

<b>BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR</b> <b>TRAVAUX PUBLICS</b>
---

## **E4 : Étude Technique et Économique**

### **Unité U41 – Études de Conception et de Réalisation en Maîtrise d’Oeuvre**

SESSION 2013

---

**Durée : 6 heures**

**Coefficient : 3**

---

**Matériel autorisé :**

Toutes les calculatrices de poche y compris les calculatrices programmables, alphanumériques ou à écran graphique à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante (Circulaire n°99-186 du 16 novembre 1999, B.O. n° 42 du 25 novembre 1999).

**Documents à rendre avec la copie :**

- DR1 : Profil en long de la bretelle H page 22/25
- DR2 : Vue en plan partielle de la bretelle H page 23/25
- DR3 : Coupe longitudinale partielle de la culée page 24/25
- DR4 : Ferrailage d'un pieu page 25/25

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet. Le sujet se compose de 25 pages. Il comprend :

- Le dossier technique et le questionnement : Pages 1/25 à 10/25
- Les documents techniques : DT1 à DT9 : Pages 11/25 à 20/25
- Les documents réponses : DR1 à DR4 : Pages 21/25 à 25/25

# ÉCHANGEUR DE CORMONTREUIL

La bretelle de Cormontreuil, créée en 1977, a permis à l'autoroute A4 Paris – Reims – Strasbourg de desservir Reims Sud. En 1997, lors de la construction de l'autoroute A34 Charleville Mézières – Reims, son rôle évolue. Elle devient l'échangeur entre l'A4 et l'A34. Aujourd'hui, sa conception ne permet plus d'absorber le trafic routier toujours croissant. Les pouvoirs publics ont donc été amenés à envisager une redéfinition complète de l'échangeur (voir la figure ci-contre).

## Le contexte humain

Travaillant dans une société d'ingénierie, vous êtes l'assistant de M. Vautras, ingénieur en maîtrise d'œuvre. Vous avez déjà prouvé vos capacités sur d'autres affaires, ce qui vous a permis d'être choisi pour ce projet complexe.

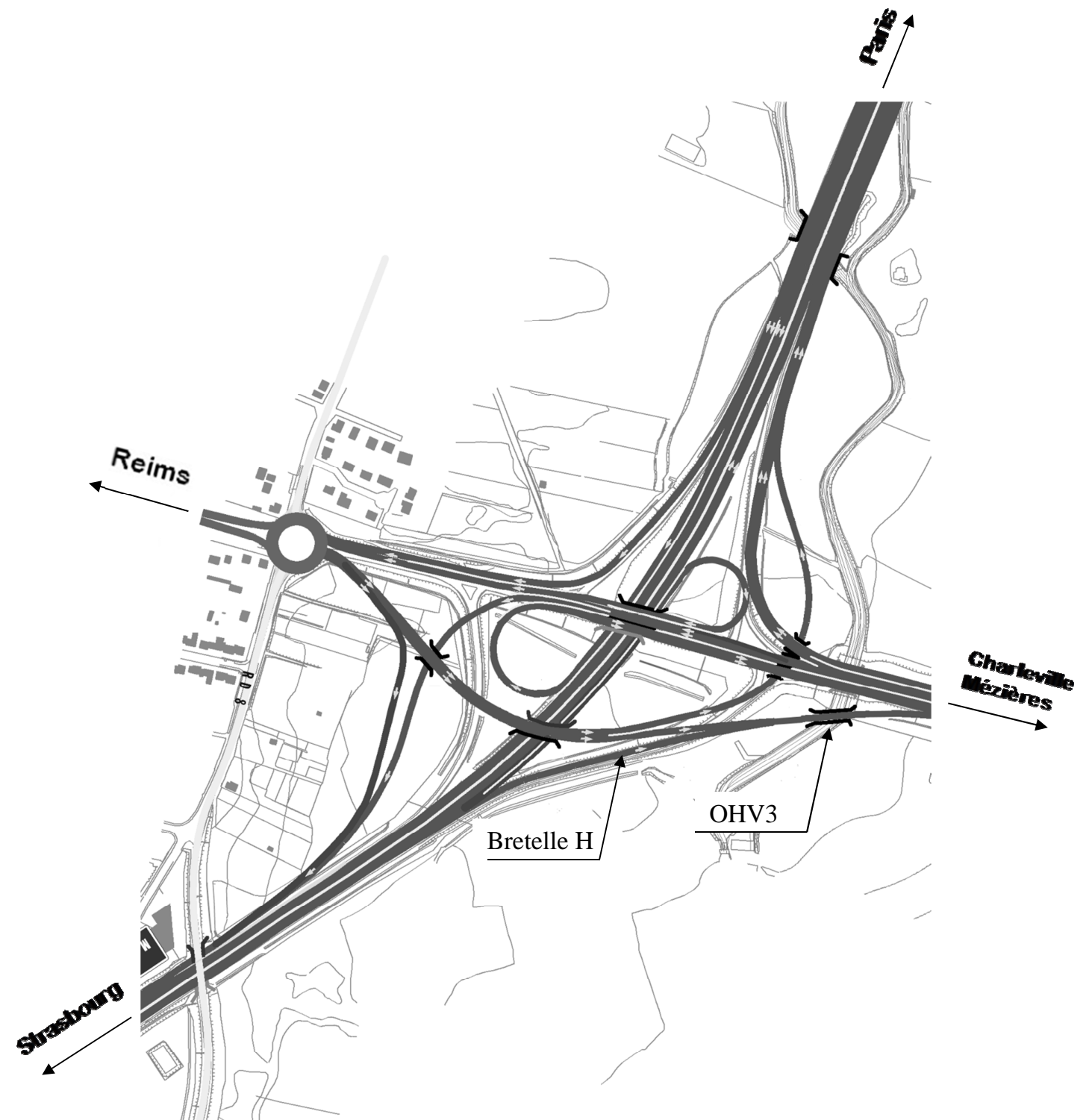
Vous êtes attaché aux études de la bretelle H (Strasbourg → Charleville Mézières) et de l'ouvrage hydraulique OHV3 (voir les deux pages suivantes) dont vous êtes chargé d'approfondir la faisabilité.

L'OHV3 est un pont mixte fondé sur pieux d'une portée de 59,491 m.

## Le contexte technique

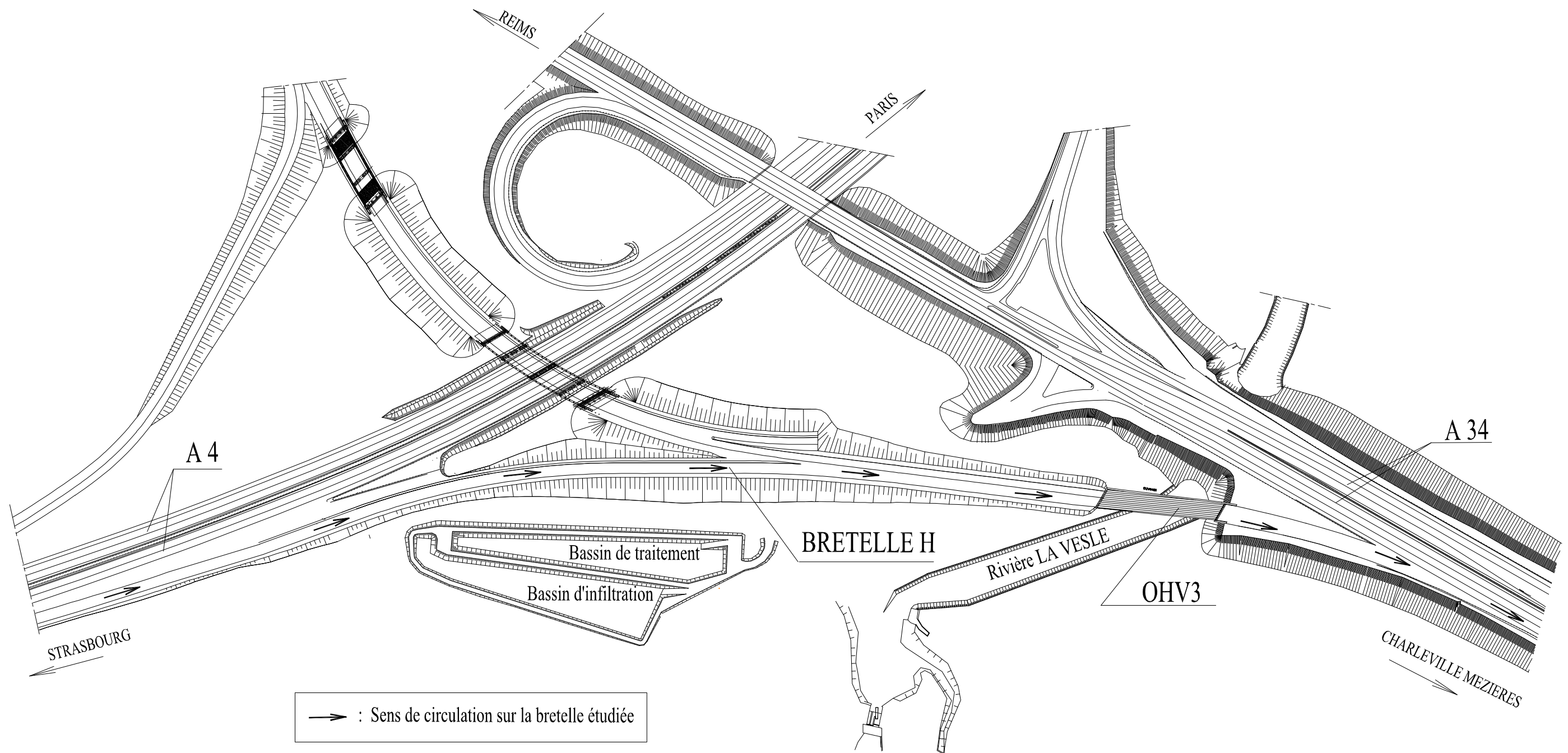
Les points suivants doivent être étudiés:

- Les terrains acquis limitent fortement l'emprise possible. Une recherche poussée de la géométrie de la bretelle doit donc être faite. C'est l'objet de la **première étude**.
- Les problèmes environnementaux sont complexes sur ce chantier. L'**étude 2** les aborde.
- Le remblai d'accès à l'ouvrage d'art est construit sur un sol de mauvaise qualité. Les choix techniques qui en découlent seront définis dans l'**étude 3**.
- Le soutènement du remblai contigu sera vu dans l'**étude 4**.
- Dans l'**étude 5**, vous définirez en partie la culée.
- Le tablier sera étudié dans l'**étude 6**.
- Et, pour terminer, on s'intéressera aux fondations profondes dans l'**étude 7**.

