figurent ci-dessous. Les forages recoupent l'ancienne couche d'étanchéité A (rabotée en 1995), la couche d'étanchéité B et la couche de Binder C. Les carottes ont fait l'objet de mesures de gamma densimétrie par le CETE d'Aix.

**Tableau 6 : Tableau de synthèse des essais réalisés en 1992**

STUCKY Ingénieurs-Conseils S.A. - CEBTP  
BARRAGE DE SAINTE CECILE D'ANDORGE - RENOVATION DU MASQUE AMONT - DIAGNOSTIC  
SYNTHESE DES CAROTTAGES REALISES EN 1992

CAROTTE N° 92	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09	.10	moyenne
POSITION	RD haut	CENTRE haut	RG haut	RG mi-hauteur carotte abimée lors de son extraction	CENTRE mi-hauteur	RG bas	CENTRE sous retenue	RD bas	RD bas	RD mi-hauteur	
COUCHE A	fissurée sur 1cm env	fissurée sur 1cm env	fissurée à 15° sur 5cm		fissurée sur 1cm env	fissurée sur 1cm env	fissure légère	fissurée sur 1cm env	fissurée sur 1cm env	fissurée sur 1cm env	
aspect face supérieure											
épaisseur (cm)	6,0	6,5	6,5	7,0	4,5	4,5	6,0	6,0	8,0	8,0	6,3
densité		2,34	2,20	?	2,34	2,35	2,34	2,35	2,35	2,30	2,32
compacité (%)		97,0	91,2	?	97,0	97,5	97,0	97,5	97,5	95,4	96,1
LIAISON A/B	bonne	bonne	décollée	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne	
COUCHE B											
épaisseur (cm)	7,5	5,5	8,0	7,5	4,5	5,0	4,5	7,0	4,0	8,0	6,2
densité		2,21	2,30	2,31	2,30	2,34	2,33	2,29	2,35	2,34	2,31
compacité (%)		91,7	95,4	95,8	95,4	97,0	96,6	95,0	97,5	97,0	95,7
COUCHE C											
épaisseur (cm)	12,5	15,0	11,5	14,5	12,0	12,5	12,5	8,0	12,0	11,0	12,2
densité		2,00	2,18	2,32	2,04	2,16	2,30	2,33	2,27	2,17	2,2
compacité (%)		82,6	90,0	95,8	84,2	89,2	95,0	96,2	93,8	89,6	90,7
longueur totale carottage (cm)	26,0	27,0	26,0	29,0	21,0	22,0	23,0	21,0	24,0	27,0	24,6

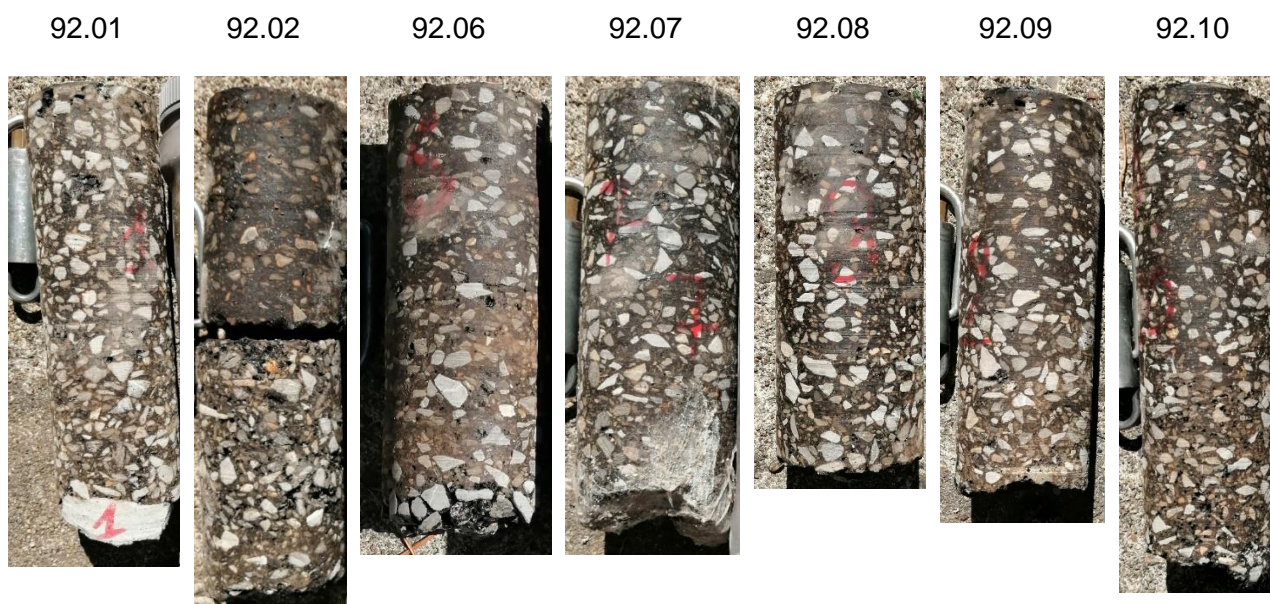


Figure 27 : Vues des carottes prélevées en 1992

### 5.2.3 ESSAIS REALISES LORS DES TRAVAUX DE REFECTION DU MASQUE DE 1995

Les essais de contrôle réalisés lors de la réfection du masque de 1995 ont compris :

- 17 sondages carottés réalisés sur le masque existant après rabotage de la première couche d'étanchéité, avec mesure de l'épaisseur et de la densité de chaque couche recoupée (couches B et C) ;
- 6 essais de contrôle du mélange, incluant :
  - ◆ granulométrie des granulats,
  - ◆ mesure du % de liant,
  - ◆ contrôles de température lors de la fabrication de l'enrobé, du réglage par la finisseuse et du compactage ;
- environ 50 carottes réalisées dans la nouvelle couche d'étanchéité ; chaque échantillon prélevé a fait l'objet :
  - ◆ d'une mesure de l'épaisseur de la couche mise en œuvre,
  - ◆ d'une mesure de compacité de la couche mise en œuvre.

Les résultats de ces essais sont disponibles dans le Dossier des Ouvrages Exécutés [3].

Des essais de perméabilité complémentaires sur carottes prélevées dans le couvre joint ont également été réalisés par le CEMETE.

Les carottes de 1995 ont été **conservées à l'abri et n'ont pas été soumises aux contraintes environnementales**. Une partie de ces carottes a été utilisée en 2020 pour réaliser des essais de granulométrie et de compacité.





Figure 28 : Echantillons prélevés lors des travaux de 1995, conservés

## 5.2.4 CAMPAGNE D'ESSAIS DE 2020

Les paragraphes suivants présentent les essais réalisés dans le cadre du présent diagnostic.

### 5.2.4.1 Sondages carottés

12 sondages carottés ont été réalisés au carottier de diamètre 101 mm, répartis sur :

- 3 niveaux dont un niveau situé sous la cote de la RN (242 NGF)
- 4 carottes par niveau dont :
  - ◆ 2 ou 3 carottes au droit de zones dépourvues de désordres apparents ;
  - ◆ 1 ou 2 carottes au droit d'un défaut identifié sur le masque (zone de fissure et de fluage).

Les sondages SC1, SC6 et SC8 ont été dédoublés afin que les sondages SC1-2, SC6-2 et SC8-2 soient entièrement dédiés aux analyses amiante.

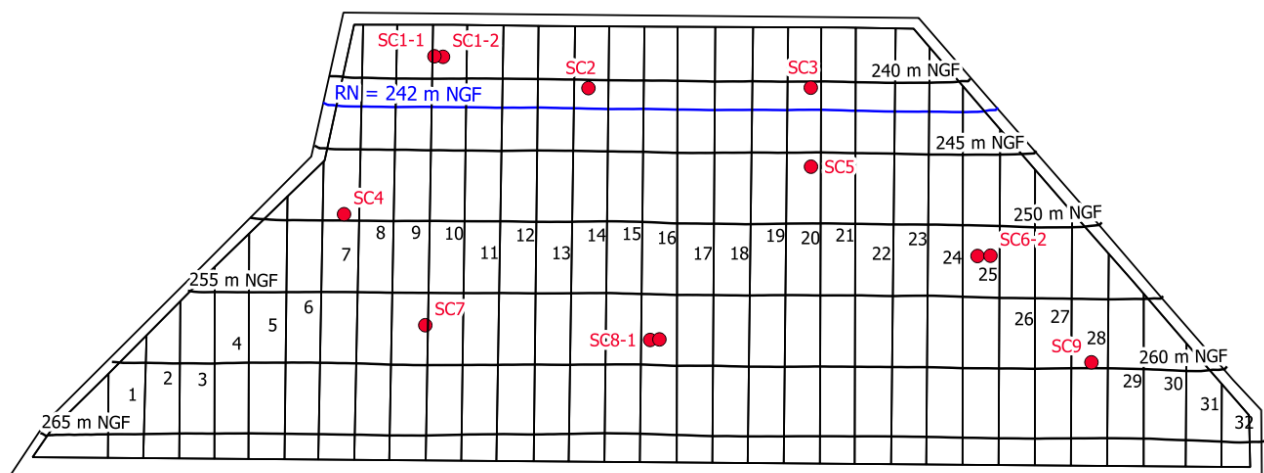






Figure 29 : Localisation des sondages réalisés en 2020





Le tableau ci-dessous illustre les sondages réalisés en 2020.







Id.	Localisation	Vue de la zone	Vue de la carotte
<p>SC1-1 SC1-2</p>	<p>Bande n°10 Z=238,5 NGF</p>	<p>Zone sans désordre visible</p> 	
<p>SC2</p>	<p>Bande n°14 Z=240,5 NGF</p>	<p>Fissure profonde (Défaut n°25 sur le plan de repérage. Profondeur estimée à 1.5cm lors du relevé)</p> 	

Id.	Localisation	Vue de la zone	Vue de la carotte
SC3	Bande n°20 Z=240,5 NGF	<p>Sondage au droit d'une cloque</p> 	
SC4	Bande n°7 Z=249,5 NGF	<p>Fluage et réseau de fissures</p> 	



Id.	Localisation	Vue de la zone	Vue de la carotte
SC5	Bande n°20 Z=246 NGF	<p>Fluage et réseau de fissures (Défaut n°19 sur notre plan de repérage. Profondeur estimée à 1cm et largeur estimée à 4mm lors du relevé)</p> 	
SC6-1 SC6-2	Bande n°25 Z=252 NGF	<p>Fluage</p> 	

Id.	Localisation	Vue de la zone	Vue de la carotte
SC7	Bande n°9 Z=257 NGF	<p>Fluage</p> 	
SC8-1 SC8-2	Bande n°16 Z=258 NGF	<p>Zone sans désordre visible</p> 	



Id.	Localisation	Vue de la zone	Vue de la carotte
SC9	Bande n°28 Z=259,5 NGF	<p>Zone sans désordre visible</p> 	

#### 5.2.4.2 Essais de laboratoire sur carottes prélevées en 2020

Le tableau ci-dessous présente les essais de laboratoire réalisés sur carottes prélevées en 2020.

SC1-2

SC2

Sondage carotté réalisé dans une zone à désordre

A

Nom de la couche ayant fait l'objet d'essais

Tableau 7 : Essais réalisés en 2020 sur échantillon prélevé en 2020

Essais	Normes	SC1-1	SC1-2	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6-1	SC6-2	SC7	SC8-1	SC8-2	SC9
	Bande	10	10	14	20	7	20	25	25	9	16	16	28
composition du matériau													
Analyse granulométrique	NF EN 12697-2		AB	A			AB		A		A	B	A
Composition chimique du bitume par chromatographie	NF EN 12697-2												A
Teneur en bitume	NF EN 12697-1		AB	A			AB		A		A	B	A
Compacité du matériau													
Masse volumique réelle <sup>4</sup>	NF EN 12697-5												
Masse volumique apparente	NF EN 12697-6	AB			A	AB		A		A	B		
Volumes des vides	NF EN 12697-8	AB			A	AB		A		A	B		
Dureté du matériau													
Pénétration à l'aiguille	NF EN 1426		AB	A							A		
Anneau-bille	NF EN 1427		AB	A							A		
Sensibilité à la fissuration													
Point de FRAASS	NF EN 12593		A	A							A		
Vieillessement du bitume													
Rolling Thin Film Oven Test	NF EN 12697-19			A							A		
Etanchéité de l'enrobé													
Perméabilité	NF EN 12697-19	AB			A	AB		A			B		
Recherche Amiante et HAP													
Diagnostic amiante			AB						AB			AB	
Diagnostic HAP			AB						AB			AB	

<sup>4</sup> Essais en attente



### 5.2.4.3 Essais de laboratoire sur carottes prélevées en 1995

Les carottes n°9, 11, 17, 19, 20, 28, prélevées dans le cadre des essais de contrôle des travaux de 1995, ont fait l'objet des essais suivants.

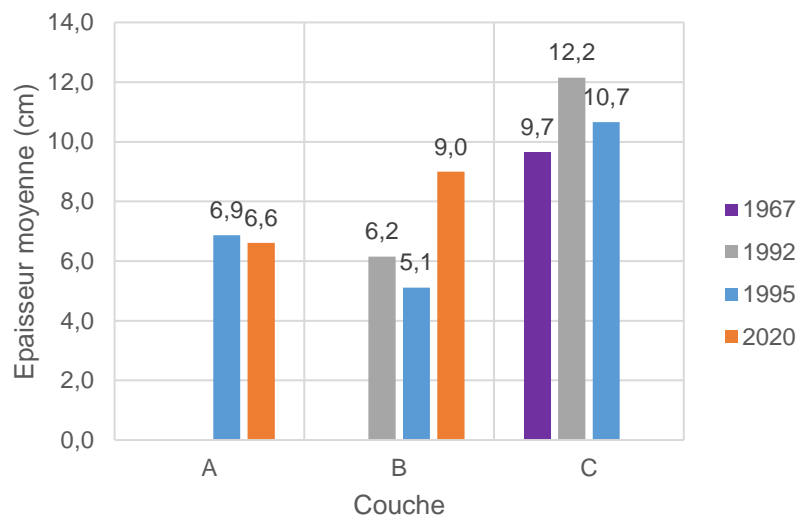
**Tableau 8 : Essais réalisés en 2020 sur échantillons prélevés en 1995**

Essais	Normes	9	11	17	19	20	28
	Bande	7	9	14	16	17	25
Composition du matériau							
Analyse granulométrique	NF EN 12697-2			A	A		
Teneur en bitume	NF EN 12697-1			A	A		
Compacité du matériau							
Masse volumique réelle <sup>5</sup>	NF EN 12697-5						
Masse volumique apparente	NF EN 12697-6	A	A			A	A
Volumes des vides	NF EN 12697-8	A	A			A	A
Sensibilité à la fissuration							
Point de FRAASS	NF EN 12593			A	A		

## 5.3 EPAISSEUR DES COUCHES

Le débit de fuite du masque est inversement proportionnel à l'épaisseur de la couche étanche. Cependant, la mise en œuvre d'une couche de trop forte épaisseur peut nuire à sa compacité. L'intervalle d'épaisseur recommandé par le CIGB est compris entre 6 et 8 cm pour une couche étanche.

Le graphique ci-dessous présente les épaisseur moyenne des couches d'étanchéité du masque (couche A, couche B) et de la couche support (couche C), en fonction de l'année des essais.

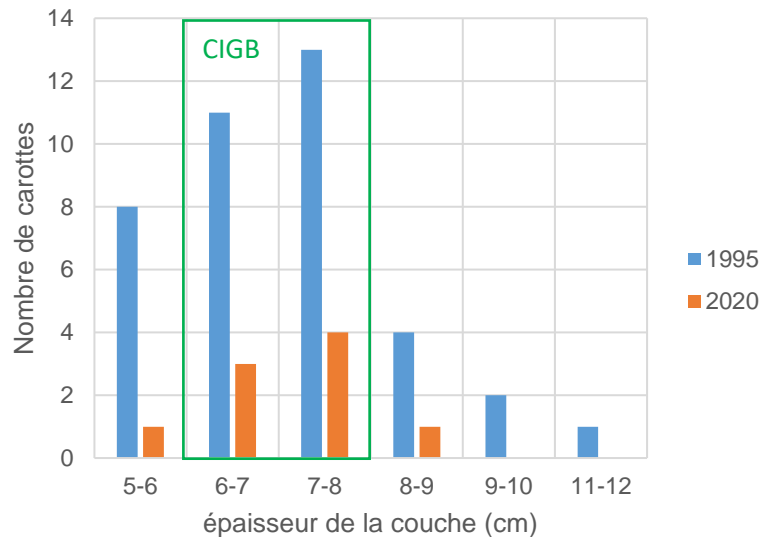


**Figure 30 : Epaisseur moyenne des couches**

<sup>5</sup> Essais en attente

### 5.3.1.1 Couche A

La distribution statistique des épaisseurs relevées sur les carottes réalisées lors de la mise en œuvre de A en 1995 et lors de la campagne de 2020 figure sur le graphique ci-dessous.



**Figure 31 : Mesures d'épaisseur de la couche A (sur carottes)**

Ce graphique appelle les commentaires suivants:

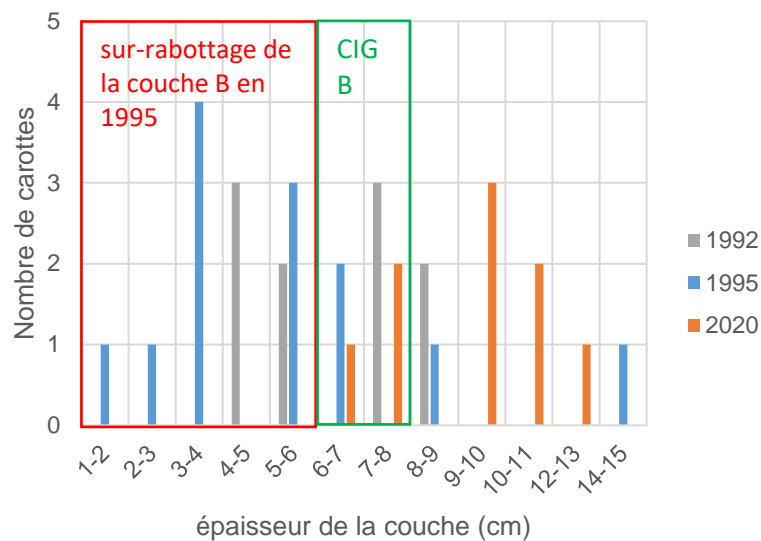
- environ 75 % de la surface présente une épaisseur comprise entre 6 et 8 cm, conforme aux recommandations du CIGB ;
- environ 15 % des sondages présentent une épaisseur inférieure à 6 cm. L'épaisseur minimale mesurée est de 5 cm, sur le sondage S8-1 de 2020 ;
- les sondages de contrôles réalisés en 1995 sur les zones mises en œuvre manuellement présentent une épaisseur anormalement élevée, avec pour conséquence une compacité mal maîtrisée (% de vides > 4 %).

Les zones mises en œuvre au finisseur et présentant une surépaisseur ne semblent pas montrer de problème de compacité.

Néanmoins, même avec des épaisseurs « correctes » comme sur les carottes 34 et 33 dans des zones mises en œuvre en manuel, les % de vide, après essais contradictoires, donnent des valeurs supérieures à 4 % alors que les contrôles du chantier indiquaient des valeurs proche de 3 %.

### 5.3.1.2 Couche B

L'épaisseur moyenne de la couche B relevée en 1995 suite au rabotage de la couche supérieure est d'environ 5 cm. Le graphique ci-dessous présente la distribution statistique des épaisseurs de B relevées suite au rabotage de la couche supérieure en 1995 et lors de la campagne de 2020.



**Figure 32 : Mesures d'épaisseur de la couche B**

70 % des mesures réalisées en 1995 montrent une épaisseur inférieure à 6 cm, probablement suite au sur-rabotage de la couche supérieure. Cette épaisseur est inférieure à l'épaisseur minimale recommandée pour une couche d'étanchéité. L'épaisseur minimale pourrait résulter de la mise en œuvre de 2 couches dans les années 60 compte tenu de la médiocre qualité des équipements et du doute de pouvoir réussir des joints suffisamment étanche sans cette double couche avec des joints décalés.

Par ailleurs, 15 % des mesures réalisées présentent des épaisseurs inférieures à 3 cm. De telles sous-épaisseurs diminuent l'étanchéité de la couche et peuvent conduire à en altérer la stabilité, si l'épaisseur locale de la couche est de l'ordre de grandeur du plus grand granulat qui s'y trouve.

