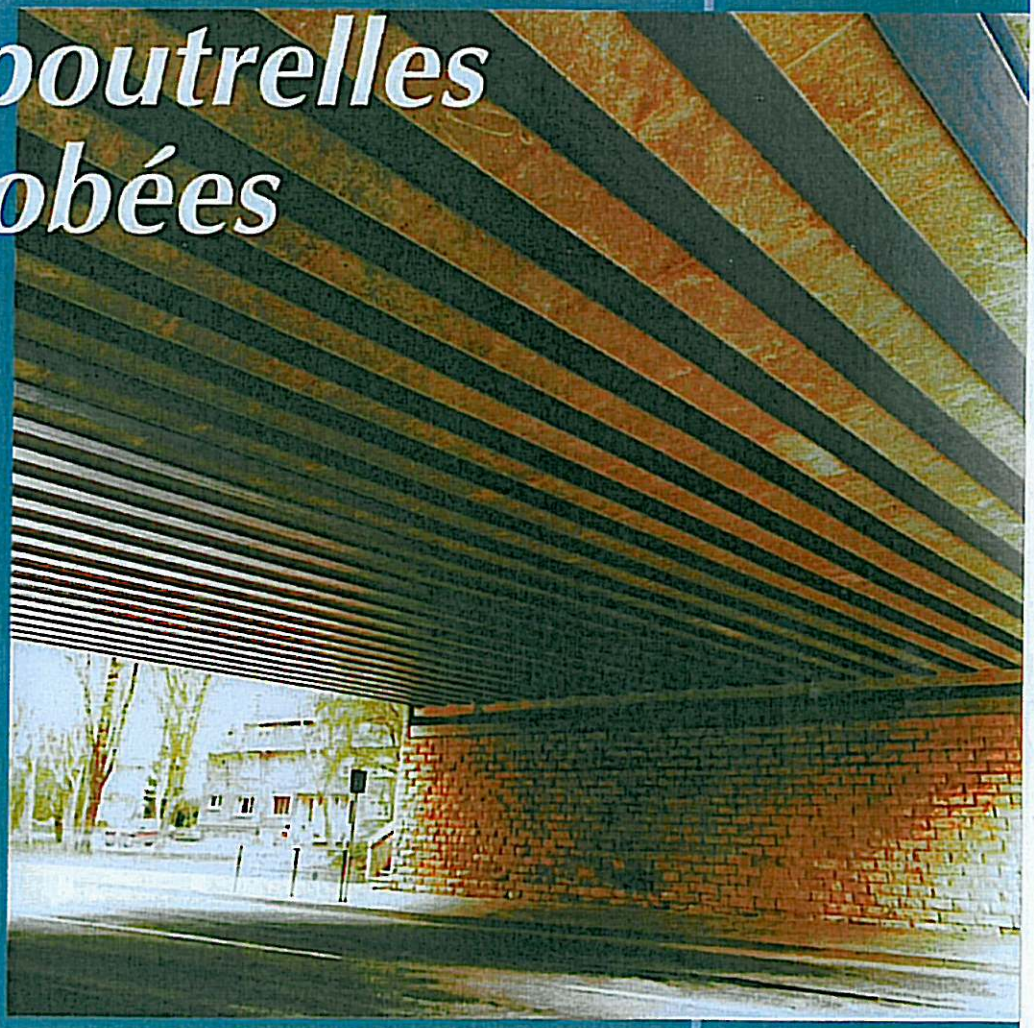
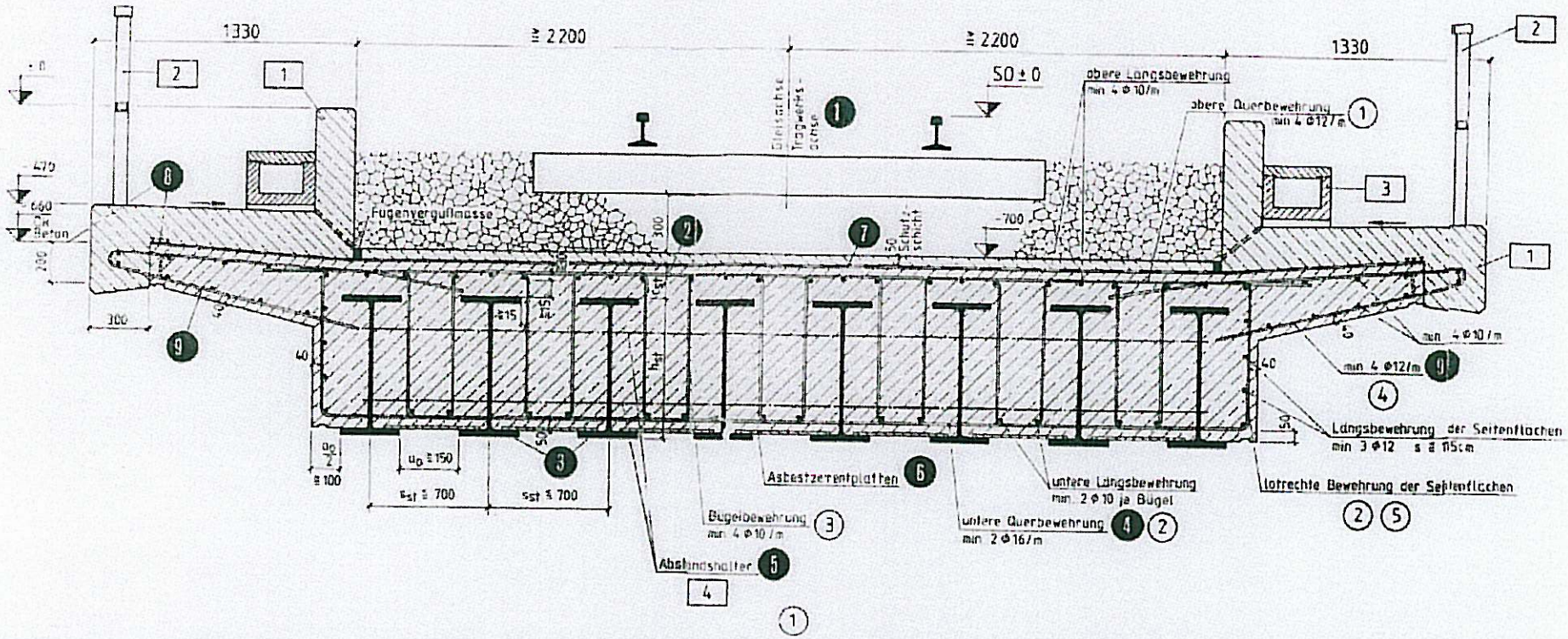
Ministère
de l'Equipement,
des Transports
et du Tourisme

Ponts-routes à tablier en poutrelles enrobées



Claude SERVANT
Directeur Scientifique

EIFFAGE TRAVAUX PUBLICS



Coupe transversale-type

ELANCEMENT

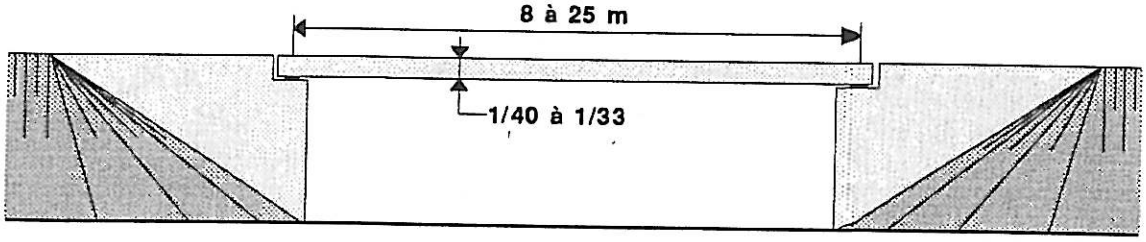
Les tabliers à poutrelles enrobées constituent un type d'ouvrage particulièrement avantageux pour les franchissements de faible tirant d'air, en raison de leur minceur tout-à-fait remarquable.

En effet, suivant la nuance de l'acier utilisé, avec des profilés HEA ou HEB espacés dans les conditions exposées plus loin, l'élancement des poutrelles (défini comme le rapport de leur hauteur à la portée de l'ouvrage) peut être défini par :

	Acier S275 (ex E28)	Acier S355 (ex E36)
Travée indépendante	1/33	1/40
Travées continues	1/38	1/45

Elancement des poutrelles

Ces règles sont approximatives, mais néanmoins suffisantes pour une étude préliminaire dont le but principal est de s'assurer de la faisabilité d'une solution et tout particulièrement de son calage dans le profil en long du tracé. Pour un dimensionnement plus fin, il convient d'appliquer les annexes 1 et 2. Les figures 10 et 11 suivantes illustrent les conditions d'un tel calage :

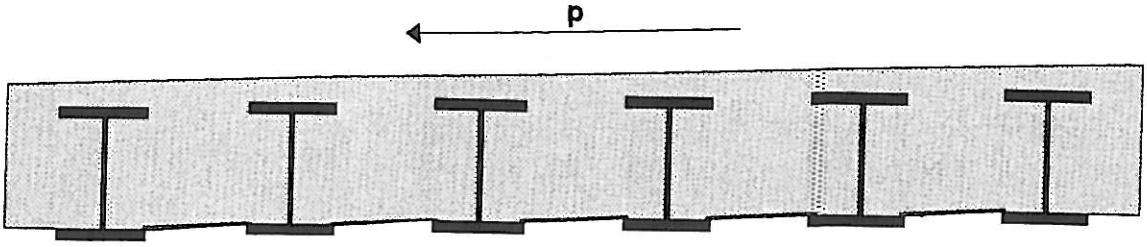


Elancement des poutrelles pour une travée indépendante

Tablier à pente transversale unique

L'extrados est en ce cas parallèle à l'intrados.

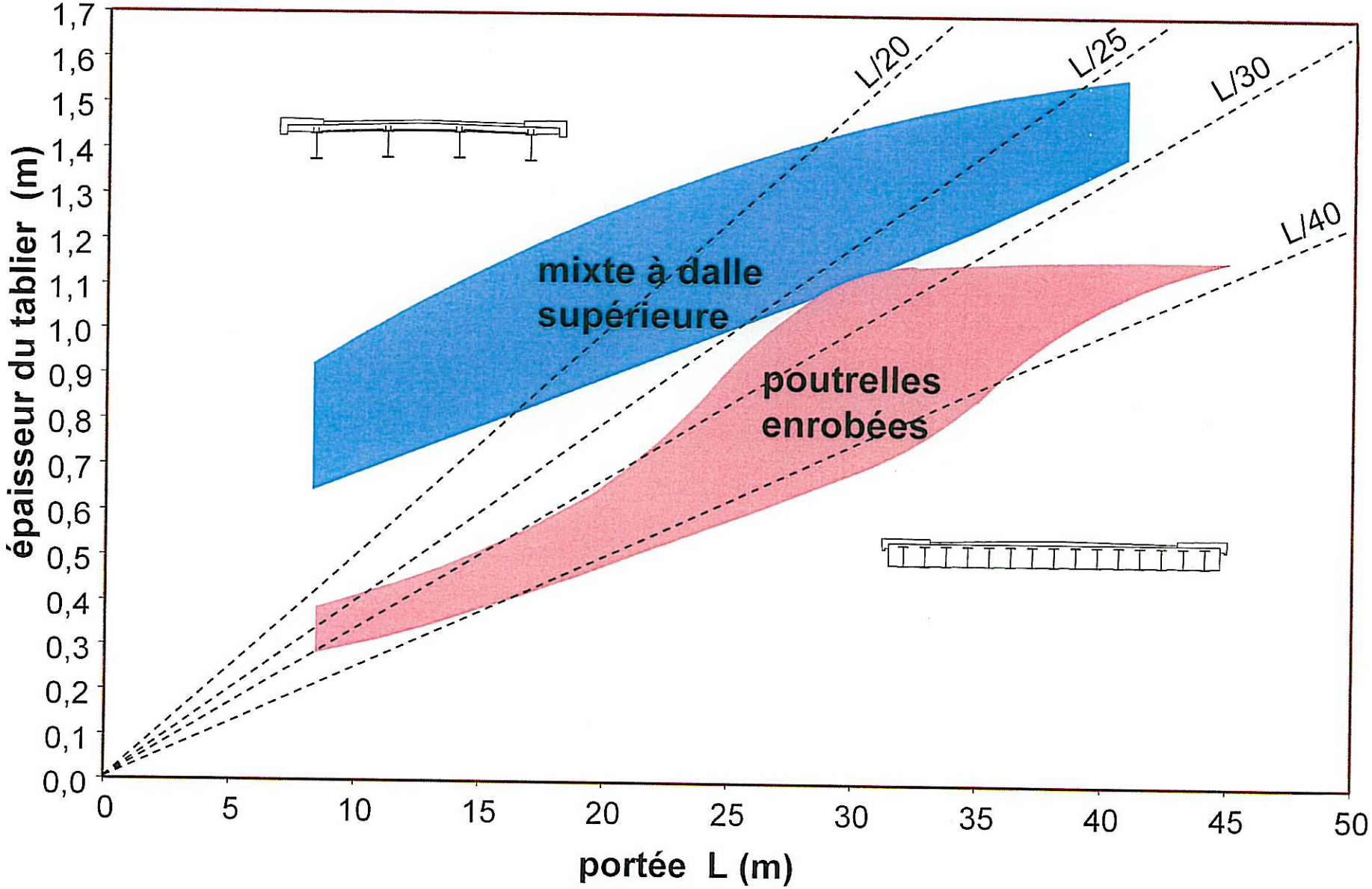
Dans le cas général, les poutrelles seront verticales, la pente étant obtenue par décrochage de l'une par rapport à l'autre.



