



MINISTÈRE  
DE L'ÉDUCATION  
NATIONALE

EAE STI 1

SESSION 2019

## AGREGATION CONCOURS EXTERNE

Section : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Options : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique  
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique  
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions  
sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique

### ÉPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR

Durée : 6 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.*

*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

**Ce sujet comporte :**

- la présentation et le travail demandé pages 1 à 30 ;
- les documents techniques annexes pages 31 à 40 ;
- les documents réponses pages 41 à 43.

**Une lecture préalable et complète du sujet est indispensable.**

Il sera tenu compte de la présentation de la copie, de la qualité de la rédaction (orthographe et syntaxe), en particulier pour les réponses aux questions ne nécessitant pas de calcul.

Si le sujet (les questions ou les annexes) conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, il est demandé au candidat de la (ou les) mentionner explicitement sur la copie.
---

Le sujet comporte 4 parties indépendantes.

### 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.

#### **Option : sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie mécanique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1414A	101	7175

#### **Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie électrique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1415A	101	7175

#### **Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie des constructions**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1416A	101	7175

#### **Option : Sciences industrielles de l'ingénieur et ingénierie informatique**

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAE	1417A	101	7175

# Stade Pierre Mauroy

## 1 PRÉSENTATION

L'étude porte sur un projet mené par l'entreprise Eiffage, un des leaders mondiaux dans le domaine de la construction. Le stade Pierre Mauroy, représenté sur la figure 1, est le premier ouvrage français prévu dès l'origine pour accueillir deux types d'événements, sportifs et culturels. L'ouvrage comporte deux dispositifs mobiles : un toit escamotable acoustique et une pelouse qui se soulève sur sa moitié et se déplace pour venir se superposer à la moitié restante. Dans l'espace libéré, des gradins rétractables supplémentaires situés en dessous du niveau de la pelouse et un nouveau sol complètent la transformation. L'enceinte constitue alors une salle de spectacle de 30 000 places (mode Aréna). La capacité, pour le mode stade, est de 50 000 spectateurs.



Figure 1 : vue d'ensemble du stade

L'étude porte plus particulièrement sur le changement de configuration du plateau mobile supportant la pelouse qui laisse place à une salle de spectacle couverte, comme le montre la figure 2.

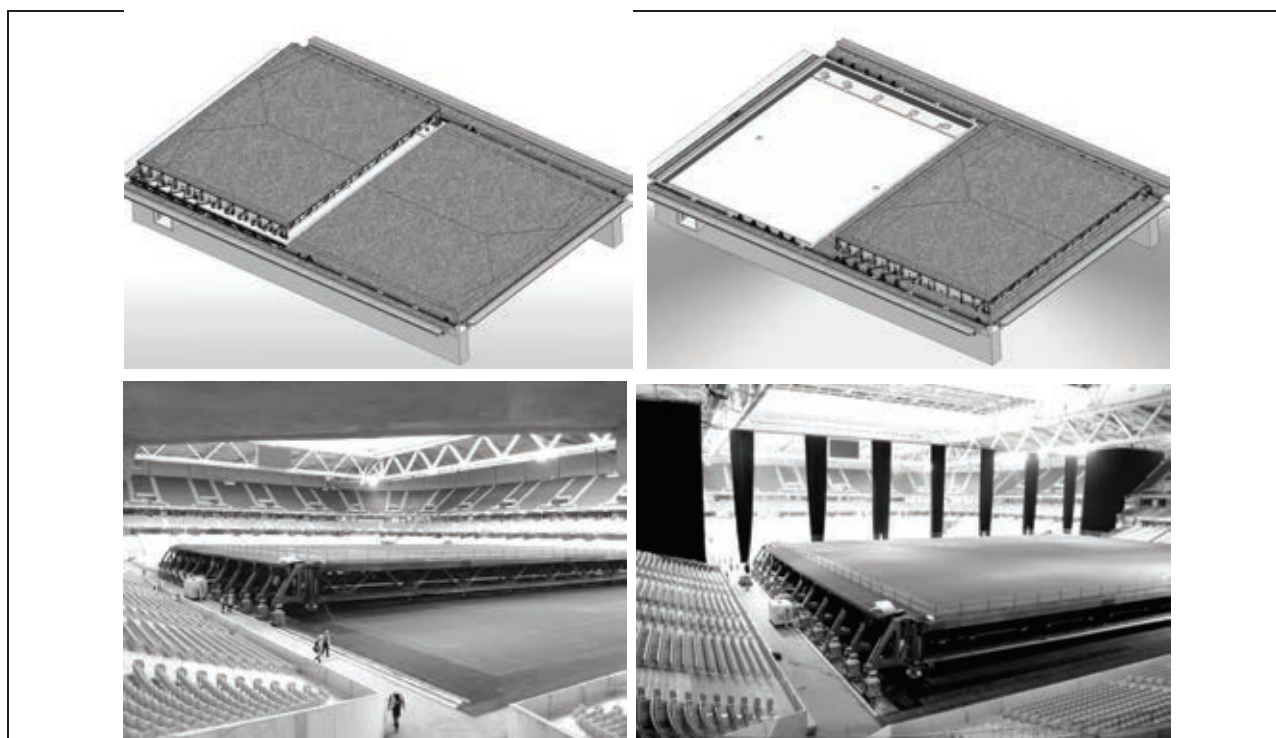


Figure 2 : vue de la phase de translation et de la position finale du plateau

Le plateau est levé de 5,7 m par 12 vérins, puis après transfert des charges sur des chariots rouleurs, translaté de 63 mètres afin de superposer les deux moitiés de pelouse et laisser libre la zone Aréna. Avec toutes les manœuvres annexes (mise en position des tribunes télescopiques et du rideau), il faut environ 24 heures pour changer de configuration.

Les trois phases de changement de configuration sont :

- position posée, le plateau mobile est posé au fond de la fosse sur des vérins de calage (figure 3) ;
- position de levage, le plateau mobile est supporté par des vérins de levage ;
- position de translation, le plateau mobile est supporté par les bras pivotants et se déplace sur ses chariots rouleurs.

L'objectif général de ce sujet est de vérifier divers points de dimensionnement du système dans les phases de levage et de translation pour valider l'exigence relative à la durée de ce changement de configuration. Un diagramme partiel des exigences associées est présenté dans le DT1.

### 1.1 Géométrie d'ensemble du plateau mobile

Le plateau mobile est composé d'une structure métallique qui supporte une dalle orthotrope (elle possède deux plans de symétrie orthogonaux entre eux) constituée d'une tôle de 10 mm d'épaisseur, renforcée par des augets dans sa grande longueur. La hauteur de l'ensemble est 3,4 m, la surface est de 75 m x 55 m. Il est composé de 2 poutres de rive (PRE et PRO), de 12 poutres treillis principales (PP) et de 9 poutres secondaires (PS) (voir DT2, DT3). Cette dalle est étanchée par une feuille antiracine et comporte toutes les réservations nécessaires à ancrer les poteaux de football ou de rugby et à installer l'arrosage de l'aire de grand jeu.

En position posée, le plateau mobile est inséré dans une fosse. Il repose sur des appuis élastiques (vérins de calage) situés aux intersections des poutres, principales et secondaires, et sur des vérins de levage, sous les poutres de rive (figure 3).

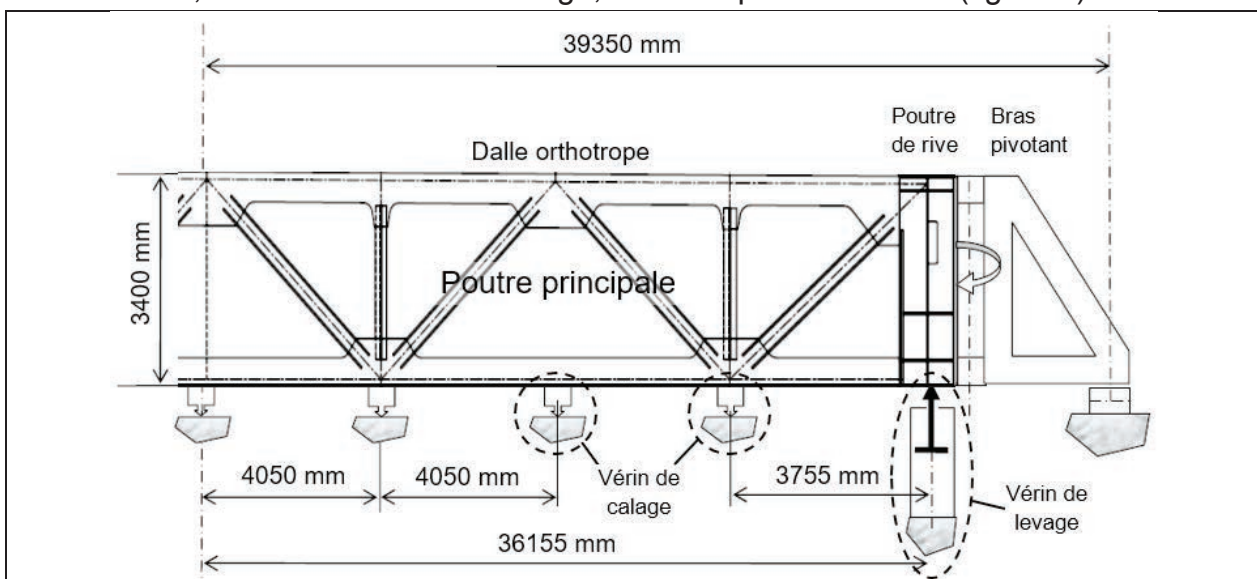
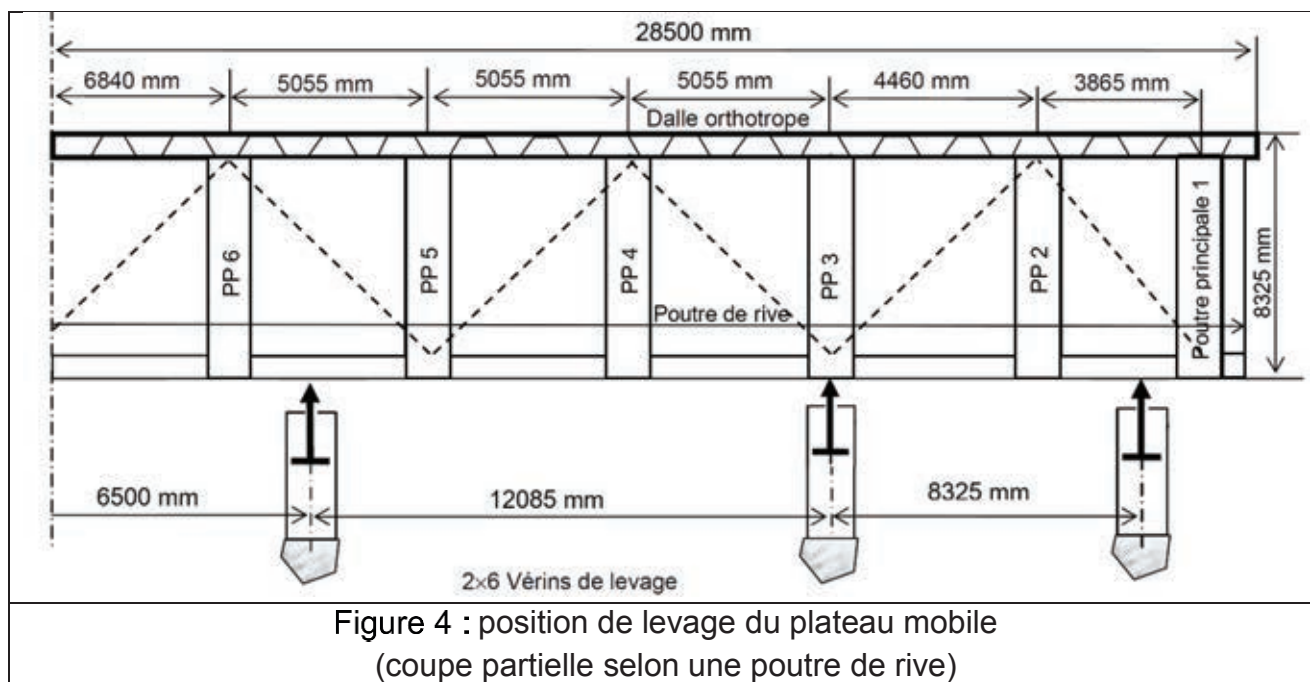


