



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE

EAI SIC 2

SESSION 2019

**AGREGATION
CONCOURS INTERNE
ET CAER**

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR
ET INGÉNIERIE DES CONSTRUCTIONS**

**ÉTUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE
ORGANISATION**

Durée : 4 heures

Calculatrice électronique de poche - y compris calculatrice programmable, alphanumérique ou à écran graphique – à fonctionnement autonome, non imprimante, autorisée conformément à la circulaire n° 99-186 du 16 novembre 1999.

L'usage de tout autre ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

NB : Conformément au principe d'anonymat, votre copie ne doit comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé consiste notamment en la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de la signer ou de l'identifier.

Tournez la page S.V.P.

A

INFORMATION AUX CANDIDATS

Vous trouverez ci-après les codes nécessaires vous permettant de compléter les rubriques figurant en en-tête de votre copie.

Ces codes doivent être reportés sur chacune des copies que vous remettrez.

► **Concours interne de l'Agrégation de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1416A	102	7048

► **Concours interne du CAER / Agrégation de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1416A	102	7048

ÉTUDE D'UN SYSTÈME, D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE ORGANISATION

Durée : 4 heures

Sujet	pages 1 à 23
Annexes 1 à 15 (Document techniques)	pages 24 à 48
Annexe 16 (Document réponse DR1)	page 49

Toutes les réponses doivent être justifiées. La qualité de la présentation est prise en compte dans l'évaluation.

Le Pont sur le Wouri, Douala

Contexte

Douala est la capitale économique du Cameroun. Sa population a décuplé entre le milieu du XX^{ème} siècle et le début du XXI^{ème}, passant de 300000 habitants à 3 millions.

Douala est située sur l'estuaire du fleuve Wouri, qui se jette dans l'océan Atlantique. Les deux rives du fleuve sont reliées par un pont construit en 1954, permettant de rejoindre Douala depuis l'Ouest et la ville de Bonaberi. Le pont comporte deux voies routières et une voie ferrée en service. Les voies routières étaient empruntées au début des années 2010 par plus de 40000 personnes quotidiennement, générant des embouteillages très importants, et par conséquent, des problèmes économiques et de sécurité très pénalisants pour la région.

Les autorités camerounaises ont donc décidé la construction d'un deuxième pont sur le Wouri. Les **figures 1 à 7** présentent le projet.



Figures 1 et 2 : situation de Douala, vue du premier pont sur le Wouri (datant de 1954)

La maîtrise d'ouvrage était assurée par le Ministère des Travaux publics (assistant maître d'ouvrage : Louis Berger/SCET Tunisie/Ingecam, assistant géotechnique au maître d'ouvrage : Labogénie). La maîtrise d'œuvre et la construction de l'ouvrage étaient assurées par un groupement d'entreprises du groupe Vinci (marché de conception/construction).

Les travaux ont débuté en novembre 2013, et l'ouvrage a été mis en service en octobre 2017.

Le projet global correspond à un marché de type TOARC urbain (Terrassements, Ouvrages d'Art et Rétablissements de Communication). L'ouvrage est long d'environ 3 km, dont 760 mètres de franchissement du Wouri. Il est composé de 2 ponts côte-à-côte, un pont routier (constitué de 6 voies et 1 trottoir) et un pont ferroviaire à 2 voies (**figure 4 et figure 5**).

Le nouveau projet est situé à 8 mètres à l'aval du premier pont (**figure 5**).

Les ouvrages définitifs sont en béton armé (fondations, chevêtres) et/ou en béton précontraint (tabliers). Les tabliers sont construits par encorbellements successifs. Ils reposent sur 2 culées et 7 piles dont 5 en rivière espacées de 130 mètres, ce qui, pour l'ouvrage ferroviaire, constitue une portée exceptionnelle. Les fondations sont réalisées par des pieux de 45 m de profondeur en moyenne et de 2,50 m de diamètre.

La durée de vie attendue de l'ouvrage est de cent ans.



Figure 3 : tracé de l'ancien et du nouveau pont sur le Wouri



Figure 4 : vue d'ensemble du chantier avant la construction des tabliers.

À droite, le premier pont sur le Wouri (1954), ouvert à la circulation des voitures et des trains, et à gauche, l'estacade (ouvrage provisoire destiné à la construction du nouveau pont) et les travaux en cours sur chacun des chevêtres.



Figure 5 : vue d'ensemble du chantier, à gauche l'estacade, au milieu le nouveau pont en partie réalisé, à droite, l'ancien pont

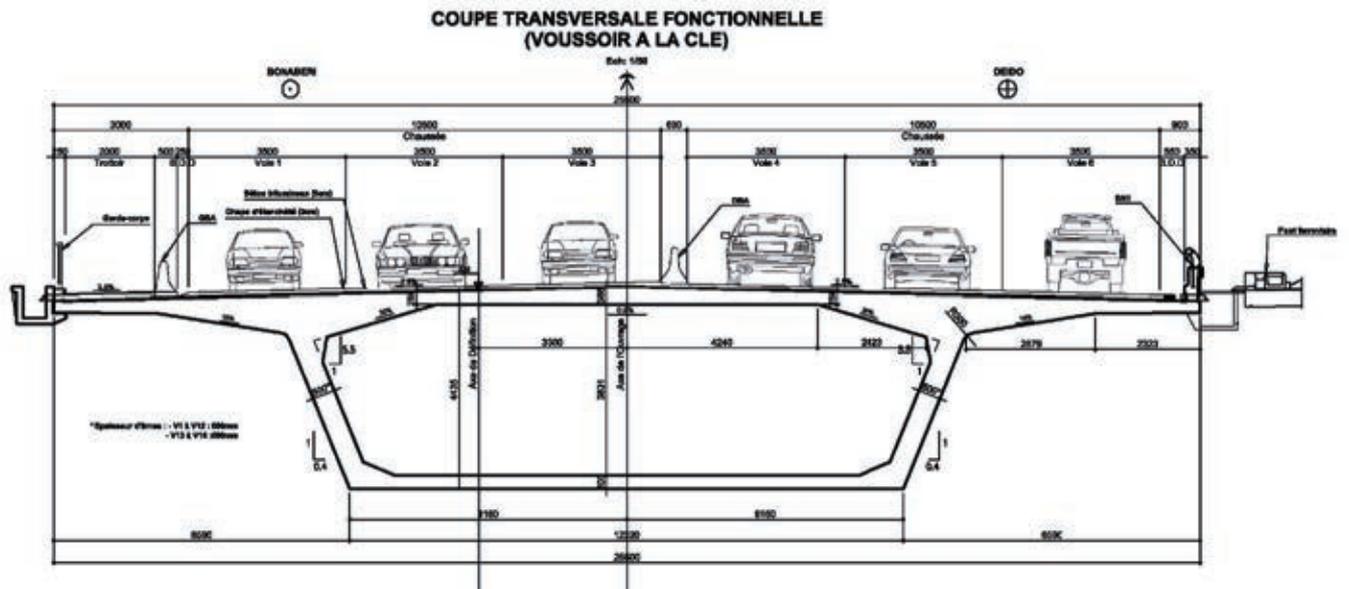


Figure 6 : coupe transversale du tablier du pont routier en béton précontraint

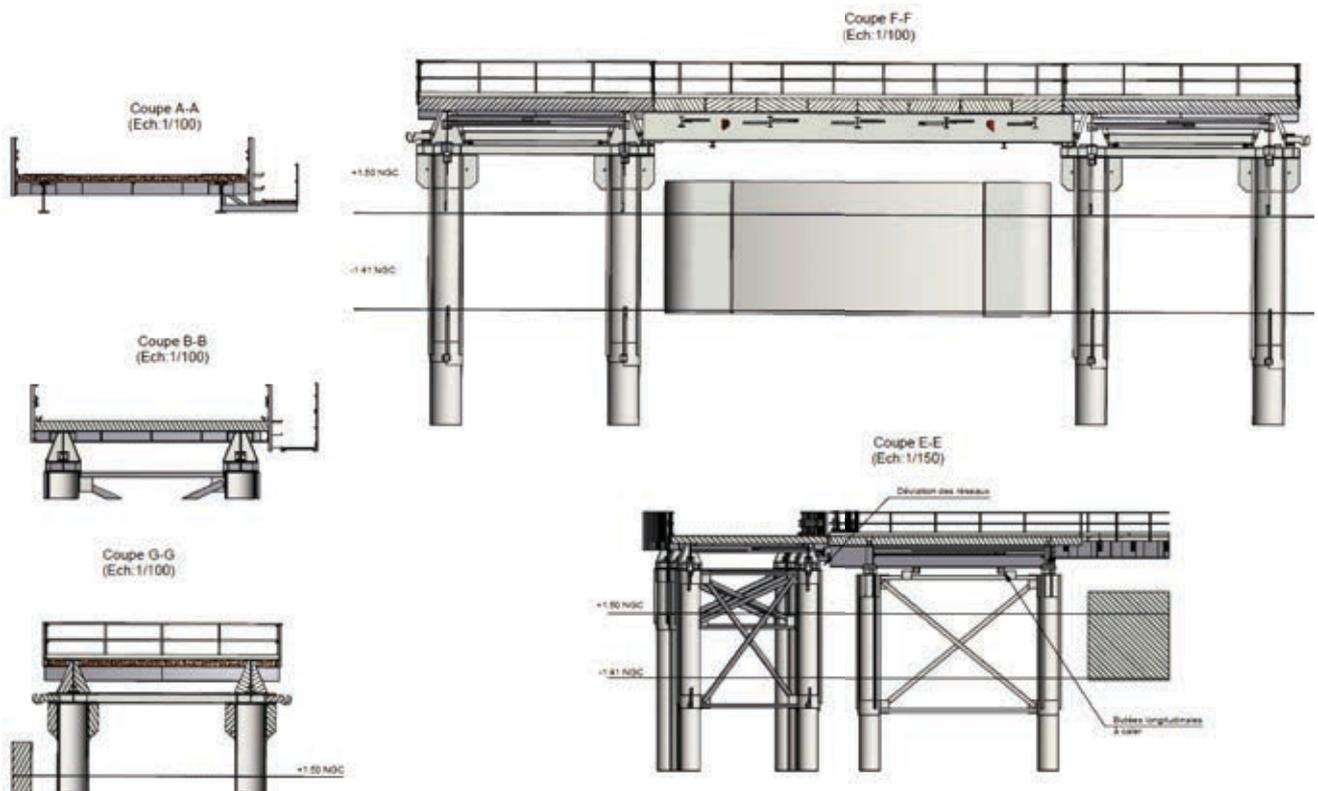


Figure 7 : principe de l'estacade (voir détails en annexe 1)

Organisation du sujet

Dans ce sujet, nous nous intéresserons à quatre aspects majeurs de la conception et de la mise en œuvre de cet ouvrage. Le sujet se décompose en quatre parties :

- la partie I, porte sur la technologie de construction et la méthodologie de chantier appliquée à la construction de ce pont ;
- la partie II, concerne la formulation et la mise en œuvre du béton des chevêtres ;
- la partie III, détaille la simulation d'échauffement thermique dans une des pièces massives du pont (chevêtre) ;
- la partie IV, s'intéresse au calcul d'une structure provisoire (l'estacade).

Nota : les quatre parties sont indépendantes

Partie I : technologie de construction et méthodologie de réalisation appliquée à la construction du pont

Question 1.1 – Dans le cas du pont sur le Wouri (pont routier neuf en franchissement d'un cours d'eau en milieu rural), expliquer quelles sont les **principales données et caractéristiques que les projeteurs doivent prendre en compte pour la conception** de cet ouvrage. Expliquer pour cela :

- a) quelles sont les données liées aux caractéristiques géométriques d'ensemble de l'ouvrage ;
- b) quelles sont les données liées aux conditions naturelles et environnementales;
- c) quelles sont les données liées aux aspects fonctionnels de l'ouvrage ;
- d) quels sont les principaux types d'ouvrage envisageables pour ce projet ;
- e) quelles sont les données ou critères pris en compte dans le processus de décision et choix du type d'ouvrage.

Question 1.2 – Expliquer pour le pont sur le Wouri à l'aide de croquis, les rôles ou géométries et fonctions des ouvrages ou documents suivants. Présenter les résultats suivant le modèle ci-dessous.

Ouvrage du projet à expliciter	Croquis	Justification de la fonction
Culée		
Pile		
Chevêtre		
VSP		
Clavage		
Clothoïde		
Profil en long		
Profil en travers		

Question 1.3 – Il a été décidé de construire sur le Wouri, cet ouvrage en béton précontraint coulé en place, par encorbellements successifs. Décrire la méthodologie de réalisation qui doit être employée, en l'illustrant à l'aide de schémas.

Question 1.4 - Dans le cadre du chantier de réalisation de ce pont, on réalise les estacades selon les plans disponibles en **annexe 1**. Expliciter toutes les familles de facteurs de risque rencontrés pendant la réalisation des estacades. Pour chaque famille, définir les moyens de prévention.

Question 1.5 – Expliquer quelles sont les cinq principales phases de conception de ce pont, qui doivent être mises en œuvre en bureaux d'études.

Partie II : formulation et mise en œuvre des bétons de chevêtre.

Cette partie s'intéresse à la formulation du béton d'une pièce de l'ouvrage et aux précautions liées à sa mise en œuvre. Il s'agit de prendre en compte les spécificités de l'environnement de l'ouvrage, de sa géométrie, et des conditions climatiques rencontrées lors du coulage afin d'assurer les performances et la durabilité de l'ouvrage dans son environnement.

Question 2.1 - A partir des informations fournies dans les **annexes 2 et 3**, indiquer quels sont les éléments du pont les plus exposés au risque de développement de réaction sulfatique interne (RSI).

Question 2.2 - Quelles sont les précautions à prendre vis-à-vis de la problématique du bétonnage par temps chaud et du risque de RSI ? Expliciter les mesures à prendre concernant la conception de l'ouvrage, la formulation, la fabrication, le transport et la mise en œuvre du béton (on ne considèrera que le cas des bétons coulés en place).

Étape 1 : formulation du béton

On s'intéresse à la formulation des bétons des chevêtres. Les chevêtres sont les éléments massifs en béton armé (**annexe 3**) reposant sur les pieux et supportant les voussoirs sur pile. Ils sont constitués de coques externes en béton préfabriqué, mis en œuvre dans un premier temps (**annexe 4**). Les coques sont alors remplies de béton, celles-ci servant de coffrage perdu et de parement.

Les chevêtres sont, en service, partiellement immergés dans l'eau qui subit des variations de niveau (marnage). À l'emplacement du pont, l'eau du Wouri est un mélange d'eau de rivière et d'eau de mer.

Les coques en béton des chevêtres ont une épaisseur de 20 cm. L'épaisseur de la pièce étant inférieure à 25 cm, conformément au fascicule LCPC 2007, celle-ci n'est pas critique vis-à-vis du risque de RSI. Le risque est en revanche prégnant pour le béton de remplissage, qui fera l'objet de la partie III de ce sujet.

La maniabilité souhaitée pour les bétons est très plastique (15 cm d'affaissement au cône d'Abrams).

On utilise les matériaux suivants :

- Les granulats des sablières Sogéa Satom Ekona produisant des granulats basaltiques concassés. Trois granulats sont utilisés : un sable 0/4 noté S, un gravillon 4/10, noté g, et un gravier 10/20, noté G. Les analyses granulométriques de ces coupes sont données à l'**annexe 5**. La masse volumique absolue de la roche basaltique est $\rho_g = 2900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et celle du ciment est $\rho_c = 3060 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Le coefficient d'absorption de masse d'eau des granulats est de 1,1 %.
- Le ciment est un CEM IV/A-P 32.5R (pouzzolane) CIMENCAM produit localement (usine Bonaberi, Douala). La fiche technique est fournie en **annexe 6**. Ce ciment est destiné à la fabrication de bétons de masse exigeant une faible chaleur d'hydratation et des résistances élevées au jeune âge.

Le jour du coulage, la teneur en eau totale du sable est de $w_s=4,1 \%$, celle du gravillon est de $w_g=2,2 \%$ et celle du gravier est de $w_G=1,5 \%$.

Il s'agit ici d'une structure en béton armé avec un ferrailage inférieur à $80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Pour des raisons liées à la mise en œuvre, on cherche à réaliser un béton plastique.

Un adjuvant superplastifiant est utilisé pour optimiser la formulation. Cependant par souci de simplification, son influence est négligée dans les calculs suivants.

Question 2.3 - A l'aide du tableau 1 de l'**annexe 7**, déterminer la classe d'exposition du béton des coques préfabriquées selon la norme EN 206.

Question 2.4 - A partir du tableau 8.B du fascicule 65 (**annexe 8**), déterminer les éléments prescriptifs pour la formulation du béton du point de vue de la classe de résistance, de la teneur en liant et de sa nature, et du rapport E/C. Résumer le cahier des charges de ce béton en listant les éléments de durabilité (classe d'exposition), de résistance mécanique, et d'ouvrabilité et leurs conséquences, à ce stade du calcul, sur les prescriptions de formulation.

La partie qui suit a pour vocation de calculer la formulation du béton à proprement parler, en utilisant la méthode « Dreux-Gorisse simplifiée ».

Question 2.5 - Calculer la résistance à la compression moyenne à 28 jours f_{cm} du béton à formuler, à partir de l'Équation 1.

$$f_{ck} = f_{cm} - 8 \text{ MPa} \quad \text{Équation 1}$$

Où f_{ck} est la résistance caractéristique en MPa à 28 jours.

