



OUVRAGES EN MAÇONNERIE

JOURNÉE TECHNIQUE DU 12/10/2015



SOMMAIRE

Chapitre 1. Le patrimoine ferroviaire

Chapitre 2. La surveillance des ouvrages en maçonnerie

Chapitre 3. La réparation des ouvrages en maçonnerie

Chapitre 4. Le confortement des appuis des ponts de la Vendée

Chapitre 5. Le confortement du viaduc de Cinq Mars La Pile

Chapitre 6. Conclusion

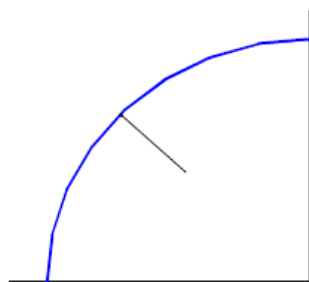
LE PATRIMOINE FERROVIAIRE

Les ponts ferroviaires

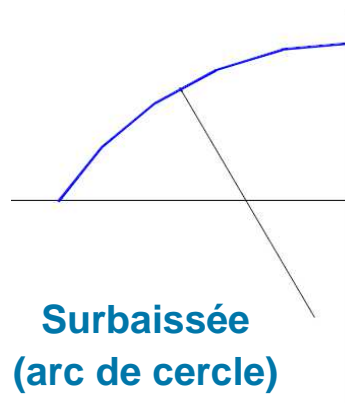
- 31 800 PRA dont 12 750 PRA en maçonnerie (10 000 plein cintre et 2 750 à voûte surbaissée)
- 58 000 POSV (voûtes, buses, dalots...)

Les ouvrages de franchissement

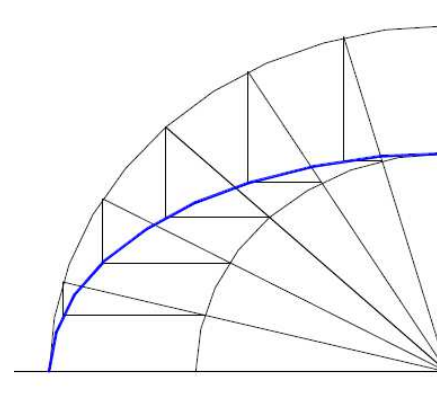
- 10 600 PRO dont 2 570 PRO en maçonnerie (840 plein cintre et 1 730 à voûte surbaissée)



Plein cintre



Surbaissée
(arc de cercle)

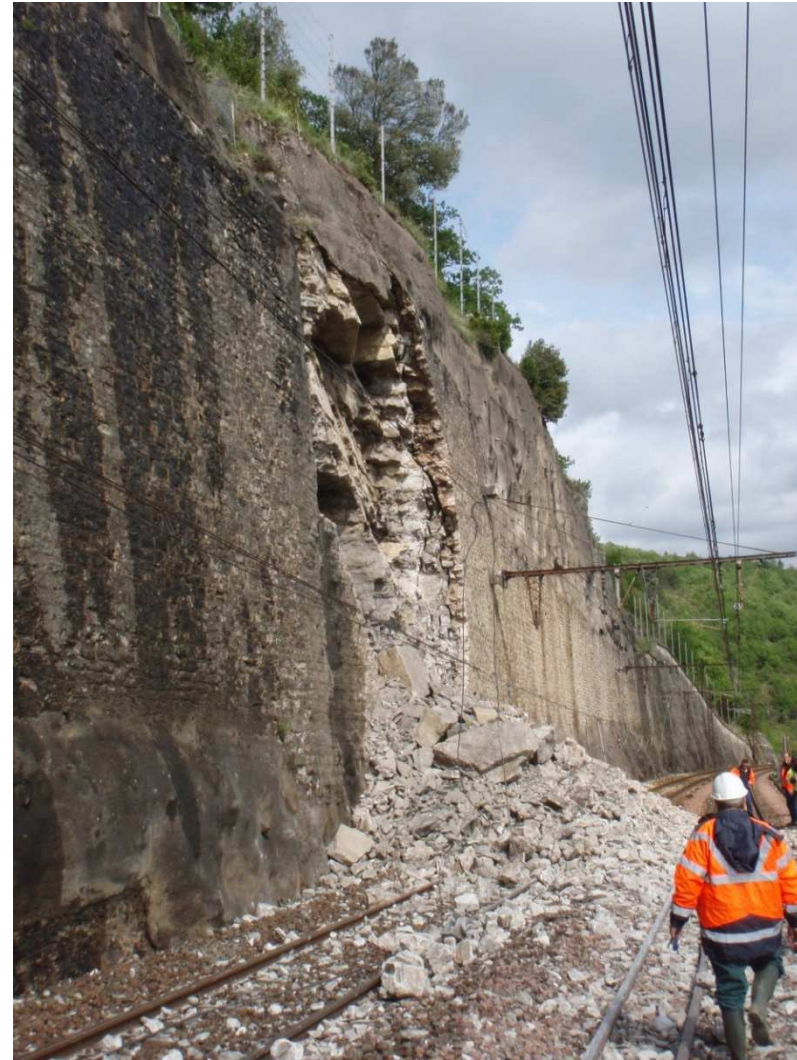


Surbaissée
(anse de panier)

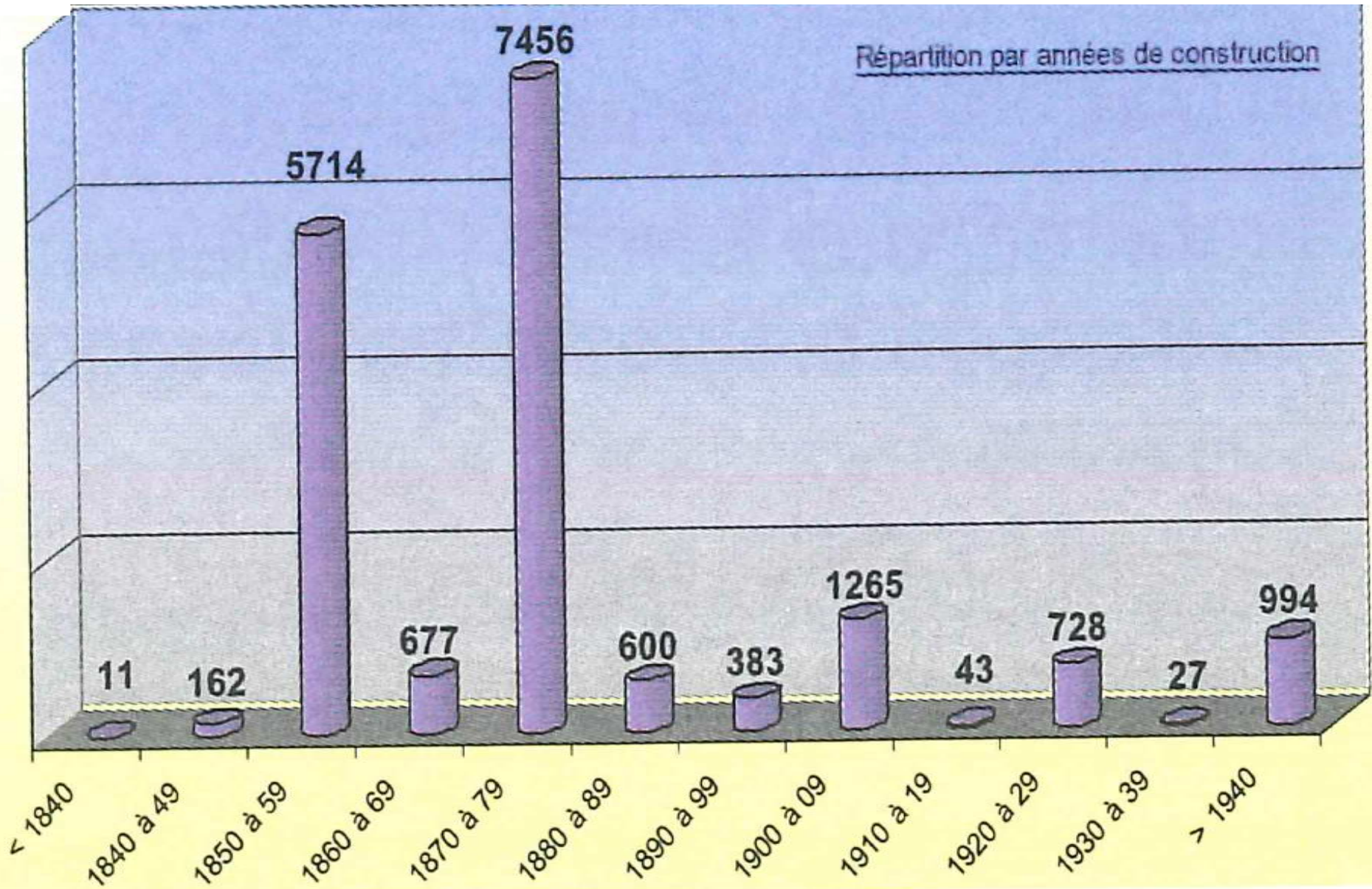
LE PATRIMOINE FERROVIAIRE

Les murs (pour mémoire)

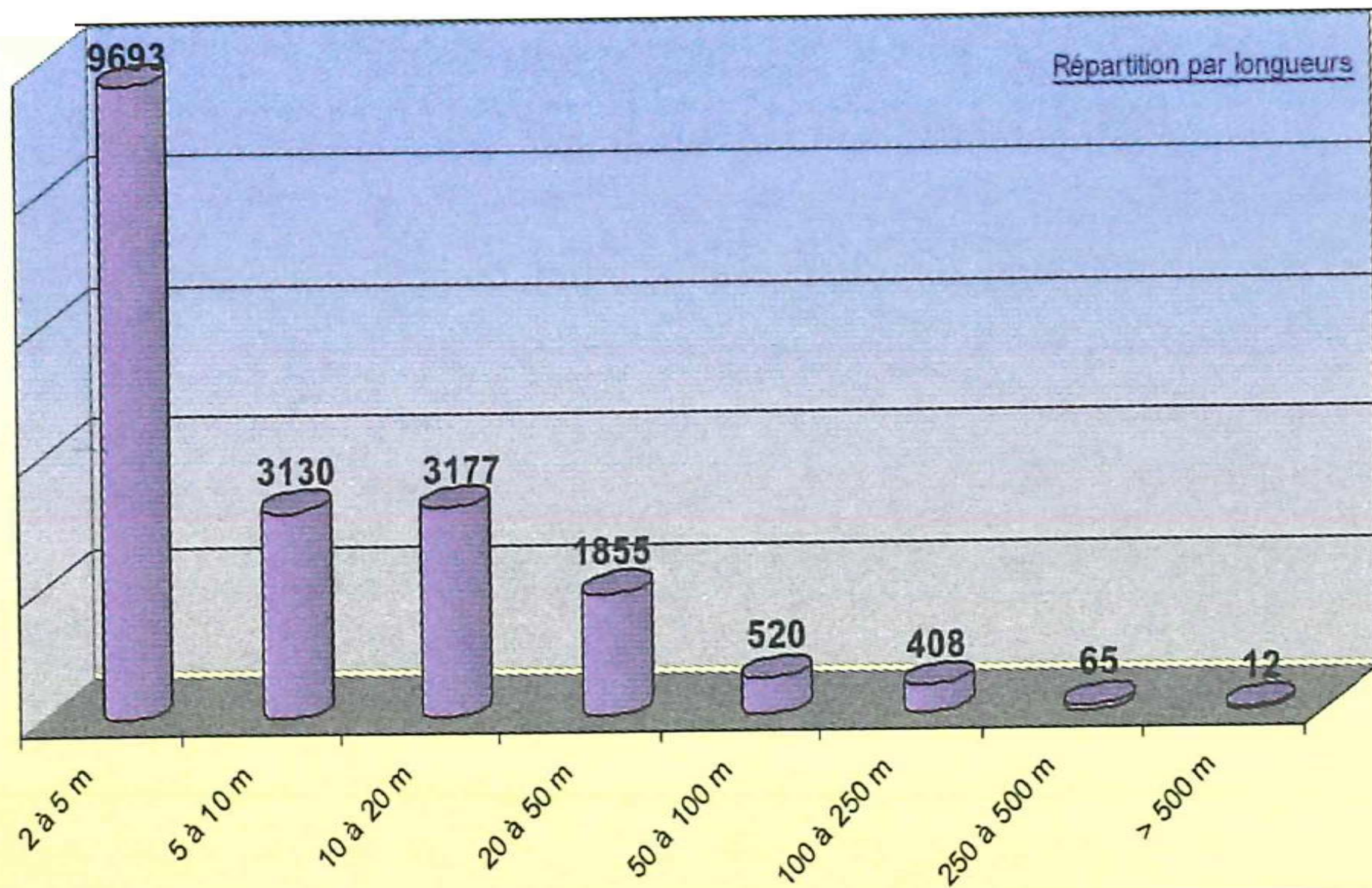
- 1 760 km de murs de soutènement
- 250 km de murs de revêtement
- 330 km de perrés maçonnés