Disposition des poutrelles dans le cas général

Il est toutefois possible d'incliner les poutrelles elles-mêmes, si celles-ci sont de hauteur modérée (≤ 400 mm) et si le dévers est faible (≤ 2%)

Ponts-route à une travée



Lorsque l'angle de biais géométrique ne dépasse pas 70 grades et que les portés angulaires (définies comme le rapport des portées développés au rayon de courbure en plan) restent inférieures à 0,2 radian, le comportement du tablier est assimilable à celui d'un tablier droit et rectiligne, à condition de considérer les portées développées dans les calculs. En outre, les moments engendrés dans le tablier par l'action du poids des superstructures ainsi que des charges d'exploitation peuvent en ce cas être évalués par une méthode simple telle que celle de Guyon-Massonnet.

En revanche, les tabliers de biais prononcé (c'est-à-dire comportant un angle de biais géométique inférieur à 70 grades) ou de forte courbure (portées angulaires supérieures à 0,2 radian), nécessitent des calculs plus élaborés (par exemple, par une modélisation en grillage de poutres ou par éléments finis).

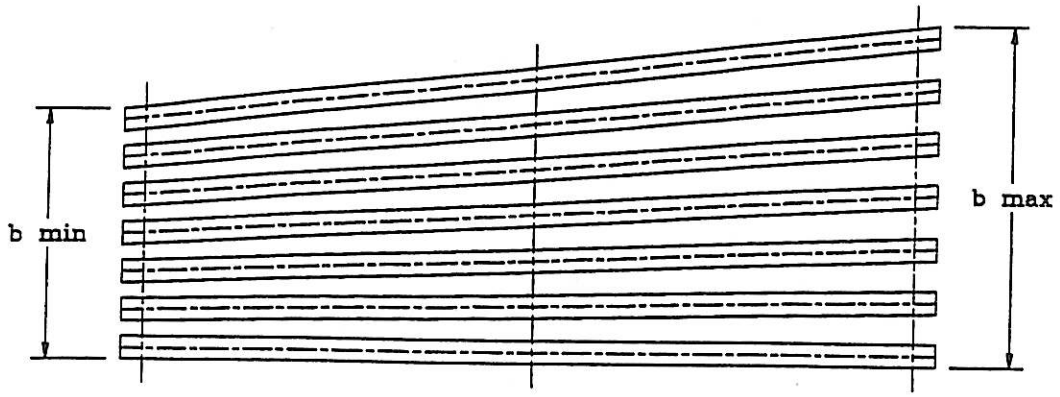
Dans le cas d'ouvrages de largeur variable, les poutrelles enrobées ne sont envisageables qu'à la condition que la variation de la largeur du tablier reste modérée ci-après, en raison des contraintes liées aux espacements limites des poutrelles.

Par ailleurs, dans le cas d'ouvrages à travées solidaires, les poutrelles sont continues d'une travée à l'autre, leur nombre demeure donc inchangé sur tout le pont.

A titre indicatif, cette condition se traduit par :

$$\frac{b_{max}}{b_{min}} \leq \frac{\frac{h}{3} + 0,60}{0,45}$$

où b_{max} et b_{min} désignent les largeurs du tablier (respectivement max et min) à ses extrémités, et h, la hauteur des poutrelles (exprimée en mètre).

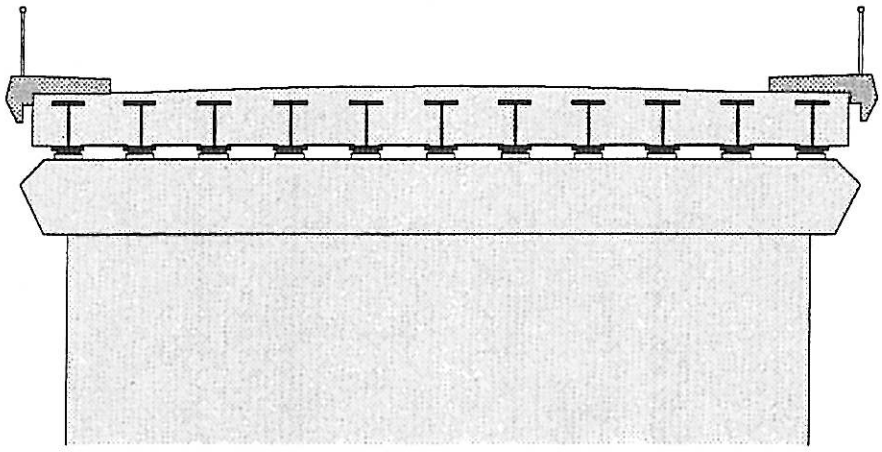


Tablier de largeur variable

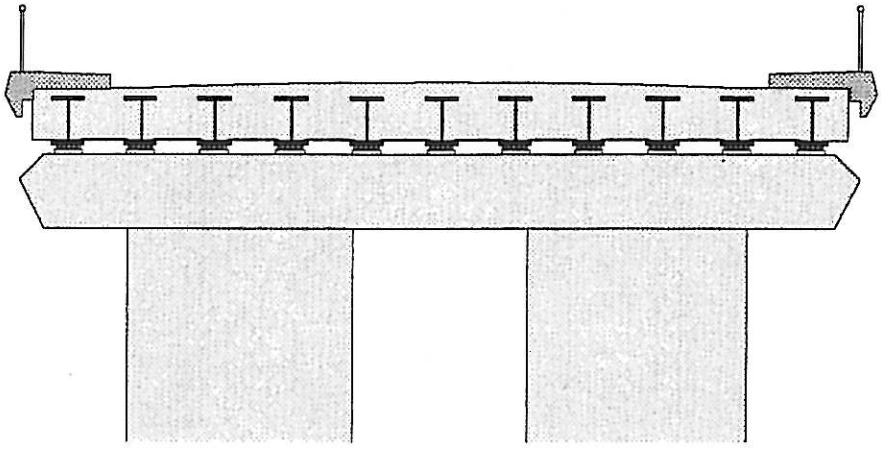
Piles

Le voile unique en béton armé semble la solution la mieux adaptée, lorsque sa longueur reste modérée (inférieure à une huitaine de mètres en ordre de grandeur).

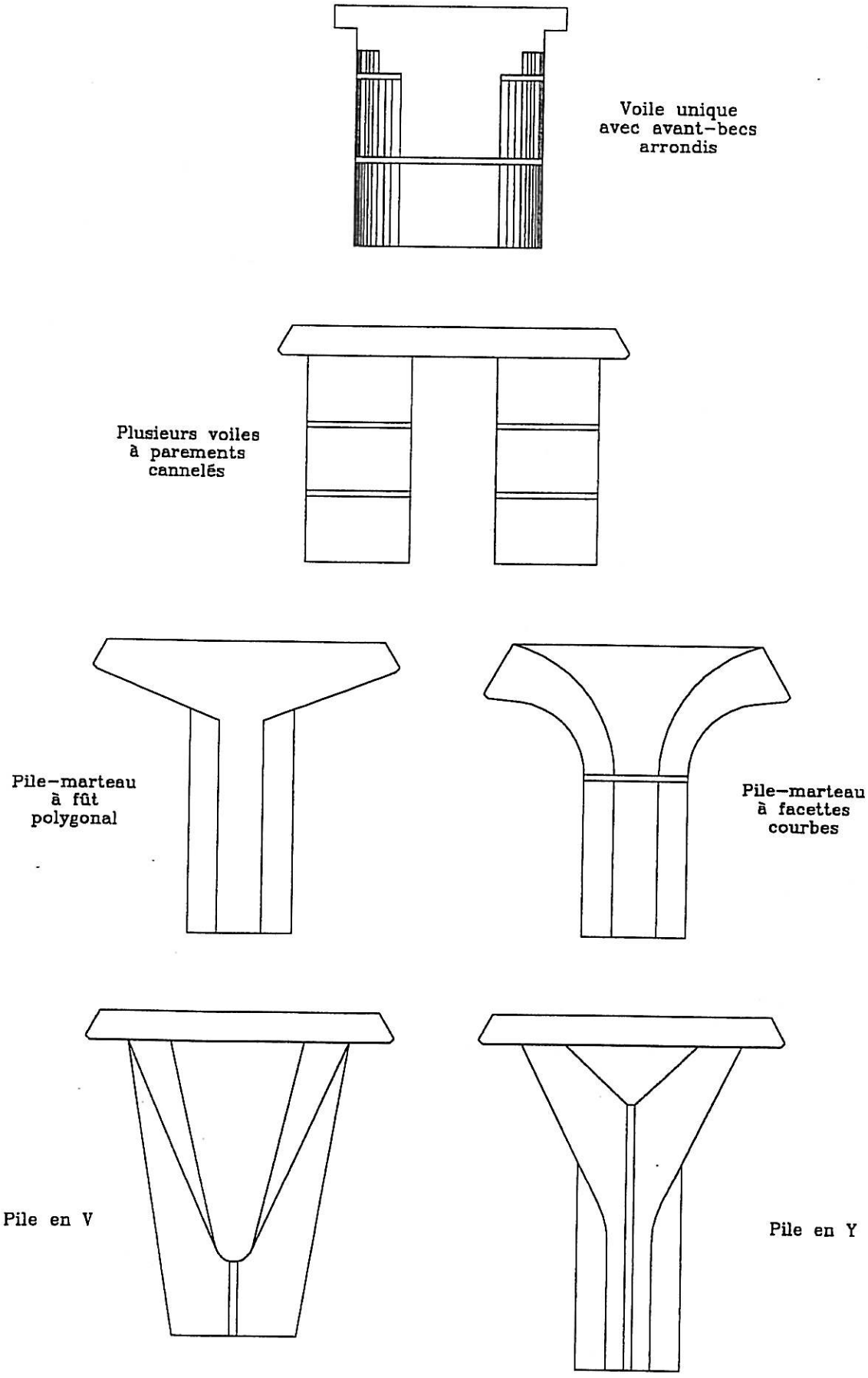
Au-delà de cette limite et pour atténuer l'effet d'écran défavorable pour les usagers de la voie franchie, il est souhaitable que les piles soient constituées par des voiles discontinus surmontés d'un chevêtre.



Voile unique



Voiles multiples couronnés par un chevêtrre



Quelques formes de piles

MATERIAUX

POUTRELLES

Les aciers laminés utilisables pour les poutrelles destinées aux tabliers de ponts-routes à poutrelles enrobées sont, dans les conditions normales d'emploi, des aciers de la nuance S355 ou inférieure. Depuis la mise en application de la normalisation européenne, ces aciers sont définis par la norme NF EN 10025. Le sigle EN indique qu'elle résulte de la transcription de la norme européenne correspondante. Cette norme, actuellement en vigueur, remplace l'ancienne norme NF A 35-501.

Dans certains cas particuliers, l'emploi d'aciers de nuance supérieure peut être justifié. Ces aciers, de nuance S355, S420 ou S460, sont définis par la norme NF EN 10013 (anciennement NF A 35-504 et NF A 36-201).

Pour ces produits laminés, les normes anciennes et actuelles sont différentes par la symbolisation des nuances et qualités qui seront rappelées au § 3.1.2.