Figure 3 : position posée, plateau mobile inséré dans la fosse (coupe partielle selon une poutre principale)



## 1.2 Le levage du plateau

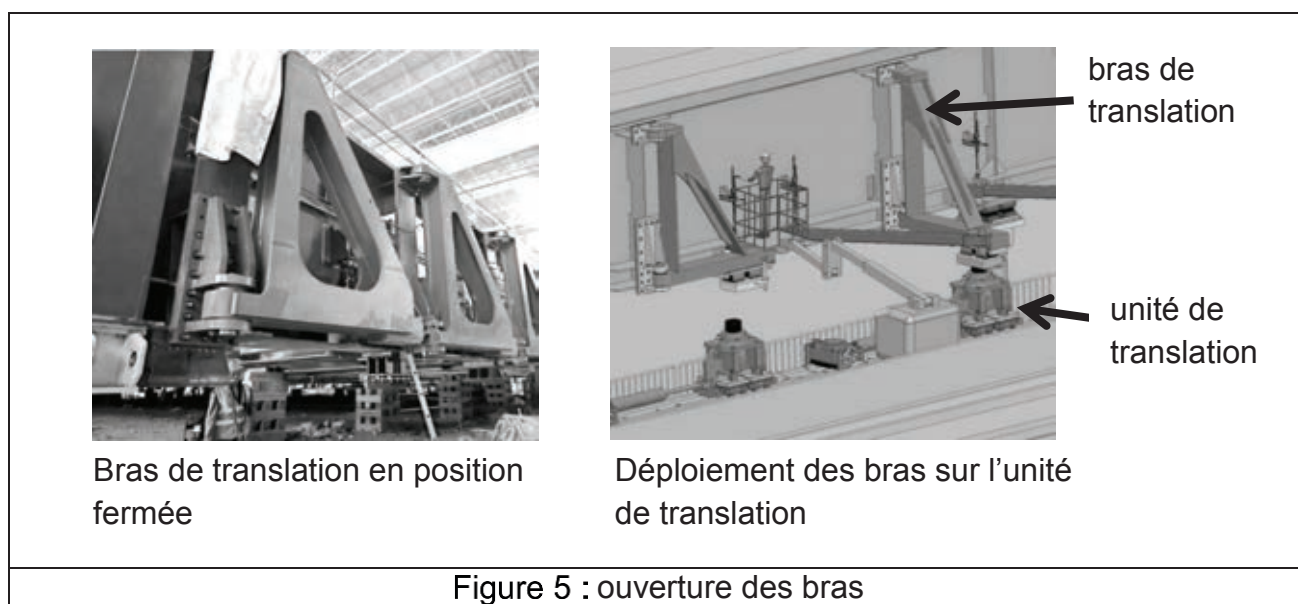
Le plateau, recouvert de pelouse, pèse 5 250 tonnes. Douze vérins permettent d'effectuer la phase de levage. Ils sont répartis en deux ensembles de six vérins, à l'est et à l'ouest, au droit des poutres de rive comme décrit sur la figure 4 et le DT2.



Il s'agit de vérins simple-tige double-effet, de 1 050 tonnes de poussée chacun. Ce choix permet de poursuivre une manœuvre malgré la défaillance totale d'un vérin par côté.

## 1.3 La translation du plateau

Une fois le plateau tenu en position haute, les bras de translation sont ouverts et l'ensemble plateau est posé sur des unités de translation (figures 5 et 6).



Chaque unité de translation est composée d'un moteur hydraulique, d'un vérin et d'un chariot rouleur.



Figure 6 : plateau en cours de translation sur les chariots rouleurs

Le sujet s'articule autour de 4 parties qui s'intéressent à des contraintes de fonctionnement présentant chacune un haut niveau de criticité dans la phase de changement de configuration de l'ouvrage, en moins de 24 heures :

- étude de la structure du plateau mobile ;
- étude du cycle de chauffe du fluide du système hydraulique de levage ;
- étude du levage du plateau mobile ;
- étude de la commande du système hydraulique de translation du plateau.

La synthèse générale porte sur la validation de l'exigence liée au temps de changement de configuration.

## 2 ÉTUDE DE LA STRUCTURE DU PLATEAU MOBILE

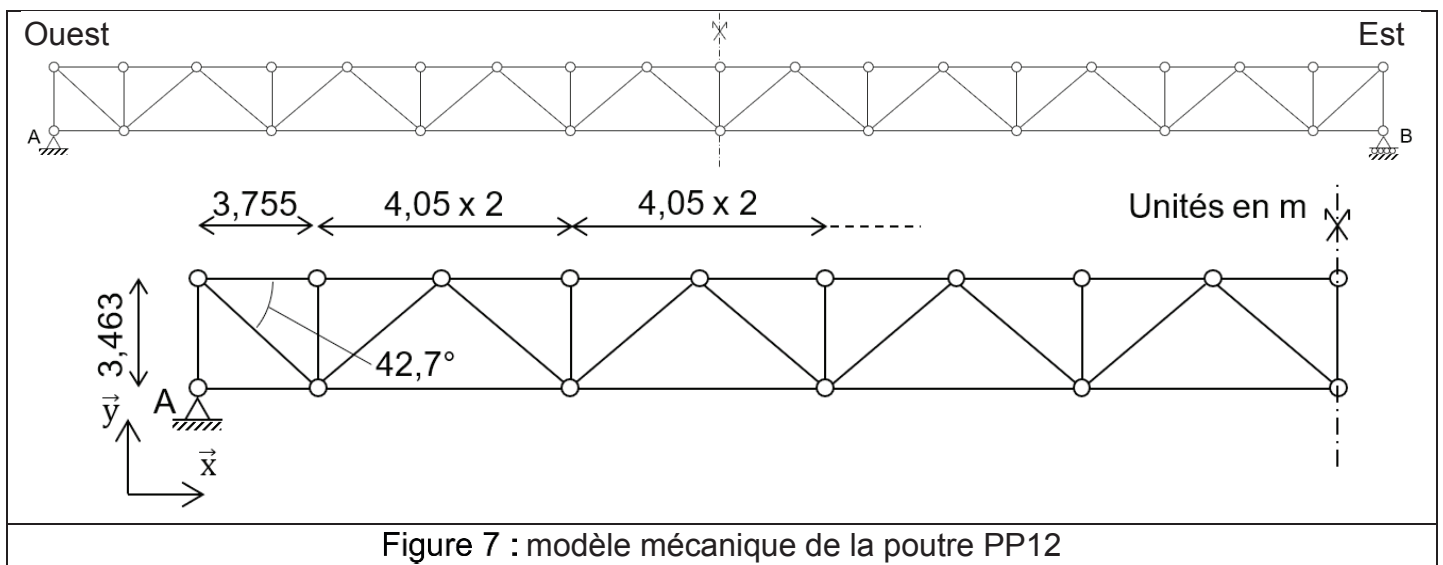
L'objectif de cette partie est de valider des choix technologiques structurels au regard des critères imposés par des exigences de résistance à la rupture, pendant la phase de levage.

### 2.1 Prédimensionnement d'une poutre principale du plateau

Cette partie propose de prédimensionner partiellement la poutre principale treillis PP12 (voir DT2 et DT3). L'objectif de cette étape est de valider le choix des éléments constitutifs de la poutre. Une fois cette étape réalisée, la structure sera étudiée sous différents cas de chargement, avec un modèle aux éléments finis.

L'étude du prédimensionnement de la PP12 est menée lors de la configuration de levage du plateau. C'est lors de cette phase que la poutre est la plus sollicitée.

Pour cette étude, la poutre PP12 (DT3) est modélisée dans le plan  $(O, \vec{x}, \vec{y})$ , par un treillis plan, constitué de barres et de nœuds articulés, comme sur la figure 7. Le treillis est considéré symétrique en géométrie et en chargement. L'appui en A, à l'ouest, est une articulation (pivot selon  $\vec{z}$ ) et celui en B, à l'est, un appui simple (liaison ponctuelle selon  $\vec{y}$ ). Les barres verticales (montants) au droit des appuis sont les poutres de rives. Les efforts extérieurs sont appliqués aux nœuds.



On admet que:

- les nœuds rigides de la poutre réelle, sont considérés, en première approche de prédimensionnement, comme des articulations ;
- le modèle proposé est isostatique ;
- les sollicitations dans les barres du modèle sont des efforts normaux.

#### 2.1.1 Évaluation des charges sur la poutre PP12

L'étude propose d'évaluer les forces extérieures, verticales, qui s'appliquent sur chacun des nœuds du treillis.

Lors du levage, le plateau est étudié avec la combinaison de charges majorées suivante :  $1,33 \text{ CP} + 1,5 \text{ S}$ , où CP sont les charges permanentes et S la surcharge climatique.



Les hypothèses suivantes sont appliquées :

- les charges d'exploitation et celles dues aux déformations thermiques ne sont pas prises en compte ;
- le poids de la terre végétale, de la pelouse, du système de drainage et de la tôle s'applique verticalement sur les nœuds supérieurs du treillis avec un coefficient majorateur de 1,33 ;
- la surcharge climatique (neige) s'applique verticalement sur les nœuds supérieurs du treillis avec un coefficient majorateur de 1,5 ;
- les poids des poutres de rive, des poutres secondaires et des poutres principales s'appliquent verticalement sur les nœuds inférieurs du treillis avec un coefficient majorateur de 1,33 ;
- dans cette phase de levage, les poutres secondaires n'ont qu'un rôle de contreventement, elles ne participent pas au transfert des charges verticales.
- les efforts extérieurs sont appliqués aux nœuds et sont constants en travée :  
 $\|\vec{F}_{1-1}\| = \|\vec{F}_{1-2}\| = \dots = \|\vec{F}_{1-n}\|$  et  $\|\vec{F}_{4-1}\| = \|\vec{F}_{4-2}\| = \dots = \|\vec{F}_{4-n}\|$