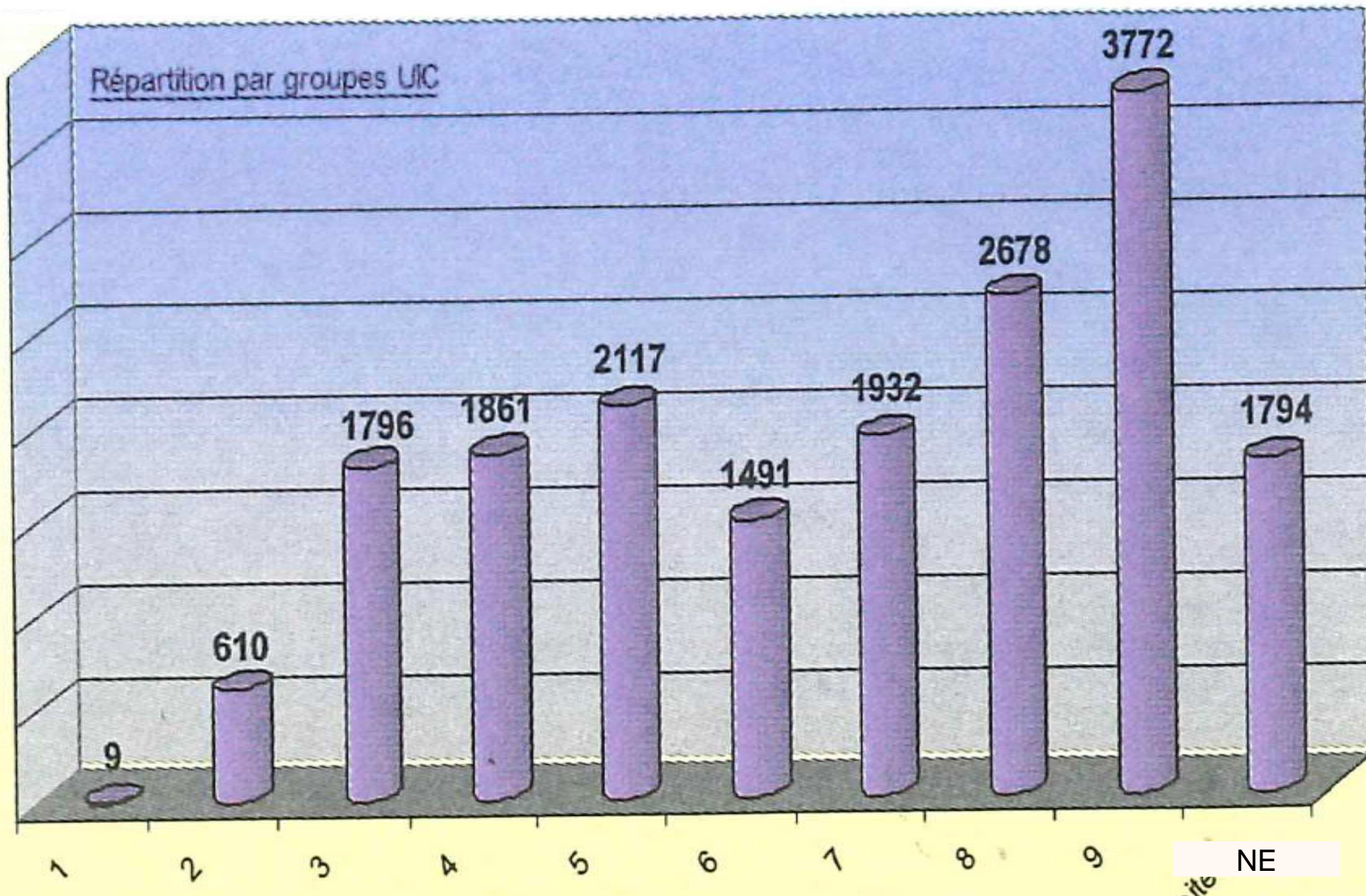
LE PATRIMOINE FERROVIAIRE



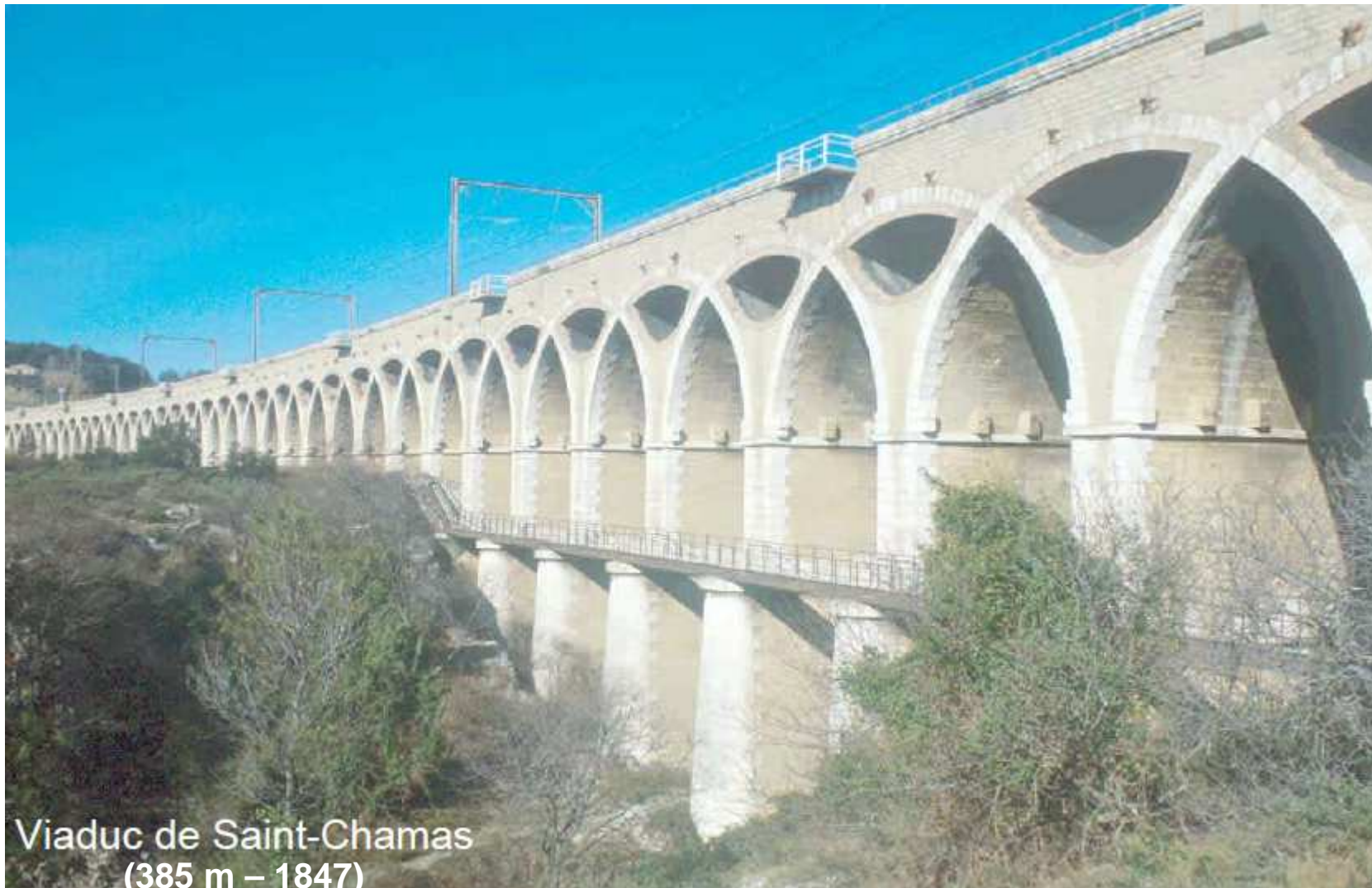
LE PATRIMOINE FERROVIAIRE



LE PATRIMOINE FERROVIAIRE



LE PATRIMOINE FERROVIAIRE



Viaduc de Saint-Chamas
(385 m – 1847)

LE PATRIMOINE FERROVIAIRE



Viaduc de Chaumont
(654 m – 1856)

LE PATRIMOINE FERROVIAIRE



LE PATRIMOINE FERROVIAIRE

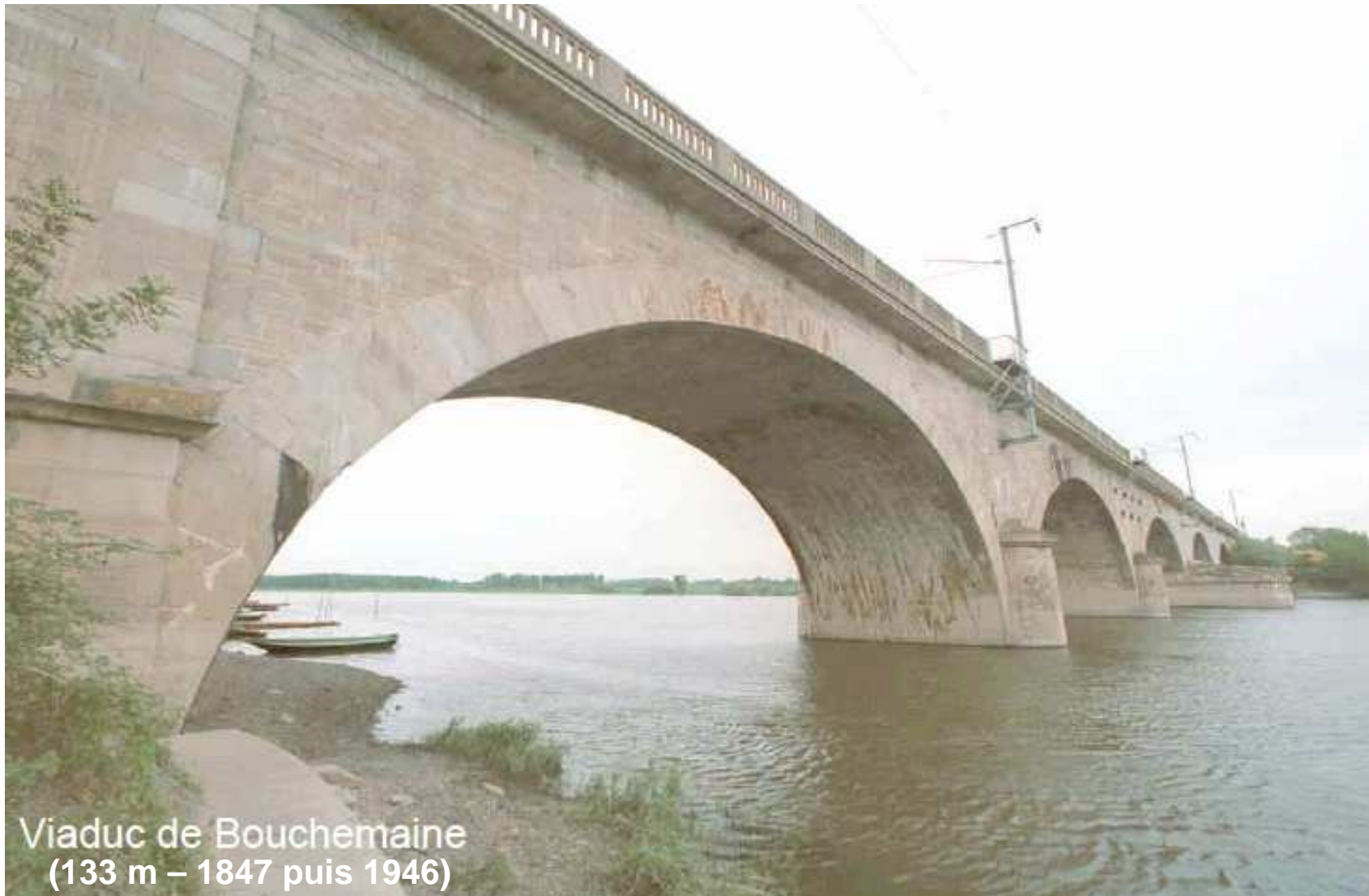


Viaduc de Chamborigaud
(384 m – 1867)