Les épaisseurs relevées en 2020 sont globalement plus élevées, ce qui a plusieurs explications possibles :

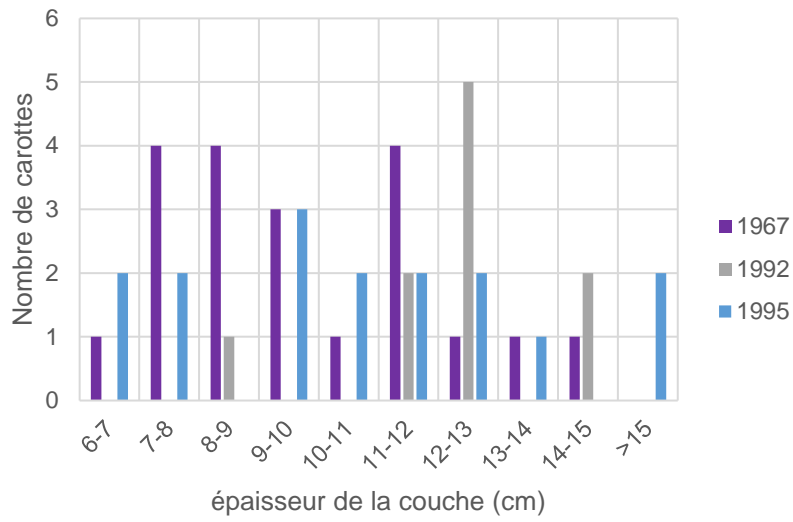
- les sondages de 2020 ne recoupent pas de zone sur-rabotées ;
- les épaisseurs de la couche d'étanchéité B mesurées en 2020 peuvent inclure une partie de la couche support C, la différenciation entre ces deux couches n'étant parfois pas nette sur les carottes de 2020.

### 5.3.1.3 Couche C

L'épaisseur de la couche C peut être appréciée à partir des carottages réalisés jusqu'en 1995.

Comme le montre la distribution statistique ci-dessous, par rapport à l'épaisseur théorique de 10 cm, les épaisseurs mesurées sont disparates. Cette variation n'est pas surprenante étant donné que cette couche a pour fonction de compléter le lissage de la planéité du support (en partie assuré par la couche de matériau 20/40 mm) avant mise en œuvre des couches d'étanchéité. La distribution (+/- 4 cm par rapport à l'épaisseur théorique) est d'ailleurs cohérente avec la granulométrie de la couche sous-jacente (2/4 cm).





**Figure 33 : Mesures d'épaisseur de la couche C**

## 5.4 CARACTERISTIQUES DES BITUMES

### 5.4.1 CLASSES DES BITUMES

#### 5.4.1.1 Couche A

D'après le DOE des travaux de 1995, le bitume de la couche supérieure (couche A) est un bitume modifié aux polymères, de classe B50/70<sup>6</sup>, coloré (bitume de la gamme « Mexphalte CP4 » de Shell d'après le DOE [1]). La nature et le dosage des polymères utilisés dans cette formulation n'est pas connue.

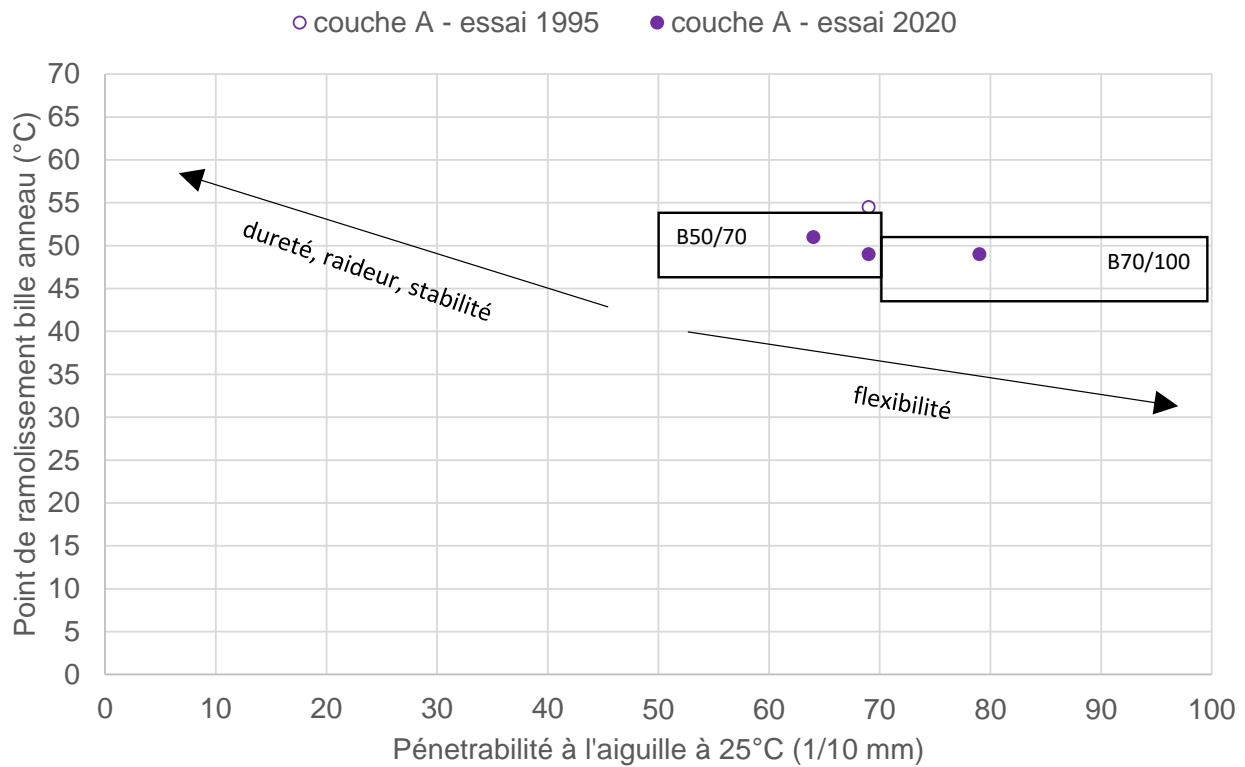
Les essais de pénétrabilité et de point de ramollissement réalisés en 2020 montrent que ce bitume présente toujours les caractéristiques de la classe B50/70 voire B70/100. Ces classes de bitume sont couramment utilisées pour réaliser des masques en béton bitumineux, car elles présentent un bon compromis entre résistance au fluage et élasticité.

Le graphique ci-dessous présente les résultats des essais de pénétrabilité à l'aiguille et des mesures des points de ramollissement bille-anneau réalisés sur le bitume extrait en 1995 (1 essai) et 2020 (3 essais). Les rectangles correspondent aux classes de bitumes au sens de la norme NF EN 12591.

---

<sup>6</sup> La classe de bitume fait directement référence à la pénétrabilité à l'aiguille, ainsi il est attendu une pénétrabilité comprise entre 50 et 70 dixièmes de mm pour un bitume B50/70.

Les résultats des essais de 2020 sont cohérents avec celui de 1995 et on peut en déduire que les propriétés rhéologiques (élasticité, viscosité) du liant de la couche A ne semblent pas avoir évolué depuis 25 ans. Cette bonne conservation des caractéristiques rhéologiques du bitume est probablement due à l'utilisation d'un bitume modifié par polymères (dans un bitume standard, l'évaporation des maltènes du bitume devrait conduire à en augmenter la dureté).



**Figure 34 : Evolution de l'élasticité du bitume de la couche A**



### 5.4.1.2 Couche B

Le bitume de la couche d'étanchéité inférieure (couche B) était initialement un bitume pur de distillation directe de classe B60/70

Dès 1972, les analyses de vieillissement du bitume ont mis une évidence que les caractéristiques mécaniques de ce bitume l'apparentaient à un B40/50. Le rapport d'analyse estime d'ailleurs que ce vieillissement du bitume se serait produit dès l'enrobage.

En effet, lors de la fabrication de l'enrobé, le bitume pur est porté à une température au-delà de 180°C et il subit en général une première altération (probable car la maîtrise de cette température n'était probablement pas parfaite sur les installations de l'époque). Ce phénomène a été mis en évidence sur les barrages de Trapan et Sainte Cécile d'Andorge.

Le bitume de la couche superficielle peut aussi être plus affecté mais en général sur une faible profondeur (quelques mm) et présenter des caractéristiques plus raides B20/30 du fait de l'action de l'air et des UV. C'est pour cette raison qu'on protège généralement les enrobés avec du bitume pur par un mastic bitumineux qui joue un rôle de fusible pour éviter l'altération supplémentaire du béton bitumineux.

Les essais réalisés en 2020 sur un échantillon de la couche B montrent que le durcissement du bitume de la couche B s'est poursuivi, ce dernier s'apparentant désormais à la classe B20/30, avec une température de ramollissement légèrement supérieure. Ce bitume plus raide aura tendance à être cassant en cas de déformation et de sollicitation sous faibles températures. En revanche, il est peu susceptible de fluer (d'autant que le fluage n'intervient généralement que pendant quelques jours à partir de la mise en œuvre sous de très fortes températures).

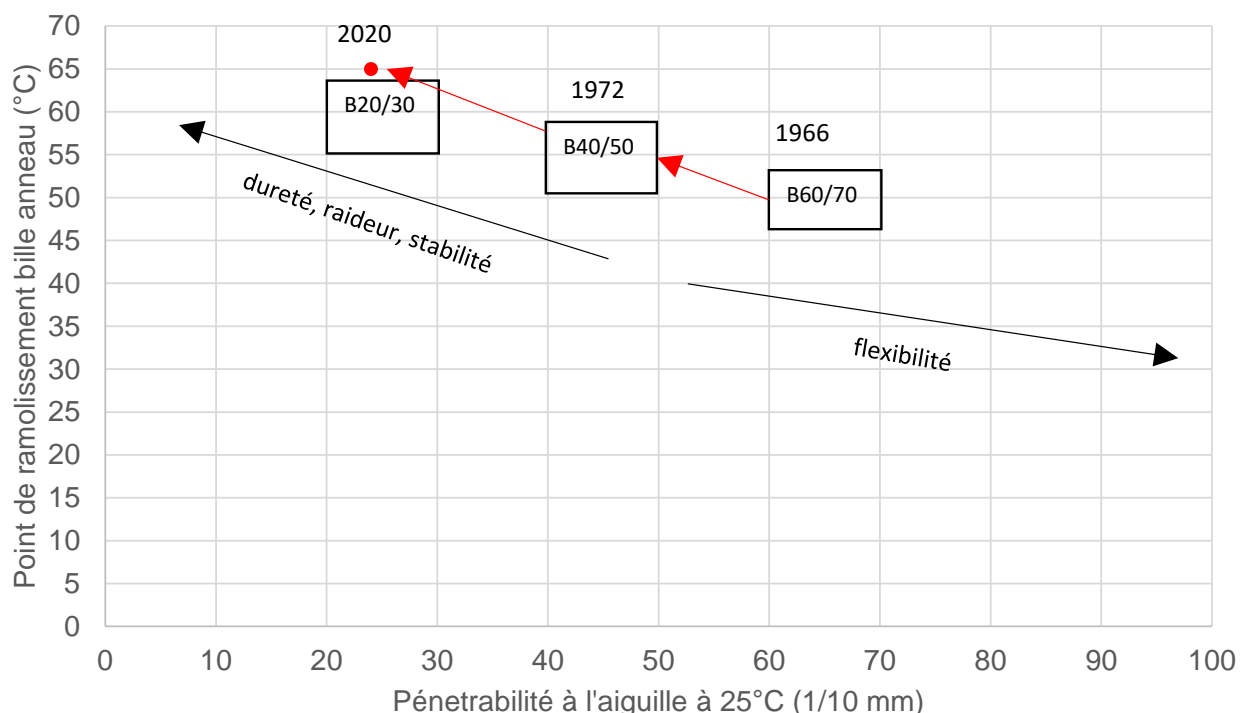


Figure 35 : Evolution de l'élasticité du bitume de la couche B

#### 5.4.1.3 Couche C

La couche C est enrobée de bitume pur de distillation directe B60/70 initial. Les essais de pénétrabilité réalisés en 2020 n'incluent pas la couche C, toutefois il est probable que le bitume de cette couche ait subi un durcissement, étant de même composition que celui de la couche B.

#### 5.4.2 TENEUR EN BITUME

Une teneur en bitume de 6 à 8 % est recommandée par le CIGB dans le béton bitumineux de la couche imperméable. Le bitume doit être en quantité suffisante pour enrober toutes les particules du filler et du granulats (rapport poids bitume/poids filler de l'ordre de 1/2). A l'inverse, un taux de bitume trop élevé diminue la stabilité du mélange et augmente le risque de fluage de la couche.

Le tableau ci-dessous présente le taux de bitume relevé dans les couches étanches, au cours du temps.

**Tableau 9 : Teneur en bitume des différentes couches d'étanchéité**

	Couche A	Couche B
<b>1966 (construction du barrage)</b>		Dosage cible : 8 % <sup>7</sup>
<b>1978</b>	Couche A actuelle pas en place à ces dates	<u>3 essais</u> : 8,2 % ; 7,2 % ; 7,3 % <sup>8</sup>
<b>1986</b>		<u>2 essais</u> : 7,2 % ; 7,1 %
<b>Prélèvement 1995 Essai 1995</b>	<u>6 essais</u> : Moyenne = 8,0 % Ecart-type = 0,05 %	Pas de données
<b>% de liant 2020 _ à l'abri Prélèvement 1995 Essai 2020</b>	<u>2 essais</u> : 7,3 % ; 7,4 %	Pas de données
<b>% de liant 2020- en place Prélèvement 2020 Essai 2020</b>	<u>6 essais</u> : Moyenne zones à désordre = 7,3 % Moyenne zones sans désordre = 7,5 % Moyenne total = 7,4 % Ecart-type total = 0,4 %	<u>3 essais</u> : 7,5 % ; 7,5 % ; 7,5 %

#### 5.4.2.1 Couche A

Lors de la mise en œuvre de la couche supérieure (couche A) en 1995, le taux de bitume était estimé proche de 8 %, à l'extrémité haute de la fourchette courante selon le CIGB (6 à 8%, cette valeur dépendant de la nature des granulats et filler utilisés). Les essais confirment ce point avec une variabilité plus forte que celle affichée antérieurement (moyenne de 7,4 % mesurée en 2020).

Les zones à désordres présentent en moyenne des taux de bitume plus faibles (et donc une imperméabilité moindre) que les zones sans désordres.

<sup>7</sup> Le dosage cible de 8 % concernait les deux couches (ancienne couche A et B) et aurait été respecté avec une tolérance de + ou - 0.15 % cf. C7 ICOLD 1967. Les différents essais réalisés ultérieurement montrent que l'écart devait être plus important que celui affiché à la construction

<sup>8</sup> Deux méthodes d'extraction différentes ont été utilisées, ce qui pourrait expliquer les différences de résultats



C'est le cas de l'échantillon SC5 prélevé dans une zone de désordre sur la couche A en 2020 qui présente :

- le taux de liant le plus faible (6,8 %) est SC5,
- l'état de dégradation le plus avancé (porosité visiblement élevée, fissure traversante).

Une fois que des fissures apparaissent le phénomène s'accélère par entrainement de limons dans ces fissures avec un effet pouvant être expansif en été et suivant les cycles de séchage/humification, incrustation de végétation et aussi en cas de gel prononcé.

Le taux de liant moyen des échantillons de 1995 conservés à l'abri est identique au taux de liant des échantillons prélevés sur le barrage.

#### 5.4.2.2 Couche B

Le taux de bitume relevé dans la couche B est légèrement inférieur au dosage initial visé de 8 %. Les mesures de 2020 présentent un taux moyen d'environ 7,5 % avec une très faible dispersion des valeurs.

#### 5.4.2.3 Couche C

Le dosage initial en liant de la couche support visé était de 7,8 %. Cette couche support n'a pas fait l'objet d'essai dans la cadre la présente étude.

### 5.4.3 ESSAIS FRAAS / ESSAIS RTFOT

Dans le cadre de la campagne de 2020, les essais suivants ont été réalisés sur la couche A :

- 2 essais de vieillissement RTFOT sur échantillons prélevés en 2020
- 7 mesures de point de fragilité FRASS dont :
  - 2 mesures sur échantillon prélevé en 1995 et conservé à l'abri (les échantillons appartiennent aux mêmes bandes de masque que deux échantillons de 2020 analysés, pour comparaison).
  - 3 mesures sur échantillon prélevé en 2020, avant vieillissement par RTFOT
  - 2 mesures sur échantillon prélevés en 2020, après vieillissement par RTFOF

Les résultats sont détaillés dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 10 : Synthèse des essais FRAAS et RTFOT**

Légende :			Pénétrabilité à l'aiguille	Température de ramollissement	Point de fragilité Fraass	Essais de RTFOT (NBN EN 12607-1)	
Nom du sondage	Couche	Description				Variation de masse (%)	Point de fragilité Fraass après RTFOT (°C)
			NF EN 1426	NF EN 1427	NF EN 12593	NF EN 12607-1	NF EN 12593
SC1-2	Couche A	EB 0/8 Beige	64	51	-21		
Comparaison échantillon de 1995 (17) et de 2020 (SC2)	17	Couche A			-20		
	SC2	Couche A	79	49	-23	-0,63	-14
Comparaison échantillon de 1995 (19) et de 2020 (SC8-1)	19	Couche A			-16		
	SC8-1	Couche A	69	49	-21	-0,46	-20

Pour l'ensemble des essais réalisés, la température de fragilité est comprise entre -16 °C et -23 °C, ce qui est conforme à la norme EN 12593, pour un bitume B50/70 (< -8 °C).

Etonnamment, les points de fragilité les plus élevés sont mesurés sur les échantillons conservés à l'abri. Les variations de point de fragilité d'un échantillon à l'autre sont toutefois peu significatives.

Les variations de masse après RTFOT sont de -0,63 % pour le SC2 et -0,46 % pour le SC8-1, ce qui est dans la fourchette haute voire légèrement supérieur à la limite fixée par la norme EN 12607-1 (-0,5 % maximum).

Après vieillissement par RTFOT des deux échantillons, l'augmentation du point de fragilité est de :

- +9 °C pour le SC2 ;
- +1 °C pour le SC8-1

Ces valeurs reflètent une tenue au vieillissement dans la plage d'acceptabilité définie dans les normes.

Le bitume de l'échantillon SC2, ayant subi la variation de masse la plus importante, présente l'augmentation la plus nette du point de fragilité (+9 °C). Cette plus grande sensibilité au vieillissement de l'échantillon SC2 peut être liée à la localisation de ce sondage dans la zone de marnage (à l'inverse, SC8-1 est situé au dessus de la RN). Il est toutefois difficile d'isoler la cause précise de cette sensibilité plus forte au vieillissement, le nombre d'essais étant réduit.

Ces essais confirment la bonne tenue dans le temps du bitume de la couche supérieure.

## 5.5 CARACTERISTIQUES DES GRANULATS

### 5.5.1 GRANULOMETRIES

Le bulletin 114 du CIGB fourni des exemples de fuseaux de granulométries utilisés (fuseaux préconisés par l'ITCOLD dans la pratique Italienne), en fonction du rôle de la couche de béton bitumineux constitutive du masque (Figure 36).

- le fuseau 1 est utilisé si la couche a une fonction d'étanchéité ; cette granulométrie continue apporte densité et stabilité au mélange, indispensable à l'étanchéité de la couche et à sa durabilité dans le temps.
- le fuseau 2 est utilisé si la couche a une fonction de drainage. Cette granulométrie uniforme contient peu de fines, assurant la présence de vides importants entre les granulats.