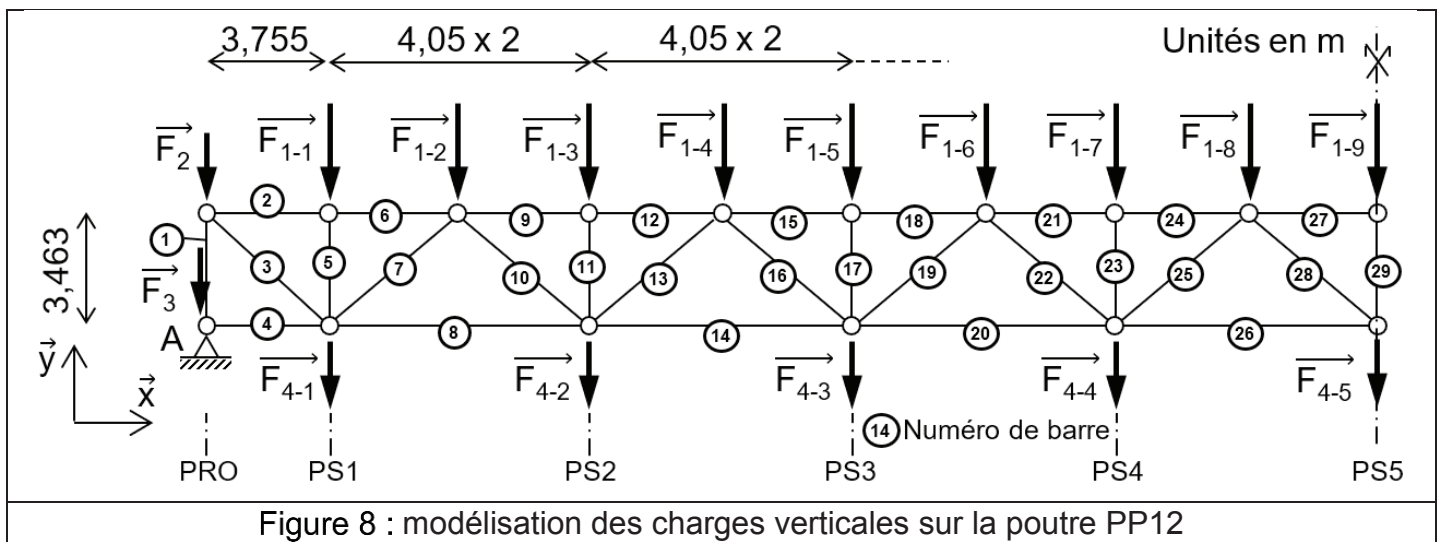


Figure 8 : modélisation des charges verticales sur la poutre PP12

Données :

- plan d'implantation des poutres et plan des poutres (DT2 et DT3) ;
- masse de la terre végétale, de la pelouse, du système de drainage et de la tôle : 843 kg par m<sup>2</sup> ;
- la poutre principale PP12 porte la demi surface entre PP11 et PP12 et la partie en porte à faux de 2283 mm.
- masse de la surcharge climatique (neige) : 50 kg par m<sup>2</sup> ;
- masse de la poutre principale PP12 : 1 424 kg par mètre linéaire de poutre ;
- masse des poutres secondaires PP12 : 97 kg par mètre linéaire de poutre ;
- masse de la poutre de rive : 1 993 kg par mètre linéaire de poutre ;
- accélération de la pesanteur :  $g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

**Q1)** Évaluer et justifier les normes des forces  $\vec{F}_{1-2}$  et  $\vec{F}_2$  en kN en tenant compte des coefficients majorateurs.

Les normes des forces  $\vec{F}_3$  et  $\vec{F}_{4-i}$  sont respectivement 111,5 kN et 152,5 kN.

## 2.1.2 Détermination des efforts dans les barres du treillis

**Q2)** À partir des résultats précédents, déterminer les réactions d'appuis en A et B.

**Q3)** Trouver par un calcul analytique, l'intensité des efforts normaux dans la diagonale la plus sollicitée, soit la barre 3. Préciser si la barre est comprimée ou tendue.

Aide : La méthode la plus rapide de résolution est la méthode des sections de Ritter : une fois les réactions d'appuis connues, effectuer une découpe imaginaire qui sépare la structure en deux parties distinctes, de telle façon que l'une des deux parties au moins soit caractérisée par un maximum de trois efforts inconnus. En d'autres termes, la section ne peut pas couper plus de trois barres. Puis écrire les équations d'équilibre de l'une des deux parties pour déterminer les efforts normaux inconnus.

La figure 9 donne les valeurs des intensités en kN des efforts normaux dans les barres du treillis. Conventionnellement, les valeurs positives représentent les barres tendues, les valeurs négatives représentent les barres comprimées.

Barres																		
Memb. Sup.	2	-2 625	6	-2 626	9	-7 220	12	-7 220	15	-10 504	18	-10 504	21	-12 474	24	-12 474	27	-13 131
Diagonale	3	3 571	7	-3 180	10	2 866	13	-2 316	16	2 002	19	-1 453	22	1 138	25	-589	28	275
Memb. Inf.	4	0	8	5 044	8	5 041	14	8 982	14	8 982	20	11 608	20	11 608	26	12 922	26	12 922
Montant	1	-2 640	5	-204			11	-204			17	-204			23	-204		

Figure 9 : intensités en kN des efforts normaux dans les barres du treillis

## 2.1.3 Contrôle des choix de prédimensionnement :

La figure 10 présente les profils choisis des barres 27, 26, 3, 23 et leur section.

Dans le cas de la membrure supérieure 27, la barre du modèle est réellement constituée de plusieurs éléments qui assurent la rigidification de la dalle du plateau : la tôle de 10 mm d'épaisseur, les augets et une âme qui assure la liaison avec le reste du treillis (figure 10).

La membrure inférieure 26 est constituée d'un profilé en T de 1,08 m de large (selon  $\bar{z}$ ).

Les diagonales choisies pour le treillis sont des HEB 180, dans les zones les moins sollicitées, et des HEM 240 dans les zones proches des rives (tronçon 1), qui concernent la barre 3 (voir DT3)

Les montants (23 inclus), peu sollicités, sont constitués de deux UPE200.

Les caractéristiques mécaniques des aciers de la charpente métallique S355 sont les suivantes :

- masse volumique :  $\rho_a = 7,85 \text{ t}\cdot\text{m}^{-3}$
- module d'élasticité longitudinale :  $E = 210\,000 \text{ MPa}$
- module de cisaillement :  $G = 81\,000 \text{ MPa}$
- coefficient de Poisson :  $\nu = 0,3$
- limites d'élasticité :  $f_y = 355 \text{ MPa}$
- limites à la rupture :  $f_u = 470 \text{ MPa}$

Le coefficient de sécurité vis-à-vis de la rupture pour le prédimensionnement doit être supérieur à 2,5.

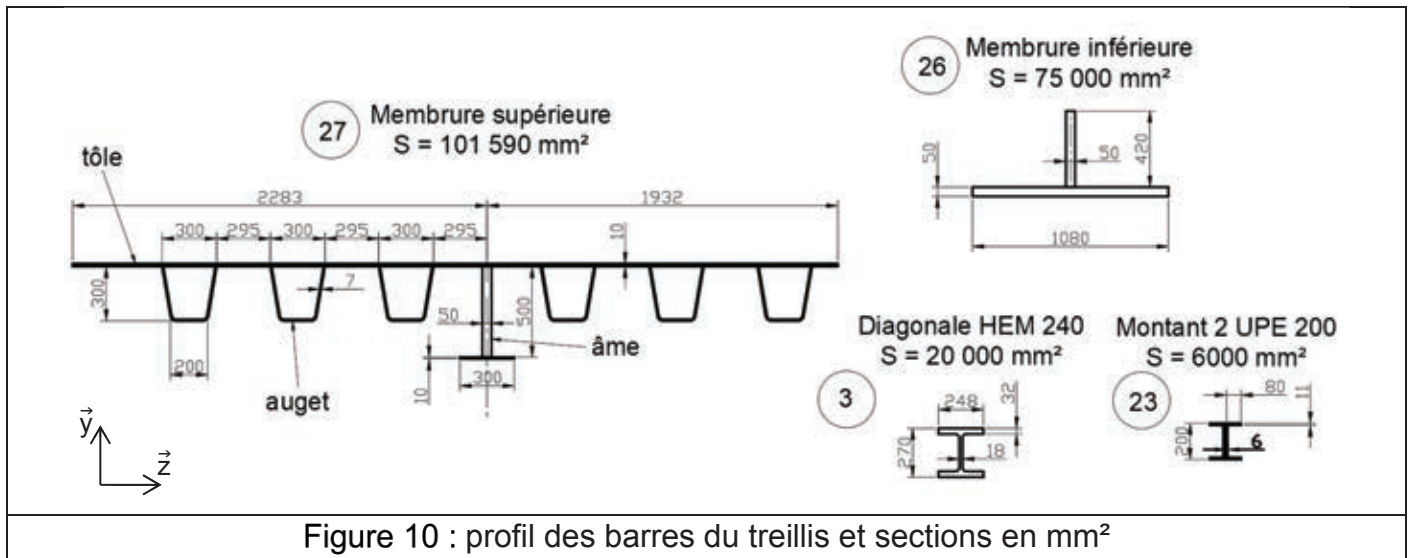


Figure 10 : profil des barres du treillis et sections en mm<sup>2</sup>

Les contraintes normales  $\sigma$  dans les barres 26 et 23 sont respectivement 172,3 MPa et -34 MPa.

**Q4)** Évaluer les contraintes normales  $\sigma$  dans les barres 27 et 3. En déduire le coefficient de sécurité de prédimensionnement des quatre éléments et conclure vis-à-vis des exigences sur le coefficient de sécurité.

**Q5)** Dans le cadre d'une démarche complète, il reste à contrôler d'autres aspects mécaniques. Citer 2 phénomènes mécaniques à évaluer et à contrôler.

## 2.2 Simulation et analyse des sollicitations dans la poutre principale PP12 à l'aide d'un modèle aux éléments finis

Le logiciel utilisé pour réaliser cette simulation utilise la convention suivante :

- $\sigma$ , contrainte normale dans les profilés :  $\sigma > 0$  en compression
- $\tau$ , contrainte tangentielle dans les profilés.

Cette étude a pour objet d'analyser les contraintes ainsi que les déplacements en situation de levage.

Ces sollicitations et contraintes seront utilisées dans les notes de justification des éléments.

Le modèle aux éléments finis utilise des mailles de type poutre à deux nœuds ou coques à trois ou quatre nœuds. Les calculs sont réalisés dans le domaine élastique.

La dalle est modélisée par une coque d'épaisseur constante 10 mm sur laquelle sont rapportés, via un décalage de fibre moyenne, des augets.

La modélisation de la structure est présentée ci-contre. Les différents profilés constituant cette structure sont définis selon le prédimensionnement.