LE PATRIMOINE FERROVIAIRE



LE PATRIMOINE FERROVIAIRE

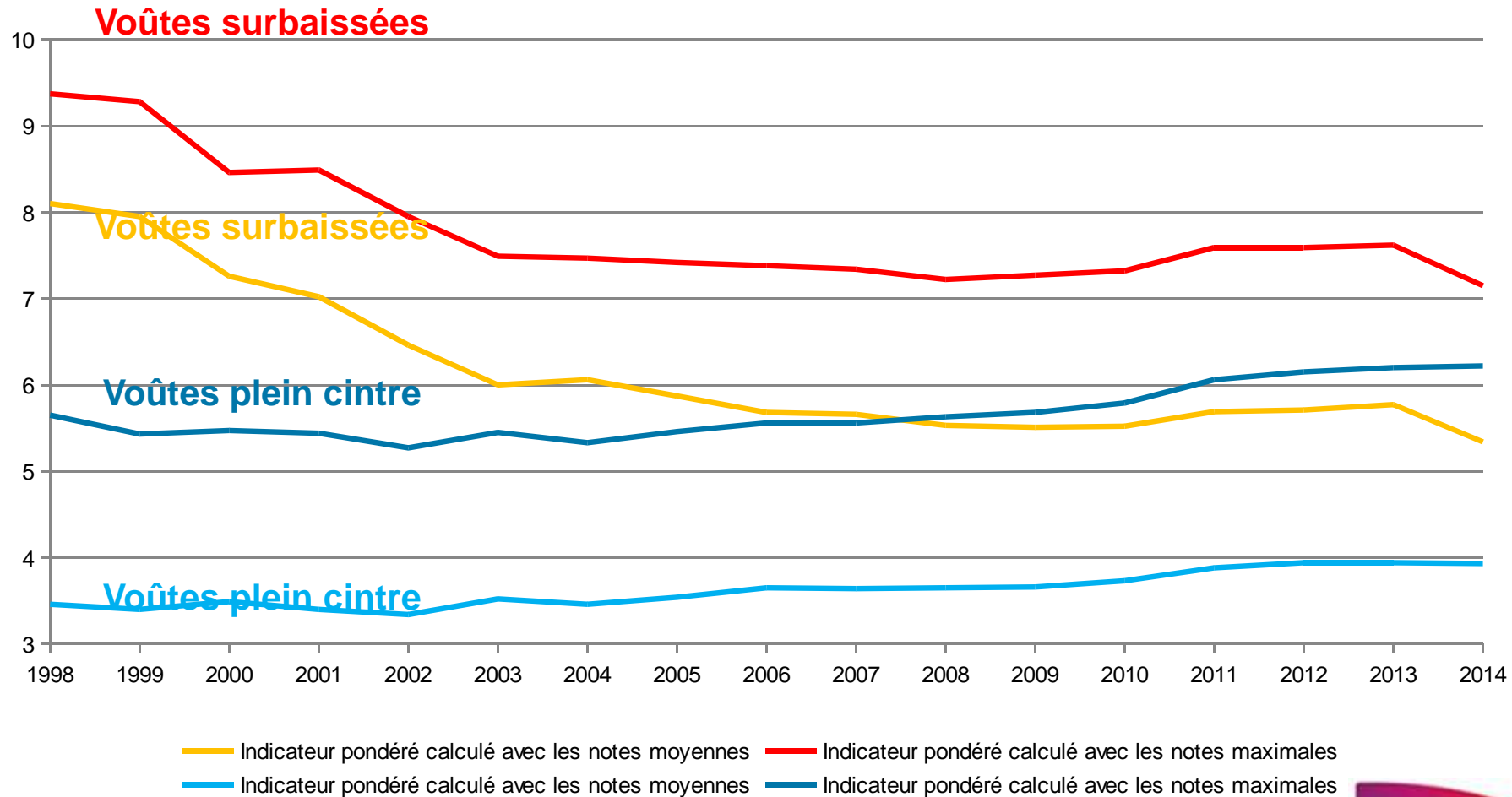


Viaduc de Bouchemaine
(133 m – 1847 puis 1946)

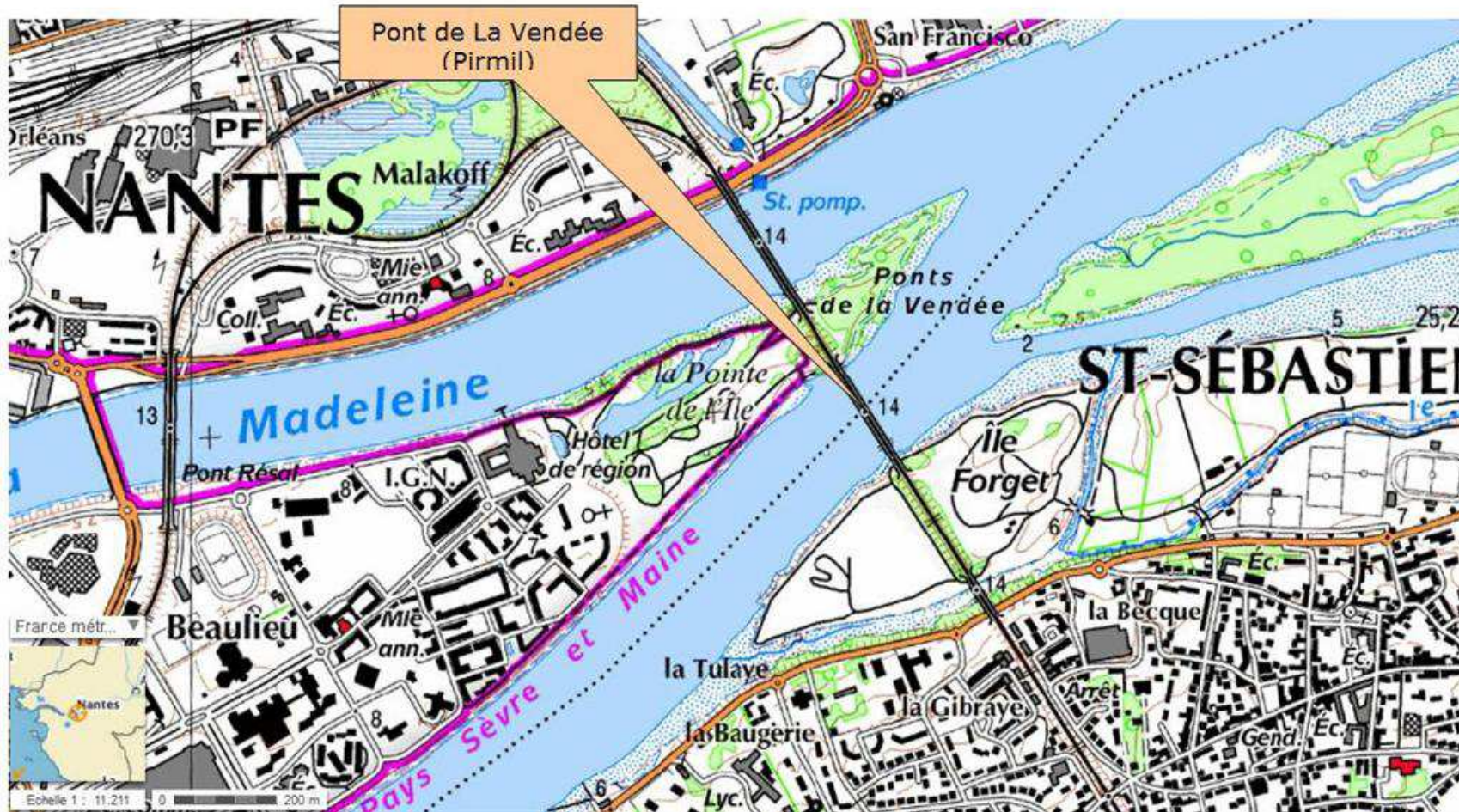
LA SURVEILLANCE DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE

- La surveillance des ponts ferroviaires est régie par le référentiel IN 1253, qui préconise pour les ponts-rails en maçonnerie :
 - Une inspection détaillée tous les 6 ans (tous les 3 ans pour les voûtes surbaissées dont une des fondations est particulièrement exposée)
 - Une visite intermédiaire tous les 3 ans (tous les ans pour les voûtes surbaissées dont une des fondations est particulièrement exposée)
 - Une inspection subaquatique au moins tous les 6 ans
- Les avaries (disjointoiement et épaufrage, défaut d'étanchéité, fissure et fracture, désorganisation et dislocation, déformation...) sont rapatriées, sous la forme d'une fiche de cotation, dans la base de données KOALA.
L'analyse de la cotation des ouvrages permet de mesurer l'évolution de l'état du patrimoine et d'orienter la politique de maintenance. Pour les ouvrages ferroviaires en maçonnerie, un effort spécifique a été mené sur les ponts à voûte surbaissée dont la sensibilité aux circulations ferroviaires est souvent accrue par la faible épaisseur de matériau de remplissage.

LA SURVEILLANCE DES OUVRAGES EN MAÇONNERIE



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

- Viaduc en maçonnerie sur le bras de la Madeleine (1863) : longueur de 322 m, comportant 9 arches elliptiques de 30 m d'ouverture,



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

- Viaduc en béton armé sur le bras de Pirmil de 240 m, comportant 7 travées



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Contexte géologique

- Les terrains situés sous le fond du lit de la Loire sont composés d'alluvions sableuses et argileuses surmontant le substratum schisteux.
- L'épaisseur des alluvions est de l'ordre de 20 mètres.

Description des fondations

- massifs de fondation réalisés au moyen de caissons métalliques à extrémités hémicylindriques, mis en œuvre par fonçage à l'air comprimé.
- caissons de 12,4 m x 4,4 m remplis à leur base, dans la chambre de travail (environ 3 m de hauteur), par du béton avec ciment de Portland.
- Au-dessus de la chambre de travail, à l'intérieur des hausses en tôle de 5 à 8 mm, le remplissage a été réalisé par du béton de chaux additionnée de 1/5 à 2/5 de ciment sur 10 m environ.
- partie haute des massifs constituée par de la maçonnerie ceinturée par un mur en moellons jusqu'à l'arase supérieure des hausses. Les cheminées ont été comblées avec du béton.

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Les fondations traversent une alternance de couche de sable et d'argile d'épaisseur très variable.

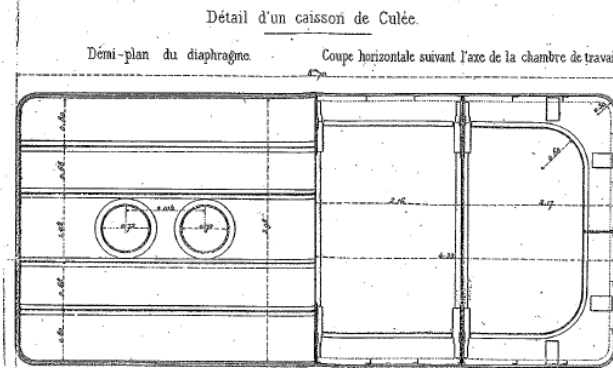
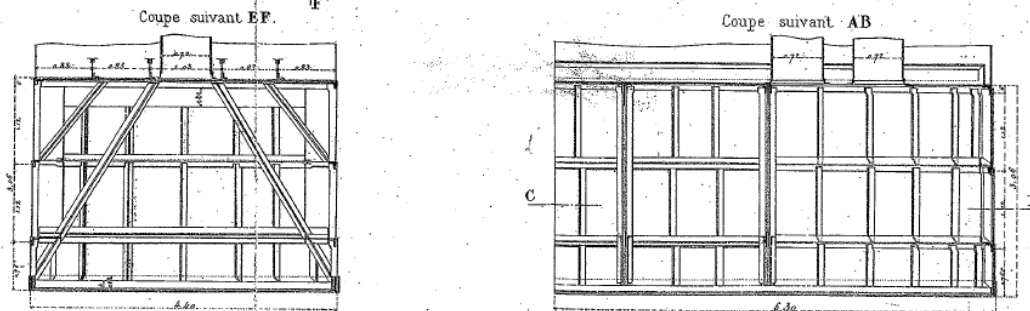
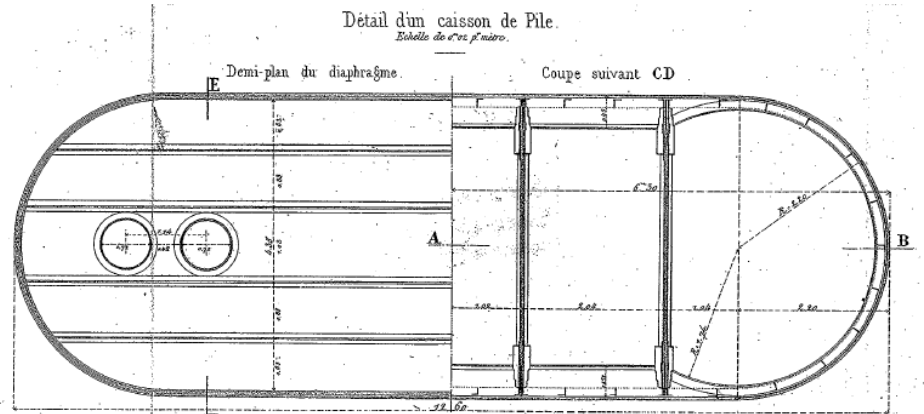
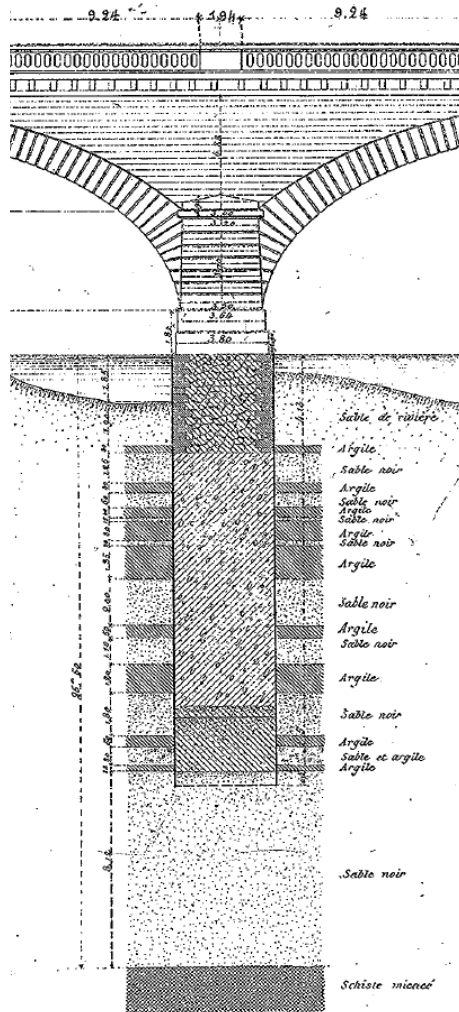
Sur le bras de la Madeleine

- les appuis P1 et P2 reposent directement sur le toit du schiste micacé,
- les appuis P3 à P8 reposent sur une alternance d'argile, de sable, de gravier et de galets (épaisseur résiduelle d'alluvions de 2,3 à 6,6m sous la base de la fondation)

Sur le bras de Pirmil

- les appuis P1 à P6, d'une hauteur de 13,20 à 17,20 m, reposent sur une alternance de sable et de gravier. Le schiste micacé se situe entre 7,3 à 10,50 m en contrebas de l'assise des caissons.

