



MINISTÈRE  
DE L'ÉDUCATION  
NATIONALE

EDE ARC 2

SESSION 2018

**CAPET  
CONCOURS EXTERNE  
ET CAFEP CORRESPONDANT**

**Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR**

**Option : 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 ouvrage de référence, de tout dictionnaire et de tout autre matériel électronique est rigoureusement interdit.*

*Dans le cas où un(e) candidat(e) repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il (elle) le signale très lisiblement sur sa copie, propose la correction et poursuit l'épreuve en conséquence.*

*De même, si cela conduisait à formuler une ou plusieurs hypothèses, il est alors demandé de la (ou les) mentionner explicitement.*

**NB : La copie que vous rendrez ne devra, conformément au principe d'anonymat, comporter aucun signe distinctif, tel que nom, signature, origine, etc. Si le travail qui vous est demandé comporte notamment la rédaction d'un projet ou d'une note, vous devrez impérativement vous abstenir de signer ou de l'identifier.**

Tournez la page S.V.P.

A

## SOMMAIRE

<b>Présentation :</b>	<b>Page</b>
Information aux candidats et sommaire du sujet	02
Éléments de contexte	03
<b>Questionnaire :</b>	
Étude 1 : Partenariats - Intégration urbaine.	04
Étude 2 : Le matériau « béton » utilisé pour la pile centrale	05
Étude 3 : Études préparatoires au choix structurel du pont	07
Étude 4 : Étude acoustique	10
Étude 5 : Étude géotechnique - Terrassements	11
Étude 6 : Environnement numérique collaboratif	13
<b>Documents techniques :</b>	
DT1 : Extraits du dossier de plans de l'ouvrage	15
DT2 : Données du mémoire technique	16
DT3 : Charges de type tramways	16
DT4 : Préparation de chantier ; terrassements	17
DT5 : Données géotechniques	19
<b>Annexes :</b>	
Annexe 1 : Bétons	21
Annexe 2 : Acoustique	23
Annexe 3 : Formulaire RDM	25
Annexe 4 : Géotechnique - Mécanique des sols	26
Annexe 5 : Environnement numérique collaboratif - BIM	28
<b>Documents réponses :</b>	
DR 1 : Questions Q1 ; Q10 ; Q 11 ;	30
DR 2 : Questions Q13 ; Q14	31
DR 3 : Question Q15 ; Q16	32
DR 4 : Question Q19	33
DR 5 : Question Q20	34
DR 6 : Question Q32	35

***Nota : Les différentes études de ce questionnaire sont totalement indépendantes les unes des autres et peuvent être traitées dans un ordre quelconque choisi par le(la) candidat(e). Tous les documents réponse, y compris ceux non renseignés, sont à remettre en fin d'épreuve. Les compléments sur copie doivent être référencés au numéro de question.***

## 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 externe du CAPET de l'enseignement public :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDE	1411E	102	7048

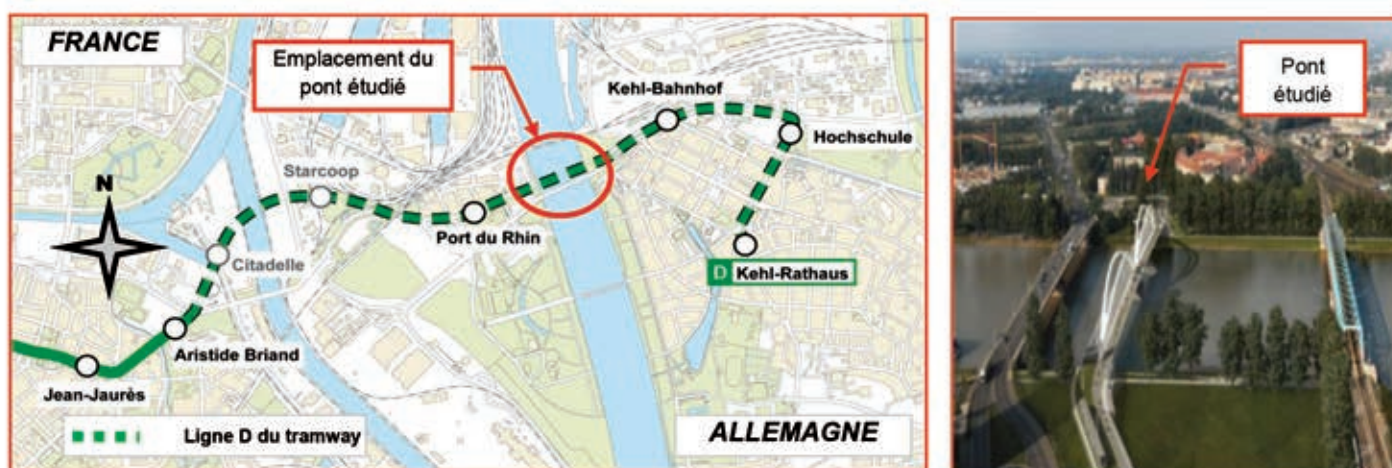
► **Concours externe du CAFEP/CAPET de l'enseignement privé :**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EDF	1411E	102	7048

## Présentation du support d'études : Pont sur le Rhin

### ÉLÉMENTS DE CONTEXTE :

Avec une offre de service de transport public s'étendant sur l'ensemble de l'Eurométropole, la CTS (compagnie des transports strasbourgeois) entend poursuivre son développement au service des usagers. L'un des axes de croissance passe par la (re)création d'une ligne continue de tramway entre Strasbourg et Kehl, la ville-frontière allemande. Sa construction nécessite la réalisation d'un ouvrage d'art de franchissement du Rhin à hauteur de Strasbourg. Ce pont sur le Rhin est le **support de l'étude** proposée pour cette épreuve.



Source autorisée par CTS Compagnie des transports strasbourgeois.

### Contraintes principales :

Cette opération s'inscrit dans le cadre du réseau de tramway strasbourgeois vers le quartier du Port du Rhin et la ville de Kehl, en Allemagne. L'extension de la ligne D comprend un tronçon d'environ 1950 m sur le territoire de la ville de Strasbourg et un tronçon de 800 m sur celui de Kehl. L'ouvrage de franchissement du Rhin à réaliser est situé entre deux ouvrages très proches existants : un pont routier en amont et un pont ferroviaire en aval.

Hors études de conception et d'équipements du tablier, un délai de 18 mois est imposé pour les travaux de réalisation de l'ouvrage lui-même. La distance à franchir est au minimum de 240 mètres à cet endroit. Un appui au maximum dans le Rhin est autorisé et ce, dans l'alignement des piles centrales des ponts à proximité (ferrovière en aval et routier en amont). Le tablier doit recevoir une "plateforme" tram de 8,10 m de largeur suivant la position des poteaux caténaires. Des emprises sont clairement délimitées pour les installations de chantier.



Source autorisée par Architecte Marc BARANI Crédit photomontages: © Cyrille THOMAS-Architecte Marc BARANI.

# Étude 1 - PARTENARIATS - INTÉGRATION URBAINE.

**Objectif :** Expliquer et justifier certains choix conceptuels du projet, ainsi que son impact sociétal.

## A/ Partenariats

### Question 01 : Acteurs de la construction

Dans le cadre du développement des partenariats école/entreprises et plus spécifiquement de l'éducation à l'orientation, certains professionnels ayant œuvré au projet sont amenés à évoquer devant les élèves la nature de leur travail.

⇒⇒⇒ En prenant une posture d'acteur du projet et en se présentant devant une classe d'élèves, donner le nom de son métier et sa période d'intervention (voir extrait du planning prévisionnel ci-dessous). La réponse doit porter sur trois métiers différents appartenant pour le 1<sup>er</sup> à la maîtrise d'œuvre, le 2<sup>ème</sup> à la maîtrise d'ouvrage et le 3<sup>ème</sup> à l'entreprise. Remplir **Q1 document réponse 1**

Charpente métallique <small>(source Entreprise Victor Buyck)</small>			Génie civil <small>(source Entreprise Bouygues construction)</small>		
2013	09 <sub>13</sub> > 05 <sub>14</sub>	Études	2012	09 <sub>12</sub> > 12 <sub>15</sub>	Études
2014	06 <sub>2014</sub>	Commande des tôles	2014	06 <sub>14</sub> > 01 <sub>15</sub>	Préchargement
	09 <sub>14</sub> > 05 <sub>15</sub>	Fabrication en atelier		06 <sub>14</sub> > 04 <sub>15</sub>	Pile P2
2015	04 <sub>2015</sub>	T & D du tablier côté <b>D</b>	2015	29 06 2014	Battage batardeau de la pile P2
	28 04 2015	Arrivée du tablier coté <b>D</b> .		29 10 2014	Bétonnage bouchon immergé
	30 04 2015	Déchargement du tablier		10 <sub>14</sub> > 02 <sub>15</sub>	Appuis coté France
	07 <sub>2015</sub>	Transport & Déchargement du tablier coté France		01 <sub>15</sub> > 04 <sub>15</sub>	Appuis coté Allemagne
2016	11 <sub>2015</sub>	Pose sur appuis	2016	11 03 2015	Bétonnage de la 2 <sup>ème</sup> élévation du fût de la pile P2
				04 <sub>15</sub> > 08 <sub>15</sub>	Escalier coté France
				06 <sub>15</sub> > 10 <sub>15</sub>	Escalier coté Allemagne
2017	09 <sub>15</sub> > 12 <sub>15</sub>	Équipements sur ouvrage	2017	01 <sub>16</sub> > 03 <sub>16</sub>	Voie ferrée
				04 <sub>2017</sub>	Réception des travaux

*Extrait du planning prévisionnel de certains phasages de travaux.*

## B/ Intégration urbaine du projet. Les transports dans la ville.

### Question 02 : Connaissance des contraintes de la ville

Le tramway -tramway sur rails- implanté dans l'Eurométropole a représenté le pari d'un mode de transport en commun: c'est un projet d'urbanisme qui a depuis été considéré comme un modèle du genre par bien d'autres agglomérations.

Inaugurée en 1994, la première ligne a concrétisé une pratique qui s'est poursuivie depuis [.../...]. Le principe adopté a été de réserver l'espace du centre-ville aux transports en commun, aux piétons et cyclistes, à la desserte et aux livraisons. Sur le reste du parcours, les trams circulent sur des voies en site propre et bénéficient d'une priorité sur la circulation automobile.../...

Tout l'hyper-centre [.../...] est un immense secteur où les piétons, les cyclistes et le tram se partagent l'espace. De 2009 à 2014, la fréquentation du réseau de transports en commun de l'Eurométropole a augmenté de 25%. [.../...]

Alors que les travaux d'extension vers Illkirch-Graffenstaden s'achèvent et que ceux menés vers Kehl vont bon train, 2 projets du même type seront lancés vers le nord et l'ouest. [.../...] Nous espérons 7000 voyageurs supplémentaires par jour, soit une augmentation de 15 % par rapport à la fréquentation actuelle" [.../...] Le principe global du schéma directeur des transports, c'est la pertinence des modes. Il faut travailler sur des offres qui correspondent aux densités des différents territoires.

« Transports : un réseau intermodal ; Le pari réussi du tramway » in : "Strasbourg Eurométropole le mag'" n°6 - 2016.

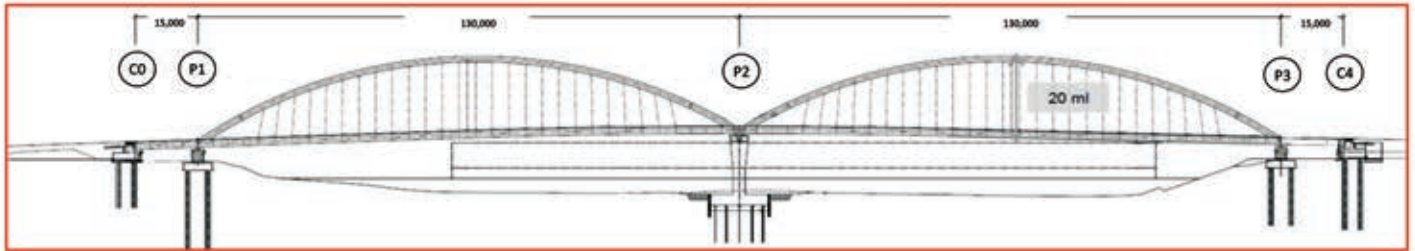
Dans un autre article, il est écrit :

Par ailleurs, on estime à 35000 le nombre de passages de véhicules à moteur franchissant quotidiennement le pont de l'Europe (actuellement unique pont routier sur le Rhin à Strasbourg).

⇒⇒⇒ Argumenter très brièvement en quelques lignes l'extension du tram vers l'Allemagne et en corollaire, la construction du pont franchissant le Rhin.

**Question 03 : Les constructions dans l'environnement urbain.**

L'une des solutions assurant la continuité à niveau des voies du tramway eût été d'effectuer des remblais jusqu'aux berges. Pourtant, on remarque sur les deux rives la présence des piles P1 et P3 allongeant l'ouvrage et par conséquence augmentant les coûts..



Coupe longitudinale du pont.

⇒⇒⇒ Donner la (l'une des) raison(s) possible(s) ayant conduit les concepteurs à positionner les culées C0 et C4 en retrait des berges des rives du Rhin.

**Question 04 : Intégration urbaine**

⇒⇒⇒ Conclure sur l'intégration urbaine de ce projet de franchissement.

**Étude 2 - LE MATÉRIAU BÉTON UTILISÉ POUR LA PILE CENTRALE**

**Objectif :** Valider la conformité du béton choisi aux exigences de résistance mécanique en compression ; Anticiper les conditions climatiques de mise en œuvre lors du coulage de la **pile P2**

**Question 05 : Masse volumique du béton**

Dans le « Rapport de convenance » rédigé par un laboratoire agréé pour les contrôles de béton, les essais sur béton frais ainsi que la formulation du béton issue des caractéristiques des matériaux le composant donne les résultats suivants pour 1 m<sup>3</sup> de béton mis en place.

Matériau	0/4 R d <sub>abs</sub> : 2,65	4/16R d <sub>abs</sub> : 2,63	16/22,4R d <sub>abs</sub> : 2,64	CEM III/A 52,5 L CE. d <sub>abs</sub> : 2,96	Filler	Viscrete Tempo11	Eau
Origine	GSM La Wantzenau	GSM Gambshheim	GSM La Wantzenau	CALCIA Rombas		SIKA	Puits
Quantité (kg)	<b>735</b>	<b>400</b>	<b>660</b>	<b>350</b>	<b>0</b>	<b>1,40</b>	<b>181</b>
<b>Produit attendu</b>	<b>BPS NF EN 206-1 C30/37 XF1 D<sub>max</sub> 22,4 Cl<sub>0,65</sub> S (150 ± 30)</b>						

Tableau de composition du béton de structure de la pile centrale.

Affaissement au cône d'Abrams à t60 min	Validée en S4
Masse volumique réelle mesurée en kg/m <sup>3</sup>	<b>2368</b>

Tableau des résultats d'essais sur béton frais.

⇒⇒⇒ Calculer la masse volumique théorique du béton frais. La formulation pondérale peut-elle être validée par rapport à la masse volumique réelle mesurée ?

**NB :** Pour valider la formulation, l'écart entre les MV théorique et réelle ne doit pas excéder 2,5%.

Tournez la page S.V.P.

### Question 06 : Résistance caractéristique du béton

Dans le cas de ce pont, ce sont les exigences du « fascicule 65 » et du « Livret 2.21 (IN0034) du CPC de la SNCF » qui doivent être satisfaites.

Tableau de vérification des résistances moyennes du béton $f_{CE}$				
Selon Livret 2.21 (IN0034)		$f_{CE} \geq 1,1 f_{C28}$		$f_{CE} \geq f_{C28} + 0,8 * (C_E - C_{min})$
Selon Fascicule 65.		$f_{CE} \geq f_{C28} + 2S$		$f_{CE} \geq f_{C28} + \lambda * (C_E - C_{min})$
$f_{CE}$	Moyenne des résistances à la compression à 28 jours			
$f_{C28}$	Résistance caractéristique spécifiée			
$C_E$	Résistance à la compression à 28 jours du ciment utilisé			
$\lambda$	Coefficient majorateur	$\lambda = 1$	S	Nombre lié aux écarts-type <b>S = 3 MPa</b>

*Extraits des normes de calculs des résistances du béton en compression et paramètres de calculs.*

N° de gâchée		1	2	3	Moyenne
Résistance (en MPa) à la compression	à 7 jours	35,4	33,9	34,8	34,7
	à 28 jours	42,6	44,6	42,1	$f_{CE} = 43,1$

*Tableau des valeurs de résistance du béton utilisé.*

Résistance caractéristique du ciment utilisé CEM III 52,5 L CE (en MPa) à 28 jours	$C_E$	59,6
Résistance minimale garantie du ciment utilisé CEM III 52,5 L CE (en MPa) à 28 j	$C_{min}$	52

*Tableau des valeurs de résistance du ciment utilisé.*

⇒⇒⇒ Valider la conformité du béton aux exigences de résistance mécanique en compression en fonction des valeurs d'essais obtenues dans les tableaux correspondants.