Question 2.6 - A partir de la loi de Bolomey (Équation 2), déterminer le rapport C/E du béton.

$$f_{cj} = k_b f_{mj} \left(\frac{C}{E + V} - 0,5 \right) \quad \text{Équation 2}$$

Où :

- f_{cj} est la résistance moyenne (en MPa) du béton à j jours
- k_b est le coefficient granulaire compris entre 0,35 et 0,65. Pour des granulats utilisés, on prendra $k_b = 0,61$.
- f_{mj} est la résistance vraie du ciment à j jours, mesurée sur mortier normal (NF EN 196-1) et donnée dans la fiche technique du ciment (**annexe 6**).
- C est le dosage massique en ciment (en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).
- E est le dosage en eau efficace (en $\ell \cdot \text{m}^{-3}$ ou $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).
- V est le volume d'air dans le béton frais, en masse du même volume d'eau ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$). V prend les valeurs de 7, 10 ou 13 % du volume d'eau efficace dans les cas respectifs de bétons très plastiques, plastiques ou fermes.

Question 2.7 - Vérifier que le rapport E/C calculé respecte bien le cahier des charges établi au 2.4.

Question 2.8 - A partir de l'abaque de l'**annexe 9** et du rapport C/E précédemment calculé ainsi que de l'affaissement (ou « slump ») désiré :

- déterminer le dosage en ciment C et vérifier qu'il est bien supérieur à la valeur prescrite par le fascicule 65 ;
- déduire le dosage en eau E.

Question 2.9 - A partir des données d'analyses granulométriques de l'**annexe 5**, tracer sur le graphe du document réponse DR1 fourni en **annexe 16**, les courbes granulométriques des trois granulats utilisés.

Question 2.10 – A l'aide des informations suivantes, tracer sur le même document DR1 de l'**annexe 16**, la courbe granulométrique de référence du mélange granulaire.

Pour mémoire, il s'agit d'une courbe bilinéaire OAB tracée sur le même diagramme. Les points O, A et B ont pour coordonnées :

- O (0,063 mm ; 0 %)
- B (D_{\max} ; 100 %), D_{\max} correspondant au diamètre maximal des granulats utilisés, soit 20 mm, ici.
- A (X_A ; Y_A) où :
 - $X_A = \frac{D_{\max}}{2}$
 - Y_A (en %) = $50 - \sqrt{D_{\max}} + K$, où K est un terme correctif pris égal à :
 - 0 pour le cas de granulats roulés et un béton peu armé ;
 - 3, si les gravillons sont concassés ;
 - 5, si le béton est destiné à un ouvrage en béton armé avec un ferrailage $\leq 80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
 - 10 si le béton est pompé ou s'il s'agit d'un ouvrage en béton armé avec un ferrailage $> 80 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
 - > 10 s'il s'agit d'un béton auto plaçant.

Question 2.11 - A l'aide des informations fournies, déterminer les pourcentages volumiques des différents granulats dans le mélange, en utilisant le schéma explicatif de l'**annexe 10**.

Le bilan volumique du béton à fabriquer peut s'écrire, pour 1 m³ de béton frais, selon l'équation 3 :

$$1 \text{ m}^3 = V_{\text{Gtot}} + V_{\text{C}} + V_{\text{E}} + V_{\text{A}} \quad \text{Équation 3}$$

Où, chaque volume étant exprimé en m³ :

- V_{Gtot} est le volume total des granulats ;
- V_{C} est le volume de ciment ;
- V_{E} est le volume d'eau ;
- V_{A} est le volume d'air.

Le volume d'air peut être calculé à partir de la formule empirique suivante :

$$V_{\text{A}} = \frac{V_{\text{E}}}{h}$$

Où h est l'affaissement du béton en cm

Question 2.12 - À partir des éléments précédents, calculer le volume total des granulats V_{G} . Déduire alors le volume et la masse sèche de chaque type de granulats dans le béton.

Question 2.13 - Dédire la formulation du béton lorsqu'on considère les granulats secs et l'eau efficace du béton. Présenter les résultats sous forme d'un tableau qui présentera les masses des différents constituants à introduire dans le malaxeur.

Question 2.14 - En présence d'eau, les granulats secs vont, du fait de leur porosité ouverte (ou coefficient d'absorption d'eau) absorber une partie de l'eau efficace.

Calculer l'eau à introduire dans le malaxeur pour compenser cette absorption.

Dédire la formule du béton en masse de constituant par m^3 de béton fabriqué.

Question 2.15 - En réalité, comme précisé précédemment, les granulats sont humides lors de leur introduction dans le malaxeur et leur teneur en eau a été mesurée.

- Expliquer le principe de cette mesure.
- Dédire de leur teneur en eau, la quantité d'eau à introduire effectivement dans le malaxeur.
- Dédire la formulation corrigée du béton, en masse de constituant par m^3 de béton fabriqué.
- Calculer la masse volumique théorique du béton ainsi constitué. Commenter.

Étape 2 : réalisation d'une gâchée d'essai

Question 2.16 - La masse volumique mesurée du béton frais est de $2510 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Si cette masse volumique ne correspond pas à la masse volumique théorique calculée précédemment, expliquer le principe de la correction de la formule de béton.

Question 2.17 - Définir l'essai de mesure de la maniabilité adapté au béton à formuler. Expliquer le principe de cette mesure. Si la maniabilité est inférieure au cahier des charges, indiquer les leviers à mettre en œuvre sur la formulation et les précautions correspondantes.

Question 2.18 - Un contrôle de la résistance mécanique à la compression à 28 jours réalisé sur 260 éprouvettes cylindriques (diamètre 16 cm et hauteur 32 cm) de béton durci, a donné les résultats obtenus au tableau 1 fourni ci-après. Les essais de compression sont réalisés au moyen d'une presse hydraulique, après surfaçage par rectification des surfaces planes des éprouvettes.

- Indiquer quel est le faciès de rupture attendu des éprouvettes et en expliquer la raison.
- Déterminer la résistance moyenne du béton et déduire la résistance caractéristique.
- Conclure : le béton est-il conforme au cahier des charges en termes de résistance mécanique ?

Fc28 (Mpa)		nombre d'échantillons
valeur moyenne	intervalle	
31	[30,32]	1
33	[32,34]	1
35	[34,36]	2
37	[36,38]	3
39	[38,40]	9
41	[40,42]	20
43	[42,44]	35
45	[44,46]	47
47	[46,48]	50
49	[48,50]	42
51	[50,52]	27
53	[52,54]	14
55	[54,56]	6
57	[56,58]	2
59	[58,60]	1

Tableau 1 : Résultats d'essais de compression à 28 jours réalisés sur le lot de 260 éprouvettes.

Partie III : Simulation d'échauffement thermique dans un des chevêtres.

Dans cette partie, on s'intéresse au problème thermique associé au bétonnage du chevêtre le plus grand (**annexe 4**). Lors de la construction d'un ouvrage aussi massif, l'échauffement du béton par l'hydratation du ciment peut être considérable et provoquer une dégradation importante de l'ouvrage si des précautions particulières ne sont pas prises.

En effet, la réaction sulfatique interne *RSI* (**annexe 2**) peut conduire à une fissuration préjudiciable aux caractéristiques mécaniques de l'élément et à sa durabilité.

La **partie III** du sujet propose d'aborder l'une des causes prépondérantes de RSI : l'échauffement interne du béton au jeune âge lié aux réactions exothermiques d'hydratation.

Calorimétrie : de la chaleur d'hydratation à la densité de puissance interne.

Afin de pouvoir prédire le comportement thermique du chevêtre lors du bétonnage, il est nécessaire de connaître la densité de puissance libérée lors de l'hydratation p ($W \cdot m^{-3}$). Cette grandeur peut être déduite de l'évolution temporelle de la chaleur d'hydratation, évolution caractérisée expérimentalement par calorimétrie semi-adiabatique (essai normalisé NF EN 196-9 Décembre 2010 « Méthodes d'essai des ciments - Partie 9 : chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique »).

L'essai semi-adiabatique peut être mis en œuvre sur chantier et permet de suivre, tout au long de l'hydratation, la température interne d'une éprouvette de béton cylindrique placée dès sa fabrication dans un caisson calorifugé dont on connaît les caractéristiques (capacité calorifique et pertes thermiques). Il est alors possible de remonter à une courbe de chaleur d'hydratation du béton à partir de l'évolution temporelle de la température mesurée :

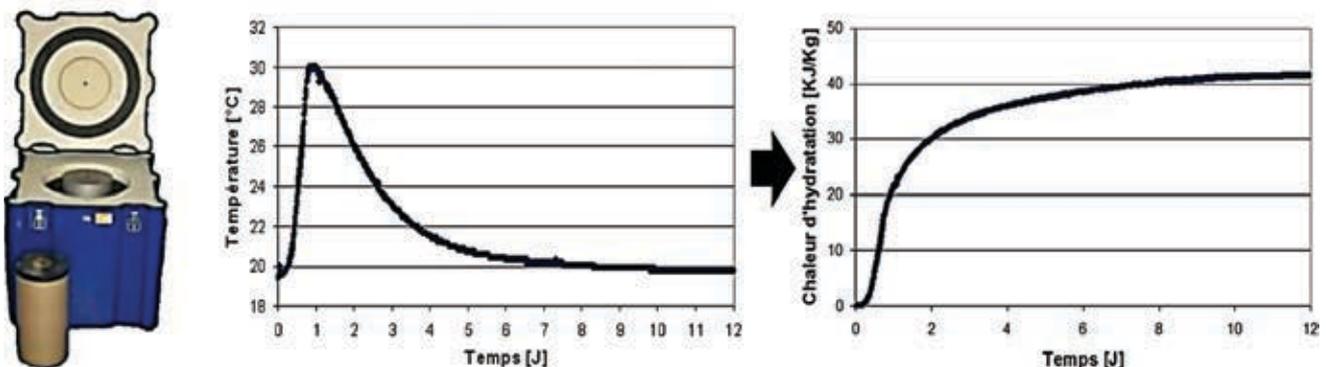


Figure 8 : exemple de calorimètre semi adiabatique et de résultat d'essai

Question 3.1 – Deux autres méthodes existent : la calorimétrie adiabatique et la calorimétrie isotherme. Quelles sont les différences de principe avec la calorimétrie semi-adiabatique ? Décrire succinctement les deux procédés.

L'évolution de la chaleur massique d'hydratation du ciment CEM IV/A-P 32.5R est présentée **figure 9**. La chaleur massique d'hydratation Q est calculée par gramme de ciment.

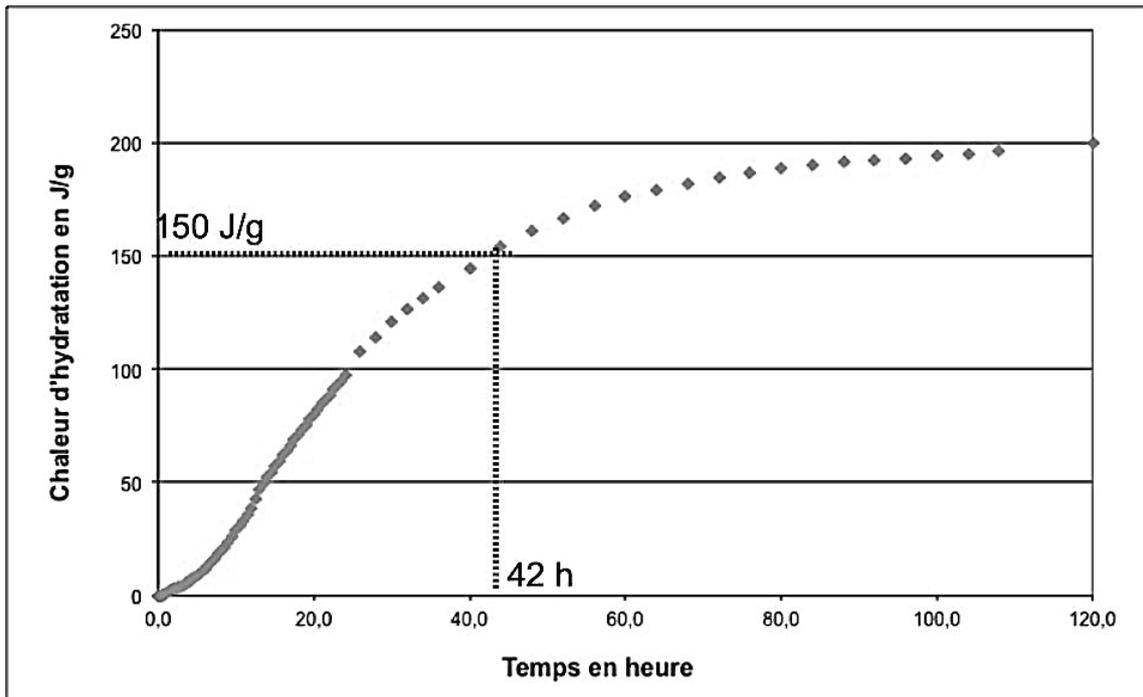


Figure 9 : évolution de la chaleur d'hydratation du ciment CEM IV/A-P 32.5R

La courbe expérimentale **figure 9** est modélisable par la fonction simplifiée suivante :

$$Q(t) = Q^\infty \times \left(1 - e^{-t/t_{ref}}\right) \quad \text{Équation 4}$$

Question 3.2 – A l'aide du tracé expérimental, déterminer les constantes Q^∞ en ($J \cdot g^{-1}$) et t_{ref} en (heure).

Question 3.3 - A partir de l'équation 4, donner l'expression analytique de la puissance massique d'hydratation, notée $P(t)$, en ($J \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$).

On rappelle : $P(t) = \frac{dQ(t)}{dt}$

Question 3.4 – Montrer que la valeur moyenne de cette puissance, \bar{P} , est égale à $1,63 J \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ sur la durée d'observation de l'essai.

On rappelle : la moyenne d'une fonction $f(x)$ sur un intervalle $[a-b]$ est définie par

$$\overline{f(x)} = \frac{1}{b-a} \times \int_a^b f(x) dx$$

Question 3.5 – Pour le béton du chevêtre, le dosage en liant à l'origine de la chaleur produite est de $375 kg \cdot m^{-3}$. En déduire la densité de puissance moyenne libérée lors de l'hydratation p ($W \cdot m^{-3}$).

Calculs thermiques dans un chevêtre

L'objectif est d'évaluer l'échauffement interne maximal du chevêtre lors de la prise du béton. Afin de limiter la montée en température, le chevêtre, de dimensions $L = 15 \text{ m}$, $l = 11 \text{ m}$, $H = 4 \text{ m}$ est réalisé en deux passes de hauteur $h = 2 \text{ m}$. L'étude se bornera à la première phase de bétonnage (**figure 10**).

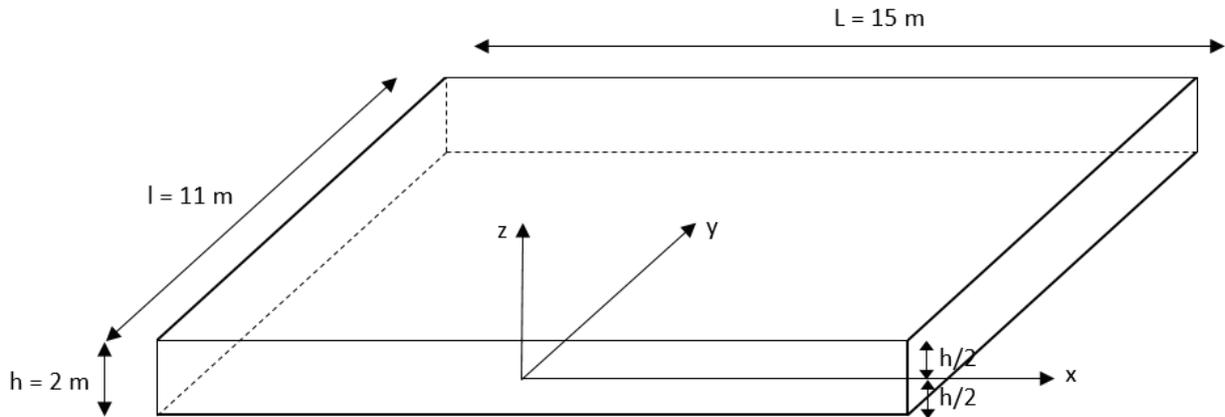


Figure 10 : géométrie du chevêtre pour la première phase de bétonnage

Question 3.6 – Quelle puissance P (kW) sera évacuée lors de la prise du béton du bloc de 2 mètres de hauteur ?

On précise : densité de puissance libérée lors de l'hydratation $p = 170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$

La conduction dans un matériau solide peut être représentée par la loi de Fourier :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \times \overrightarrow{\text{grad}(T)} \quad \text{Équation 5}$$

où : T est la température en K ou $^{\circ}\text{C}$,

φ est la densité de flux de chaleur en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$,

λ est la conductivité thermique du matériau, constante et uniforme, en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$,

$\overrightarrow{\text{grad}(T)} = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ en coordonnées cartésiennes.

En réalisant un bilan énergétique sur un volume élémentaire et en utilisant la loi de Fourier, on obtient l'équation de la chaleur en coordonnées cartésiennes :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{p}{\lambda} = \frac{\rho \times c}{\lambda} \times \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Équation 6}$$

où : ρ est la masse volumique en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

C est la capacité calorifique massique en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$,

p est la densité de puissance interne en $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$.

Pour simplifier le problème, on admettra que :

- le transfert de chaleur par conduction dans le bloc de béton est **unidirectionnel et symétrique suivant l'axe z** (effets de bords négligés),
- le régime permanent est établi.

Question 3.7 - En prenant en compte les hypothèses précédentes, simplifier les expressions analytiques du flux de chaleur ϕ (équation 5) et de l'équation de la chaleur (équation 6).

En caractérisant les échanges superficiels (convection et rayonnement) entre la surface (à $T_{h/2}$) et l'environnement (à T_{amb}) par le coefficient d'échange h_s ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$), les conditions aux limites du problème sont :

- en $z = 0$ $\phi = 0$ (par symétrie)
- en $z = h/2$ $\phi = h_s \times (T_{h/2} - T_{amb})$ (par continuité du flux)

Question 3.8 – En intégrant l'équation de la chaleur simplifiée, donner l'expression analytique de la température du béton $T(z)$ pour $0 \leq z \leq h/2$.