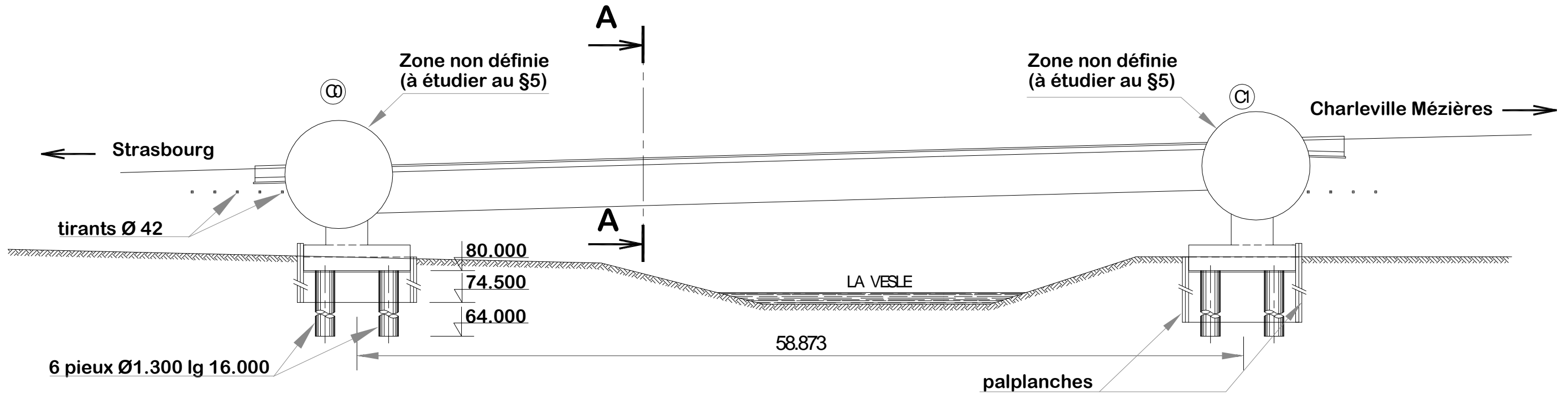


Nouvel échangeur

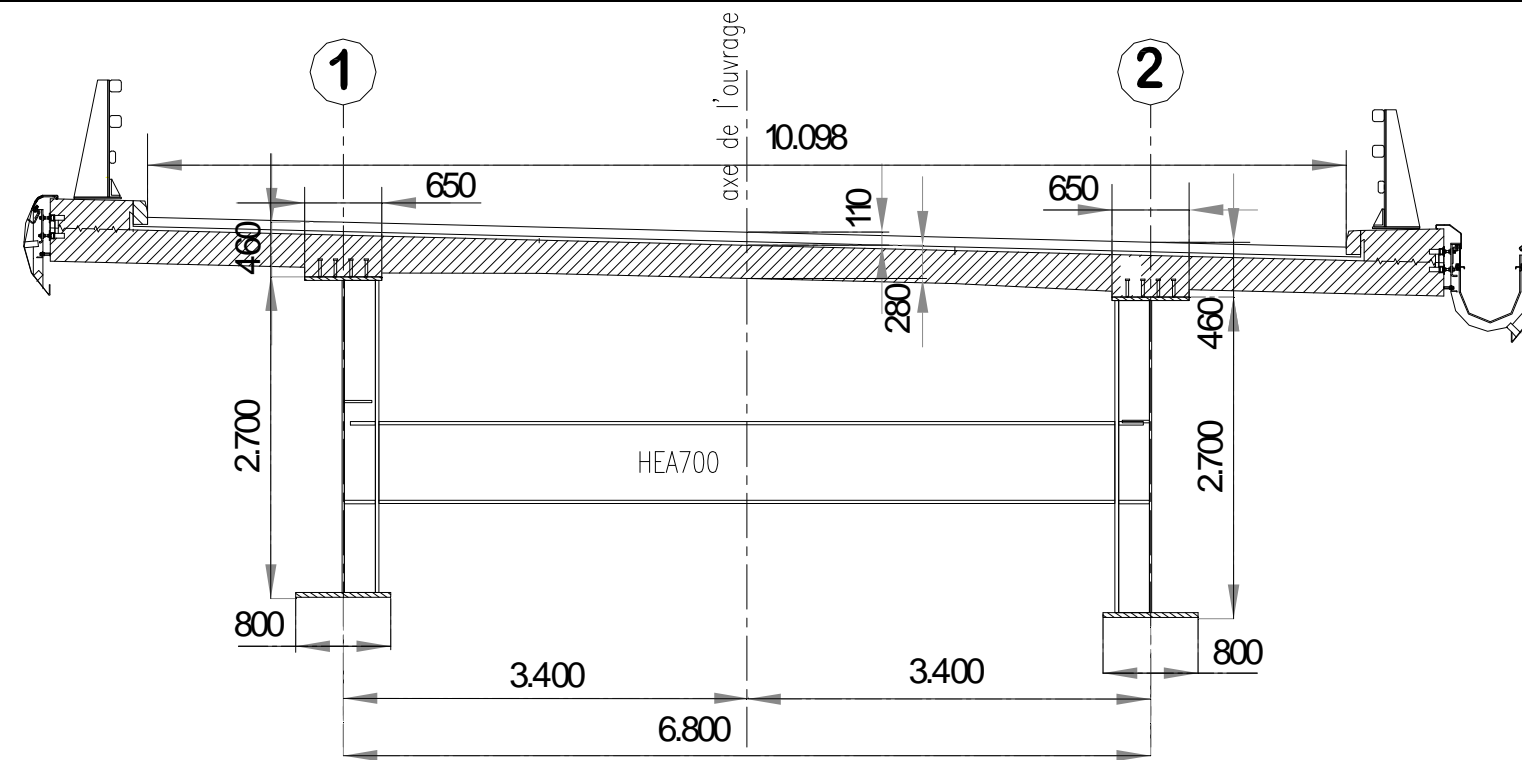
# VUE EN PLAN PARTIELLE DE L'ÉCHANGEUR (Phase provisoire)



## OHV3 COUPE LONGITUDINALE



## OHV3 COUPE TRANSVERSALE AA



# QUESTIONNEMENT

<b>Étude 1 : Définition géométrique de la bretelle H.....</b>	<b>25 points</b>
<b>Étude 2 : Environnement - Assainissement.....</b>	<b>30 points</b>
<b>Étude 3 : Remblai .....</b>	<b>20 points</b>
<b>Étude 4 : Remblai contigu de l'OHV3.....</b>	<b>50 points</b>
<b>Étude 5 : Culée.....</b>	<b>20 points</b>
<b>Étude 6: Tablier.....</b>	<b>15 points</b>
<b>Étude 7 : Fondations.....</b>	<b>40 points</b>
	<b>200 points</b>

## ÉTUDE 1 : DÉFINITION GÉOMÉTRIQUE DE LA BRETELLE H

Voir les documents réponses DR1 et DR2.

L'étude du tracé de la bretelle a été confiée à un de vos collègues. Suite à une restructuration de votre service, votre responsable vous charge de reprendre le dossier en cours et de terminer cette étude. Vous prenez connaissance du profil en long de la bretelle H défini sur le document réponse DR1.

1.1 Que signifie P.C. : 79.000?

1.2 Pourquoi votre collègue a-t-il choisi des échelles différentes en s et en z ?

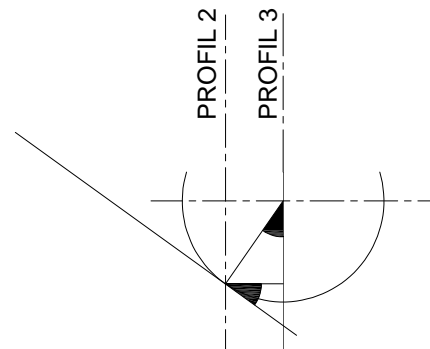
1.3 On doit connaître la hauteur du remblai pour déterminer les conditions de sa mise en œuvre. La structure de la chaussée est identique tout le long de la bretelle. Dans quel profil coté la hauteur de remblai sera-t-elle maximale?

1.4 La chaussée a un profil en travers à devers unique. Dessiner le profil en travers schématique du profil 9 (on regarde vers Charleville Mézières). Quels paramètres permettent de déterminer la valeur de ce devers ?

1.5 En élévation, le profil en long se compose des courbes suivantes :

- Entre les profils 1 et 2 : rampe de pente 1 %,
- Entre les profils 2 et 8 : cercle de rayon 1000 m,
- Entre les profils 8 et 17bis : cercle de rayon 1880 m.

Déterminer la valeur "distance partielle" entre le profil 2 et le profil 3 (point bas). Pour cela, vous serez amené à calculer l'angle repéré sur le dessin ci-dessous à l'aide de la valeur de la pente de la droite.



En déduire l'abscisse du profil 2. Déterminer ensuite les cotes projet des profils 2 et 3.

1.6 En plan, entre les profils 1 et 11bis, la géométrie de la bretelle est un cercle de rayon 400 m. Utiliser les informations données précédemment, les résultats de vos calculs et les informations déjà données sur le profil en long pour renseigner "au maximum" les lignes "pentes et rampes" et "alignement et courbes" sur le document réponse DR1.

Remarques : Les informations données ne vous permettent pas de remplir complètement les 2 lignes "pentes et rampes" et "alignement et courbes".

## ÉTUDE 2 : ENVIRONNEMENT - ASSAINISSEMENT

Voir le document réponse DR2.

Un arrêté préfectoral concernant les eaux souterraines indique :

La zone de travaux est incluse dans le périmètre de protection éloigné du captage d'alimentation en eau potable de Fléchambault.

La nappe phréatique se situe à une profondeur variant de 0 à 2 mètres. Les relations entre la nappe et la Vesle étant étroites, cette nappe phréatique crayeuse est par conséquent identifiée comme très vulnérable. Les eaux pluviales ruisselant sur la chaussée seront collectées puis acheminées jusqu'à des bassins (bassin de traitement et bassin d'infiltration) au niveau desquels elles seront traitées avant de rejoindre le milieu naturel (eaux souterraines).

2.1 Dessiner (sous forme de schémas) sur le document réponse DR2, le cheminement de l'eau de ruissellement de la chaussée de la bretelle H. Indiquer également sur ce document, les différents ouvrages d'assainissement schématisés à mettre en place pour assurer l'écoulement des eaux depuis la chaussée de la bretelle H jusqu'aux bassins.

Cette étude sera faite en répondant aux exigences environnementales. Les ouvrages d'assainissement seront représentés par des symboles (un exemple vous est donné sur le document DR2).

2.2 En tant que technicien "maître d'œuvre", on vous confie la tâche de concevoir les bassins. Quels traitements les eaux de ruissellement vont-elles subir dans le bassin de traitement pour répondre aux exigences environnementales ? Comment ces traitements sont-ils effectués ?

2.3 Quelles informations allez-vous rechercher pour pouvoir déterminer les dimensions du bassin d'infiltration ?

## ÉTUDE 3 : REMBLAI

Vous avez demandé au laboratoire LRPC de Saint Quentin de réaliser une étude géotechnique du sol en place, au niveau de la bretelle H. Les sondages ont été effectués le 7 Août. Les résultats du sondage sont les suivants :

0,00 m à - 0,50 m	- 0,50 m à - 2,50 m	- 2,50 m à - 5,00 m
Terre végétale + tourbe	Silt argileux et tourbeux	Craie pâteuse, polluée

La nappe phréatique a été rencontrée à -1,95 m.

Les teneurs en eau des sols sont les suivantes :

Profondeur (m)	1	2	3	4
$w_n$ (%)	19,9	25,7	24,5	32,1

Le rapport indique :

"La hauteur de remblai à mettre en œuvre amène l'examen de deux problématiques :

- la première est relative à la stabilité au poinçonnement à court terme,
- la deuxième est relative aux tassements à long terme".

**3.1** Dans les conditions actuelles, le sol en place ne résistera pas au poids de tout le remblai à construire. Une première solution envisageable consiste à consolider le sol en place.

### 3.1.1 Préciser en quoi consiste cette technique.

**3.1.2** Cette technique implique des temps d'attente importants avant de pouvoir construire la chaussée. Quel essai complémentaire allez-vous demander au LRPC pour pouvoir prévoir l'évolution du tassement dans le temps? Décrire succinctement cet essai en précisant les valeurs mesurées.

**3.1.3** Quelle solution économiquement envisageable pourrait-on demander à l'entreprise pour diminuer les temps de consolidation? Faire un schéma explicitant votre solution.

**3.2** Quelle autre solution, différente de la consolidation du sol en place, permettrait la mise en place du remblai en toute sécurité?

**3.3** Le maître d'ouvrage possède sur un chantier voisin un stock de sol conséquent. Quel document devez-vous consulter pour savoir si, d'un point de vue technique, ce sol peut être utilisé pour construire le remblai?

**3.4** Lors de la remise de son offre, l'entrepreneur du lot terrassement doit présenter le SOPRE (Schéma Organisationnel du Plan de Respect de l'Environnement). Dans ce document, quelles nuisances générées par le chantier devront être analysées pour que l'offre retienne votre attention? D'où proviennent ces nuisances?

Remarques:

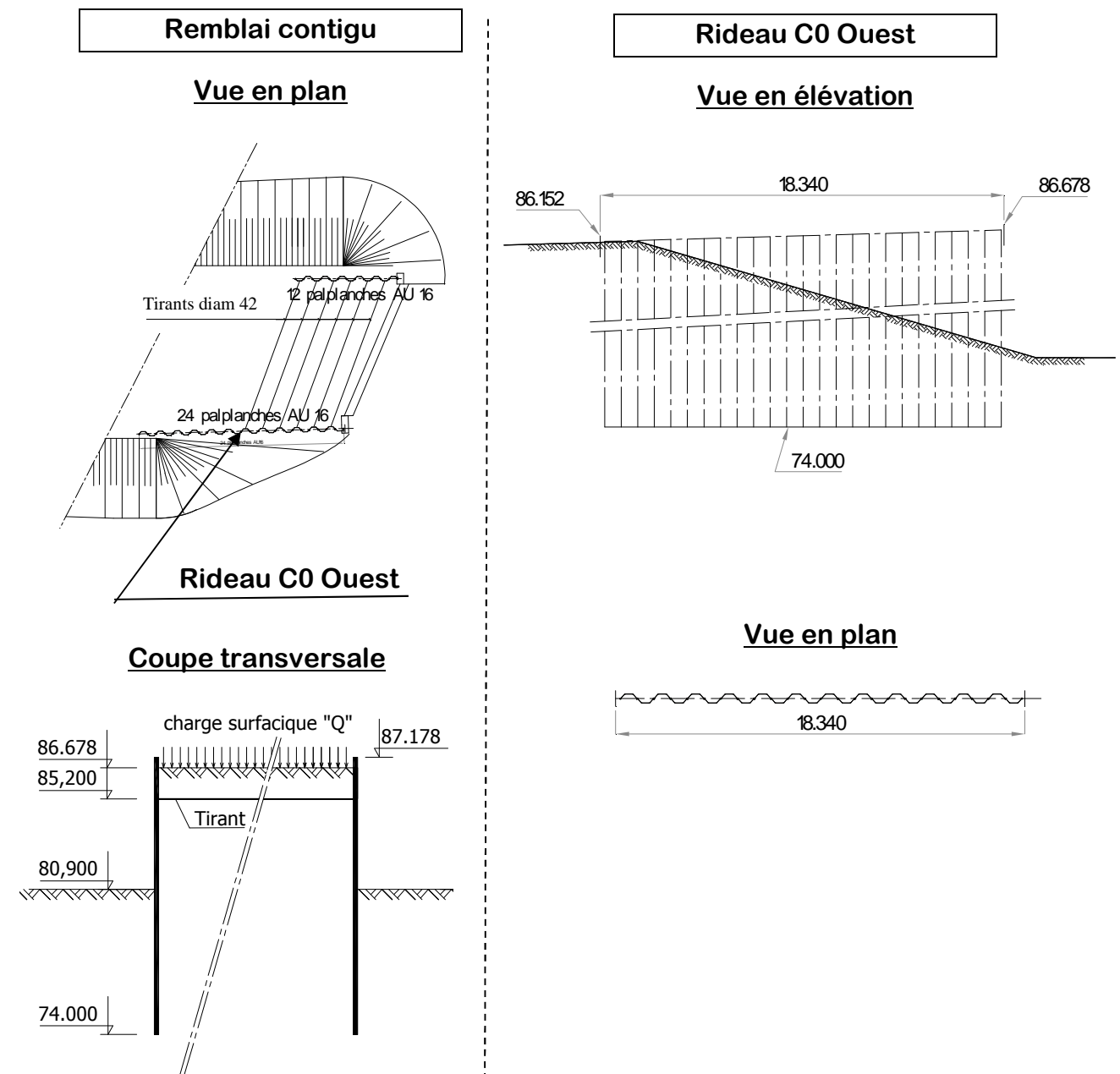
- On vous rappelle qu'une des contraintes à considérer est le captage d'alimentation en eau potable de Fléchambault.