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Les 2 ouvrages bombardés en 1944.

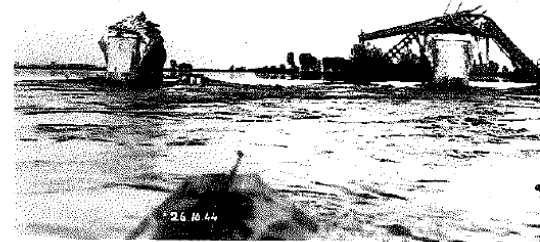
- viaduc sur le bras de la Madeleine : destruction totale à partir de la 7ème arche (3 arches, 2 piles, une partie de la culée),
- viaduc sur le bras de Pirmil : effondrement de toutes les arches, ruine ou déversement des piles.
- nouveaux appuis reconstruits dès octobre 1946 sur les fondations des piles détruites ou déversées, après recépage des fondations existantes jusqu'à retrouver la maçonnerie saine.

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE



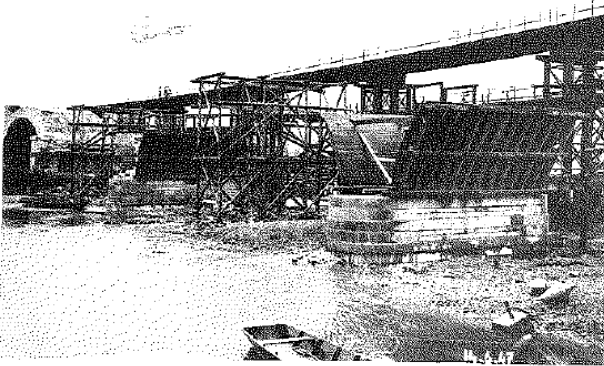
*Vue d'ensemble de l'ouvrage
et des destructions.*

*Vue d'une pile détruite
après déblaiement.*

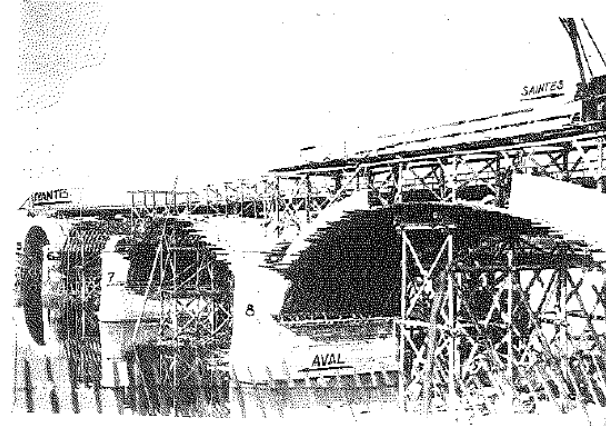


Détail des destructions d'une des arches.

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE



*Reconstruction des 3 arches
en mars 1948.*

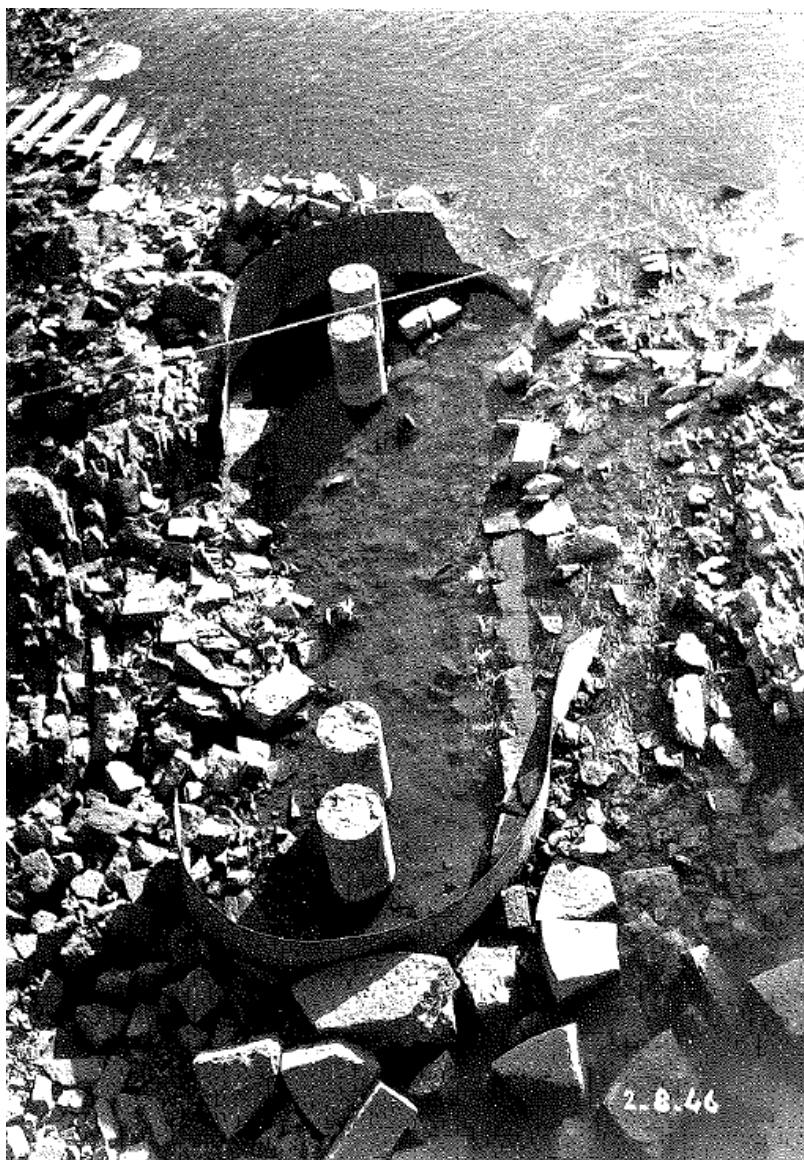


*Reconstruction des 3 arches
sur cintres en rails.*

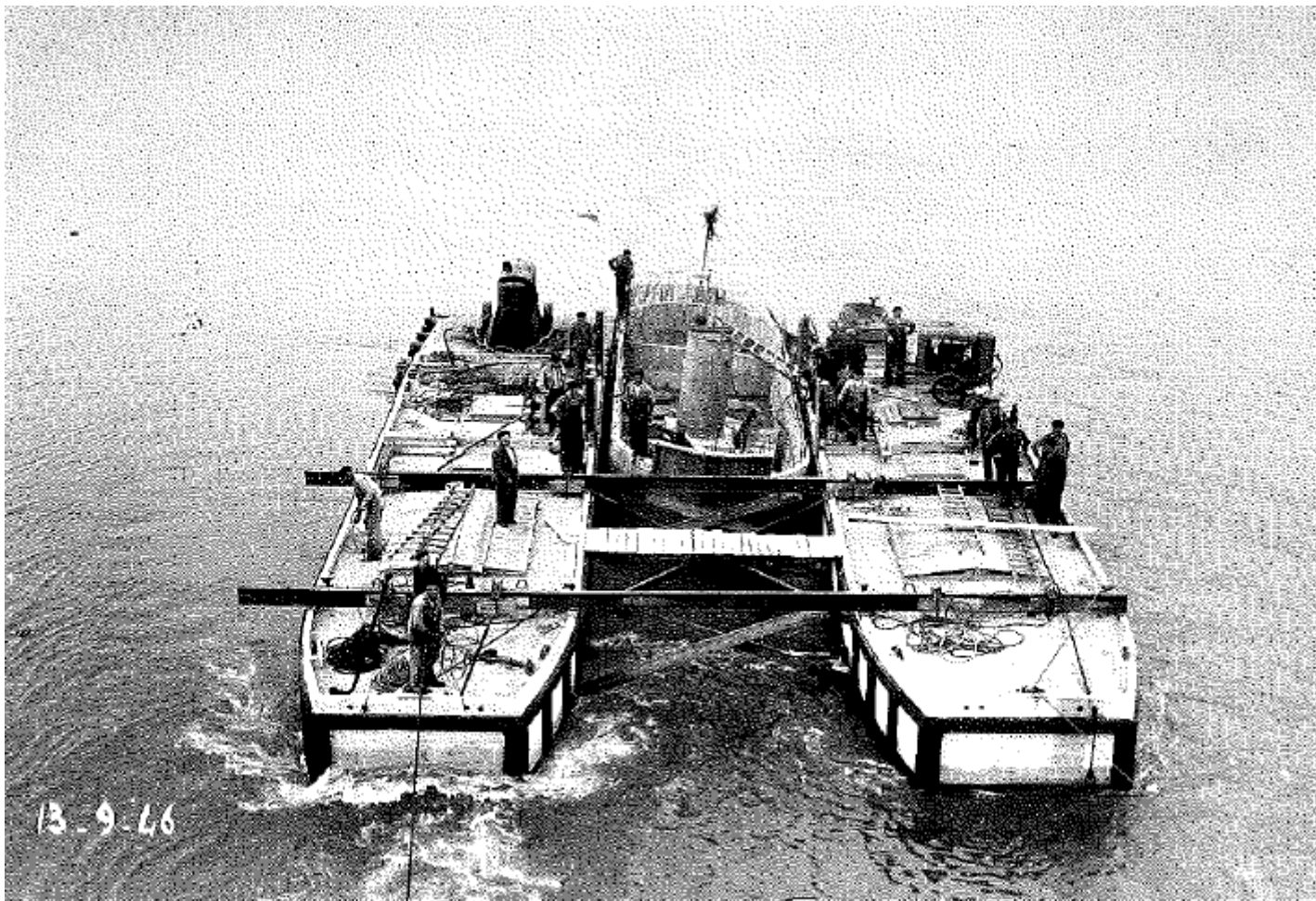
*Montage des cintres
des naissances des voûtes.*