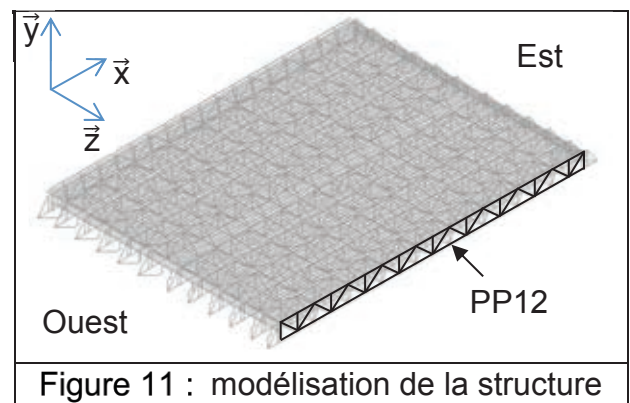


Figure 11 : modélisation de la structure

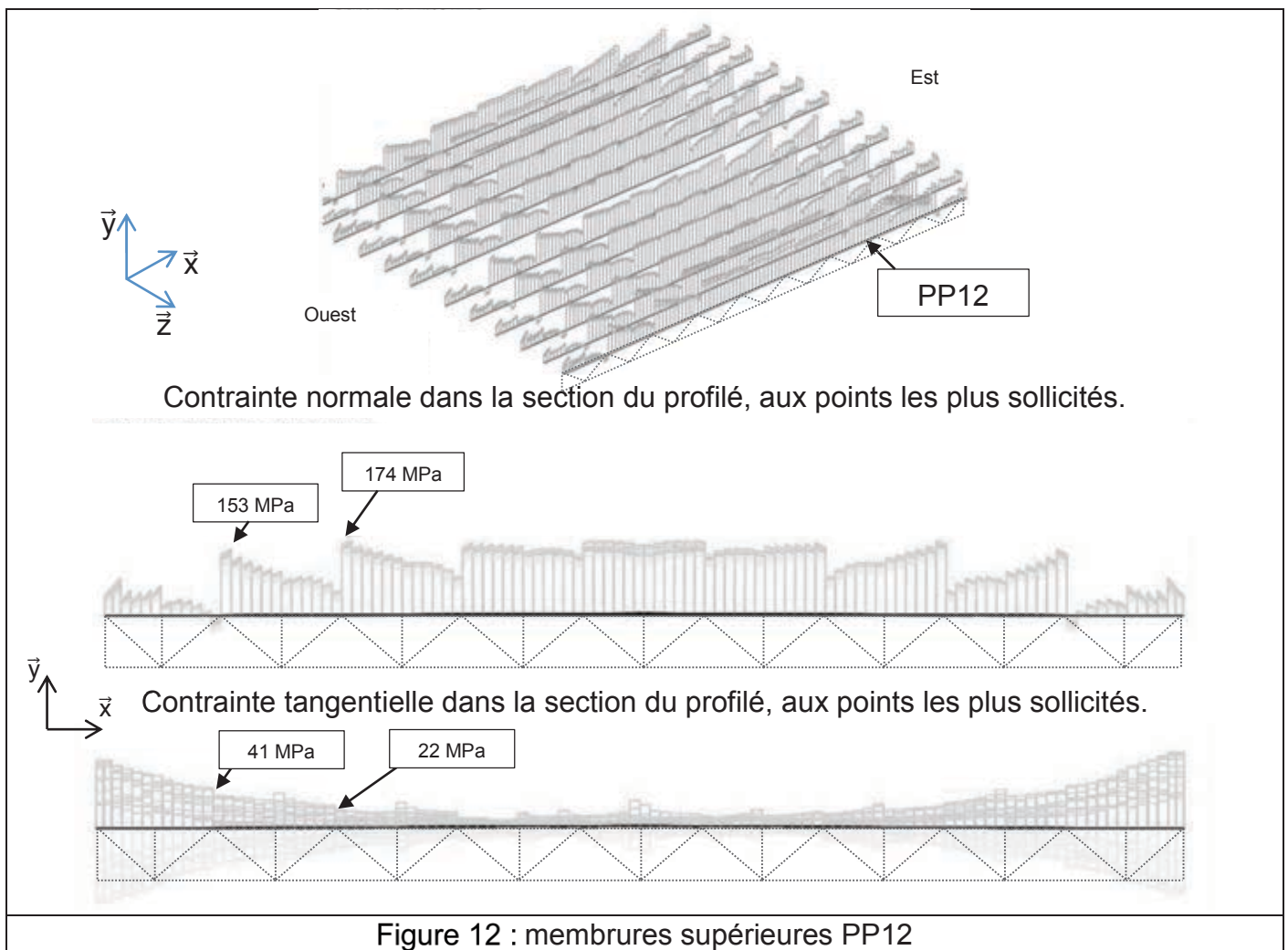
### 2.2.1 Combinaisons de chargement lors du levage

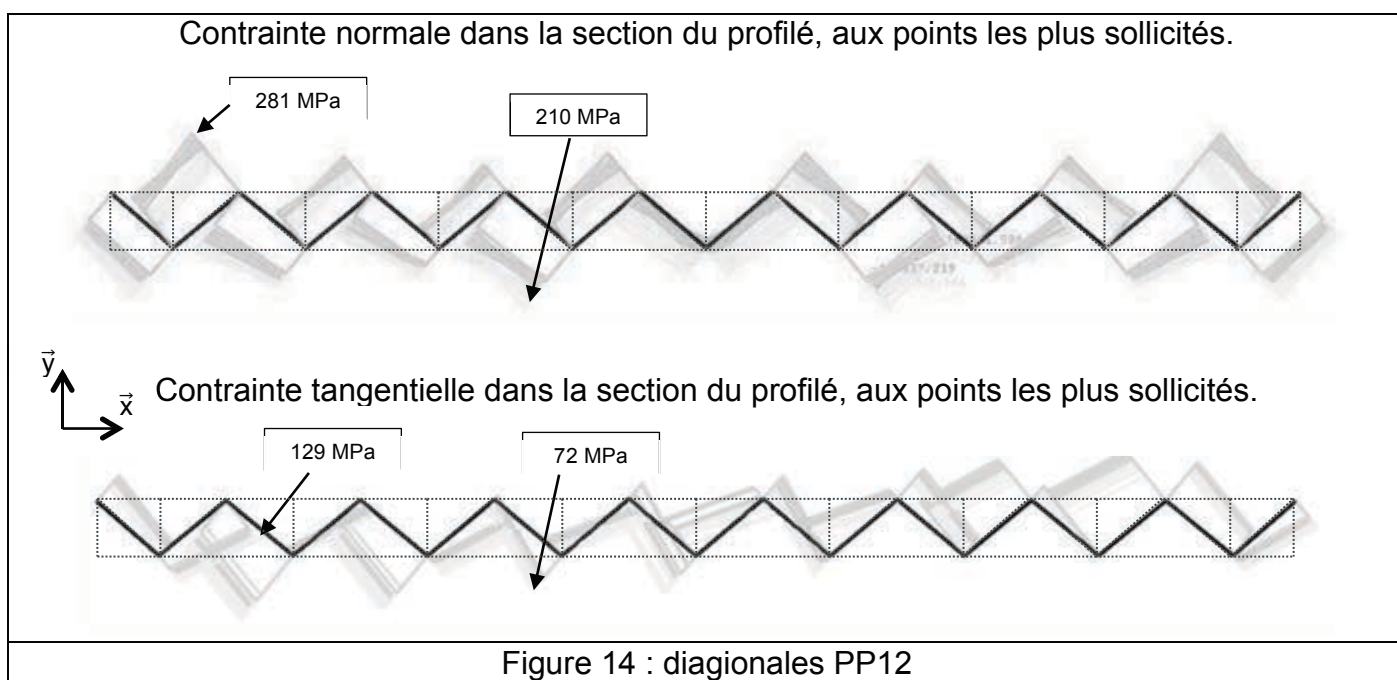
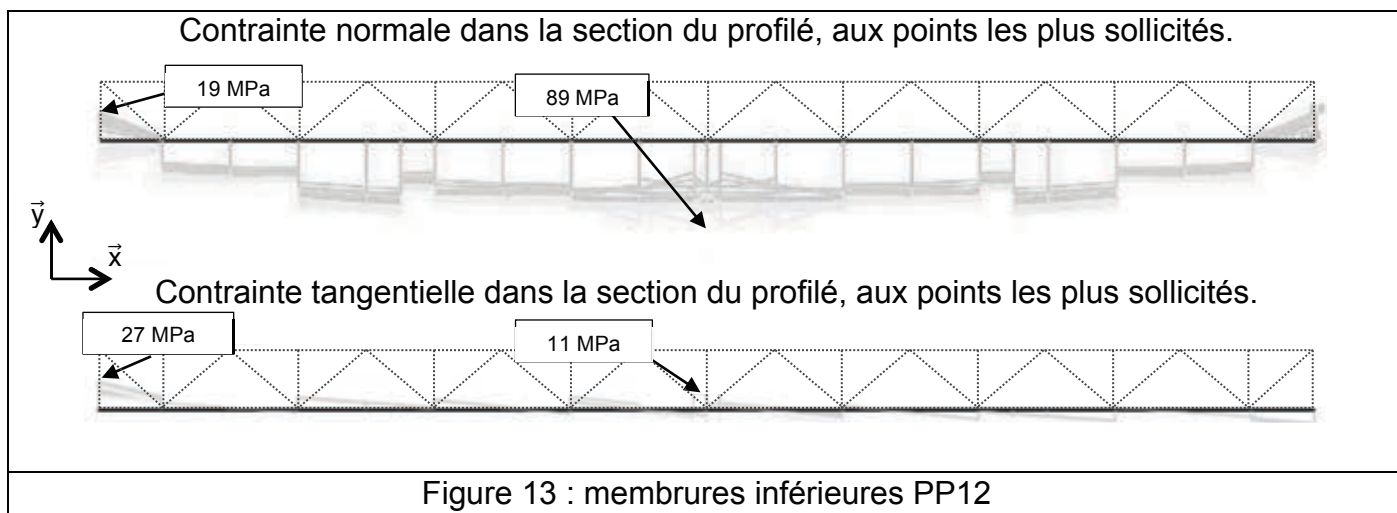
Pour l'étude des sollicitations dans le plateau (et dans la poutre PP12), les combinaisons de plusieurs configurations de chargements sont étudiées :

- le plateau est soulevé par 2 x 6 vérins hydrauliques monotiges placés sous les deux poutres de rive. Les appuis verticaux exercés par ces vérins sur le plateau, seront étudiés dans deux configurations : appuis verticaux infiniment rigides et appuis verticaux élastiques avec une raideur de  $63,5 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-1}$  ;
- une configuration en situation normale de levage (tous les vérins fonctionnent) et 48 configurations en situation dégradée où 1 ou 2 vérins (1 sur chaque rive) ne fonctionnent pas ;
- quatre configurations d'efforts horizontaux et verticaux au niveau des pions de centrage. Ces pions permettent le repositionnement du plateau lors de sa fermeture en fond de fosse.

### 2.2.2 Résultats des simulations :

Les résultats des simulations sont fournis dans les figures suivantes, sous forme de fuseaux qui donnent les extremums de contrainte dans les éléments de la PP12 en fonction des différentes combinaisons de chargement. Les montants, peu sollicités, ne sont pas étudiés.





Cette simulation permet de vérifier le dimensionnement des éléments de la poutre PP12 en déterminant la contraente équivalente de Von Mises.

Rappel : Le critère de résistance consistera à limiter la contraente équivalente obtenue au point le plus critique de la section à la valeur de la limite élastique du matériau de la section :

$$\sigma_{eq\_max} = \sqrt{\sigma_{max}^2 + 3 \cdot \tau_{max}^2} < f_y$$

où  $\sigma_{max}$  et  $\tau_{max}$  sont les contraentes normales et tangentielles, au point le plus sollicité et  $f_y$  la limite élastique de l'acier.

**Q6)** D'après les résultats des simulations, vérifier que le critère de Von Mises est respecté pour l'ensemble des éléments étudiés. Conclure sur d'éventuels éléments à redimensionner.



- Q7)** Le bureau d'étude propose de remplacer les diagonales en HEM 240, qui ont une section de 200 cm<sup>2</sup>, par des poutrelles HEM 280, qui ont une section de 240 cm<sup>2</sup>, et de relancer les simulations. Justifier cette démarche en considérant que ce changement modifie le poids de la structure de façon négligeable.