Question 3.9 – Tracer $T(z)$ pour $-h/2 \leq z \leq h/2$ et conclure.

On précise : $\lambda = 2 \text{ W} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$h_s = 20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$

$T_{amb} = 30^\circ\text{C}$

Une solution adéquate pour évacuer plus efficacement la chaleur d'hydratation, et ainsi limiter l'échauffement du béton, consiste à prévoir une circulation d'eau dans un réseau de conduites noyées dans le béton frais.

Un circuit est mis en place au niveau du plan $z = 0$ et permet de faire circuler l'eau à la température moyenne T_{eau} . L'espacement réduit entre les canalisations permet de modéliser la nappe par un plan d'épaisseur négligeable à température homogène T_{eau} .

La résolution de l'équation de la chaleur est simplement reconditionnée par la nouvelle condition aux limites en $z = 0$: $T = T_{eau}$. On obtient :

$$T(z) = -\frac{p}{2 \times \lambda} \times z^2 + A \times z + T_{eau} \quad \text{avec} \quad A = \frac{\frac{p \times h}{2} + \frac{p \times h^2 \times h_s}{8 \times \lambda} + h_s \times (T_{amb} - T_{eau})}{\lambda + \frac{h \times h_s}{2}}$$

Question 3.10 – Après avoir localisé sa position sur l'axe z , déterminer T_{max} dans le bloc de béton et conclure. A l'instar de la question 3.9, on pourra tracer $T(z)$ pour $-h/2 \leq z \leq h/2$. On précise : $T_{eau} = 22^\circ\text{C}$.

Question 3.11 – En précisant votre démarche, évaluer la puissance thermique P_{eau} en (kW) évacuée par le circuit d'eau.

Circuit de refroidissement

En combinaison avec d'autres mesures préventives, un refroidissement artificiel pendant la prise est mis en œuvre : une circulation d'eau (puisée in situ dans le fleuve) est assurée de manière continue dans un réseau de canalisations métalliques disposées régulièrement sur la surface de chaque levée. Les tubes noyés sont répartis à égale distance afin de disposer d'une répartition uniforme de source froide. La disposition retenue pour la première passe de bétonnage de 2 mètres d'épaisseur est présentée **figure 11**.

Cette nappe est constituée de 11 tubes acier $\text{Ø}1/4''$ de 16 mètres de longueur disposés à égale distance de 1 mètre. Ils sont alimentés par une nourrice $\text{Ø}1''1/2$ depuis A. L'évacuation de l'eau, récupérée dans un collecteur de même diamètre, se fait à l'air libre en B. Le sens de circulation sera inversé régulièrement afin d'uniformiser le refroidissement.

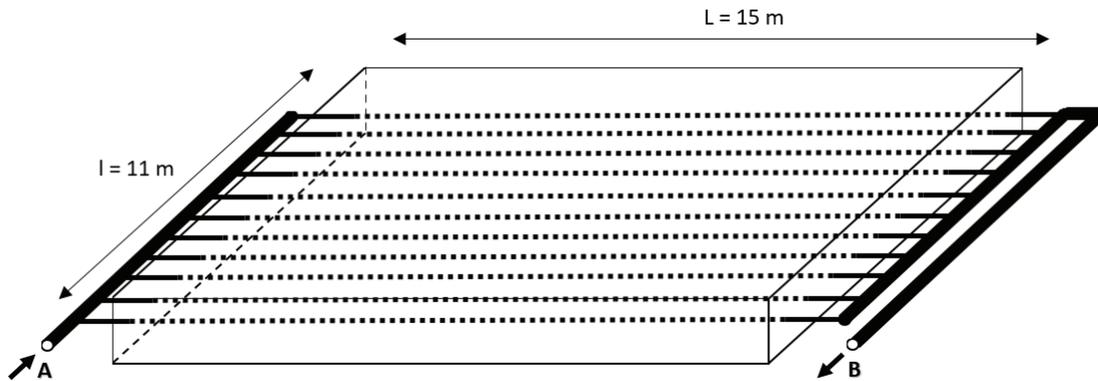


Figure 11 : réseau de refroidissement

Question 3.12 – Quel est l'intérêt de la disposition tubulaire au collecteur ?

Question 3.13 – Déterminer le débit d'eau global à assurer Q_v en $(m^3 \cdot h^{-1})$ ainsi que la vitesse de circulation dans les tubes noyés v en $(m \cdot s^{-1})$.

On rappelle : $P = q_m \times C \times \Delta T$ où : P est la puissance calorifique en W,
 q_m est le débit massique de fluide en $kg \cdot s^{-1}$,
 C est la capacité calorifique massique en $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$,
 ΔT est l'échauffement du fluide en $^\circ C$.

$Q_v = v \times S$ où : Q_v est le débit volumique en $m^3 \cdot s^{-1}$,
 v est la vitesse de circulation en $m \cdot s^{-1}$,
 S est la section de passage en m^2 .

On précise : $P = 35 \text{ kW}$

$$\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$$C_{\text{eau}} = 4185 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ \text{C}^{-1}$$

Température de l'eau en entrée : 20°C , échauffement maximal souhaité : 4°C

Tube acier $\text{Ø}1/4''$: $13,5 \times 2,3$ ($\text{Ø}_{\text{ext}} \times \text{épaisseur}$) en mm

Question 3.14 – Écrire puis simplifier l'équation de Bernoulli (conservation de l'énergie mécanique) entre les points A et B. On notera J_{AB} les pertes de charge entre A et B.

On rappelle : la charge énergétique E d'un fluide en un point s'exprime en (Pa) par :

$$E = p + \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 + \rho \times g \times z \quad \text{où : } p \text{ est la pression statique en Pa,}$$

$$v \text{ est la vitesse de circulation en } m \cdot s^{-1},$$

$$z \text{ est l'altitude du point en m.}$$

Question 3.15 – Quelle pression en (bar) sera nécessaire en A pour obtenir le débit souhaité ?

On rappelle : pertes de charge linéiques en $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ $j = \frac{\Lambda}{D} \times \frac{1}{2} \times \rho \times v^2$

où Λ est le coefficient de résistance du tube et D le diamètre intérieur

On précise : les pertes de charge de la nourrice et du collecteur ainsi que les pertes singulières sont considérées négligeables devant celles des tubes noyés,

$$\Lambda = 0,036 \text{ (tube acier } \text{Ø}1/4'')$$

Question 3.16 – Si pour des raisons techniques (performance du surpresseur amont par exemple) on dispose d'une pression motrice insuffisante, est-il possible de conserver le débit global en modifiant le nombre de tubes noyés ?

Partie IV : Dimensionnement d'un ouvrage provisoire, l'estacade

La construction en rivière du pont sur le Wouri, nécessite la mise en œuvre d'un ouvrage provisoire, une passerelle métallique appelée estacade, longeant les deux tabliers sur toute leur longueur. Le plan d'implantation de la passerelle est donné en **annexe 1**. L'estacade comprend une passerelle principale (ou rameau principal), dont l'axe est parallèle aux axes des ouvrages ferroviaire et routier à construire, et des passerelles secondaires, ou rameaux secondaires, perpendiculaires au rameau principal et permettant d'accéder aux chevêtres supports de tablier. Les rameaux principal et secondaires sont indépendants mécaniquement.

Le rameau principal sera l'objet de la présente étude.

La passerelle correspondante, d'axe longitudinal globalement courbe, est de trame régulière. On négligera sa géométrie courbe. Le tablier de cet ouvrage, repose sur deux séries de pieux distants de 15 mètres dans la direction longitudinale et de 5,3 mètres dans la direction transversale.

Le tablier, de largeur 7 mètres, est constitué, dans sa partie courante, d'un platelage bois. Ce platelage repose sur un réseau de poutres transversales et longitudinales. Les poutres longitudinales, de longueur 15 mètres, reposent à leurs extrémités sur les têtes de pieux.

Au niveau de chaque intersection du rameau principal avec les rameaux secondaires, un point fixe est mis en œuvre (voir **figure 12** ci-dessous), permettant de bloquer les déplacements longitudinaux et transversaux de la passerelle (noté PF sur l'**annexe 1**). Ce point fixe est constitué d'un contreventement (treillis de barres) dans les deux directions.

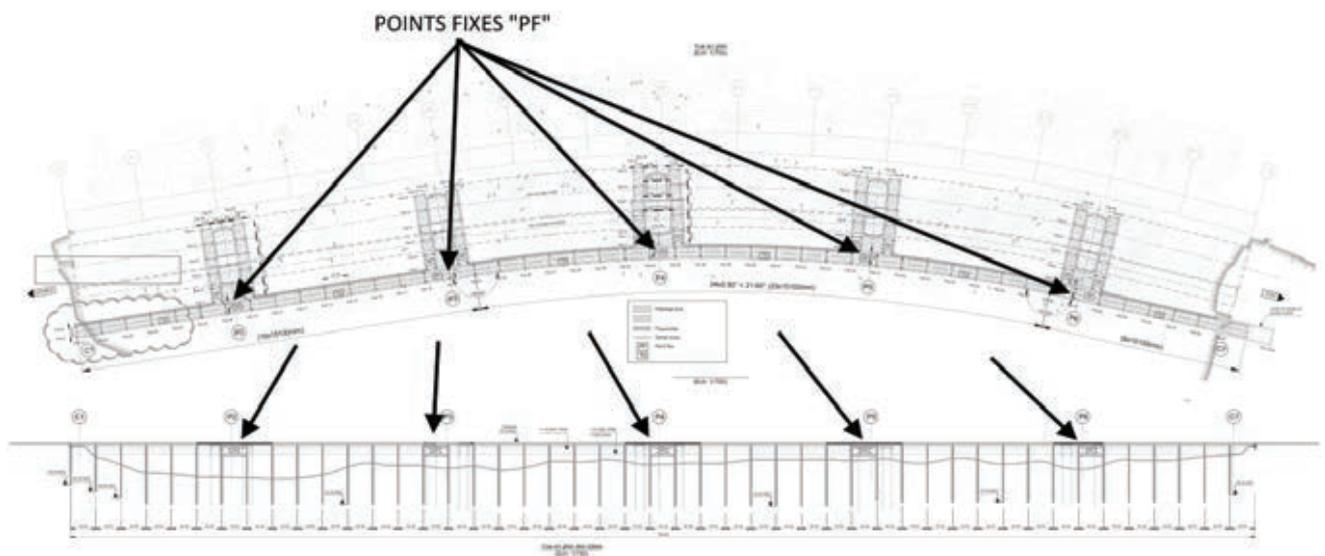


Figure 12 : géométrie de l'estacade et position des points fixes PF (voir annexe 1)

On considère que la structure porteuse du rameau principal est isostatique dans sa partie courante.

Le dimensionnement de la structure porteuse du rameau principal est réalisé selon les recommandations de l'Eurocode 3 en considérant les hypothèses énoncées ci-après.

Données et hypothèses de calcul

Catégorie d'ouvrage provisoire :

L'ouvrage provisoire est de première catégorie selon le fascicule 65.

Caractéristiques des aciers :

- Aciers de profilés commerciaux : les aciers de tous les profilés sont de nuance S355. Le tableau 2 ci-dessous fournit les caractéristiques mécaniques détaillées de ces aciers.

Tableau 2 : caractéristiques mécaniques des aciers de construction métallique de nuance S355.

Nuance	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E (GPa)	G (GPa)
S355	355	540	210	81

Les caractéristiques géométriques des profilés mis en œuvre dans la structure et objet de calculs dans le présent sujet sont fournies en **annexe 12**.

Charges permanentes et variables

Charges permanentes G :

- Poids propre surfacique du platelage bois : $212 \text{ daN} \cdot \text{m}^{-2}$.
- Poids propre des profilés considérés : voir **annexe 12**.
- Poids des superstructures (passerelles, garde-corps, réseaux...) appliquées sur chaque file de poutre longitudinale : 100 daN/m.

Charges variables Q :

- Charges d'exploitation
 - Charges des grues et engins :
 - Grue de masse 130 tonnes en charge sur les plateaux lourds ou en transfert sur l'estacade.
 - Camions de masse 30 tonnes ou en charges routières Bc, Bt, Br (croisement permis). Les efforts sont donnés par le fascicule 61 titre II. Ces charges ne sont pas dimensionnantes dans le cas de l'estacade. Elles ne sont donc pas considérées dans cette application.
 - Remorque avec une charge maximale de 40 tonnes.
 - Efforts de freinage des engins : on prendra de manière défavorable un effort de freinage parallèle à l'estacade de 30 tonnes.
- ⇒ **Les actions de ces trois types d'engins roulants ne peuvent pas être simultanées**
- Charges climatiques de vent : elles seront négligées pour le dimensionnement du rameau principal.
 - Les charges liées au courant de la rivière sur les pieux ne seront pas considérées.

Détail des charges liées à la grue et aux engins

- Charges liées à la grue :
 - Grue 130 tonnes en transfert : le poids total de la grue en transfert est de 140 tonnes. Il est réparti sur les 2 chenilles, soit $p = 0,123 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2}$ (2 chenilles 0,965 m x 5,9 m).
 - Grue 130 tonnes en charge : cette charge ne concerne que les zones aux intersections avec les rameaux secondaires. Elle ne sera pas considérée ici.
- Charges liées à la remorque : le poids de la remorque est 10,2 tonnes, l'entraxe des roues est de 2,44 m ; la surface impactée par les roues au sol est de 50 cm x 50 cm. La remorque supporte une surcharge maximale de 40,0 tonnes.

Combinaisons d'actions :

On note G les charges permanentes, et Q les charges variables.

Les états limites de service (ELS) et ultimes (ELU) considérés ici sont :

- ELS quasi-permanent : $G + Q$
- ELU fondamental : $1,35 G + 1,5 Q$

Flèches et contraintes admissibles

Conformément au fascicule 65 :

- Pour les aciers utilisés sur ce projet, un coefficient de sécurité $\gamma_{Mo} = 1,1$ est appliqué pour les contraintes limites, pour un ouvrage de 1ère catégorie. Ainsi, les contraintes seront limitées à 323 MPa pour une nuance S355.
- Les flèches seront limitées à $L/200$.

Justification des poutres transversales

En préambule, la structure porteuse du tablier du rameau principal est détaillée ci-dessous (**figure 13** et **figure 14**).

Le platelage bois est constitué de poutres en bois $b \times h = 10 \times 20$ cm, de longueur 3 ou 4,5 m reposant sur les poutres transversales (HEB 240 ou IPE 400) distantes de 1,5 m.

Les poutres en bois sont insérées à leurs extrémités entre les ailes des HEB 240 (elles reposent sur leurs semelles inférieures) et sont en appui dans leur partie courante sur les semelles supérieures des IPE 400.

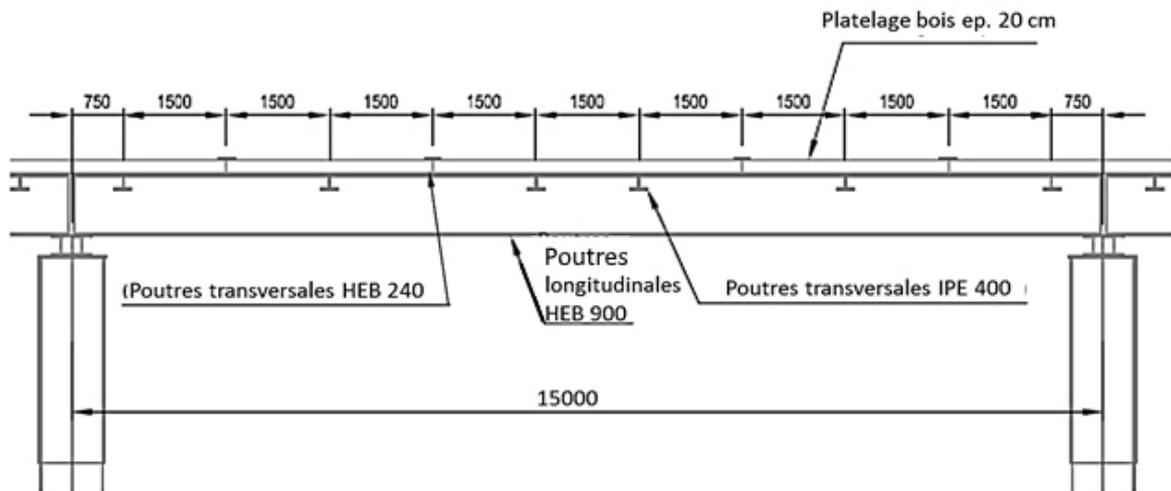


Figure 13 : vue en coupe longitudinale du tablier du rameau principal (en mm, sans échelle)

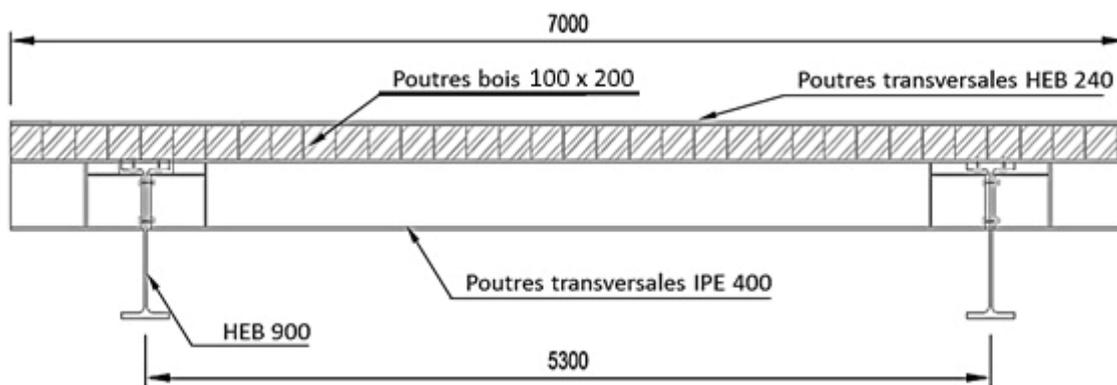


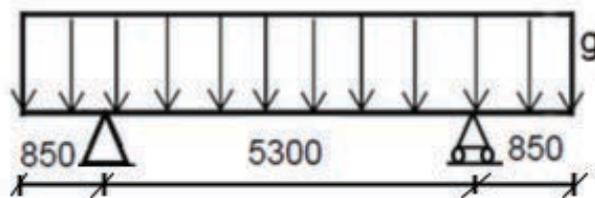
Figure 14 : vue en coupe transversale du tablier du rameau principal (en mm, sans échelle)

Vérification des poutres transversales IPE 400 et HEB 240

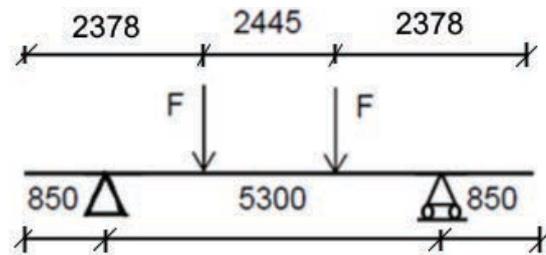
La combinaison d'action la plus défavorable pour la vérification des profilés en acier supportant le platelage bois est celle du poids propre et de la remorque.