### Question 07 : Élévation de température dans le béton

L'épaisseur de la pile centrale est telle qu'il est nécessaire d'évaluer la température maximale atteinte au cœur de l'ouvrage au risque d'entraîner une réaction sulfatique interne.

Paramètres de calcul			Valeur	Unité
Résistance du ciment en Compression	Rc 2	2 jours	20	MPa
	Rc 28	28 jours	63	MPa
Dégagement de chaleur du ciment à 41 heures	Q41	À l'infini	289	J * g <sup>-1</sup>
Dosage en ciment selon formulation	C	-	À définir	Kg * m <sup>-3</sup>
Rapport Eau efficace sur ciment	Eeff/C	-	À définir	-
Masse volumique du béton frais	Mv BF	-	À définir	Kg * m <sup>-3</sup>
Épaisseur de la pièce dans sa plus petite dimension	EP	-	3	m

*Paramètres de calculs issus de la fiche technique du ciment utilisé.*

⇒⇒⇒ Selon le guide de calcul, estimer l'élévation de température  $\Delta T_{adia}$  (en degré) à l'intérieur de l'ouvrage lors du coulage, puis  $\Delta T$  (en degré) après la prise en compte des déperditions thermiques

### Question 08 : Niveau de prévention lors du coulage du béton

⇒⇒⇒ Estimer le niveau de prévention à atteindre pour garantir l'absence d'une réaction sulfatique interne et, au moment du coulage de la pile P2, en déduire la température du béton frais à ne pas dépasser pour rester conforme au niveau de prévention à atteindre.

### Question 09 : Validité du choix du béton

⇒⇒⇒ Au regard des précautions particulières de sa mise en œuvre, le choix du béton retenu pour la pile P2 est-il pertinent ? Conclure sur la validité du béton choisi pour la réalisation de la pile P2.

## Étude 3 - ÉTUDES PRÉPARATOIRES AU CHOIX DU PONT

**Objectif :** Vérifier sur le plan mécanique les choix architecturaux et structurels du pont.

Le questionnaire proposé dans ce thème suit la chronologie des actions à mener par le bureau d'études "structure" associé au projet, le tout en lien avec l'architecte.

### A/ Études préparatoires aux choix architectural et structurel du pont ; 1<sup>ère</sup> approche: Taux de charges et cas de charges

Afin de connaître les ordres de grandeur de la géométrie de la structure, une étude simplifiée permet d'alimenter la réflexion des concepteurs.

#### Question 10 : Types de ponts

⇒⇒⇒ En imaginant une portée unique de 260 m environ pour le besoin de franchissement du Rhin, donner le nom, les matériaux utilisés et le schéma du plan longitudinal moyen de deux différents types de ponts -autres que le bow-string- susceptibles de répondre à ce seul critère. Utiliser pour la réponse Q10 document réponse 1

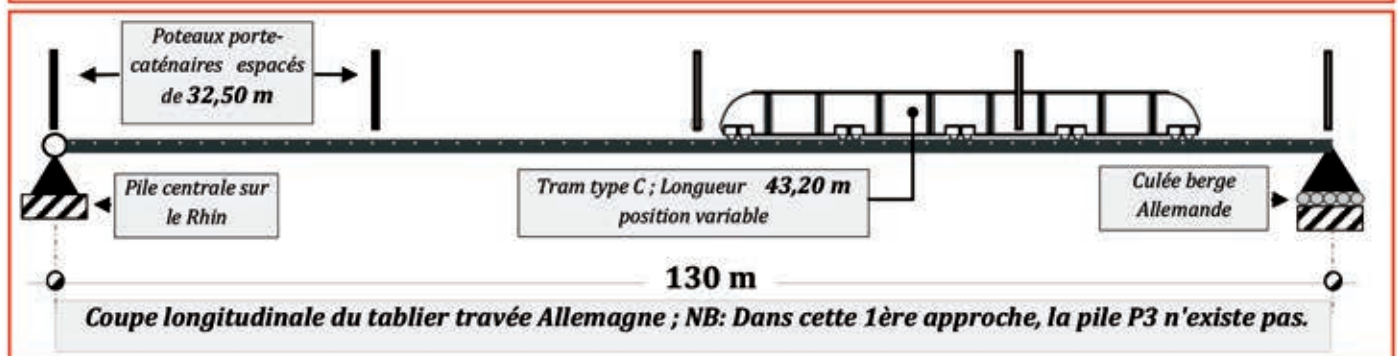
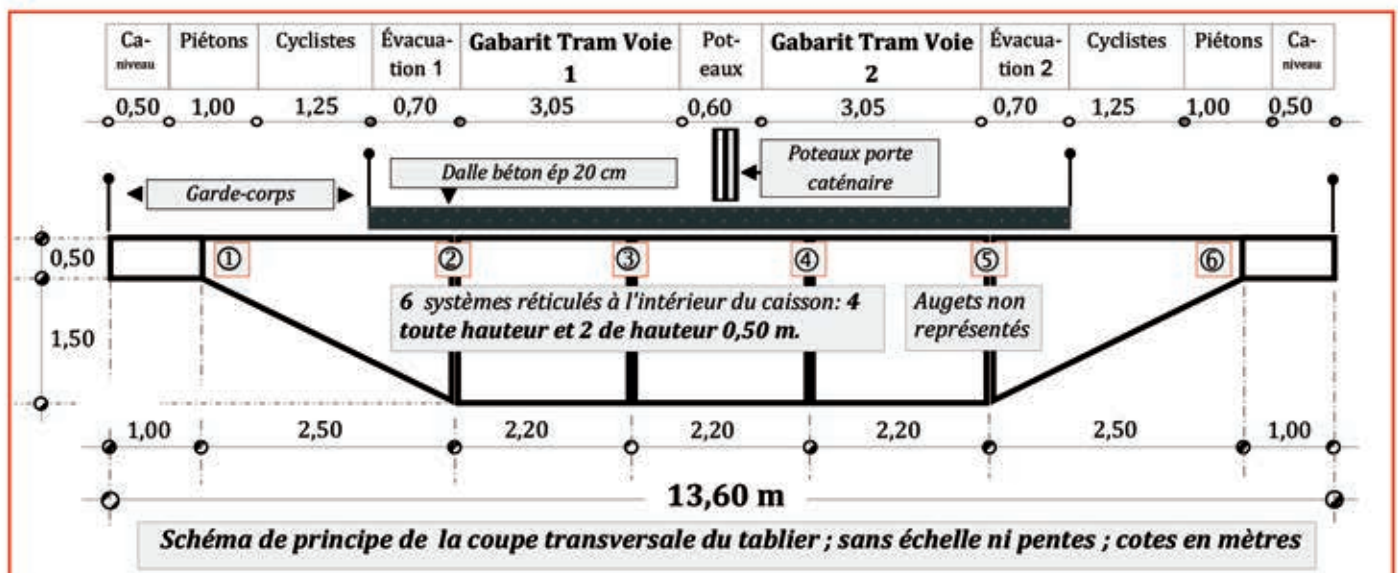
#### Question 11 : Choix des matériaux de structure du tablier

Dans un 1<sup>er</sup> temps, l'architecte sollicite l'avis des ingénieurs "structure" à propos de la solution "pont à poutre-caisson" métallique sur 3 appuis, à savoir 2 culées et une pile centrale.

⇒⇒⇒ Donner la raison principale conduisant les auteurs de l'étude à écarter -a priori- la solution "tout béton" pour la structure du tablier. Renseigner Q11 document réponse 1

#### Question 12 : Calcul de taux de charges

Pour valider -ou non- cette architecture, les ingénieurs travailleront à partir d'un modèle "simplifié" de pont dans lequel seront admises les symétries du tablier et des travées. Des calculs simples et approchés pourront ainsi être menés indifféremment sur l'une ou l'autre des travées.



Schémas de principe des coupes du tablier -- Les cotes expriment les entraxes et non les valeurs hors-tout.



La géométrie **prévisionnelle** symétrique de la coupe transversale du tablier est donnée sur le schéma page 7. On note que sur la totalité de l'emprise de la plateforme tram se trouve une dalle indépendante de béton d'épaisseur 20 cm et de largeur 8,10 m.

Celle concernant la coupe longitudinale du demi tablier est également donnée page 7. On admet pour cette 1<sup>ère</sup> approche que la portée de la "poutre-caisson" formant le tablier du pont est de 130 m. (NB: Dans cette 1<sup>ère</sup> approche, la pile P3 "n'existe pas". Les remblais sont prévus jusqu'aux berges)

L'appui sur la pile centrale est de type **articulé** alors que celui sur la culée est de type appui **simple**. Il autorise donc les déplacements et déformations longitudinaux.

Les premiers calculs effectués par le bureau d'études sont établis à partir des données suivantes:

- La dalle de béton recouvrant la plateforme tram a une épaisseur de **20 cm** ;
- Les poids volumiques béton et acier sont  $\gamma_{\text{béton}} = 25 \text{ kN/m}^3$  ;  $\gamma_{\text{acier}} = 78 \text{ kN/m}^3$
- Le poids linéique des caténaires est de  $p_{\text{cat}} = 0,05 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$  ;
- Le poids des poteaux porte caténaires est de  $P_{\text{pot}} = 1,56 \text{ kN}$  ;
- Le poids linéique des garde-corps -tous types- est de  $p_{\text{gc}} = 0,37 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$  ;
- Le poids linéique du caisson métallique est de  $p_{\text{mét}} = 54,6 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ .

⇒⇒⇒ Évaluer les **charges ponctuelles et linéiques permanentes** sur la structure de la travée allemande du "tablier du pont". En déduire le modèle mécanique précis correspondant.

**Question 13 : Schématisation de modèles mécaniques**

⇒⇒⇒ Compléter sur **Q13 Document réponse 2**, les schémas des modèles mécaniques de la travée allemande du tablier correspondants aux 2 cas de **charges d'exploitation** définis ci-après : La travée étant chargée par **2 tramways de 43,20 m de longueur** T① et T②.

Le cas N°1 est le plus "contraignant" (au sens des contraintes générées par la sollicitation de flexion); Le cas N°2 est le moins "contraignant". Préciser la position des 2 tramways.

**Question 14 : Calcul de moment fléchissant**

Un autre cas de charges d'exploitation est retenu sur la **travée** :

- Sur la voie 1, un tramway T① en panne est remorqué par un 2<sup>ème</sup> tramway T② ;
- Sur la voie 2, un 3<sup>ème</sup> tramway T③ circule normalement ;
- Les 3 tramways T①, T②, T③ sont positionnés au plus défavorable de la flexion.

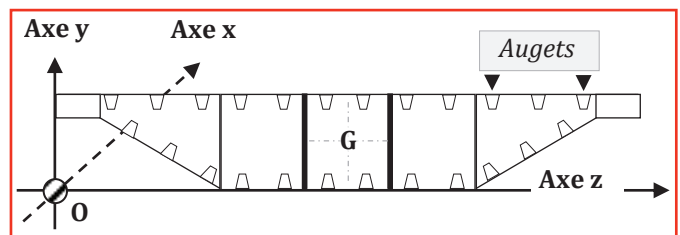
⇒⇒⇒ Sur **Q14 Document réponse 2**, préciser et justifier la position des 3 tramways sur la travée. et en déduire directement la valeur du moment fléchissant  $M_{f_{\text{maxi}}}$  à mi-travée avec l'hypothèse d'une charge répartie unique (poids propre et exploitation) pondérée  $p = 150 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ .

**B/ Études préparatoires aux choix architectural et structurel du pont :  
1<sup>ère</sup> approche : Caractéristiques géométriques des sections et flèches.**

**Question 15 : Recherche de Centre de Gravité.**

⇒⇒⇒ Compléter **Q15 document réponse 3** pour établir la position en z et y du centre de gravité G de la section du caisson métallique.

On considère que toutes les enveloppes métalliques extérieures sont **sans épaisseur** et que la dalle béton a un impact négligeable au vu de celui du caisson métallique.



Position de l'origine O et axes du repère (x,y,z). Le plan (z,y) porte la section transversale. La travée est portée par l'axe x. NB: Les cotations sont données en question 12.

**Question 16 : Recherche de  $I_{Gz}$**

⇒⇒⇒ Compléter sur **Q16 document réponse 3**, le calcul du moment quadratique  $I_{Gz}$  de la section du caisson par rapport à l'axe Gz. NB: La dalle béton n'est pas intégrée à cette étude.

Pour le calcul du moment quadratique de la section du caisson métallique développé lors de cette pré-étude, sont à prendre les données complémentaires suivantes :

- Le centre de gravité de la section -y compris les poutres treillis et augets- par rapport au repère donné précédemment est évalué à  $z_g = 6,80 \text{ m}$  et  $y_g = 1,15 \text{ m}$  ;
- Des calculs préalables indiquent que l'apport en moment quadratique des poutres treillis et augets est estimé à  $0,1225 \text{ m}^4$ , celui de chaque tôle inclinée étant de  $0,007 \text{ m}^4$ .
- L'épaisseur des tôles est de  $12 \text{ mm}$ .

### Question 17 : Calcul de flèche

Par souci de simplification, on considère que :

- ① les charges **permanentes** ponctuelles et réparties sont rapportées à **une charge répartie** sur toute la travée ;
- ② les charges **d'exploitation** dues aux tramways T① et T② sont rapportées à **une charge répartie** sur toute la travée d'une voie lorsque le tram T① est remorqué derrière le tram T② ;
- ③ les charges **d'exploitation** due au tramway T③ sont rapportées ponctuelle sur la 2ème voie.

Les valeurs à prendre en compte sont : Charge ponctuelle du tramway T③ :  $P_{exp} : 1150 \text{ kN}$ .

Charge répartie dues aux tramways T① et T② :  $p_{exp} : 18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$  ;

Charge répartie permanente due au caisson  $p_{per} : 100 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$  ;

L'acier utilisé pour les caissons est de type **E 235** ; son module E est égal à **210000 MPa**.

Le moment quadratique du caisson par rapport à l'axe Gz est évalué à  $0,37 \text{ m}^4$  ;

⇒⇒⇒ Calculer la **flèche maximale** induite par les charges (**non pondérées**) permanentes et d'exploitation dans le cas de charges où 3 tramways sont placés au plus contraignant.

## C/ Études préparatoires complémentaires au choix structural du pont : 2<sup>ème</sup> approche: Calculs avec présence d'un appui complémentaire.

La flèche calculée précédemment, très largement supérieure aux attentes, nécessite un autre modèle (voir ci-dessous) **NB**: On rappelle que la pile intermédiaire et la culée sont considérées comme des appuis simples, alors que la pile centrale est considérée comme appui articulé.

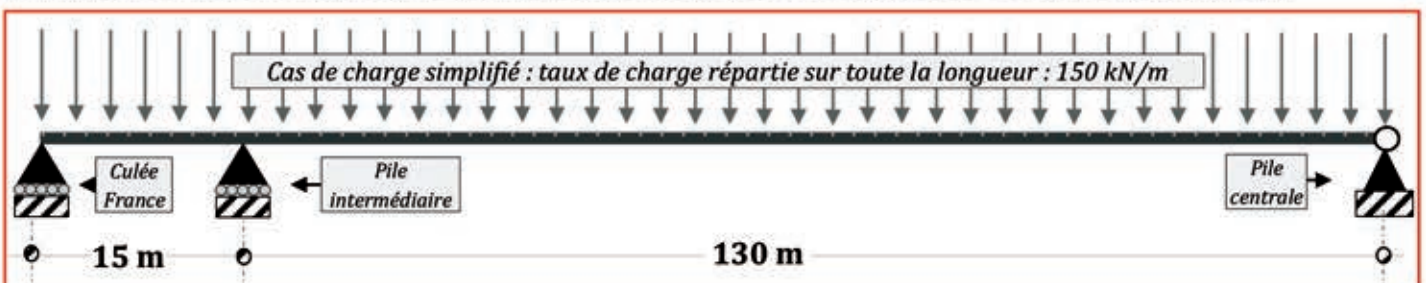


Schéma du modèle mécanique de la travée du tablier coté France à prendre en compte pour l'étude du § C de l'étude 3.

### Question 18 : Calcul d'actions d'appuis

⇒⇒⇒ Donner et justifier le degré d'hyperstaticité du système, puis calculer les actions mécaniques aux appuis.

### Question 19 : Graphe de courbes des éléments de cohésion

⇒⇒⇒ Établir et schématiser -sans calculs- sur Q19 Document réponse 4 la forme des courbes des efforts normal et tranchant dans le tablier des 2 travées du pont.

### Question 20 : Calcul et graphe de courbes de moment fléchissant

⇒⇒⇒ Établir sur Q20 Document réponse 5, le graphe du moment fléchissant et ce, **uniquement** entre les 2 piles P1-P2 coté France. Calculer la valeur du moment fléchissant maximum  $M_{f_{maxi}}$ .