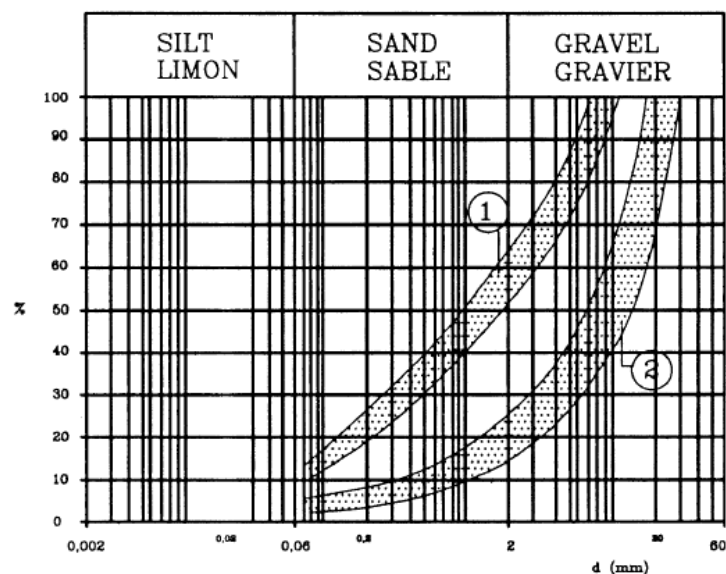


Figure 36 : Fuseaux granulométriques de l'ITCOLD présentés dans le bulletin 114 du CIGB pour les couches étanches (1) et drainantes (2)

En France, le fuseau dit « hollandais » était préconisé dans toute la période de mise en œuvre des bétons bitumineux du masque de Sainte-Cécile d'Andorge, en 1967 comme en 1995 :

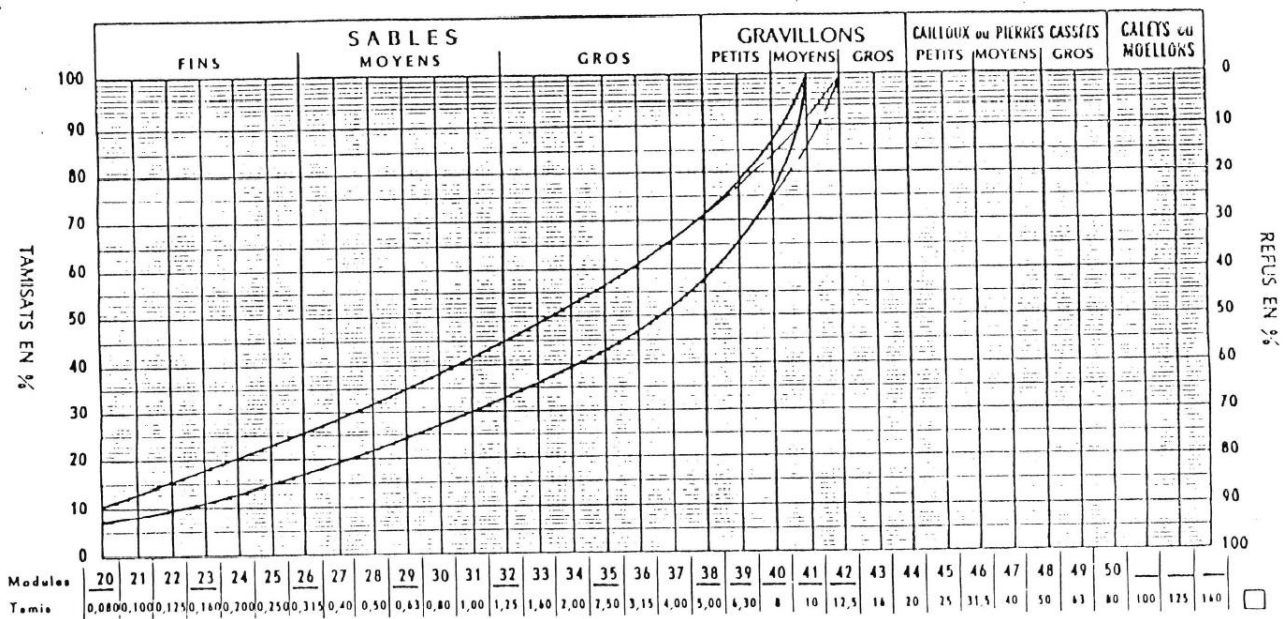


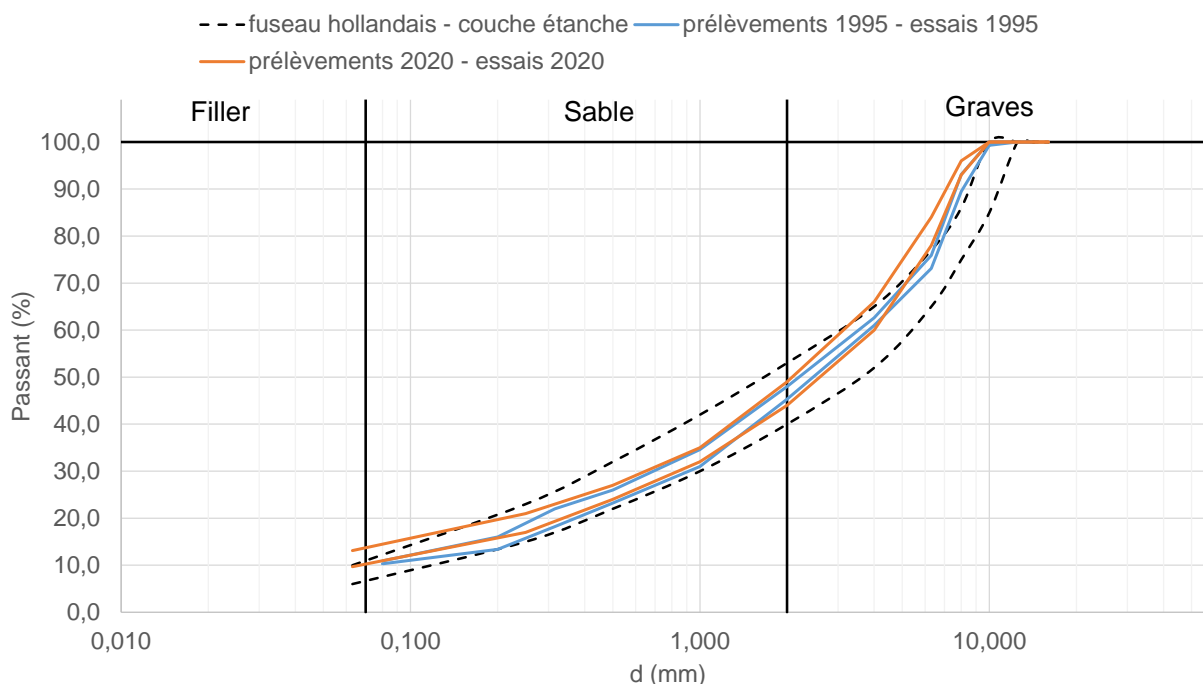
Figure 37 : Fuseau « hollandais » préconisé pour la couche étanche

Les couches A et B du masque du barrage de Sainte Cécile ayant une fonction d'étanchéité, leurs granulométries sont comparées au fuseau « hollandais ».

#### 5.5.1.1 Couche A

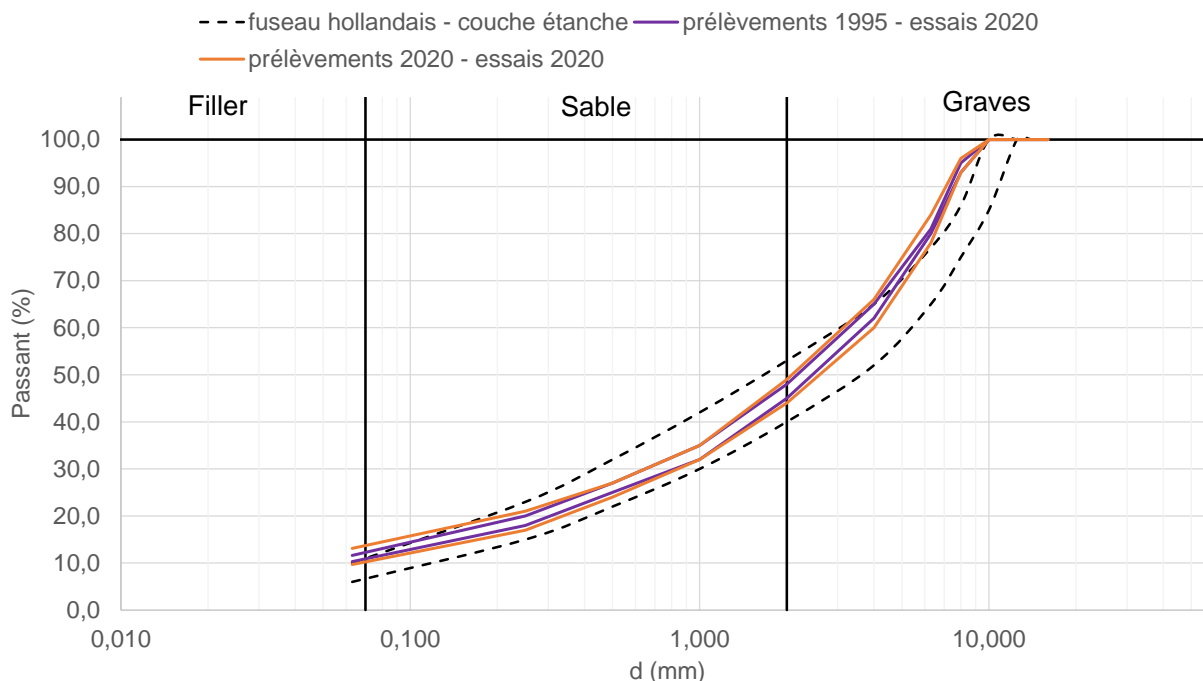
Le graphique ci-dessous présente les granulométries réalisées sur carottes prélevées en 2020 dans la couche supérieure du masque (A), en orange. Les granulométries réalisées lors de la réalisation de la couche en 1995 apparaissent également, en bleu. Elles sont comparées au fuseau « hollandais » pour enrobé étanche.





**Figure 38 : Granulométrie 2020 et granulométrie 1995 de la couche A**

Le graphique ci-dessous présente les fuseaux des granulométries réalisées sur carottes prélevées en 2020 dans la couche supérieure du masque (A), comparées aux granulométries réalisées en 2020 sur échantillons prélevés en 1995.



**Figure 39 : Granulométrie 2020 -prélèvement 2020 et 1995 de la couche A**

Aucune différence de granulométrie n'est notée entre les échantillons conservés à l'abri et les échantillons prélevés sur le masque en 2020.

La granulométrie de la couche supérieure est conforme au fuseau de référence « hollandais ».

### 5.5.1.2 Couche B

Le graphique ci-dessous présente les granulométries relevées dans la couche inférieure du masque (B). La granulométrie est globalement conforme au fuseau de référence « hollandais », mais présente quelques écarts avec le fuseau de référence des travaux de 1966 (granulométrie cible publiée dans la revue TRAVAUX de septembre 1967).

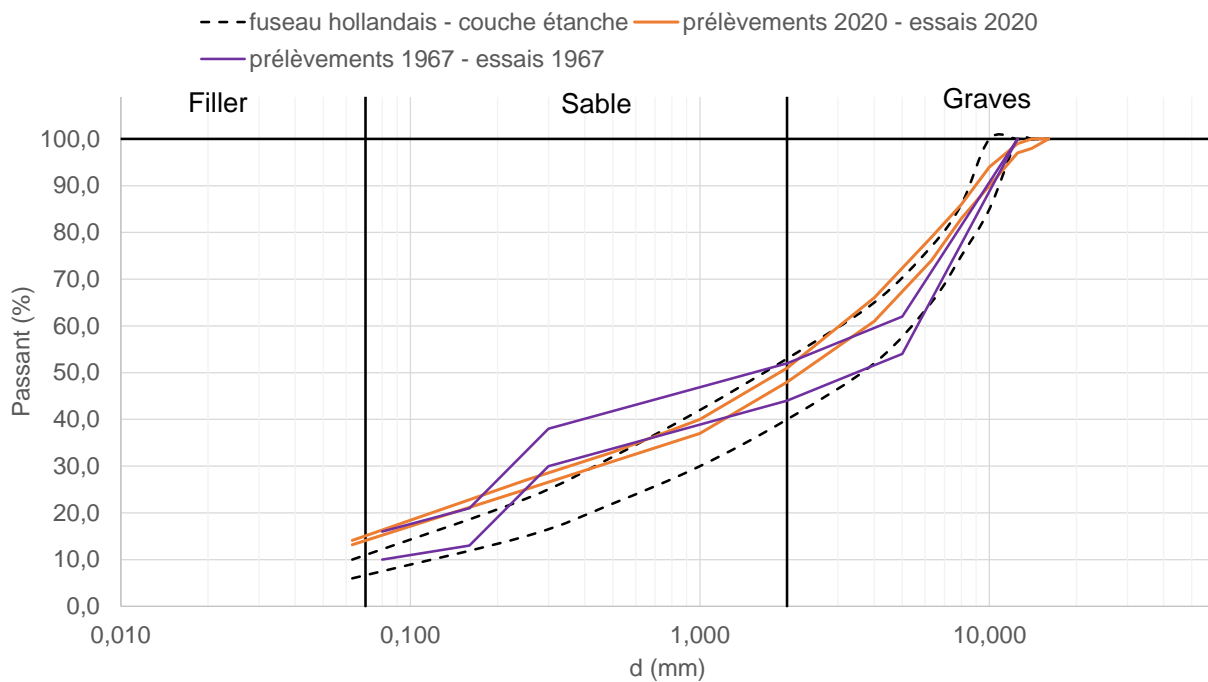
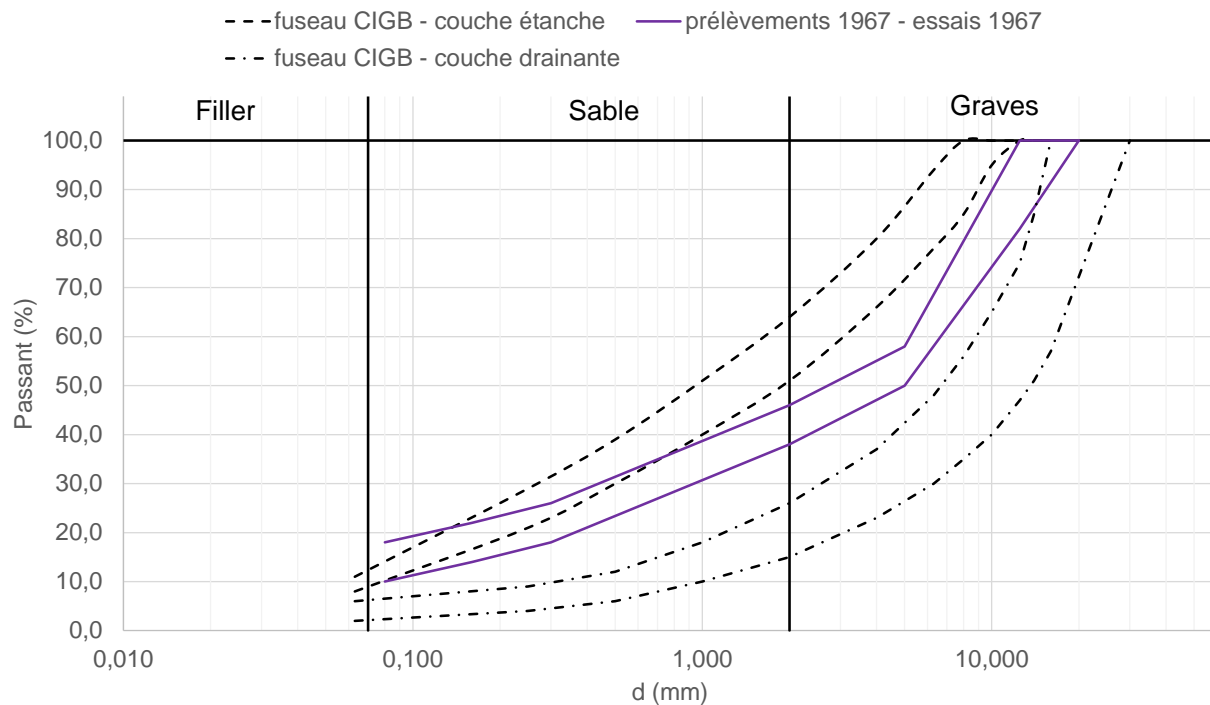


Figure 40 : Granulométries de la couche B

### 5.5.1.3 Couche C

Le fuseau de la couche C est à mi-chemin entre le fuseau de référence d'une couche étanche et celui d'une couche drainante, ce qui est cohérent avec la fonction de la couche (la couche support devant être plus dense qu'une couche drainante mais suffisamment poreuse pour évacuer les vapeurs lors de la mise en œuvre de la couche étanche sus-jacente et éviter ainsi la formation de cloques).



**Figure 41 : Fuseau granulométrique de la couche C (source : revue TRAVAUX, septembre 1967)**

### 5.5.2 QUALITE DES GRANULATS

Les granulats de la couche A sont calcaires, de forme généralement régulière.

L'examen des carottes prélevées en 2020 appelle toutefois les remarques suivantes :

- la carotte SC5 réalisée sur une zone de fluage présente un granulats anormalement grand, de plus grande longueur 4 cm ; le fait que ce désordre soit apparu malgré le faible échantillonnage de la couche (10 carottes = 0,001 % de la couche) indique qu'il est probable que ce désordre soit relativement bien représenté dans la couche ; malgré les contrôles, la qualité de la réalisation des travaux de 1995 n'a donc pas été irréprochable avec comme conséquence des désordres qui n'auraient pas dû arriver ;
- de nombreux granulats de la couche A sont endommagés (fissuration, éclats), souvent à proximité de l'interface avec la couche B ; il est difficile de déterminer la date et la cause de leur détérioration mais l'hypothèse la plus probable est un endommagement de granulats de qualité insuffisante lors du compactage initial (l'interface étant la zone subissant alors les plus fortes contraintes).



Figure 42 : Défaits observés sur SC5

Les granulats des couches B et C sont également calcaires. Contrairement à ceux de la couche A, peu de granulats sont endommagés.

## 5.6 COMPACTE DES COUCHES ET PERMEABILITE

Le graphique ci-dessous présente les pourcentages moyens de vides des couches du masque, en fonction de l'année des essais.

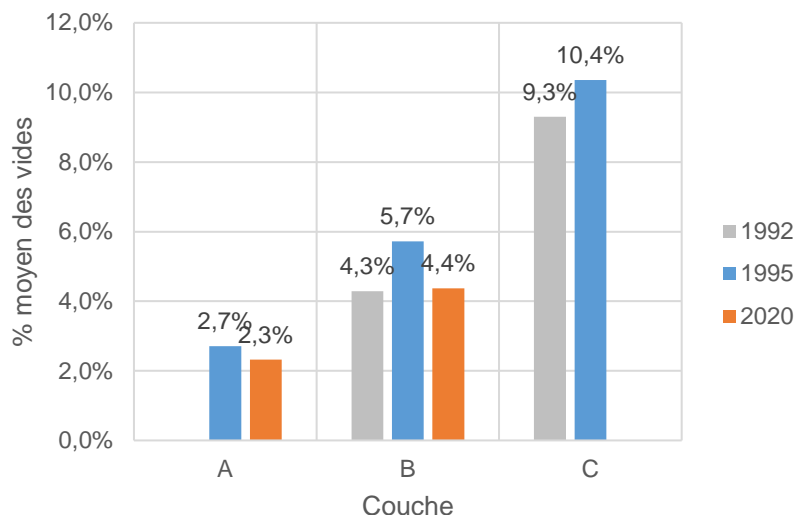


Figure 43 : Porosité moyenne des couches

Ce graphique appelle les commentaires suivants :



- toutes les campagnes conduisent à des valeurs cohérentes ;
- la compacité des couches du masque est bien étagée, la couche la plus compacte (et donc imperméable) étant la couche amont et la couche la plus poreuse étant la couche aval du masque.

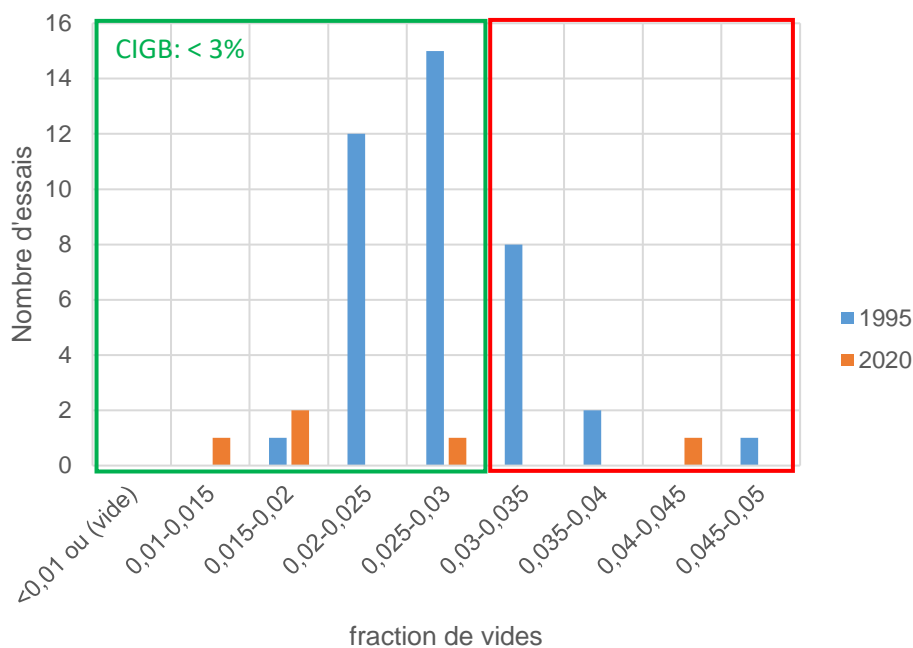
Les paragraphes ci-dessous détaillent les résultats des essais de compacité et de perméabilité pour chaque couche.