La modélisation des deux charges correspondantes est la suivante :

- Poids propre : charge linéaire uniformément répartie notée g . Les cotes sont données en millimètres.



- Remorque : deux forces ponctuelles F d'intensité correspondant aux effets des deux masses appliquées ci-dessous, chacune d'une valeur de 12,6 tonnes. Leur position la plus défavorable est définie sur le schéma ci-dessous. Les cotes sont en millimètres.



Pour les calculs qui suivent, on pourra notamment s'appuyer sur le formulaire donné en **annexe 11** et sur l'organigramme de calcul donné en **annexe 13**.

Question 4.1 - Déterminer les sollicitations maximales dans les profilés IPE 400 et HEB 400 sous l'effet de la combinaison d'actions à l'ELU, et vérifier la résistance à l'ELU des deux profilés.

Question 4.2 - Déterminer la flèche maximale en flexion simple pour chacun des deux types de profilés sous l'effet de la combinaison d'actions à l'ELS.

Conclure sur la vérification en flexion simple à l'ELU et à l'ELS des profilés HEB 240 et IPE 400.

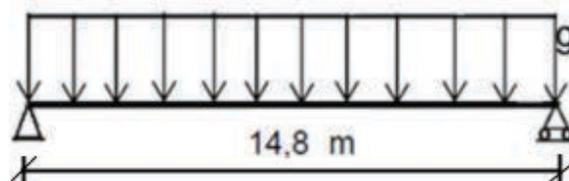
Question 4.3 - Quelle vérification mécanique complémentaire doit être réalisée pour les IPE 400 ? Pourquoi peut-on s'en passer pour les HEB 240 ? Aucun calcul n'est demandé pour cette question.

Vérification des poutres longitudinales HEB 900

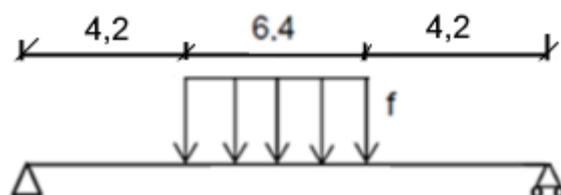
La combinaison d'action la plus défavorable pour la vérification des poutres longitudinales supportant l'ensemble platelage bois et poutres transversales est celle du poids propre de la structure, des éléments de superstructure et de la grue de 130 tonnes en transit.

La modélisation des deux charges correspondantes est la suivante :

- Poids propre : charge linéaire uniformément répartie notée g .



- Grue de 130 tonnes en transfert : une force linéaire uniformément répartie sur une longueur de 6,4 m et d'intensité $f = 10,9 \text{ t} \cdot \text{m}^{-1}$. La position la plus défavorable est centrée telle que définie sur le schéma ci-dessous.



Question 4.4 - Déterminer les sollicitations maximales dans le profilé HEB 900 sous l'effet de la combinaison d'actions à l'ELU, et vérifier sa résistance à l'ELU.

Question 4.5 - On souhaite maintenant vérifier la flèche maximale en flexion simple pour une poutre longitudinale sous l'effet de la combinaison d'actions à l'ELS.

Pour accélérer le calcul manuel, on s'interroge sur la possibilité éventuelle de simplifier le modèle mécanique de la charge transmise par la grue (charge f répartie sur 6,4 m), par une charge appliquée de même intensité résultante appliquée ponctuellement à mi-travée de la poutre.

Que peut-on dire de cette proposition de simplification du modèle de calcul mécanique ? Evaluer dans cette situation, l'importance de l'erreur liée à cette simplification (**annexe 11**). Dans quelle condition cette erreur serait-elle maximale et quelle serait sa valeur ?

Question 4.6 – Vérifier le profilé HEB 900 à l'ELS et conclure sur la vérification en flexion simple à l'ELU et à l'ELS pour les poutres longitudinale HEB 900.

Question 4.7 - Quelle vérification mécanique complémentaire doit être réalisée ? Aucun calcul n'est demandé pour cette question.

Vérification du système de contreventement longitudinal de l'estacade.

Le contreventement vis-à-vis des actions horizontales sur l'estacade est mis en œuvre aux points fixes positionnés sur le plan de l'**annexe 1**.

Ce contreventement est réalisé entre deux séries de pieux successifs par l'intermédiaire d'un système de barres s'apparentant à une croix de Saint-André. La **figure 15** présente l'architecture du contreventement dans le sens longitudinal.

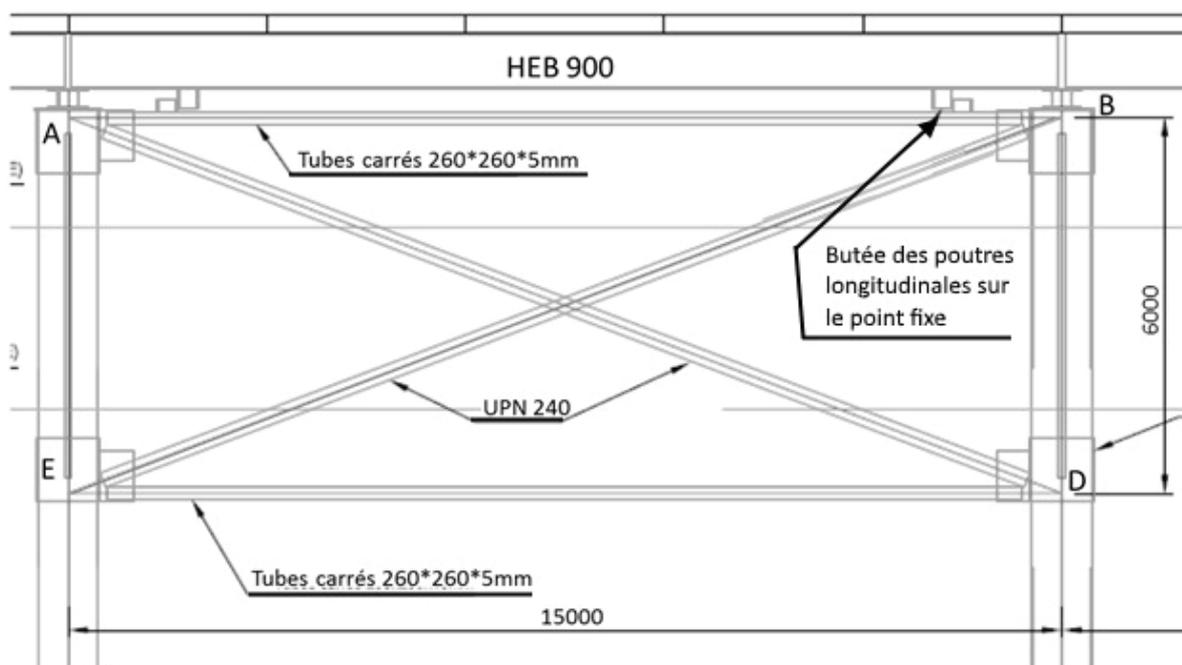


Figure 15 : système de contreventement longitudinal

Ce système de contreventement est constitué de barres AB, AE, AD, BE, BD et DE. Conformément aux hypothèses de calcul des treillis, les barres seront considérées comme articulées entre elles.

Pour simplifier, on considère que le système est articulé en E et simplement appuyé en D. Les efforts sont transmis par le platelage de l'estacade et sont appliqués aux nœuds A et/ou B.

Les efforts sont ici considérés comme appliqués au nœud B.

La modélisation du système est donc la suivante, la barre comprimée UPN 240 devenant inefficace (**figure 16**) :

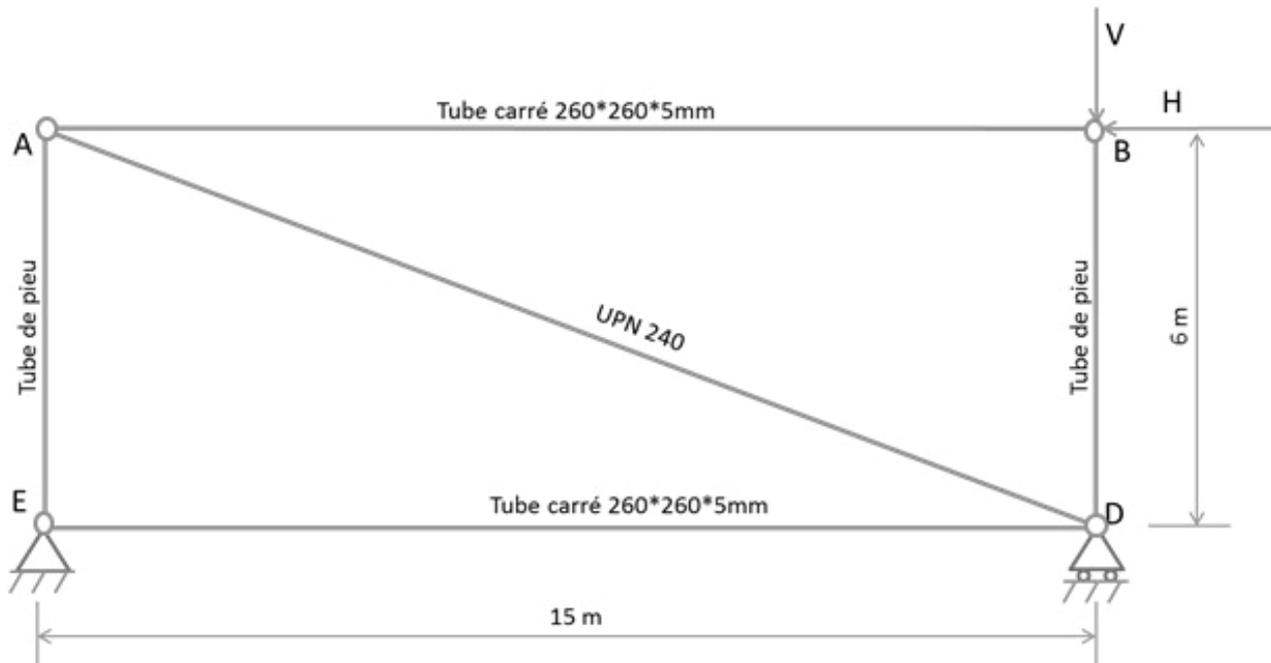


Figure 16 : modélisation du système de contreventement longitudinal dans le cas d'un effort horizontal vers la gauche appliqué en B

Selon la combinaison la plus défavorable à l'ELU, les forces ponctuelles sont données ci-après. Les valeurs numériques des efforts ci-dessous tiennent compte du coefficient majorateur à l'ELU :

- Effort vertical V : somme du poids propre de l'estacade (40,4 t), et du poids propre de la grue (131 t)
- Effort horizontal de freinage H : 30 t.

On s'intéresse ici à la vérification des tubes carrés 250*250*4 et de l'UPN 240. Les tubes de pieux ne sont pas ici pris en compte.

Question 4.8 - Calculer les efforts dans chacune des barres, et vérifier que les tubes carrés horizontaux sont en compression alors que l'UPN 240 est en traction.

Question 4.9 - Effectuer la vérification en traction de l'UPN dans la section courante (hors assemblage).

Question 4.10 - Effectuer la vérification (**annexe 14**) du tube carré en compression et flambement.

Question 4.11 - Conclure sur le dimensionnement des éléments et commenter les hypothèses de calcul utilisées.

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Estacade – Plans et implantation.
- Annexe 2 : Réaction sulfatique interne.
- Annexe 3 : Plan de coffrage chevêtre courant.
- Annexe 4 : Chevêtre en cours de construction.
- Annexe 5 : Analyses granulométriques des granulats utilisés pour la confection des bétons du Pont sur le Wouri.
- Annexe 6 : Fiche technique du ciment.
- Annexe 7 : Extrait de NF EN 206/CN Décembre 2014 Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206.
- Annexe 8 : Extrait du fascicule 65 – Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux de génie civil - Exécution des ouvrages de génie civil en béton.
- Annexe 9 : Détermination de la teneur en ciment C en fonction du rapport C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams (valable pour les granulats concassés basaltiques utilisés).
- Annexe 10 : Schéma de principe de détermination des pourcentages volumiques de chaque granulats dans le mélange de béton frais.
- Annexe 11 : Formulaire de résistance des matériaux.
- Annexe 12 : Caractéristiques géométriques des profilés métalliques commerciaux de résistance des matériaux (extraits des catalogues ArcelorMittal).
- Annexe 13 : Organigramme de calcul d'éléments métalliques en flexion simple selon l'Eurocode 3, pour des sections de classe 1 et 2 (voir le glossaire en Annexe 15).
- Annexe 14 : Organigramme de calcul d'éléments métalliques comprimés selon l'Eurocode 3, vérification au flambement (voir le glossaire en Annexe 15) .
- Annexe 15 : Glossaire des abaques et organigrammes de l'Annexe 13 et de l'Annexe 14, notations et définitions de l'Eurocode 3.
- Annexe 16 : Document réponse DR1 – Courbes granulométriques des granulats à tracer.

Annexe 1 - Estacade – Plans et implantation (sans échelle)

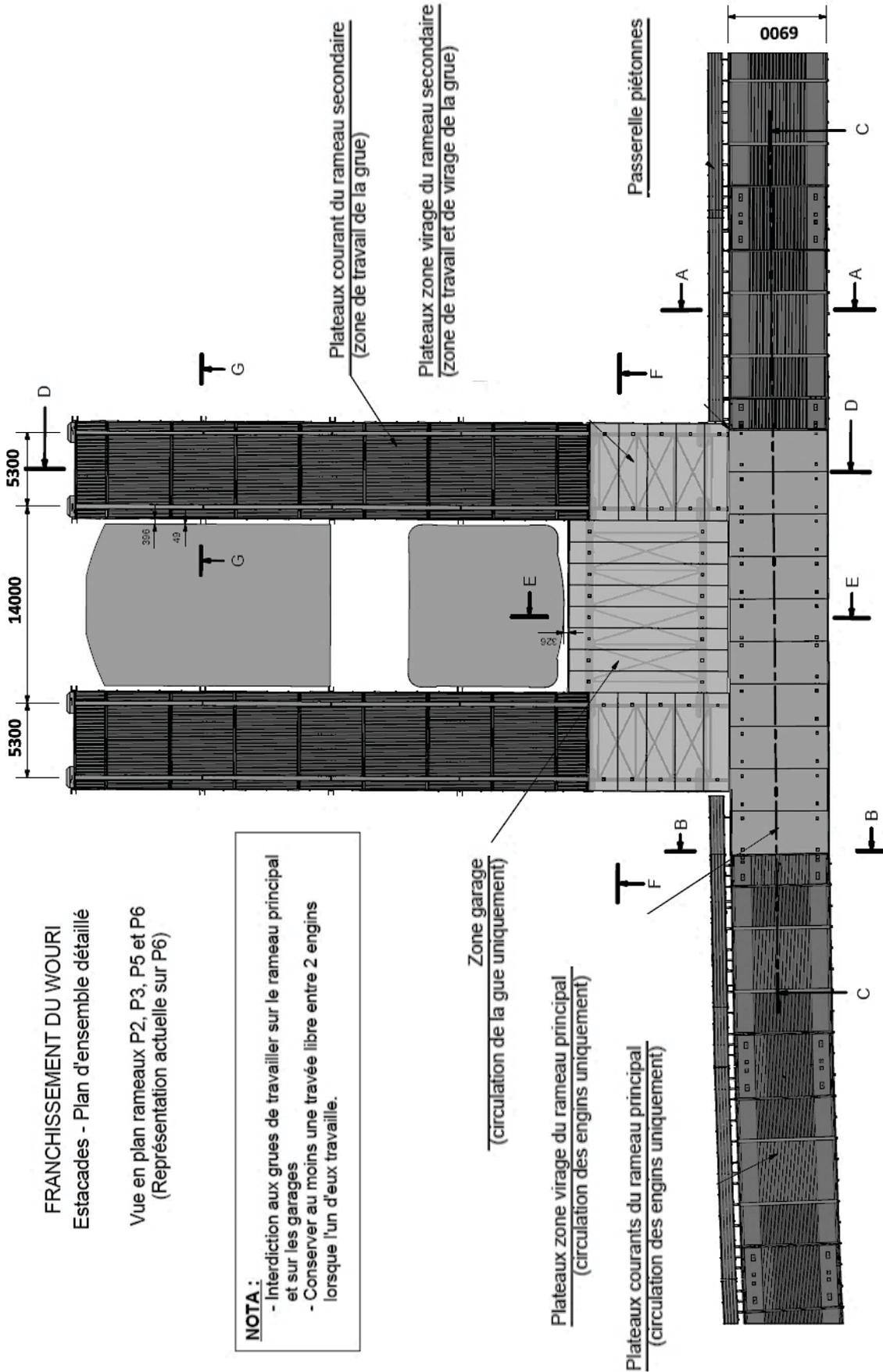


Figure 15 : vue en plan estacade sur pile P6

Annexe 1 - Estacade – Plans et implantation (sans échelle)