- On ne vous demande pas comment ces nuisances devront être gérées.

## ÉTUDE 4 : REMBLAI CONTIGU DE L'OHV3

Voir les documents techniques DT1, DT2, DT3.

On envisage de stabiliser le remblai contigu par deux rideaux de palplanches AU 16 reliés par des tirants de diamètre 42 mm. Les tirants sont en acier de type S 235. Les palplanches sont en acier de type S 355.



On étudie les palplanches AU 16 les plus sollicitées du rideau CO Ouest.

**4.1** Définir précisément, à l'aide de schémas (coupe transversale et vue en élévation), une solution technique assurant la liaison des palplanches avec les tirants.

**4.2** La coupe transversale du remblai contigu est définie ci-contre. En prédimensionnement, on étudie un tronçon de rideau d'un mètre de longueur soumis à la poussée du sol et à l'action d'un tirant Ft.

Les caractéristiques du sol du remblai (limon) sont :

- cohésion = 0,
- poids volumique = 20 kN/m<sup>3</sup>,
- angle de frottement interne = 30°.

La charge surfacique "Q" due aux véhicules est égale à 10 kPa.

Le schéma mécanique des palplanches AU 16 est donné **en partie** ci-contre. Elles sont encastrées de la cote 74,000 m à la cote 80,900 m, supportent la poussée du remblai de la cote 80,900 m à la cote 86,678 m (poussée non représentée sur le schéma), et sont soumises à Ft, effort d'un tirant de 13 m de longueur.

On rappelle que la poussée du sol sur le rideau en un point M de profondeur z est égale à  $K_a(\gamma z + Q)$ , où

- $K_a$  = coefficient de poussée =  $\tan^2(\pi/4 - \varphi/2)$ ,  $\varphi$  étant l'angle de frottement du sol (exprimé en radians),
- $\gamma$  est le poids volumique du sol,
- Q est la charge surfacique.

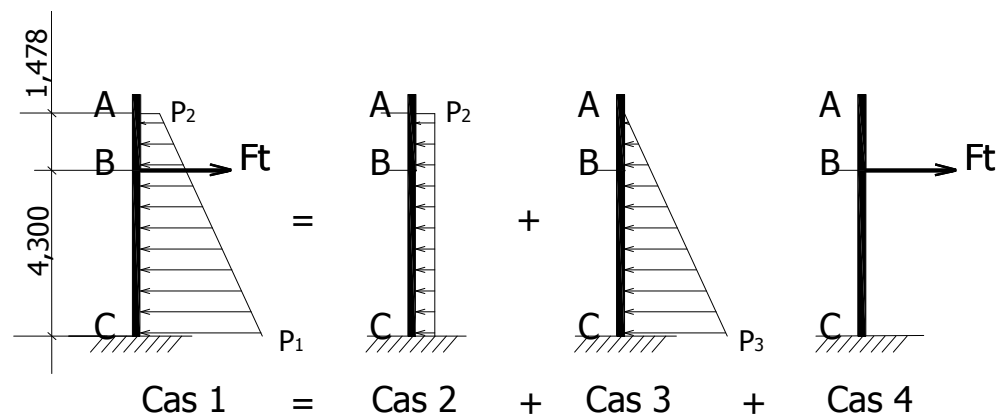
**4.2.1** Déterminer  $P_1$  et  $P_2$ , valeurs non pondérées de la poussée en C et A.

**4.2.2** Compléter le schéma mécanique des palplanches en traçant le diagramme de poussée du sol sur le rideau. Justifier votre réponse.

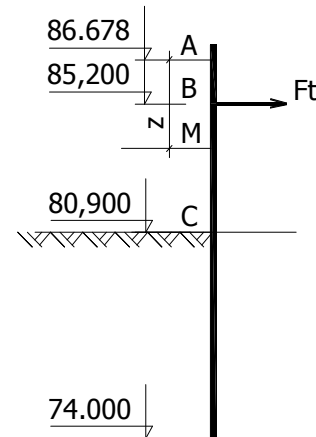
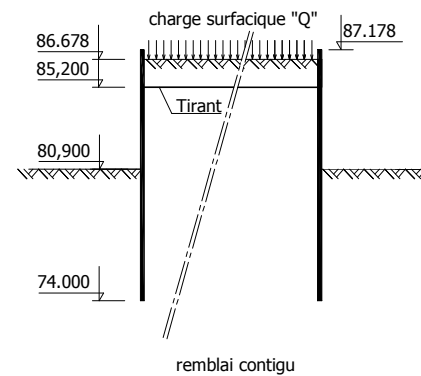
Les calculs qui suivent sont faits à l'ELU. On prendra donc les valeurs pondérées suivantes pour traiter les questions qui suivent :

$$P_1 = 57 \text{ kPa} \quad P_2 = 5 \text{ kPa}$$

**4.3** Le principe de superposition permet de décomposer les actions agissant sur le rideau en 3 cas de charge :



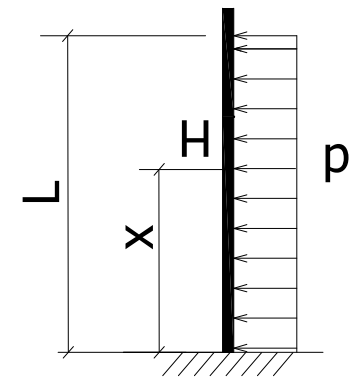
Pour déterminer l'effort Ft, nous allons déterminer la flèche en B pour chaque cas de charge.



**4.3.1** Pour le cas 2, on donne la flèche en H d'abscisse x dans le cas d'une poutre encastrée supportant une charge uniformément répartie :  $f = \frac{px^2(x^2 - 4Lx + 6L^2)}{24EI}$

Remarque : Cette valeur est donnée en valeur absolue.

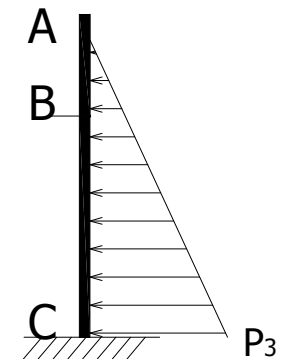
Calculer la flèche  $f_2$  en B.



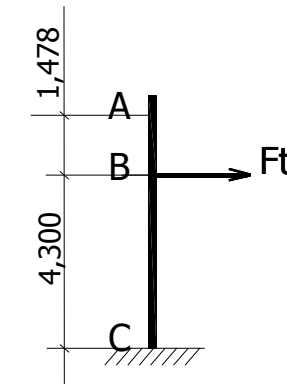
**4.3.2** Pour le cas 3, on utilise le logiciel RdM 6. Déterminer tout d'abord la valeur de  $p_3$  que nous devons intégrer dans le logiciel.

Ce logiciel ne permet pas de résoudre le problème dans le cas où on étudie des palplanches, mais permet de connaître la flèche correspondant à ce cas de charge pour un HEA 700. La flèche en B pour un HEA 700 sollicité comme indiqué ci-contre est de 2,9 mm (le HEA est orienté pour offrir le plus grand moment quadratique).

Déterminer la flèche  $f_3$  en B des palplanches dans le cas 3. Vous expliquerez votre démarche.



**4.3.3** Pour le cas 4, vous calculerez la flèche  $f_4$  en B en fonction de Ft. Justifier votre réponse en utilisant le document DT2.



**4.3.4** La déformation des tirants étant très faible, on peut considérer qu'elle est nulle. Le déplacement du point B dans le cas 1 est donc nul. En déduire la valeur de Ft.

**4.4** Déterminer le moment fléchissant maximal dans le cas 1 si on prend un effort Ft égal à 70 kN, valeur admise jusqu'à la fin du sujet.

**4.5** La durée de vie de l'ouvrage est de 100 ans. Les palplanches sont en acier de type S 355. A long terme, elles travaillent dans le domaine plastique (classe 1). Vérifier la résistance des palplanches en prenant un moment fléchissant maximal égal à 75 mkN. Pourquoi les palplanches sont-elles surdimensionnées ?



4.6 Les tirants de diamètre 42 sont espacés de 1,41 m.

4.6.1 Vérifier que les tirants résistent, si on suppose qu'ils travaillent dans le domaine plastique (classe 1). On rappelle qu'ils sont en acier de type S 235.

4.6.2 La valeur de l'effort normal agissant sur les tirants permet de déterminer leur allongement en considérant qu'ils travaillent dans le domaine élastique. Déterminer l'allongement des tirants de 13 m de long. L'hypothèse formulée en 4.3.4 est-elle justifiée?

### ÉTUDE 5 : CULÉE

Voir le document réponse DR3.

On vous demande de compléter le plan du document réponse DR3 afin de concevoir les interfaces entre la dalle de transition, l'about du tablier et la culée. Vous légendez les éléments que vous avez définis. Les dimensions des éléments à concevoir sont laissées à l'initiative du candidat mais ne seront pas cotées.

### ÉTUDE 6 : TABLIER

Voir les documents techniques DT4, DT5.

On s'intéresse aux actions permanentes agissant sur le tablier afin de dimensionner celui-ci puis la fondation. Déterminer précisément le poids d'un PRS (profilé reconstitué soudé) sans tenir compte des différents raidisseurs, des plaques d'appuis et des goujons.

- Remarques :
- Vous noterez que les épaisseurs des semelles ne sont pas constantes,
  - Le poids volumique de l'acier est de  $7\,850\text{ daN/m}^3$ .

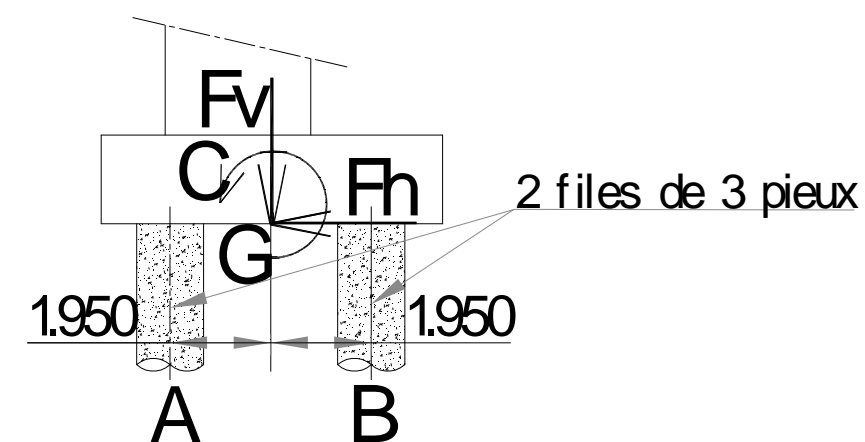
### ÉTUDE 7 : FONDATIONS

Voir les documents techniques DT6, DT7, DT8, DT9 et le document réponse DR4.

On veut dimensionner les fondations de la culée C0.

7.1 Les actions pondérées (ELU) agissant sur la culée et calculées en G, centre de gravité de la base de la semelle, ont les valeurs suivantes :

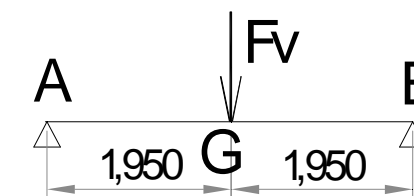
- $F_v = 16\,890\text{ kN}$ ,
- $F_h = 170\text{ kN}$ ,
- $C = 6\,930\text{ mkN}$ .