### Question 21 : Réflexion autour de deux modèles technologiques

⇒⇒⇒ Comparer les valeurs des moments fléchissants obtenus aux questions 20 et 14. Conclure.

### Question 22 : Réflexion autour d'une amélioration technologique

⇒⇒⇒ À partir de ces 2 premières approches, les choix architecturaux et structuraux du pont sont-ils acceptables ? Si non, proposer en synthétisant une **autre solution** technique à étudier.

## Étude 4 - ÉTUDE ACOUSTIQUE

**Objectif :** Assurer le confort acoustique des riverains au regard des réglementations en vigueur, y compris lors de la phase travaux.

**Question 23 : Appareillage de mesure du niveau de pression acoustique.**

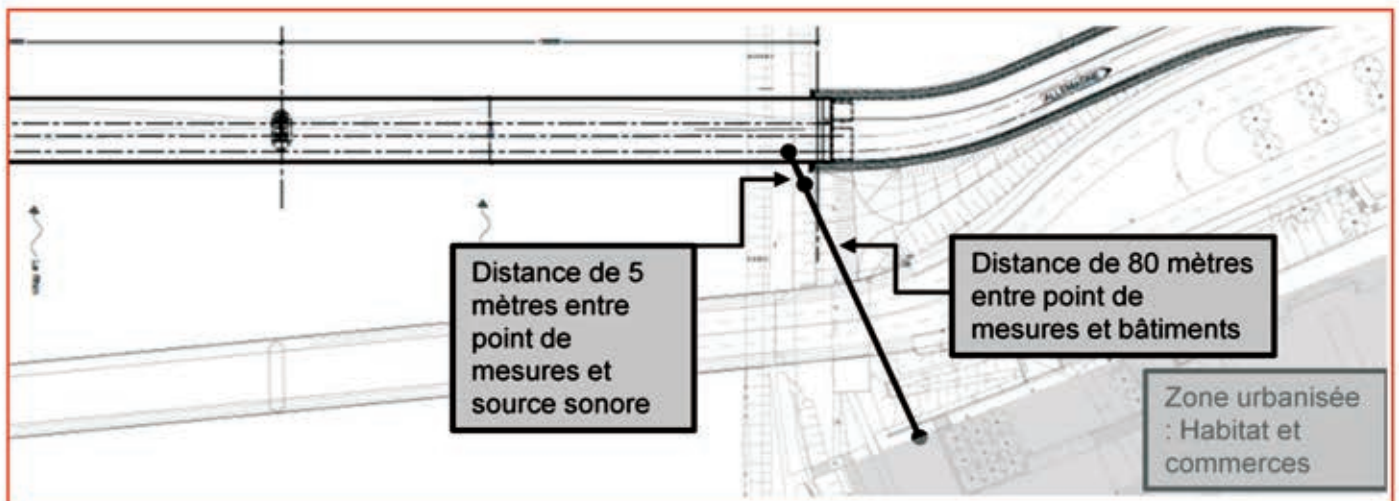
⇒⇒⇒ Nommer l'appareil permettant la mesure du niveau de pression acoustique.

**Question 24 : Niveau global de pression acoustique à 5 mètres de la source sonore.**

En prévision des études acoustiques, une campagne de mesures d'enregistrements sonores a été faite dans des conditions très similaires au projet : mêmes matériels, vitesse (40 km/h), type de plateforme (pavés de béton), charges, sans phénomènes de crissement et ce, à 5 mètres de la source sonore. (voir tableaux ci-dessous) :

Fréquence (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8 000
Lp par octave (dB)	73	75	79	84	85	79	72	63	60

*Tableau des valeurs mesurées en dB par octave à 5 mètres de la source sonore*



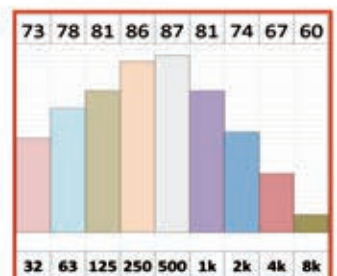
*Plan masse ; Schématisation des distances entre source sonore, point de mesures et bâtiments impactés.*

⇒⇒⇒ Calculer le niveau global de pression acoustique mesuré à 5 mètres de la source sonore.

**Question 25 : Niveau global de pression acoustique en dB en façade du bâtiment.**

Une autre campagne de mesures a été effectuée dans des conditions plus restrictives. Les valeurs des mesures sont dans ce tableau → C'est ce résultat du niveau global de pression acoustique à 5 mètres de la source soit **91 dB** qui sera retenu dans la suite des calculs.

NB : Pour traiter cette question, on admet que la source émettrice est en champ libre (pas d'obstacle entraînant une quelconque réflexion des ondes) et linéique du fait du mouvement du tram.



⇒⇒⇒ Calculer le niveau global de pression acoustique en dB en façade du bâtiment. En déduire l'atténuation acoustique.

**Question 26 : Niveau global de pression acoustique en dB(A).**

⇒⇒⇒ Calculer le niveau de pression acoustique en dB(A) à 5 mètres de la source. En déduire le niveau en dB(A) en façade du bâtiment.

**Question 27 : Niveau acoustique continu équivalent LAeq.**

En semaine, le trafic quotidien prévisionnel des passages de tramways est le suivant :

04-05h	05-06h	06-07h	07-08h	08-09h	09-10h	10-11h	11-12h	12-13h	13-14h
2	10	12	20	20	20	16	16	16	12
14-15h	15-16h	16-17h	17-18h	18-19h	19-20h	20-21h	21-22h	22-23h	23-24h
16	16	16	16	16	12	12	6	6	6

*Fréquence prévisionnelle des passages de tramways dans les 2 sens de circulation.*

**Nota :** Les données de calculs pour cette question sont les suivantes :

- Le temps à prendre en compte pour chaque passage est de **1 minute** ;
- Le niveau sonore en dB(A) occasionné pendant cette minute de passage est le même quelles que soient les conditions et vaut **L<sub>p</sub> = 70 dB(A)** en façade du bâtiment ;
- Le bâtiment est un bâtiment de logements en zone **modérée**.

⇒⇒⇒ *Calculer le niveau acoustique continu équivalent **L<sub>Aeq</sub>** (22h00 - 6h00), puis **L<sub>Aeq</sub>** (6h00-22h00) en façade du bâtiment.*

**Question 28 : Action(s) correctrice(s) sur niveaux L<sub>Aeq</sub> continus équivalents.**

Les calculs précédents établis à partir d'une vitesse de 40 km/m montrent qu'il faudrait des atténuations acoustiques de 2 dB(A) et 4 dB(A) pour respecter les contraintes réglementaires des If nuit et If jour. Une action sur la vitesse est envisagée.

⇒⇒⇒ *Calculer la vitesse maximale que doit avoir le tramway pour satisfaire la réglementation.*

**Question 29 : Autre action correctrice**

⇒⇒⇒ *Quelle autre action que celle d'agir sur la vitesse du tramway pourrait être envisagée. Quels en seraient les avantages?*

**Question 30 : Réflexion autour de l'amélioration du confort acoustique**

⇒⇒⇒ *Conclure sur les différentes possibilités pouvant être envisagées pour assurer le confort acoustique des riverains au regard des réglementations en vigueur*

## Étude 5 - ÉTUDE GÉOTECHNIQUE - TERRASSEMENTS

**Objectifs :** Assurer la pérennité des terrassements généraux liés à la rampe d'accès à l'ouvrage côté « Allemagne » et plus particulièrement au niveau de la culée C4. Optimiser la planification de la mise en œuvre des terrassements généraux et répondre à des enjeux environnementaux

### A/ Phasage des travaux de terrassement sur la zone de chantier n°3

**Question 31 : Phasage de travaux**

⇒⇒⇒ *Lister les principales phases des travaux de terrassement nécessaires à la réalisation de la rampe d'accès au pont côté « Allemagne ».*

⇒⇒⇒ *Indiquer en le justifiant la phase susceptible d'imposer un temps d'inactivité sur le planning.*

### B/ Contexte géologique au niveau de la zone de chantier n°3

**Question 32 : Schématisation de certaines coupes du terrain**

⇒⇒⇒ *Représenter sur Q32 document réponse 6 :*

- la coupe géologique localisée au niveau de la culée **C4** avant toute opération de terrassement ;
- la semelle et les pieux de **C4**, ainsi que le niveau de la nappe phréatique (noté **N.N.P.**) ;
- la base drainante mise en œuvre sur l'ensemble de la zone des remblais de la rampe d'accès au pont. Préciser son utilité.

## C/ Mouvement des terres – Remblais de préchargement

### Question 33 : Principe du préchargement

⇒⇒⇒ Décrire le principe et l'utilité de la technique du **préchargement**.

### Question 34 : Calcul de contrainte

On considère dans la **phase amont des travaux de remblaiement**, les données simplificatrices suivantes :

- le décapage de la terre végétale sur la zone de chantier n°3 est déjà réalisé ;
- la couche de terre végétale décapée n'a pas eu d'influence sur l'histoire géologique des couches inférieures du sol en place ;
- le sol en place est normalement consolidé ;
- le niveau **+138,500 NGF** est le niveau historique au-dessus duquel aucun chargement n'a pu interférer sur la consolidation des sols en place.

⇒⇒⇒ Calculer la contrainte moyenne  $\sigma_{v0}$  (en kPa) au milieu de la couche soumise aux tassements et apportée par le poids propre de cette couche durant son histoire géologique.

### Question 35 : Calcul de hauteur de remblai

On considère dans la **phase finale des opérations de terrassement** que les matériaux de préchargement excédentaires issus du site seront démontés.

⇒⇒⇒ Indiquer la hauteur  $H_R$  définitive des remblais prévus au-dessus de la couche drainante dans la configuration finale du chantier.

### Question 36 : Calcul de variation de contrainte

La hauteur des remblais à considérer (couche drainante non comprise) est **5,200 m**.

⇒⇒⇒ Calculer la variation de contrainte  $\Delta\sigma_F$  (en kPa), sur le sol en place au niveau **+138,500 NGF**, apportée par la composition du massif final (remblais et base drainante).

## D/ Estimation des tassements - Durée de la consolidation des sols en place

Pour traiter les questions suivantes et en tenant compte des hypothèses déjà émises, les calculs seront conduits à partir des données complémentaires tirées des résultats d'essais œdométriques pratiqués sur les matériaux de ce chantier.

**Données complémentaires issues de l'essai œdométrique réalisé sur la couche de sol soumise aux chargements :**

- Contrainte de consolidation :  $\sigma_c = 78 \text{ kPa}$   
**NB :** Les hypothèses précédentes liées au niveau de la nappe phréatique permettent de quantifier la valeur de  $\sigma_c$  comme étant équivalente à celle de  $\sigma_{v0}$
- Indice des vides :  $e_0 = 1,3$
- Indice de compression :  $C_c = 0,5$
- Coefficient de consolidation :  $C_v = 2,546 * 10^{-3} \text{ cm}^2 * \text{s}^{-1}$
- Estimations de la variation de contrainte  $\Delta\sigma_F$  apportée par les remblais définitifs et la base drainante sur la couche de sol sensible aux tassements :  $\Delta\sigma_F = 130,2 \text{ kPa}$

### Question 37 : Calcul de hauteur et de temps de tassement

⇒⇒⇒ Lors de la phase finale des travaux de terrassement, calculer le tassement  $\Delta h$ , en cm, de la couche de sol soumise aux chargements induits par la mise en œuvre des remblais définitifs et de la base drainante, puis calculer le temps nécessaire pour obtenir 100% de ce tassement.

### Question 38 : Influence des modes opératoires sur les délais

⇒⇒⇒ Conclure et justifier la solution constructive retenue (remblai de préchargement) pour permettre la réalisation des opérations de terrassement dans le délai initialement prévu.

## E/ Détermination de la hauteur du remblai de préchargement sur la zone de chantier n°3

Une étude géotechnique réalisée parallèlement montre que la couche de sol support de la rampe d'accès au pont sera stabilisée après un tassement global estimé de **56 cm**.

Il est précisé par ailleurs que le planning du chantier prévoit **une durée de 120 jours au maximum** pour permettre au sol support d'atteindre ce tassement global, tout en sachant que la durée estimée pour atteindre normalement ce tassement est supérieure à 2 ans.

### Question 39 : Calcul de facteur temps

⇒⇒⇒ *Calculer le facteur temps  $T_V$  correspondant à la nouvelle situation imposée par le planning du chantier. Indiquer le degré de consolidation verticale  $U_V(120 \text{ jours})$  correspondant et en déduire le tassement global ciblé ( $\Delta H$ , en cm) de la couche du sol support sous l'effet des remblais de préchargement.*

### Question 40 : Calcul de variation de contrainte

Il est toujours admis avec une bonne approximation que la distribution des contraintes apportée par la surcharge due aux remblais de préchargement est uniforme au sein de la couche de sol support.

Pour répondre à la problématique posée, on considère dans la suite que l'objectif d'atteindre un tassement final de 70 cm sous l'effet du préchargement est réaliste.

⇒⇒⇒ *Calculer, au niveau +138,500 NGF, la variation de contrainte ( $\Delta\sigma_{\text{Préch}}$  en kPa) qui permettrait d'aboutir à un tassement de 70 cm de la couche de sol support.*

*En déduire, d'une part, la **hauteur globale** des remblais de préchargement (y compris la couche des matériaux drainants) et d'autre part, la **hauteur  $H_{\text{Préch}}$**  correspondant au seul matériau de remblai issu du site. Préciser le niveau altimétrique que le géomètre devra vérifier en fin de montage des remblais de préchargement.*

### Question 41 : Calcul de déblais

En s'appuyant sur les résultats d'une étude géotechnique parallèle, le terrassier devra finalement régler l'altitude des remblais de préchargement à la cote + 147,600 NGF.

⇒⇒⇒ *Calculer l'épaisseur de matériaux excédentaires qu'il suffira d'éliminer une fois le tassement de 70 cm de la couche de sol support obtenu.*

### Question 42 : Réflexion autour de la pollution sonore générée par ce type de travaux.

⇒⇒⇒ *Expliciter comment les nuisances générées par l'apport et le retrait de matériaux excédentaires peuvent être justifiées auprès de la population.*

## Étude 6 - ENVIRONNEMENT NUMÉRIQUE COLLABORATIF - BIM

**Objectif :** *Identifier et adapter les nouveaux outils et modes de communication à la transition numérique émergente dans les projets de construction.*

## A/ Niveau de développement numérique et démarche collaborative

Il est important dans le cadre d'une démarche collaborative de pouvoir cibler le niveau d'information utile aux différents acteurs selon l'état d'avancement de la construction de l'ouvrage étudié.

### Question 43 : Détermination du type d'informations nécessaires selon l'avancement du projet.

Le groupement d'entreprises travaillant sur l'ouvrage utilise des modèles numériques contenant uniquement des volumes 3D sans attribut, contenant des objets non paramétriques et composés de fichiers ou entités 2D.

Tournez la page S.V.P.

Toutes les informations utiles à la construction sont disponibles durant la durée du chantier, sur demande, auprès des différents sous-traitants. Des informations complémentaires sur des supports de type différent (papier) peuvent également être communiquées.

⇒⇒⇒ *Indiquer les **niveaux de développement ND** de la maquette numérique nécessaires et directement exploités durant les opérations de construction en phase chantier.*

⇒⇒⇒ *Préciser si la démarche utilisée par le groupement d'entreprises peut être qualifiée de démarche collaborative numérique « BIM ». Justifier la réponse.*

⇒⇒⇒ *Au regard des pratiques pré-décrites du groupement d'entreprises, identifier le degré d'expérience BIM actuellement mis en œuvre.*

## **B/ Démarche de développement durable**

L'une des pistes de progrès observés grâce à l'approche numérique, telles la diminution de l'empreinte carbone ou encore l'optimisation des coûts est attachée au développement durable.

### **Question 44 : Démarche de développement durable**

⇒⇒⇒ *Expliquer en quoi une approche numérique pour la construction du pont peut conduire le projet dans le cadre d'une démarche de développement durable.*

## **C/ Avantages et limites de l'utilisation des outils numériques émergents**

Toutes les conceptions technologiques visant à améliorer la qualité de l'organisation du travail conduisent inmanquablement à imaginer de nouveaux outils, qu'il convient d'utiliser au mieux.

### **Question 45 : Réflexion autour des outils numériques**

⇒⇒⇒ *Indiquer en quoi l'utilisation émergente des outils numériques apporte une plus-value à l'acte de construire. Préciser les limites actuelles d'un tel déploiement.*

## **D/ Destination et degré de précision des données numériques**

Les informations numériques à communiquer doivent être adaptées aux besoins (études et/ou production) exprimés.