Caractéristiques dimensionnelles

Les poutrelles sont généralement des profilés laminés à chaud, en acier de construction d'usage général.

Des poutrelles reconstituées soudées (PRS) de dimensions correspondantes ou supérieures aux profilés marchands, peuvent être employées mais il faut en outre, dans ce cas, justifier la résistance et le comportement à la fatigue des cordons de soudure.

Les poutrelles utilisées sont à larges ailes à faces parallèles, de type HE ; elles sont choisies, par ordre de priorité, parmi celles figurant dans les document suivants :

- normes AFNOR NF A 45-201 ou EURONORM 53-62
- normes ASTM A6 (norme des E.U.A. ; poutrelles de la série W)
- gamme de production des usines sidérurgiques agréées (poutrelles hors norme ou sur mesure).

Eventuellement, il peut être fait usage de poutrelles allégées, de type HEA-A, si elles peuvent reprendre toutes les sollicitations développées dans la structure, dans toutes les situations.

Les longueurs de poutrelles réalisables sont fonction du module, du poids maximal du lingot de base servant à leur confection et de la longueur du train de laminage de l'usine productrice.

Actuellement, les longueurs maximales varient de 22 à 36,5 m selon le module. Après accord auprès de certaines usines, une longueur maximale de 45 m est possible pour les modules de faibles dimensions.

Par ailleurs, ce sont les conditions de transport ou de manutention des poutrelles qui peuvent limiter leur longueur.

Caractéristiques mécaniques

Les poutrelles sont dans leur très large majorité fabriquées dans les nuances S235, S275 et S355 définies par l'actuelle norme NF EN 10025.

La correspondance avec l'ancienne norme NF A 35-501, en ce qui concerne la symbolisation des nuances et qualités, est la suivante :

	Ancienne norme NF A 35-501	*Norme actuelle NF EN 10025*
Nuances	E 24	S235
	E 28	S275
	E 36	S355
Qualités	2	JR
	3	J0
	4	S235, S275 : J2G3 S355 : K2G3

*Correspondance (nuances et qualités) entre la norme actuelle et l'ancienne norme : les symboles **JR, J0, J2 et K2** désignent des qualités (liées à l'énergie de rupture par choc, appelée encore "résilience"), et le symbole **G3** désigne l'état de livraison normalisé ou équivalent.*

Comme il est mentionné ci-dessus, l'emploi d'aciers de nuance supérieure peut être justifié dans certains cas particuliers. Ces aciers, de nuance S355, S420 ou S460, sont définis par la norme NF EN 10013. La nuance S355 existe donc dans les normes NF EN 10025 et NF EN 10013, mais pour les poutrelles normalement utilisées, la référence à la première est suffisante. Par ailleurs, il est à noter que dans le cas d'emploi des nuances S420 et S460, la qualité N est suffisante pour les poutrelles enrobées.

La caractéristique mécanique servant de base aux justifications est la limite d'élasticité qui dépend de l'épaisseur des semelles de poutrelles, **e**, selon les normes actuelles par :

	Limite d'élasticité en MPa	
Nuance	***e ≤ 16 mm***	***16 mm < e ≤ 40 mm***
S235	235	225
S275	275	265
S355	355	345
S420	420	400
S460	460	440

BASES DE CALCUL – PRINCIPES GENERAUX

1. TEXTES DE REFERENCE

Les textes réglementaires de base sont les suivants :

- Cahier des Clauses Techniques Générales (C.C.T.G.) des marchés publics de travaux :
  - Fascicule 61, Titre II : Programme de charges et épreuves des ponts-routes.
  - Fascicule 61, Titre V : Conception et calcul des ponts et constructions métalliques en acier.
  - Fascicule 62, Titre I – Section I : Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états-limites (BAEL 91).

Il n'existe pas actuellement de textes réglementaires ministériels pour le calcul des tabliers en poutrelles enrobées. Néanmoins, il peut être fait référence aux documents suivants pour établir les justifications à produire pour de tels tabliers :

- Circulaire n°81.63 du 28 juillet 1981 relative au règlement de calcul de ponts mixtes acier-béton (fascicule spécial n°81.31 bis BO.UL, T et E),
- Cahier des Prescriptions Communes (C.P.C) des marchés de travaux de la SNCF :
  - Livret 2.01 « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton, métal ou mixtes », en son annexe 6 : « Règles de calcul des tabliers en poutrelles enrobées ».

Les calculs justificatifs sont conduits suivant la méthode des états-limites. L'exposé de cette méthode ainsi que les définitions des termes utilisés se trouvent dans les « Directives communes de 1979 relatives au calcul des constructions » 5DC 79) jointe à la circulaire n°79.25 du 13 mars 1979 (fascicule spécial n°79.12 bis BO.ECV et T)

2. CONTRAINTES LIMITES AUX ETATS LIMITES DE SERVICE

- Pour l'acier des poutrelles : $\sigma_a = \dfrac{\sigma_e}{1,15}$
- Pour le béton comprimé : $\sigma_{bc} = 0,6\, f_{cj}$
- Pour les armatures : $f_s = \min\left(\frac{2}{3} f_e \,;\, 110\sqrt{h f_{tj}}\right)$

La fissuration du béton est à considérer en effet comme préjudiciable. Cependant, vis-à-vis des pointes de moments (efforts locaux), il peut être admis de porter la

contrainte admissible de traction des armatures à $\frac{2}{3} f_e$

CALCULS JUSTIFICATIFS

NOTATIONS

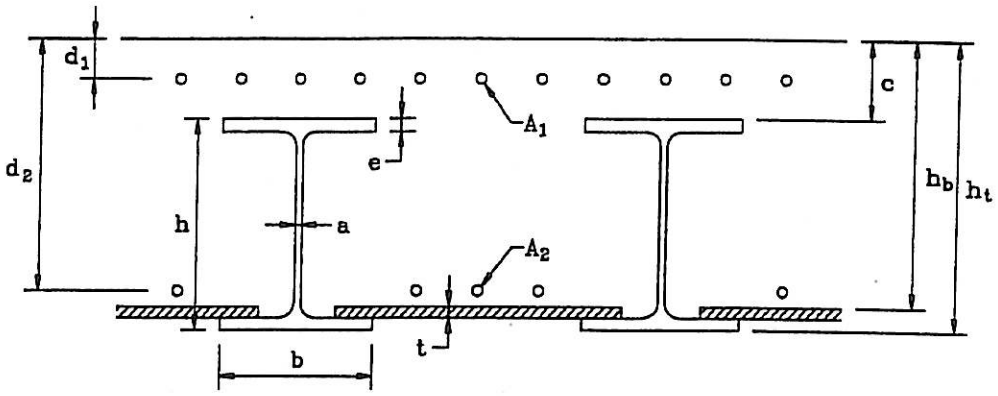


FIG. 69 : Coupe transversale - Notations

Les notations suivantes sont utiles par la suite :

N	:	nombre total de poutrelles du tablier
A	:	aire d'une poutrelle
I	:	inertie principale d'une poutrelle
h	:	hauteur d'une poutrelle
b	:	largeur d'une poutrelle
e	:	épaisseur des semelles d'une poutrelle
a	:	épaisseur de l'âme d'une poutrelle
c	:	couverture de béton au-dessus des semelles supérieures des poutrelles
A_1	:	aire totale d'armatures longitudinales en face supérieure
A_2	:	aire totale d'armatures longitudinales en face inférieure
t	:	épaisseur du coffrage perdu
h_b	:	épaisseur utile de béton
		$h_b = c + h - e - t$: en travée avec coffrage perdu
		$h_b = c + h - e$: coffrage perdu localement supprimé sur appui
E	:	module de déformation de l'acier
n_i	:	coefficient d'équivalence acier-béton instantané

EMPLOI DES TABLES DE DIMENSIONNEMENT

① **Portée équivalente 10 mètres**

ΔM tm/m	En travée Profilé		En travée e m	Sur appui Profilé		Sur appui e m
②	③		④			
⑤ 22	HE260A	*	0,680			
24	HE260A	*	0,680			
26	HE260A	*	0,680	HE260A	*	0,680
28	HE240B		0,670	HE260A	*	0,680
	HE260A	*	0,680			
30	HE240B		0,670	HE260A	*	0,680
	HE260A	*	0,670			
	HE280A		0,680			
32	HE240B		0,670	HE260A	*	0,680
	HE260A	*	0,640			
	HE280A		0,680			

Commentaires

① Il s'agit de la portée, notée l_e, ayant le même moment maximum en valeur absolue, soit en travée soit sur appui, que la travée étudiée. Les tables sont établies pour l_e compris entre 10m et 31m, qui constitue le domaine d'emploi économique des poutrelles enrobées.

② Il s'agit de la valeur absolue du moment de flexion longitudinale à l'ELS, agissant soit dans la section en travée, soit dans la section sur appui, sous l'action du poids des *superstructures et des charges d'exploitation* (mais non compris le poids propre des poutrelles). Par ailleurs, elle correspond au moment unitaire (par mètre de largeur de tablier) calculé dans la *facette* la plus chargée (dans le sens transversal).

③④ Il s'agit du type et de l'entraxe des poutrelles constitutives de la section résistante. Le nombre de poutrelles s'en déduit, connaissant la largeur totale du tablier.

⑤ Les moments varient par pas de 2 tm/ml (ou 20 KNm/ml). Au delà de 20m de portée équivalente, le pas est de 5 tm/ml (ou 50 KNm/m).

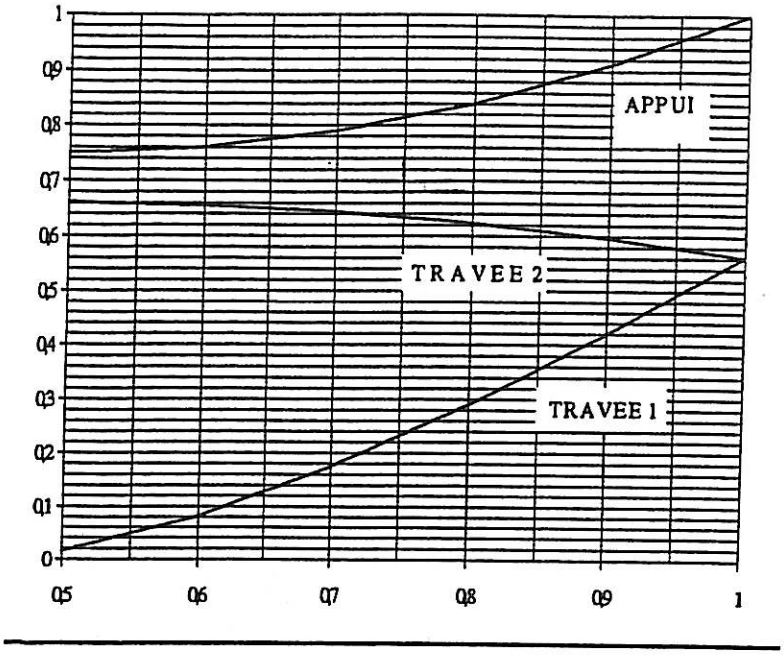
Portée équivalente 25 mètres

ΔM tm/m	En travée Profilé	e m	Sur appui Profilé	e m
40	HE600A	* 0,790		
45	HE600A	* 0,770	HE600A	* 0,790
	HE650A	0,810		
50	HE600A	* 0,750	HE600A	* 0,770
	HE650A	0,790	HE650A	0,810
55	HE600A	* 0,730	HE600A	* 0,750
	HE650A	0,770	HE650A	0,790
60	HE600A	* 0,710	HE600A	* 0,730
65	HE600A	* 0,690	HE600A	* 0,710
	HE600B	0,790		
	HE700A	0,810		
70	HE650A	* 0,720	HE650A	* 0,740
	HE700A	0,790	HE700A	0,810
75	HE600A	* 0,660	HE600A	* 0,680
	HE650A	0,700	HE600B	0,780
	HE650B	0,800		
	HE700A	0,770		
80	HE600B	0,740	HE650A	* 0,710
	HE650A	* 0,690	HE650B	0,810
			HE700A	0,780
85	HE600A	* 0,630	HE600A	* 0,650
	HE600B	0,720	HE600B	0,750
	HE650A	0,670	HE650B	0,790
	HE650B	0,770	HE700A	0,760
	HE700A	0,740		
90	HE650A	* 0,660	HE600B	0,730
	HE650B	0,750	HE650A	* 0,680
	HE700B	0,820	HE700A	0,750
95	HE600A	* 0,600	HE650B	* 0,760
	HE600B	0,690	HE700B	0,830
	HE700A	0,710		
	HE800A	0,820		
100	HE600A	* 0,590	HE600A	* 0,610
	HE650A	0,630	HE600B	0,700
	HE650B	0,720	HE650A	0,650
	HE700B	0,790	HE700A	0,720
105	HE600B	0,660	HE650A	* 0,640
	HE650A	* 0,620	HE650B	0,730
	HE800A	0,790	HE700B	0,800
110	HE600B	0,650	HEB00A	* 0,800
	HE650B	0,690		
	HE700A	* 0,670		
	HE700B	0,760		
115	HE650B	* 0,680	HE600B	0,660
	HE800B	0,860	HE700A	* 0,680
	HE900A	0,890	HE700B	0,770