Les liaisons entre la semelle et les pieux sont des appuis ponctuels. Les pieux travailleront en compression.

7.1.1 On étudie l'action de  $F_v$  seule sur les pieux. Le schéma mécanique est donné ci-contre.

Déterminer les actions sur chaque file de pieux A et B.



7.1.2 On étudie l'action de C seul sur les pieux. Le schéma mécanique est le suivant.

Déterminer les actions sur chaque file de pieux A et B.



7.1.3 En déduire l'effort de compression maximal sur une file de pieux, puis sur un pieu. Certains pieux travaillent-ils en traction?

7.2 De 0,00 à 4,60 m de profondeur, le sol de mauvaise qualité est compressible.

7.2.1. Quelles conséquences cela peut-il avoir sur les pieux lors de la construction du remblai contigu. Justifier clairement votre réponse.

7.2.2. Comment pourrait-on minimiser ce problème?

**7.3** On recherche la force portante d'un pieu tubé foré (tube récupéré) de diamètre 1,30 m, fondé à 17 m de profondeur et situé au niveau de la culée C0. Le sondage PR 99-1 a été réalisé au niveau de la culée C0.

**7.3.1 Déterminer l'effort de pointe.** Vous prendrez pour  $P_{ie}^*$  la pression limite à la base du pieu. Vous considérerez que la hauteur d'encastrement effective  $D_{ef}$  est égale à 12 m.

**7.3.2** Le frottement latéral (porteur) ne se fait que dans la craie de bonne qualité (profondeur supérieure à 12,50 m). Pour calculer l'effort du au frottement latéral, on simplifie le problème en considérant que la pression limite du sol de - 12,50 à - 17 m a une valeur constante égale à 3,5 MPa. **Déterminer l'effort du au frottement latéral.**

**7.3.3** En déduire la force portante à l'ELU d'un pieu en pondérant par 0,5 l'effort de pointe et par 0,7 l'effort du au frottement latéral. **Que concluez-vous?**

**7.4** La rédaction de l'estimatif nécessite la connaissance du poids des aciers des pieux. Vu l'effort appliqué sur un pieu, on peut les ferrailer en utilisant les sections minimales d'armature définies par les normes.

**7.4.1** Dans le cas étudié, justifier mécaniquement la présence des armatures longitudinales et transversales.

**7.4.2** Déterminer les armatures longitudinales et transversales (nombre, diamètres, espacement....). Vous prendrez un espacement maximal des armatures transversales égal à 300 mm et un enrobage des aciers de 50 mm.

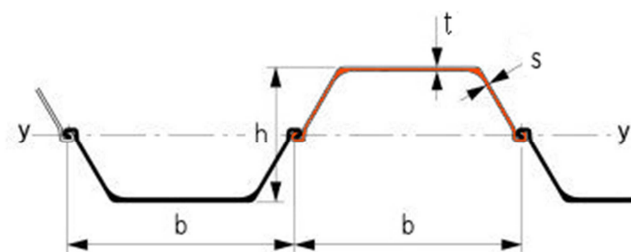
**7.4.3** Afin de faciliter le calcul ultérieur du métré, synthétiser vos résultats en schématisant le ferrailage sur le document réponse DR 4. Le dessin sera coté.

# DOCUMENTS TECHNIQUES

Caractéristiques géométriques : palplanches, H, cornières, armatures de béton armé.....	DT1
Théorème de Muller – Breslau . Intégrales de Mohr .....	DT2
Aciers de construction métallique : Caractéristiques des aciers - Eurocode 3 (extraits).....	DT2
Aciers de construction métallique : Résistance des sections transversales "Flexion – Traction" - Eurocode 3.(extraits)..	DT3
OHV3 Tablier : Vue en plan – Coupe transversale AA.....	DT4
OHV3 : Ossature métallique .....	DT5
Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 - Fondations profondes (Extraits).....	DT6 et DT7
Normes définissant le ferrailage d'un pieu - Eurocodes 2 et 7 - Norme NF 1536 (Extraits).....	DT8
Sondage pressiométrique .....	DT9

### Caractéristiques géométriques des palplanches

Série AU

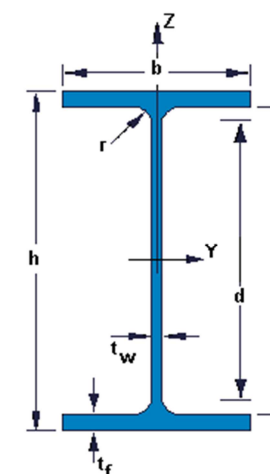


Profils	Dimensions				A	Gsp	Gw	I <sub>y</sub>	W <sub>el,y</sub>	S <sub>y</sub>	W <sub>pl,y</sub>
	b	h	t	s							
	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup> /m	kg/m	kg/m <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup> /m	cm <sup>3</sup> /m	cm <sup>3</sup> /m	cm <sup>3</sup> /m
AU14	750	408	10	8,3	132,3	77,9	103,8	28 680	1 405	820	1 663
AU16	750	411	11.5	9.3	146.5	86.3	115.0	32 850	1 600	935	1 891
AU17	750	412	12.0	9.7	151.2	89.0	118.7	34 270	1 665	975	1 968
AU18	750	441	10.5	9.1	150.3	88.5	118.0	39 300	1 780	1 030	2 082
AU20	750	444	12.0	10.0	164.4	96.9	129.2	44 440	2 000	1 155	2 339
AU21	750	445	12.5	10.3	169.3	99.7	132.9	46 180	2 075	1 200	2 423

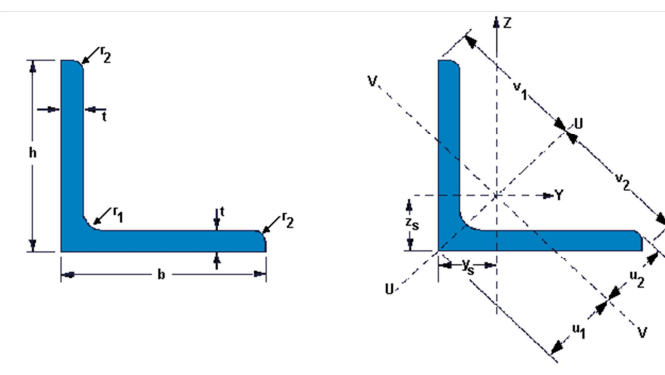
### ARMATURES BÉTON ARMÉ - SECTIONS

Ø mm	Sections (cm <sup>2</sup> )									
	Nombres de barres									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0,28	0,57	0,85	1,13	1,42	1,70	1,98	2,26	2,55	2,83
8	0,50	1,01	1,51	2,01	2,52	3,02	3,52	4,02	4,53	5,03
10	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07	7,85
12	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,78	7,91	9,04	10,17	11,30
14	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,78	12,32	13,86	15,40
16	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,09	20,10
20	3,14	6,28	9,42	12,56	15,70	18,84	21,98	25,12	28,26	31,40
25	4,91	9,82	14,73	19,64	24,55	29,46	34,37	39,28	44,19	49,10
32	8,04	16,08	24,12	32,16	40,20	48,24	56,28	64,32	72,36	80,40
40	12,57	25,14	37,71	50,28	62,85	75,42	87,99	100,56	113,13	125,70
50	19,63	39,26	58,89	78,52	98,15	117,78	137,41	157,04	176,67	196,30

### Caractéristiques géométriques des H et des cornières



	CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES		
<b>HEA 700</b>	<b>g = 204,00 kg/m</b> <b>A = 260,50 cm<sup>2</sup></b> <b>I<sub>y</sub> = 215 300 cm<sup>4</sup></b> <b>I<sub>z</sub> = 12 180 cm<sup>4</sup></b>	<b>h = 690 mm</b> <b>b = 300 mm</b> <b>t<sub>w</sub> = 14,5 mm</b>	<b>t<sub>f</sub> = 27 mm</b> <b>r = 27 mm</b> <b>d = 582 mm</b>
<b>HEB 600</b>	<b>g = 212,00 kg/m</b> <b>A = 270,00 cm<sup>2</sup></b> <b>I<sub>y</sub> = 171 200 cm<sup>4</sup></b> <b>I<sub>z</sub> = 11 270 cm<sup>4</sup></b>	<b>h = 600 mm</b> <b>b = 300 mm</b> <b>t<sub>w</sub> = 15,5 mm</b>	<b>t<sub>f</sub> = 30 mm</b> <b>r = 27 mm</b> <b>d = 486 mm</b>



	CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉTRIQUES		
<b>L 80 x 80 x 8</b>	<b>g = 9,63 kg/m</b> <b>A = 12,30 cm<sup>2</sup></b>	<b>r<sub>1</sub> = 10 mm</b> <b>r<sub>2</sub> = 5 mm</b> <b>y<sub>s</sub> = z<sub>s</sub> = 2,26 cm</b>	<b>v = 5,66 cm</b> <b>u<sub>1</sub> = 3,19 cm</b> <b>u<sub>2</sub> = 2,83 cm</b>

## Théorème de Muller-Breslau

(ou théorème de Castigliano ou théorème de Bertrand de Fontviolant).

$$\Delta_j = \int_{structure} \frac{M \times \bar{M}_j}{EI} dx$$

$E$  : Module d'élasticité longitudinale ou module d'Young

$I$  : Moment quadratique

$\Delta_j$  : Déplacement au point j,

$M$  : Moment de flexion, dans la structure étudiée ( $S$ )

$\bar{M}_j$  : Moment de flexion, dans ( $\bar{S}_j$ ) qui correspond à la structure initiale ( $S$ ) soumise à un facteur sollicitant unité (force unité ou couple unité =1) appliqué au point j.

Dans le cas de structures composées de poutres et de barres bi-articulées :

$$\Delta_j = \int_{structure} \frac{M \times \bar{M}_j}{EI} dx + \sum_{poutres\ bi-articulées} \frac{N \times \bar{N}_j}{EA} L$$

**Tableau des intégrales de Mohr :  $\int_0^L M_i(x) \times M_j(x) dx$**

$m_i(x)$	$m_j(x)$	$M_j \uparrow$	$M_j \downarrow$	$M_j \uparrow$	$M_j \downarrow$	$M_j \uparrow$	$M_j \downarrow$	$M_j \uparrow$	$M_j \downarrow$
		$LM_i M_j$	$\frac{1}{2} LM_i M_j$	$\frac{1}{2} LM_i (M_i + M_j)$	$\frac{2}{3} LM_i M_j$	$\frac{2}{3} LM_i M_j$	$\frac{2}{3} LM_i M_j$	$\frac{1}{3} LM_i M_j$	$\frac{1}{3} LM_i M_j$
		$\frac{1}{2} LM_i M_j$	$\frac{1}{3} LM_i M_j$	$\frac{1}{6} LM_i (2M_i + M_j)$	$\frac{1}{3} LM_i M_j$	$\frac{5}{12} LM_i M_j$	$\frac{1}{4} LM_i M_j$	$\frac{1}{4} LM_i M_j$	$\frac{1}{12} LM_i M_j$
		$\frac{1}{2} LM_i M_j$	$\frac{1}{6} LM_i M_j$	$\frac{1}{6} LM_i (M_i + 2M_j)$	$\frac{1}{3} LM_i M_j$	$\frac{1}{4} LM_i M_j$	$\frac{5}{12} LM_i M_j$	$\frac{1}{12} LM_i M_j$	$\frac{1}{4} LM_i M_j$
		$\frac{1}{2} LM_i (M_i + M_i')$	$\frac{1}{6} LM_i (2M_i + M_j)$	$\frac{1}{6} L (2M_i M_j + M_i M_j')$	$\frac{1}{3} LM_i (M_i + M_j)$	$\frac{1}{12} LM_j \times (5M_i + 3M_i')$	$\frac{1}{12} LM_j \times (3M_i + 5M_i')$	$\frac{1}{12} LM_j \times (3M_i + M_i')$	$\frac{1}{12} LM_j \times (M_i + 3M_i')$
		$\frac{1}{2} LM_i M_j$	$\frac{1}{6} LM_i M_j \left(1 + \frac{x'}{L}\right)$	$\frac{1}{6} LM_i \left[ M_j \left(1 + \frac{x'}{L}\right) + M_j' \left(1 + \frac{x'}{L}\right) \right]$	$\frac{1}{3} LM_i M_j \left(1 + \frac{xx'}{L^2}\right)$	$\frac{1}{12} LM_i M_j \times \left(3 + \frac{3x'}{L} - \frac{x'^2}{L^2}\right)$	$\frac{1}{12} LM_i M_j \times \left(3 + \frac{3x}{L} - \frac{x^2}{L^2}\right)$	$\frac{1}{12} LM_i M_j \times \left(\frac{3x'}{L} + \frac{x'^2}{L^2}\right)$	$\frac{1}{12} LM_i M_j \times \left(\frac{3x}{L} + \frac{x^2}{L^2}\right)$
		$\frac{1}{2} LM_i M_j$	$\frac{1}{4} LM_i M_j$	$\frac{1}{4} LM_i (M_i + M_j)$	$\frac{5}{12} LM_i M_j$	$\frac{17}{48} LM_i M_j$	$\frac{17}{48} LM_i M_j$	$\frac{7}{48} LM_i M_j$	$\frac{7}{48} LM_i M_j$

Dans le tableau,  $M_i, M_j, M_i', M_j'$ , sont les extremums des fonctions  $m_i(x)$  et  $m_j(x)$ . Ils sont à prendre en valeurs algébriques.