### **Question 46 : Types de données attributaires**

⇒⇒⇒ *Indiquer le nom de l'extension des fichiers numériques communément utilisés pour partager des données au sein d'une maquette numérique.*

*Pour chaque bureau d'études précité, indiquer au moins 3 types de données attributaires pertinentes pouvant être introduites et partagées dans le cadre d'une modélisation numérique commune du projet.*

*Préciser si le niveau de fiabilité des informations partagées entre utilisateurs de logiciels différents est assuré à 100%. Argumenter la réponse*

Pour cette question, le regard portera uniquement sur les intervenants des B.E.T. suivants :

**Béton Armé ; Charpente Métallique ; Acoustique ; Géotechnique.**

Soit les 4 spécialités visées dans les parties n°2 à n°5 du présent sujet.

### **Question 47 : Niveau de développement**

⇒⇒⇒ *Identifier le niveau de développement minimum (ND) d'une maquette numérique le mieux adapté (ou tout au moins le plus souhaitable) pour chacun des acteurs ci-après :*

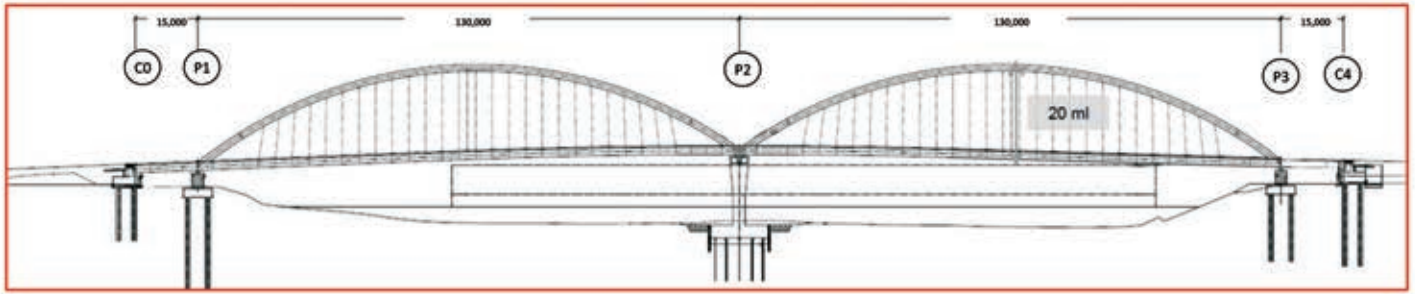
- *le chef de chantier qui gère les équipes des coffreurs/ferrailleurs ;*
- *l'économiste de la construction en phase avant-projet sommaire ;*
- *le conducteur de travaux gérant les interventions simultanées de plusieurs acteurs.*

### **Question 48 : Conclusion**

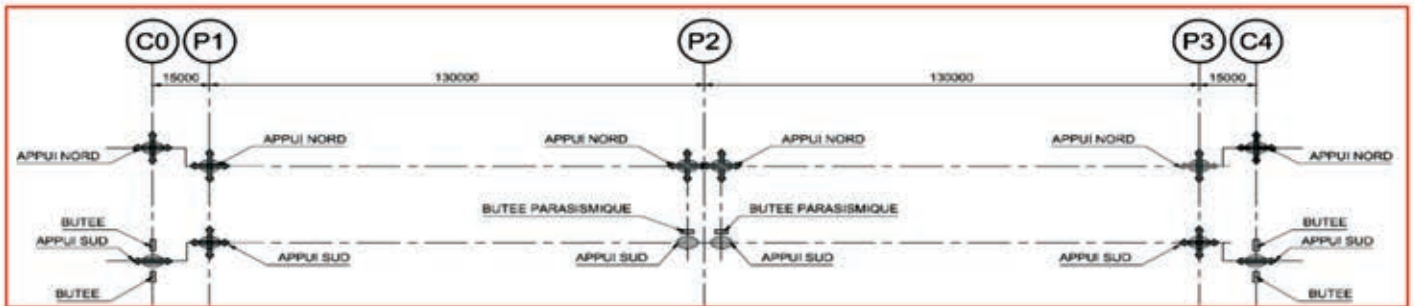
⇒⇒⇒ *Conclure sur la nécessité des petites et moyennes entreprises, mais aussi des groupes nationaux, à s'emparer des enjeux digitaux en cours de développement.*

# DT1 : EXTRAITS DU DOSSIER DE PLANS DE L'OUVRAGE

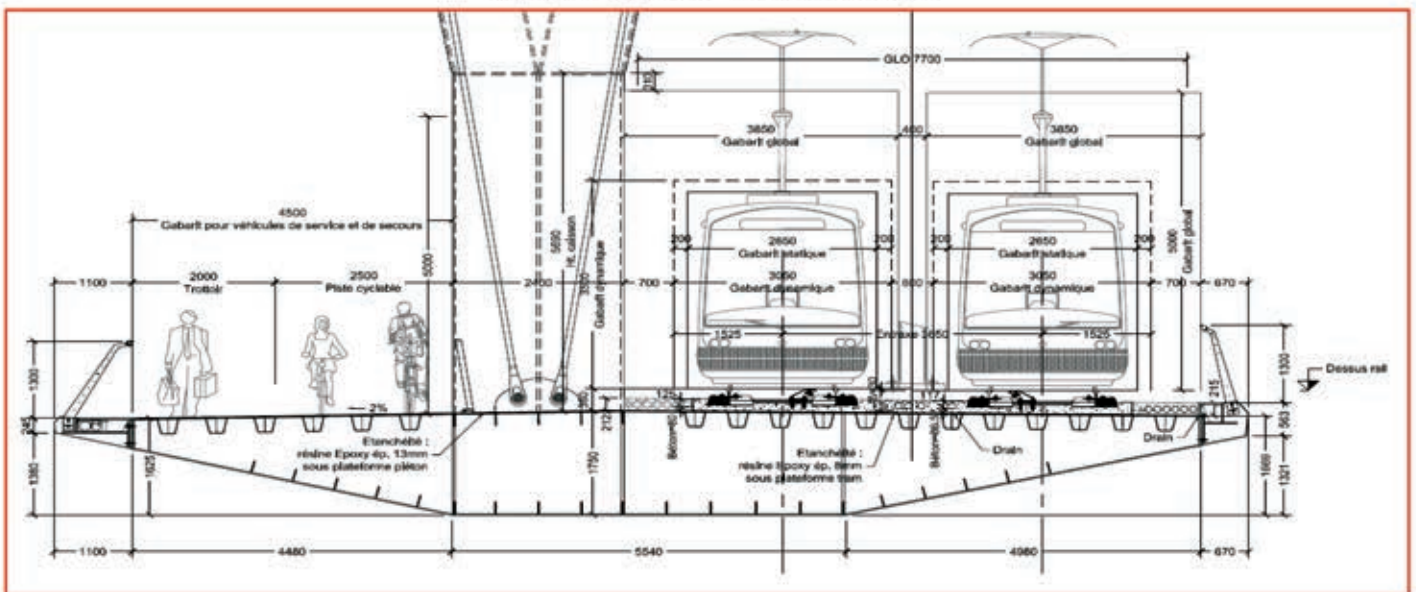
*Coupe longitudinale de l'ouvrage*



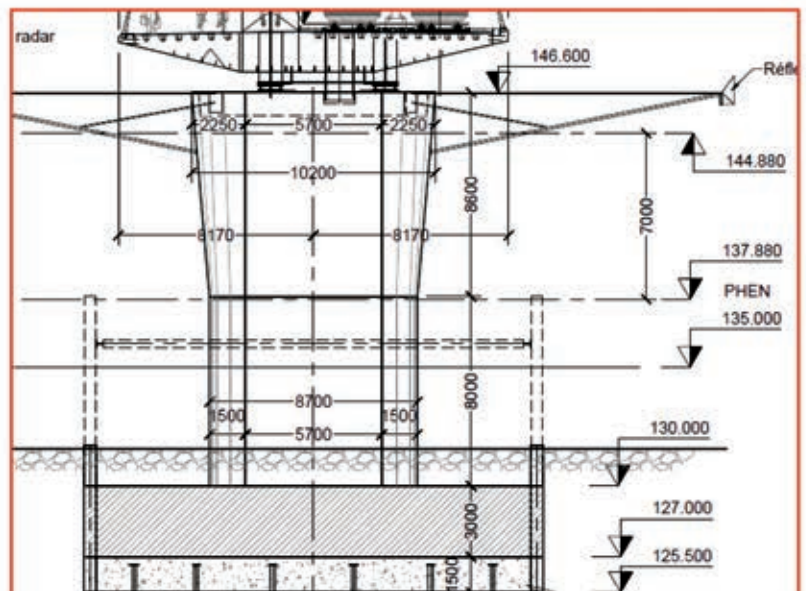
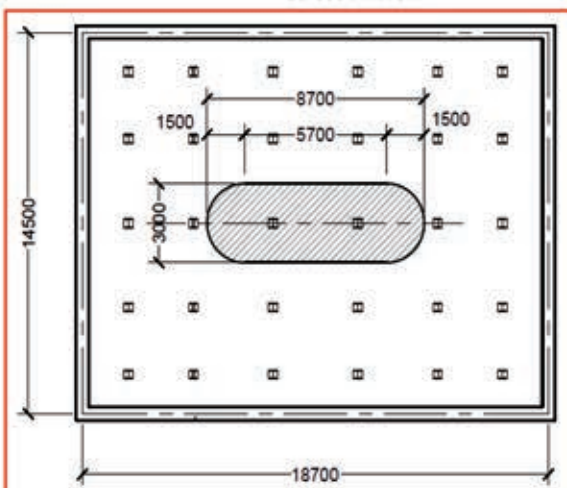
*Vue en plan : Repérage des appuis*



*Coupe transversale - section courante*



**Pile centrale P2 : Coupe →→  
et élévation ↓↓**





## DT2 : DONNÉES DU MÉMOIRE TECHNIQUE

### A] Généralités

Dans le dossier technique présenté par le groupement dans le cadre du concours d'appel à projet, le document : "Mémoire de présentation générale" apporte quelques renseignements permettant la justification des choix effectués par les acteurs du projet en fonction du cahier des charges dicté par la C.T.S.

### B] Informations du mémoire technique. Aperçu général

Plusieurs typologies d'ouvrages ont été examinées au démarrage de la phase concours.

In fine, le groupement a opté pour une solution d'ouvrage d'art avec un tablier entièrement métallique, de type bow-string. Ce choix répond avantagement aux contraintes de site, de délai, de chantier, de coût et d'entretien futur.

L'ouvrage possède deux travées de 15,00 m et deux de 130,00 m.

Il repose sur des appuis en béton armé : 2 culées, C0 et C4, une pilette P1, côté France, une pilette P3, côté Allemagne et une pile centrale, P2, faisant office de point fixe longitudinal dans le Rhin.

Côté France, la pilette est implantée de manière à conserver en rive du Rhin un **passage libre de 3,00 m**, entre l'appui et la crête de berge. Considérant qu'il fallait favoriser dans cette zone de rive du Rhin des espaces permettant des cheminements pour divers modes, nous avons choisi de rallonger l'ouvrage par une petite travée de 15 m qui libère ainsi un espace supplémentaire.

## DT3 : CHARGES DE TYPE TRAMWAYS

Le Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés de l'administration française (STRMTG) a défini des **convois-types** permettant d'englober les tramways réels existants.

L'hypothèse retenue à Strasbourg est un **convoi de type C dont la longueur retenue forfaitairement est de 43,2 m** et dont les caractéristiques des 5 boggies, espacés de 10 m entre axes, sont : 3 boggies intermédiaires et 2 d'extrémités de 2 essieux, de **11,5 t chacun**, espacés de 1,2 m.

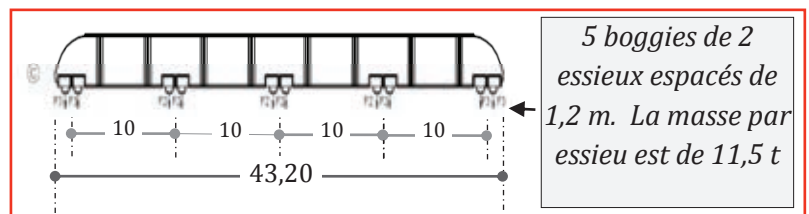
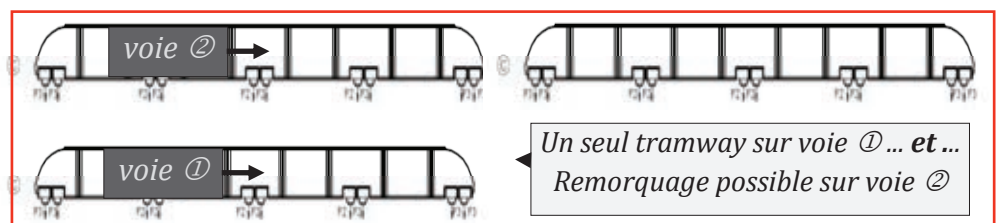


Schéma du tramway : convoi de type C

On admet également que sur l'une des travées et sur une **même** voie :

- Le remorquage d'un tramway T① en panne sur l'ouvrage doit être envisagé grâce à un autre tramway T②. Le croisement avec un autre tramway T③ reste également possible et doit être pris en compte.



Cas de charge 3 tramways.

- En exploitation normale, les rames peuvent se suivre avec une distance minimale de 50 m.

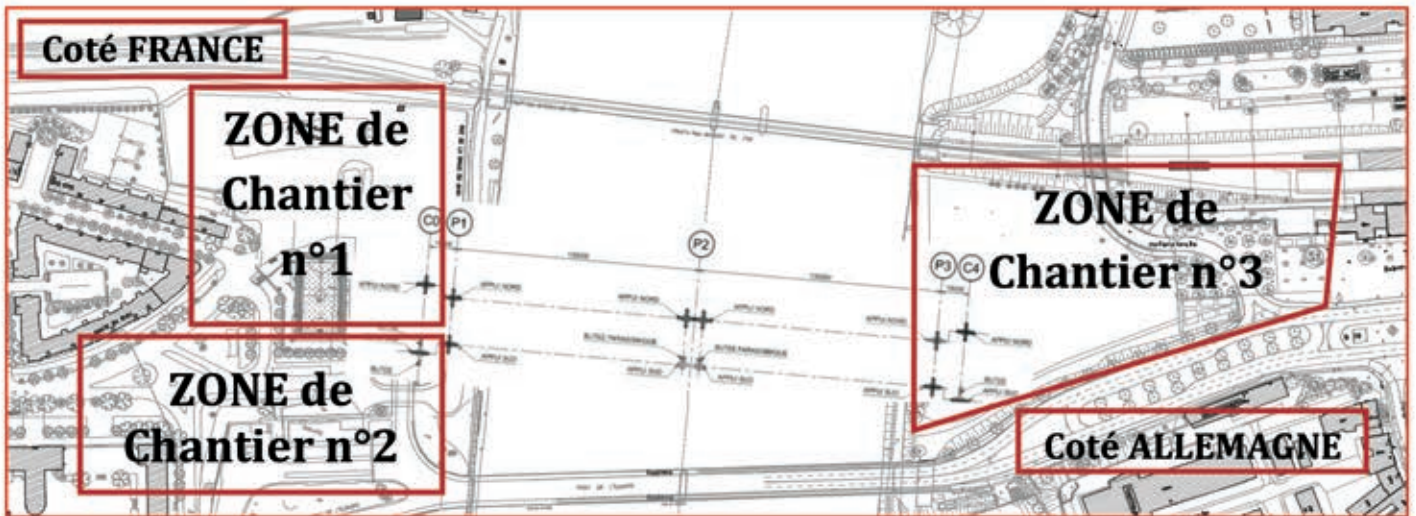


Cas de charge avec 2 tramways.

# DT4 : PRÉPARATION DE CHANTIER ; TERRASSEMENTS

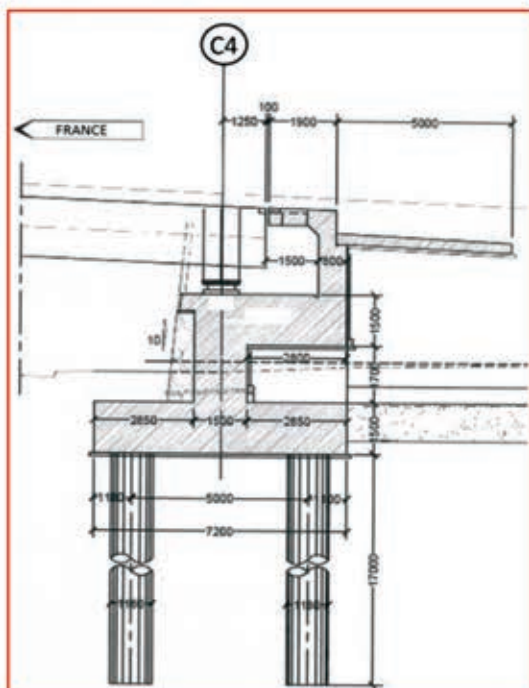
## A/ Installation de chantier.