Portée équivalente 25 mètres

ΔM tm/m	En travée Profilé	e m	Sur appui Profilé	e m
120	HE600A	* 0,540	HE600B	0,650
	HE700B	0,730	HE650B	0,690
	HE800A	0,750	HE700A	* 0,670
	HE900A	0,880	HE700B	0,760
125	HE600A	* 0,530	HE650B	0,680
	HE600B	0,610	HE800A	* 0,760
	HE600M	0,790	HE800B	0,860
	HE650A	0,570	HE900A	0,890
	HE700B	0,720		
130	HE600A	* 0,520	HE800A	* 0,750
	HE600B	0,600		
	HE650A	0,560		
	HE650B	0,640		
	HE800B	0,820		
135	HE600A	* 0,510	HE600M	0,790
	HE600B	0,590	HE700B	0,720
	HE600M	0,760	HE800A	* 0,740
	HE650A	0,550		
	HE650B	0,630		
	HE700A	0,610		
140	HE650A	0,540	HE600B	* 0,600
	HE650B	0,620	HE600M	0,780
	HE650M	0,800	HE700B	0,710
	HE700A	* 0,600	HE800B	0,820
	HE700B	0,680	HE900A	0,850
	HE800B	0,790		
145	HE600M	0,730	HE600B	* 0,590
	HE700A	0,590	HE650M	0,820
	HE700B	0,670	HE800B	0,810
	HE800A	* 0,690	HE900A	0,840
	HE800B	0,780		
150	HE600M	0,720	HE600B	* 0,580
	HE700A	0,580	HE600M	0,750
	HE700B	0,660	HE650B	0,620
	HE800A	* 0,690		
	HE800B	0,770		
	HE900A	0,800		
155	HE650M	0,760	HE600B	* 0,570
	HE700A	0,570	HE600M	0,740
	HE700B	0,650	HE650B	0,610
	HE700M	0,810		
	HE800A	* 0,670		
	HE900A	0,790		

ABAQUE N° 1 : DEUX TRAVEES



CHARGES PERMANENTES

Appui

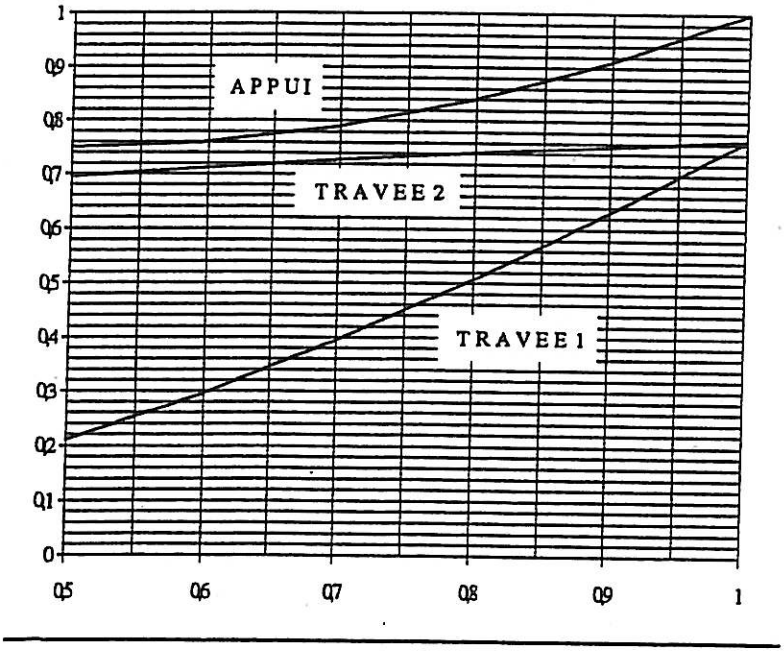
$$\beta_g = \frac{1 + \alpha^3}{1 + \alpha} = 1 - \alpha + \alpha^2$$

Travée 1

$$\beta_g = \left[\frac{3\alpha^2 + \alpha - 1}{4\,\alpha}\right]^2$$

Travée 2

$$\beta_g = \left[\frac{3 + \alpha - \alpha^2}{4}\right]^2$$



CHARGES D'EXPLOITATION

Appui

$$\beta_q = \frac{1 + \alpha^3}{1 + \alpha}$$

Travée 1

$$\beta_q = \left[\frac{\alpha\,(4 + 3\alpha}{4\,(1 + \alpha)}\right]^2$$

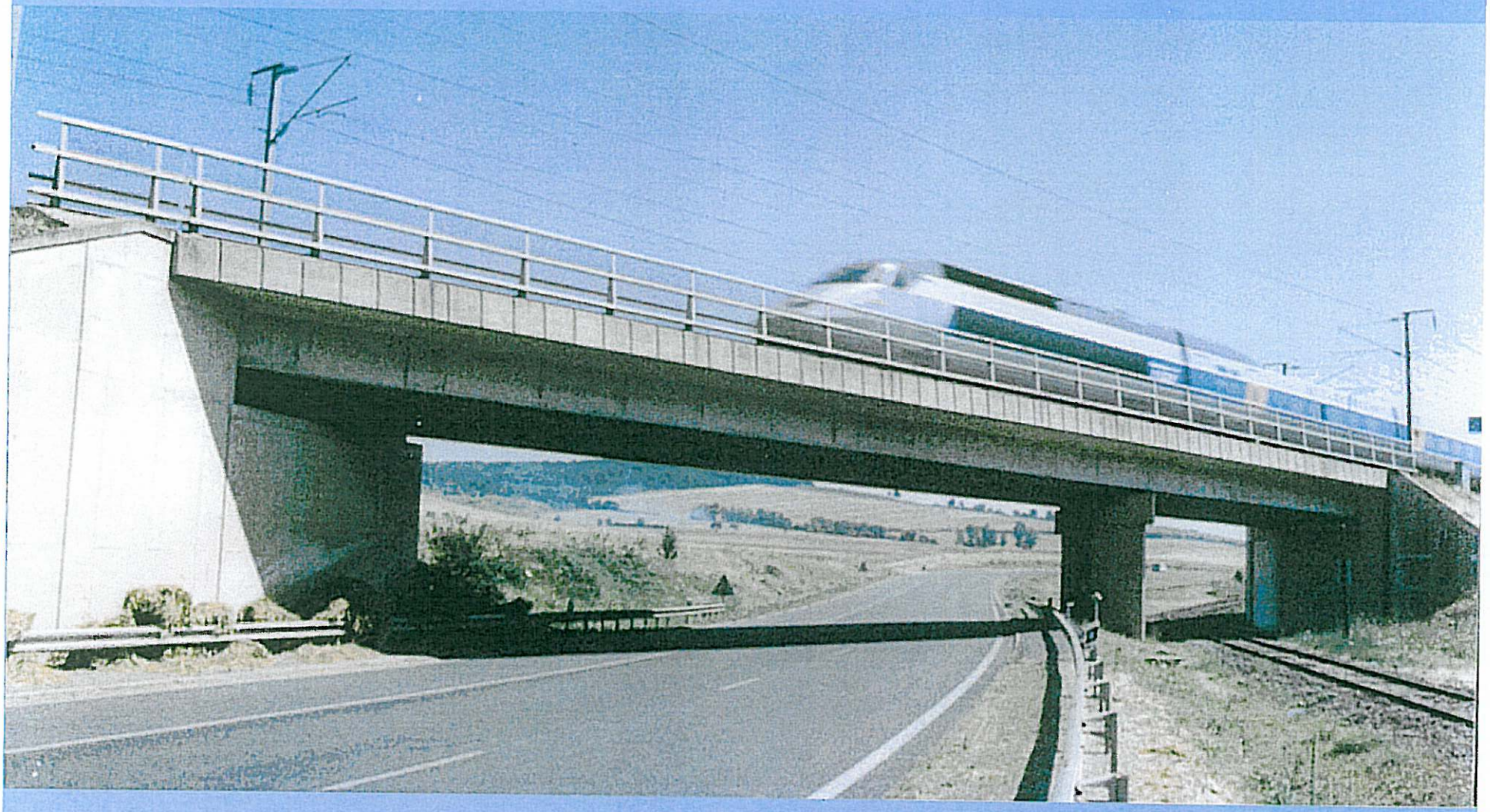
Travée 2

$$\beta_q = \left[\frac{3 + 4\alpha}{4\,(1 + \alpha)}\right]^2$$

Ponts à poutrelles enrobées

- Utilisation dans le sens longitudinal
- Utilisation dans le sens transversal

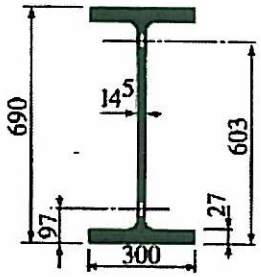
1 - utilisation dans le sens longitudinal



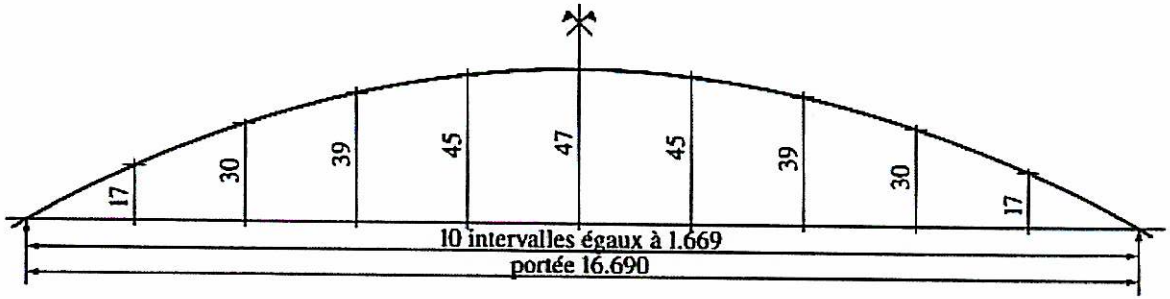
14 poutrelles HE 700A semblables en acier S235 JR

Nota: Les trous sont percés au diamètre définitif, soit par forage, soit par poinçonnage suivi d'un alésage.