### 5.6.1 COUCHE D'ÉTANCHEITE SUPERIEURE (COUCHE A)

Le % de vides maximal recommandé par le CIGB pour une couche imperméable est de 3 %. Une telle compacité permet en effet de garantir l'étanchéité de la couche et une bonne durabilité dans le temps.

Le graphique ci-dessous présente les estimations des % des vides des échantillons de la couche A :

- prélevés en 1995 et testés en 1995 (en bleu) ;
- prélevés en 2020 et testés en 2020<sup>9</sup> (en orange).



**Figure 44 : % de vides de la couche A**

D'après les essais réalisés, près de 30 % de la couche dispose d'un pourcentage de vide supérieur à 3 %. Cela est en partie dû au fait que la quasi-totalité des carottes réalisées en 1995 dans les zones mises en œuvre manuellement présente un pourcentage de vide supérieur ou égal à 3%.

<sup>9</sup> D'après le DOE des travaux de réalisation de la couche étanche en 1995, la masse volumique réelle (MVRE) du mélange bitumineux de la couche A est de 2,38 t/m<sup>3</sup>. Le % de vides est calculé à partir de cette MVRE et de la masse volumique apparente des échantillons (MVA).

Par ailleurs, ces volumes de vides pourraient être sous-évalués par le laboratoire de chantier, les essais contradictoires réalisés par le CEMETE et le labo MALET ayant systématiquement obtenu des compacités inférieures sur les échantillons testés (Tableau 5).

Enfin, tous les essais de compacité réalisés lors des travaux de 1995 sur le couvre-joint périmétral présentent un fort pourcentage de vides compris entre 6 et 10 %, probablement à cause du réglage manuel du béton bitumineux dans cette zone et des difficultés de compactage en pied de parement.

La valeur maximale admissible recommandée par le CIGB pour la perméabilité de la couche étanche est de  $10^{-7}$  cm/s soit  $10^{-9}$  m/s. Comme le montre la figure ci-dessous, l'ensemble des essais réalisés en 2020 sur la couche A présentent des perméabilités plus faibles. En revanche, les couvre joints n'assurent pas de barrière d'étanchéité supplémentaire au raccordement du masque avec la galerie, leur perméabilité étant 3 à 5 ordres de grandeur plus forte que celle du masque.

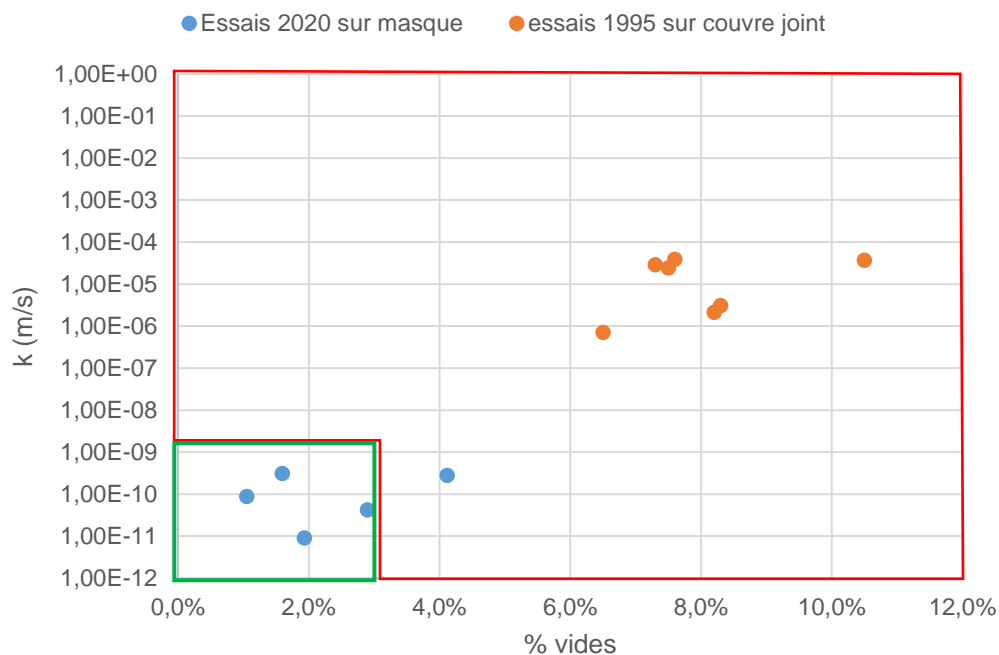


Figure 45 : % de vides et perméabilité de la couche A

Le tableau ci-dessous compare les % de vides mesurées sur les mêmes échantillons, en 1995 et en 2020.

**Tableau 11 : Comparaison des compacité mesurées sur échantillons identiques en 1995 et 2020**

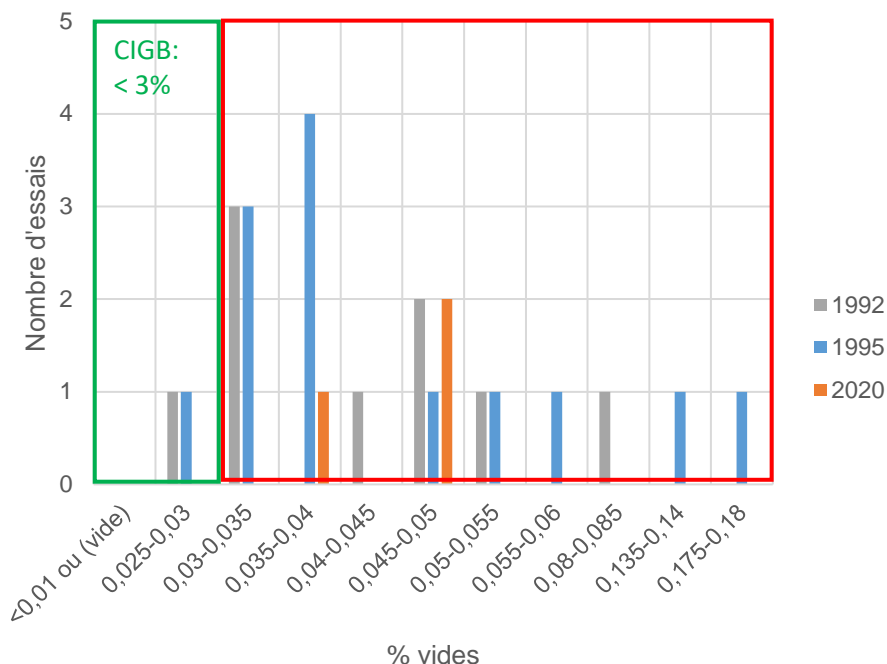
N° échantillon prélevé en 1995	% vides 1995	% vides 2020
9	2,4 % - valeur remise en cause par un essai contradictoire ayant conduit à 4,4 %	Echantillon cassé en deux Moitié 1 : 2,1 % Moitié 2 : 8,2 % Moyenne : 5,2 %
11	2,8 %	1,7 %
20	2,1 %	0,5 %
28	3,1 %	2,7 %

A l'exception de 20 (qui paraît anormalement bas) et en considérant l'essai contradictoire réalisé pour 9, les estimations de 1995 sont cohérentes avec les valeurs estimées en 2020.

#### 5.6.2 COUCHE D'ÉTANCHEITE INFÉRIEURE (COUCHE B)

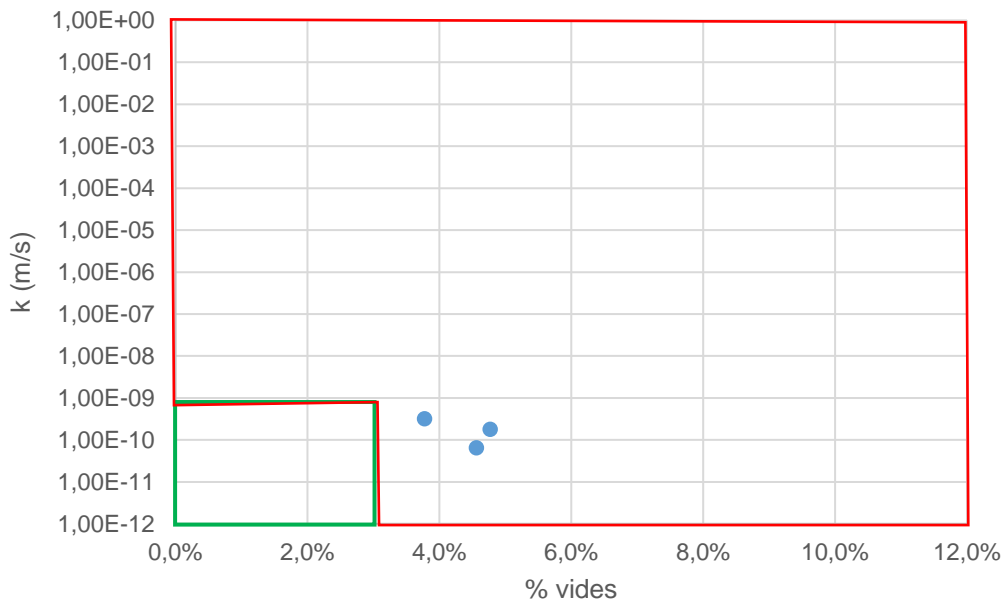
Le graphique ci-dessous présente les estimations des % des vides des échantillons prélevés en 1995 et 2020<sup>10</sup>, pour la couche B. Les valeurs extrêmes relevées sur la couche existante en 1995 (de 13,5 % à 18 % de vides) paraissent erronées pour une couche de perméabilité et il se peut que la couche support C ait été incluse dans l'essai.

<sup>10</sup> D'après le DOE des travaux de réalisation de la couche étanche en 1995, la masse volumique réelle (MVRE) du mélange bitumineux de la couche B est de 2,41 t/m<sup>3</sup>. Le % de vides est calculé à partir de cette MVRE et de la masse volumique apparente des échantillons (MVA).



**Figure 46 : Pourcentage de vides de la couche B**

Plus de 93 % des échantillons présentent un pourcentage de vides supérieur aux 3 % recommandés par la CIGB. En revanche, les essais de perméabilité réalisés en 2020 (cf. figure suivante) présentent des perméabilités acceptables pour une couche étanche (de l'ordre de  $10^{-9}$  à  $10^{-10}$  m/s).

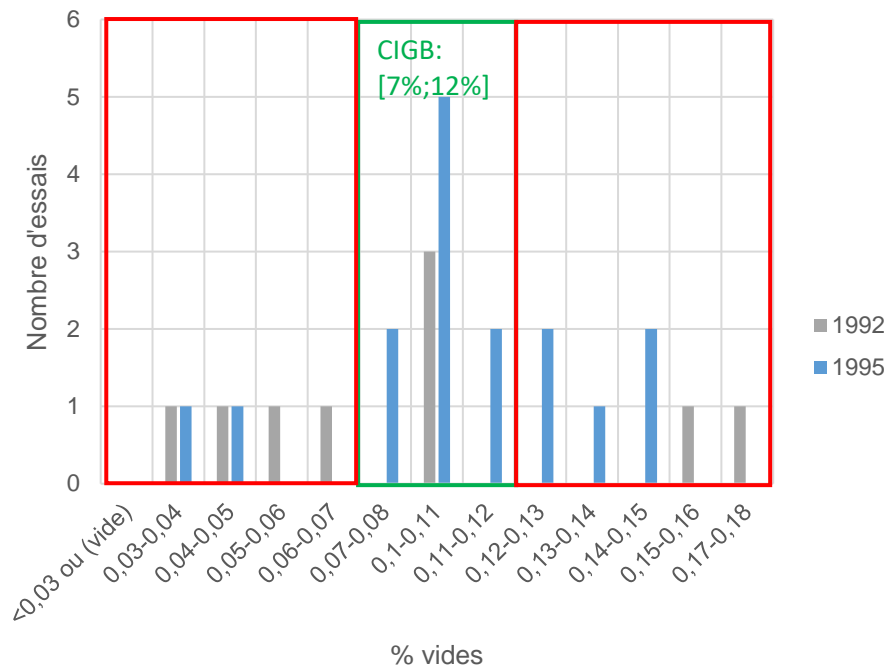


**Figure 47 : % de vides et perméabilité de la couche B**

### 5.6.3 COUCHE SUPPORT (COUCHE C)

Le pourcentage de vides recommandé par le CIGB pour la couche support est compris entre 7 % et 12 % : cette couche doit présenter suffisamment de vides pour prévenir la formation de boursouflures entre elle et la couche étanche.

Le graphique ci-dessous présente les estimations des % des vides des échantillons prélevés en 1995 pour la couche support C<sup>11</sup>. Aucun essai n'a été réalisé en 2020 sur cette couche.



**Figure 48 : Pourcentage de vides de la couche C**

La porosité de la couche respecte globalement l'intervalle recommandé par le CIGB. Une faible proportion des essais indique une porosité relativement faible (< 7 %), ce qui explique peut-être la formation de quelques cloques entre la couche B et la couche C, signalées dans le DOE des travaux de 1995 (notamment en rive droite, au droit de la tour).

## 5.7 ANALYSES D'AMIANTE ET HAP

Les analyses réalisées en 2020 n'ont pas détecté de traces d'amiantes dans la couche A ni dans la couche B.

Le taux maximal de HAP détecté dans ces couches est de 0,75 mg/kg, ce qui est inférieur au seuil de 50 mg/kg fixé par l'arrêté du 12 décembre 2014 pour être considéré comme « déchet inerte ».

<sup>11</sup> D'après le DOE des travaux de réalisation de la couche étanche en 1995, la masse volumique réelle (MVRE) du mélange bitumineux de la couche support est de 2,42 t/m<sup>3</sup>. Le % de vides est calculé à partir de cette MVRE et de la masse volumique apparente des échantillons (MVA).

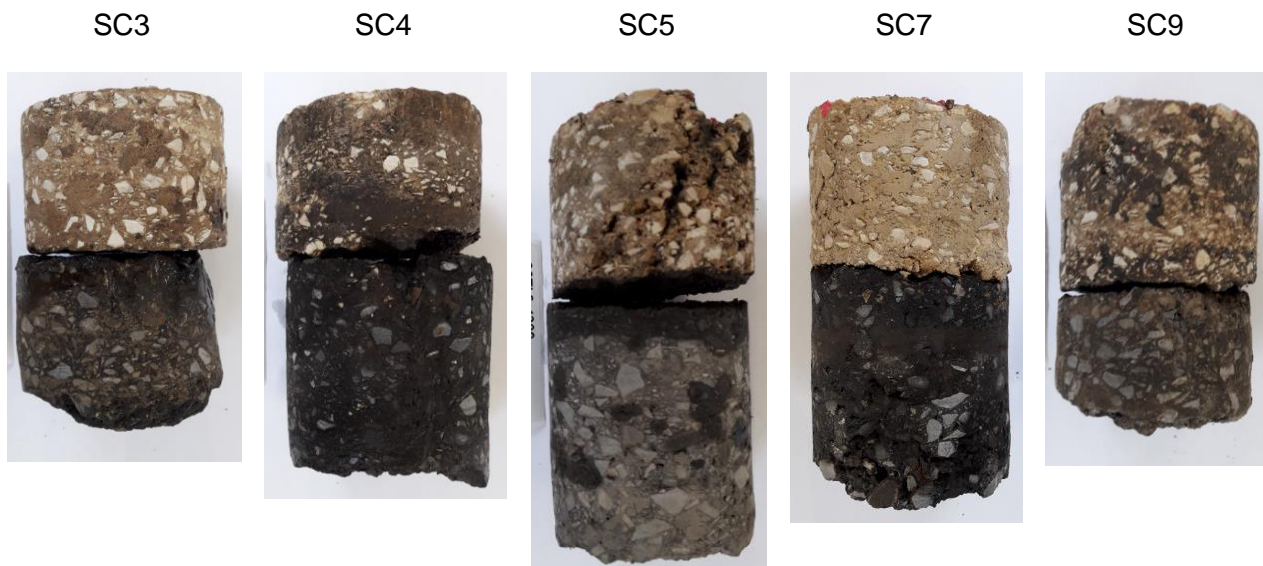


## 5.8 ADHÉRENCE DES COUCHES

Comme le montre le tableau ci-dessous, la majorité des carottes prélevées au droit de zones présentant des défauts visibles (cloques ou fluage et fissuration) présentent également un défaut d'adhérence entre la couche mise en œuvre en 1995 et la couche B (datant de la construction).

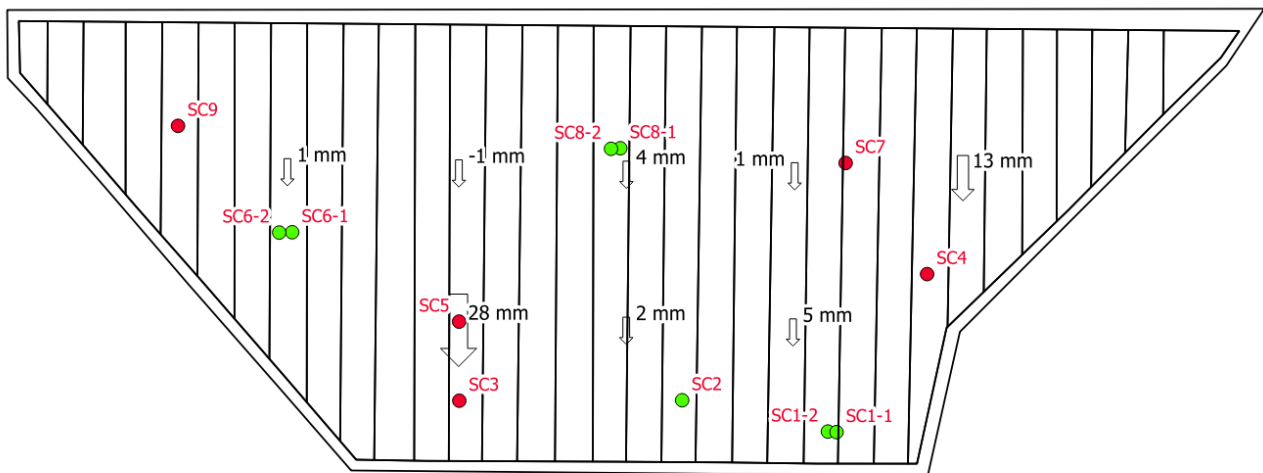
**Tableau 12 : Adhérence couche A/ couche B**

Sondage	Localisation	Désordres	adhérence
SC1	Bande n°10 ; Z=238,5 NGF	Zone sans désordre visible	Oui
SC2	Bande n°14 ; Z=240,5 NGF	Fissure profonde	Oui
SC3	Bande n°20 ; Z=240,5 NGF	Sondage au droit d'une cloque	Non
SC4	Bande n°7 ; Z=249,5 NGF	Fluage et réseau de fissures	Non
SC5	Bande n°20 ; Z=246 NGF	Fluage et réseau de fissures	Non
SC6	Bande n°25 ; Z=252 NGF	Fluage (absence de fissures)	Oui
SC7	Bande n°9 ; Z=257 NGF	Fluage et réseau de fissures	Non
SC8	Bande n°16 ; Z=258 NGF	Zone sans désordre visible	Oui
SC9	Bande n°28 ; Z=259,5 NGF	Zone sans désordre visible	Non



**Figure 49 : Carottes présentant un décollement des couches A et B**

La figure ci-dessous présente les carottes avec un défaut d'adhérence des couches (en rouge) et sans défaut d'adhérence (en vert), ainsi que le déplacement en plan des cocardes cumulé depuis 1996 (source : [5]).



**Figure 50 : Fluage et adhérence des couches A et B**

Le Tableau 12 et la figure ci-dessus montrent qu'il existe une forte corrélation entre les zones de décollement des couches et les zones présentant les fluages les plus importants.

Il est possible que des défauts d'adhérence aient été initiés dès la mise en œuvre de la couche supérieure en 1995. La mise en œuvre d'une couche étanche sur une couche étanche existante est en effet propice à ce type de désordre, les vapeurs générées lors de la mise en œuvre ne pouvant être évacuées à travers une couche plus drainante.

Le décollement accentue ensuite le phénomène de fluage : la couche pouvant glisser localement sur la couche sous-jacente, une nouvelle contrainte est subie par la couche, proportionnelle à la composante de son poids propre ne pouvant plus être reprise par adhérence sur la couche sous-jacente.

Ce fluage peut ensuite agrandir la zone de décollement, par concentration des contraintes et rupture par cisaillement à l'interface entre les couches.