## Aciers de construction métallique

### Caractéristiques de l'acier

#### Eurocode 3 – (Extraits)

- le module d'élasticité longitudinale :  $E = 210000 \text{ MPa}$
- coefficient de Poisson :  $\nu = 0,3$
- module de cisaillement :  $G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 81000 \text{ MPa}$
- la limite d'élasticité :  $f_y$
- la contrainte de rupture à la traction :  $f_u$
- le coefficient de dilatation :  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
- masse volumique :  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

nuances d'acier

4 nuances d'acier : la nuance S 235 est la plus courante

Valeurs nominales de la limite d'élasticité  $f_y$  et de la résistance à la traction  $f_u$  pour les aciers de construction laminés à chaud. Tableau 3.1(NF)

Norme EN 10025-2	Épaisseur nominale de l'élément : $t$ .			
	$t \leq 40 \text{ mm}$		$40 < t \leq 80 \text{ mm}$	
	Limite d'élasticité $f_y$ (MPa)	Résistance à la traction $f_u$ (MPa)	Limite d'élasticité $f_y$ (MPa)	Résistance à la traction $f_u$ (MPa)
<b>S 235</b>	<b>235</b>	<b>360</b>	215	360
S 275	275	430	255	410
S355	355	490	335	470
S450	440	550	410	550

## Aciers de construction métallique - Résistance des sections transversales Eurocode 3 (Extraits)

### Traction simple

**Aire brute ( $A$ )**

Elle est calculée en utilisant les dimensions nominales sans déduire les trous pratiqués pour les fixations, mais il faut tenir compte des ouvertures plus importantes.

**Aire nette ( $A_{net}$ )**

Elle est égale à l'aire brute diminuée des aires des trous et autres ouvertures.

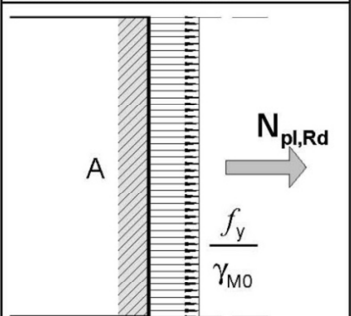
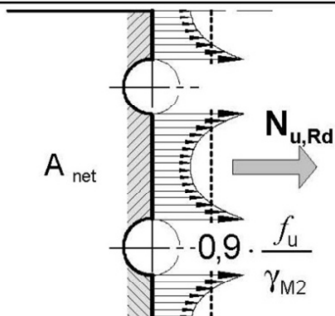
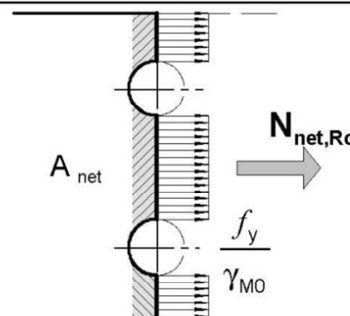
**Effort axial de traction ( $N$ )**

On doit vérifier :  $N_{Ed} \leq N_{t,Rd} = \min(N_{pl,Rd}, N_{u,Rd}, N_{net,Rd})$  où

$N_{Ed}$  = Effort de traction (agissant) sollicitant la section

$N_{t,Rd}$  = Résistance de calcul à la traction de la section, prise comme la plus petite des valeurs suivantes :

Lorsqu'un comportement ductile est requis, c'est à dire lorsque la section brute doit se plastifier avant la rupture de la section nette, il convient de vérifier la condition supplémentaire :  $N_{u,Rd} \geq N_{pl,Rd}$

SECTION BRUTE (en partie courante)	SECTION NETTE (perçages déduits au droit des assemblages)	
<p>On considère que l'état de plastification est atteint sur toute la section transversale.</p> 	<p><b>Assemblage par boulons ordinaires :</b> Il y a amplification des contraintes de traction au droit des perçages.</p> 	<p><b>Assemblage par boulons précontraints (HR) :</b> L'étreinte latérale permet une répartition quasi uniforme des contraintes de traction</p> 
<p>Résistance plastique de calcul de la section brute</p> $N_{pl,Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$	<p>Résistance ultime de calcul de la section nette au droit des trous de fixations</p> $N_{u,Rd} = 0,9 A_{net} \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$ <p>Validité de cette expression : attaches symétriques. Pour des cornières assemblées par une seule aile et autres types de sections assemblées par des parois en console, se référer à : EN 1993-1-8 clause 3.6.3</p>	<p>Résistance plastique de la section nette, à considérer dans le cas d'assemblages par boulons HR précontraints 8.8 ou 10.9 (attaches boulonnées de catégorie C) pour lesquels aucun glissement n'est autorisé.</p> $N_{net,Rd} = A_{net} \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$

### Flexion simple

On doit vérifier :  $M_{Ed} \leq M_{c,Rd}$

où  $M_{Ed}$  = Moment fléchissant (agissant) de calcul sollicitant la section droite à l'ELU ;

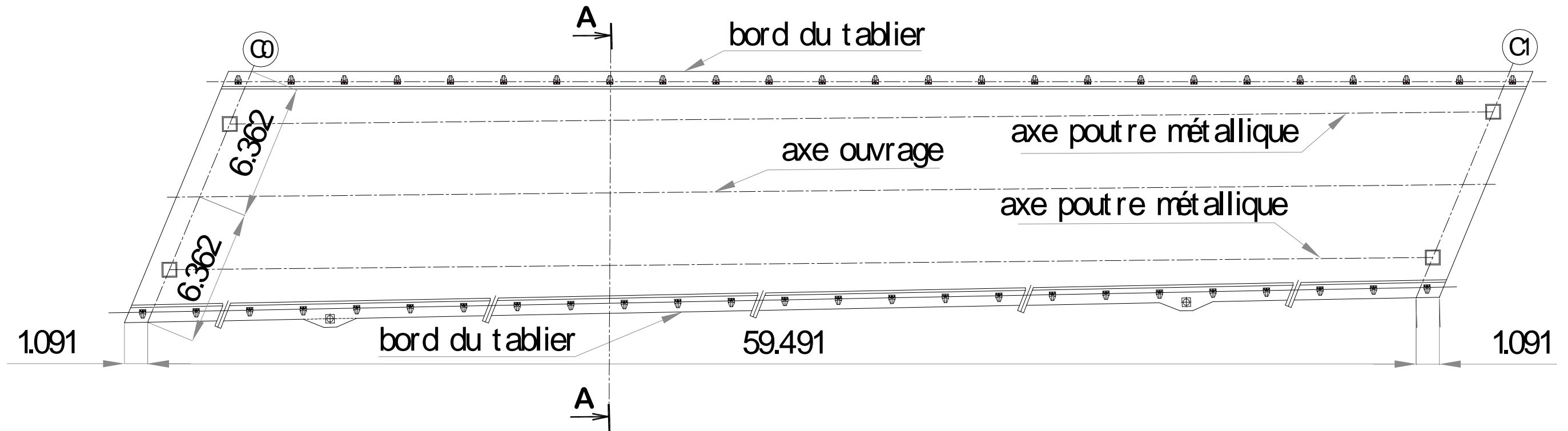
$M_{c,Rd}$  = Résistance de calcul à la flexion de la section à l'ELU.

pour une section de classe 1 ou 2	pour une section de classe 3
$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd}$ (moment résistant plastique)	$M_{c,Rd} = M_{el,Rd}$ (moment résistant élastique)
$M_{pl,Rd} = W_{pl} \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$	$M_{el,Rd} = W_{el,min} \times \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$

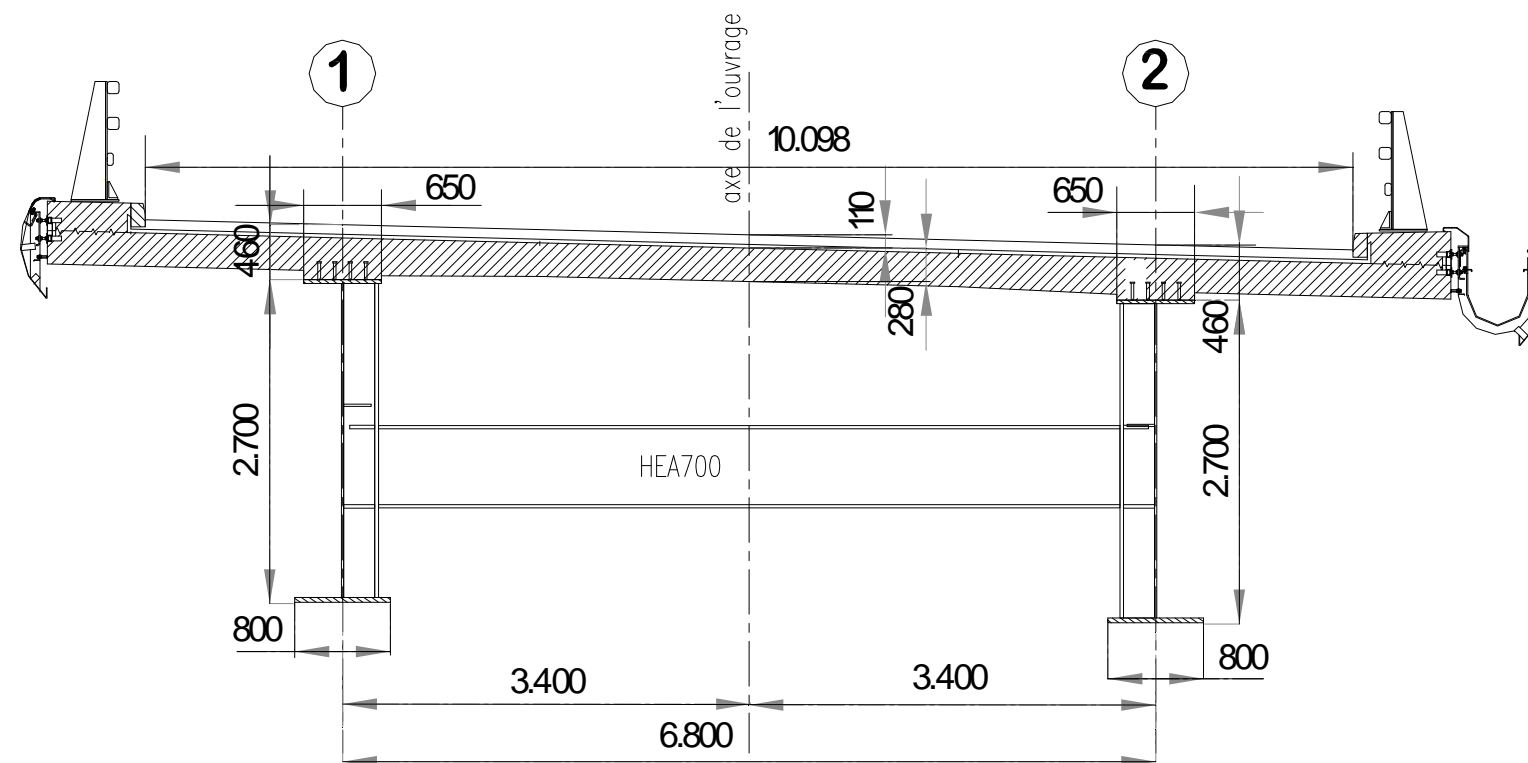
### Valeurs des coefficients partiels de sécurité $\gamma_M$

Valeurs des coefficients partiels de sécurité $\gamma_M$ sur les résistances pour le calcul aux ELU			
Résistance concernée	Symbole utilisé	Domaine d'application	Valeurs EC3-DAN
Résistance des sections	$\gamma_{M0}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résistance des sections :                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- de classes 1, 2 ou 3</li> <li>- bénéficiant de la marque NF Acier</li> <li>- dans les autres cas</li> </ul> </li> <li>- de classe 4</li> </ul>	1,00 1,00 1,00
	$\gamma_{M2}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résistance de section nette au droit des trous de boulons</li> </ul>	1,25