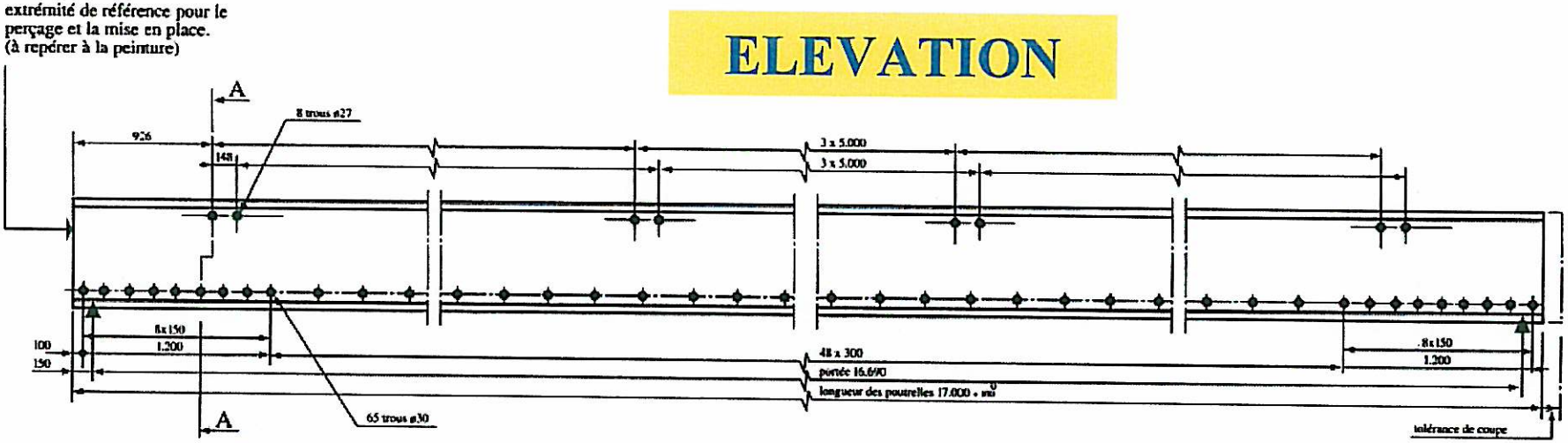
Coupe A-A



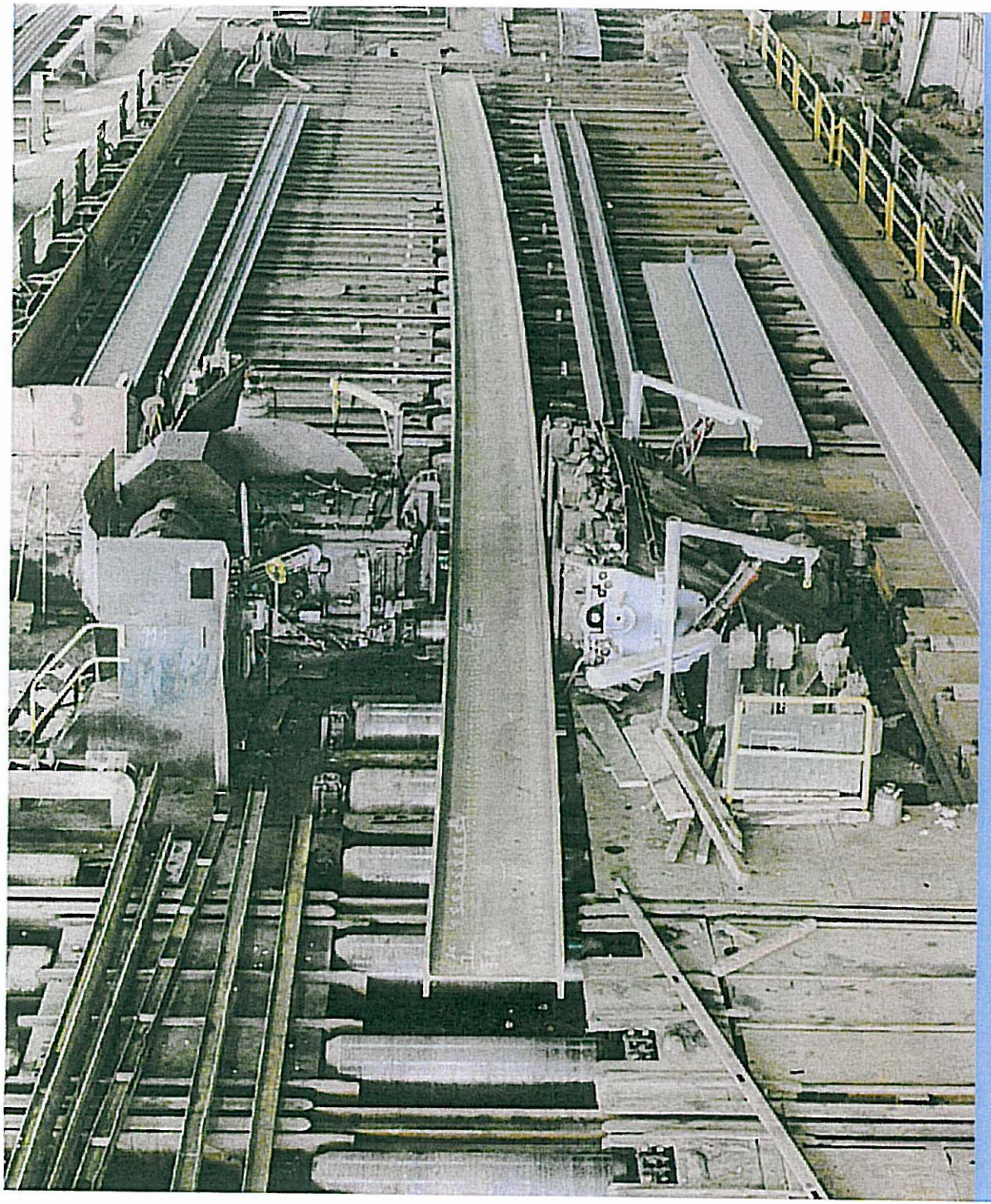
CONTRE-FLECHE



ELEVATION



Exemple d'un plan de parachèvement



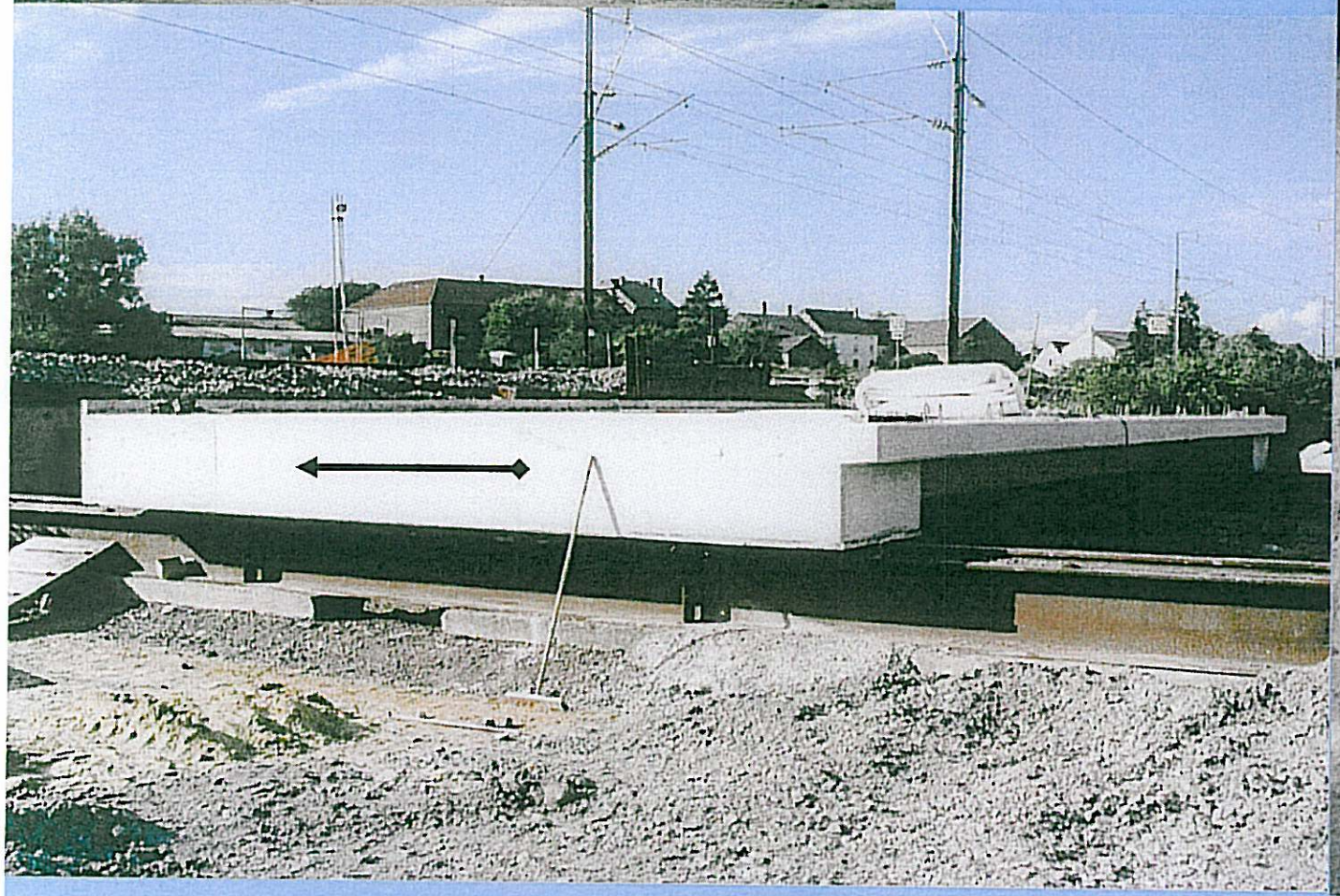
FABRICATION : CONTRE-FLECHE

Cintrage sur presse

Expédition de poutrelles parachevées

Mise en place des poutrelles par 2

MISE EN PLACE PAR RIPAGE

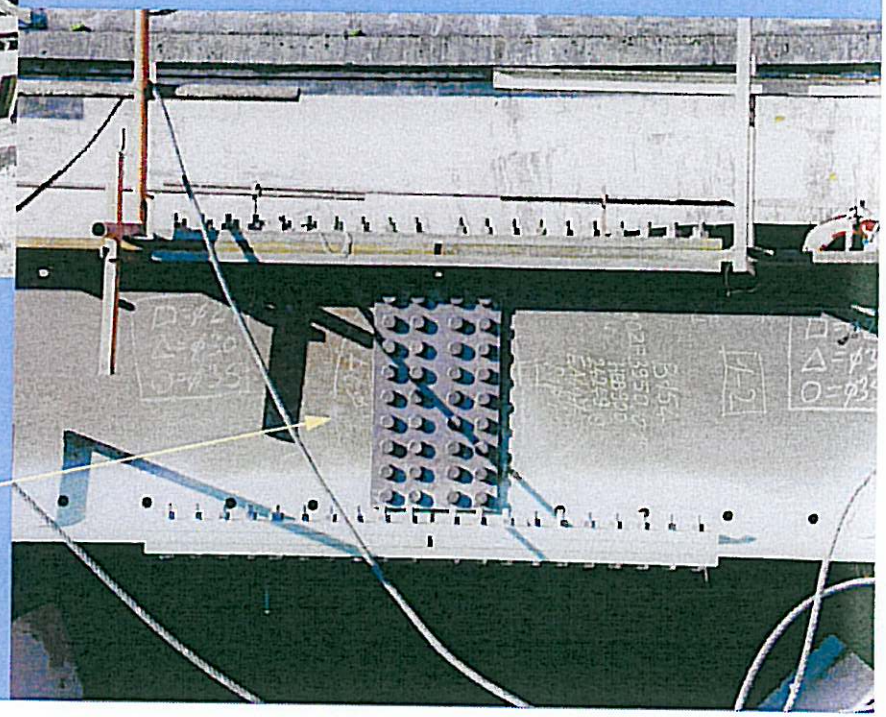


tablier prêt pour le ripage

DALLETTES ET FERAILLAGE

Cas particulier d'un pont courbe

RABOUTAGE DES POUTRELLES