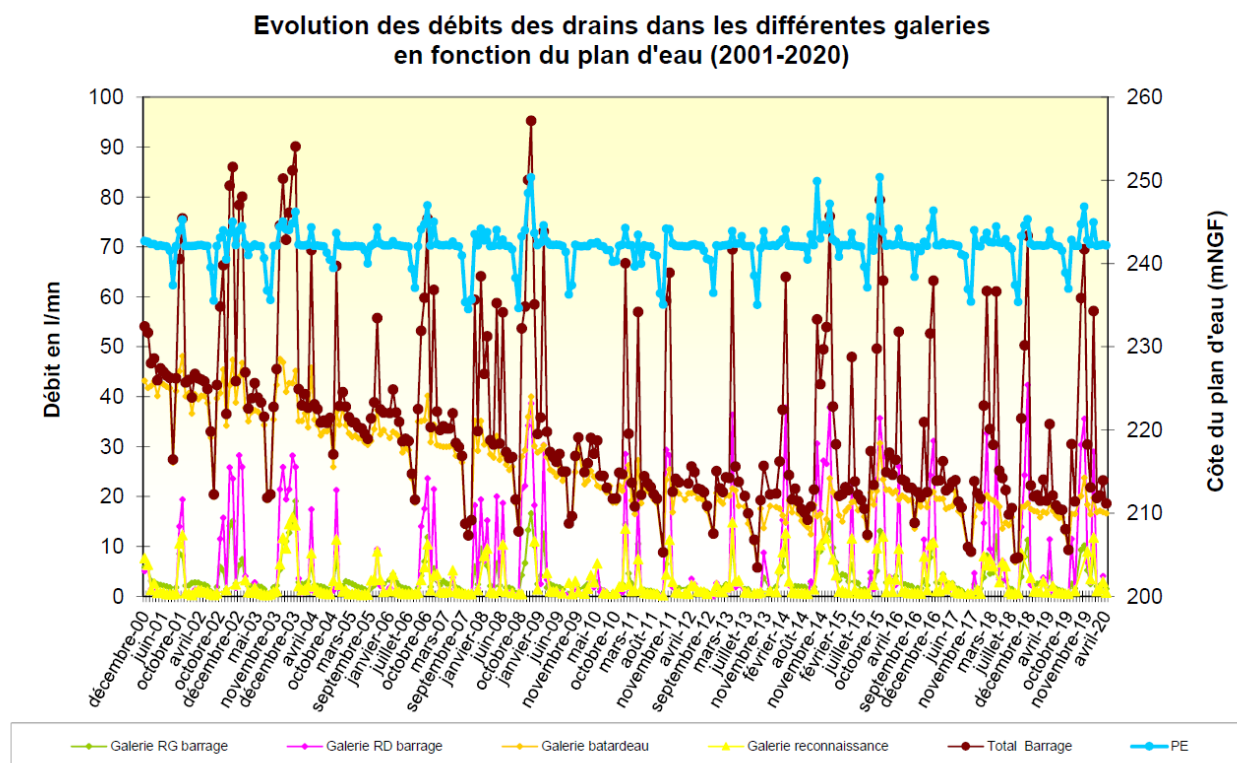
La fissuration contribue à entretenir le phénomène, car l'introduction d'eau entre les couches conduit à accélérer leur décollement, par effets de pression entre les couches.

## 6 ANALYSE DES DONNEES D'AUSCULTATION

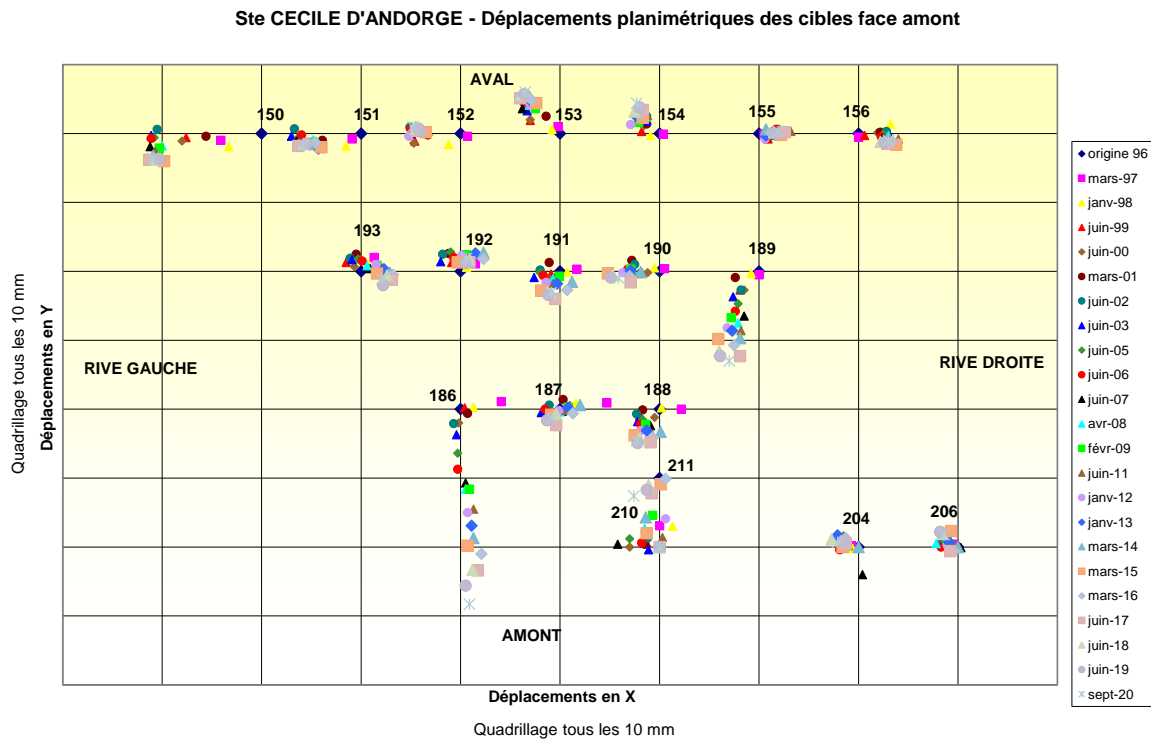
Le système d'auscultation actuel ne permet pas d'évaluer précisément le niveau de performance du masque :

- sur la période avec relevés (2000-2020), la cote maximale de remplissage a été de l'ordre de 250 NGF (soit 45 % de la charge sous la cote des PHE actuelles) avec des sollicitations éphémères (quelques heures) ;
- les débits de fuite du masque ne peuvent pas être isolés (les eaux de la couche drainante n'étant pas collectées directement dans la galerie) ;
- les piézomètres du remblai sont situés en pied aval, loin du masque ;
- les piézomètres de la galerie mesurent les sous-pressions en fondation.

Le rapport d'auscultation [5] note toutefois une tendance à la diminution des débits de fuite totaux depuis 2001, probablement liée au colmatage des drains ou des réseaux d'écoulements internes.

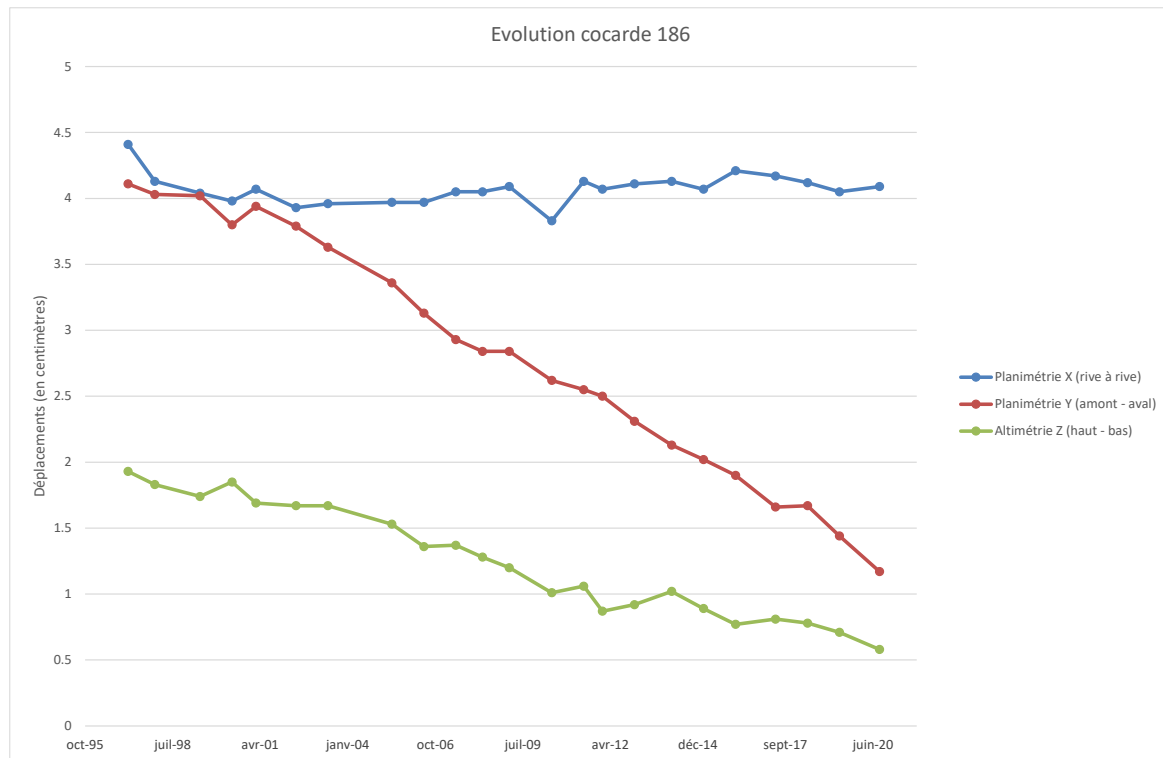


Les déplacements planimétriques des cibles du parement amont sont présentés sur la figure ci-dessous.

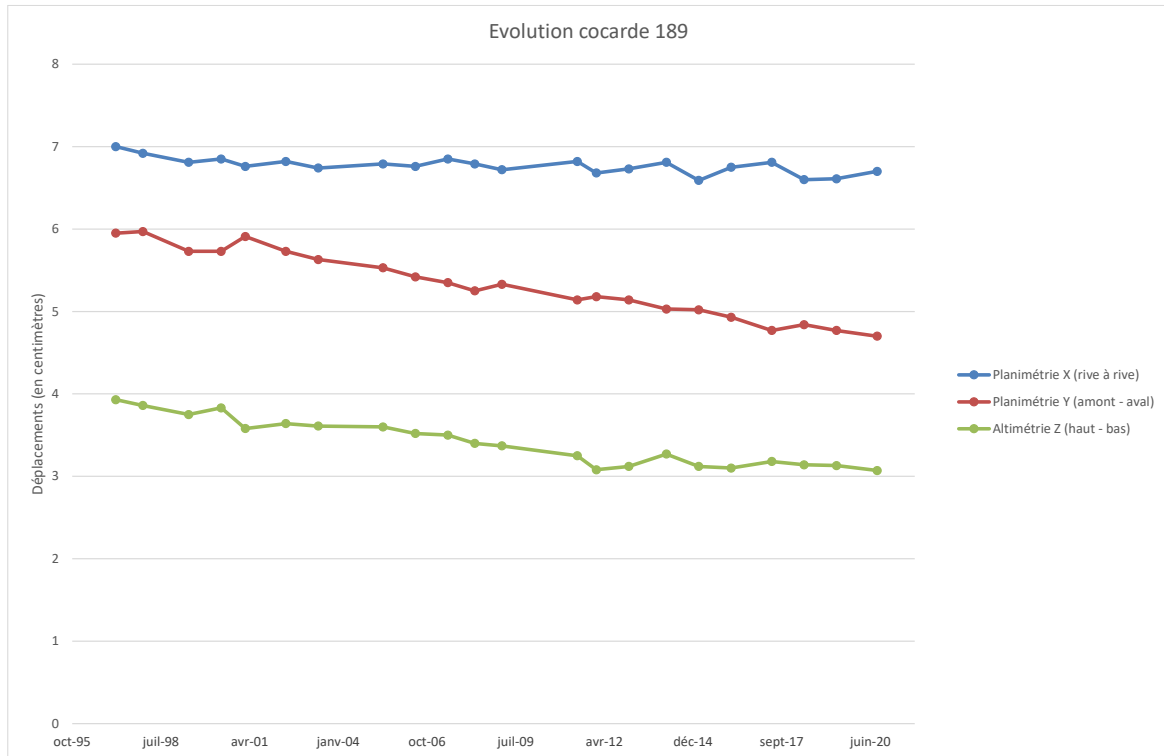


**Figure 52 : Déplacements planimétriques des cibles disposées sur la parement amont**

Les déplacements des cocardes 186 et 189 sont présentés ci-dessous.



**Figure 53 : Déplacements de la cocarde 186**



**Figure 54 : Déplacements de la cocarde 189**

Le suivi des déplacements montre une dérive locale concernant principalement deux cibles. Ces dérives sont attribuées au fluage du masque.



## 7 SYNTHÈSE DES ANALYSES

### 7.1 PREAMBULE

Les paragraphes ci-dessous présentent une analyse de l'état des différentes couches constituant le masque, au regard des essais réalisés et des inspections visuelles (pour la couche visible uniquement). Cette analyse se base sur l'évaluation des deux fonctions essentielles que doivent assurer les couches imperméables : étanchéité et stabilité.

L'étanchéité de la couche imperméable dépend principalement :

- de la compacité de la couche,
- de la qualité de la mise en œuvre (altérée au droit des raccordements nécessitant une mise en œuvre manuelle, notamment au contact de la plinthe sur les versants),
- de la qualité des joints entre les bandes et avec la plinthe,
- de la présence ou non de défauts d'étanchéité (fissures profondes par exemple)

Et dans une moindre mesure :

- du pourcentage de liant bitumineux,
- de la granulométrie des granulats,
- de l'épaisseur de la couche

La stabilité dépend principalement :

- de l'adhérence sur la couche sous-jacente
- des caractéristiques des granulats (granulométrie, qualité des granulats, affinité avec le bitume, ...)
- du type de bitume (standard, modifié, indice de pénétration)
- de la compacité de la couche.
- de l'épaisseur de la couche,

L'évaluation des fonctions est synthétisée sous forme de tableau regroupant les sous-critères énumérés ci-dessus, en différenciant l'état des couches lors des travaux de 1995 et leur état actuel. Le code couleur retenu pour qualifier chaque sous critère est le suivant :

	Conforme aux pratiques recensées dans le bulletin B114 de la CIGB
	Non-conformité mineure
	Non-conformité majeure

## 7.2 COUCHE A

### 7.2.1 FONCTION ETANCHEITE

Critère	CIGB	Etat 1995	Etat 2020
Compacité	% vides < 3 %	30 % de la couche présente un % de vides > 3 % Systématiquement >3 % dans les zones mises en œuvre manuellement	Pas d'évolution significative depuis la construction
Taux de liant bitumineux	[6 % ; 8 %]	Moyenne = 8 %	Moyenne = 7,3 % (zones à désordres) et 7,5 % (zones sans désordres visibles)
Granulométrie	Granulométrie continue fuseau hollandais	Granulométrie conforme au fuseau hollandais	
Epaisseur de la couche	[6 cm ; 8 cm]	min = 5,4 cm moyenne = 6.9 cm	min = 5 cm moyenne = 6.6 cm
Perméabilité de la couche	< 10 <sup>-9</sup> m/s	< 10 <sup>-10</sup> m/s d'après le DOE	< 10 <sup>-9</sup> m/s d'après les essais de perméabilité au triaxial
Perméabilité des joints périmétraux		Perméabilité des couvre-joints trop élevée : 10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-6</sup> m/s Enduit d'étanchéité mis en œuvre en 1996	Pas de nouveaux essais de perméabilité des couvre-joints L'enduit mis en œuvre en 1996 n'est probablement plus étanche.
Désordres pouvant conduire à des défauts d'étanchéité		Pas de désordre signalé	Nombreux désordres altérant l'épaisseur de la couche : dents de pelle, chutes de pierres Nombreuses fissures dans la couche, souvent associées aux zones de fluage : jusqu'à 2 cm de profondeur d'après les inspections visuelles. <b>Parfois traversantes comme le montre la carotte SC5</b> Quelques granulats trop grands, calcaires fragiles cassés sous l'effet du compactage

Les essais de perméabilité montrent que, même si la compacité de la couche supérieure et les granulats ne sont pas tout à fait conformes aux pratiques recensées par la CIGB, la perméabilité de la couche supérieure est satisfaisante. A ce jour, seuls des désordres ponctuels (fissures parfois profondes, décollements au niveau des joints périmétraux) constituent de potentiels points faibles de l'étanchéité. La couche A peut donc assurer sa fonction d'étanchéité à moyen terme, sous réserve que les désordres n'évoluent pas jusqu'à constituer des défauts d'étanchéité majeurs.

## 7.2.2 STABILITE

Critère	CIGB	Etat 1995	Etat 2020
Adhérence à la couche sous-jacente	Requise en tout point	Pas de défaut d'adhérence signalé	Défauts d'adhérence généralisés, notamment sur les zones de fluage et de fissuration
Granulométrie	Granulométrie continue fuseau hollandais	Granulométrie conforme au fuseau hollandais	
Type de bitume	Bitume modifié recommandé pour de meilleures propriétés rhéologiques, susceptibilité thermique.	Bitume coloré, modifié aux polymères	
Classe de bitume	B40-50 à B80-100	B50/70	Pas de diminution significative de l'indice de pénétrabilité / d'augmentation du point de ramollissement
Taux de bitume	[6 % ;8 %]	Moyenne = 8 %	Moyenne = 7,3 % (zones à désordres) et 7,5 % (zones sans désordres visibles),
Compacité	< 3 %	70 % de la couche présente un % de vides < 3 %	Pas d'évolution significative depuis la construction
Epaisseur de la couche	> 3 Dmax des granulats (Dmax = 8 mm)	min = 5,4 cm	min = 5 cm Un granulats anormalement grand a été observé en SC5 (D = 40mm), mettant en doute la qualité de la réalisation et du contrôle sur le chantier
Désordres attestant d'un défaut de stabilité		Pas de désordre signalé	Nombreuses zones de fluage associées à des fissuration plus ou moins profondes Quelques granulats trop grands, calcaires fragiles cassés sous l'effet du compactage

A terme, la stabilité de la couche A est compromise par le mécanisme de dégradation perte d'adhérence/fluage/fissuration mis en évidence par les carottes réalisées en 2020 et les inspections visuelles.

## 7.3 COUCHE B

### 7.3.1 FONCTION ETANCHEITE

Critère	CIGB	Etat 1966	Etat 2020
Compacité	% vides < 3 %	Cahier des charges : < 4 %	93 % de la couche présente un % de vides > 3 %
Taux de liant bitumineux	[6 % ;8 %]	8 %	Moyenne = 7,5 %
Granulométrie	Granulométrie continue fuseau hollandais	Granulométrie conforme au fuseau hollandais	
Epaisseur de la couche	[6 cm ;8 cm]	6 cm	1995 : min = 1,5 cm (zone sur-rabotée) moyenne = 6.2 cm 2020 : min = 6 cm moyenne = 9 cm (non représentatif des zones sur-rabotées en 1995)
Perméabilité de la couche	< 10 <sup>-9</sup> m/s	< 10 <sup>-10</sup> m/s	Pas d'essais
Perméabilité des joints périmétraux		Pas de données	
Désordres pouvant conduire à des défauts d'étanchéité (inspections visuelles)		Pas de désordre signalé	1995 : Défauts observés après rabotage de la couche supérieure (fissures) Défauts traités au mortier epoxy puis enduit Tixophalte 2020 : Couche non visible

L'épaisseur irrégulière (suite au sur-rabotage réalisé en 1995) et la faible compacité de la couche B ne permettent pas de garantir son étanchéité.