Plan de masse. ↓



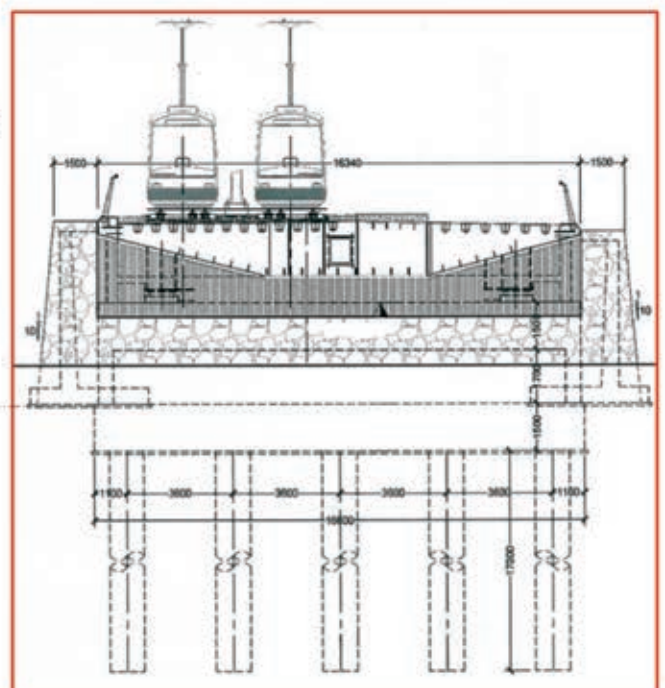
Zone n°3 d'installation de chantier.

NB : La zone n°3 sert de plateforme à la réception et à l'assemblage des éléments métalliques du pont.



Culée C4 :  
←← Coupe  
Élévation →→

+ 136,500  
NGF



## B/ Organisation générale des travaux de terrassement :

① **Décapage de la terre végétale** et mise en cordon sur la partie Nord de la zone de chantier n°3 :



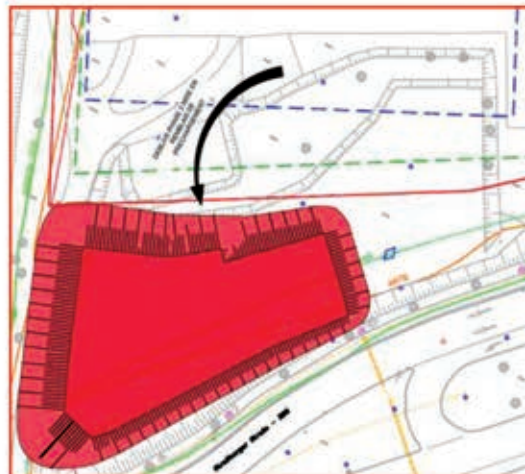
**Terre végétale :**  
 Arase supérieure de la plate-forme après décapage :  
 $\approx +139,000$  NGF  
**PV :  $\gamma_{TV} = 12,5 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$**   
 Par souci de simplification, cette couche de TV sera négligée dans les calculs liés à la consolidation des sols en place.

② **Terrassement pour mise en œuvre d'une couche de matériaux drainants** en remblai :



**Base drainante :**  
**Matériaux 0/60**  
 Niveau livré de la PFT :  
 $+139,500$  NGF  
 Remblai drainant épaisseur :  
**1,000 m**  
 Niveau Fond de Forme :  
 $+138,500$  NGF  
 PV Remblai Drainant :  
 $\gamma_{RD} = 21 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$

③ **Remblais de préchargement :**



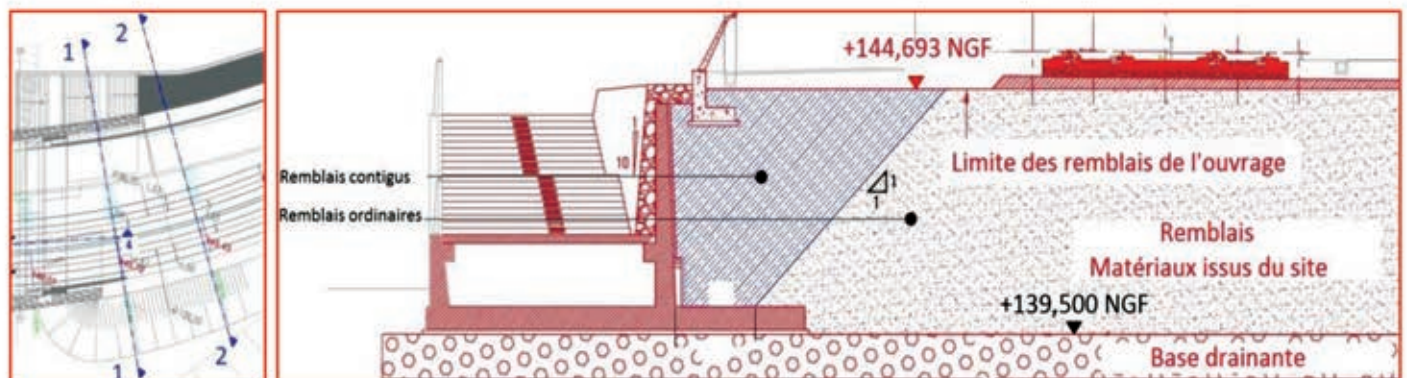
**Caractéristiques géotechniques :**  
 Le niveau PFT supposé horizontal pour cette étude est ...  
*à définir !*  
*Ce niveau sera compris entre  $+145,000$  et  $+150,000$  NGF*  
 PV des remblais de préchargement :  
 $\gamma_{RPréch} = 21 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$

④ **Terrassement de la plateforme de préchargement** pour permettre la réalisation de C4 et des murs de soutènement :



⑤ **Livraison de la plateforme finale pour accueillir le corps des voies circulées :**

**Plateforme finale**  
 Plan ↓↓ et Coupe transversale 1-1 ↓↓



**NB :** Le niveau altimétrique du remblai final devant supporter le corps de la chaussée est  $+144,693$  NGF.

⑥ **Travaux de terrassement des aménagements extérieurs contigus à l'ouvrage.**

## DT5 : DONNÉES GÉOTECHNIQUES

En phase chantier, seules 3 zones situées entre 2 ouvrages existants servent aux installations de chantier. **La zone n°3 avant travaux a une altitude de terrain naturel (TN) de +139,000 NGF.**

Le modèle géotechnique de référence est basé sur le sondage pressiométrique le plus défavorable.

A partir de l'arase inférieure de la semelle de la culée C4 (+136,500 NGF), nous retenons :

Couche	Profondeur m	PI* MPa	E <sub>M</sub> MPa	Φ degré	C' kPa	α -	γ kN·m <sup>-3</sup>
Remblais sablo-graveleux	0-1	0,9	10	30	0	1/3	26
Alluvions sablo-grav. moyennement compactes	1-4	1	15	30	0	1/3	26
Alluvions sablo-graveleuses compactes	4-30,5	4	55	35	0	1/3	27

*Modèle géotechnique moyen.*

### Hypothèses simplificatrices :

- La nappe phréatique durant la phase de terrassement n'excède pas le niveau **+132,000 NGF** ;
- Les sols en place sont considérés comme humides et non saturés ;
- Les poids volumiques indiqués tiennent compte des taux d'humidité propres à chaque matériau.

### Appuis :

- Les appuis reposent sur des fondations profondes ;
- La culée C4 est classique, à mur de front, réalisée en béton armé et fondée sur des pieux de 17,00 m et réalisés à l'aide d'un tubage provisoire. L'arase inférieure de la semelle de C4 est **+136,500 NGF**.

### Contraintes environnementales exigées :

- Participer au confortement de la berge (atténuation de l'effet du bastillage par la biomasse végétale) ;
- Valoriser la berge d'un point de vue écologique (accueil de la faune : libellules, oiseaux...) ;
- Participer à l'épuration succincte des eaux ;
- Améliorer l'insertion paysagère de la berge.

### Remblais :

Les études géotechniques ont mis en évidence des zones probables de tassements sous les culées et remblais d'approche côté France et côté Allemagne. Le planning de l'opération étant contraint, le groupement aura recours à la mise en œuvre d'un **préchargement sur la zone de remblais, avant la construction des appuis, en particulier des pieux**. Les matériaux en place tasseront au fur et à mesure de la montée du remblai, dans un délai global de consolidation relativement court.

Le processus est le suivant :

- Terrassement des matériaux en place jusqu'à la cote environ +138,500 NGF. Les matériaux sont mis en stock sur site en vue de leur réemploi (les matériaux identifiés sont compatibles en réemploi en remblais) ;
- Mise en place de profilomètres ;
- Mise en place d'un géotextile anticontaminant ;
- Réalisation d'une couche de matériaux drainants d'environ 1,00 m d'épaisseur permettant le drainage vertical et horizontal du sol support ;
- Mise en place d'un géotextile anticontaminant sur la base drainante ;
- Réalisation de remblais de préchargement sur l'emprise des travaux et des culées. Les remblais seront réalisés avec surlargeur afin de solliciter le sol support sur toute la largeur des plateformes futures ;
- Après consolidation, les matériaux excédentaires et ceux dans les emprises des travaux des ouvrages de génie civil seront terrassés et remis en remblais pour la réalisation des plateformes de montage de la charpente.

Les remblais techniques à l'arrière des culées et soutènements seront réalisés avec des matériaux d'apport type GTV du Rhin ou équivalent.

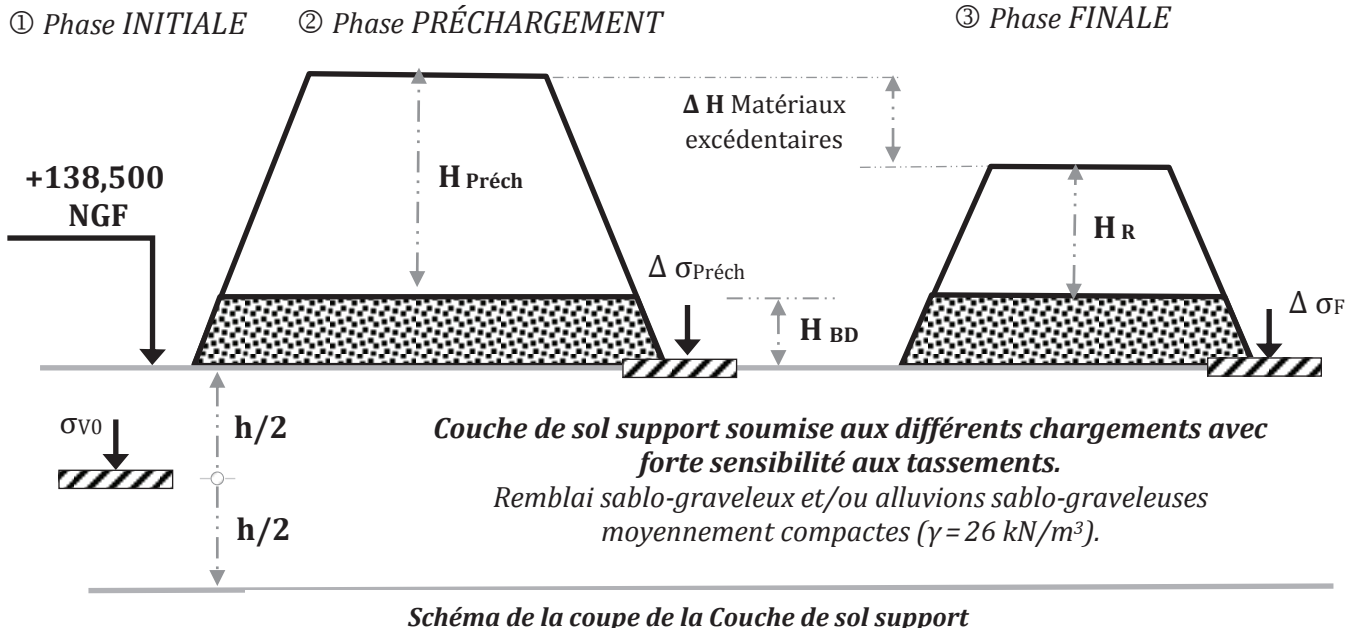
**Tournez la page S.V.P.**

## Remblais de préchargement

Les caractéristiques des couches de matériaux de type remblai sablo-graveleux et/ou alluvions sablo-graveleuses moyennement compactes **évoluent** fortement lorsqu'elles sont soumises à des variations de chargement durant leur histoire géologique.

De ce fait, les couches de sol comprises entre les **niveaux +132,500 NGF et +138,500 NGF** étant très sensibles aux phénomènes de tassement et ayant des caractéristiques similaires, seront dorénavant considérées comme une **seule et unique couche de sol support**. La conception technique des abords de l'ouvrage (zone d'accès au pont) nécessite la mise en œuvre d'une couche de matériaux drainants et de remblais de préchargement sur la zone de chantier n°3.

Le modèle suivant est retenu dans ses différentes phases constructives :



# Annexe 1 : BÉTONS

## A] Réaction sulfatique interne (RSI) ; Généralités.

La réaction sulfatique interne (RSI) par formation d'**ettringite** est une cause de désordres susceptibles d'endommager assez sévèrement des ouvrages en béton.

Issues du guide technique CEREMA, des recommandations concernant les ouvrages de génie civil et bâtiments comportant des éléments de dimensions importantes en contact avec l'eau ou soumises à une ambiance humide fixent le niveau de **prévention** à atteindre en fonction de la catégorie de l'ouvrage et des conditions d'expositions auxquelles il est soumis. A chacun de ces niveaux de prévention, sont associées des **précautions à appliquer et des vérifications à effectuer**.

Exemple d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages classés par catégorie		
Catégorie ②	Conséquences peu tolérables	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Éléments porteurs de la plupart des bâtiments et des ouvrages de génie civil dont les ponts courants</li> <li>• La plupart des produits préfabriqués structurels</li> </ul>

Tableau partiel de classement par catégorie d'ouvrage.

## B] Niveaux de prévention ; Classes d'exposition.

Il existe 4 niveaux de prévention (As ; Bs ; Cs et Ds) associés au risque vis-à-vis de la RSI. Pour chacun de ces niveaux, des précautions doivent être prises en compte.

Exemple de précautions à prendre en fonction du niveau de prévention		
Niveau	Cs	• La température $T_{\max}$ au sein de l'ouvrage doit rester inférieure à 70°C.

Tableau partiel de classement des niveaux de prévention

Classe d'exposition de la partie d'ouvrages vis-à-vis de la RSI.		
Classe d'exposition	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
<b>XH1</b>	Sec ou humidité modérée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible ou moyen</li> <li>• Partie d'ouvrage située à l'extérieur et abritée de la pluie</li> </ul>
<b>XH2</b>	Alternance d'humidité et de séchage, humidité élevée	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partie d'ouvrage en béton située à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est élevé</li> <li>• Partie d'ouvrage en béton non protégé par un revêtement et soumis aux intempéries, sans stagnation d'eau à la surface</li> <li>• Partie d'ouvrage en béton non protégée par un revêtement et soumise à des condensations fréquentes.</li> </ul>
<b>XH3</b>	En contact durable avec l'eau : immersion permanente ; stagnation d'eau à la surface ;	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partie d'ouvrage en béton submergée en permanence dans l'eau</li> <li>• Éléments de structure marine</li> <li>• La plupart des fondations</li> <li>• Partie d'ouvrage en béton régulièrement exposée à des projections d'eau.</li> </ul>

Tableau des classes d'exposition vis à vis de la RSI.

Choix du niveau de prévention				
Classe d'exposition →		XH1	XH2	XH3
↓	Catégorie d'ouvrage			
	Catégorie ①	<b>As</b>	<b>As</b>	<b>As</b>
	Catégorie ②	<b>As</b>	<b>Bs</b>	<b>Cs</b>
	Catégorie ③	<b>As</b>	<b>Cs</b>	<b>Ds</b>

Tableau des choix de niveau de prévention vis à vis de la RSI.

## C] Estimation des températures atteintes - Méthode simplifiée.

### c1] Principe général.

Cette méthode permet une estimation de la température maximale au cœur d'une pièce en béton dont on ne connaît que l'épaisseur EP (sa plus petite dimension) et les caractéristiques du béton.