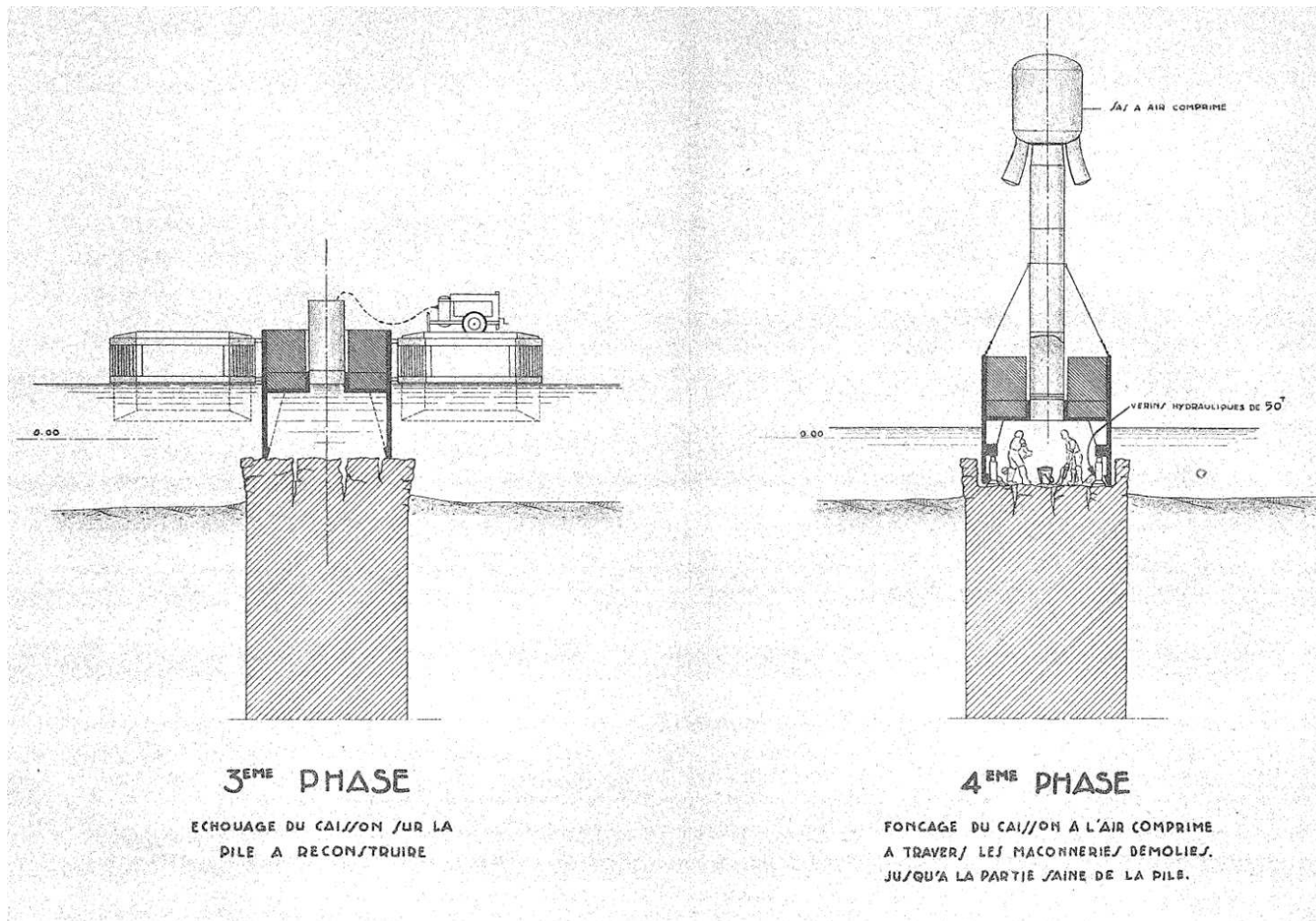
LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE



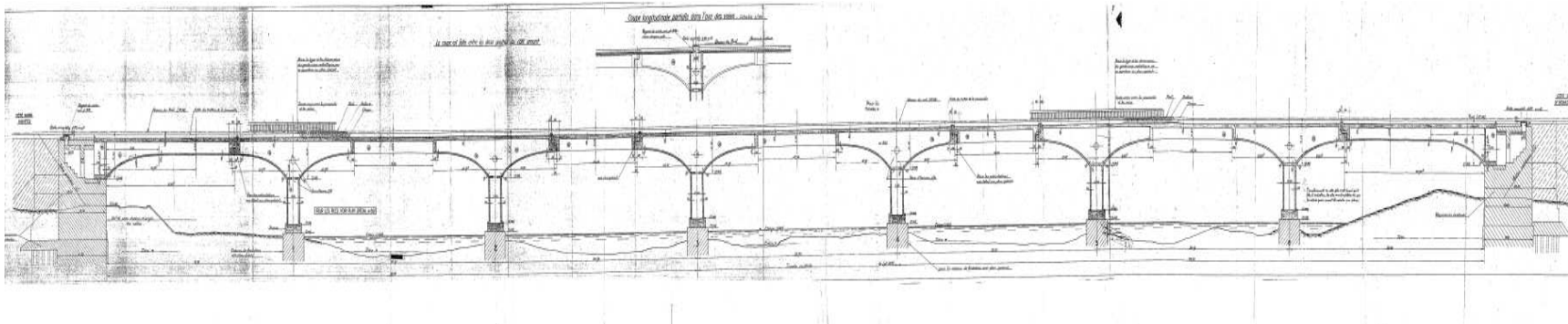
LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

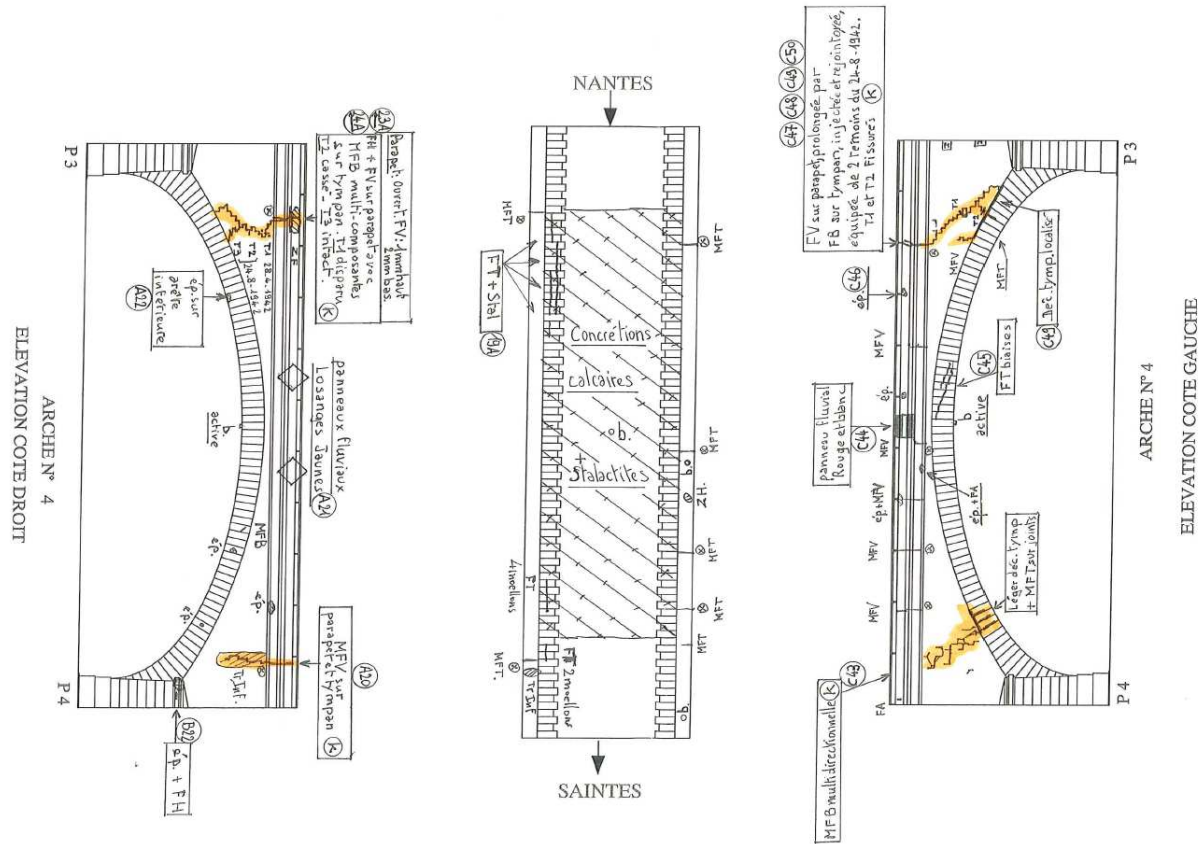
Reconstruction des ouvrages

- L'ouvrage sur le bras de la Madeleine a été reconstruit en béton armé avec parement en moellons
- L'ouvrage sur le bras Pirmil est de type Cantilever en béton armé



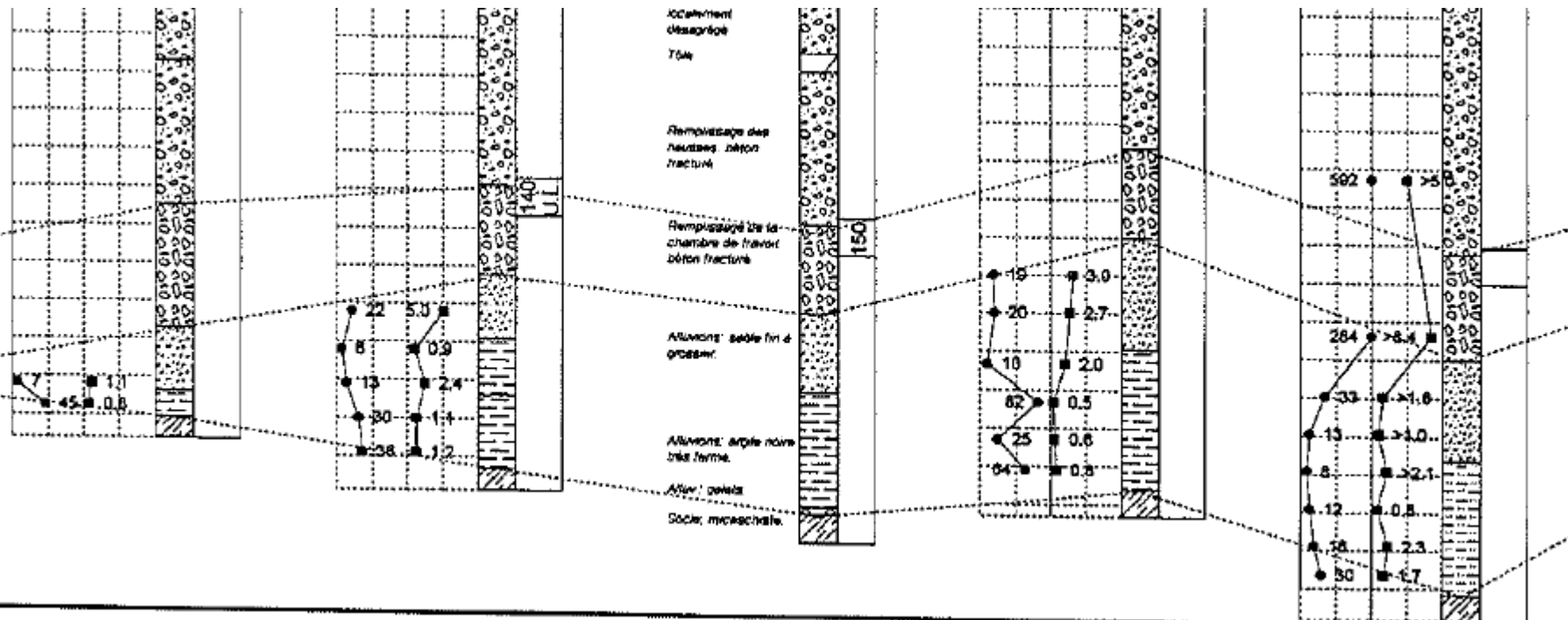
LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

- fissures et fractures sur les tympans au niveau des reins des voûtes sur le bras de la madeleine



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

- ▶ tassements différentiels dus au système de fondation hétérogène (assise sur substratum rocheux ou alluvions argileuses)

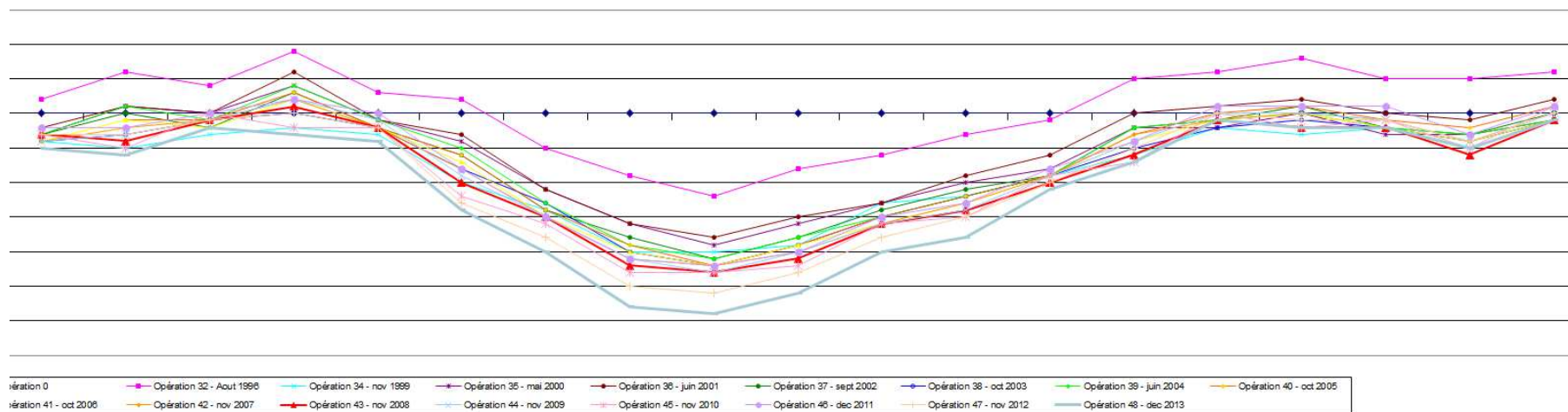


LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

- essais pressiométriques réalisés dans les sols d'assise alluvionnaires : valeurs mesurées en général médiocres au droit du bras de la Madeleine (couches argileuses en particulier) et nettement meilleures au droit du bras de Pirmil.
- pression limite pressiométrique pl^* de l'ordre de 0.5 à 1.2 MPa dans les couches argileuses tandis qu'elle est en moyenne de l'ordre de 2.5 à 3 MPa dans les horizons sableux (bras de Pirmil essentiellement)
- Les documents d'archive indiquent que la pression appliquée au sol sous l'assise des massifs de fondation est de l'ordre de 0.6 à 0.7 MPa.
- Pour les appuis du viaduc sur le bras de la Madeleine, ce taux de travail du sol est très élevé vis-à-vis de la résistance mécanique médiocre des couches argileuses. Les appuis ne doivent leur « salut » qu'à l'effet de répartition et de diffusion des efforts créé par la couche de sable compact dans laquelle sont ancrés les caissons. Ce « matelas » permet de réduire les pressions appliquées à la couche d'argile.
- Il convient également de remarquer que la contrainte de préconsolidation mesurée sur des échantillons d'argile prélevés dans la pile P4 entre 20 et 21 mètres de profondeur, soit environ 2.5 mètre sous l'assise du caisson, est de l'ordre de 0.6 MPa. On peut en déduire que toute augmentation des charges permanentes se traduirait par des tassements conséquents.