## 7.3.2 STABILITE

Critère	CIGB	Etat 1966	Etat 2020
Adhérence à la couche sous-jacente	Requise en tout point	Pas de défaut d'adhérence signalé	Pas de données (les carottes ne descendent pas assez profond)
Granulométrie	Granulométrie continue fuseau hollandais	Granulométrie conforme au fuseau hollandais	
Type de bitume	Bitume modifié recommandé pour de meilleures propriétés rhéologiques, susceptibilité thermique.	Bitume standard	
Classe de bitume	B40-50 à B80-100	B60/70	Equivalent B20/30 : bitume cassant, peu élastique (mais bonne résistance au fluage)
Taux de bitume	[6 % ;8 %]	8 %	Moyenne = 7,5 %
Compacité	< 3 %	% de vide < 4% recherché	93% de la couche présente un % de vides > 3%
Epaisseur de la couche	> 3 Dmax des granulats lors de la mise en œuvre de la couche (Dmax = 12,5 mm)	6 cm	De nombreuses carottes réalisées en 1995 présentent des épaisseurs inférieures à 3 cm. De telles sous-épaisseurs diminuent l'étanchéité de la couche et peuvent conduire à en altérer la stabilité, si l'épaisseur locale de la couche est de l'ordre de grandeur du plus grand granulats qui s'y trouve
Désordres attestant d'un défaut de stabilité (inspections visuelles)		Pas de désordre signalé	1995 : Défauts observés après rabotage de la couche supérieure (fissures) Défauts traités au mortier epoxy puis enduit Tixophalte 2020 : pas d'information

Les faibles épaisseurs locales de la couche B et sa faible compacité nuisent à l'intégrité du mélange en place. Le bitume est peu élastique, ce qui peut le rendre cassant en cas de déplacement. En revanche, sa résistance au fluage est bonne.



## 8 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

### 8.1 AVIS SUR L'ETAT DU MASQUE

Les essais réalisés en 2020 montrent que la perméabilité de la couche A est satisfaisante dans les zones non endommagées. Toutefois :

- Pour la couche d'étanchéité A, une partie des désordres relevés lors des inspections visuelles et à l'analyse des carottes (fissures profondes voire traversantes, épaufrures causées par les dents de pelle mécanique, granulats anormalement grands, granulats de qualité mécanique insuffisante) constituent des points faibles de l'étanchéité du masque ; ces défauts sont nombreux et affectent une surface importante de la couche ;
- La barrière d'étanchéité supplémentaire constituée par la couche B, aujourd'hui âgée de plus de 55 ans, est peu fiable :
  - ◆ le rabotage réalisé à l'occasion de la rénovation de la couche A a parfois réduit son épaisseur (2 carottes avec une épaisseur de 1 à 3 cm, 6 avec moins de 4 cm) ;
  - ◆ la compacité de la couche est notablement inférieure à ce qui est recommandé pour une couche étanche (près de la moitié des % de vides > 4 %) ;
  - ◆ le bitume est devenu très dur avec le temps, ce qui le rend cassant et pourrait conduire à l'apparition de fissures en cas de déformation suite à une mise en charge importante du masque.
- A l'interface entre les deux couches, les essais démontrent un décollement avéré sur une partie importante du masque bien corrélé avec les déplacements des cibles sur le parement ; ce décollement (perte d'adhérence de la couche / fluage / fissuration) a un potentiel d'auto-entretien voire d'auto-accélération ; ce mécanisme de dégradation sera d'autant plus rapide que les défauts d'étanchéité s'aggraveront.

La couche support C (que l'on ne qualifiera pas de drainante, contrairement à ce qu'on retrouve dans la bibliographie du barrage) offre probablement un complément d'étanchéité.

De nombreuses cloques et décollements, observés dès 1972, entre l'ancienne couche A et la couche B et dès 1995 entre la nouvelle couche A et la couche B, sont en partie imputables à la superposition de couches étanches, solution constructive retenue en 1966 car on ne disposait pas d'équipements et de moyens à l'époque permettant de s'en affranchir et lors des travaux de réfection de 1995 (on disposait d'équipements permettant de s'en affranchir mais par contre on avait déjà perdu une grande partie du savoir-faire des entreprises et de leurs personnels avec ce type de technique par manque de travaux de ce type depuis la fin des années 1970. Bien que cette disposition présente l'avantage de conserver le niveau de sécurité de l'ouvrage lors des travaux de réfection du masque, elle serait écartée aujourd'hui au profit d'une des conceptions type recommandée par le CIGB, préférant l'alternance de couche étanches et poreuses (type A).

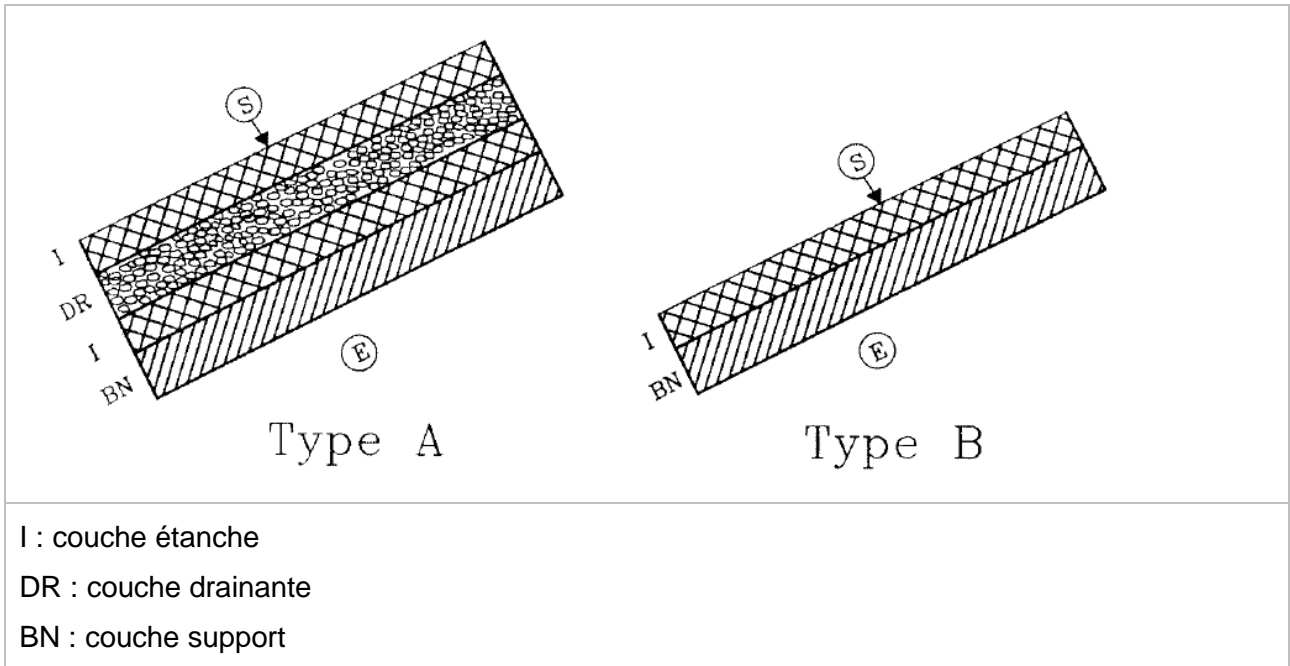


Figure 55 : Masques de type A et B (source : Bulletin 114, CIGB)

A titre d'exemple, la figure suivante présente le détail du masque de type A réalisé en 2020 sur le barrage de Kruth (maîtrise d'œuvre ISL).

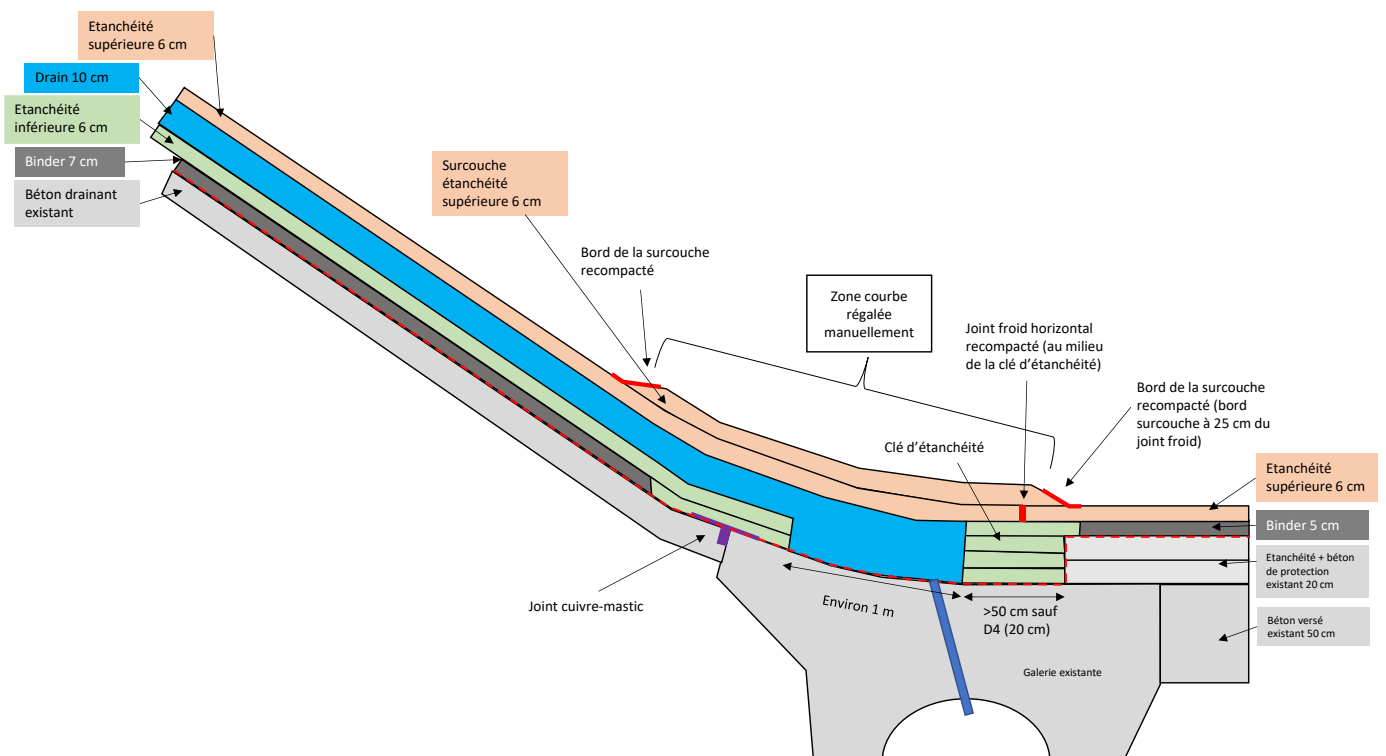




Figure 56 : Mise en place de la couche drainante sur la couche d'étanchéité inférieure



Figure 57 : Mise en œuvre de la couche étanche supérieure sur la couche drainante



## 8.2 DISCUSSION SUR LA NECESSITE DE REMPLACER LE MASQUE

En conclusion du § précédent, on retiendra que :

- l'étanchéité du masque du barrage de Ste-Cécile d'Andorge n'est pas au niveau attendu par comparaison aux standards actuels et du fait de son état ;
- les dégradations par décollement/fluage vont s'accélérer et conduiront probablement à devoir le reprendre dans moins de 20 ans.

Ce constat est aggravé par le fait que cette étanchéité ne peut véritablement être éprouvée (ce qui est essentiel avec ce type de technique) :

- S'agissant d'un barrage écrêteur, sa performance peut difficilement être mesurée par une mise en eau contrôlée (cf. document annexe n°6 du dossier de révision spéciale relatif à la faisabilité d'une mise en eau contrôlée) ;
- Les débits de fuite du masque ne sont pas collectés dans la plinthe mais se perdent de manière diffuse dans le corps du barrage ce qui ne permet pas un véritable suivi.

Enfin, le remplissage significatif le plus récent<sup>12</sup> du barrage (2015) n'a représenté que 45% de la charge maximale sous les PHE (actuelles et futures). Il est possible qu'un remplissage important conduise à des cisaillements et des écoulements entre les couches A et B susceptibles d'accentuer les désordres.

Ces points sont à nuancer par le fait que l'étanchéité imparfaite d'un barrage en enrochements à masque n'est pas rédhibitoire :

- L'augmentation de la piézométrie induite n'est pas de nature à générer des instabilités (dans l'état actuel comme dans l'état aménagé comme l'a démontré le dossier de révision spéciale en considérant l'arrachement du masque sur toute la partie supérieure – cf. Document C) ;
- En matière d'érosion interne, selon le guide bulletin CIGB 164, ce type de barrage est sensible uniquement au déchaussement régressif (type Tokwé-Mukorsi avec une mise en eau avant réalisation du masque) ; dans l'état aménagé, les écoulements seront filtrés et l'instabilité sera « bloquée » par la recharge en BCR (comme démontré dans le dossier de révision spéciale – Cf. Document C).

<sup>12</sup> On écarte ici le remplissage maximal atteint en 1977 avec un masque de moins de 10 ans.



Figure 58 : Déchaussement du pied aval du barrage de Tokwé-Mukorsi (2014)

## 9 LES OPTIONS POUR UNE RENOVATION

S'il est décidé de rénover l'étanchéité du masque, plusieurs alternatives sont envisageables :

- rabotage de la couche A jusqu'à la couche B et mise en œuvre d'une nouvelle couche drainante (sur émulsion d'accroche) et d'une nouvelle couche étanche ;
- rabotage des couches A et B et mise en œuvre d'un masque de type A (couche support existante C + couche étanche inférieure CEI + couche drainante CD + couche étanche supérieure CES) ;
- mise en place d'un dispositif de type DEG sur le masque actuel (complexe comprenant une membrane étanche).

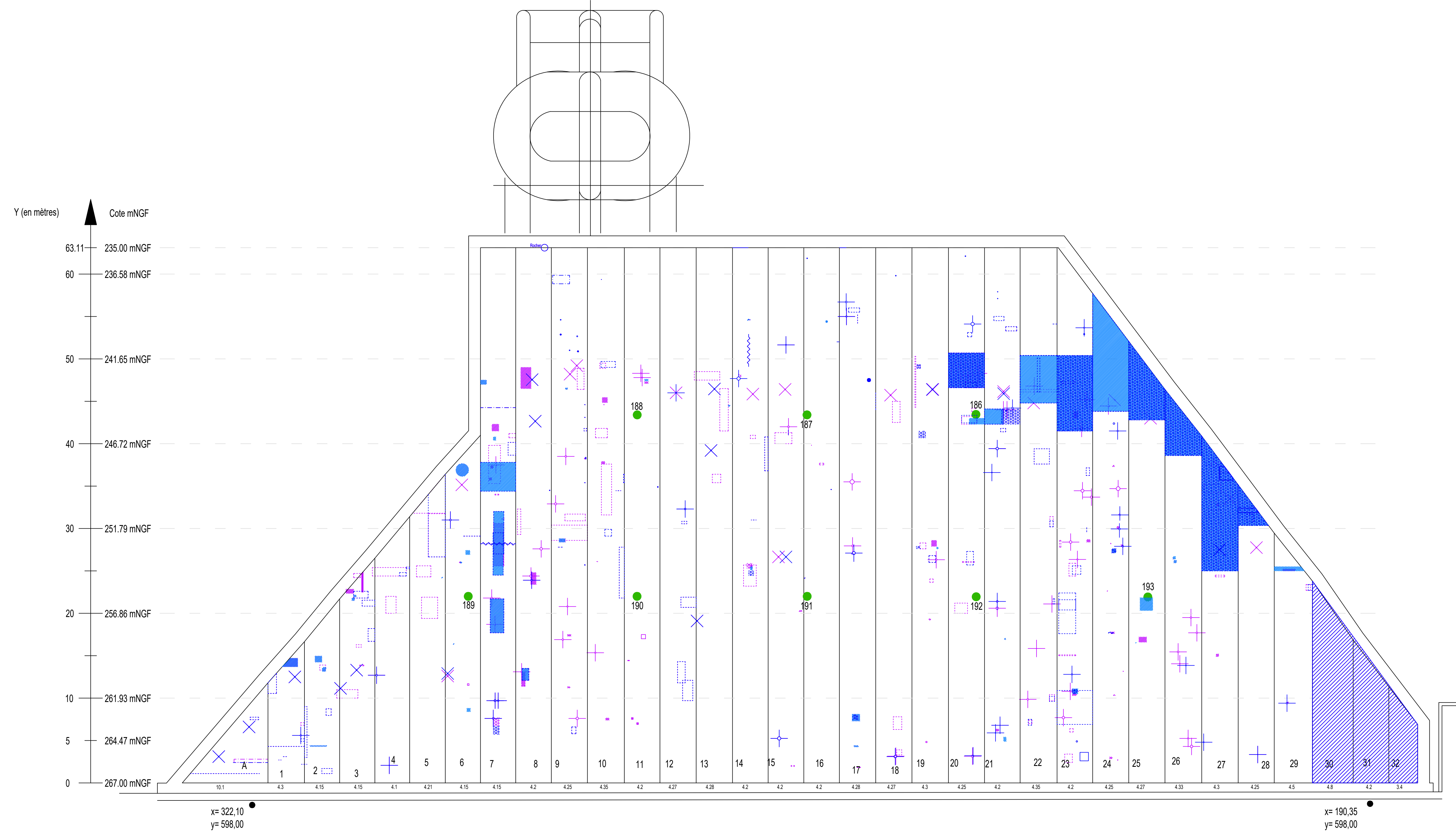
Une analyse multicritère sera préalablement réalisée à l'AVP pour trancher sur la meilleure solution.

La sécurité du barrage en phase chantier et l'impact sur le phasage de l'intervention relative au nouvel évacuateur de crue seront deux critères majeurs de l'analyse.



# ANNEXE 1      PLAN DE SYNTHÈSE DES DESORDRES DE 2006 A 2018

Echelle 1/4000 ème



**Légende**

- 2013 (PE= 241.79mNGF)
- 2018 (PE= 242.26mNGF)
- Déformations par zones
- Fluage par zones et ponctuels
- Fissures par zones et ponctuels
- Défaut de compactage par zones et ponctuels
- Cloques par zones et ponctuels \*
- Zone de mousse
- Trous (ponctuels) \*
- Forages \*
- Cocardes


\* Diamètre du symbole ponctuel correspond à la taille réelle du défaut.