**OHV3 VUE EN PLAN DU TABLIER**

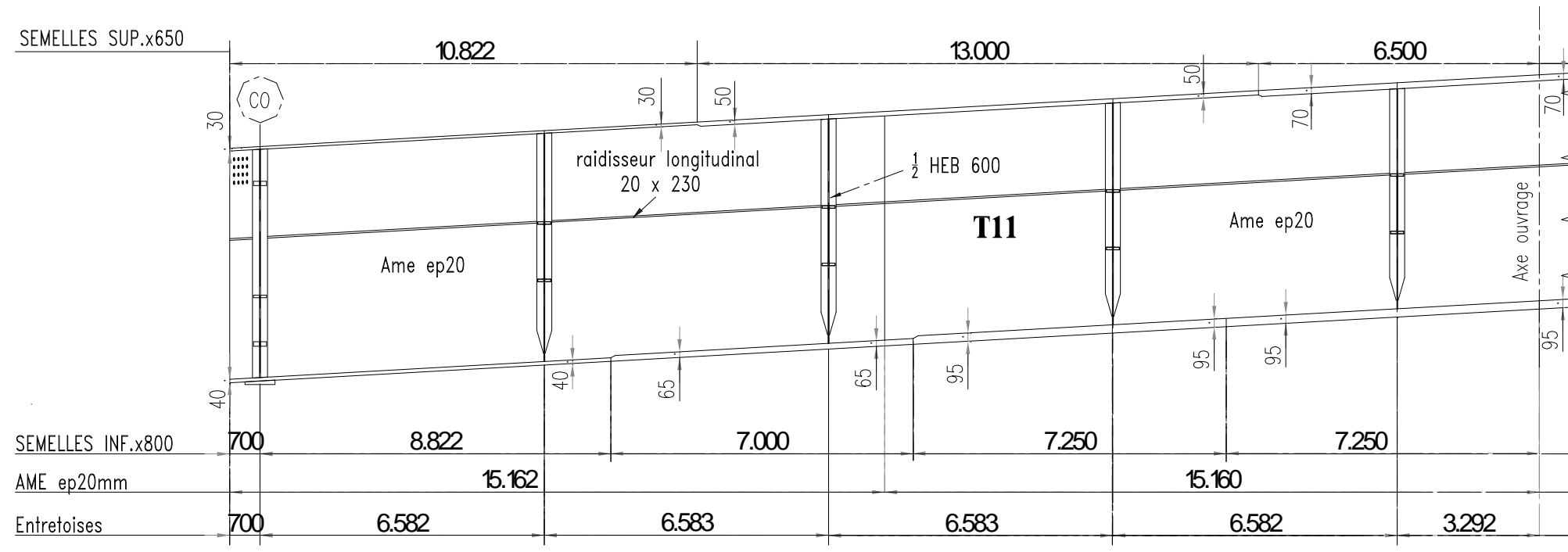


**OHV3 COUPE TRANSVERSALE AA DU TABLIER**

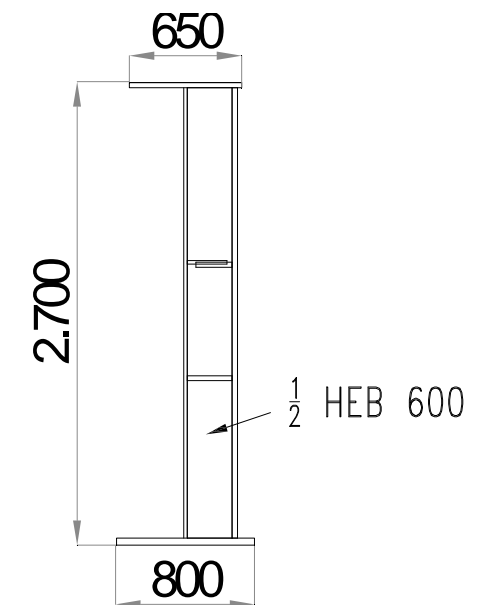


# OHV3 - OSSATURE MÉTALLIQUE

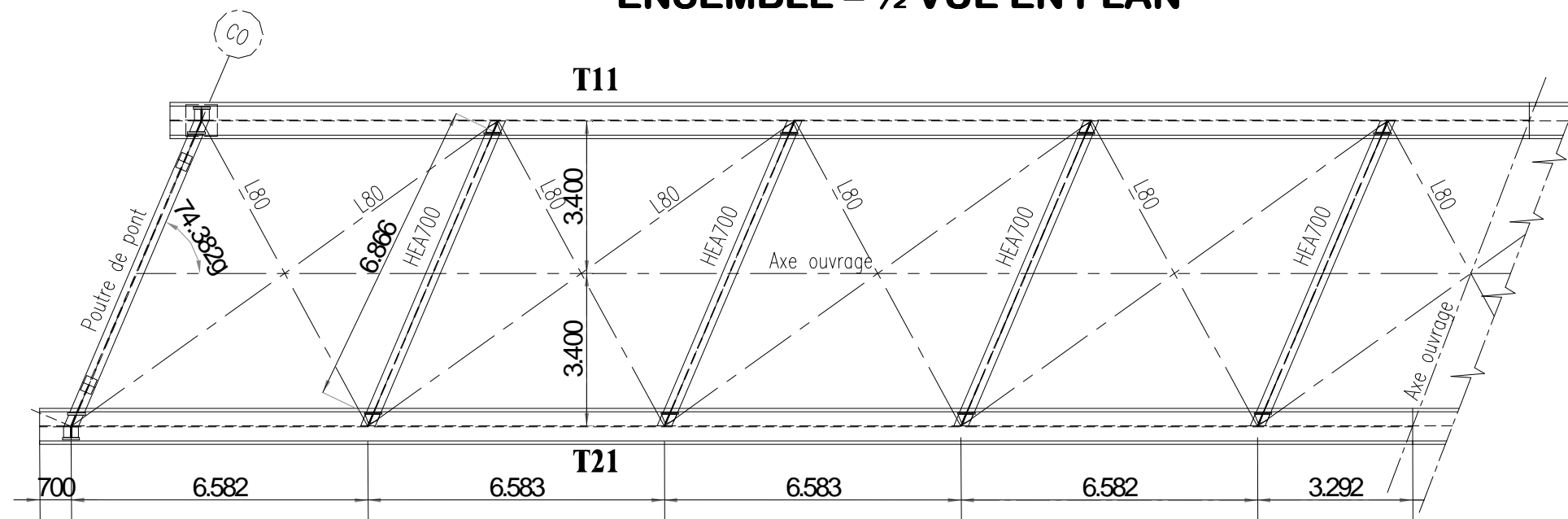
## PRS T11 – ½ VUE EN ÉLÉVATION



## PRS T11 COUPE TRANSVERSALE



## ENSEMBLE – ½ VUE EN PLAN





## Norme d'application nationale de l'Eurocode 7 Fondations profondes

### (EXTRAITS)

#### F.3 Résistance limite d'un pieu

Cet article définit les procédures pour déterminer la portance limite  $R_c$  et la résistance limite à la traction  $R_t$  d'une fondation profonde isolée réalisée au droit d'un sondage pressiométrique. La portance limite en compression  $R_c$  d'une fondation profonde isolée doit être déterminée à partir de l'expression générale  $R_c = R_b + R_s$ .

- $R_c$  est la valeur de la portance de la fondation profonde,
- $R_b$  est la valeur de la résistance de pointe de la fondation profonde,
- $R_s$  est la valeur de la résistance de frottement axial de la fondation profonde.

#### F.4 Résistance de pointe

##### F.4.1 Principe général

L'effort limite mobilisable dû au terme de pointe d'une fondation profonde doit être calculé à partir de l'expression générale  $R_b = A_b q_b$  où

- $R_b$  est la valeur de la résistance de pointe d'une fondation profonde,
- $A_b$  est la surface de la base de la fondation profonde,
- $q_b$  est la valeur de la pression de rupture du terrain sous la base du pieu.

##### F.4.2 Pression de rupture du terrain

Sauf cas particulier, la valeur de la pression de rupture du terrain sous la base de la fondation profonde doit être calculée à partir de l'expression générale  $q_b = k_p p_{le}^*$ .

$k_p$  est le facteur de portance pressiométrique,

$p_{le}^*$  est la pression limite nette équivalente.

La valeur du facteur de portance pressiométrique  $k_p$  dépend de l'encastrement effectif  $D_{ef}/B$  (où  $D_{ef}$  est la hauteur d'encastrement effective et  $B$  est le diamètre du pieu), de la nature de la formation dans laquelle se trouve la base de la fondation profonde, de son mode de mise en œuvre (voir tableau A1) et de la hauteur d'encastrement effective  $D_{ef}$ .

Lorsque l'encastrement effectif  $D_{ef}/B$  est supérieur à 5 :  $k_p = k_{p \max}$

Lorsque l'encastrement effectif  $D_{ef}/B$  est inférieur à 5 :  $k_p = 1,0 + (k_{p \max} - 1,0)(D_{ef}/B)/5$

$k_{p \max}$  est donné par le tableau F.4.2.1.

Tableau A.1 – Classes et catégories de pieux

Classe	Catégorie	Technique de mise en œuvre	Abréviation	Norme de référence
1	1	Foré simple (pieux et barrettes)	FS	NF EN 1536
	2	Foré boue (pieux et barrettes)	FB	
	3	Foré tubé (virole perdue)	FTP	
	4	Foré tubé (virole récupérée)	FTR	
	5	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	FSR, FBR, PU	
2	6	Foré tarière creuse simple rotation, ou double rotation	FTC, FTCD	NF EN 1536
3	7	Vissé moulé	VM	NF EN 12699
	8	Vissé tubé	VT	
4	9	Battu béton préfabriqué ou précontraint	BPF, BPR	NF EN 12699
	10	Battu enrobé (béton – mortier – coulis)	BE	
	11	Battu moulé	BM	

Tableau F.4.2.1 Valeur du facteur de portance  $k_{p \max}$  pour un encastrement effectif >5

Terrain	Argile % CaCO <sub>3</sub> < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et calcaire- marneux	Roche altérée et fragmentée (a)
1	1,15	1,1	1,45	1,45	1,45
2	1,3	1,65	1,6	1,6	2,0
3	1,55	3,2	2,35	2,10	2,10
4	1,35	3,1	2,30	2,30	2,30
5 #	1,0	1,9	1,4	1,4	1,2
6 #	1,20	3,10	1,7	2,2	1,5
7 #	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2
8	1,15	1,1	1,45	1,45	1,45

Suite de la norme sur la page suivante

## F.5 Résistance de frottement axial

### F.5.1 Principe général

L'effort limite mobilisable par frottement axial sur la hauteur concernée du fût de la fondation profonde doit être calculé à partir de l'expression générale suivante :

$$R_s = q_s(z) \cdot D \cdot P_s$$

- $R_s$  est la valeur de la résistance de frottement axial d'une fondation profonde,
- $q_s(z)$  est la valeur du frottement axial unitaire limite à la cote  $z$  (Article F.5.2),
- $D$  est la longueur de la fondation contenue dans le terrain,
- $P_s$  est le périmètre du fût du pieu.

*Remarque : L'article F.5.1 a été modifié en tenant compte du fait que la pression limite était constante sur la hauteur du pieu étudié.*

### F.5.2 Frottement axial unitaire limite $q_s(z)$

La valeur du frottement axial unitaire limite  $q_s(z)$  à la profondeur  $z$  doit être déterminée en fonction de la nature du terrain, du mode de mise en œuvre du pieu et de la valeur de pression limite nette mesurée à cette même profondeur, à partir des tableaux F.5.2.1 et F.5.2.2 et de la figure F.5.2.1.

La valeur du frottement axial unitaire limite à la profondeur  $z$  est déterminée à partir de la relation suivante :

$$q_s(z) = \alpha_{\text{pieu-sol}} \cdot f_{\text{sol}}(p_l^*(z))$$

•  $\alpha_{\text{pieu-sol}}$  est un paramètre adimensionnel qui dépend à la fois du type de pieu et du type de sol,

•  $p_l^*(z)$  est la pression limite à la profondeur  $z$ ,

•  $f_{\text{sol}}$  est une fonction qui ne dépend que du type de sol et des valeurs de  $p_l^*(z)$ .

Indépendamment des courbes de la figure F.5.2.1, il convient de s'assurer que les valeurs de frottement axial unitaire déterminées ne sont pas supérieures à celles définies dans le tableau F.5.2.3.