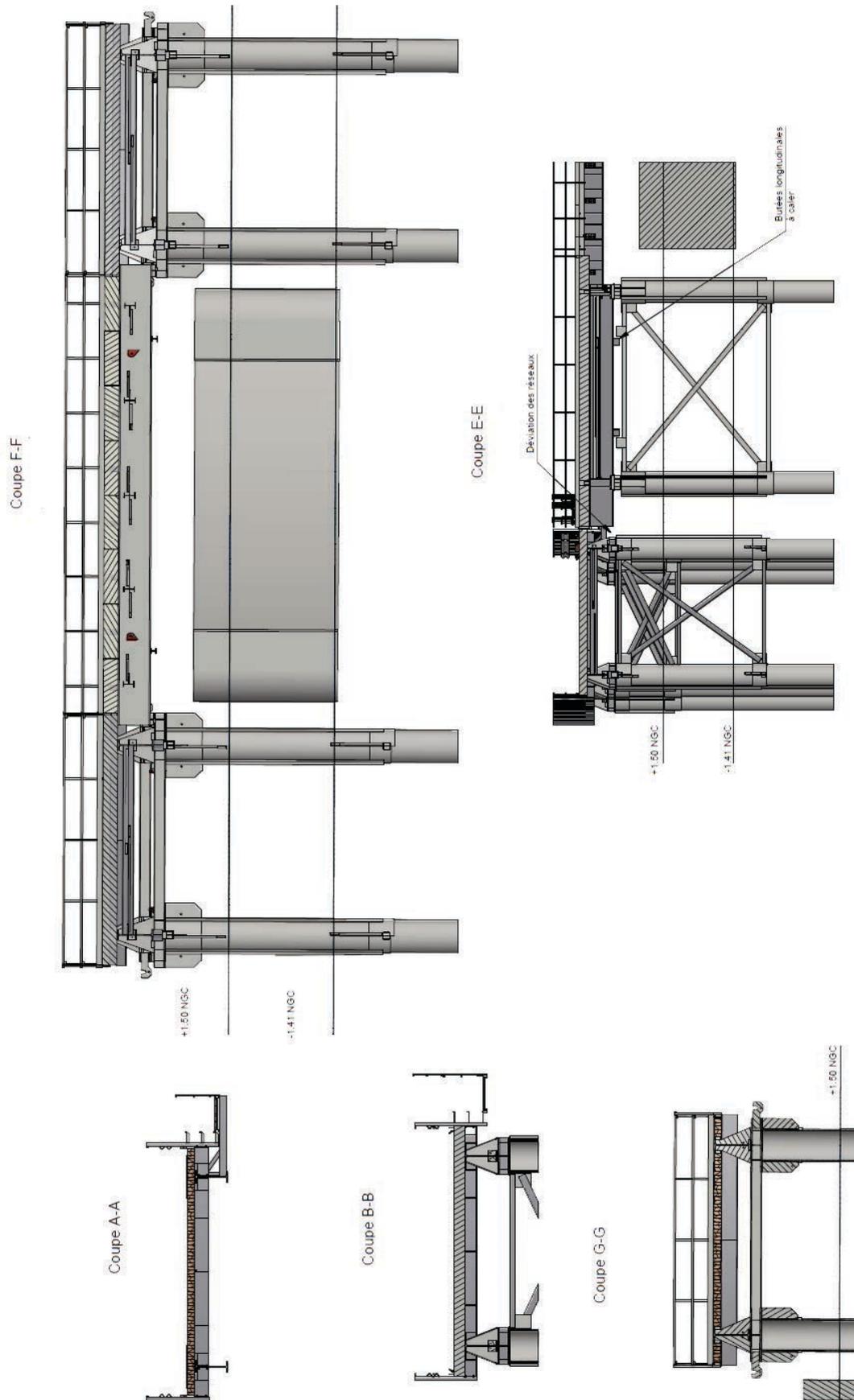
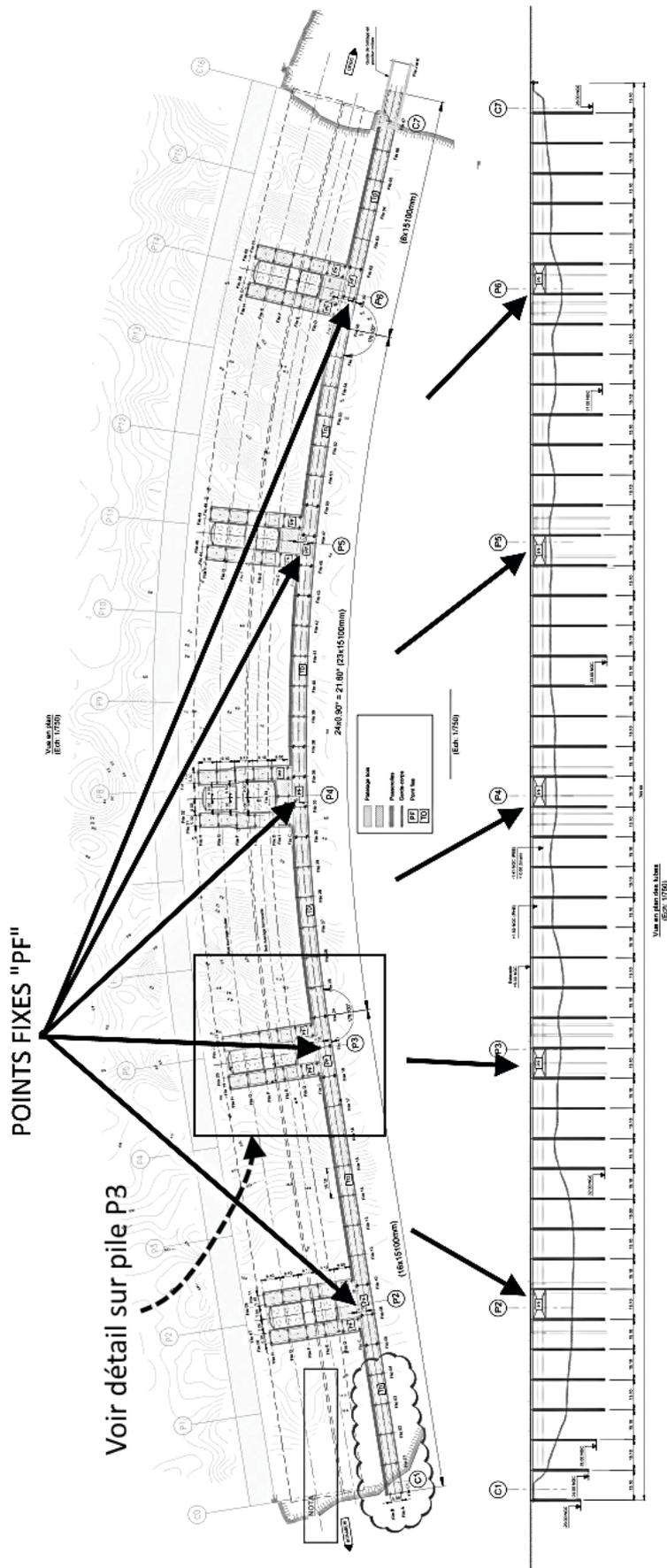


Figure 15 : coupes sur estacade sur pile P6

Annexe 1 - Estacade – Plans et implantation (sans échelle)



Annexe 1 - Estacade - Plan d'ensemble et implantation (sans échelle)

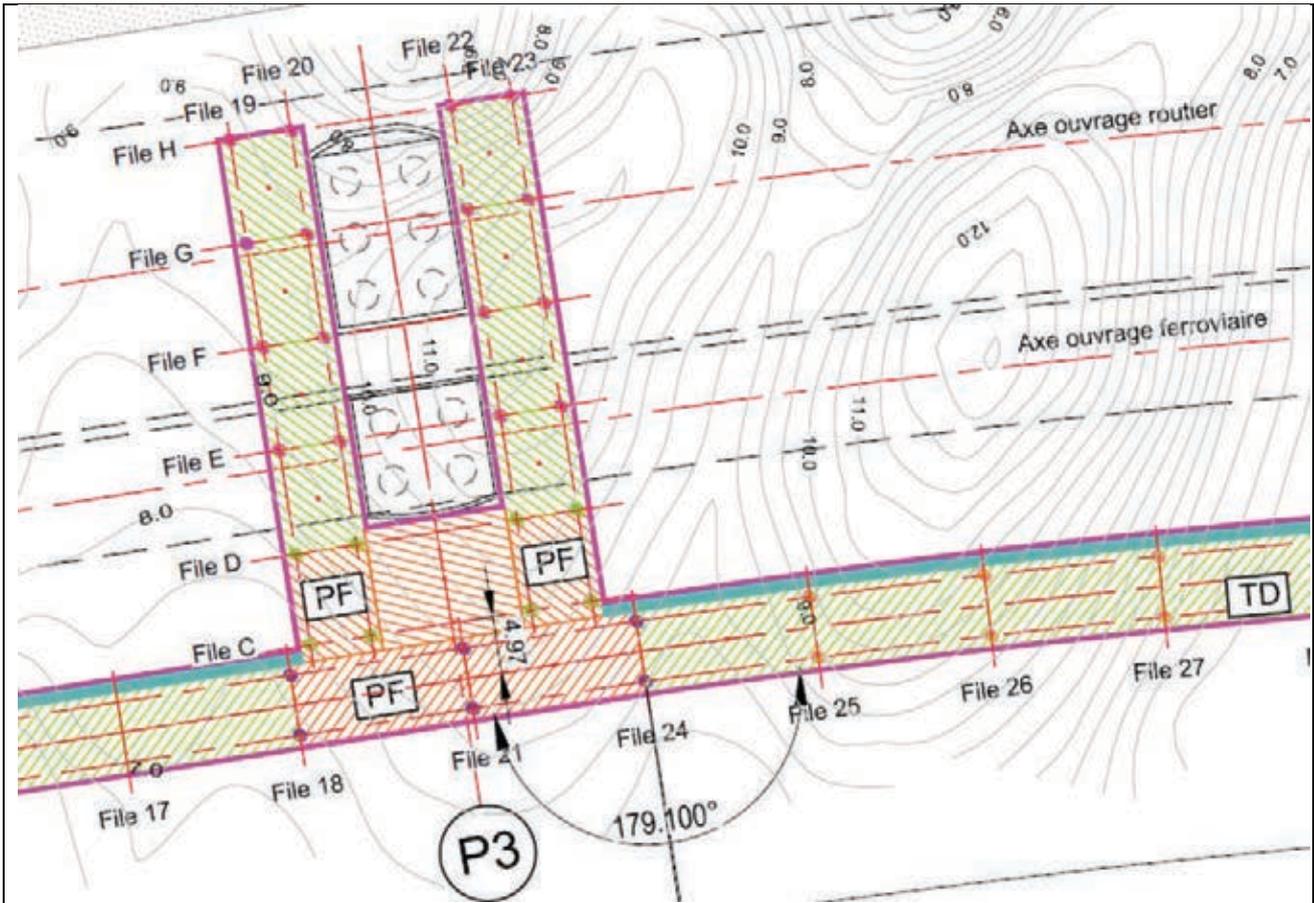


Figure 16 : plan de détail sur pile P3

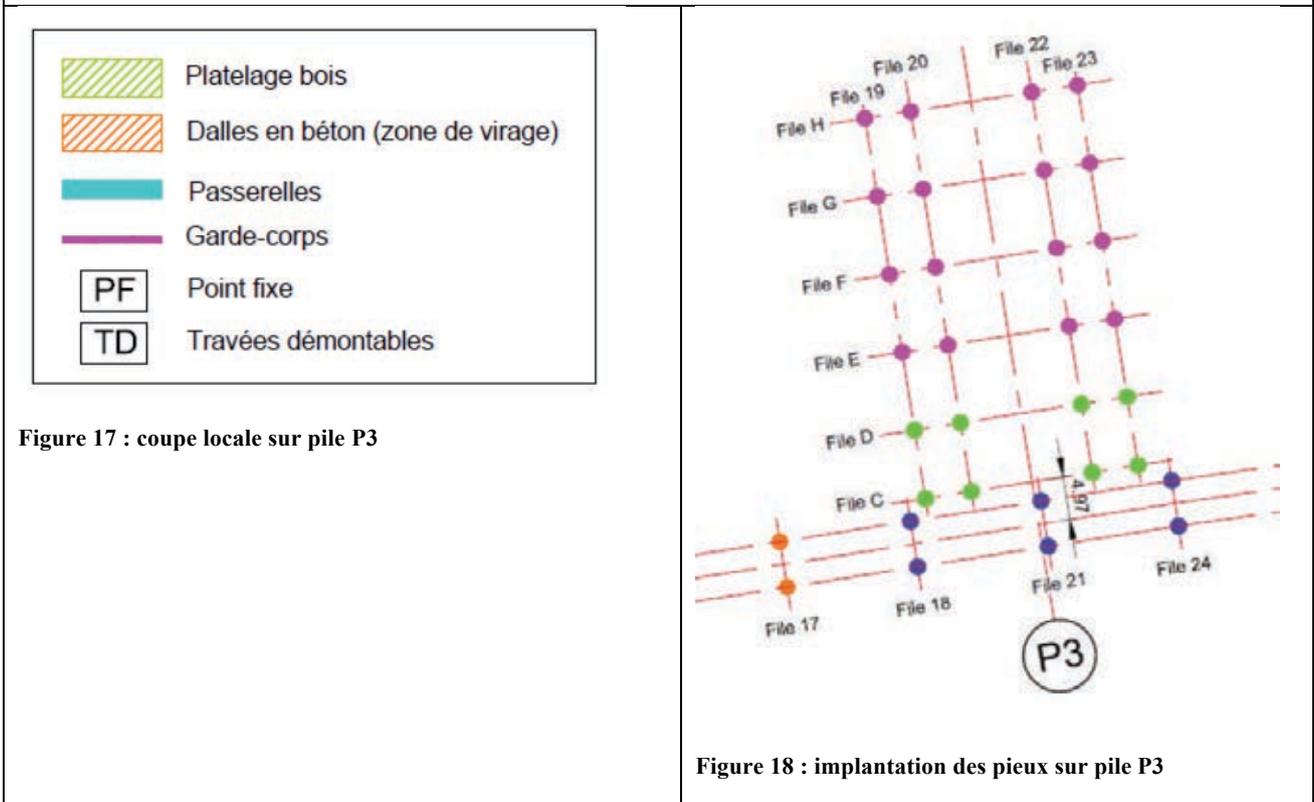


Figure 17 : coupe locale sur pile P3

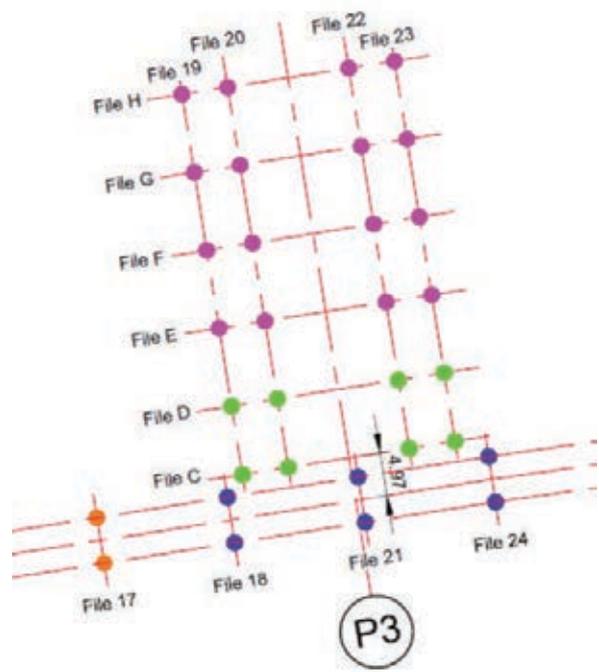


Figure 18 : implantation des pieux sur pile P3

Annexe 2 - Réaction sulfatique interne (RSI)

L'ouvrage considéré (pont sur Youri) est un pont en rivière. Il sera exposé à un certain nombre d'agressions de natures chimiques et/ou physiques tout au long de sa durée de service.

Par ailleurs, l'ouvrage est constitué de pièces en béton, souvent massives, dont les températures à cœur, du fait des réactions d'hydratation du ciment, sont susceptibles de dépasser un seuil critique, ce risque étant accentué par les conditions climatiques spécifiques de la région. En outre, en service, certaines pièces seront en contact régulier ou constant avec l'eau.

Ces deux types de conditions sont favorables au développement d'une pathologie du béton : **la réaction sulfatique interne.**

La réaction sulfatique interne, ou RSI, est une réaction différée se produisant dans le béton, correspondant à la remobilisation des sulfates présents dans les matières premières du béton (ciment, principalement, mais également granulats et/ou eau de gâchage) et conduisant à la formation d'ettringite secondaire expansive.

La pathologie est généralisée dans le béton et conduit à des gonflements par l'expansion d'ettringite, entraînant une fissuration préjudiciable aux caractéristiques mécaniques de l'élément et à sa durabilité.

Les facteurs prépondérants induisant un risque élevé de RSI sont :

- une température du béton au jeune âge, i.e. associée aux réactions exothermiques d'hydratation du béton, élevée (**supérieure à 65°C**),
- une humidité du béton élevée (la formation d'ettringite nécessite beaucoup d'eau).