Maitre d'ouvrage



Conseil Général du Gard  
Hôtel du Département, Rue Guillemette  
30044, Nîmes CEDEX 9  
Tél : 04.66.76.76.76

Maitre d'oeuvre



1105, Avenue Pierre Mendès France  
BP 4001 - 30001 Nîmes Cedex - France  
Tel:04.66.67.50.00 - Télécopie:04.66.94.25.63  
E mail: brl@brl.fr - Web: http://www.brll.fr

**BARRAGE SAINTE CECILE D'ANDORGE  
SUIVI DES DEFAUTS DU MASQUE AMONT  
PLAN DES DEFAUTS  
ANNEE 2013 - 2018 - PAR TYPE**

ECHELLE: 1/4000	N° du PLAN: 4364-A01-1	Dessiné par: JCO	PIECE: 1
Norm du fichier: 4364-A01-1.dwg	Cotation en mètre	Vérifié par: JVA	
	Date: 27/03/19	Approuvé par: RVI	

## ANNEXE 2 PLAN DE LOCALISATION DES DESORDRES (2020)




# PROJET DE SECURISATION DU COMPLEXE HYDRAULIQUE FORME PAR LES BARRAGES DE SAINTE CECILE D'ANDORGE ET DES CAMBOUS

Phase REG\_SCA

Inspections visuelles du masque amont du barrage de Sainte  
Cécile d'Andorge



Indice A – Janvier 2021

	<p><b><u>Maître d'œuvre</u></b></p> <p>BRL Ingénierie</p> <p>1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5</p>
	<p><b><u>Maître d'œuvre</u></b></p> <p>ISL INGÉNIERIE</p> <p>65 avenue Clément Ader 34170 CASTELNAU LE LEZ</p>
	<p><b><u>Maître d'ouvrage</u></b></p> <p>Conseil Départemental du Gard Direction de l'Eau et de la Valorisation du Patrimoine Naturel</p> <p>3 rue Guillemette 30044 Nîmes Cedex 9</p>

Date du document	12/01/2020
Contact	Julien VANWARREGHEM

Titre du document	Inspections visuelles du masque amont du barrage de Sainte Cécile d'Andorge
Référence du document :	A00593_REG_SCA – Inspections visuelles du masque
Indice :	A

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
19/01/2021	A	Première version	ADO	JVA

# PROJET DE SECURISATION DU COMPLEXE HYDRAULIQUE FORME PAR LES BARRAGES DE SAINTE CECILE D'ANDORGE ET DES CAMBOUS

## Phase REG\_SCA

### Inspections visuelles du barrage de Sainte Cécile d'Andorge

<b>PREAMBULE .....</b>	<b>1</b>
<b>1 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DU BARRAGE.....</b>	<b>3</b>
<b>2 INSPECTION DU PAREMENT AMONT.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1 GENERALITES.....</b>	<b>6</b>
2.1.1 Conditions de l'inspection .....	6
2.1.2 Programme de l'inspection .....	6
2.1.3 Objectifs de l'inspection.....	7
<b>2.2 RESULTATS DE L'INPECTION.....</b>	<b>7</b>
2.2.1 Localisation des désordres observés.....	7
2.2.2 Typologies des désordres observés.....	9
2.2.2.1 Cloques.....	9
2.2.2.2 Fissures sur le masque .....	10
2.2.2.3 Fluage du matériau bitumineux .....	13
2.2.2.4 Forages.....	14
2.2.2.5 Trous.....	16
2.2.2.6 Défauts de compactage.....	17
2.2.2.7 Défauts d'étanchéité.....	17
2.2.2.8 Fissuration des doucines.....	22
2.2.2.9 Fissuration du mur de couronnement .....	23
2.2.2.10 Désordres accidentels.....	24
2.2.2.10.1 Chute de roches .....	24
2.2.2.10.2 Impacts.....	25
2.2.2.10.3 Travaux de déboisement du masque .....	25
2.2.2.10.4 Arrachement du couvre-joint .....	27



# TABLE DES ILLUSTRATIONS

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Parcours des inspections .....	7
Figure 2 : Plan de détail de l'étanchéité au niveau du couronnement .....	21
Figure 3 : Coupe au droit de la plinthe du barrage de Sainte Cécile d'Andorge .....	27

## LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Défaut n°6 – Cloque sur la bande n°27 .....	9
Photo 2 : Défaut n°44 – Cloque sur la bande n°7 .....	9
Photo 3 : Défaut n°16 – Cloque sur bande n°20.....	9
Photo 4 : Défaut n°16 – Cloque sur bande n°20 (vue de profil).....	9
Photo 5 : Défaut n°16 – Cloque sur bande n°20 (vue dans le trou de carottage) .....	10
Photo 6 : Défaut n°3 – Zone de fissures en RG sur bande n°30 .....	11
Photo 7 : Défaut n°5 – Fissure en RG sur bande n°28.....	11
Photo 8 : Défaut n°19 – Réseau de fissures sur bande n°20 .....	11
Photo 9 : Défaut n°36 – Fissure en RD entre les bandes n°7 et 8.....	11
Photo 10 : Défaut n°40 – Fissure en RD sur la bande n°5 .....	12
Photo 11 : Défaut n°42 – Fissure en RD sur la bande n°5 .....	12
Photo 12 : Défaut n°50 – Fissure en RD sur la bande n°1 .....	12
Photo 13 : Défaut n°18 – Fissures sur bande n°21 (profondeur : 1.5cm) .....	12
Photo 14 : Défaut n°25 – Fissures sur bande n°14 (profondeur : 1.5cm) .....	12
Photo 15 : Défaut n°33 – Fissures sur bande n°10 (profondeur : 2cm) .....	13
Photo 16 : Défaut n°38 – Fissures sur bande n°7 (profondeur : 2cm) .....	13
Photo 17 : Défaut n°34 – Fluage du matériau bitumineux sur la bande n°7 .....	13
Photo 18 : Défaut n°17 – Forage rebouché sur la bande n°21(sans évolution par rapport à 2013) .....	14
Photo 19 : Défaut n°23 – Forage rebouché sur la bande n°16 (sans évolution par rapport à 2013) .....	14
Photo 20 : Défaut n°21 – Forage rebouché sur la bande n°19 (à gauche : 2020 ; à droite : 2013) .....	14
Photo 21 : Défaut n°20 – Forage rebouché sur la bande n°19 (à gauche : 2020 ; à droite : 2013) .....	15
Photo 22 : Défaut n°22 – Forage rebouché sur la bande n°18 (à gauche : 2020 ; à droite : 2013) .....	15
Photo 23 : Défaut n°49 – Forage rebouché sur la bande n°1(sans évolution par rapport à 2013) .....	15
Photo 24 : Défaut n°46 – Forage rebouché sur la bande n°3 (sans évolution par rapport à 2013) .....	15
Photo 25 : Défaut n°45 – Forage rebouché sur la bande n°4 (sans évolution par rapport à 2013) .....	16
Photo 26 : Défaut n°37 – Petites ouvertures dans le masque sur la bande n°7 .....	16
Photo 27 : Défaut n°39 – Différences de tassement sur la bande n°5.....	17
Photo 28 : Défaut n°41 – Différences de tassement sur la bande n°4.....	17
Photo 29 : Défaut n°47 – Différences de tassement sur la bande n°2.....	17
Photo 30 : Défaut n°48 – Différences de tassement sur la bande n°1.....	17
Photo 31 : Défaut n°1 – Décollement au niveau de la doucine RG .....	18
Photo 32 : Défaut n°2 – Décollement au niveau de la doucine RG .....	18
Photo 33 : Défaut n°4 – Décollement au niveau de la doucine RG .....	18
Photo 34 : Défaut n°7 – Décollement au niveau de la doucine RG .....	18
Photo 35 : Défaut n°13 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°22 (1m de long).....	19
Photo 36 : Défaut n°14 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°21 (15cm de long).....	19
Photo 37 : Défaut n°15 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°20 (30cm de long).....	19
Photo 38 : Défaut n°24 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°16 (15cm de long).....	19
Photo 39 : Défaut n°28 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°10 (90cm de long).....	19
Photo 40 : Défaut n°51 – Décollement de l'étanchéité entre le mur de couronnement et le masque en partie supérieure .....	20

Photo 41 : Décollement de l'étanchéité entre le mur de couronnement et le masque en partie supérieure .....	20
Photo 42 : Décollement de l'étanchéité entre le mur de couronnement et le masque en partie supérieure .....	20
Photo 43 : Décollement de l'étanchéité entre le mur de couronnement et le masque en partie supérieure .....	20
Photo 44 : Décollement de la surépaisseur .....	21
Photo 45 : Décollement de la surépaisseur .....	21
Photo 46 : Décollement de la surépaisseur .....	21
Photo 47 : Décollement de la surépaisseur .....	21
Photo 48 : Défaut n°53 – Ouverture de l'étanchéité en partie supérieure, dans le sens vertical, sur la bande n°14.....	22
Photo 49 : Défaut n°54 – Ouverture de l'étanchéité en partie supérieure, dans le sens vertical, sur la bande n°26.....	22
Photo 50 : Fissuration des doucines.....	23
Photo 51 : Fissuration des doucines.....	23
Photo 52 : Fissuration des doucines.....	23
Photo 53 : Fissuration des doucines.....	23
Photo 54 : Défaut n°52 – Fissure sur le mur de couronnement au droit de la bande n°8 .....	24
Photo 55 : Défaut n°29 – Rocher sur le parement (vue depuis la RG) .....	24
Photo 56 : Défaut n°29 – Rocher sur le parement .....	24
Photo 57 : Défaut n°30 – Impact réparé sur la bande n°9 .....	25
Photo 58 : Défaut n°31 – Impact réparé sur la bande n°9 .....	25
Photo 59 : Défaut n°32 – Impact réparé sur la bande n°9 .....	25
Photo 60 : Défaut n°35 – Impact sur la doucine RD .....	25
Photo 61 : Défaut n°8 – Dégâts de déboisement constatés en 2013 .....	26
Photo 62 : Défaut n°9 – Dégâts de déboisement constatés en 2013 .....	26
Photo 63 : Défaut n°10 – Dégâts de déboisement constatés en 2013 .....	26
Photo 64 : Défaut n°11 – Dégâts de déboisement constatés en 2013 .....	26
Photo 65 : Défaut n°11 – Dégâts de déboisement constatés en 2013 .....	26
Photo 66 : Défaut n°12 – Traces de dents de pelle mécanique sur la bande n°18.....	26
Photo 67 : Défaut n°27 – Dégâts au niveau de la plinthe .....	27
Photo 68 : Défaut n°26 – Arrachement du couvre-joint .....	28
Photo 69 : Défaut n°26 – Présence d'un bois au droit de la partie arrachée du couvre-joint.....	28
Photo 70 : Réparation de la partie de couvre-joint arrachée .....	28

## LISTE DES TABLEAUX

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

# PREAMBULE

Le présent document s'inscrit dans le cadre du marché de maîtrise d'œuvre relative au projet de sécurisation du complexe hydraulique formé par les barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous.

Cette mission de maîtrise d'œuvre a été confiée à BRL Ingénierie, en co-traitance avec ISL Ingénierie et MEDIAE.

Dans le cadre de ce projet, la réalisation des Etudes De Dangers des barrages de Sainte Cécile d'Andorge et des Cambous est attendue. Conformément au point d) du §1 de l'Annexe de l'Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan d'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, les présentes EDD seront réalisées suivant le cas n°2 puisqu'elles se réfèrent à « une demande d'autorisation ou d'approbation nouvelle d'un barrage existant en raison des travaux qui y sont prévus ».

Dans ce contexte, et conformément au point III du §5.1 de l'Annexe de l'Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan d'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, « le diagnostic exhaustif du barrage comporte uniquement les études de diagnostic permettant de renseigner le maître de l'ouvrage sur l'état de l'ouvrage existant et sur la faisabilité de l'opération ». Le programme des investigations (référéncé A00593\_Programme\_investigations\_diagnostic\_exhaustif\_indB du 02/03/2020) a donc permis de lister les études de **diagnostic** nécessaires permettant de **dresser un état des lieux uniquement des parties d'ouvrages impactées par les futurs travaux** sur le barrage de Sainte Cécile d'Andorge :

- Inspection du couronnement ;
- Inspection du parement et du pied aval ;
- Inspection du parement amont ;
- Inspection des conduites de restitution et de la chambre des vannes aval.

Le présent rapport dresse le bilan de l'inspection visuelle du masque amont du barrage.



# 1 PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU BARRAGE

Les principales caractéristiques de l'ouvrage actuel mis en service en 1967, sont résumées dans le texte ci-après.

## SITE - HYDROLOGIE

Le barrage de Sainte Cécile d'Andorge est situé sur le Gardon d'Alès, dans le département du Gard.

Le site de Sainte Cécile d'Andorge est situé quelques kilomètres en amont de la Grand-Combe.

Le barrage a pour vocation principale l'écrêtement des crues.

Aire du bassin versant	:	109 km <sup>2</sup>
Crue décennale estimée	:	2728 m <sup>3</sup> /s

## RETENUE

Cote normale de la retenue	:	242 mNGF
Cote maximale exceptionnelle	:	266,8 mNGF
Capacité normale de la retenue	:	1,6 Mm <sup>3</sup>
Capacité maximale	:	16,4 Mm <sup>3</sup>
Aire normale de la retenue	:	25 ha



### OUVRAGE DE VIDANGE

Vidange par deux conduites de fond Ø 800 calées aux cotes 229 mNGF coté gauche et 231,90 mNGF coté droit, débouchant dans les galeries de l'évacuateur

Débit max. des vidanges : 10 m<sup>3</sup>/s

### EVACUATEURS

Evacuateur constitué d'un puits à seuil libre en corolle et de deux pertuis de demi-fond de 6m x 1,5m débitant dans deux galeries de 6m de diamètre.

Cote du seuil du puits : 261,2 mNGF

Débit max. du puits : 600 m<sup>3</sup>/s

Longueur du seuil du puits : 45,5 m

Cote des pertuis : 242,0 mNGF

Débit max. des pertuis : 300 m<sup>3</sup>/s

### OUVRAGE DE PRISE

Quatre prises étagées (de 230,5 à 235,5 mNGF) Ø 800 se rejoignant en une conduite unique Ø 800

Q maximal : 5 m<sup>3</sup>/s

4

### OUVRAGE

**Type :** Barrage remblai (terre ou enrochement)

**Étanchéité du barrage :** Masque d'étanchéité en amont en béton bitumineux. Trois couches de haut en bas : une couche de béton bitumineux drainant de 10 cm et deux couches de béton bitumineux étanche de 6 cm chacune. La couche supérieure du masque a été remplacée en 1995 par un enrobé clair teinté dans la masse.

**Drainage du barrage :** Massif d'enrochements drainant dans sa masse et drains horizontaux.

Altitude en crête : 267 mNGF

Hauteur maximale au-dessus du TN : 42 m

Longueur en crête : 154 m

Largeur en crête : 6 m

Largeur maximale au niveau du TN : 136 m



## FONDATIONS

*Nature :* Rocher constitué de schistes cristallins métamorphiques.

*Cote :* 222 mNGF

*Etanchéité des fondations :* Rideau d'injection

*Drainage des fondations :* Voile de drainage par forages inclinés vers l'aval et débouchant dans la galerie périmétral de pied amont





## 2 INSPECTION DU PAREMENT AMONT

### 2.1 GENERALITES

#### 2.1.1 Conditions de l'inspection

L'inspection du parement amont s'est effectuée en deux temps compte tenu d'une importante quantité de limon en partie basse du masque découverte après l'abaissement du plan d'eau. Cette couche de limon a pu être retirée à la pelle et à la lance par la Société Vauclusienne de Traitement le 31 août 2020 et le 01 septembre 2020.

Les visites d'inspection ont été réalisées :

- le 26 août 2020 après-midi (hors plinthe et partie basse du masque située sous les limons) avec les participations de :
  - Alexandre DORADOUX (ingénieur Génie Civiliste BRLi)
  - Julien CIEPIELWSI (CD30)
  - Francis FOUSSARD (CD30)
- le 02 septembre 2020 matin (plinthe et partie basse du masque après nettoyage du masque) avec les participations de :
  - Alexandre DORADOUX (ingénieur Génie Civiliste BRLi)
  - Francis FOUSSARD (CD30)

Les conditions météorologiques étaient bonnes et ensoleillées (35°C le 26 août et 18°C le 02 septembre).

Le 26 août, on notera également la présence de :

- Lilan ROCHE (GINGER) venu implanter les sondages à réaliser dans le masque bitumineux de Sainte Cécile d'Andorge et sur le massif de butée RD du barrage des Cambous,
- Un représentant de la Société Vauclusienne de Traitement venu repérer les travaux de nettoyage du masque

Le 02 septembre, on notera également la présence d'une équipe de l'entreprise GINGER sur le masque en cours de réalisation des sondages.

#### 2.1.2 Programme de l'inspection

Le suivi des défauts du masque d'étanchéité est inscrit à la consigne de surveillance et d'auscultation de l'ouvrage depuis janvier 2012 avec une périodicité quinquennale. Avant la formalisation des consignes de surveillance, le suivi des défauts du masque s'effectuait régulièrement à une périodicité biennale, voir annuelle.

Les derniers relevés (2006, 2007, 2009, 2010, 2011, 2013 et 2018) ont fait l'objet d'une mise en forme sous Autocad pour améliorer le suivi et l'analyse des défauts (localisation sur fond de plan et symbolique par type de défauts).

Lors de la dernière ETC réalisée en 2013, un premier parcours sur le masque avait été élaboré visant à observer les désordres jugés importants, les zones de désordres et enfin les désordres semblant évoluer au fil des ans. Ce même principe a été mis en œuvre lors de la présente inspection visuelle. Le parcours a également été calé de façon à retrouver les défauts relevés en 2013 pour permettre l'analyse de leur évolution dans le temps.

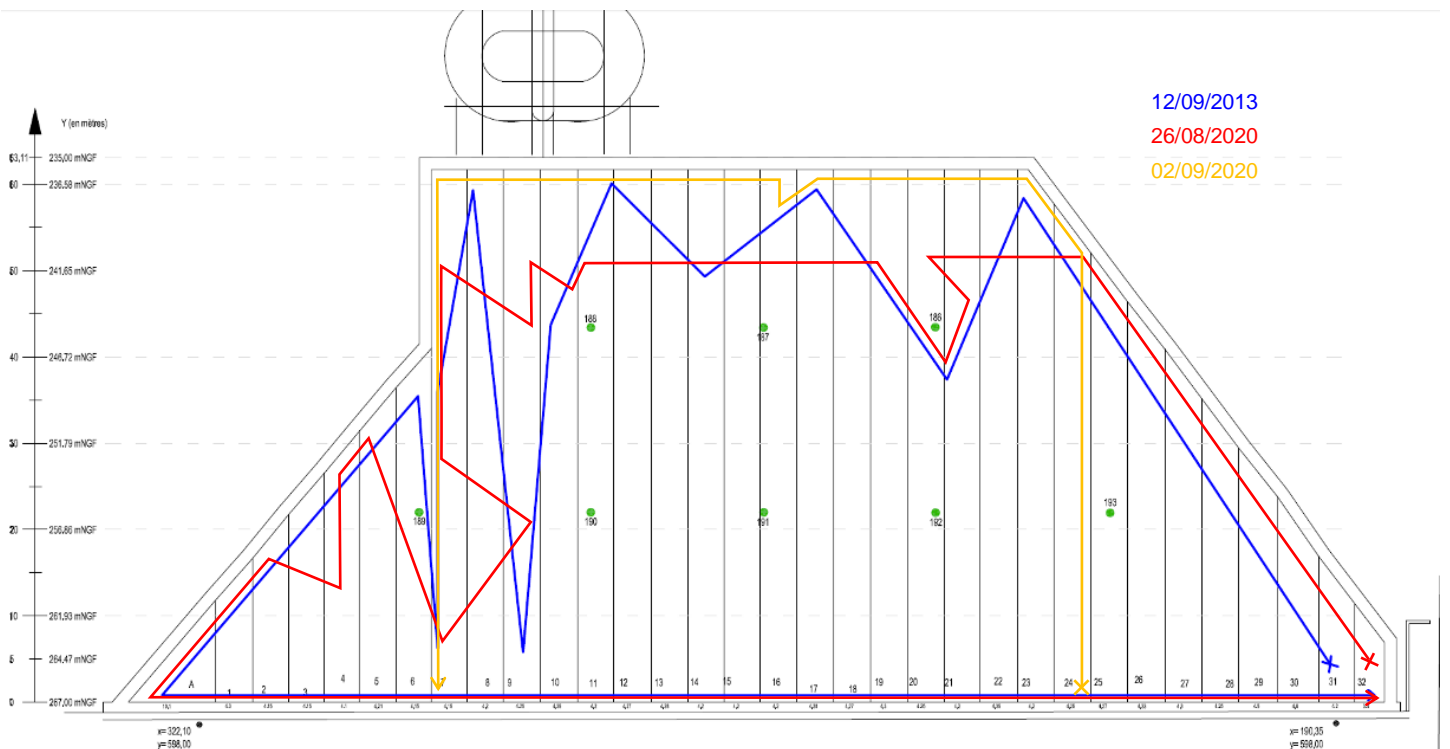


Figure 1 : Parcours des inspections

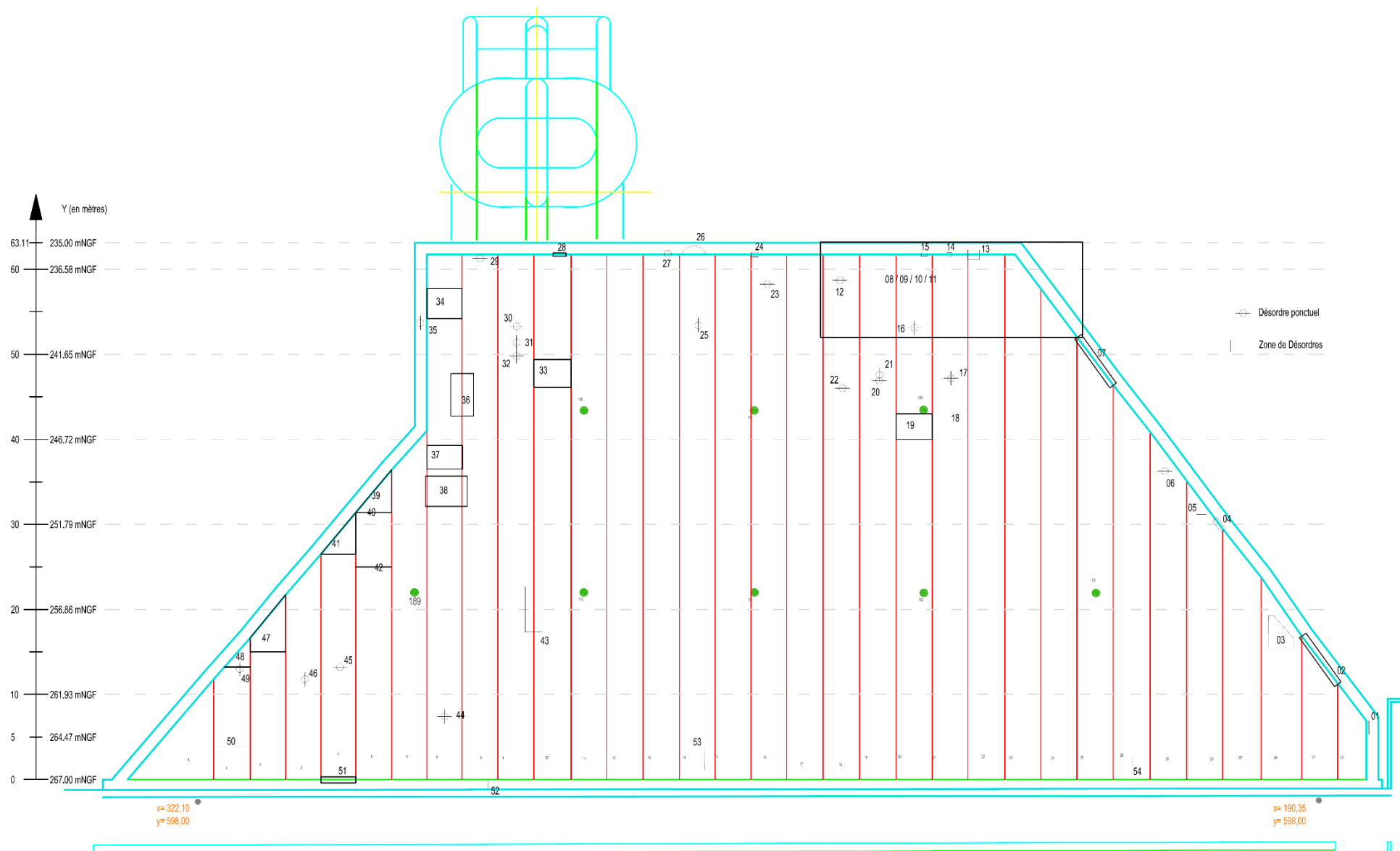
### 2.1.3 Objectifs de l'inspection

Les objectifs de l'inspection sont :

- D'établir une typologie des différents défauts observables sur le masque amont du barrage ;
- Evaluer la criticité et l'évolution des défauts majeurs observés par l'exploitant et lors de l'ETC de 2013 ;
- Définir un protocole de suivi futur des désordres du masque.