### 2.2.3 Synthèse

- Q8)** À partir du DT1, rappeler les exigences à respecter pour la validation des choix des éléments de charpente constitutifs de la poutre PP12. Préciser quelle(s) exigence(s) est(sont) respectée(s) par la solution initiale. Rappeler les solutions proposées pour permettre de remplir l'(es) exigence(s) non respectée(s). Justifier l'intérêt de la simulation par un modèle aux éléments finis par rapport au modèle de treillis simplifié.

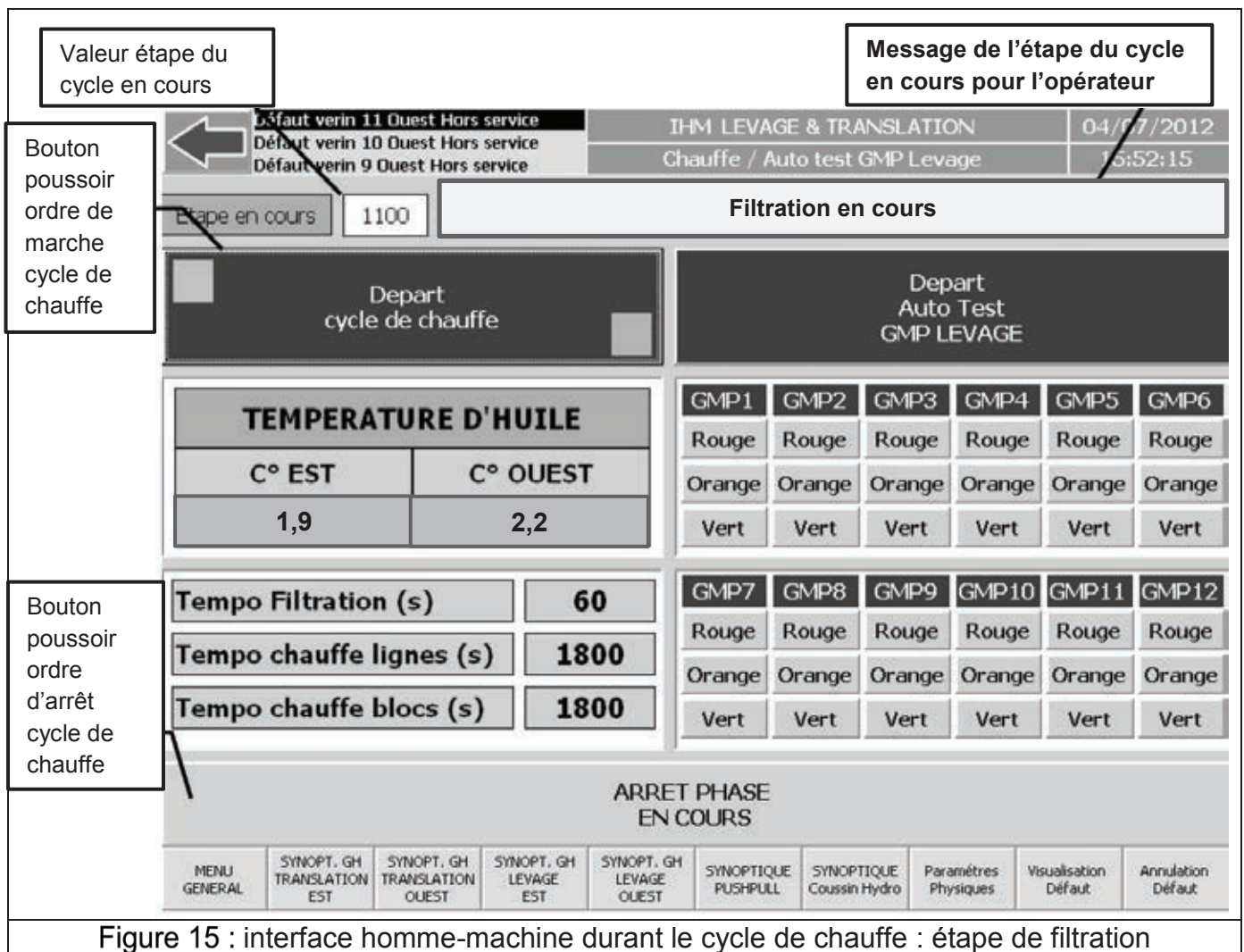
### 3 ÉTUDE DU CYCLE DE CHAUFFE DU FLUIDE DU SYSTEME HYDRAULIQUE DE LEVAGE

#### 3.1 Étude du cycle de chauffe au sein du cycle de levage

*L'objectif de cette partie est de valider l'exigence relative à l'interface homme-machine durant le cycle de chauffe nécessaire pour effectuer un changement de configuration.*

Concernant la phase de préparation, le cycle de chauffe représente une des durées les plus impactantes, comme le montre le diagramme de Gantt, figure 32. Il s'agit pour l'opérateur de pouvoir commander et suivre cette mise en chauffe, durant le cycle de levage, par le biais d'un écran de contrôle tactile. Les phases de levage et les données relatives à cette étape sont décrites sur le DT4.

La figure 15 présente l'interface homme-machine (IHM) pour une étape particulière du cycle de chauffe, celle de filtration :



Le cycle de chauffe est nécessaire pour mettre en température l'ensemble des circuits hydrauliques afin de limiter les pertes de charge plus importantes à basse température.

Les conditions de fonctionnement d'un cycle de chauffe en mode opérateur pour la rive Est sont les suivantes :

	Mode operateur	Capteurs associés
<b>Conditions Permanentes</b>	Marche groupe motopompe de gavage Est Fin descente en position basse rive Est /Défaut capteur temp. dans salle hydraulique Est Contrôle temp. huile dans salle hydraulique Est < 25°C	GMPGAV_EST EST_BAS T_EST T_EST_25
<b>Ordre de Marche</b>	BP Ordre de marche cycle de chauffe	BP_OMCC
<b>Ordre d'arrêt</b>	BP Ordre d'arrêt cycle de chauffe	BP_OACC

Le séquençage des étapes liées au cycle de chauffe est le suivant :

N°	Consigne		GMP GAV	EV_ RD	EV_ SA	EV_ N	EV_ IG	GMP HP
1	-	Arrêt	0	0	0	0	0	0
2	1 min	Filtration	1	0	0	0	0	0
3	12°C	Chauffage réservoir	1	1	0	0	0	0
4	12°C durant 30 min	Chauffage lignes	1	1	1	0	1	0
5	12°C durant 30 min	Chauffage pompes et blocs	1	1	1	1	0	1
6	PS21 durant 1 min	Décompression ligne de gavage	0	0	0	0	1	0
7	-	Fin cycle chauffe	0	0	0	0	0	0

**Q9)** Expliquer à quel(s) moment(s) du cycle de levage présenté sur le DT4, il peut y avoir risque d'échauffement du fluide. Déterminer alors les conséquences d'un échauffement éventuel sur les conditions permanentes présentées ci-dessus.

Une fois la température souhaitée atteinte dans le réservoir Est, il s'agit de mettre en chauffe les tuyauteries des lignes entre la centrale de gavage et les points de levage répartis sur une longueur de 75 m. Le volume linéaire du circuit de gavage et de son retour est d'environ 2,1 l.m<sup>-1</sup>. Pour le retour, s'ajoute au circuit principal un drain de volume linéaire d'environ 4,6 l.m<sup>-1</sup>. Le débit lors du chauffage des lignes est estimé à 260 l.min<sup>-1</sup> et le volume total des lignes doit être parcouru 10 fois pour assurer une température homogène.

**Q10)** Déterminer le temps nécessaire au chauffage des lignes. Comparer avec le temps indiqué dans la description des étapes du programme du cycle de chauffe et sur l'IHM de la figure 15. Justifier l'écart éventuel.

**Q11)** Compléter sur le DR1 le logigramme de vérification des conditions permanentes du fonctionnement d'un cycle de chauffe pour la rive Est en faisant apparaître les messages à afficher sur l'écran de l'IHM de façon à guider l'opérateur dans le suivi des étapes.

**Q12)** En vue de la mise en place d'un algorithme de commande du cycle de chauffe de la rive Est, compléter la liste de variables proposées ci-dessous d'après les

documentations techniques précédentes et la figure 15, en précisant à chaque fois leur nature.

### Variables

BP\_OMCC (Bouton Poussoir Ordre de Marche Cycle de Chauffage) : binaire

tempo\_chauffage\_lignes : entier

**Q13)** De la même manière, compléter ci-dessous la liste des conditions initiales nécessaires à la mise en place d'un algorithme de commande du cycle de chauffage de la rive Est.

### Conditions initiales

BP\_OMCC=0

tempo\_chauffage\_lignes = 1800

**Q14)** Proposer un algorithme permettant uniquement la gestion de l'état de BP\_OMCC.

**Q15)** Proposer un algorithme partiel du cycle de chauffage (étapes 1, 2 et 3 seulement du tableau de séquençement) en prenant en compte les messages à afficher sur l'IHM. Vous disposez d'une fonction temps « time » qui renvoie l'heure en s.

## 3.2 Étude du capteur de température et de la transmission de données

*L'objectif de cette partie est de vérifier la cohérence des choix technologiques en lien avec des exigences de mesure de température au cours du cycle de chauffage et de transfert de données vers l'automate déporté.*

La mesure de la température de l'huile dans le réservoir de la centrale de gavage est réalisée par un capteur thermorésistif.

La sonde mise en place par le bureau d'étude est de type Pt100 et est associée à un conditionneur de signal pour une transmission analogique entre le point de mesure et l'automate de contrôle déporté situé à 150 m.

Le diagramme des exigences impose une mesure de température de l'huile comprise entre - 10 °C et 70 °C.

La mesure est réalisée au moyen d'un montage type pont de Wheatstone présenté sur la figure 16. Soient  $U_{cc}$  la tension continue d'alimentation et  $U_{mes}$  la tension de sortie de ce dispositif.

La résistance électrique de la sonde évolue selon la loi :

$$R_{Pt100}(\theta) \approx R_0 \times (1 + a \times \theta)$$

avec

$$R_0 = 100 \Omega$$

$$a = 3,98.10^{-3} \Omega \cdot ^\circ C^{-1}$$

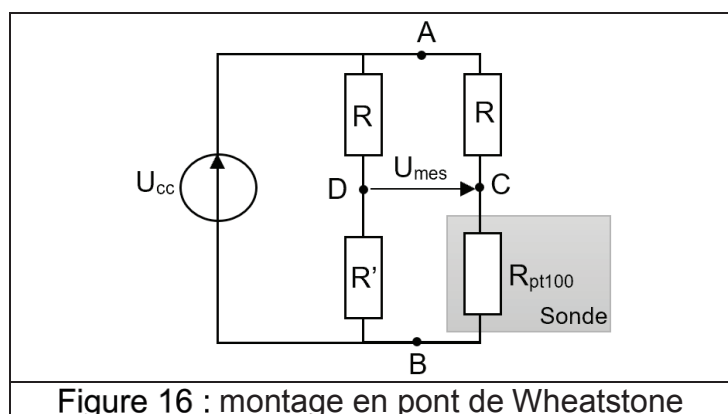


Figure 16 : montage en pont de Wheatstone

**Q16)** Déterminer la valeur à donner à  $R'$  afin que la tension de sortie du pont  $U_{mes}$  soit nulle pour la valeur minimale de température de  $-10^{\circ}\text{C}$ . On donne  $R = 10\text{ k}\Omega$ .

Le signal électrique issu de ce montage étant de faible amplitude, un circuit de conditionnement (amplification et filtrage) assure l'adaptation de ce signal pour une transmission analogique de données.