### c2] Données nécessaires à l'estimation.

La méthode simplifiée nécessite la détermination des paramètres suivants :

- Dosage en ciment du béton **C** (en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ;
- Dosage en addition minérale **A** (en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ;
- Masse vol. réelle du béton **M<sub>v</sub>** (en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ;
- Dosage en eau efficace **E<sub>eff</sub>** du béton (en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) ;
- Chaleur d'hydratation à 41 h du ciment **Q41** (en  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) ;
- Épaisseur de la pièce **EP** (en m) ;
- Résistance en compression à 2 j et 28 j du ciment **Rc2** et **Rc28** (en MPa) selon NF EN 196-1 ;

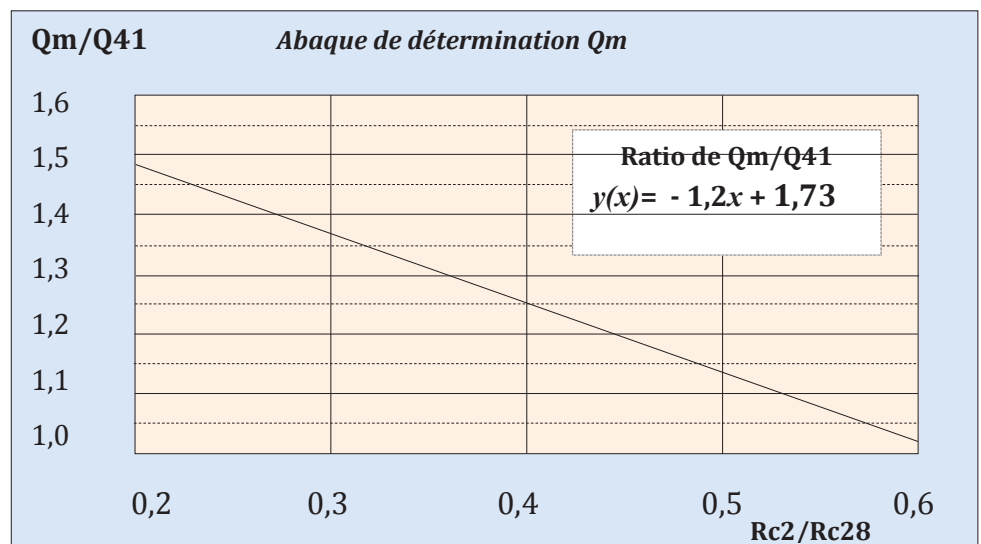
### c3] Organigramme de calcul.

Étapes successives de calcul de la température maximale atteinte dans les structures.		
Étape ①	Estimation du dégagement de chaleur à l'infini pour le ciment retenu :	Détermination de <b>Q<sub>m</sub></b> (à partir de <b>Q41</b> , <b>Rc2/Rc28</b> )
Étape ②	Prise en compte des additions minérales	Détermination du liant équivalent chaleur <b>LE<sub>ch</sub></b> <b>LE<sub>ch</sub> = Additions minérales + C</b>
Étape ③	Prise en compte de l'impact du rapport <b>E<sub>eff</sub>/LE<sub>ch</sub></b> sur l'élévation de température	Détermination d'un terme correctif " <b>α</b> " fonction de ( <b>E<sub>eff</sub>/LE<sub>ch</sub></b> ) selon la formule <b>α = 40 * (E<sub>eff</sub>/LE<sub>ch</sub>) - 18</b>
Étape ④	Estimation de l'élévation de T° en l'absence de déperditions thermiques	Détermination de <b>ΔT<sub>adia</sub></b> ( <b>Q<sub>m</sub></b> ; <b>LE<sub>ch</sub></b> ; <b>C<sub>th</sub></b> ; <b>M<sub>v</sub></b> ; <b>α</b> ) <b>ΔT<sub>adia</sub> = (Q<sub>m</sub> * LE<sub>ch</sub>) / (C<sub>th</sub> * M<sub>v</sub>) + α</b> Avec <b>C<sub>th</sub> = 1 kJ * kg<sup>-1</sup> * °C<sup>-1</sup></b>
Étape ⑤	Prise en compte de déperditions thermiques	Détermination d'un coefficient de réduction <b>R</b> ( <b>Q41</b> , <b>EP</b> ) à affecter à <b>ΔT<sub>adia</sub></b> pour estimer l'élévation de température <b>ΔT</b> de la pièce
<b>La valeur estimée de T° est la somme de la T° du béton au moment du coulage et de ΔT</b>		

*Protocole de calcul de Tmax au cœur des ouvrages en béton*

### c4] Estimation du dégagement de chaleur à l'infini pour le ciment retenu

La 1<sup>ère</sup> étape permet l'estimation de la chaleur maximale dégagée à long terme par le ciment **Q<sub>m</sub>** (en  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) grâce à la formule :  
**Q<sub>m</sub> = Q41 \* ratio Q<sub>m</sub>/Q41**  
La valeur du ratio **Q<sub>m</sub>/Q41** est donnée par l'abaque ci contre sur la base du rapport **Rc2/Rc28**.



Épaisseur de la pièce <b>EP</b>	4 m	3 m	2 m	1 m	0,75 m	0,5 m	0,25 m
Coef de réduction <b>R</b>	<b>0,98</b>	<b>0,96</b>	<b>0,94</b>	<b>0,85</b>	<b>0,8</b>	<b>0,68</b>	<b>0,43</b>

*Extrait de l'abaque estimant le coefficient R lié aux déperditions thermiques (Cas où Q41 > 310 kJ \* kg<sup>-1</sup>).*

# Annexe 2 : ACOUSTIQUE

## A] Généralités

Du point de vue physique, un son peut être défini comme une variation de pression susceptible d'être détectée par l'oreille humaine. Pour tenir compte de la sensibilité de celle-ci, certains paramètres sont pondérés par un «filtre fréquentiel », introduisant une première approche de la notion de gêne subie par l'individu.

Valeurs des corrections physiologiques "A".									
Fréquences centrales des octaves (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Pondération physiologique "A" (dB)	-39,4	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	-1,1

*Tableau de corrections physiologiques "A".*

D'autres caractéristiques constituent des paramètres qu'il est essentiel d'intégrer dans un indice de gêne. Par exemple, un individu exposé pendant un certain temps à une source de bruit «absorbe» une «dose» de bruit caractérisée par un temps d'exposition. On utilise ainsi le niveau acoustique continu équivalent **LA<sub>eq</sub>** ou **L<sub>eq</sub>**.

## B] Formules générales ; formules empiriques.

### b1] I : Intensité acoustique

La puissance mécanique moyenne transportée par unité de surface (W/m<sup>2</sup>) par une onde sonore s'appelle l'intensité acoustique. Elle est liée à la (sur)pression acoustique par la relation :

$$I = (P_{\text{eff}}^2) / (\rho * c) \dots$$

où **P<sub>eff</sub>** est la (sur)pression acoustique efficace, **ρ** la masse volumique du fluide dans lequel se propage l'onde et **c** la célérité de l'onde dans le milieu.

### b2] L<sub>I</sub> : Niveau d'intensité acoustique

L'expérience montre que les sensations physiologiques sont globalement proportionnelles au logarithme des énergies des phénomènes physiques à l'origine des stimuli. Est introduite une nouvelle grandeur associée à l'intensité acoustique : le **niveau d'intensité acoustique L<sub>I</sub>**, dont l'unité est le décibel et la définition est **L<sub>I</sub> = 10 \* log(I/I<sub>0</sub>)** ...

où **I** est l'intensité acoustique et **I<sub>0</sub>** une intensité de référence fixée à 10<sup>-12</sup> W \* m<sup>-2</sup>.

### b3] L<sub>pi</sub> : Niveau de pression acoustique (ou sonore) ; L<sub>p</sub> : Niveau sonore global

Parallèlement, sont définis les niveaux de pression acoustique ou niveaux sonores ...

**L<sub>pi</sub> = 10 \* log(p<sub>i</sub>/p<sub>0</sub>)<sup>2</sup> = 20 \* log(p<sub>i</sub>/p<sub>0</sub>)**... où **p<sub>0</sub>** est la pression de référence et **p<sub>i</sub>** la pression efficace pour une fréquence ou pour une bande de fréquence particulière ; on considère les octaves ou les tiers d'octave.

**p<sub>i</sub>** correspond à la moyenne des valeurs de p(t) pendant un intervalle de temps donné. Enfin, à partir des niveaux **L<sub>pi</sub>**, le niveau de pression acoustique global **L<sub>p</sub>** permet de quantifier le bruit par une seule valeur, exprimée également en dB et valant **L<sub>p</sub> = 10 \* log(Σ 10<sup>(L<sub>pi</sub>/10)</sup>)**.

Nota : Il est possible de s'affranchir du calcul logarithmique en considérant le tableau ci-dessous.

Somme à ajouter à L <sub>1</sub> de 2 signaux indépendants avec L <sub>1</sub> > L <sub>2</sub>															
L <sub>1</sub> - L <sub>2</sub> (en dB)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	>19
= L <sub>1</sub> + ... (dB)	3	2,5	2,1	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

*Valeurs des gains acoustiques en fonction du différentiel des niveaux de pression*

### b4] Atténuation acoustique

Dans le cas des ondes planes linéiques et lorsque la source ponctuelle émettrice est en champ libre on peut montrer que le **niveau sonore global décroît de 3 dB(A) en doublant la distance**.



### b5] $L_{eq}$ : Niveau de pression acoustique continu équivalent

$L_{eq}$  correspond au niveau d'un son continu stable qui, au cours d'une période spécifiée  $T$ , a la même quantité d'énergie qu'un son considéré dont le niveau varie au cours du temps (sons intermittents). Cette relation est souvent remplacée par  $L_{eq, T}$  qui est la sommation des mesures faites durant le temps  $T$ , soit :

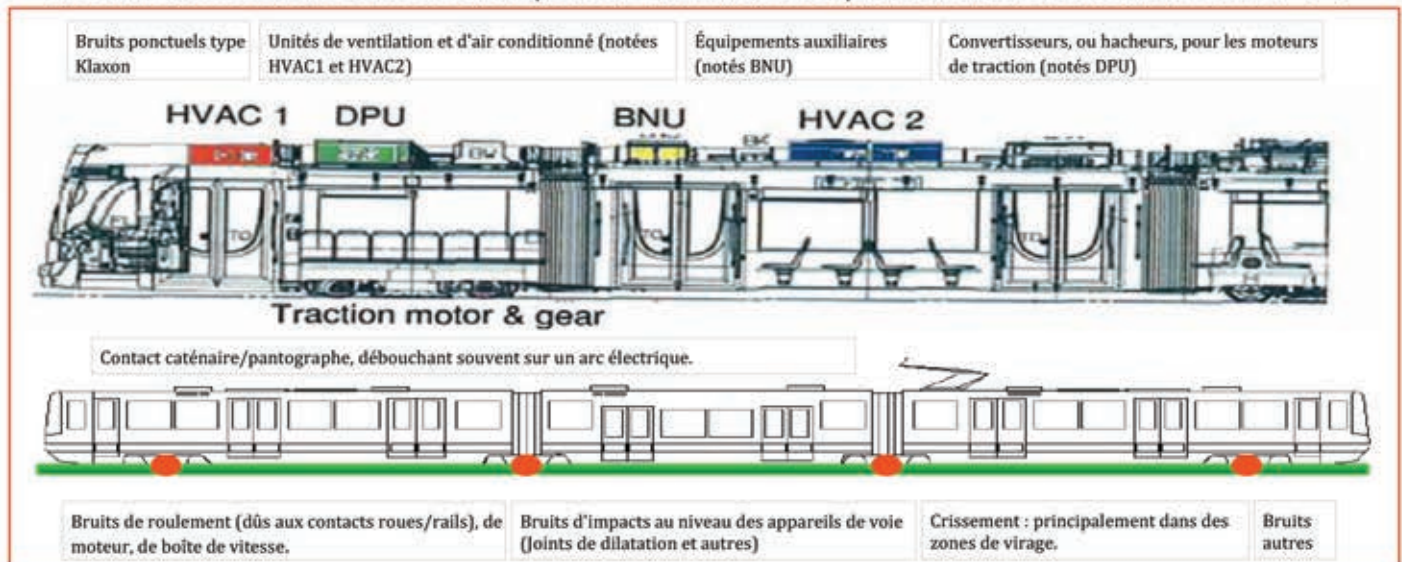
$$L_{eq} = 10 * \log\left[\left(\frac{1}{T}\right) * \int_0^T 10^{\left(\frac{L_p}{10}\right)} * dt\right] \quad L_{eq, T} = 10 * \log\left[\left(\frac{1}{T}\right) * \sum_0^T 10^{\left(\frac{L_p}{10}\right)}\right]$$

**NB :**  $LA_{eq}$  se calcule avec  $L_{eq}$  en tenant compte des corrections physiologiques.

## C] Cas particuliers des tramways sur rail.

### c1] Sources du bruit

Les nuisances sonores dues au transport sur rail sont liées à plusieurs facteurs. Voir ci dessous ↓↓



*Schémas de trams, avec les sources et le positionnement des principales émissions acoustiques.*

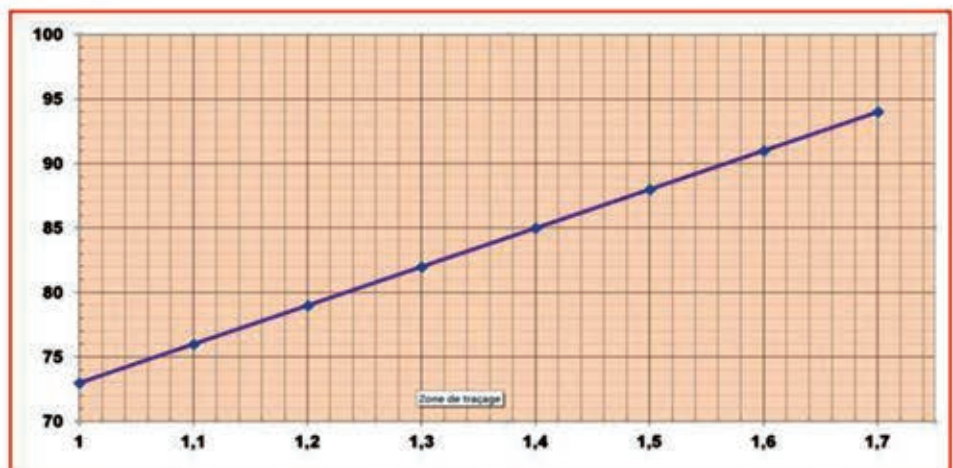
### c2] Actions visant à diminuer les nuisances sonores.

#### c21] Actions sur la vitesse.

On ne retient que les **bruits de roulement** et on admet que :

- Ils sont prépondérants au-delà de **10 km/h** ;
- Il existe une dépendance **linéaire** de l'émission sonore en fonction du logarithme de la vitesse.

Est retenue dans le cas de ce tram une dépendance en ...  **$30 \cdot \log(v)$** .



*Courbe des niveaux de pression acoustique en dB mesurés à 5 mètres de la source en fonction du logarithme décimal de la vitesse exprimée en km/h. (Vitesses comprises entre 10 et 50 km/h). Équation de la droite :  $L_p = 30 \cdot \log(v) + 43$*

#### c22] Actions sur les revêtements de plateforme.

Les revêtements permettent des atténuations acoustiques non négligeables : Ainsi, pour l'**herbe**, l'influence est relativement forte par rapport à un revêtement réfléchissant de type pavés en béton. On mesure des gains de **6** et de **8 dB(A)** pour des vitesses respectivement de **20** et **40 km/h** par rapport aux pavages minéraux.

Le **ballast**, dont les gains peuvent être appréciés à hauteur de **3 dB(A)** (vitesse **20 km/h**) et **4 dB(A)** (vitesse **40 km/h**), est une solution intermédiaire entre revêtement herbeux et revêtement réfléchissant. Il permet par ailleurs d'améliorer les coûts de maintenance.

**c23] Autres actions.**

Le traitement de la pose des rails peut apporter des améliorations, tout comme l'arrêt de la climatisation qui peut être imposé lors des arrêts voire à des vitesses inférieures à 10 km/h.

**c3] Éléments de réglementation.** *Code de l'environnement article L 571-92*


Lors de la construction d'une infrastructure ferroviaire nouvelle, la réglementation actuelle (appelée à évoluer) impose des contributions maximales aux nuisances sonores futures liées à son utilisation. Deux indicateurs ferroviaires sont définis : **If,jour** et **If,nuit**. Les niveaux maxima de **If,jour** et **If,nuit** indiqués dans le tableau suivant sont définis en fonction de l'ambiance sonore avant travaux.