Annexe 3 - Plan de coffrage chevêtre courant P2, P3, P5, P6

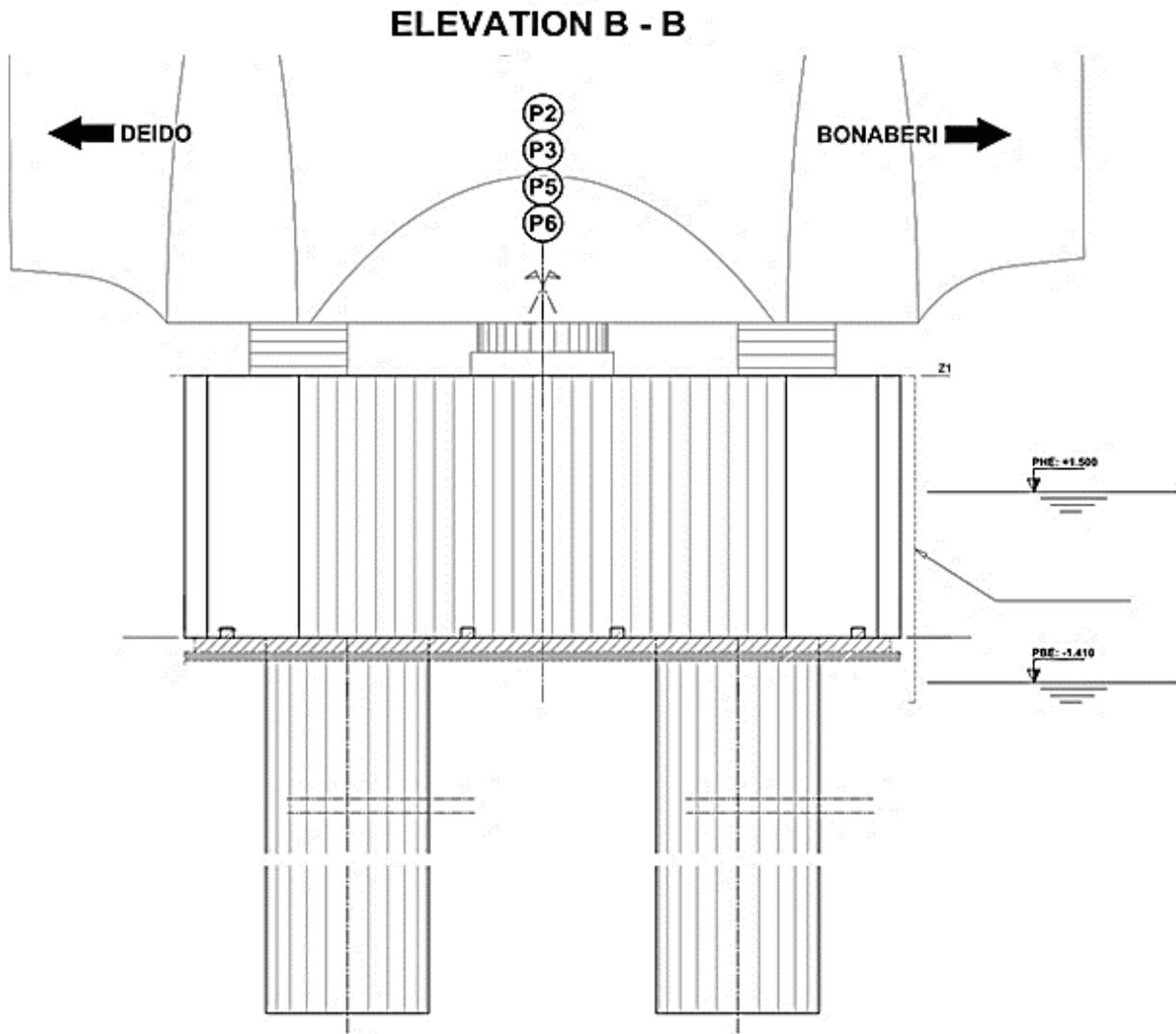


Figure 20 : élévation pile et chevêtre courant (sans échelle)

Annexe 4 - Photo d'un chevêtre en cours de construction.

Coques préfabriquées en béton. Acier en attente des 6 pieux. Chevêtre en attente de remplissage par du béton coulé en place



Aciers en attente
provenant des têtes de
pieux

Coque en béton
préfabriqué

Annexe 5 - Analyses granulométriques des granulats utilisés pour la confection des bétons du Pont sur le Wouri

Sable 0/4

Dimensions de tamis (mm)	Tamisats cumulés (%)
0.063	1
0.08	1.2
0.1	4
0.125	6
0.16	9
0.25	15
0.315	22
0.5	37
0.63	45
1	61
1.25	67
2	79
3.15	92
4	98
5	100

Gravillon 4/10

Dimensions de tamis (mm)	Tamisats cumulés (%)
0.063	0.2
0.2	1
0.25	1.2
0.315	1.3
3.15	2
4	5
5	24
6.3	55
8	85
10	99
12.5	100

Gravier 10/20

Dimensions de tamis (mm)	Tamisats cumulés (%)
5	0
6.3	0.3
8	0.7
10	1
12.5	2
16	55
20	99
25	100

Annexe 6 - Fiche technique du ciment



Usine de Bonabéri
B.P. 1323 – Douala

Usine de Figuil
B.P. 116 – Garoua

FICHE TECHNIQUE NC CEM IV A-P 32.5 R (SR)

CIMENT PORTLAND COMPOSE CONFORME A LA NORME CAMEROUNNAISE NC 234 : 2009 - 06

Constituants Principaux (%)		Caractéristiques chimiques (%)		Valeur usine
				Moyenne
Clinker	65-79	SiO ₂		28
Pouzzolane naturelle	21-35	Al ₂ O ₃		6.75
Gypse	3.5	Fe ₂ O ₃		7.25
Additif		CaO		48.79
Agent de mouture	< 0.1%	MgO		2.88
		K ₂ O		0.81
		Na ₂ O		1.31
		SO ₃		2.10
		TiO ₂		0.96
		P ₂ O ₅		0.24
		MnO		0.09
		Perte au feu		0.89
		Chlorure (Cl-)		0.007
		CaO libre		0.36
		Résidus insolubles		19.32
		Autres indices		
		Ciment CP1	ions sulfures (S ⁻)=	0.00 < 0.7
		C3A		1.59
		Indice de Sadran		18.92
		Pouzzolanité (EN 196-5)	Positif à 8 jours	
			CaO=	3.0 mmol/l
			OH- =	64.8 mmol/l
Valeurs limites applicables à chacun des résultats (Réf : NC 234 : 2009-06)		Valeurs limites applicables à chacun des résultats (Réf : NC 234 : 2009-06)		
Caractéristiques Mécaniques		Valeurs limites applicables aux résistances à la compression (Réf : NC 234 : 2009-06)		
Résistances à la compression à 20°C	Valeur usine			MPa
1 jour	14.0	2 jours		≥ 10
2 jours	22.0	7 jours		-
7 jours	32.6	28 jours		≥ 32,5
28 jours	42.0			≤ 52.5

EMPLOIS :

Travaux massifs exigeant des résistances élevées au jeunes âges et une faible chaleur d'hydratation, Ouvrages à décoffrage rapide

Béton non armé, béton armé, béton précontraint pour les résistances élevées au jeune âge et les produits de préfabrifications.

Annexe 7 - Extrait de NF EN 206/CN Décembre 2014 Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206

Tableau 1 – Classes d'agressivité

Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples Informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
1. Aucun risque de corrosion ni d'attaque		
<i>X0</i>	Béton non armé et sans pièces métalliques noyées : toutes les expositions sauf en cas de gel/dégel, d'abrasion et d'attaques chimiques.	
	Pour le béton armé ou avec des pièces métalliques noyées : Très sec	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est très faible.
2. Corrosion Induite par carbonatation		
Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est exposé à l'air et à l'humidité, les différentes classes d'exposition sont classifiées ci après :		
NOTE On entend par condition d'humidité celle du béton recouvrant les armatures ou les pièces métalliques noyées, mais, dans de nombreux cas, cette humidité peut être considérée comme le reflet de l'humidité ambiante. Dans ces cas-là, une classification fondée sur les différents milieux ambiants peut être appropriée ; il peut ne pas en être de même s'il existe un barrière entre le béton et son environnement.		
<i>XC1</i>	Sec ou humide en permanence	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau
<i>XC2</i>	Humide, rarement sec	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau. Un grand nombre de fondations
<i>XC3</i>	Humidité modérée	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie.
<i>XC4</i>	Alternance d'humidité et de séchage	Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition <i>XC2</i> .
3. Corrosion Induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine		
Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine, contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage, les différentes classes d'exposition sont classées comme suit :		
NOTE À propos des conditions d'humidité, voir aussi la section 2 de ce tableau.		
<i>XD1</i>	Humidité modérée	Surfaces de bétons exposées à des chlorures transportés par voie aérienne.
<i>XD2</i>	Humide, rarement sec	Piscines. Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures.
<i>XD3</i>	Alternance d'humidité et de séchage	Éléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures. Chaussées. Dalles de parc de stationnement de véhicules.

Annexe 7 - Extrait de NF EN 206/CN Décembre 2014 Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206

Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
4. Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer		
Lorsque le béton contenant une armature ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin, les différentes classes d'exposition sont :		
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structures sur ou à proximité d'une côte.
XS2	Immergé en permanence	Éléments de structures marines.
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	Éléments de structures marines.
5. Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage		
Lorsque le béton est soumis à une attaque significative due à des cycles de gel/dégel alors qu'il est mouillé, les différentes classes d'exposition sont :		
XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons exposées à la pluie et au gel.
XF2	Saturation modérée en eau avec agents de déverglaçage	Surfaces verticales de bétons des ouvrages routiers exposées au gel et à l'air véhiculant des agents de déverglaçage.
XF3	Forte saturation en eau, sans agent de déverglaçage	Surfaces horizontales de bétons exposées à la pluie et au gel.
XF4	Forte saturation en eau, avec agents de déverglaçage ou eau de mer.	Routes et tabliers de pont exposés aux agents de déverglaçage et surfaces de bétons verticales directement exposées aux projections d'agents de déverglaçage et au gel. Zones des structures marines soumises aux projections et exposées au gel.
6. Attaques chimiques		
Lorsque le béton est exposé aux attaques chimiques, se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface, les eaux souterraines, comme indiqué au Tableau 2, les classes d'exposition doivent être données ci-après. La classification de l'eau de mer dépend de la localisation géographique, par conséquent la classification valide sur le lieu d'utilisation du béton s'applique.		
NOTE Une étude particulière peut être nécessaire pour déterminer la classe d'exposition adéquate dans les environnements tels que :		
<ul style="list-style-type: none"> — n'entrant pas dans les limites du Tableau 2 ; — contenant d'autres substances chimiques agressives ; — sol ou eau polluée chimiquement ; — présentant une vitesse d'écoulement de l'eau élevée, en combinaison avec certaines substances chimiques du Tableau 2. 		
XA1	Environnement à faible agressivité chimique, selon le Tableau 2	
XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée, selon le Tableau 2	
XA3	Environnement à forte agressivité chimique, selon le Tableau 2	

Annexe 7 - Extrait de NF EN 206/CN Décembre 2014 Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206

**Tableau 2 — Valeurs limites pour les classes d'exposition correspondant aux
attaques chimiques par les sols et eaux souterraines naturels**

Caractéristique chimique	Méthode d'essai de référence	XA1	XA2	XA3
Eaux souterraines				
SO ²⁻ ₄ , en mg/l	EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3 000	> 3 000 et ≤ 6 000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 et ≥ 5,5	< 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 4,0
CO ₂ agressif, en mg/l	EN 13577	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 jusqu'à saturation
NH ⁺ ₄ , en mg/l	ISO 7150-2	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100
Mg ²⁺ , en mg/l	EN ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1 000	> 1 000 et ≤ 3 000	> 3 000 jusqu'à saturation
Sols				
SO ²⁻ ₄ total, en mg/kg ^a	EN 196-2 ^b	≥ 2 000 et ≤ 3 000 ^c	> 3 000 ^c et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000
Acidité selon Baumann-Gully, en ml/kg	prEN 16502	> 200	N'est pas rencontrée dans la pratique	
Les sols argileux dont la perméabilité est inférieure à 10 ⁻⁵ m/s peuvent être affectés à une classe inférieure.				
La méthode d'essai prescrit l'extraction du SO ²⁻ ₄ à l'acide chlorhydrique ; il est également possible de procéder à cette extraction à l'eau, si l'on dispose d'une expérience en la matière sur le lieu d'utilisation du béton.				
La limite doit être ramenée de 3 000 mg/kg à 2 000 mg/kg en cas de risque d'accumulation d'ions sulfate dans le béton en raison de l'alternance de périodes sèches et de périodes humides ou d'absorption capillaire.				

Annexe 8 - Extrait du fascicule 65 – Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux de génie civil - Exécution des ouvrages de génie civil en béton

Tableau 8.B – Valeurs limites applicables selon le fascicule 65 pour la composition et les propriétés du béton en fonction de la classe d'exposition

	Classes d'exposition																				
	Corrosion induite par carbonatation						Corrosion induite par les chlorures						Attaque gel / dégel						Environnements chimiquement agressifs		
	Eau de mer			Chlorures autres que l'eau de mer			Eau de mer		Chlorures autres que l'eau de mer				XF1	XF2	XF3 ^{u)}	XF4 ^{d)}	XA1	XA2	XA3 ^{w)}		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3 ^{u)}	XF4 ^{d)}	XA1	XA2	XA3 ^{w)}				
Rapport Z _{erfl} / éq maximal ^{d)}	0,60	0,60	0,55	0,50 ^{b)}	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,50 ^{b)}	0,45	0,50	0,45	0,50	0,45	0,40				
Classe de résistance minimale ^{c)}	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37 ^{b)}	C30/37 ^{b)}	C35/45	C30/37	C30/37 ^{b)}	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45 ^{b)}	C30/37	C35/45	C40/50				
Teneur mini en liant éq (kg/m ³) ^{a) c) d)}	280	280	300	330	330	330	350	330	330	350	330	350 ^{b)}	385 ^{b)}	385 ^{b)}	330	350	360				
Absorption d'eau maxi pour les produits préfabriqués en usine (%) ^{e)}	6,5 ^{m)}	6,5 ^{m)}	6 ^{m)}	6 ^{m)}	5,5 ^{m)}	5,5 ^{m)}	5 ^{m)}	6 ^{m)}	5,5 ^{m)}	5 ^{m)}	6 ^{m)}	5 ^{m)}		5,5 ^{m)}	5 ^{m)}	4,5 ^{m)}					
Teneur minimale en air (%) ^{f)}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	- ⁿ⁾	4 ^{e)}	-	-	-	-				
Essai(s) de performances ^{h)}												XP P 18-420	NF P 18-424 (NF P 18-425)	NF P 18-424 (NF P 18-425)							
Cendres volantes	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30 ^{b)}	0,00 ^{b)}	0,00 ^{b)}	0,30	0,30	0,30	0,30			
Fumées de silice	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10			
Métafaïne type A	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15			
Laitier moulu classe A ^{*)}	0,50	0,50	0,40	0,40	0,50	0,50	0,50	0,40	0,50	0,50	0,40	0,50	0,50	0,15	0,50	0,50	0,50	0,50			
Laitier moulu classe B ou C	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,15	0,30	0,30	0,30	0,30			
Addition calcaire catégorie A	0,30	0,30	0,30	0,30	0,05	0,05	0,05	0,30	0,05	0,05	0,30	0,05	0,25	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00			
Addition calcaire catégorie B	0,25	0,25	0,25	0,25	0,05	0,05	0,05	0,25	0,05	0,05	0,25	0,05	0,25	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00			
Addition siliceuse de minéralogie QZ	0,25	0,25	0,25	0,25	0,15	0,15	0,15	0,25	0,15	0,15	0,25	0,15	0,20	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00			
Rapport maximal A/A+C)																					
Combinaison CEM I + add-on																					

Annexe 8 - Extrait du fascicule 65 – Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux de génie civil - Exécution des ouvrages de génie civil en béton

	Classes d'exposition																
	Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures				Attaque gel / dégel					Environnements chimiquement agressifs			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3 ^{a)}	XF4 ^{a)}	XA1	XA2	XA3 ^{a)}
Combinaison CEM II/A + additif																	
Rapport maximal A/(A+C)																	
Cendres volantes	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20 ^{b)}	0,00 ^{b)}	0,20	0,20	0,20	0,20
Fumées de silice ^{a)}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Métakrafin type A ^{a)}	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Laitier moulu classe A ^{a)}	0,35	0,35	0,30	0,30	0,35	0,35	0,30	0,35	0,35	0,35	0,30	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Laitier moulu classe B ou C	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Addition calcaire catégorie A	0,10	0,10	0,10	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Addition siliceuse de minéralogie QZ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nature du ciment	-	-	-	-	-	PM ^{b)}	PM ^{b)}	-	-	0	-	-	0	0	0	0	0

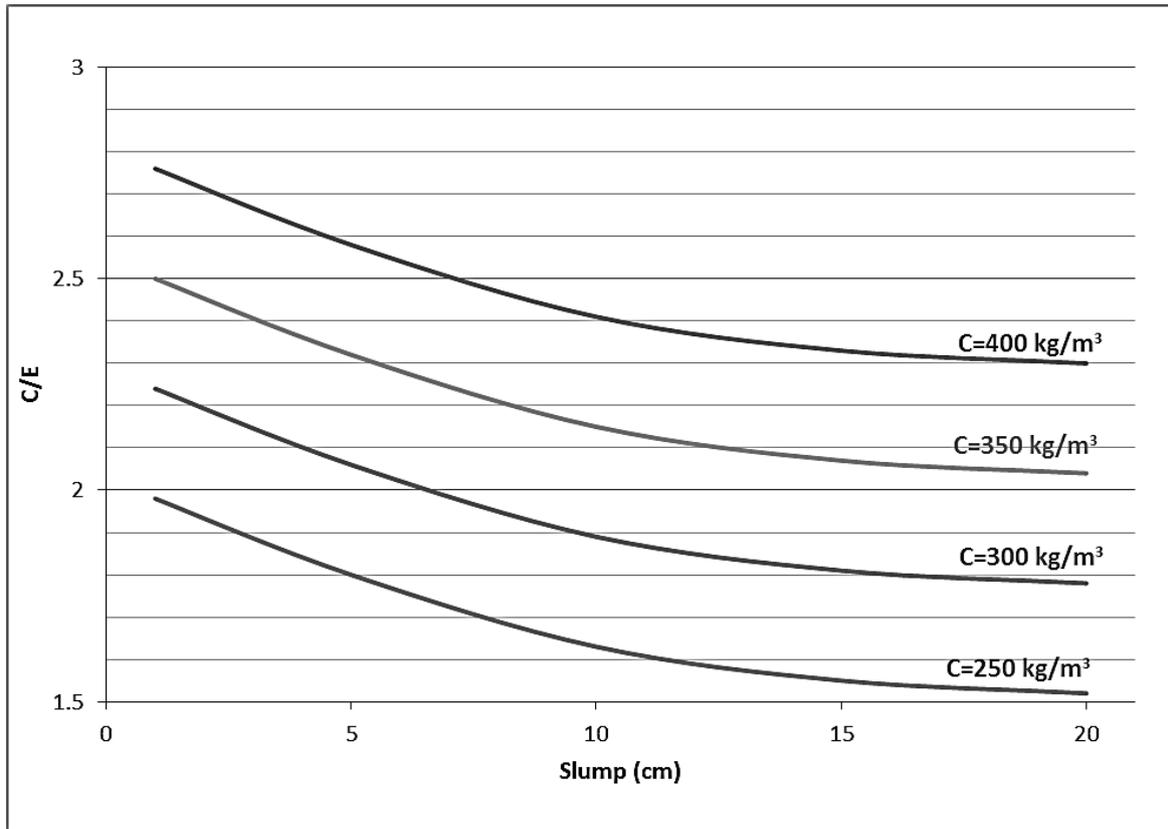
Dans le cas de béton précontraint, la classe minimale de résistance en compression à 28 jours est C30/37. D'autre part, la teneur minimale en éléments fins de la composition (inférieurs à 0,125 mm) est égale à 385 kg/m³.