Tableau F.5.2.1 Choix des valeurs de  $\alpha_{\text{pieu-sol}}$  - Méthode pressiométrique

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Argile % CaCO3 < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
2	FB ##	Foré boue (pieux et barrettes)	1,25	1,4	1,8	1,5	1,6
3	FTP	Foré tubé (virole perdue)	0,7	0,6	0,5	0,9	—
4	FTR	Foré tubé (virole récupérée)	1,25	1,4	1,7	1,4	—
5	FSR, FBR, PU ##	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	1,3	—	—	—	—
6	FTC, FTCD (c)	Foré tarière continue simple rotation ou double rotation	1,5	1,8	2,1	1,6	1,6
7	VM	Vissé moulé	1,9	2,1	1,7	1,7	—

Tableau F.5.2.2 Choix des courbes- Méthode pressiométrique

Type de sol	Argile % CaCO3 < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
Choix de la courbe	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5

Figure F.5.2.1 Courbe  $f_{\text{sol}}$  pour la méthode pressiométrique

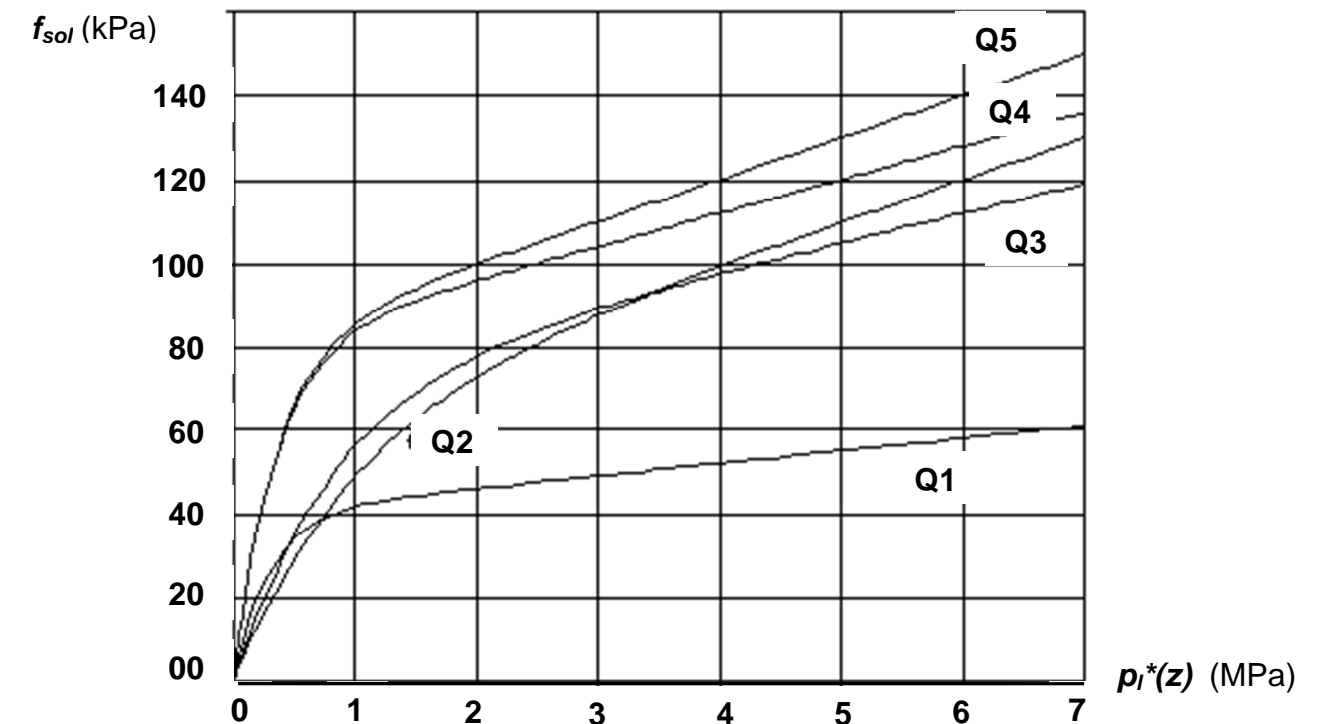


Tableau F.5.2.3 — Valeurs maximales de frottement axial unitaire limite  $q_s$

N°	Abréviation	Technique de mise en œuvre	Valeurs en kPa				
			Argile % CaCO3 < 30% Limon Sols intermédiaires	Sols intermédiaires Sable Grave	Craie	Marne et Calcaire- Marneux	Roche altérée ou fragmentée
1	FS ##	Foré simple (pieux et barrettes)	90	90	200	170	200
2	FB ##	Foré boue (pieux et barrettes)	90	90	200	170	200
3	FTP	Foré tubé (virole perdue)	50	50	50	90	—
4	FTR	Foré tubé (virole récupérée)	90	90	170	170	—
5	FSR, FBR, PU ##	Foré simple ou boue avec rainurage ou puits	90	—	—	—	—
6	FTC, FTCD	Foré tarière continue simple rotation ou double rotation	90	170	200	200	200
7	VM	Vissé moulé	130	200	170	170	—
8	VT	Vissé tubé	50	90	90	90	—

## NORMES DEFINISSANT LE FERRAILLAGE D'UN PIEU

### Eurocode 7 NF P 94-262 (EXTRAITS)

#### FONDATEMENTS PROFONDES

#### 12.2 Pieux ou éléments de fondation en béton armé

##### 12.2.1 Principes

- (1) Les dispositions de la norme NF EN 1992 s'appliquent.  
 (2) Les pieux ou éléments de fondation en béton doivent être armés sur toute leur longueur dans les cas suivants :
- ils sont soumis à des efforts de traction,
  - ils sont inclinés,
  - ils supportent des ouvrages tels des ponts.

### Eurocode 2 NF EN 1992.1.1.2004

#### CALCUL DE STRUCTURES EN BETON - EXTRAITS

#### 9.8 Fondations

##### 9.8.5 Pieux forés

- (1) Les clauses suivantes s'appliquent aux pieux forés armés. Pour les pieux forés non armés, on se reportera à la Section 12.  
 (2) Afin de permettre une bonne mise en place du béton autour des armatures, il est primordial que les armatures, cages d'armatures et tout insert incorporé soient conçus de manière à ne pas compromettre l'écoulement du béton.  
 (3) Il convient d'équiper les pieux forés d'une section minimale d'armatures longitudinales  $A_{s,bpmin}$ .  
 La valeur de  $A_{s,bpmin}$  est donnée dans le Tableau 9.6N. Il convient de répartir ces armatures sur le pourtour de la section.

**Tableau 9.6N : Aire minimale d'armatures longitudinales recommandée dans les pieux forés coulés en place**

Section transversale du pieu : $A_c$	Aire minimale d'armatures longitudinales : $A_{s,bpmin}$
$A_c \leq 0,5 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,005 \cdot A_c$
$0,5 \text{ m}^2 < A_c \leq 1,0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 25 \text{ cm}^2$
$A_c > 1,0 \text{ m}^2$	$A_s \geq 0,0025 \cdot A_c$

Il convient que le diamètre minimal des barres longitudinales ne soit pas inférieur à 16 mm et que les pieux comportent au moins 6 barres longitudinales. Il convient que la distance libre entre les barres, mesurée sur le pourtour du pieu, ne soit pas supérieure à 200 mm.

- (4) Pour les dispositions constructives des armatures longitudinales et transversales dans les pieux forés, voir l'EN 1536.

### NF EN 1536 (EXTRAITS)

#### 7.5 Armatures

##### 7.5.2 Armatures longitudinales

**7.5.2.5** Il convient que l'écartement entre les barres longitudinales soit toujours maximal afin de permettre un écoulement correct du béton, sans toutefois dépasser 400 mm.

**7.5.2.6** La distance horizontale nu à nu entre les barres longitudinales ou les paquets de barres d'un lit ne doit pas être inférieure à 100 mm.

**7.5.2.10** Pour les pieux circulaires, il convient d'éviter les cages d'armatures non symétriques.

##### 7.5.3 Armatures transversales

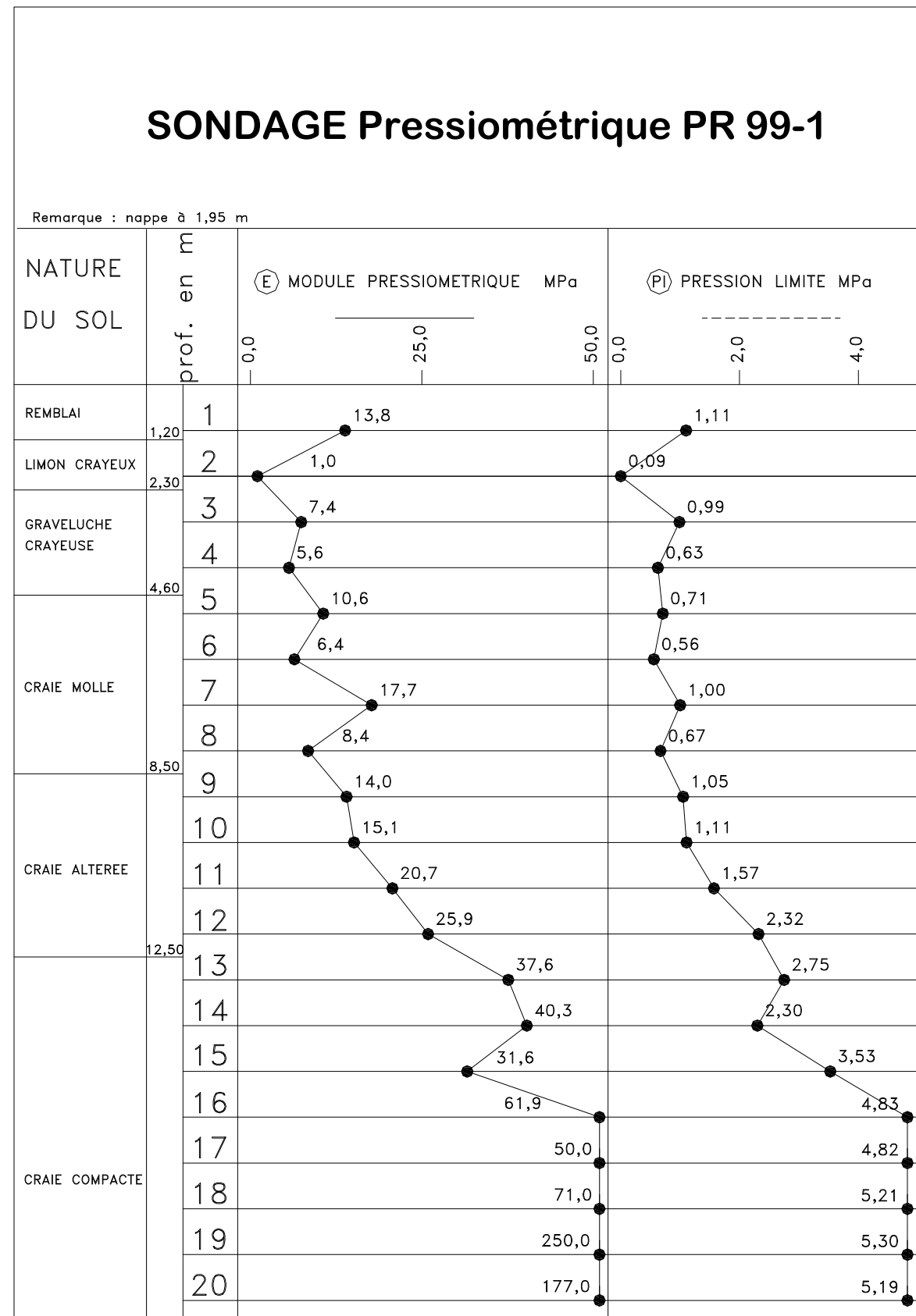
**7.5.3.1** Il convient que les diamètres des armatures transversales soient conformes au Tableau 6.

**Tableau 6 – Diamètres recommandés pour les armatures transversales**

Armature transversale	Diamètres d'armature transversale
Étriers, cerces ou spires	Supérieurs à 6 mm et supérieurs à un quart du diamètre maximal des barres longitudinales
Fils ou treillis soudés transversaux	Supérieurs à 5 mm

**7.5.3.2** La distance minimale nu à nu des armatures transversales ne doit pas être inférieure à la distance définie pour les armatures principales en 7.5.2.

**7.5.3.3** Il convient que les barres longitudinales, ou les paquets de barres longitudinales placés dans les angles d'une cage d'armatures, soient retenues par l'armature transversale.