USAGE ET NATURE DES LOCAUX	Ambiance sonore avant réalisation du projet. dB(A)		Contribution maximale de l'infrastructure après travaux	
	L <sub>Aeq</sub> (6h-22h)	L <sub>Aeq</sub> (22h-6h)	If, jour	If, nuit
Établissement de santé et soins.	-	-	<b>60</b>	<b>55</b>
Salle dédiée au séjour de malades	-	-	<b>57</b>	<b>55</b>
Établissements d'enseignement	-	-	<b>60</b>	-
Logement • Zone modérée	≤ <b>65</b>	≤ <b>60</b>	<b>60</b>	<b>55</b>
Logement • Zone modérée de nuit	≥ <b>65</b>	≤ <b>60</b>	<b>65</b>	<b>55</b>
Logement • Zone non modérée	-	≥ <b>60</b>	<b>65</b>	<b>60</b>
Local à usage de bureaux	-	-	<b>65</b>	-

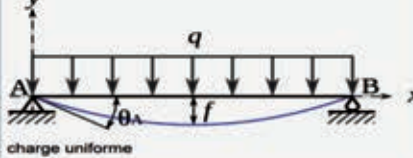
*Niveaux maxima admissibles pour la construction d'une voie nouvelle de tramway.*

**Annexe 3 : FORMULAIRE RDM**

**A] Formules des flèches**

Solicitation	Flèche	Pente
	Équation de la déformée	
 <p>force concentrée en son centre</p>	$f = \frac{FL^3}{48EI}$ $x_f = \frac{L}{2}$	$-\theta_A = \theta_B = \frac{FL^2}{16EI}$
	$x < \frac{L}{2} : y = -\frac{Fx}{48EI} (3L^2 - 4x^2)$	

**B] Théorème des 3 moments**

Solicitation	Flèche	Pente
	Équation de la déformée	
 <p>charge uniforme</p>	$f = -\frac{5qL^4}{384EI}$ $x_f = \frac{L}{2}$	$\theta_A = \theta_B = \frac{qL^3}{24EI}$
	$x < \frac{L}{2} : y = -\frac{qx}{24EI} (x^3 - 2Lx^2 + L^3)$	

Dans le cas des poutres continues où les inerties sont les mêmes et où les charges sont uniformément réparties et égales sur les travées, il est rappelé :

$$(M_{i-1} * L_i) + 2 * (L_i + L_{i+1}) * M_i + (L_{i+1} * M_{i+1}) = - 1/4 * (p_i * L_i^3 + p_{i+1} * L_{i+1}^3)$$

Où ...  $L_i$  et  $L_{i+1}$  sont les portées des travées  $i$  et  $i+1$  ; où ...  $M_{i-1}$ ,  $M_i$  et  $M_{i+1}$  sont les moments sur les appuis  $i-1$  ;  $i$  et  $i+1$  ; et où  $p_i$  est la charge répartie uniforme sur la totalité de la travée  $i$ .

## A] Phénomènes de tassement et de consolidation

### a1] Tassement d'un sol

Le tassement est par définition la variation de hauteur d'une couche de sol sous l'effet d'une charge. Ils peuvent être uniformes ou différents d'un point à l'autre selon la nature du sol en place. Dans les sols non saturés, les tassements sont presque instantanés, au contraire des sols saturés, où ils peuvent s'étendre de quelques secondes -dans les sols drainants-, jusqu'à plusieurs dizaines d'années dans les argiles peu perméables.

Le tassement total d'un sol se décompose en **tassement primaire** et en **tassement secondaire**. Le tassement primaire a deux composantes, un tassement immédiat et un tassement différé associé à la consolidation.

### a2] Consolidation d'un sol

La consolidation d'un sol est l'évolution du tassement dans le temps.

### a3] Calcul du tassement $\Delta h$ d'une couche de sol en place

Par hypothèse simplificatrice, on se limite aux contraintes verticales et aux problèmes à deux dimensions ou axisymétriques. Le calcul du tassement d'un sol soumis à un chargement vertical se fait en deux étapes.

**1<sup>ère</sup> étape** : Calcul de l'état de contraintes dans le sol avant et après le changement : Pour cette étape, on applique le plus souvent la théorie de l'élasticité, valable au moins pour les contraintes verticales.

**2<sup>ème</sup> étape** : Calcul des déformations. 2 méthodes peuvent être utilisées : la méthode du chemin de contraintes (basée sur l'essai œdométrique) et la méthode dérivée de la théorie de l'élasticité (basée le plus souvent sur l'essai pressiométrique).

Dans le cas d'un sol normalement consolidé, les paramètres caractéristiques sont reliés par la formule :

$$\frac{\Delta h}{H} = -\frac{C_c}{1+e_0} \times \log\left(1 + \frac{\Delta\sigma}{\sigma_c}\right) \quad \text{avec :}$$

$\Delta h$  : Tassement de la couche de sol considérée à un instant  $t$  (fini ou infini) ;

Notons que  $\Delta h < 0$  pour un tassement et que  $\Delta h > 0$  pour un gonflement ;

$H$  : Épaisseur de la couche de sol considérée ;

$C_c$  : Indice de compression ;

$e_0$  : Indice des vides initial du sol considéré ;

$\Delta\sigma$  : Variation de la contrainte apportée par une surcharge sur la couche de sol considérée, en kPa ;

$\sigma_c$  : Contrainte de consolidation, en kPa.

### a4] État de contrainte dans un sol soumis à chargement

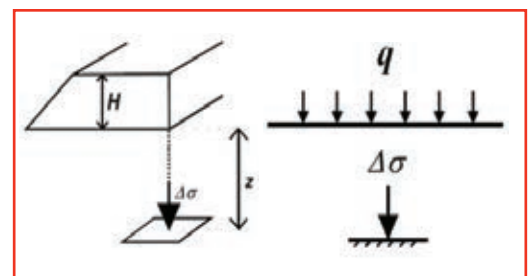
Lorsque les dimensions horizontales des remblais mis en œuvre sont très largement supérieures à la hauteur de ces derniers, on peut considérer que la couche de sol est infinie à surface horizontale. La composante verticale de la contrainte due au poids propre du sol est :  $\sigma_z = \gamma \cdot z$

### a5] Effet d'une surcharge uniformément répartie $q$ sur une couche de sol

$\gamma$  étant le poids volumique du matériau de remblai (donné en  $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ ), l'augmentation de contrainte apportée par la mise en œuvre d'un remblai est :

$$\Delta\sigma = q = \gamma \cdot H, \text{ quelle que soit la profondeur } z.$$

Par définition, la contrainte de consolidation ( $\sigma_c$ ) est la plus forte contrainte effective supportée par le sol au cours de son histoire géologique.

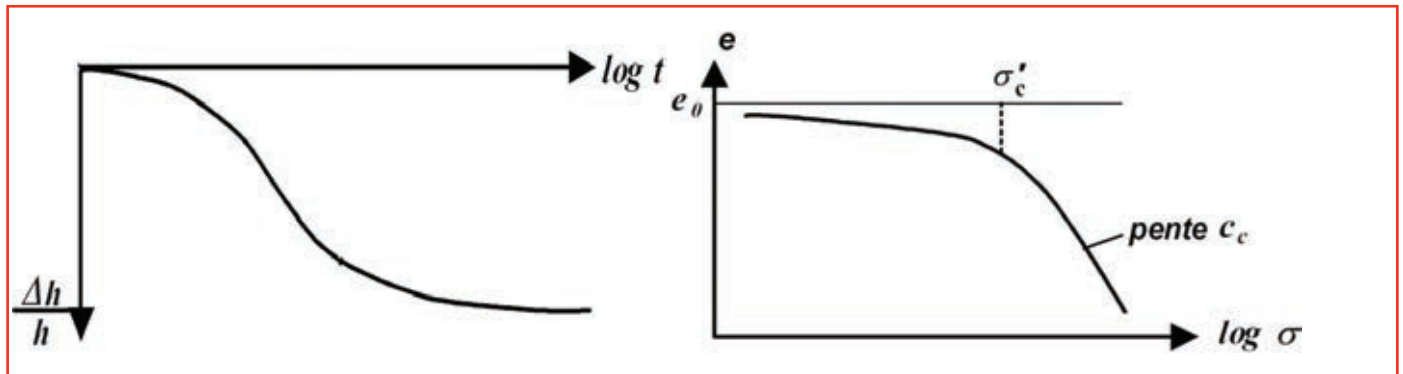


*Modélisation d'une surcharge  $q$  sur une couche de sol.*

## B] Rôle du temps dans les phénomènes de tassement et de consolidation

### b1] Explication temporelle de la diminution de volume d'un sol chargé

Pour une contrainte de chargement  $\sigma'$  donnée, inchangée pendant un palier de temps considéré, on représente la courbe de consolidation donnant le tassement en fonction du temps.



Tassement en fonction du temps et évolution de l'indice des vides en fn de la contrainte appliquée.

Lors de l'application d'une charge uniformément répartie  $q$  (à  $t = 0$ ), le volume ne varie pas. L'eau interstitielle reprend toute la surpression car la compressibilité de l'eau est très inférieure à celle de l'assemblage des grains.

Ensuite, lors du drainage, la contrainte effective sur les grains augmente en même temps que la pression interstitielle diminue. L'eau en s'évacuant permet ainsi aux grains de se rapprocher : c'est le **tassement**. Le drainage s'arrête lorsque la pression interstitielle s'est dissipée. Cette phase de dissipation des pressions interstitielles s'appelle la **consolidation**. Elle est d'autant plus lente que le sol est imperméable. Lorsque la pression interstitielle est nulle, le sol est dit consolidé.

### b2] Coefficient de compression $C_c$

Ce coefficient  $C_c$  permet de calculer le tassement total à long terme sous un état de charge donné en considérant que pour des contraintes supérieures à la contrainte de consolidation, la variation  $(e, \log \sigma')$  est linéaire.

### b3] Coefficient de consolidation $C_v$

Le coefficient  $C_v$  permet de calculer l'évolution du tassement au cours du temps. Pour cela on définit (voir § b4) le degré de consolidation  $U_v(t)$ , puis on calcule le facteur temps  $T_v$ .

$C_v$  est exprimé en  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

### b4] Degré de consolidation verticale $U_v(t)$ à un instant $t$

Degré de consolidation verticale  $U_v(t)$ , en % : 
$$U_v(t) = \frac{\text{Tassement à l'instant } t}{\text{Tassement final}}$$

### b5] Facteur tps vertical $T_v$ ; tableau $T_v$ & degré de consolidation verticale $U_v(t)$

Le facteur temps vertical  $T_v$  pour une couche de sol d'épaisseur  $H$  drainée par ses deux faces (sup et inf) est:

$T_v$	2	0,6	0,29	0,18	0,13	0,07
$U_v(t)$ en %	99,4	90	80	70	60	50

Tableau des valeurs  $T_v$  &  $U_v(t)$  à prendre en compte

$$T_v = \frac{4 \times C_v}{H^2} \times t$$

$t$  : temps de tassement primaire, en seconde ;

$H$  : épaisseur de la couche compressible, en cm ;

$C_v$  : coefficient de compressibilité du sol, en  $\text{cm}^2/\text{s}$ .

**NB** : Une durée infinie permet d'atteindre 100% du tassement possible d'une couche de sol. Il sera considéré pour les calculs  $U_v(t=\text{infini})_{100\%}$  comme étant très proche de  $U_v(t)_{99,4\%}$ .

Tournez la page S.V.P.

## A] Contexte général

### a1] Révolution technologique

La révolution technologique que représente le numérique est à l'origine d'un véritable changement de paradigme économique et sociétal. Il se traduit par des mutations irréversibles dans de nombreux domaines comme l'économie, la santé, la culture, l'organisation du travail, avec des prolongements dans les relations sociales notamment par l'apparition d'un espace nouveau entre sphère publique et sphère privée.

### a2] Maquette numérique et BIM

Maquette numérique et BIM sont des termes souvent utilisés à tort de façon interchangeable.

**La maquette numérique** est un outil de représentation virtuelle du projet : c'est le clone de l'ouvrage à réaliser, son ADN, une agrégation de données contenant tous les renseignements et les détails du projet. On parle parfois d'avatar, d'une préfiguration numérique de l'ouvrage avant sa construction.

**Le BIM** (traduction officielle française : Bâtiment et Informations Modélisés, parmi d'autres) est un processus de gestion collaboratif du projet reposant sur les échanges et l'enrichissement de la maquette numérique par les acteurs du projet.

### a3] Fichier interopérable « .ifc »

Signifiant "Industry Foundation Classes", ce format de fichier numérique orienté objet est utilisé par l'industrie du BTP pour échanger et partager des informations entre logiciels. Il permet de décrire universellement les objets présents dans une maquette numérique (murs, sols, etc.,...) ainsi que de décrire les relations des objets entre eux.

## B] Évolution en cours

### b1] Contexte (Source : Le moniteur 9 mai 2014)

Les évolutions à prendre en compte sont notamment les suivantes :

- des projets de BTP de plus en plus complexes ;
- une demande sociétale et économique de maîtrise approfondie des risques ;
- l'intégration du développement durable sur l'ensemble du cycle de vie des projets (programmation, conception, construction, exploitation, fin de vie) et dans toutes ses dimensions (économique, environnementale, sociétale...) ;
- un investissement très fort de la communauté internationale du secteur du BTP dans le développement de la maquette numérique ;
- une évolution des grands secteurs d'activité – notamment industriels –, de par leurs structures et avant le secteur du BTP, vers des méthodes de conception, de conduite et de production de projets plus performantes et industrialisées :
  - . partenariats, travail collaboratif ;
  - . utilisation partagée de la maquette numérique ;
  - . suppression ou limitation des plans en papier ;
  - . gestion de bases de données plutôt que de plans ou de fichiers.

### b2] Identification des niveaux BIM – Degré d'expérience

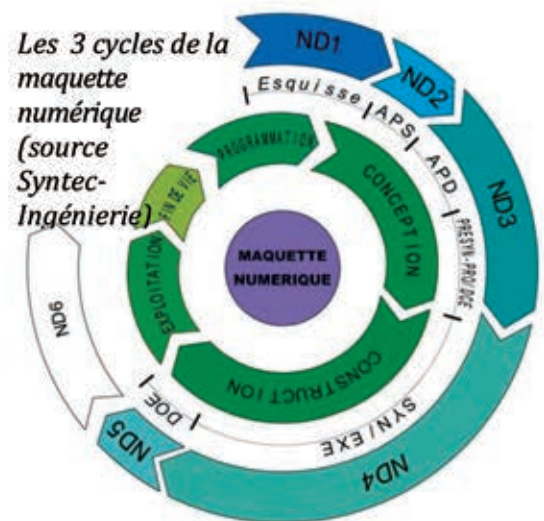
**BIM de niveau 1** : un acteur crée une maquette numérique pour son propre usage. L'architecte pour concevoir le projet et en extraire les livrables, l'entreprise pour préparer le chantier.

**BIM de niveau 2** : chaque acteur crée sa propre maquette. Les différentes maquettes sont ensuite comparées, synchronisées, enrichies puis fusionnées.

**BIM de niveau 3** : il s'agit d'un processus de conception intégré à partir d'un modèle numérique unique, hébergé sur un serveur centralisé accessible en temps réel par tous les acteurs du projet avec des droits d'accès distincts. La conception est concurrente et collaborative. De l'avis des spécialistes, la conception totale en BIM de niveau 3 n'est techniquement pas encore possible sauf dans un environnement mono-logiciel.

## C] Définition des niveaux ND et LOD autour d'une maquette numérique

Les niveaux de développement (ND) – de ND1 à ND5 – définissent le niveau de renseignement attendu pour les éléments constituant la maquette numérique selon l'avancement du projet. Cette organisation s'inspire des « Levels of development » (LOD) américains, en s'efforçant de franciser les concepts afin qu'un praticien du découpage selon la loi MOP retrouve une certaine similitude.



### c1] Identification des niveaux de développement :

#### ND1 : CONCEPTS – ESQUISSE :

Ce ND1 permet d'analyser la maquette numérique pour les aspects d'impacts sur le site : mouvements de sol, ensoleillement, masques, vents, interfaces avec avoisinants et existants...

#### ND2 : APS – PERMIS DE CONSTRUIRE :

donne les informations nécessaires au dépôt du permis de construire.

#### ND3 : APD – PRÉ-SYNTHÈSE – PRO/DCE :

Ce ND présente de manière exhaustive les composants de la maquette numérique : ils sont repérés et renseignés et permettent une description détaillée du projet. Ce niveau de développement permet l'établissement de quantitatifs nécessaires à l'estimation financière.

#### ND4 : SYNTHÈSE – ÉTUDE D'EXÉCUTION –CONSTRUCTION :

Ce ND4 est celui de l'exécution des travaux par l'entreprise. La maquette numérique de ND4 intègre progressivement les caractéristiques des éléments retenus dans les marchés d'entreprises et mis au point durant les études d'exécution. Le titulaire des études d'exécution développe la maquette ND3 et produit ses documents d'exécution, d'usine, de fabrication, d'atelier ; il établit ses commandes, sa méthodologie d'exécution et intègre les informations dans la maquette numérique qui devient ND4. Il permet d'apprécier les impacts éventuels des modifications potentielles pendant la phase d'exécution.

#### ND5 : DOSSIER DES OUVRAGES EXÉCUTÉS :

La maquette numérique, double virtuel de la construction, contient toutes les informations des dossiers des ouvrages exécutés (DOE). Ce ND5 permet l'extraction et le développement de maquettes de ND6 qui seront supports de l'exploitation (en permettant une GMAO et des interventions ultérieures).

#### ND6 : EXPLOITATION ET MAINTENANCE DES OUVRAGES :

L'objectif du ND6 est de déployer l'information aux utilisateurs en vue de l'exploitation de l'ouvrage construit. Les utilisateurs sont gestionnaires du patrimoine mais aussi intervenants (maintenance, audit...) et occupants. La maquette numérique, double virtuel de la construction, contient toutes les informations des dossiers d'intervention ultérieures sur l'ouvrage (DIUO).

### c2] Identification des niveaux de détail LOD (Level Of Development)

**LOD 100** : (Concept / Esquisse) ; **LOD 200** : (APS/PC) ; **LOD 300** : (PRO/DCE) ; **LOD 350** ; **LOD 400** : (EXE) ; **LOD 500** : (DOE) ; **LOD 600** : ... Facility Management...



**NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE**



**DR1** ▲ Étude 1 : Partenariats - Intégration urbaine ▲ **Question 1** ▲

	Métier	Date d'intervention
Entreprises	-----	-----
Maîtrise d'ouvrage	-----	-----
Maîtrise d'œuvre	-----	-----

**DR1** ▲ Étude 3 : Études préparatoires au choix du pont ▲ **Question 10** ▲

**Pont N° 1**

-----

-----

-----

-----

-----

**Pont N°2**

-----

-----

-----

-----

-----

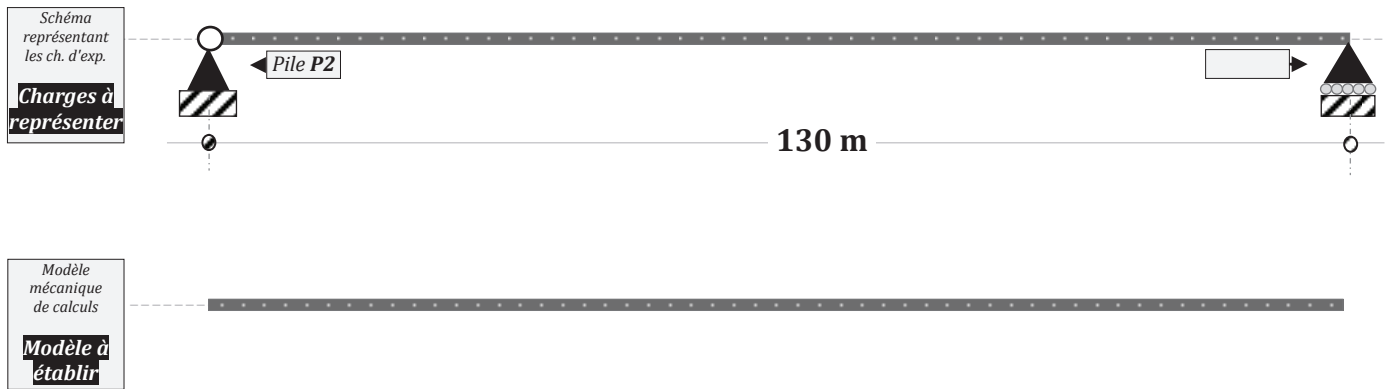
**DR1** ▲ Étude 3 : Études préparatoires au choix du pont ▲ **Question 11** ▲

-----

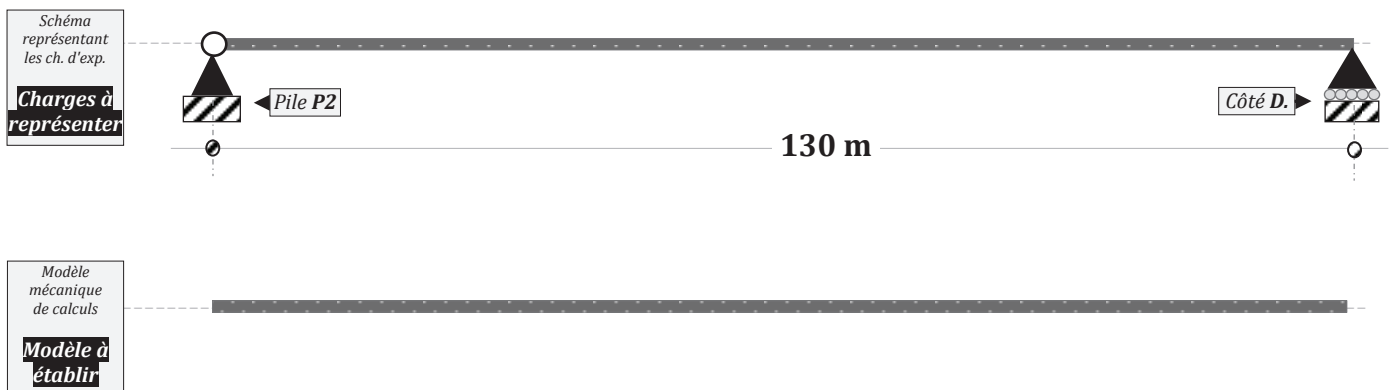
-----

**DR2** ▲ Étude 3 : Études préparatoires au choix du pont ▲ **Question 13** ▲

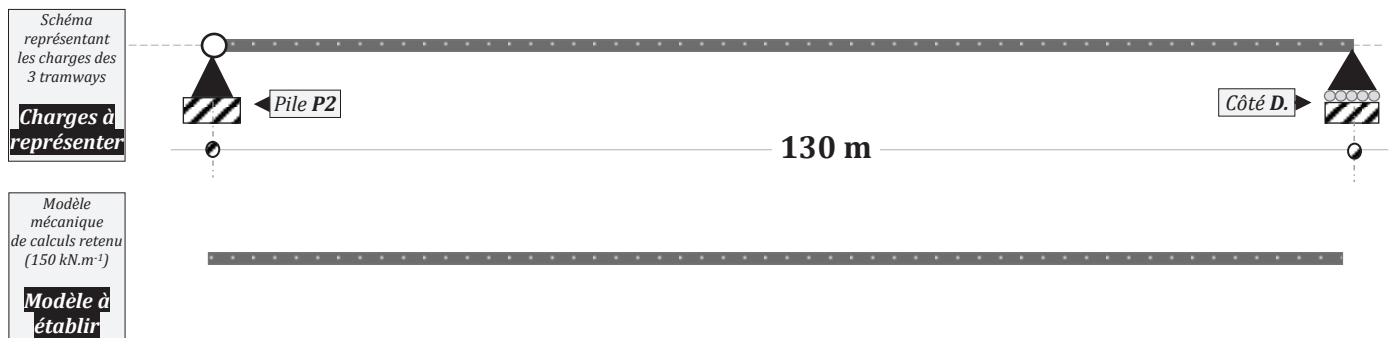
**Cas de charge N°1 "favorable"**



**Cas de charge N°2 "défavorable"**



**DR2** ▲ Étude 3 : Études préparatoires au choix du pont ▲ **Question 14** ▲

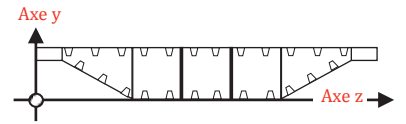


Valeur du  $M_f$  à mi-travée : .....



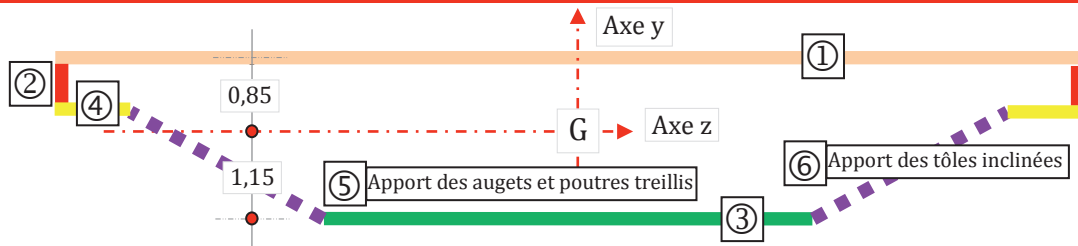
**NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE**

**DR3** ▲ Étude 3 : Études préparatoires au choix du pont ▲ **Question 15** ▲



Unités →									
①									
②									
③									
④									

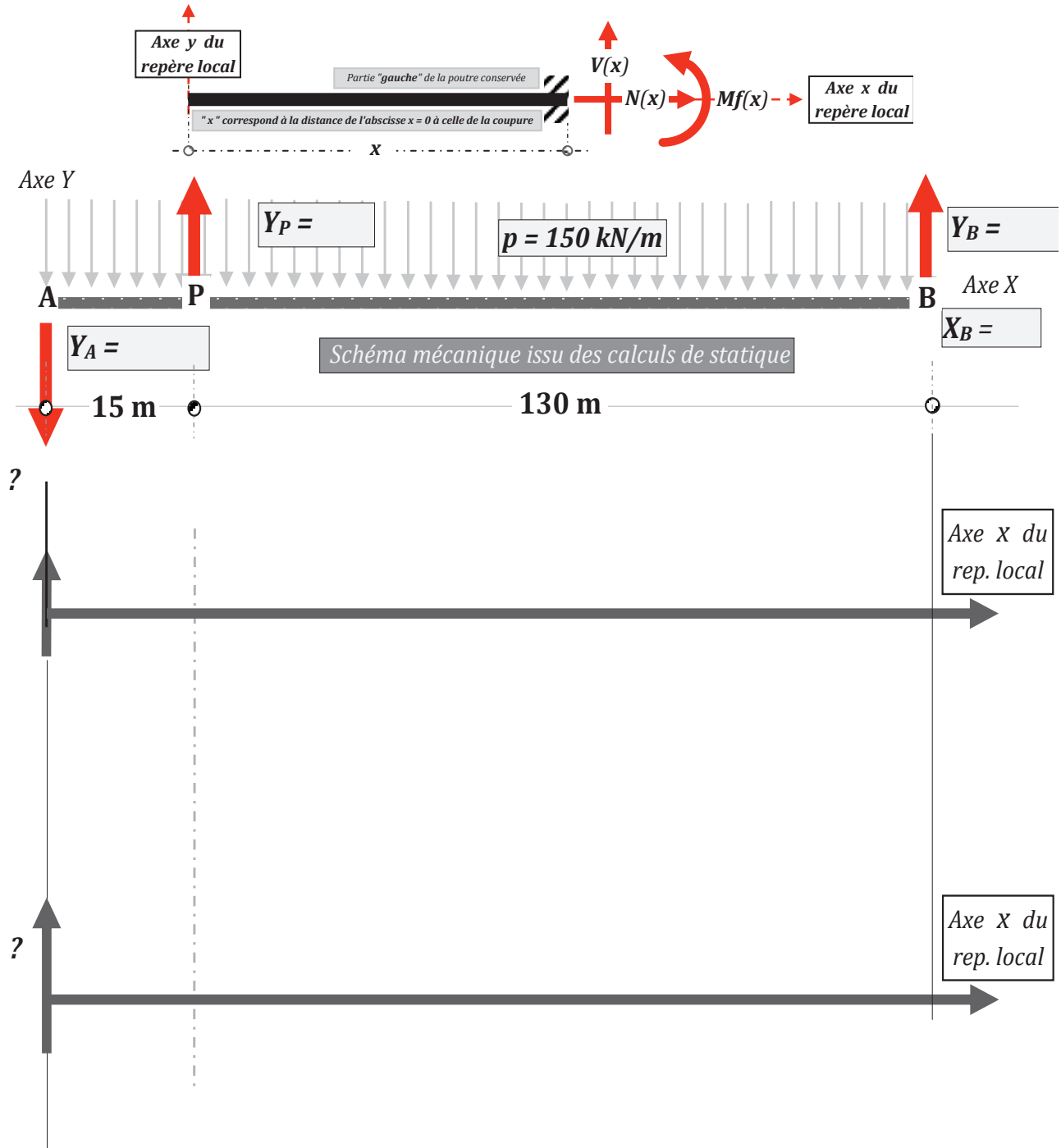
**DR3** ▲ Étude 3 : Études préparatoires au choix du pont ▲ **Question 16** ▲



Forme ↓	Nb	haut	base	S	$bh^3/12$	$y_G$ du cdg	$d^{ist.}/cdg$	$Sd^2$	I cdg
	Unités →	m	m	$m^2$	$m^4$	m	m	$m^4$	$m^4$
S 1									
S 2									
S 3									
S 4									
S 5		Donnée du sujet						<b>0,12250 <math>m^4</math></b>	
S 6	<b>2</b>	<b>0,007 <math>m^4</math></b>	Donnée sujet					<b>0,01400 <math>m^4</math></b>	
<b>Total en <math>m^4</math></b>									

**DR4** ▲ Étude 3 : Études préparatoires au choix du pont ▲ **Question 19** ▲

**Écritures et convention adoptées :** Le repère général de calculs pour la partie statique est un repère orthonormé direct dont l'axe X est confondu avec l'horizontale et noté X, Y, Z (en majuscules). Les actions extérieures au système sont repérées par rapport à leur axe support et indicées par le point d'application. Pour l'étude des éléments de cohésion, la convention résumée ci-dessous sous forme schématique est adoptée. Le repère local, nécessaire aux calculs de résistance des matériaux, est noté x, y, z (en minuscule) et son origine est confondue avec l'extrémité "gauche" de la poutre. Son axe x suit la ligne moyenne formée par les centres de gravité des sections transversales.




---



---



---



---



---

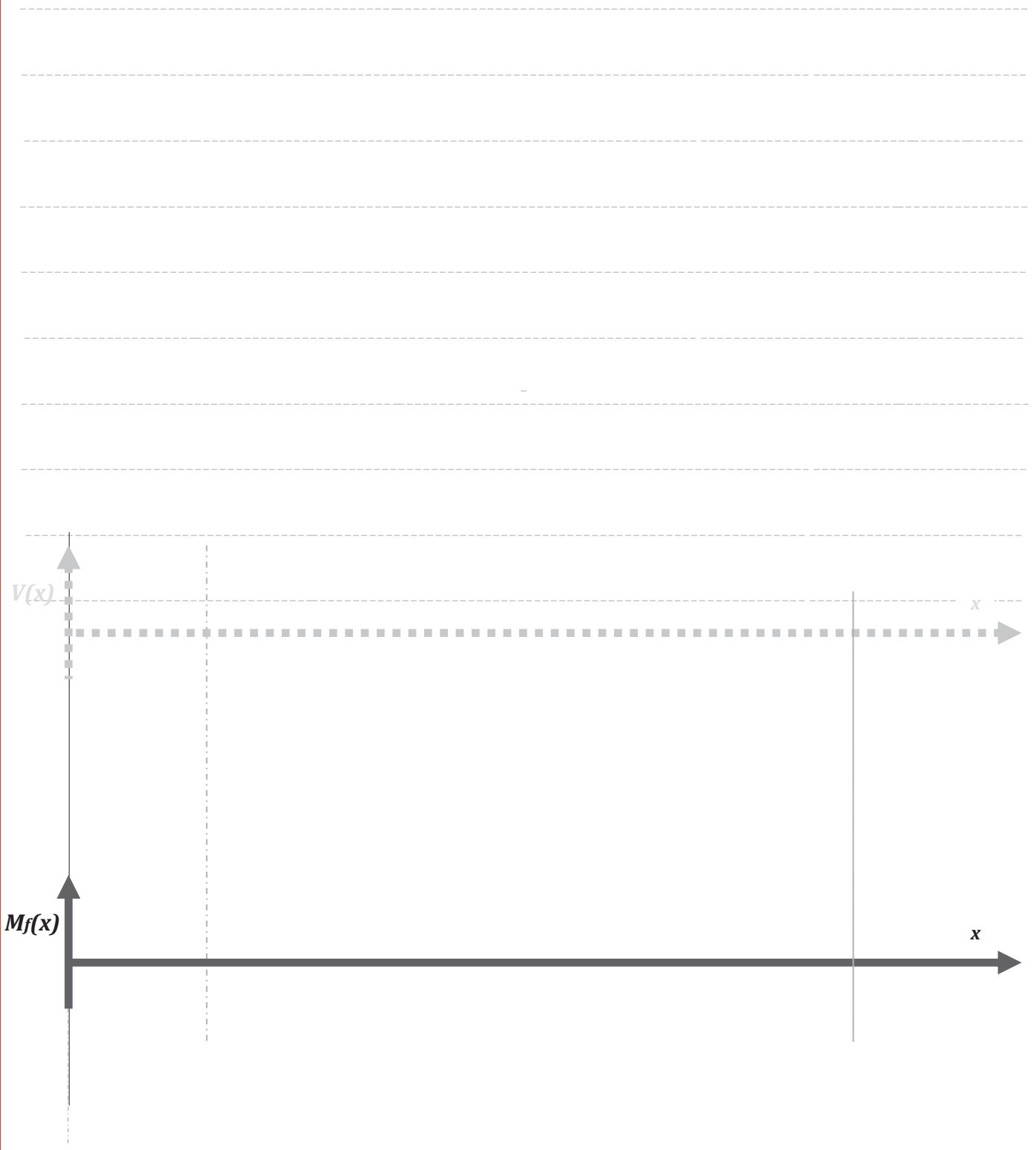


**NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE**



**DR5** ▲ Étude 3 : Études préparatoires au choix du pont ▲ **Question 20** ▲

NB: Le graphe de  $V(x)$  n'est pas exigé.



Représenter la coupe géologique localisée au niveau de la culée C4 avant toute opération de terrassement.  
Sur ce même profil, représenter la semelle et les pieux de la culée C4, ainsi que le niveau de la nappe (noté N.N.P.).  
Représenter également la base drainante mise en œuvre sur l'ensemble de la zone des remblais de la rampe d'accès.

**Profil géologique :**