2 travées de 36,5 et 35,8 m



joints à éclisses boulonnées

portée: 25 m
épaisseur du tablier: 0,60 m
élancement: 42
2015
CFL

UIC

UNION INTERNATIONALE DES CHEMINS DE FER

Tables de calcu
des ponts-rails
à poutrelles enr

PROFIL ARBED

SNCF

UIC

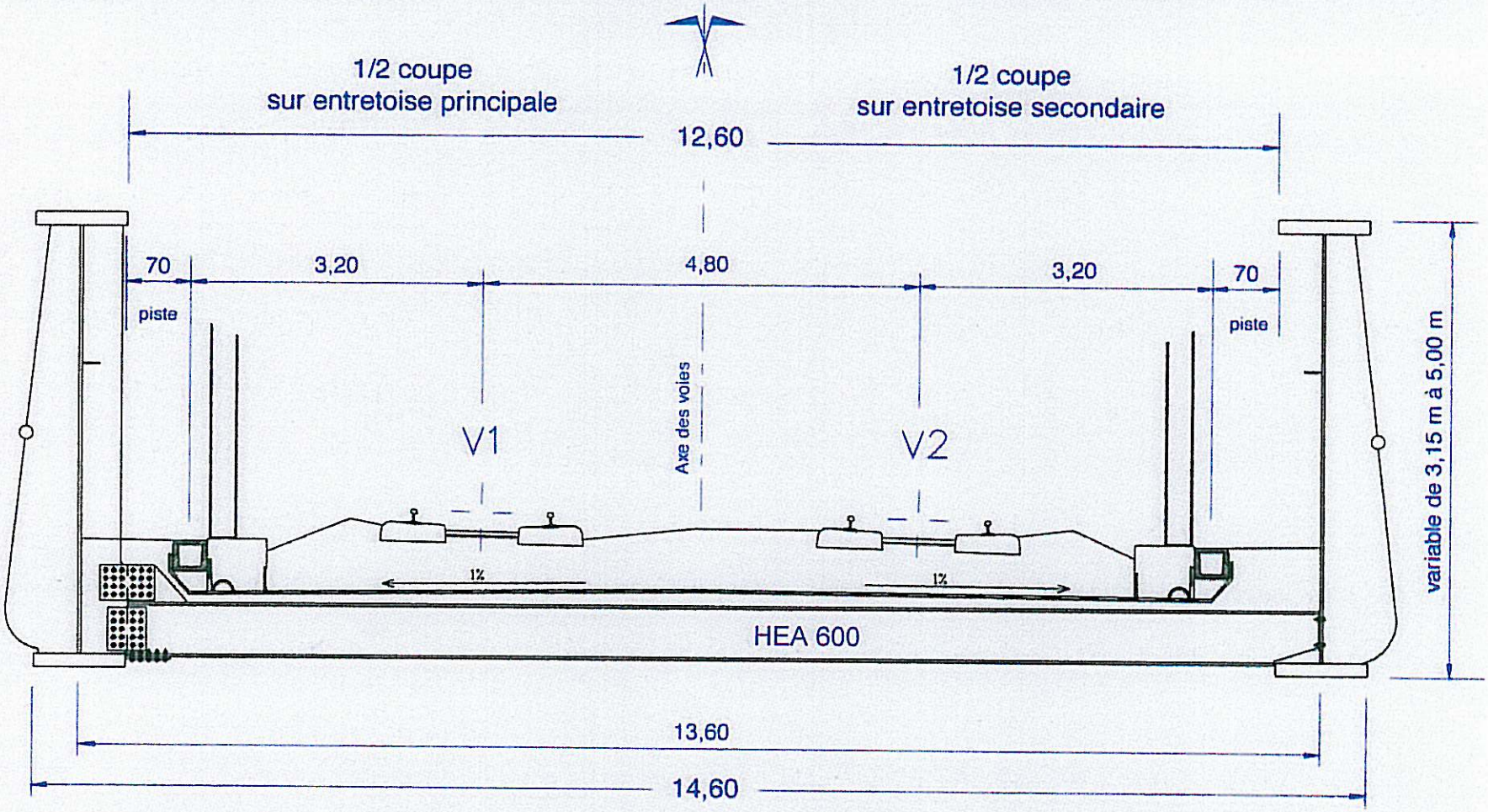
INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS

Design Tables
for Filler Beam
Railway Bridges

PROFIL ARBED

SNCF

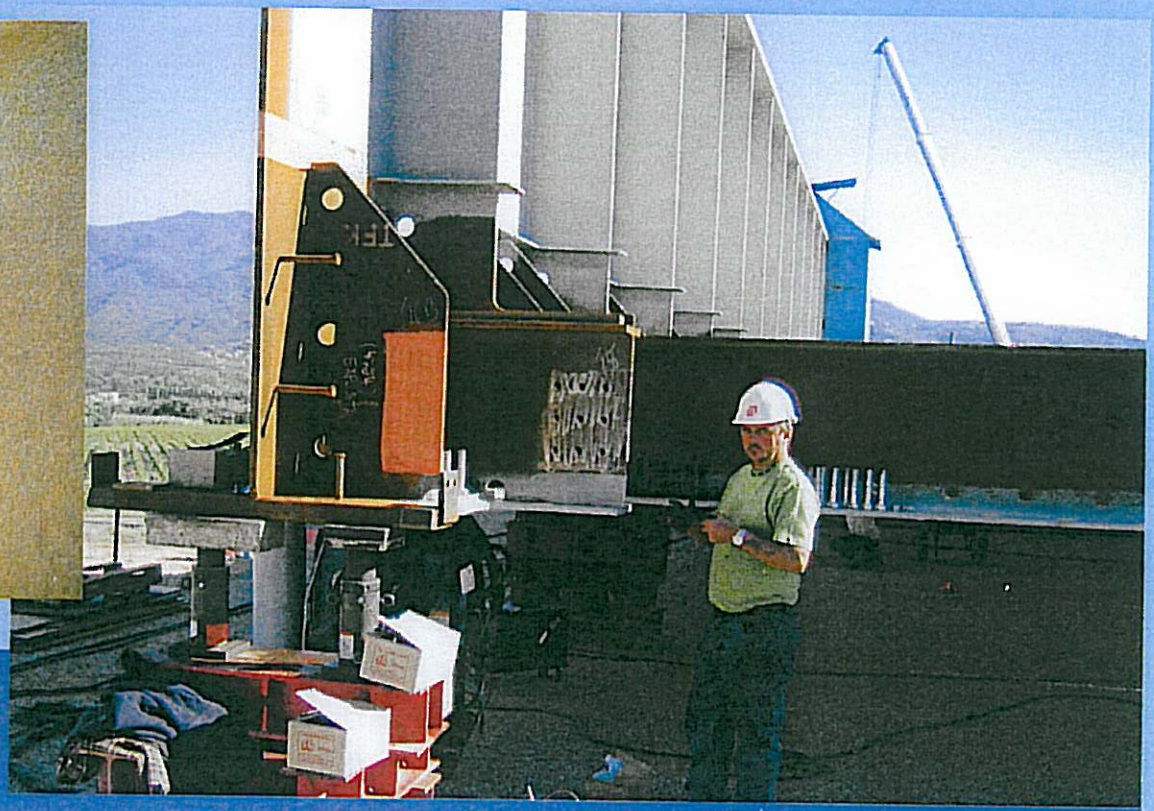
2 - utilisation dans le sens transversal