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

- En fin de construction : tassement >40cm des piles P4, P5 et P6 (consolidation des couches argileuses et taux de travail proche de la pression de fluage)
- NP de 2000 à 2010 : légère évolution des tassements (zone centrale P4, P5, P6)



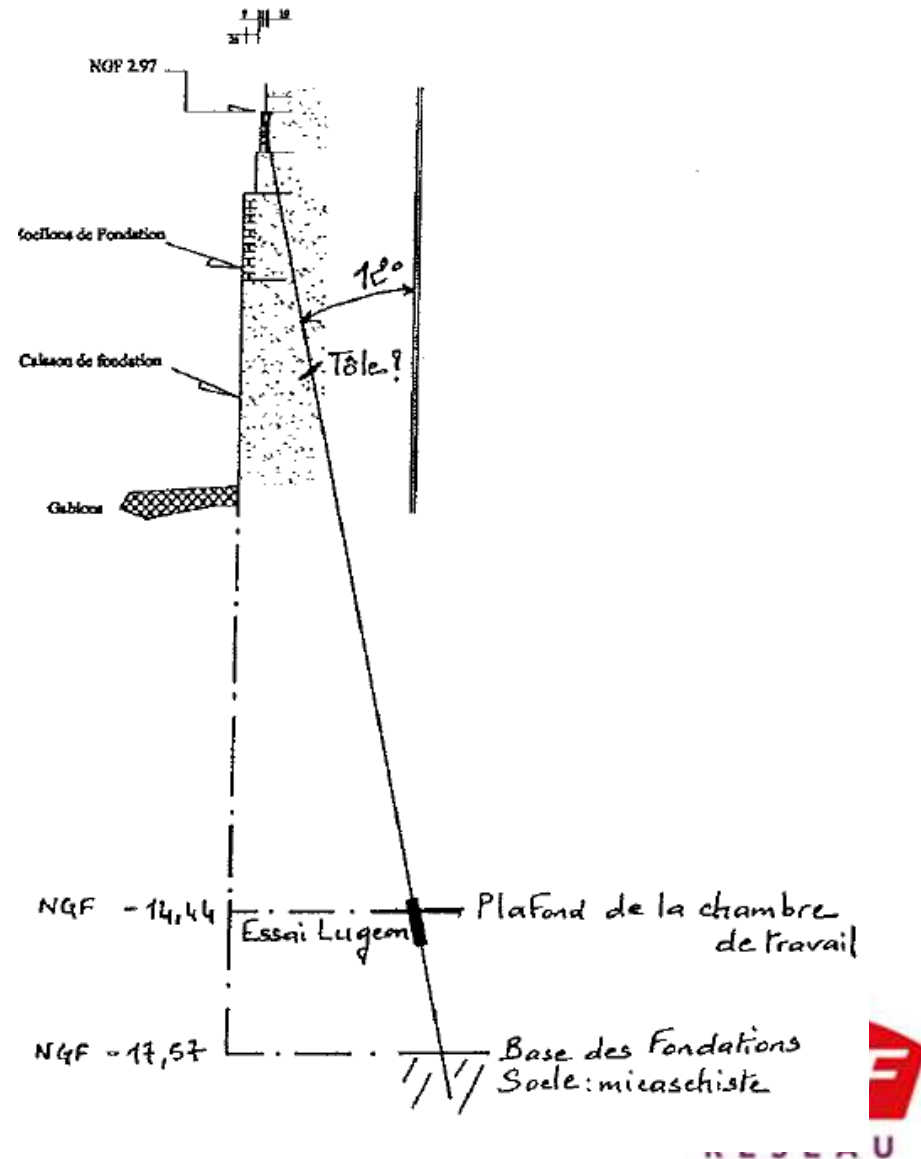
LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Fosse d'érosion à l'aval du Pont sur le bras de Pirmil :

- relevés bathymétriques au début des années 80 : mise en évidence d'une fosse d'érosion située immédiatement en aval des ouvrages
- sur le bras de Pirmil : la fosse atteint le substratum rocheux.
 - ❖ forte pente des talus de la fosse, atteignant localement le 1/1,
 - ❖ caractère régressif de l'érosion,
- construction, en 1982, d'un radier déversoir en gabions et en enrochements pour stopper la progression vers l'amont des fosses avales et l'augmentation des pentes des talus aux voisinages des appuis (présence de matériaux érodables sous la base des fondations)

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

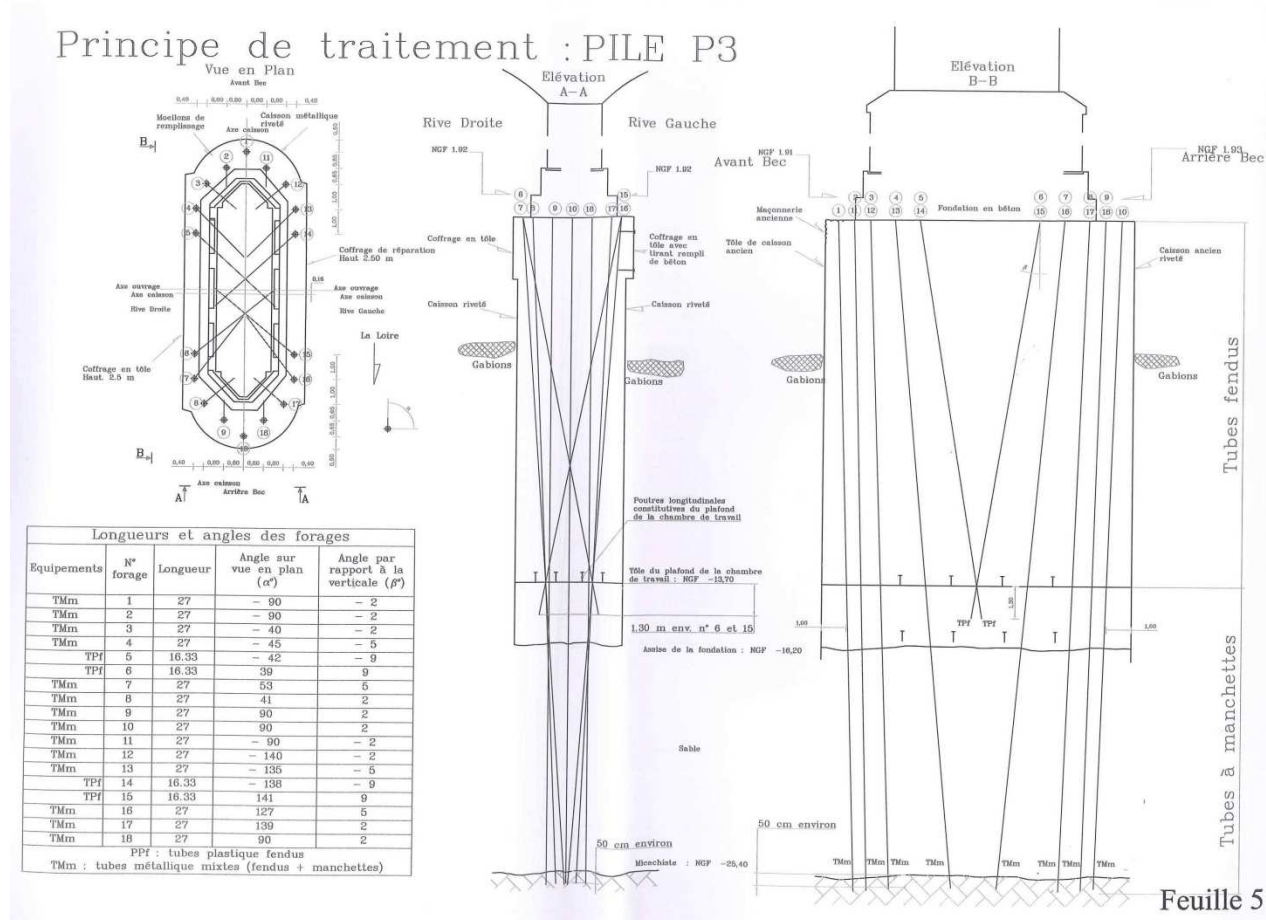
- Les sondages carottés montrent que le mortier de liaison des éléments de remplissage des caissons des deux ouvrages est en grande partie altéré (élément disjoints, cavités, béton morcelé, fissures...).
- Les essais "Lugeon", réalisés au niveau des chambres de travail, confirment cet état de fracture ; aucun d'eux n'a pu être mené à son terme.



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Consistance des travaux de régénération envisagés

- Injection de régénération de la maçonnerie constitutive des fondations



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Consistance des travaux de régénération envisagés

- Rejointoiements localisés et réparations ponctuelles
- Mise en place de témoins métalliques pour le suivi de la fracturation



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Particularités des travaux sur la Loire

- crues potentielles : novembre à mars
- Marnage important
- Inversion régulière du sens du courant
- Fosse d'érosion à l'aval du pont (Pirmil)
- Passes navigables à maintenir sur le bras de Pirmil



Le St-Germain, navire sablier passant quotidiennement sous le pont du bras de Pirmil

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Procédures administratives et foncières

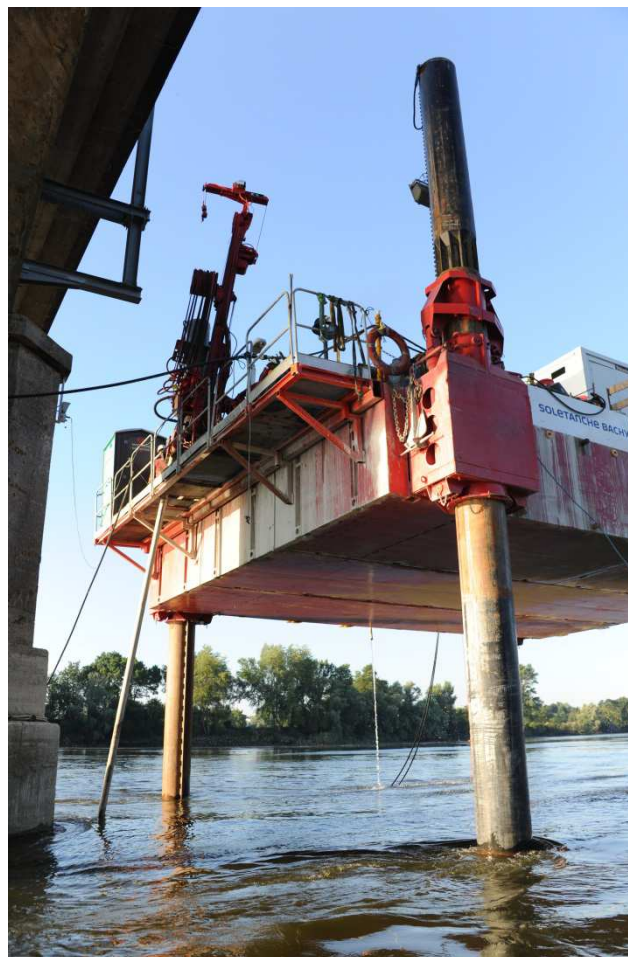
Démarches administratives	Autorité administrative	Objet
Dossier de déclaration au titre de la loi sur l'eau	DDTM44 CODERST PREFECTURE	<ul style="list-style-type: none"> Régularisation de l'existence des ouvrages de franchissement ferroviaire sur la Loire dits « ponts de la Vendée » au titre de la loi sur l'eau. Déclaration des opérations de régénération des fondations des piles de ponts.
Arrêté circulation stationnement	Ville de Nantes	<ul style="list-style-type: none"> chemin des bateliers (piéton et cycle) traversé par l'accès chantier situé sur la cale San Francisco boulevard de Sarrebruck
Convention d'occupation	DDTM 44	<ul style="list-style-type: none"> installation de chantier sur la cale San Francisco et quai Wilson (domaine fluvial)
Permis de stationnement	Ville de Nantes	<ul style="list-style-type: none"> implantation d'un poteau électrique sur le domaine public pour l'alimentation des installations de chantier
Arrêté bruit	Préfecture et ville de St Sébastien	<ul style="list-style-type: none"> nuisances sonores
Titre de navigation	DDTM 44	<ul style="list-style-type: none"> délivrance d'un titre de navigation pour le ponton flottant

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

- Utilisation d'un ponton « jack up » pour permettre de disposer d'un niveau fixe pour l'atelier de forage



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

- Utilisation d'un bateau pousseur muni d'un bras pour permettre les déplacements du ponton et l'approvisionnement en ciment et bentonite
- Utilisation d'une barque motorisée pour le déplacement du personnel



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Dispositions prévues au DCE : forage et équipement

- Perforations exécutées avec tubage à l'avancement, suivant la méthode « OD » - tige tube (au diamètre compris entre 90 et 110 mm)
- Interdiction du forage à l'air
- mise en place de tubes mixte à manchettes (T.M.) avec coulis de gaine ou tubes fendus (métalliques ou PVC)
- ❖ Manchettes dans les alluvions
- ❖ Tubes fendus sur la hauteur des caissons
- ❖ Chaussettes en tête, au 1/3 et au 2/3 de la hauteur du caisson (isolement des zones d'injection)

- coulis à base de ciment avec ajout de bentonite.
- Dosage des coulis à adapter aux conditions d'injectabilité des milieux rencontrés, tout en restant dosés le plus possible en ciment. (rapports C/E compris entre 1,5 et 0,5 avec ajout de bentonite pour la stabilité).