- a) Pour les classes XF3 et XF4, les granulats doivent être non gélifs au sens de la norme NF P 18-545. Pour les classes XF3 et XF4, les spécifications complémentaires relatives aux bétons de type G ou G+S sont à respecter si elles sont exigées au marché.
- b) Ces valeurs sont définies pour $D_{max} = 20$ mm. La quantité de liant équivalent à ajouter (+) ou à déduire (-) en pourcentage de la valeur indiquée, en fonction de la dimension nominale supérieure du plus gros granulats, exprimée en millimètre est $D \leq 12,5 : + 10 \% ; D = 14 : + 7,5 \% ; D = 16 : + 5 \% ; D = 22,4 : - 2,5 \% ; D \geq 31,5 : - 10 \%$.
- c) Pour les produits préfabriqués en usine, il est possible de déroger aux exigences sur les dosages minimaux en liant équivalent à condition de respecter les seuils concernant les absorptions d'eau et de diminuer de 0,05 les rapports $E_w/Liant \text{ Eq}$ maximaux.
- d) Exigence applicable à la charge.
- e) Le respect de cette valeur nécessite l'utilisation d'un agent entraîneur d'air. Il est possible de déroger à la teneur minimale en air en utilisant les essais de performance (NF P 18-424 ou NF P 18-425 ou XP P 18-420) et les seuils correspondants (allongement relatif, fréquences de résonance, perte de matière) définis dans le guide LCPC de 2003 « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel ».
- f) Pour les classes XF2 (lorsque le béton présente une teneur en air supérieure ou égale à 4 %) et XF3, l'utilisation de cendres volantes jusqu'à un taux de 30 % en cas de combinaison avec un CEM I et 20 % en cas de combinaison avec un CEM II est possible si la durabilité au gel et aux sels est démontrée par des essais performantiels probants. Pour la classe XF4, l'utilisation de cendres volantes jusqu'à un taux de 15 % est possible si la durabilité au gel et aux sels est démontrée par des essais performantiels probants.

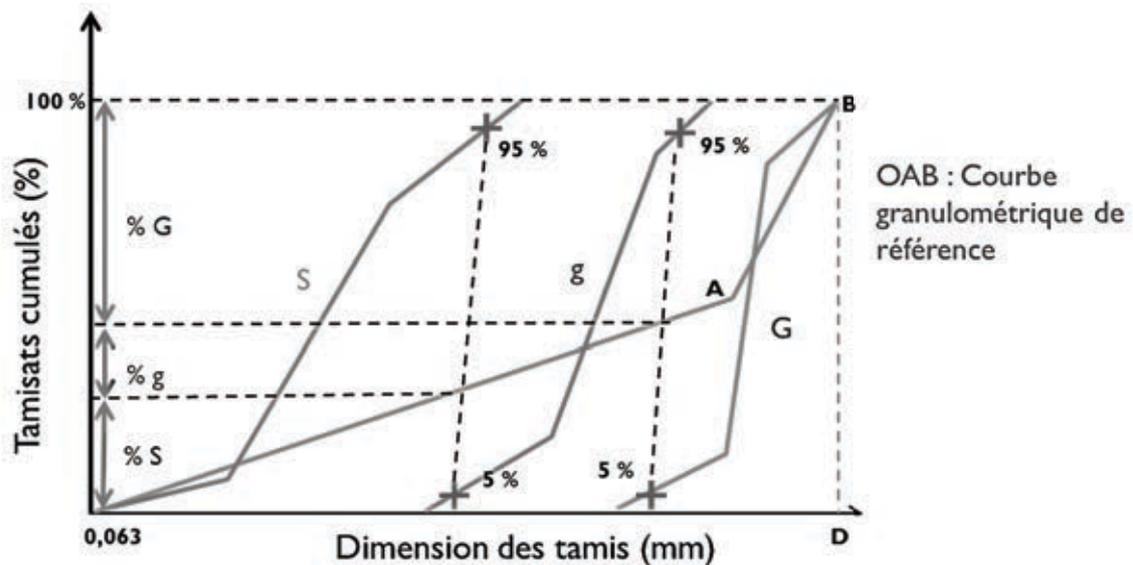
Annexe 8 : Extrait du fascicule 65 – Cahier des clauses techniques générales applicables aux marchés publics de travaux de génie civil - Exécution des ouvrages de génie civil en béton

- g) Les ciments de type CEM IIIA-D, CEM IIIA-Q ou CEM IIIA-M contenant des fumées de silice ou des pouzzolanes naturelles calcinées ne doivent pas être utilisés.
- h) La composition de l'addition (teneur en sulfures, en sulfates, etc.) doit être telle que le liant respecte les exigences de la norme NF P 15-317.
- i) En cas d'utilisation de sels de déverglaçage, utiliser un ciment conforme à la norme NF P 15-317 (PM) ou un ciment résistant aux sulfates au sens du 8.1.2.1. S'il est prévu de n'utiliser que des sels de déverglaçage conformes aux classes A ou B de la norme NF P 98-180, ou conformes à la norme XP P 98-181, pendant toute la vie de l'ouvrage, il est possible de déroger à cette exigence.
- j) Pour le choix du ciment et des additions, se référer au fascicule FD P 18-011. Lorsque la classe d'agressivité résulte de la présence de sulfates, si la teneur en sulfates est comprise entre 800 et 1500 mg/L, utiliser un ciment conforme à la norme NF P 15-317 (PM) et si la teneur en sulfates excède 1500 mg/L, utiliser un ciment résistant aux sulfates au sens du 8.1.2.1. En cas de dépassement des seuils d'agressivité définis dans le FD P 18-011, il convient de justifier la durabilité du béton dans le milieu considéré au moyen d'une étude spécifique.
- k) Pour la résistance au gel avec ou sans sels de déverglaçage (classes XF2, XF3 et XF4), l'utilisation des essais de performance (NF P 18-425, XP P 18-424 ou NF P 18-420 le cas échéant) et le respect des seuils associés à ces essais peuvent se substituer aux obligations concernant la teneur minimale en air.
- l) Le rapport $E_{a,4}/L_{a,4}$ maximal pourra être augmenté jusqu'à 0,55 à condition de respecter le seuil limite de 6 % concernant l'absorption d'eau.
- m) Lorsque le béton respecte les dosages minimaux en liant équivalent, les mesures d'absorption d'eau ne sont pas exigées.
- n) Il est possible de déroger aux valeurs spécifiées si le prescripteur dispose d'une étude spécifique justifiant de la durabilité du béton dans le milieu considéré.
- o) Il est possible de réduire le dosage minimal en liant équivalent à 350 kg/m³ pour la classe XF3 et 370 kg/m³ pour la classe XF4 en utilisant les essais de performance (NF P 18-424 ou NF P 18-425 ou XP P 18-420) et les seuils correspondants (allongement relatif, fréquence de résonance, perte de matière) définis dans le guide LCPC de 2003 « *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel* ».
- p) L'absorption d'eau doit être inférieure à 8 % sauf si la classe de résistance est supérieure ou égale à C35/45.
- q) Pour les bétons non armés ou faiblement armés, il est possible de réduire la classe de résistance à C30/37 en utilisant les essais de performance (NF P 18-424 ou NF P 18-425 ou XP P 18-420) et les seuils correspondants (allongement relatif, fréquence de résonance, perte de matière) définis dans le guide LCPC de 2003 « *Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel* ».
- r) Pour les éléments très exposés des ouvrages d'art la teneur minimale en liant équivalent est portée à 370 kg/m³ et la teneur en air occlus doit être supérieure ou égale à 4 %. Dans ce cas, l'exigence sur l'absorption d'eau ne s'applique pas. Ces éléments sont ceux qui présentent des surfaces horizontales soumises aux stagnations d'eau et aux projections directes de sels de déverglaçage : corniches, solins d'ancrage des joints de chaussée, longrines d'ancrage des dispositifs de retenue...
- s) Les rapports maximaux A/(A+C) pour le laitier moulu de classe A correspondent aux valeurs pour les bétons d'ingénierie dans l'annexe NALF de la norme NF EN 206/CN.

Annexe 9 - Détermination de la teneur en ciment C en fonction du rapport C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams (valable pour les granulats concassés basaltiques utilisés)

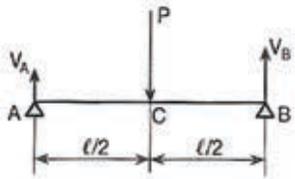
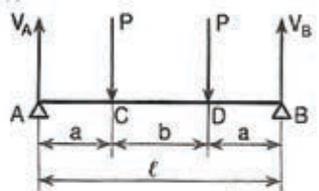
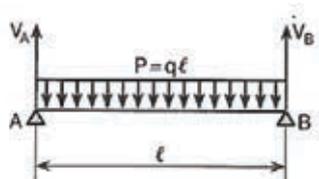
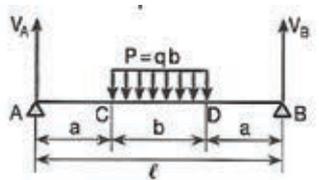


Annexe 10 - Schéma de principe de détermination des pourcentages volumiques de chaque granulat dans le mélange de béton frais



% G, % g, % S : volumes absolus de chaque type de granulat dans le mélange de béton frais

Annexe 11 - Formulaire de résistance des matériaux

Cas de charge	Réactions aux appuis	Moment fléchissant à $l/2$	Flèche à $l/2$
	<i>sans indication</i>	<i>sans indication</i>	$\frac{Pl^3}{48EI}$
	<i>sans indication</i>	<i>sans indication</i>	$\frac{Pa}{24EI}(3l^2 - 4a^2)$
	<i>sans indication</i>	<i>sans indication</i>	$\frac{5ql^4}{384EI}$
	<i>sans indication</i>	<i>sans indication</i>	$\frac{qb}{384EI}(8l^3 - 4b^2l + b^3)$

Annexe 12 - Caractéristiques géométriques des profils métalliques commerciaux (extraits catalogues ArcelorMittal)

CARACTERISTIQUES DES PROFILES IPE

Désignation Designation Bezeichnung	Valeurs statiques / Section properties / Statistische Kennwerte										Classification EN 1993-1-1:2005						EN 10025-2:2004	EN 10025-4:2004	EN 10225:2001	
	axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y					axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z					Pure bending y-y		Pure compression							
	I_y mm ⁴ x10 ⁴	W_{ey} mm ³ x10 ³	W_{ep} mm ³ x10 ³	i_y mm x10	A_w mm ² x10 ²	I_z mm ⁴ x10 ⁴	W_{ez} mm ³ x10 ³	W_{ep} mm ³ x10 ³	i_z mm x10	S_x mm	I_x mm ⁴ x10 ⁴	I_y mm ⁴ x10 ⁸	S235	S355	S460	3				4
IPEAA 240	24,9	3154	267	298	9,97	15,3	231	38,6	60,0	2,70	38,4	7,33	30,1	1	1	-	3	4	-	✓
IPEA 240	26,2	3290	278	312	9,94	16,3	240	40,0	62,4	2,68	39,4	8,35	31,3	1	1	1	2	4	4	✓
IPE 240	30,7	3892	324	367	9,97	19,1	284	47,3	73,9	2,69	43,4	12,9	37,4	1	1	1	1	2	4	✓
IPEO 240	34,3	4369	361	410	10,0	21,4	329	53,9	84,4	2,74	46,2	17,2	43,7	1	1	1	1	2	3	✓
IPEA 270	30,7	4917	368	413	11,2	18,8	358	53,0	82,3	3,02	40,5	10,3	59,5	1	1	1	3	4	4	✓
IPE 270	36,1	5790	429	484	11,2	22,1	420	62,2	97,0	3,02	44,6	15,9	70,6	1	1	1	2	3	4	✓
IPEO 270	42,3	6947	507	575	11,4	25,2	514	75,5	118	3,09	49,5	24,9	87,6	1	1	1	1	2	3	✓
IPEA 300	36,5	7173	483	542	12,4	22,3	519	69,2	107	3,34	42,1	13,4	107	1	1	1	3	4	4	✓
IPE 300	42,2	8356	557	628	12,5	25,7	604	80,5	125	3,35	46,1	20,1	126	1	1	1	2	4	4	✓
IPEO 300	49,3	9994	658	744	12,6	29,1	746	98,1	153	3,45	51,0	31,1	158	1	1	1	1	3	4	✓
IPEA 330	43	10230	626	702	13,7	27,0	685	85,6	133	3,54	47,6	19,6	172	1	1	1	3	4	4	✓
IPE 330	49,1	11770	713	804	13,7	30,8	788	98,5	154	3,55	51,6	28,2	199	1	1	1	2	4	4	✓
IPEO 330	57	13910	833	943	13,8	34,9	960	119	185	3,64	56,6	42,2	246	1	1	1	1	3	4	✓
IPEA 360	50,2	14520	812	907	15,1	29,8	944	111	172	3,84	50,7	26,5	282	1	1	1	4	4	4	✓
IPE 360	57,1	16270	904	1019	15,0	35,1	1043	123	191	3,79	54,5	37,3	314	1	1	1	2	4	4	✓
IPEO 360	66	19050	1047	1186	15,1	40,2	1251	146	227	3,86	59,7	55,8	380	1	1	1	1	3	4	✓
IPEA 400	57,4	20290	1022	1144	16,7	35,8	1171	130	202	4,00	55,6	34,8	432	1	1	1	4	4	4	✓
IPE 400	66,3	23130	1160	1307	16,6	42,7	1318	146	229	3,95	60,2	51,1	490	1	1	1	3	4	4	✓
IPEO 400	75,7	26750	1324	1502	16,7	48,0	1564	172	269	4,03	65,3	73,1	588	1	1	1	2	3	4	✓

Annexe 12 - Caractéristiques géométriques des profils métalliques commerciaux (extraits catalogues ArcelorMittal)

CARACTERISTIQUES DES PROFILS HE

Désignation Designation Bezeichnung	Valeurs statiques / Section properties / Statistische Kennwerte												Classification EN 1993-1-1:2005						EN 10225-2:2004	EN 10025-4:2004	EN 10225:2001	
	axe fort y-y strong axis y-y starke Achse y-y						axe faible z-z weak axis z-z schwache Achse z-z						Pure bending y			Pure compression						
	I_y mm ⁴ x10 ⁴	W_{Ay} mm ³ x10 ³	W_{Py} mm ³ x10 ³	I_y mm	A_z mm ² x10 ²	I_z mm ⁴ x10 ⁴	W_{Az} mm ³ x10 ³	W_{Pz} mm ³ x10 ³	I_z mm	S_x mm	I_t mm ⁴ x10 ⁴	I_w mm ⁶ x10 ⁹	5235	5355	5460	5235	5355	5460				
HE 240 AA	47,4	5835	521,0	570,6	9,83	21,54	2077	173,1	264,4	5,87	49,10	22,98	239,6	3	3	4	3	3	4	✓	✓	✓
HE 240 A	60,3	7763	675,1	744,6	10,05	25,18	2769	230,7	351,7	6,00	56,10	41,55	328,5	1	2	3	1	2	3	✓	✓	✓
HE 240 B	83,2	11260	938,3	1053	10,31	33,23	3923	326,9	498,4	6,08	68,60	102,7	486,9	1	1	1	1	1	1	✓	✓	✓
HE 240 C	119	17330	1359	1564	10,67	46,35	5942	487,1	743,8	6,25	87,60	288,7	787,9	1	1	-	1	1	-	✓	-	-
HE 240 M	157	24290	1799	2117	11,03	60,07	8153	657,5	1006	6,39	106,6	627,9	1152	1	1	-	1	1	-	✓	✓	✓
HE 900 AA	198	301100	6923	7999	34,55	147,2	9041	602,8	957,7	5,99	90,15	334,9	16260	1	1	1	4	4	4	✓	✓	✓
HE 900 A	252	422100	9485	10810	36,29	163,3	13550	903,2	1414	6,50	111,1	736,8	24960	1	1	1	4	4	4	✓	HI	HI
HE 900 B	291	494100	10980	12580	36,48	188,8	15820	1050	1658	6,53	123,6	1137	29460	1	1	1	3	4	4	✓	HI	HI
HE 900 M	333	570400	12540	14440	36,70	214,4	18450	1220	1929	6,60	136,1	1671	34750	1	1	1	2	4	4	✓	HI	HI
HE 900 x 391	391	674300	14630	16990	36,81	254,3	22320	1454	2312	6,70	152,1	2597	42560	1	1	1	1	2	4	✓	HI	HI
HE 900 x 466	466	814900	17380	20380	37,05	305,3	27560	1767	2832	6,81	173,1	4256	53400	1	1	1	1	1	2	✓	HI	HI