### 3.2.1 Étude d'une transmission analogique en tension 0 – 10V

La figure 17 présente le principe de la transmission analogique de données en tension 0 – 10V. Les résistances de ligne sont modélisées par  $R_{L1}$  de résistance linéique  $r_{L1} = 0,1\ \Omega\cdot\text{m}^{-1}$  pour ce type de transmission. La résistance d'entrée du récepteur  $R_{r1}$  est de  $2,5\text{ k}\Omega$ , valeur supposée très grande par rapport aux autres résistances du circuit.

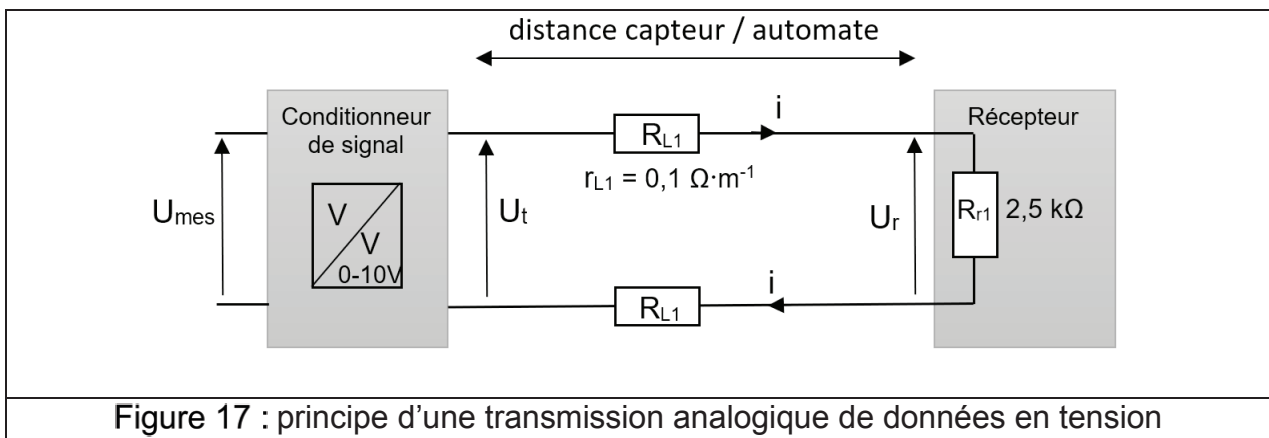


Figure 17 : principe d'une transmission analogique de données en tension

**Q17)** Montrer que  $U_r \approx \left(1 - \frac{2R_{L1}}{R_{r1}}\right) \times U_t$ . Exprimer en pourcentage la différence de tension  $\varepsilon_{\%}$  entre  $U_r$  et  $U_t$  par rapport à  $U_t$ . Cet écart  $\varepsilon_{\%}$  est appelé l'erreur de liaison. Calculer cette erreur dans le cas de l'automate de contrôle déporté situé à 150m. Sachant que l'erreur de liaison ne doit pas excéder 1 %, conclure sur l'inconvénient de ce dispositif.

On donne l'approximation :  $\frac{1}{1+x} \approx 1 - x$  si  $x \ll 1$

### 3.2.2 Étude d'une transmission analogique par boucle 4 – 20 mA

La figure 18 présente le principe d'une transmission analogique par boucle de courant 4 – 20 mA. La boucle de courant est un circuit de transmission de l'information d'un capteur sous forme de courant.

Sa particularité vient du fait que l'alimentation  $U_{DC}$ , le conditionneur et le récepteur sont tous branchés en série dans une maille unique qui constitue la boucle (figure 18).

La résistance d'entrée du récepteur  $R_{r2}$  est ici de  $500\ \Omega$ .

Le constructeur indique que la tension  $U_s$  aux bornes du conditionneur de signal doit être comprise entre 12 V et 30 V. On note  $I_b$  l'intensité du courant de boucle.



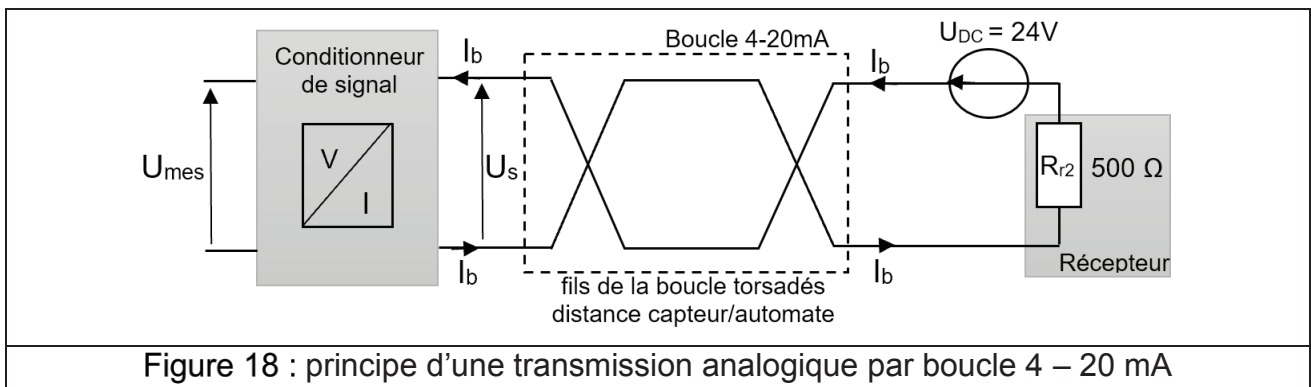


Figure 18 : principe d'une transmission analogique par boucle 4 – 20 mA

- Q18)** En négligeant initialement les résistances des fils, déterminer les valeurs minimale et maximale de  $U_s$  pour respecter le standard d'une boucle de courant 4 – 20 mA. Indiquer si ces valeurs sont compatibles avec les indications du constructeur.
- Q19)** Déterminer la longueur maximum de la liaison si la résistance linéique des fils de boucle est de  $0,1 \Omega \cdot m^{-1}$ . Valider le fonctionnement de ce dispositif pour la mesure de température de l'huile.
- Q20)** Synthèse : à partir des résultats précédents et de vos connaissances, donner au moins deux avantages d'une transmission analogique par boucle de courant. En considérant les conditions permanentes de fonctionnement du cycle de chauffe présentée dans la partie 3.1, justifier l'intérêt d'une transmission par boucle 4 – 20 mA par rapport une boucle 0 – 20 mA parfois rencontrée avec certains capteurs.

## 4 ÉTUDE DU LEVAGE DU PLATEAU MOBILE

L'objectif de cette partie est de valider des choix technologiques au regard des critères imposés par des exigences de dimensionnement et de pilotage du système de levage (DT1, DT4, DT5).

Les étapes de levage et les données relatives à cette phase sont décrites sur le DT4. Les choix technologiques et les dimensionnements des éléments impactent directement la rapidité d'exécution du levage du plateau mobile dans le cadre d'un changement de configuration du stade.

### 4.1 Dimensionnement du système hydraulique de levage

Le fluide retenu pour alimenter le circuit hydraulique est une huile de marque Panolin et de référence HLP SYNTH E 22. Son écoulement est supposé stationnaire et incompressible lors du fonctionnement de la pompe principale de gavage.

Des données relatives au dimensionnement du circuit hydraulique sont à consulter dans le DT5.

#### 4.1.1 Détermination des pertes de charges dans le circuit de gavage principal entre la centrale de gavage et le groupe motopompe haute pression.

Lors du levage, le débit volumique à la sortie de la centrale de gavage est de  $420 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$  puis diminue au fur et à mesure de l'alimentation de chacun des vérins de  $70 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Données :

	Unité	Symbole	Repère des différentes portions de circuit					
			V6/V5	V5/V4	V4/V3	V3/V2	V2/V1	V1/C <sub>g</sub>
Longueur ligne	m	L	8,30	10,60	13,00	10,60	8,3	24,20
Débit ligne gavage	$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$	Q <sub>v</sub>	70	140	210	280	350	420
Diamètre ligne gavage aller	mm	D	50,80					
Masse volumique de l'huile	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho_h$	930					
Côte centrale gavage C <sub>g</sub>	mm	Z <sub>c</sub>	0					
Côte des motopompes de levage n°V1 à V6	mm	Z <sub>v_i</sub>	-7 000					

**Q21)** À partir du DT5, relever la valeur de la viscosité dynamique du fluide pour les températures d'utilisation de l'huile suivantes :

- 0°C : température minimale en salle hydraulique ;
- 20°C : température ambiante normale ;
- 40°C : température maximale de fonctionnement normal ;
- 60°C : température de coupure du circuit.

Parmi ces valeurs, indiquer celle à retenir pour le dimensionnement du circuit hydraulique. Justifier.

Le bureau d'étude en charge du dimensionnement du circuit hydraulique propose le tableau de valeurs suivant pour la détermination des pertes de charges régulières.

	Unité		V6/V5	V5/V4	V4/V3	V3/V2	V2/V1	V1/C <sub>en</sub>
Vitesse moyenne	m·s <sup>-1</sup>	v <sub>m</sub>	0,6	1,1	1,7	2,3	2,8	3,4
Nombre de Reynold		R <sub>e</sub>	203	373	576	779	948	1151
Coefficient de perte de charge		λ	0,31	0,17	0,11	0,081	0,067	0,055
Perte de charge	Pa	Δp	0,09.10 <sup>5</sup>	0,20.10 <sup>5</sup>	0,38.10 <sup>5</sup>	0,42.10 <sup>5</sup>	0,40.10 <sup>5</sup>	1,40.10 <sup>5</sup>

**Q22)** Développer les étapes de calculs et valider les valeurs obtenues pour la portion de circuit comprise entre les vérins 3 et 4 référencés V4/V3. Le bureau d'étude a retenu 2,9 bars de pertes de charges régulières associées à la ligne de gavage aller. Vérifier que cette valeur est cohérente.

4.1.2 Calcul de la puissance hydraulique d'un groupe motopompe gavage principal.

Afin de dimensionner la puissance hydraulique du groupe motopompe de gavage principal, le bureau d'études propose quelques données complémentaires :

- Pression à l'aspiration dans le réservoir 1,9 bar
- Pression de gavage à l'entrée des pompes de levage 1 bar
- Perte de charge du régulateur de débit (EV\_RD) entre 8 et 14 bars
- Perte de charge électrovanne d'isolation amont (EV\_SA) 2 bars
- Perte de charge électrovanne d'isolation aval (EV\_IG) 1 bar
- Perte de charge électrovanne niche levage (EV\_N) 1 bar
- Perte de charge filtre 1 bar

**Q23)** Indiquer la nature des pertes de charge apparaissant dans ces données.

**Q24)** En considérant la ligne de gavage la plus longue, vérifier qu'une pompe de pression hydraulique 30 bars est correctement dimensionnée en considérant un coefficient de sécurité de 20%.

#### 4.2 Validation mécanique d'un choix de vérin

Lors du levage, le plateau est supporté par les 12 vérins de levage (voir figure 19 et DT2). Le modèle aux éléments finis (présenté dans la partie 2.2) permet de déterminer les efforts dans les vérins.

Les efforts longitudinaux dans les tiges des vérins sont obtenus en situation normale de levage et par les 48 configurations en situation dégradée dans le cas où 1 ou 2 vérins (1 sur chaque rive) ne fonctionnent pas.