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Dispositions prévues au DCE : coulis

- coulis à base de ciment avec ajout de bentonite.
- Dosage des coulis à adapter aux conditions d'injectabilité des milieux rencontrés, tout en restant dosés le plus possible en ciment.
- rapports C/E compris entre 1,5 et 0,5 avec ajout de bentonite entre 2 et 5%.

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Dispositions prévues au DCE : injection

- Dans les tubes à manchettes :
 - ❖ Au double obturateur par passes remontantes
 - ❖ Lavage tube après chaque injection
 - ❖ Critères d'arrêt : 0,8 Mpa, 150l par manchette à la 1^{ère} passe, 50l à la 2^{ème}

- Dans les tubes fendus :
 - ❖ À l'obturateur simple au droit d'une chaussette
 - ❖ En commençant par le bas
 - ❖ Critères d'arrêt : Pression finale de refus 0,8 Mpa ou 750 l par forage pour chaque zone

- Contrôle de la stabilité de l'appui lors de l'injection

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Marché de travaux :

- Attribué à SOLETANCHE BACHY
- Montant du marché : 2 286 K€ (2012)
- Quantités principales
 - ❖ Linéaire de forage : 4910 m
 - ❖ Volume d'injection : 370 m³

- Os de démarrage des études et travaux : 2 avril 2012
- Délai global : 424 jours calendaires
- Début réel du traitement par injection : début juin 2012
- Fin réelle du traitement par injection : fin Novembre 2012
- Travail en 2 postes de 6h à 22h (1 atelier)

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Méthodologie de réalisation des travaux d'injection proposée par l'entreprise à l'appel d'offre

- Suite à REX sur travaux similaires sur le pont de Pirmil (1998/1999) un peu en aval du cours d'eau
- ❖ grosses difficultés de forage avec coincement des tubes au passage des tôles métalliques
- ❖ Contournement des chaussettes par le coulis
- Forage de diamètre réduit (76mm) en roto percussion au tricône ou taillant à bouton, non tubé (foreuse lourde)
- Fluide de forage = eau (Loire)
- Coulis à C/E<1 (bentonite/ciment)
- Injection à trou ouvert avec positionnement de l'obturateur simple en tête de chacune des zones à injecter

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Incidents rencontrés lors des forages sur les premières piles

- Perte de fluide de forage (non remonté des cuttings)
- Éboulement des parois de forage
- Coincement des tiges et outils de forage
- Coincement de l'obturateur simple

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Adaptation de la méthodologie de forage et d'injection

- Forage en tige seule (trou ouvert), en rotopercussion diamètre 76mm (taillant à bouton)



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

- Si perte de fluide de forage dans le massif de fondation et non remontée des cuttings (risque de dégradation de la maçonnerie par éboulement des parois de forage et circulation d'eau)
 - ❖ envoi de bentonite, ou polymère par le train de tiges
 - ❖ Si pas de remontée de fluide de forage en tête, abandon du forage, envoi de 200L de coulis $c/e=0,66$ par les tiges, remontée du train de tiges et injection du forage abandonné avec un coulis $c/e = 1$.
 - ❖ L'injection s'arrête à la montée en pression (critère de $P_{max} = 6$ bars), ou au critère de volume de $2m^3$. On peut ajouter du silicate de sodium pour faire prendre le coulis s'il n'y a pas de remontée constatée au bout de $2 m^3$ mis en place.

- Si perte de fluide de forage dans les alluvions
 - ❖ forage à la bentonite ou polymère tant que le forage se tient
 - ❖ Si le forage ne se tient pas, envoi de 200L de coulis $c/e=0,66$ par le train de tiges

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Adaptation de la méthodologie de forage et d'injection

- Lorsque la profondeur demandée est atteinte dans le micaschiste, envoi de 200 L de coulis $c/e=0,66$ par le train de tiges, et remontée du train de tiges.
- Installation de l'obturateur sous la chambre de travail si possible, au dessus sinon. Envoi d'un coulis $c/e=0,66$ avec un critère de pression de 4 bars, avec un critère de volume de 100L/ml.
- Ensuite installation de l'obturateur en tête de forage, envoi d'un coulis $c/e=1$ avec un critère de pression de 6 bars, et un critère de volume de 100L/ml.
- Une phase d'injection s'arrête pour l'une des raisons suivantes :
 - ❖ il y a résurgence
 - ❖ le volume maximum est atteint
 - ❖ la pression de refus est atteinte
 - ❖ le système d'instrumentation détecte un mouvement supérieur au seuil toléré.

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

2.5.1. Composition du coulis pour les alluvions $c/e = 0,66$

Ci-dessous la composition du coulis :

Type de ciment : Ciment CEM III/C 32,5 N CE ES

Type de bentonite : Bentonil CV 15 T

L'eau utilisée est soit de l'eau potable, soit de l'eau dont l'utilisation aura été validée par la maîtrise d'œuvre, et testée lors des convenances.

Coulis pour alluvions	
Eau	150 l.
Ciment	100 kg
Bentonite	4,1 kg
Autres produits	

La décantation à 3 heures est inférieure à 5%.

La viscosité apparente (avec un ajutage de 4,8mm sur cône Marsh) est supérieure à 38 s.

La densité ne s'écarte pas de plus d'1% de celle constatée lors des essais de convenance.

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

2.5.2. Composition du coulis pour la pile $c/e = 1$

Ci-dessous la composition du coulis :

Type de ciment : Ciment CEM III/C 32,5 N CE ES

Type de bentonite : Bentonil CV 15 T

L'eau utilisée est soit de l'eau potable, soit de l'eau dont l'utilisation aura été validée par la maîtrise d'œuvre, et testée lors des convenances.

Coulis pour béton et maçonnerie	
Eau	100 l.
Ciment	100 kg
Bentonite	2 kg
Autres produits	

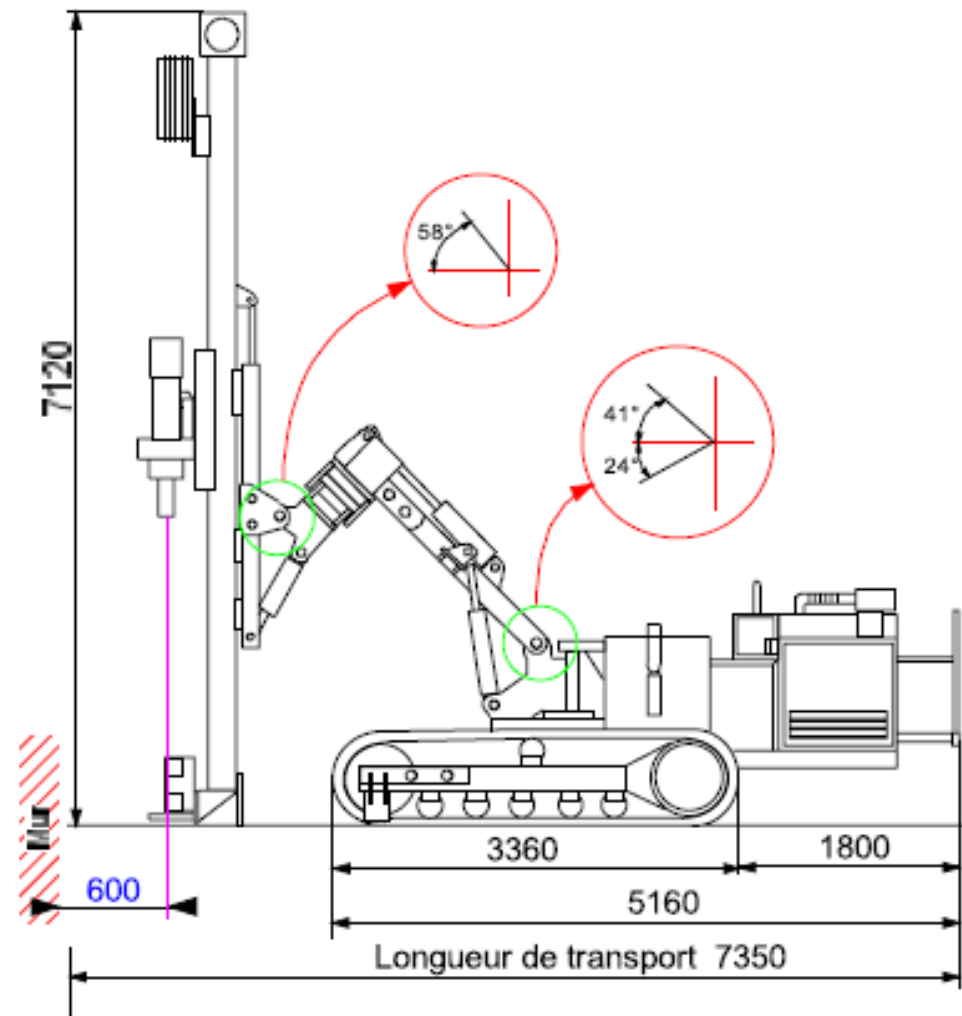
La décantation à 3 heures est inférieure à 5%.

La viscosité apparente (avec un ajutage de 4,8mm sur cône Marsh) est supérieure à 38 s.

La densité ne s'écarte pas de plus d'1% de celle constatée lors des essais de convenance.