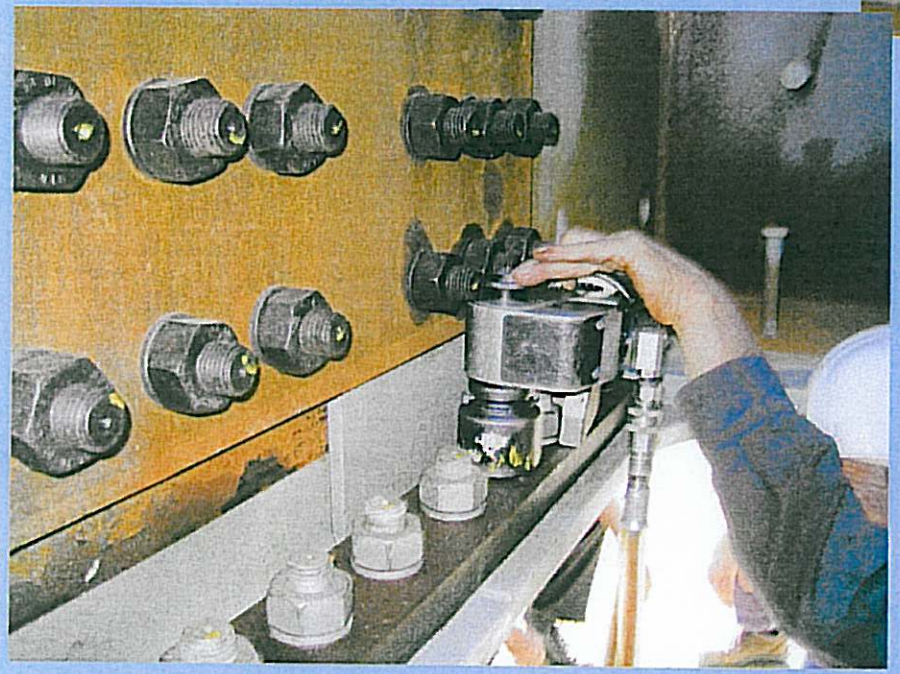


Pont-rails à poutres latérales

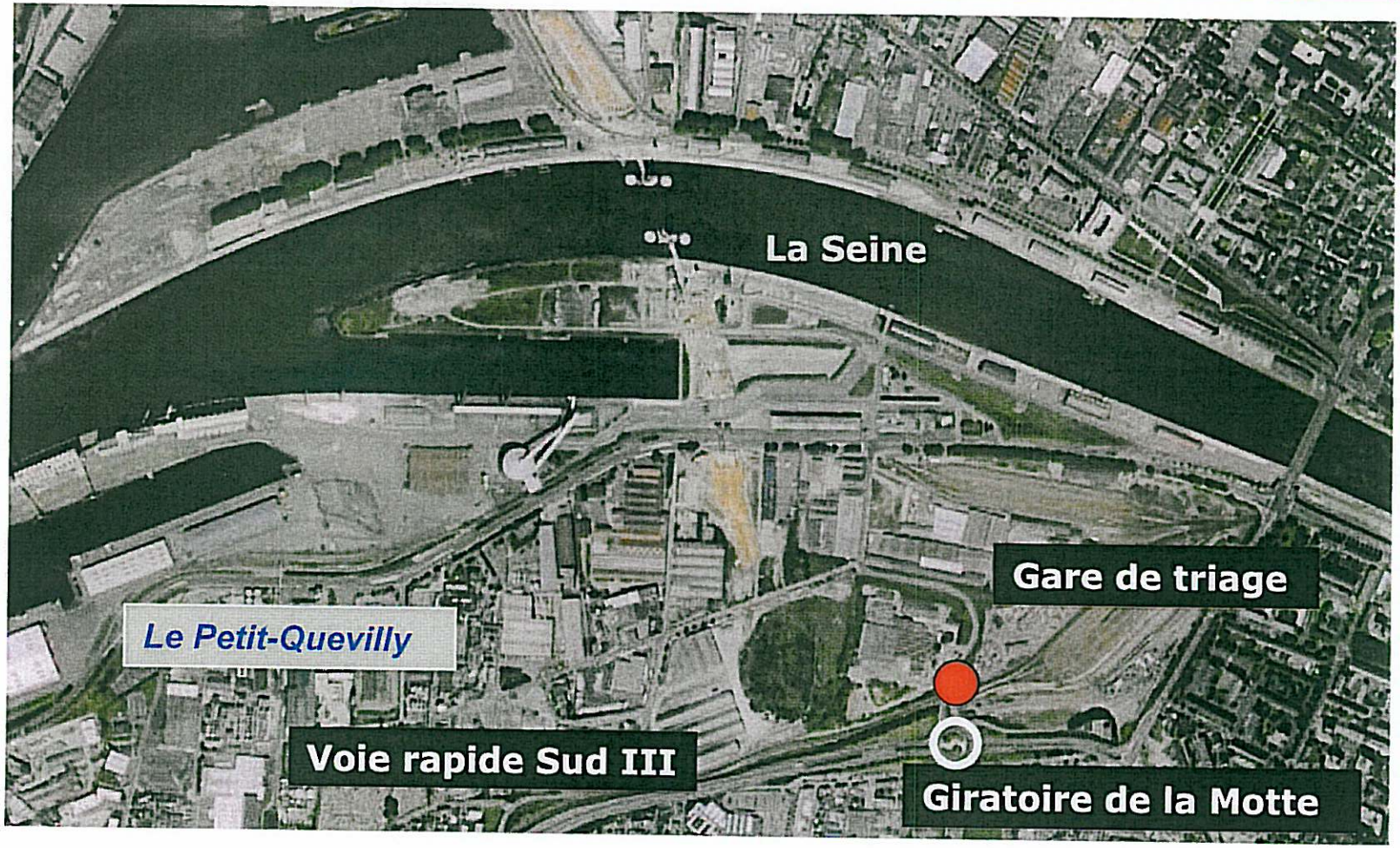
TGV Méditerranée

Bow-string sur le péage de l'A7 à l'échangeur d'Avignon





Le triplement du pont Pinel à Rouen par un ouvrage à poutres en BFUP

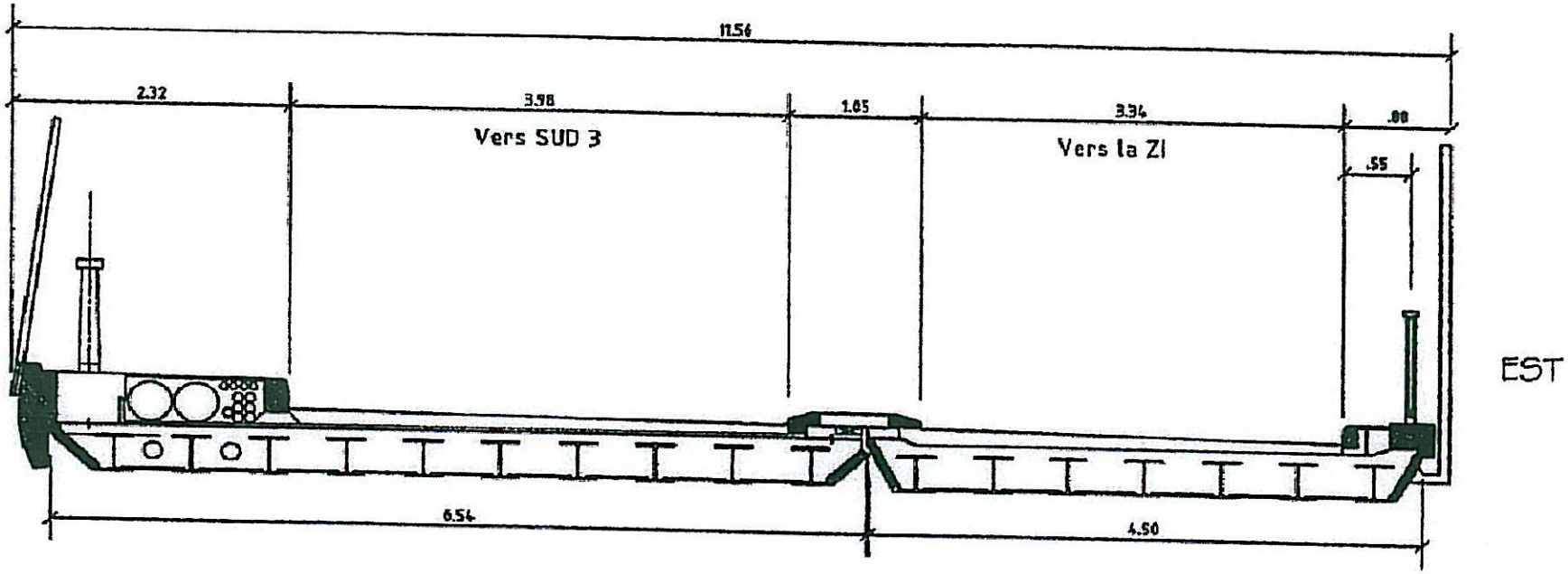


Situation de l'ouvrage existant

(Maître d'ouvrage : DRE Haute Normandie /SMO)

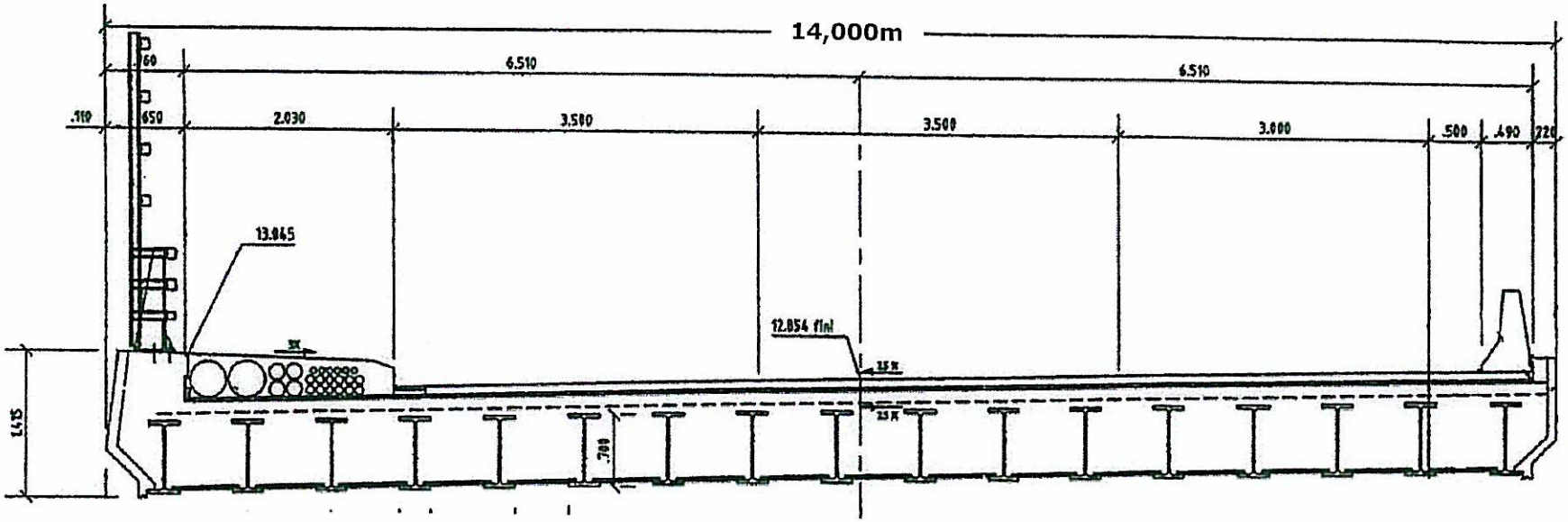
Vue depuis la gare de triage de l'ouvrage existant

Ouvrage à deux travées de 13,50m chacune présentant un biais de 64 grades



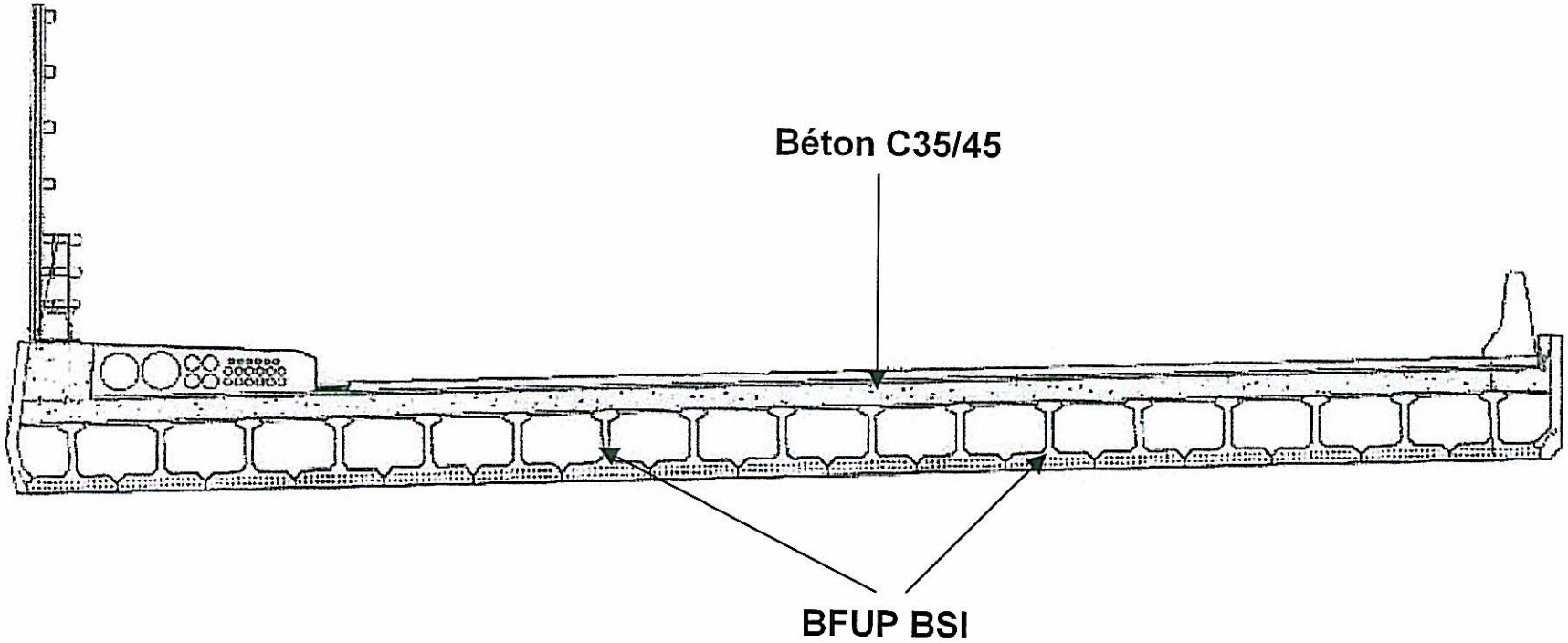
Coupe transversale des deux tabliers existants

Deux dalles en poutrelles enrobées reliées par un joint longitudinal



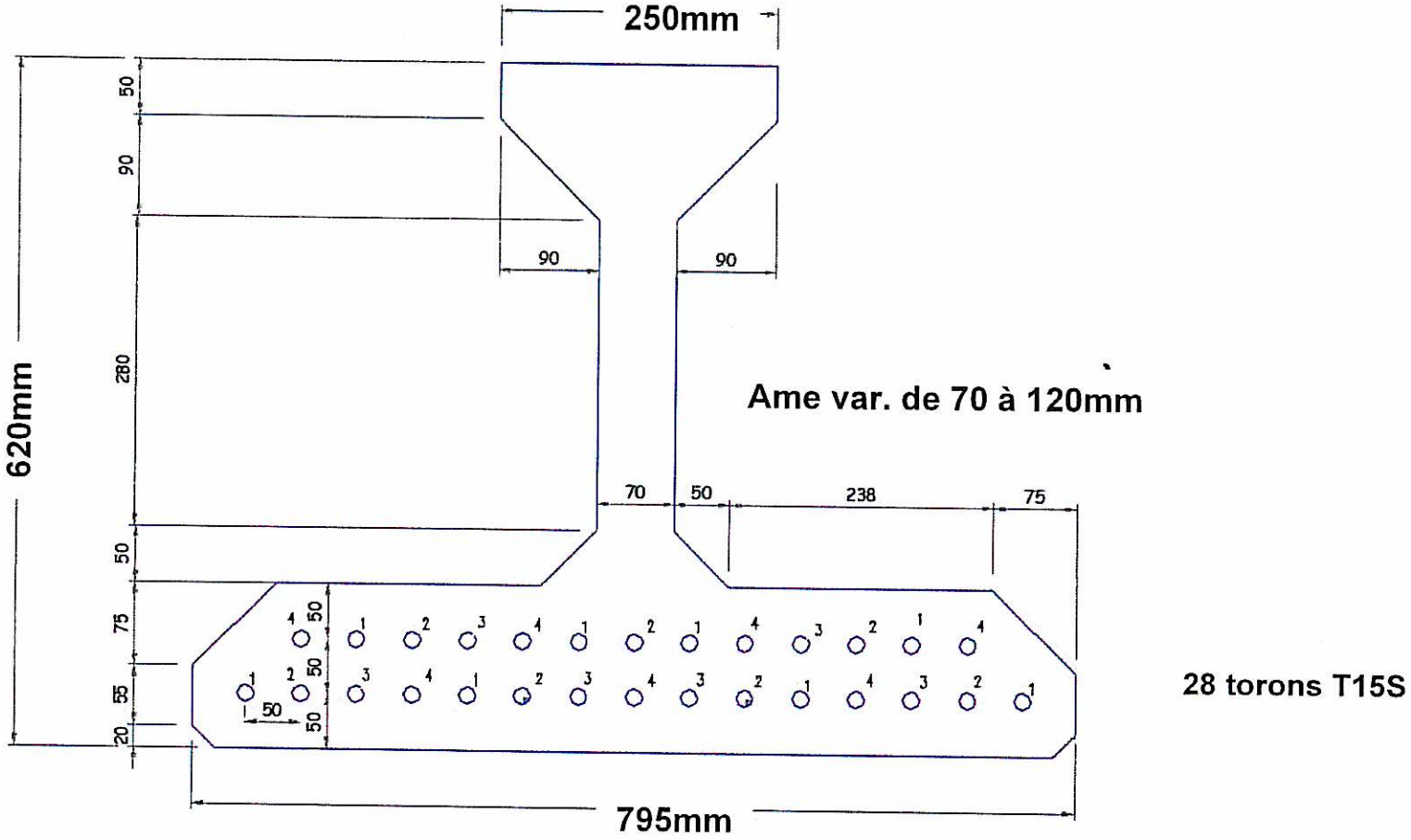
Coupe transversale de la solution de base du triplement

Une dalle à 17 poutrelles enrobées HEB700 de 0,85m de hauteur et de 27m de portée