Des efforts transversaux (radiaux), en tête de vérin (voir DT6), s'appliquent, lors des phases de repositionnement sur les pions de centrage, lors du démarrage de la phase de translation du plateau et aussi par le déplacement des poutres de rive, en contact direct avec les vérins, lors de la déformation du plateau.

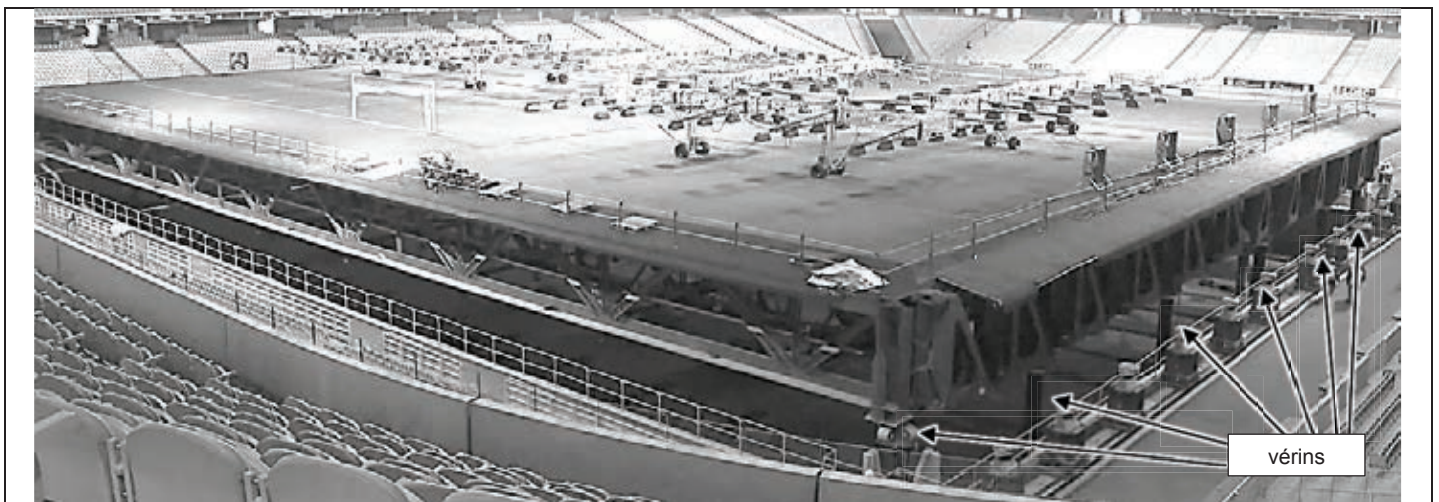


Figure 19 : plateau en fin de levage, supporté par les vérins.

La suite de l'étude s'attache à vérifier les dimensions et l'épaisseur du tube qui constitue la tige d'un vérin en fonction des sollicitations qui s'exercent sur celle-ci en fin de levage. Dans cette étude, on ne tient pas compte de la pression du fluide hydraulique dans la tige du vérin. La tige du vérin est sortie.

On modélise la tige en porte-à-faux (figure 20) par une poutre de section tubulaire de longueur  $L + a$ , où  $L$  est la distance de contact entre la tige et le corps en fin de levage (tige sortie) et  $a$  est la distance de porte-à-faux de la tige. La tige est soumise à des efforts  $\vec{F}_L$  (effort longitudinal) et  $\vec{F}_T$  (effort transversal) en son extrémité. On note  $E = 210 \text{ GPa}$  le module d'Young de l'acier inoxydable de nuance 42CrMo4, utilisé pour la tige, et  $I_z$  le moment quadratique de la section  $S$  du tube par rapport à l'axe où  $G$  est le centre de la section.

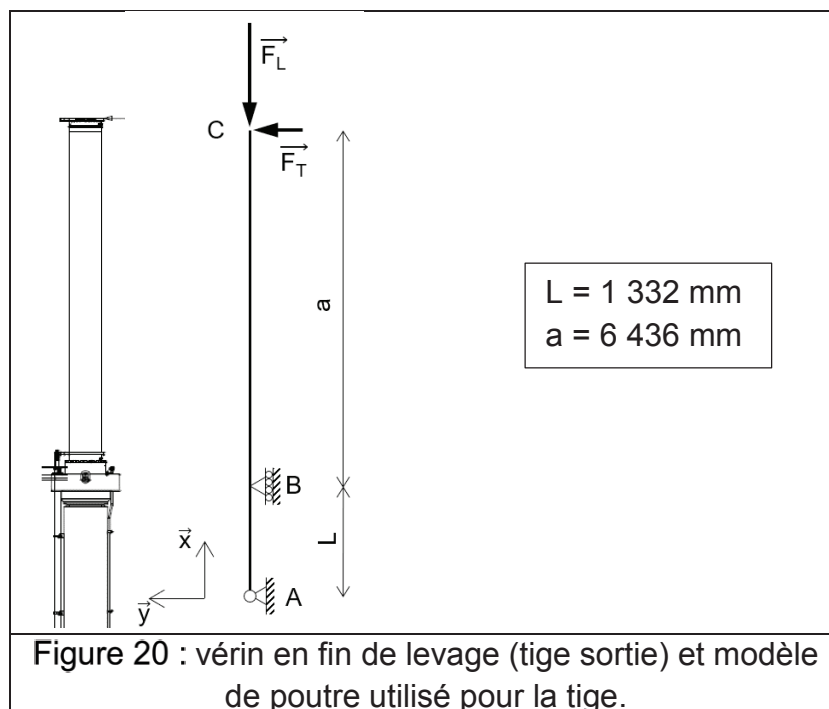


Figure 20 : vérin en fin de levage (tige sortie) et modèle de poutre utilisé pour la tige.

**Q25)** À l'aide de la figure 21, déterminer les intensités des efforts  $\vec{F}_L$  (effort longitudinal) et  $\vec{F}_T$  (effort transversal) dans le cas le plus défavorable. Préciser la situation et le vérin concernés.

Vérin	FL (kN)	FT (kN)	FL (kN)	FT (kN)	FL (kN)	FT (kN)	FL (kN)	FT (kN)	FL (kN)	FT (kN)	FL (kN)	FT (kN)
1	2 624	52	2 619	52	2 615	52	Inactif	Inactif	2 611	52	1 126	23
2	4 948	99	4 939	99	4 974	99	9 412	188	4 922	98	9 324	186
3	5 407	108	5 396	108	5 429	109	3 430	69	5 594	112	Inactif	Inactif
4	5 399	108	5 429	109	5 324	106	5 597	112	3 408	68	8 905	178
5	4 882	98	4 926	99	4 894	98	4 872	97	9 252	185	3 753	75
6	2 527	51	2 479	50	2 551	51	2 474	49	Inactif	Inactif	2 678	54
7	2 624	52	2 620	52	2 751	55	2 569	51	2 746	55	2 775	56
8	4 948	99	4 897	98	3 813	76	4 942	99	3 797	76	3 821	76
9	5 407	108	5 570	111	8 969	179	5 601	112	8 978	180	8 908	178
10	5 399	108	3 501	70	Inactif	Inactif	3 493	70	Inactif	Inactif	Inactif	Inactif
11	4 882	98	9 200	184	9 207	184	9 181	184	9 275	186	9 250	185
12	2 527	51	Inactif	Inactif	1 048	21	Inactif	Inactif	991	20	1 033	21
Situation	Normale		Dégradée 1		Dégradée 3		Dégradée 12		Dégradée 17		Dégradée 34	

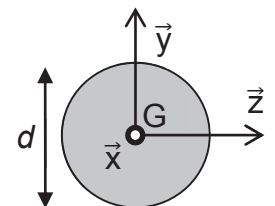
Figure 21 : extrait des résultats des simulations – Intensité des efforts longitudinaux  $\vec{F}_L$  et transversaux  $\vec{F}_T$  dans les tiges des vérins en situation normale et dans les situations dégradées où les efforts sont les plus importants.

**Q26)** Définir, pour le modèle de poutre de la figure 20, l'expression littérale des efforts internes  $N(x)$ ,  $V_y(x)$  et  $M_z(x)$ , entre A et B, puis entre B et C ou tracer, à main levée, le diagramme des efforts internes, en précisant la valeur des extremums. Préciser les conventions utilisées.

Rappel :  $N(x)$  : Effort normal selon  $\vec{x}$ ,  $V_y(x)$  : effort tranchant selon  $\vec{y}$  et  $M_z(x)$  : moment fléchissant selon  $\vec{z}$ .

**Q27)** L'expression du déplacement de la poutre, au point C, selon  $\vec{y}$  (flèche en C), sous chargement, est égale à  $\frac{F_T \cdot a^2 \cdot (a+L)}{3 \cdot E \cdot I_z}$ . Sans réaliser le calcul analytique, détailler la méthode d'obtention de l'expression précédente, à partir des efforts internes  $N(x)$ ,  $V_y(x)$  et  $M_z(x)$  et des conditions aux limites du modèle.

Aide : le moment quadratique  $I_z$  d'une poutre de section circulaire pleine (disque) de diamètre constant  $d$  est  $\frac{\pi \cdot d^4}{64}$



**Q28)** En utilisant le DT6, déterminer  $I_z$  le moment quadratique de la section de la tige du vérin.

**Q29)** Vérifier que le déplacement de la poutre, au point C, selon  $\vec{y}$  (flèche en C), est conforme au cahier des charges.



### 4.3 Validation de la pression de fonctionnement du groupe motopompe haute pression de levage

Au niveau de chaque vérin, le groupe motopompe de levage fonctionne à haute pression de sorte à pouvoir développer les efforts nécessaires. La pression hydraulique d'alimentation est de 350 bar maximum.

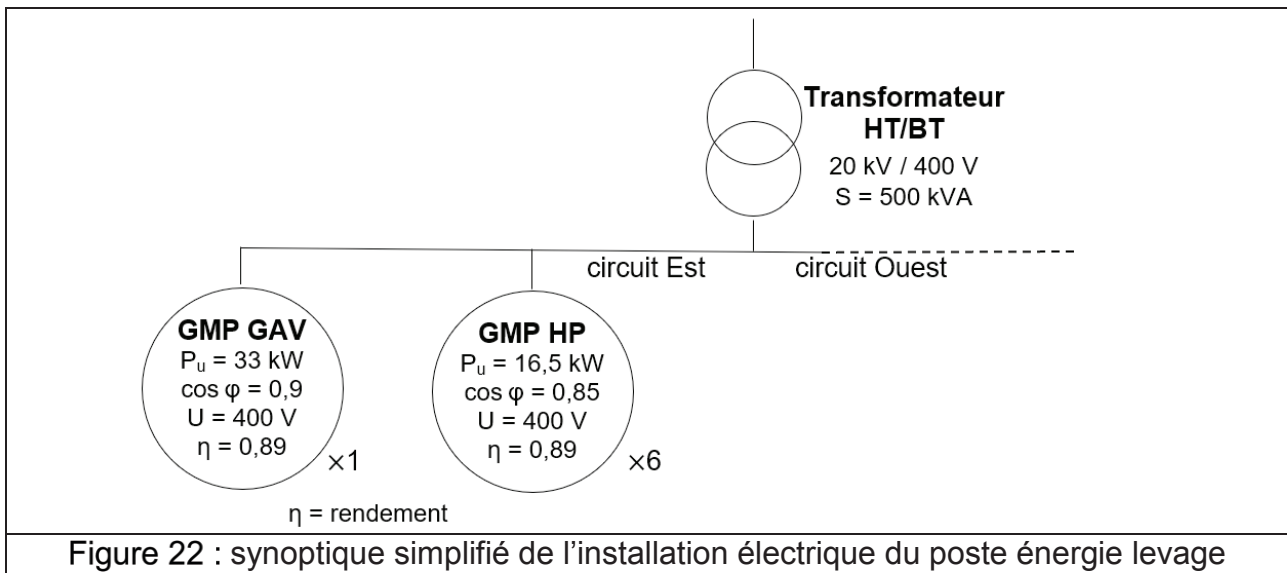
Le dimensionnement mécanique des vérins (DT6) proposé dans la partie 4.2 a permis d'identifier un effort longitudinal maximal d'environ 9 500 kN.