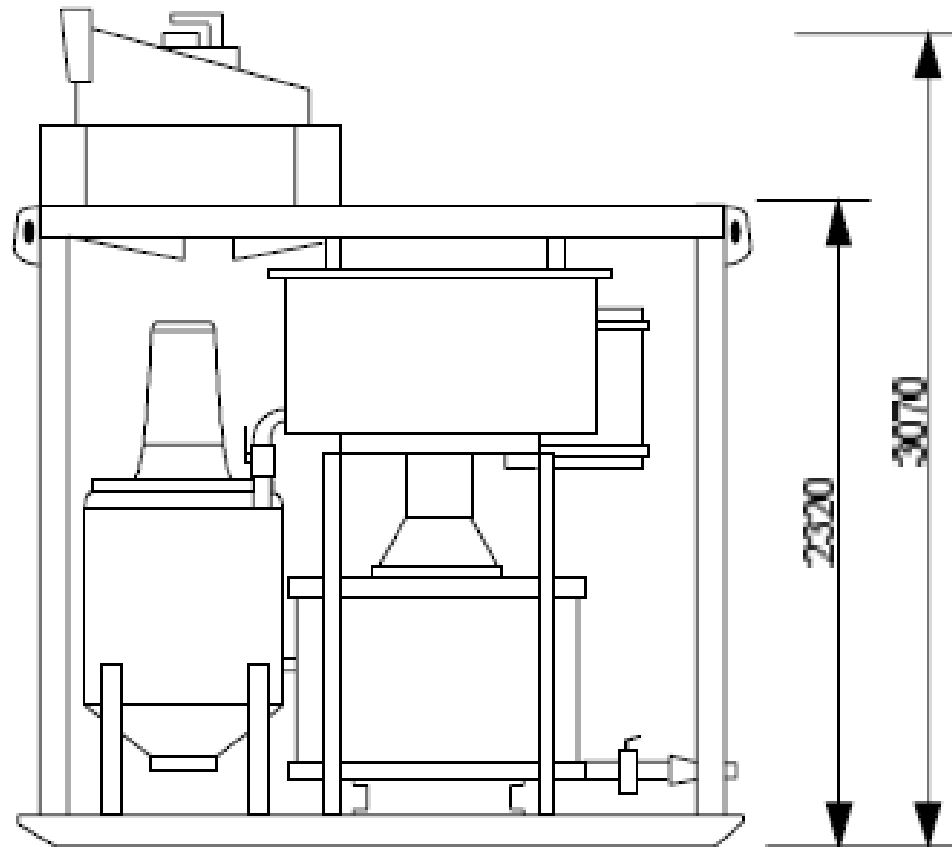
LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Foreuse Klemm 804



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Mélangeur AC83



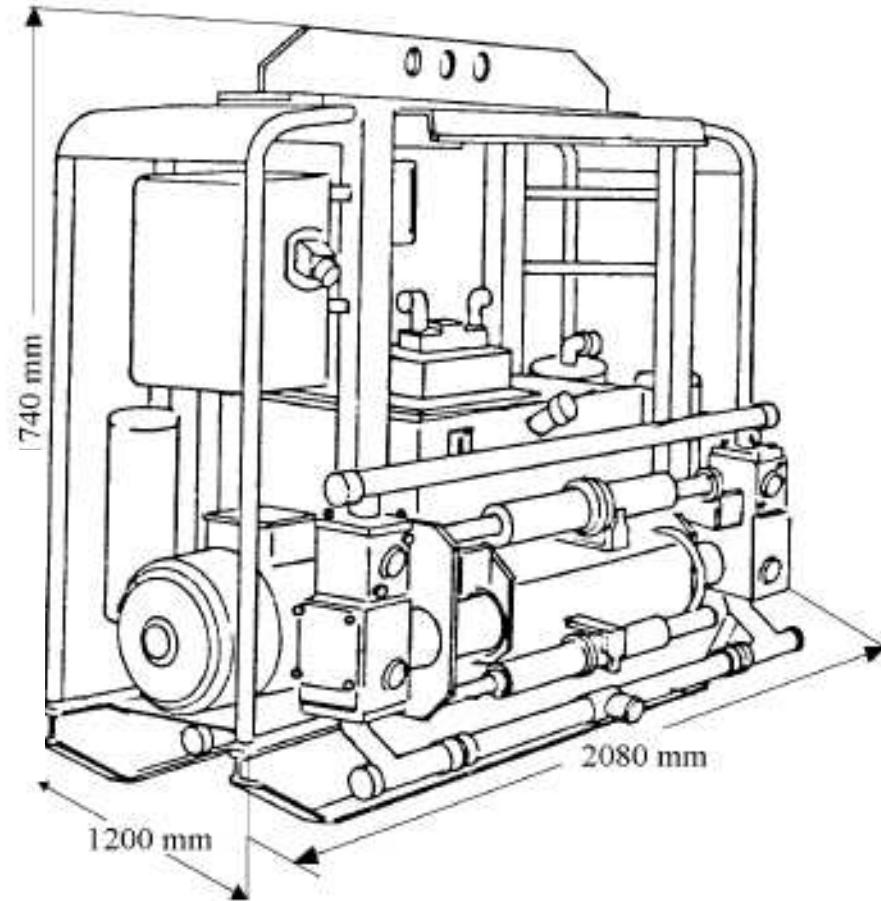
Capacité moyenne de production : 3 à 5 m³/h
Volume utile du mélangeur : 300 l
Volume utile de la cuve de reprise : 450 l

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Pompe d'injection PH125

Pompe d'injection à commande hydraulique proportionnelle permettant un réglage précis du débit et de la pression.

L'injecteur est composé de 2 vérins hydraulique couplés à 2 pistons plongeurs . L'étanchéité est assurée par des garnitures en caoutchouc lubrifiées à l'eau .



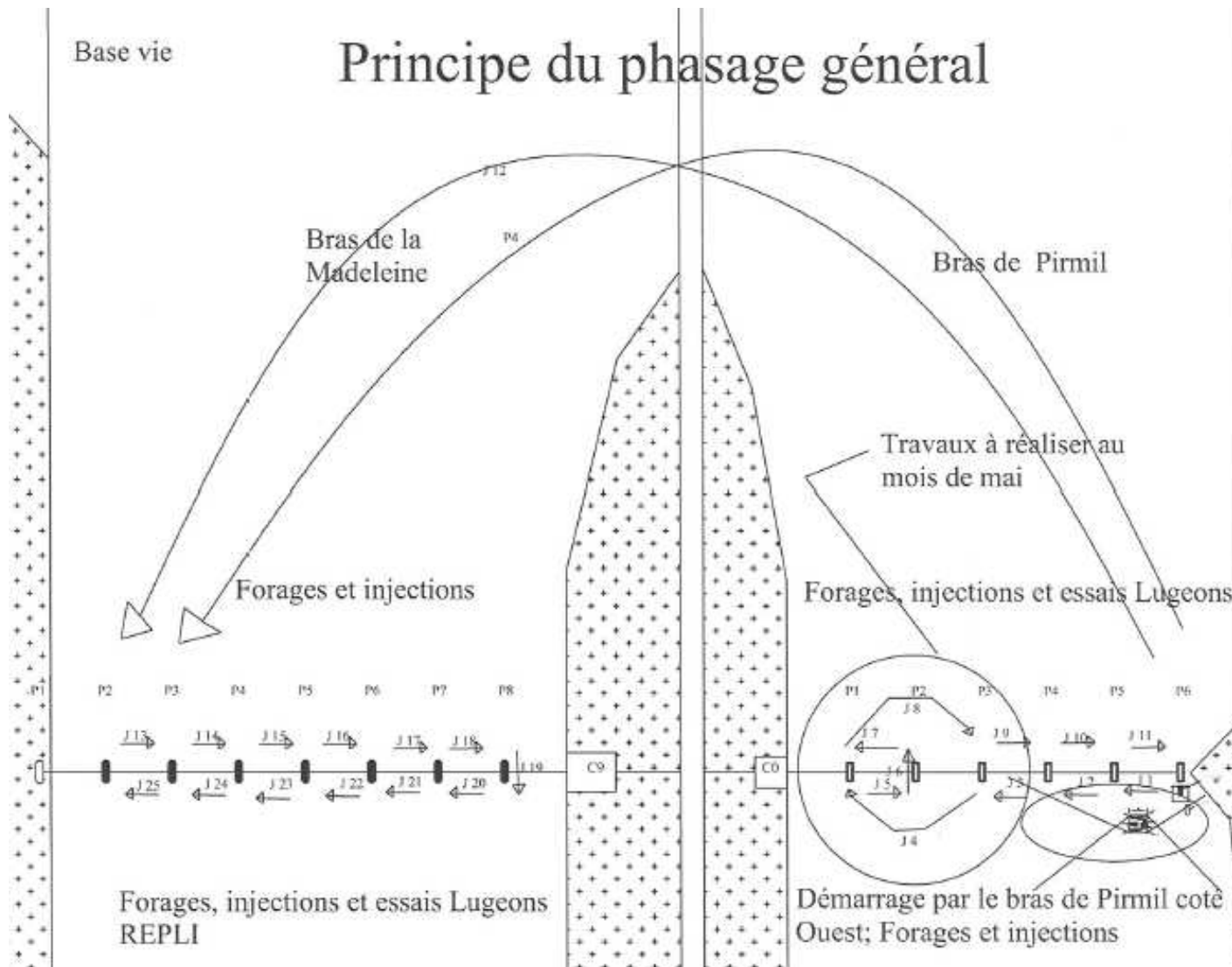
LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Vfond = 4900 m³
 Vinj=3,8% de Vfond
 Vinj=75l/ml de forage

Vfond = 5785 m³
 Vinj=2,5% de Vfond
 Vinj=59l/ml de forage

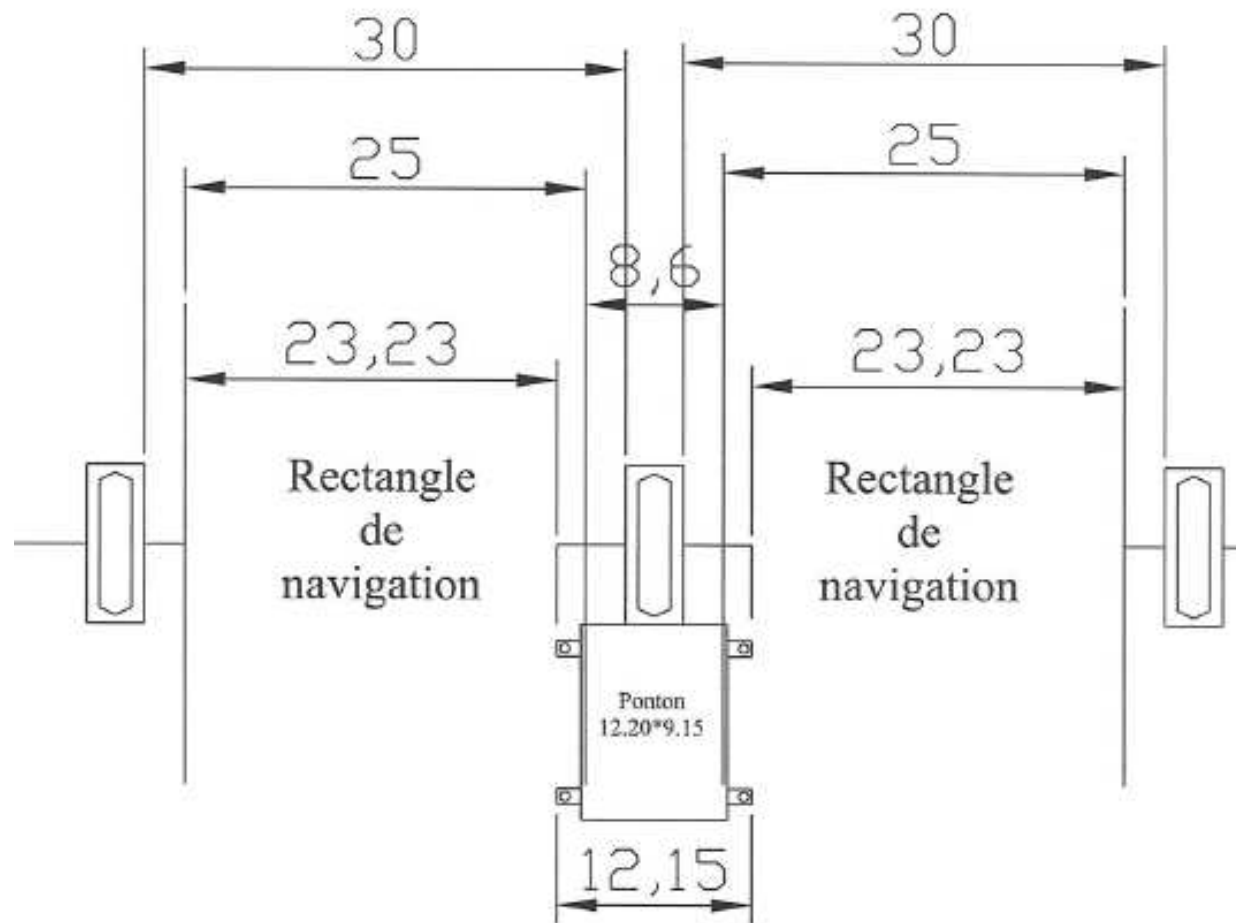
OA	AVAL AMONT	Appuis traités	Forage (ml)	Reforage (ml)	Perdu (ml)	FORAGE (ml)	INJECTION (m ³)
PIRMIL	AVAL	P1	205	0	0	205	12
		P2	209	38	0	247	11
		P3	224	37	20	281	16
		P4	227	171	6	404	23
		P5	191	78	0	269	21
		P6	187	28	0	215	14
	AMONT	P1	197	0	0	197	20
		P2	206	0	0	206	15
		P3	220	0	0	220	14
		P4	205	0	5	209	13
		P5	198	0	0	198	14
		P6	182	21	12	215	12
TOTAL			2451	374	42	2867	186
MADELEINE	AMONT	P2	172	0	0	172	11
		P3	174	0	0	174	11
		P4	177	0	0	177	8
		P5	173	15	0	188	11
		P6	178	0	0	178	13
		P7	202	0	0	202	14
		P8	168	0	0	168	10
		AVAL	P2	172	0	0	172
	P3		174	0	0	174	10
	P4		180	0	0	180	12
	P5		187	0	0	187	11
	P6		177	0	0	177	6
	P7		200	0	0	200	13
	P8	167	0	0	167	8	
TOAL			2500	15	0	2514	147
TOTAL GENERAL			4951	388	42	5381	332

LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

Signalisation particulière à mettre en place



LE CONFORTEMENT DES APPUIS DES PONTS DE LA VENDÉE