## 2.2 RESULTATS DE L'INPECTION

### 2.2.1 Localisation des désordres observés





## 2.2.2 Typologies des désordres observés

### 2.2.2.1 Cloques

Les cloques sont des gonflements ponctuels du masque, de géométrie circulaire.

La plus grande observée était de diamètre inférieur à 60cm et d'épaisseur de l'ordre de 3.5cm. Ces gonflements pourraient être créés par de l'air ou de l'eau emprisonnée entre les deux couches bitumineuses du masque.

Ces désordres sont de gravité minime mais leur évolution est à surveiller.



Photo 1 : Défaut n°6 – Cloque sur la bande n°27

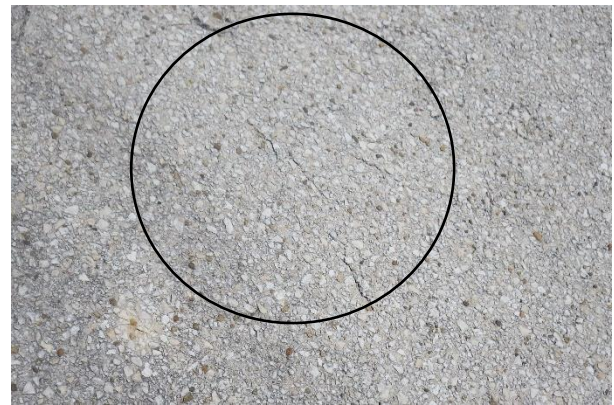


Photo 2 : Défaut n°44 – Cloque sur la bande n°7



Photo 3 : Défaut n°16 – Cloque sur bande n°20



Photo 4 : Défaut n°16 – Cloque sur bande n°20 (vue de profil)





Photo 5 : Défaut n°16 – Cloque sur bande n°20 (vue dans le trou de carottage)

En 2013, le diamètre maximal observé pour une cloque était de 30cm environ. Lors de la présente inspection, le défaut n°16 fait état d'un diamètre de 60cm. Ce défaut a fait l'objet d'un carottage le 02 septembre 2020. Il a été mesuré un espace de 3.5cm environ entre la couche de l'ancien masque (en noir sur la Photo 5) et la couche du nouveau masque (en blanc sur la Photo 5). Ceci confirme donc la présence d'une poche dans laquelle de l'eau s'engouffre et reste emprisonnée, engendrant ainsi le gonflement observable en surface du masque. Ce défaut semble évolutif mais lent.

### 2.2.2.2 Fissures sur le masque

La grande majorité des fissures détectées sont superficielles.

Elles sont parfaitement normales et inhérentes au type de matériau mis en œuvre sur le masque.

Il est possible de distinguer plusieurs types de fissures :

- Les fissures superficielles, de largeur et de profondeur très faibles. Il s'agit de la catégorie la plus représentée sur le masque du barrage de Sainte Cécile d'Andorge ;



Photo 6 : Défaut n°3 – Zone de fissures en RG sur bande n°30

- Les concentrations de fissures, de profondeur et de largeur pouvant atteindre respectivement 1cm et 4mm ;

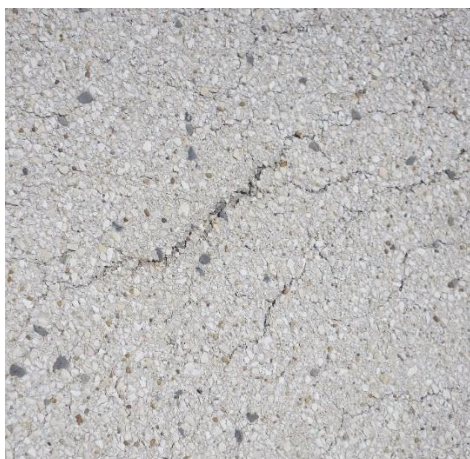


Photo 7 : Défaut n°5 – Fissure en RG sur bande n°28



Photo 8 : Défaut n°19 – Réseau de fissures sur bande n°20



Photo 9 : Défaut n°36 – Fissure en RD entre les bandes n°7 et 8





- Les fissures longues, pouvant atteindre jusqu'à 3 m de longueur. Celles-ci sont toujours de faible largeur et de faible profondeur ;



Photo 10 : Défaut n°40 – Fissure en RD sur la bande n°5



Photo 11 : Défaut n°42 – Fissure en RD sur la bande n°5



Photo 12 : Défaut n°50 – Fissure en RD sur la bande n°1

- Les fissures plus profondes, pouvant atteindre au maximum 2 cm de profondeur ;



Photo 13 : Défaut n°18 – Fissures sur bande n°21  
(profondeur : 1.5cm)



Photo 14 : Défaut n°25 – Fissures sur bande n°14 (profondeur : 1.5cm)





Photo 15 : Défaut n°33 – Fissures sur bande n°10  
(profondeur : 2cm)



Photo 16 : Défaut n°38 – Fissures sur bande n°7 (profondeur :  
2cm)

D'une manière générale, il a pu être constaté que la tenue dans le temps des réparations des fissures au Tixophalte n'est pas garantie. Ce matériau se durcit, sous l'influence probable des effets thermiques, et se décolle ou se fissure sur une grande majorité des réparations.

Les profondeurs et ouvertures de fissures repérées durant le présent relevé visuel restent dans leur grande majorité dans les mêmes ordres de grandeur qu'en 2013. Seuls les défauts n°33 et 38 semblent avoir très légèrement évolué à la hausse (profondeur passant de 1.50 à 2cm)

### 2.2.2.3 Fluage du matériau bitumineux

Le matériau constituant le masque amont du barrage est sujet à des phénomènes de fluage, traduisant le travail thermique du bitume.

Ce défaut se caractérise par un déplacement localisé du matériau, assimilé à une « coulée », sans que cela ne vienne remettre en cause la fonction d'étanchéité du matériau bitumineux. Ces défauts sont assez fortement représentés sur le masque.



Photo 17 : Défaut n°34 – Fluage du matériau bitumineux sur la bande n°7





Ce phénomène de fluage/fissuration du masque est bien connu et visible lors du relevé topographique annuel des cibles situé sur le parement. La cocarde 186 notamment présente régulièrement des déplacements vers le bas et vers l'amont, ceci pouvant être expliqué par la zone de défaut n°19 situé juste au-dessus qui continue d'évoluer lentement.

### 2.2.2.4 Forages

Lors de l'inspection réalisée en 2013, des forages rebouchés avaient été observés sur le masque. Lors de la présente inspection, ces forages ont de nouveaux été repérés. L'examen a permis de confirmer leur bonne tenue dans le temps.



Photo 18 : Défaut n° 17 – Forage rebouché sur la bande n°21 (sans évolution par rapport à 2013)



Photo 19 : Défaut n°23 – Forage rebouché sur la bande n°16 (sans évolution par rapport à 2013)

14



Photo 20 : Défaut n°21 – Forage rebouché sur la bande n°19 (à gauche : 2020 ; à droite : 2013)





Photo 21 : Défaut n°20 – Forage rebouché sur la bande n°19 (à gauche : 2020 ; à droite : 2013)



Photo 22 : Défaut n°22 – Forage rebouché sur la bande n°18 (à gauche : 2020 ; à droite : 2013)

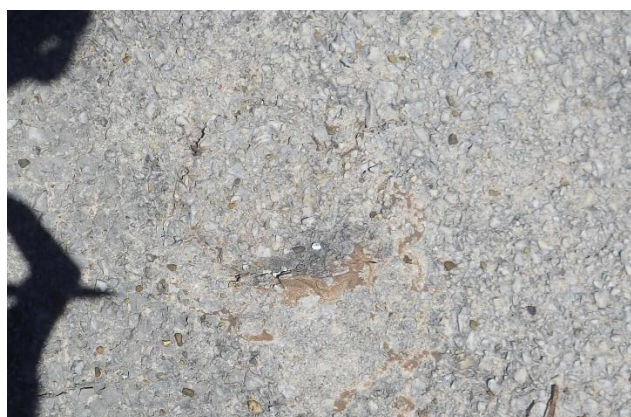


Photo 23 : Défaut n°49 – Forage rebouché sur la bande n°1 (sans évolution par rapport à 2013)



Photo 24 : Défaut n°46 – Forage rebouché sur la bande n°3 (sans évolution par rapport à 2013)





Photo 25 : Défaut n°45 – Forage rebouché sur la bande n°4 (sans évolution par rapport à 2013)

Les défauts n°20, 21 et 22 apparaissent moins visibles qu'en 2013, comme si leur rebouchage avait été soit un peu lessivé en partie supérieure par le plan d'eau soit avait tassé à l'intérieur de leur forage. Ceci n'amène pas de commentaire outre mesure. Le suivi de leur évolution est à poursuivre lors des prochains relevés effectués par l'exploitant.

### 2.2.2.5 Trous

L'inspection du masque en 2013 avait permis de répertorier de petites cavités humides le jour de la visite.

Ces dernières ont été retrouvées lors de la présente inspection et sont sans évolution apparente (cavité sèche le jour de la visite).

Compte tenu de la petite taille de ces cavités, ces désordres sont actuellement de très faible gravité.

Il est recommandé de poursuivre leur suivi. Suivant les évolutions et informations recueillies, une expertise plus poussée pourra être programmée.



Photo 26 : Défaut n°37 – Petites ouvertures dans le masque sur la bande n°7



### 2.2.2.6 Défauts de compactage

En extrémité rive droite, sur les 7 premières bandes de revêtement, l'aspect du masque montre des différences de relief, avec un enfoncement plus prononcé du masque au droit de la doucine.

Ces variations sont probablement dues à l'utilisation d'engins de compactage différents. En effet, ce secteur a fait l'objet d'un compactage à l'aide de moyens plus légers, ce qui peut expliquer les différences de rendu en superficie.



Photo 27 : Défaut n°39 – Différences de tassement sur la bande n°5

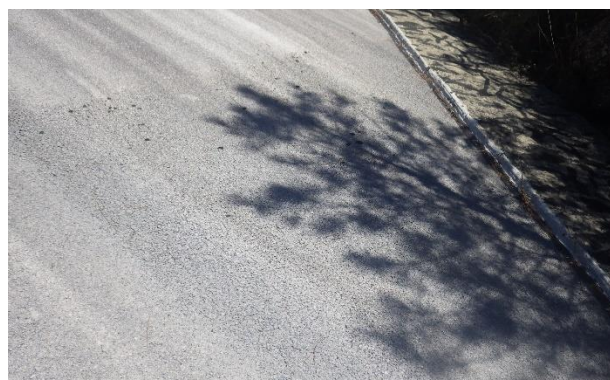


Photo 28 : Défaut n°41 – Différences de tassement sur la bande n°4



Photo 29 : Défaut n°47 – Différences de tassement sur la bande n°2



Photo 30 : Défaut n°48 – Différences de tassement sur la bande n°1

### 2.2.2.7 Défauts d'étanchéité

Des décollements ponctuels de l'étanchéité périphérique, au droit des doucines et de la plinthe, sont observables en plusieurs endroits.





Photo 31 : Défaut n°1 – Décollement au niveau de la doucine  
RG



Photo 32 : Défaut n°2 – Décollement au niveau de la doucine  
RG

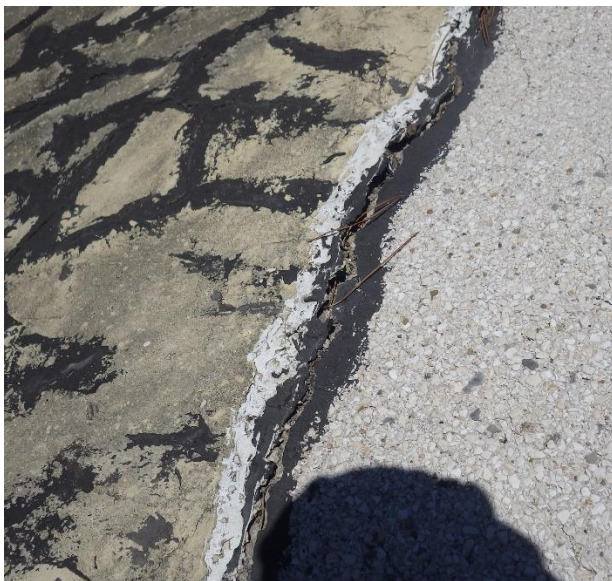


Photo 33 : Défaut n°4 – Décollement au niveau de la doucine  
RG



Photo 34 : Défaut n°7 – Décollement au niveau de la doucine  
RG





Photo 35 : Défaut n°13 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°22 (1m de long)



Photo 36 : Défaut n°14 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°21 (15cm de long)



Photo 37 : Défaut n°15 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°20 (30cm de long)



Photo 38 : Défaut n°24 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°16 (15cm de long)

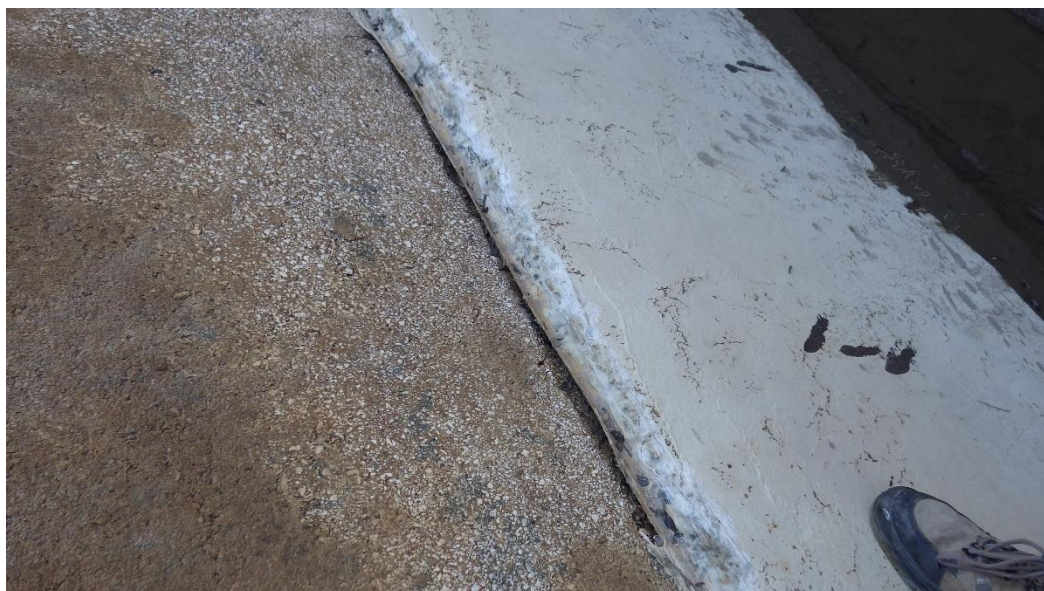


Photo 39 : Défaut n°28 – Décollement au niveau de la plinthe sur la bande n°10 (90cm de long)

On note également que l'étanchéité entre le mur de couronnement et le masque ne joue plus parfaitement son rôle. Ce défaut est généralisé sur toute la longueur en crête du barrage.





Photo 40 : Défaut n°51 – Décollement de l'étanchéité entre le mur de couronnement et le masque en partie supérieure



Photo 41 : Décollement de l'étanchéité entre le mur de couronnement et le masque en partie supérieure



Photo 42 : Décollement de l'étanchéité entre le mur de couronnement et le masque en partie supérieure



Photo 43 : Décollement de l'étanchéité entre le mur de couronnement et le masque en partie supérieure





Au niveau de la jonction du masque avec le couronnement, il est possible de constater de longs décrochements du bitume. Il s'agit en réalité d'une surépaisseur, qui n'impacte pas à proprement parler l'étanchéité du masque.

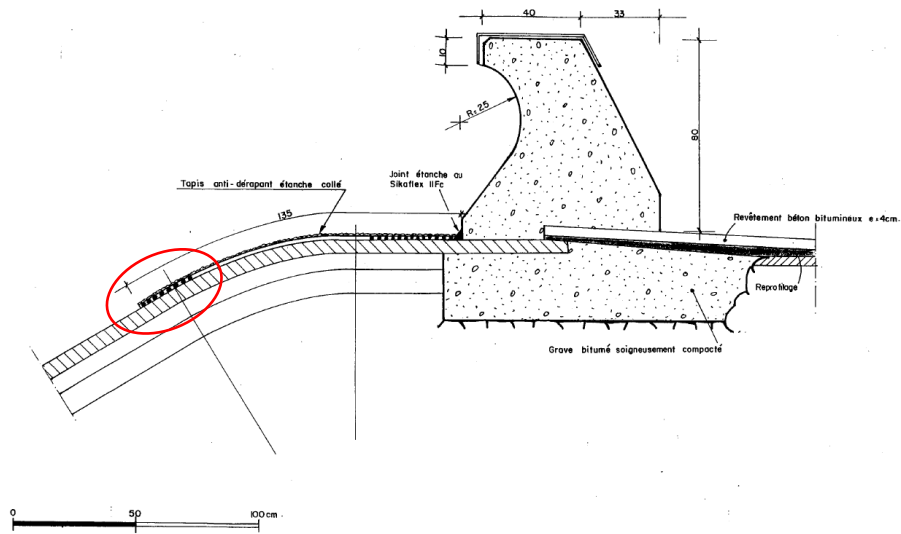


Figure 2 : Plan de détail de l'étanchéité au niveau du couronnement

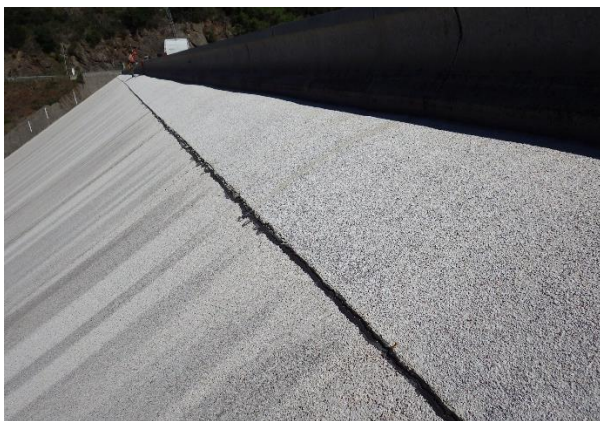


Photo 44 : Décollement de la surépaisseur



Photo 45 : Décollement de la surépaisseur



Photo 46 : Décollement de la surépaisseur



Photo 47 : Décollement de la surépaisseur



Sur cette même partie supérieure du masque, on relève également la présence de joints ouverts.



Photo 48 : Défaut n°53 – Ouverture de l'étanchéité en partie supérieure, dans le sens vertical, sur la bande n°14



Photo 49 : Défaut n°54 – Ouverture de l'étanchéité en partie supérieure, dans le sens vertical, sur la bande n°26

### 2.2.2.8 Fissuration des doucines

Les doucines RD et RG ont été réparées de manière importante puisqu'une très grande partie de leur surface a été reprise avec l'application de Tixophalte pour étanchéifier les fissures.

Cependant, on peut noter une re-fissuration quasi-systématique, au niveau des zones réparées, que ce soit en RD ou en RG.