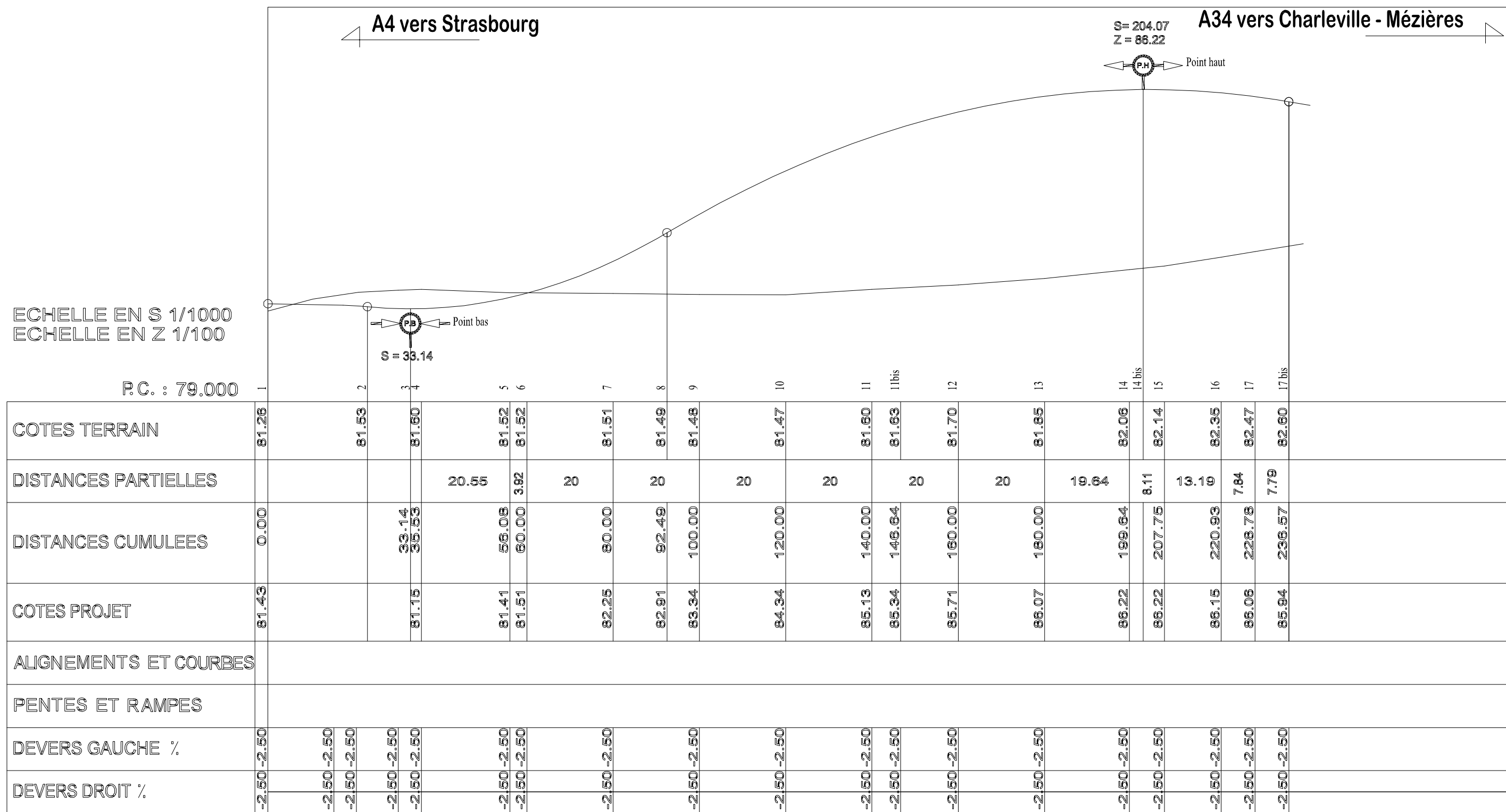


# DOCUMENTS RÉPONSES

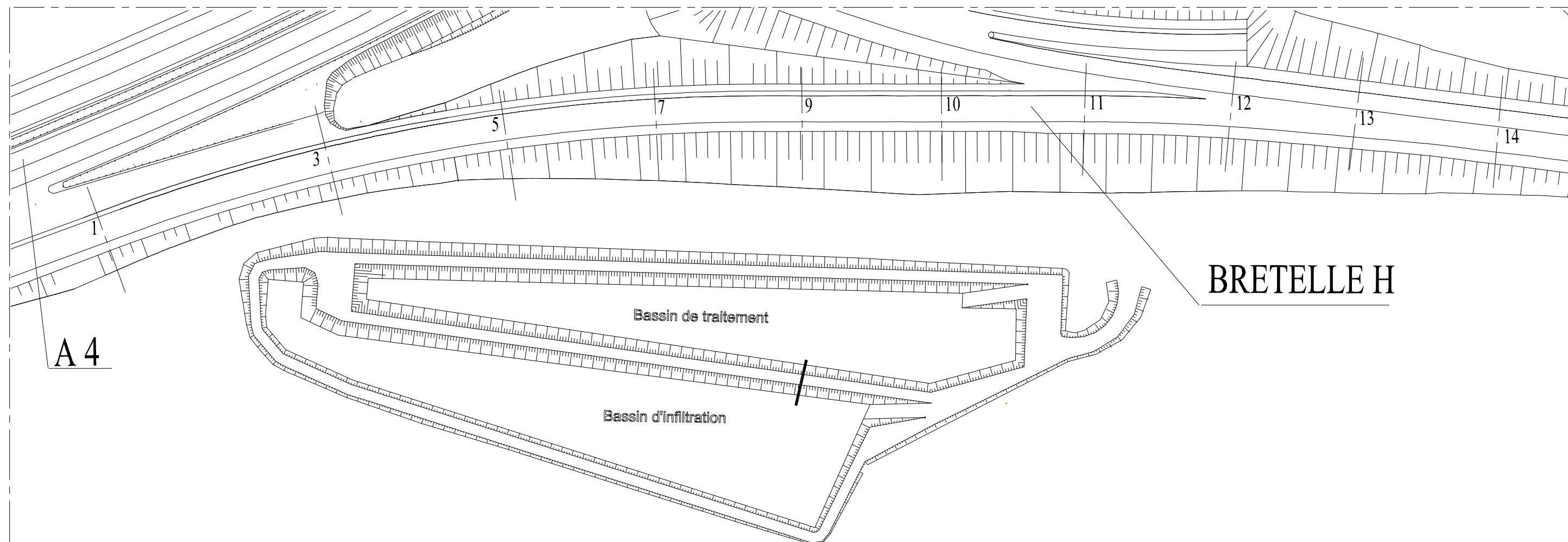
Profil en long de la bretelle H.....	DR1
Vue en plan partielle de la bretelle H .....	DR2
Coupe longitudinale partielle de la culée .....	DR3
Ferraillage d'un pieu.....	DR4

## PROFIL EN LONG DE LA BRETELLE H

**Remarque :** Les conditions de reprographie ne nous ont pas permis de reproduire le profil en long ci-dessous aux échelles indiquées.



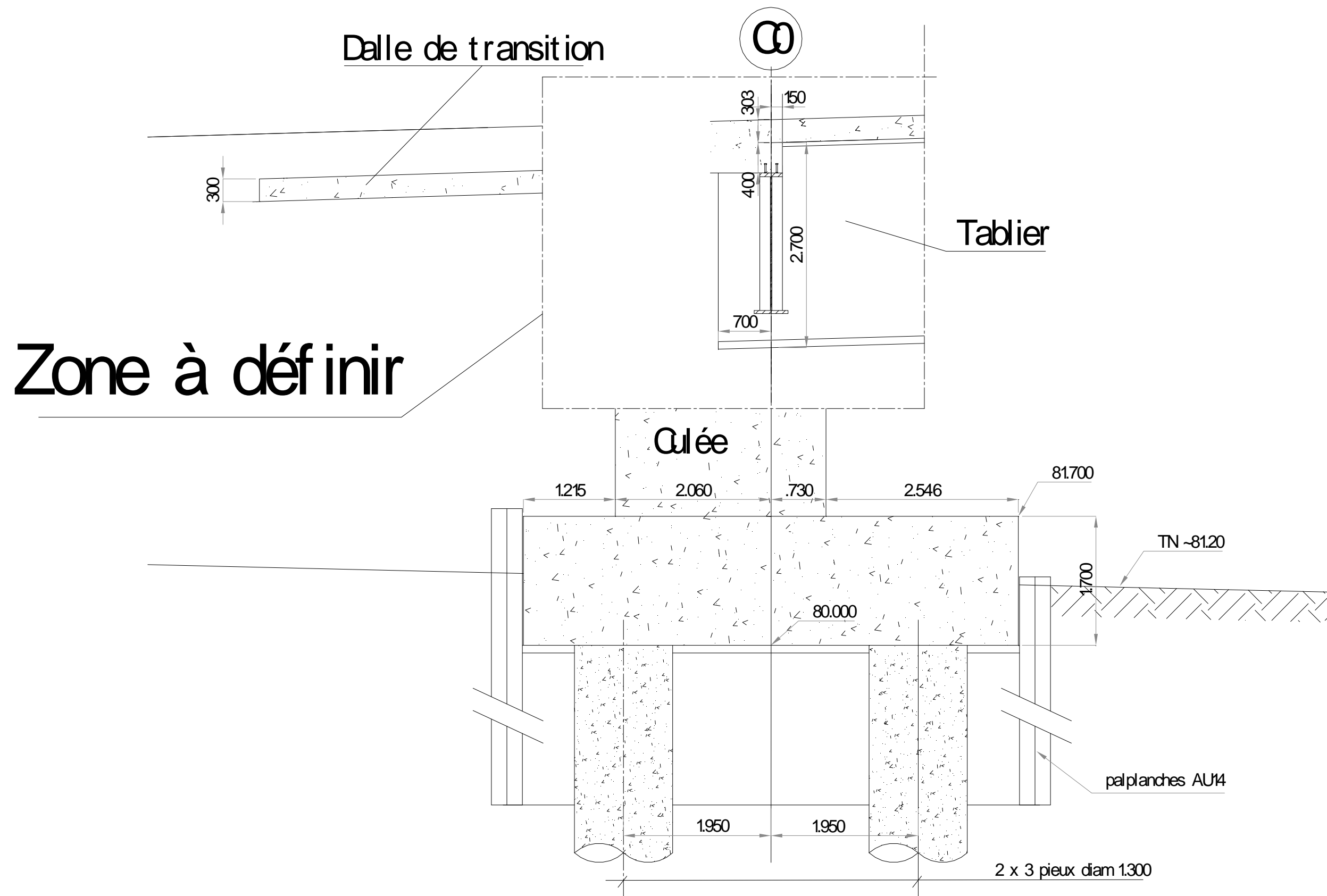
### VUE EN PLAN PARTIELLE DE LA BRETELLE H



**Légende :**

———— Canalisation

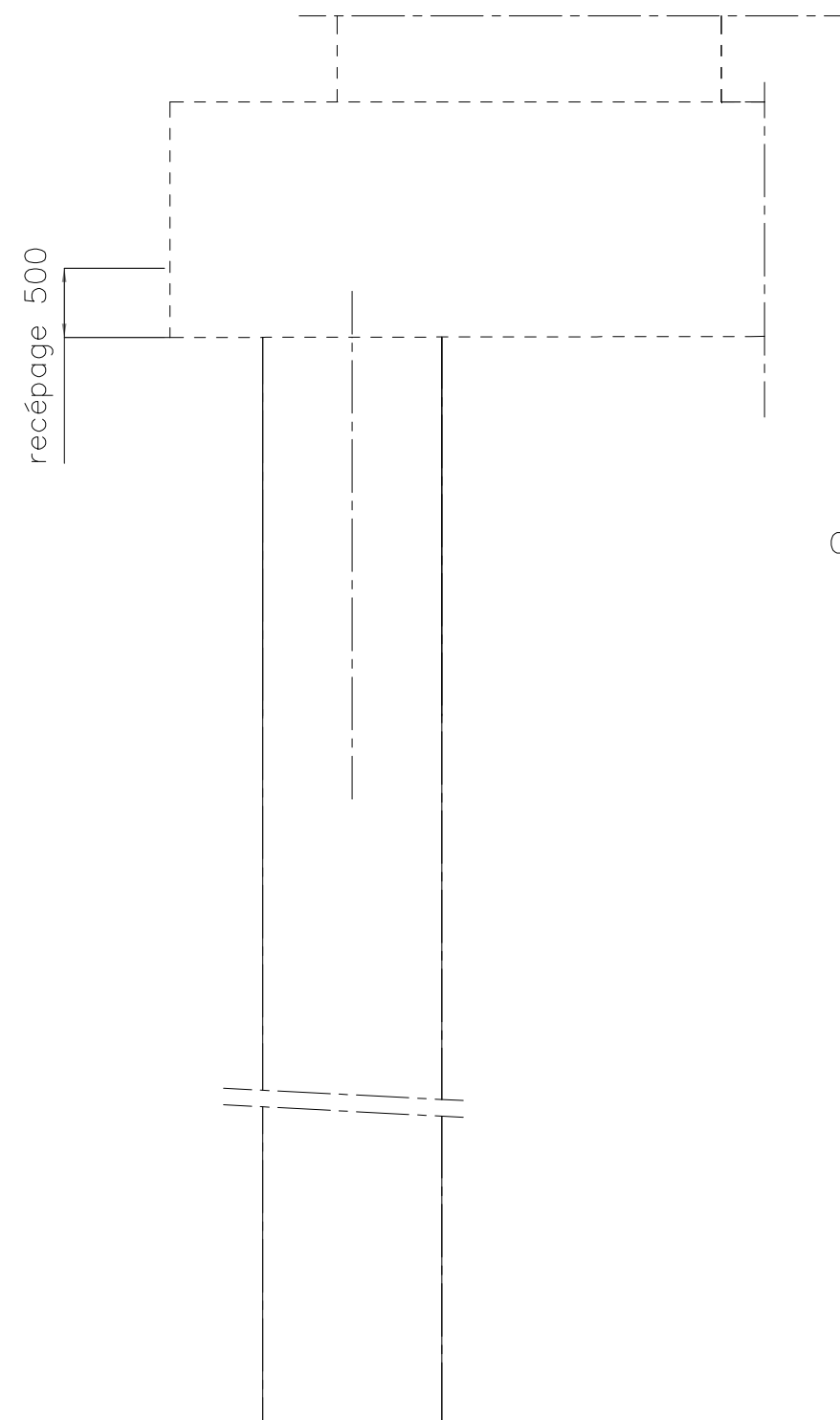
### COUPE LONGITUDINALE PARTIELLE DE LA CULÉE





# FERRAILLAGE D'UN PIEU

ELEVATION



COUPE TRANSVERSALE