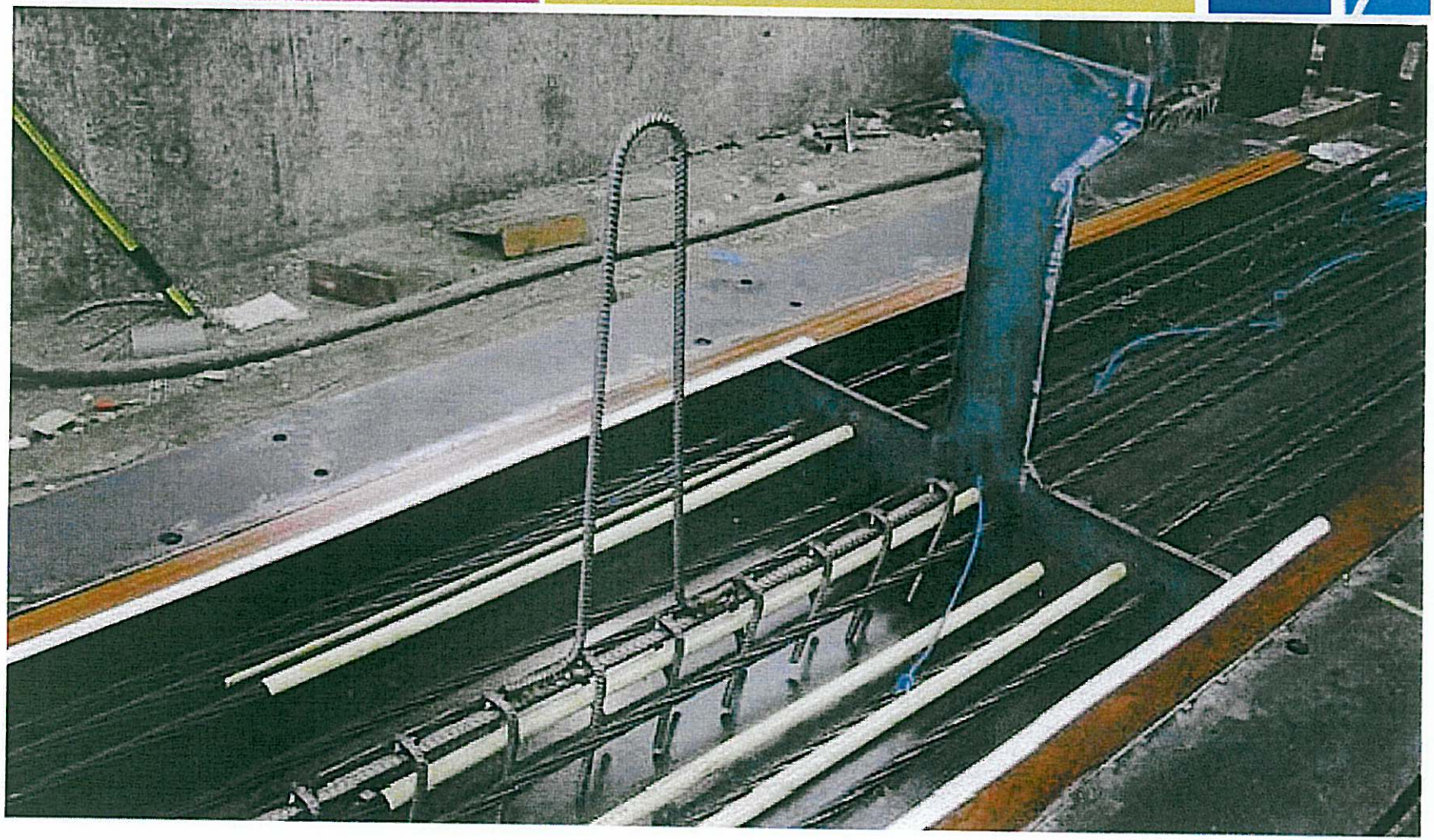
Coupe transversale du tablier de la variante d'Eiffage TP

Tablier avec 17 poutres jointives en BFUP et un hourdis en béton classique C35/45



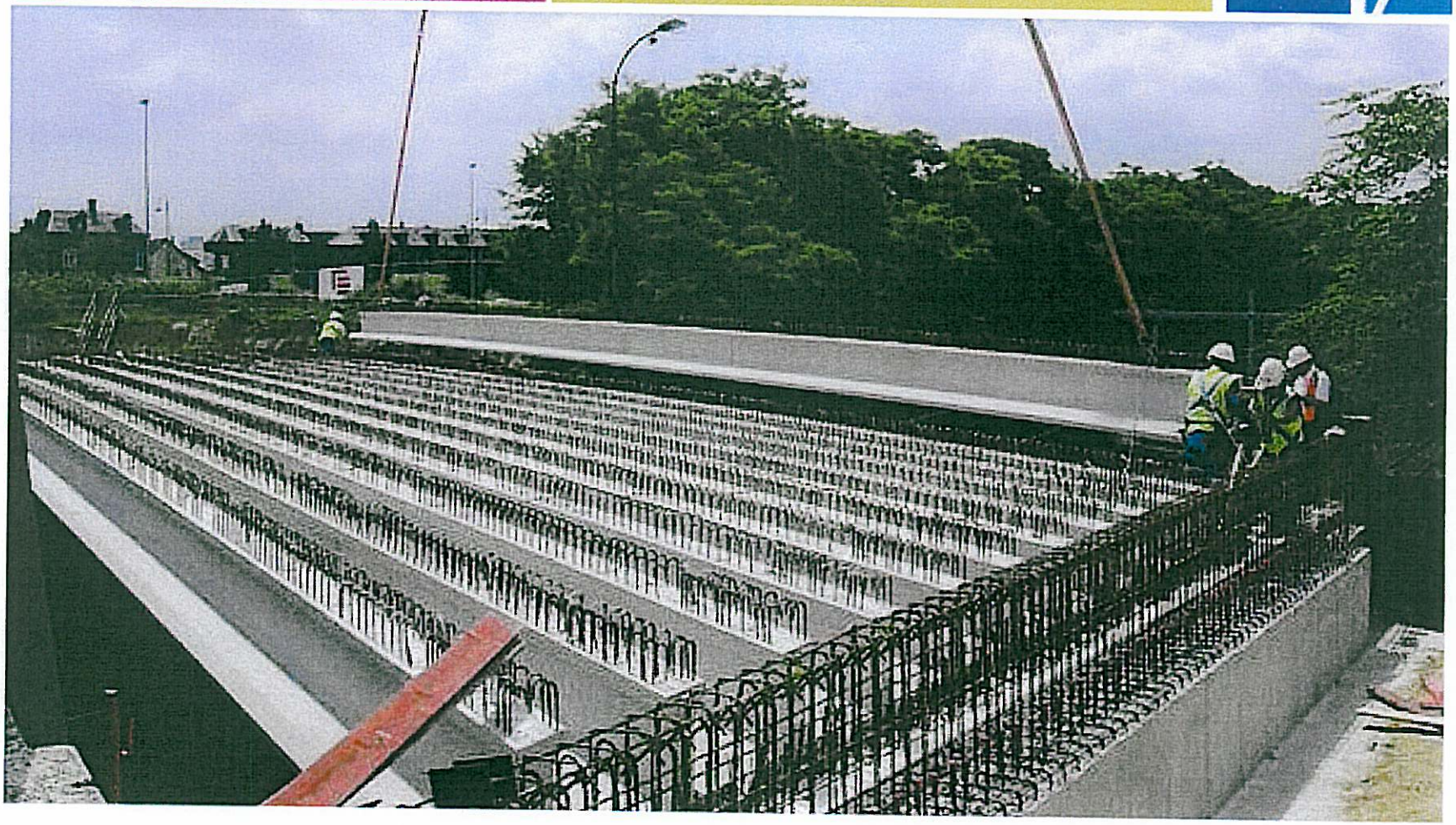
Coffrage des poutres courantes de la variante d'Eiffage TP

(élancement des poutres seules : 1/43éme)



Masque d'extrémité, peigne, torons et gaines

Le triplement du pont Pinel à Rouen par un ouvrage à poutres en BFUP



Pose des poutres à la grue le 9 juin 2007

Les 17 poutres ont été posées en huit heures avec une grue de 200t

Conclusions

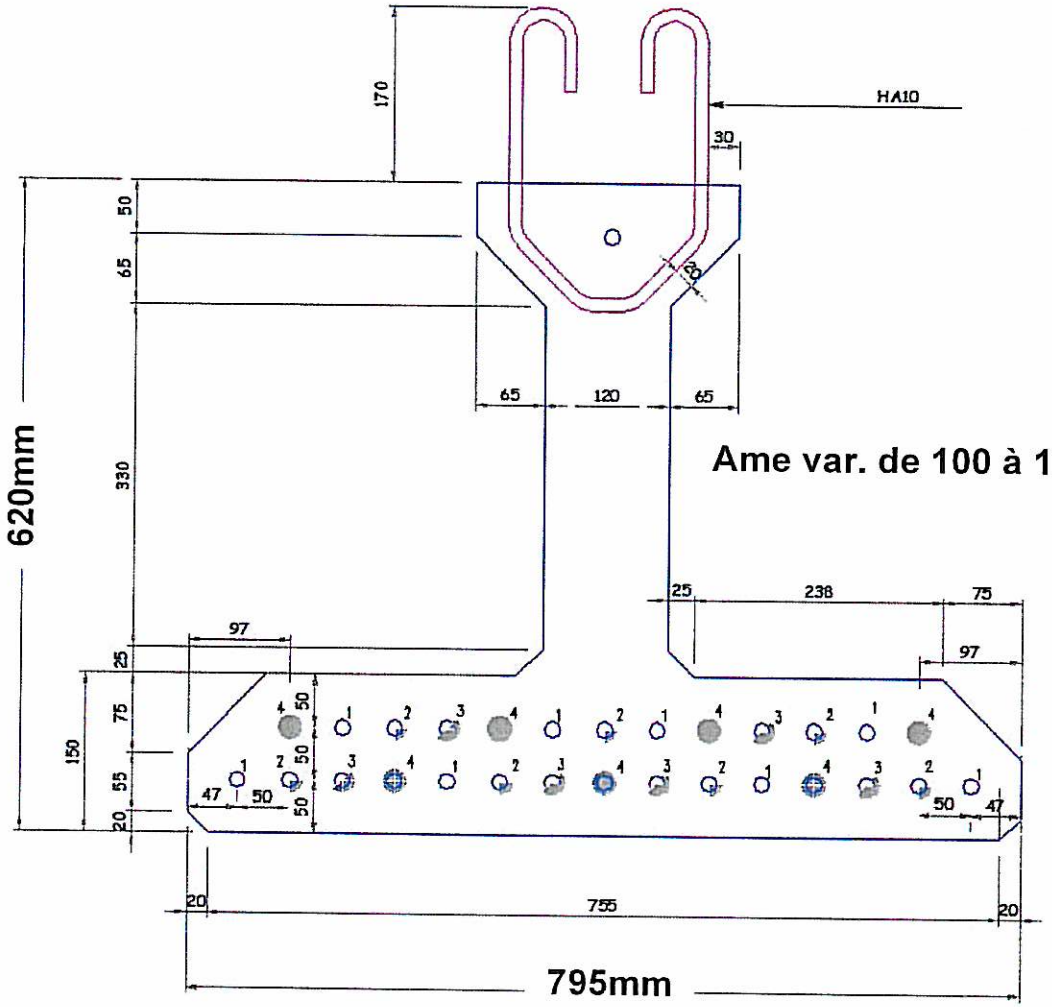
Avantages

Grande durabilité du BFUP
Légéreté de la structure
Faible consommation de matière
Peu de tâches postérieures à la pose des poutres
Stabilité des poutres en construction

Inconvénients

Durabilité des parties d'ouvrage non homogène
Structure creuse non visitable
Matériau encore assez pointu

Le triplement du pont Pinel à Rouen par un ouvrage à poutres en BFUP



1 toron T15S

28 torons T15S

Coffrage des poutres renforcées (poutres de rive)

Le BFUP

Identique au BSI Ceracem Millau adopté pour le péage de Millau

Résistance caractéristique en compression égale à 165 MPa

Composition :

- **2360 kg de Sika Premix Ceracem BFM Millau 25 (*),**
- **45 kg de super plastifiant,**
- **195 kg d'eau,**
- **195 kg de fibres métalliques.**

(*) Le Premix est un composant sec, livré en sacs, constitué du ciment et des granulats.