Annexe 12 - Caractéristiques géométriques des profils métalliques commerciaux (extraits catalogues ArcelorMittal)

CARACTERISTIQUES DES PROFILES UPN

Désignation Designation Bezeichnung	Dimensions Abmessungen							Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße				Surface Oberfläche		
	G kg/m	h mm	b mm	t _w mm	t _r mm	r ₁ mm	r ₂ mm	A mm ² x10 ²	d mm	Ø	e _{min} mm	e _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t
UPN 50*	5,59	50	38	5,0	7,0	7,0	3,5	7,12	21	-	-	-	0,232	42,22
UPN 65*	7,09	65	42	5,5	7,5	7,5	4,0	9,03	34	-	-	-	0,273	39,57
UPN 80*	8,64	80	45	6,0	8,0	8,0	4,0	11,0	47	-	-	-	0,312	37,10
UPN 100*	10,6	100	50	6,0	8,5	8,5	4,5	13,5	64	-	-	-	0,372	35,10
UPN 120	13,4	120	55	7,0	9,0	9,0	4,5	17,0	82	-	-	-	0,434	32,52
UPN 140	16,0	140	60	7,0	10,0	10,0	5,0	20,4	98	M 12	33	37	0,489	30,54
UPN 160	18,8	160	65	7,5	10,5	10,5	5,5	24,0	115	M 12	34	42	0,546	28,98
UPN 180	22,0	180	70	8,0	11,0	11,0	5,5	28,0	133	M 16	38	41	0,611	27,80
UPN 200	25,3	200	75	8,5	11,5	11,5	6,0	32,2	151	M 16	39	46	0,661	26,15
UPN 220	29,4	220	80	9,0	12,5	12,5	6,5	37,4	167	M 16	40	51	0,718	24,46
UPN 240	33,2	240	85	9,5	13,0	13,0	6,5	42,3	184	M 20	46	50	0,775	23,34
UPN 260	37,9	260	90	10,0	14,0	14,0	7,0	48,3	200	M 22	50	52	0,834	22,00
UPN 280	41,8	280	95	10,0	15,0	15,0	7,5	53,3	216	M 22	52	57	0,890	21,27

Annexe 12 - Caractéristiques géométriques des profils métalliques commerciaux (extraits catalogues ArcelorMittal)



TUBES ET PROFILS CREUX

PROFILS CREUX DE CONSTRUCTION FINIS À FROID

Norme de référence : NF EN 10219

État de surface : noir

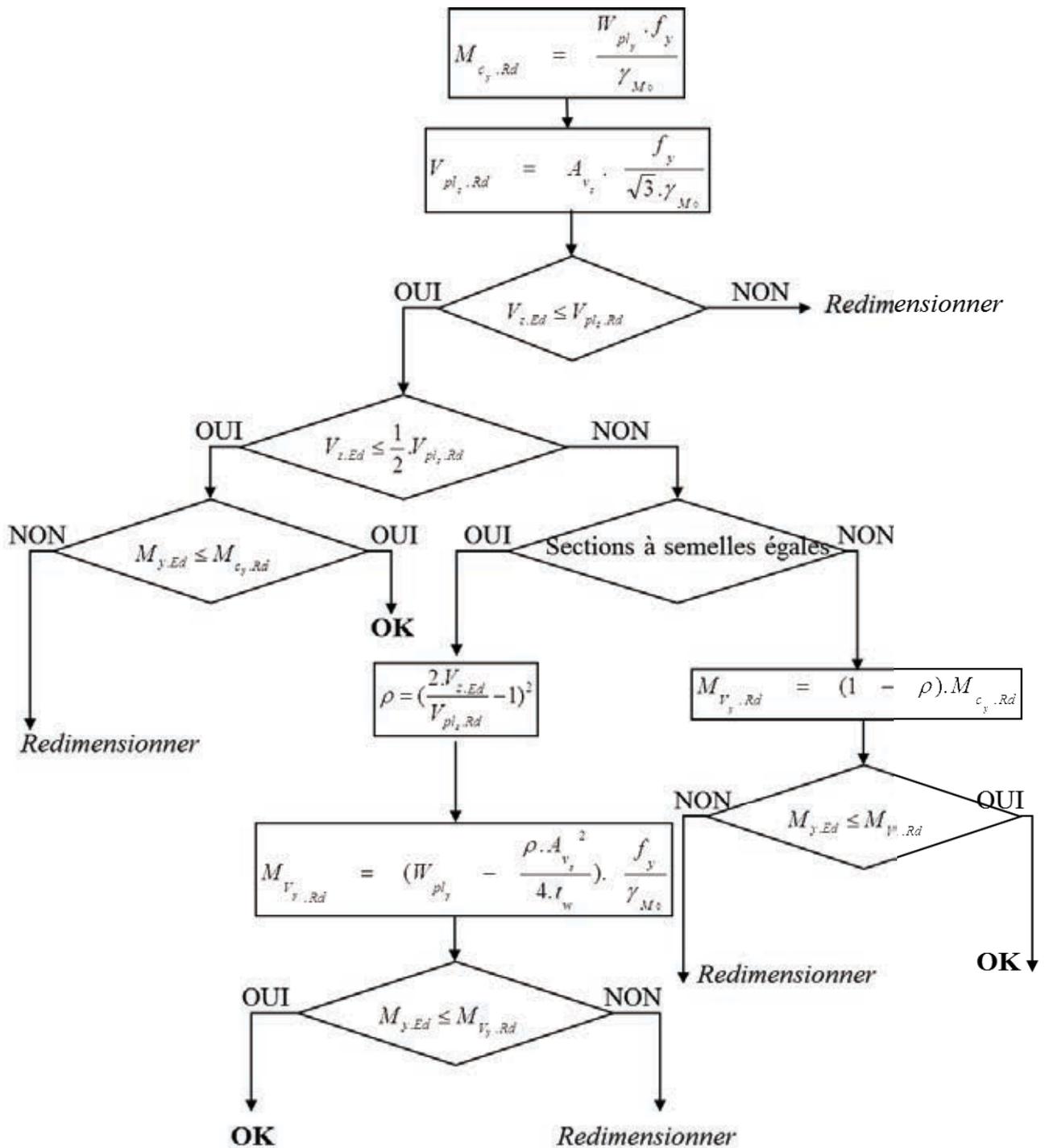
Qualité de base : S235JRH

SECTIONS CARRÉES FORMÉES À FROID

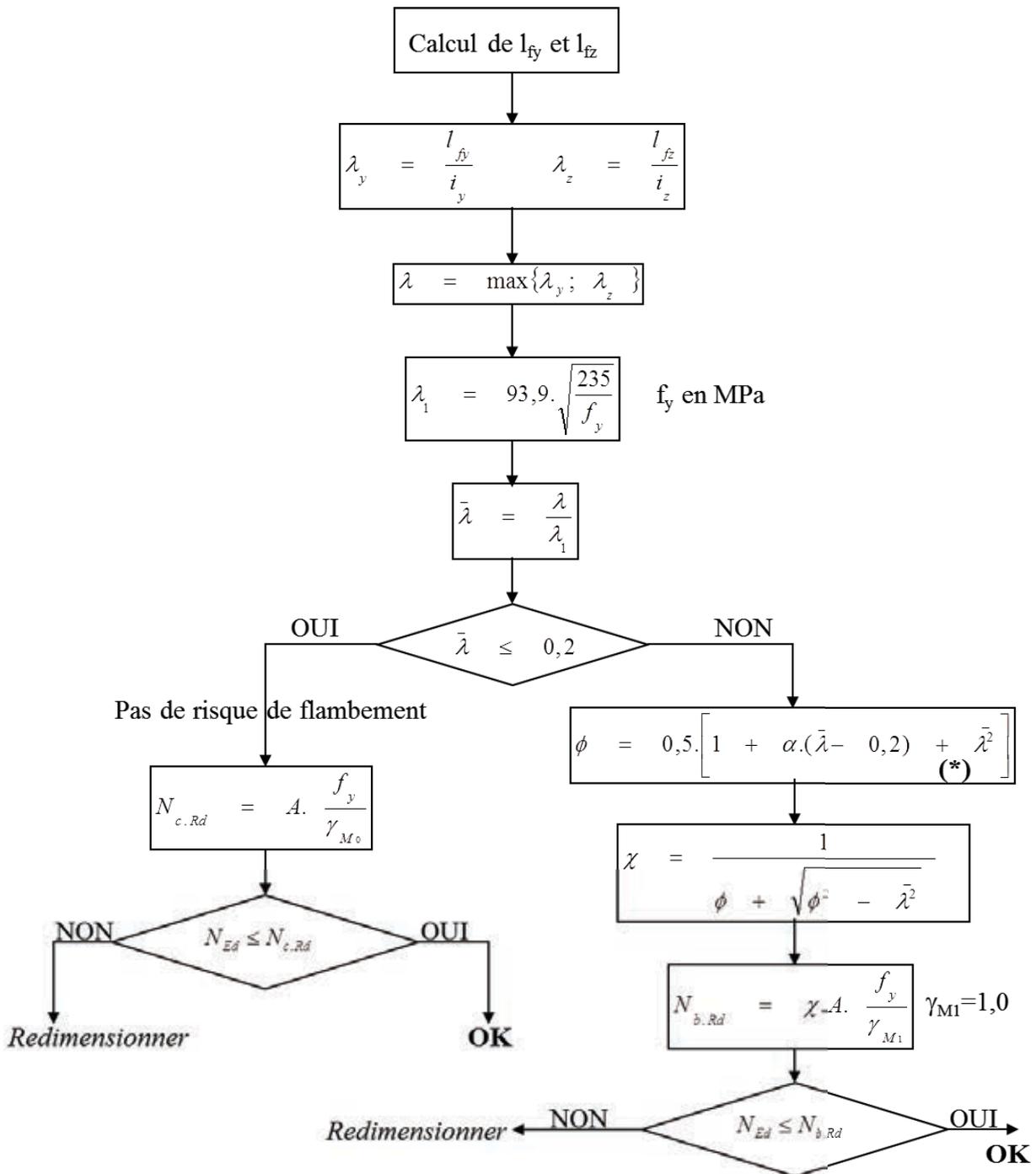
$i_z = i_y$

DIMENSION EXTÉRIEURE mm	ÉPAISSEUR mm	MASSE LINÉIQUE kg/m	AIRE DE SECTION TRANSVERSALE cm ²	MOMENT D'INERTIE DE FLEXION cm ⁴	RAYON DE GIRATION cm
140 x 140	5	20,69	26,36	790,52	5,48
	6	24,52	31,23	920,38	5,43
150 x 150	3	13,70	17,40	623	5,98
	4	18,01	22,95	807,78	5,93
	5	22,26	28,36	982,07	5,89
	6	26,40	33,63	1145,84	5,84
160 x 160	4	19,27	24,55	987,13	6,34
	5	23,83	30,36	1202,30	6,29
	6	28,28	36,03	1405,41	6,25
180 x 180	4	21,78	27,75	1421,69	7,16
	5	26,97	34,36	1736,79	7,11
	6	32,05	40,83	2036,42	7,06
	8	41,48	52,84	2545,74	6,94
200 x 200	4	24,29	30,95	1968,07	7,97
	5	30,11	38,36	2409,99	7,93
	6	35,82	45,63	2832,62	7,88
220 x 220	4	26,80	34,10	2639	8,79
250 x 250	4	30,60	38,90	3907	10,00
260 x 260	4	31,80	40,50	4406	10,40
	5	39,50	50,40	5422	10,40
300 x 300	5	45,80	58,40	8417	12,00
325 x 325	5	49,70	63,40	10757	13,00
	6	59,40	75,60	12748	13,00
	8	77,90	99,20	16427	12,90
	10	96,20	123,00	19966	12,80
400 x 400	8	96,70	123,00	31269	15,90

Annexe 13 - Organigramme de calcul d'éléments métalliques en flexion simple selon l'Eurocode 3, pour des sections de classe 1 et 2

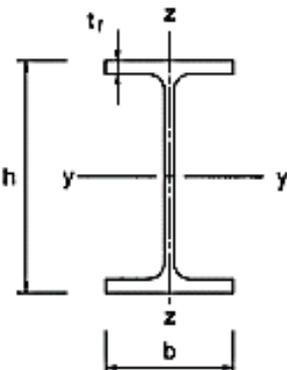
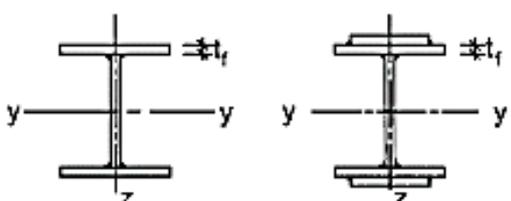
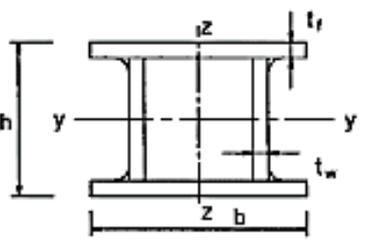


Annexe 14 - Organigramme de calcul d'éléments métalliques comprimés selon l'Eurocode 3, vérification au flambement



α désigne le facteur d'imperfection (fonction du type de profilé). Les tableaux permettant de déterminer α sont donnés ci-après.

Annexe 14 - Organigramme de calcul d'éléments métalliques comprimés selon l'Eurocode 3, vérification au flambement (voir le glossaire en annexe 15)

Section transversale		Limites	Flambement Selon l'axe	Courbe de flambement	
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
Sections en I laminées		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ mm $40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	a a ₀
				y-y z-z	b c
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ mm $t_f > 100$ mm	y-y z-z	b c
				y-y z-z	d c
Sections en I soudées		$t_f \leq 40$ mm $t_f > 40$ mm	y-y z-z	b c	
			y-y z-z	c d	
Sections creuses		Finies à chaud	Quelconque	a	a ₀
		Formées à froid	Quelconque	c	c
Sections en caisson soudées		En général (sauf comme indiqué ci-dessous)	Quelconque	b	b
		Soud. épaisses : $a > 0,5 t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Quelconque	c	c

Courbe de flambement	a ₀	a	b	c	d
Facteur d'imperfection α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Annexe 15 - Glossaire des abaques et organigrammes de l'Annexe 13 et de l'Annexe 14, notations et définitions de l'Eurocode 3

x-x	axe longitudinal d'une barre
y-y	axe de section transversale parallèle aux semelles
z-z	axe de section transversale perpendiculaire aux semelles
b	largeur d'une section
h	hauteur d'une section
d	hauteur de la partie droite d'une âme
t_w	épaisseur d'âme
t_f	épaisseur de semelle
r	rayon de congé
f_y	limite d'élasticité
f_u	résistance à la traction
γ_{M0}	coefficient partiel pour résistance des sections transversales, toute classe de section
γ_{M1}	coefficient partiel pour résistance des barres aux instabilités, évaluée par vérifications de barres
N_{Ed}	valeur de calcul de l'effort normal
V_{Ed}	valeur de calcul de l'effort tranchant
$M_{y,Ed}$	valeur de calcul du moment fléchissant par rapport à l'axe y – y
$M_{z,Ed}$	valeur de calcul du moment fléchissant par rapport à l'axe z - z
N_{Rd}	valeurs de calcul de résistances à l'effort normal
$M_{y,Rd}$	valeurs de calcul de résistances à la flexion par rapport à l'axe y - y
$M_{z,Rd}$	valeurs de calcul de résistances à la flexion par rapport à l'axe z – z
$N_{c,Rd}$	valeur de calcul de la résistance de la section transversale à la compression uniforme
$V_{c,Rd}$	valeur de calcul de la résistance au cisaillement
$M_{c,Rd}$	valeur de calcul de la résistance à la flexion par rapport à un axe principal de la section
$V_{pl,Rd}$	valeur de calcul de la résistance plastique au cisaillement
W_{pl}	module plastique de section
A_v	aire de cisaillement
η	coefficient pour l'aire de cisaillement
A	aire de la section
ρ	coefficient de réduction pour déterminer les valeurs de calcul des résistances à la flexion réduites par la présence d'efforts tranchants
$M_{V,Rd}$	valeurs de calcul de résistances à la flexion réduites par la présence d'efforts tranchants
l_{fx}	longueur de flambement selon l'axe x
l_{fy}	longueur de flambement selon l'axe y
i	rayon de giration par rapport à l'axe approprié, déterminé en utilisant les propriétés de section transversale brute
$\bar{\lambda}$	élancement réduit
λ_1	valeur d'élancement pour déterminer l'élancement réduit
$N_{b,Rd}$	valeur de calcul de la résistance de la barre comprimée au flambement
c	coefficient de réduction pour le mode de flambement approprié
Φ	valeur pour déterminer le coefficient de réduction c
a ₀ , a, b, c, d	dénominations de courbes de flambement
N_{cr}	effort normal critique de flambement élastique pour le mode de flambement approprié, basé sur les propriétés de section transversale brute

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

Annexe 16 - Document réponse DR1 – Courbes granulométriques des granulates à tracer