**Q30)** Vérifier que le dispositif proposé est correctement dimensionné. On considèrera que l'huile se répartit dans un volume associé au diamètre d'alésage.

### 4.4 Validation du choix du transformateur HT/BT du poste énergie levage

Lors du changement de configuration, pendant de la phase de levage, la mise sous pression des circuits hydrauliques de gavage et de levage Est et Ouest est assurée par des moteurs asynchrones triphasés (DT4).

Un synoptique simplifié de l'installation électrique est proposé sur la figure 22. Seules les charges de type motopompe ont été représentées. On considère en première approximation que les consommations associées aux différents organes de commande sont négligeables.



**Q31)** Faire un bilan de puissance de l'installation électrique du poste énergie levage, circuits Est et Ouest. Calculer les puissances active  $P_t$ , réactive  $Q_t$  et apparente  $S_t$  au niveau du transformateur HT/BT. Valider le choix de transformateur.

**Q32)** En considérant la puissance active  $P_t$  au niveau du transformateur HT/BT et un rendement du dispositif de levage de 0,45, vérifier la capacité de chaque vérin de

levage à fournir un effort maximum d'environ 9500kN pour une vitesse de déplacement de 70 mm·min<sup>-1</sup>.

#### 4.5 Étude de la synchronisation en position des vérins en phase de levage

Cette partie va permettre d'étudier plus particulièrement les exigences associées au pilotage du système de levage. Douze vérins hydrauliques sont répartis sur les deux poutres de rive, soit six vérins de chaque côté du plateau mobile comme le montre la figure 19. La synchronisation de levage entre les deux poutres de rive n'est pas étudiée dans cette partie.

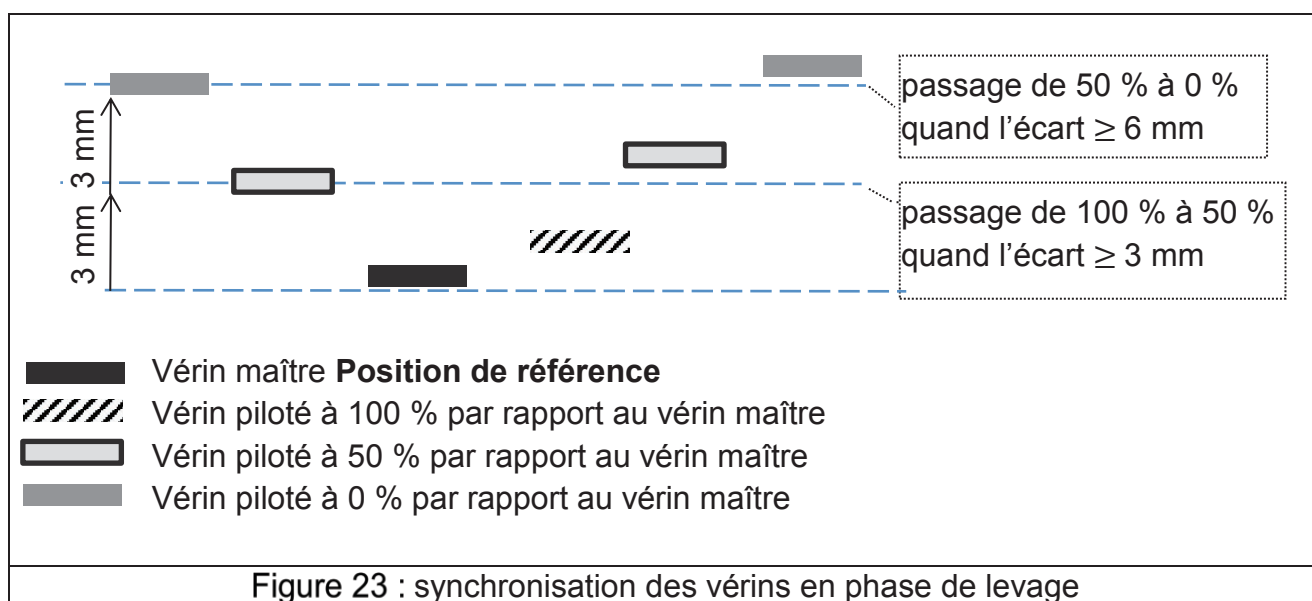
Le mouvement de levage du plateau mobile représente une étape critique. Pour une poutre de rive, le pilotage des six vérins hydrauliques est assuré soit en régulation de position (les hauteurs des vérins sont synchronisées les unes par rapport aux autres), soit en régulation de pression.

L'étude porte sur la phase de levage qui se décompose en plusieurs étapes décrites dans le DT4. Le mode de régulation choisi est une synchronisation en position relative afin d'assurer un suivi de trajectoire des 12 vérins, avec surveillance permanente des pressions maximum.

Le principe de cette régulation est de contrôler en permanence quel est le vérin le plus bas d'une poutre (figure 23) : c'est le vérin « maître » qui sera toujours piloté à 100 % de vitesse.

Le vérin maître peut changer en cours de cycle. Tous les autres vérins seront donc en avance (dans le sens courant) sur le maître :

- quand cette avance atteint 3 mm, on passe de 100 à 50 % de vitesse pour les vérins en avance ;
- si l'avance atteint 6 mm malgré ce ralentissement (très probable lors des phases de début de levage à cause des volumes comprimés différents), la vitesse de pilotage passe de 50 % à 0 %.



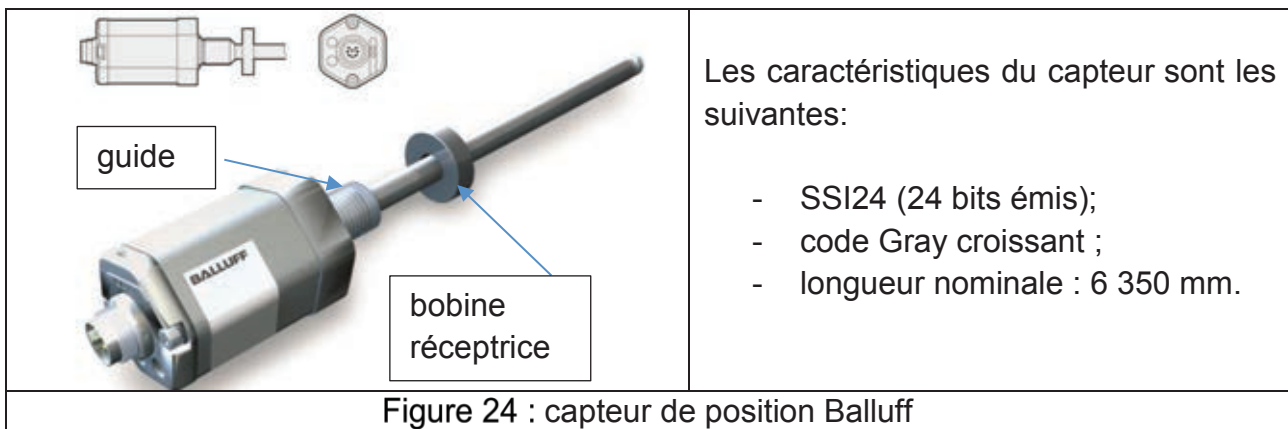
Afin d'éviter un battement des électrovannes, une hystérésis est prise en compte et le passage de 0 à 50% se fera à 4,5 mm et celui de 50 à 100% à 1,5 mm.

**Q33)** En phase de levage, compléter les deux états du DR2 qui permettent la description du fonctionnement du pilotage du vérin 1, qui n'est pas le vérin maître dans la situation étudiée. Tracer et compléter les transitions.

#### 4.6 Étude de l'acquisition de la position des vérins

Cette partie va permettre de valider le choix du capteur par rapport aux exigences associées au pilotage du système de levage : la résolution du capteur doit être de 5  $\mu\text{m}$  et son fonctionnement synchrone.

Le contrôle de la position des vérins est assuré par un capteur Balluff magnétostrictif de type BTL7 Standard (figure 24). Son principe de fonctionnement repose sur la création d'une onde au début du guide qui génère un signal électrique dans une bobine réceptrice. La position est déterminée d'après la durée de propagation de l'onde. Ce processus s'effectue avec une grande précision ainsi qu'une très bonne reproductibilité. Le capteur choisi par le constructeur est un capteur SSI (Synchronous Serial Interface). Cette technologie comprend une interface numérique synchrone avec un câble différentiel d'horloge et un câble différentiel de données.



**Q34)** Sachant que la course attendue du plateau mobile est de 5 700 mm, déterminer le nombre de bits minimal que le capteur doit transmettre pour répondre à l'exigence de résolution.

**Q35)** Sachant que pour un capteur BTL7 en SSI24, le bit 21 est un bit de parité paire et les bits 22 et 23 sont mis à 0, valider la capacité de transmission de la position du capteur choisi ainsi que sa résolution. Expliquer le principe et l'intérêt du bit de parité.

Pour les applications de régulation, un minutage court et régulier est souvent requis. Par conséquent, dans des circuits de régulation fermés, un fonctionnement synchrone est prévu. Pour le fonctionnement synchrone souhaité, la période d'échantillonnage  $T_A$  doit être inférieure 16 ms. En dehors de cette plage, le BTL7 bascule en mode asynchrone.

- Q36)** À l'aide des documents techniques DT7, valider le fonctionnement synchrone du capteur.
- Q37)** À l'aide des documents techniques DT7, vérifier que la fréquence d'échantillonnage déterminée précédemment permet la transmission de l'ensemble des données SSI. Conclure quant à la validité du choix du capteur au regard de l'ensemble des exigences citées.
- Q38)** En début de la phase de levage, le vérin maître est considéré en position initiale (cf DT4). Pour une résolution de 5  $\mu\text{m}$ , indiquer quelle serait la trame transmise par le capteur d'un vérin à la limite du passage de la commande de 50 % à 0 %.

#### **4.7 Synthèse phase de levage**

- Q39)** Au vu de l'étude précédente, compléter le diagramme des blocs internes partiel DR3 en plaçant les indications suivantes :
- la nature du flux entre le système de mesure de température et le système de commande de levage Est ;
  - le vérin de levage 1 et son groupe motopompe ;
  - la nature de l'ensemble des flux entre le réservoir Est et le plateau mobile ;
  - le capteur de position du vérin.

## 5 ÉTUDE DE LA PHASE DE TRANSLATION

*L'objectif de cette partie est de déterminer un modèle permettant de réaliser l'asservissement en position du système hydraulique de translation du plateau.*

La maîtrise de cette phase de translation est primordiale pour optimiser le déroulement du changement de configuration du stade. Les deux poutres de rive, Est et Ouest, sont équipées chacune de douze bras pivotants. Avant la phase de translation, ces bras sont déployés et mis en contact avec des chariots rouleurs montés sur rail et tractés au moyen de dispositifs à pas de pèlerin appelé unité de translation (figure 25).

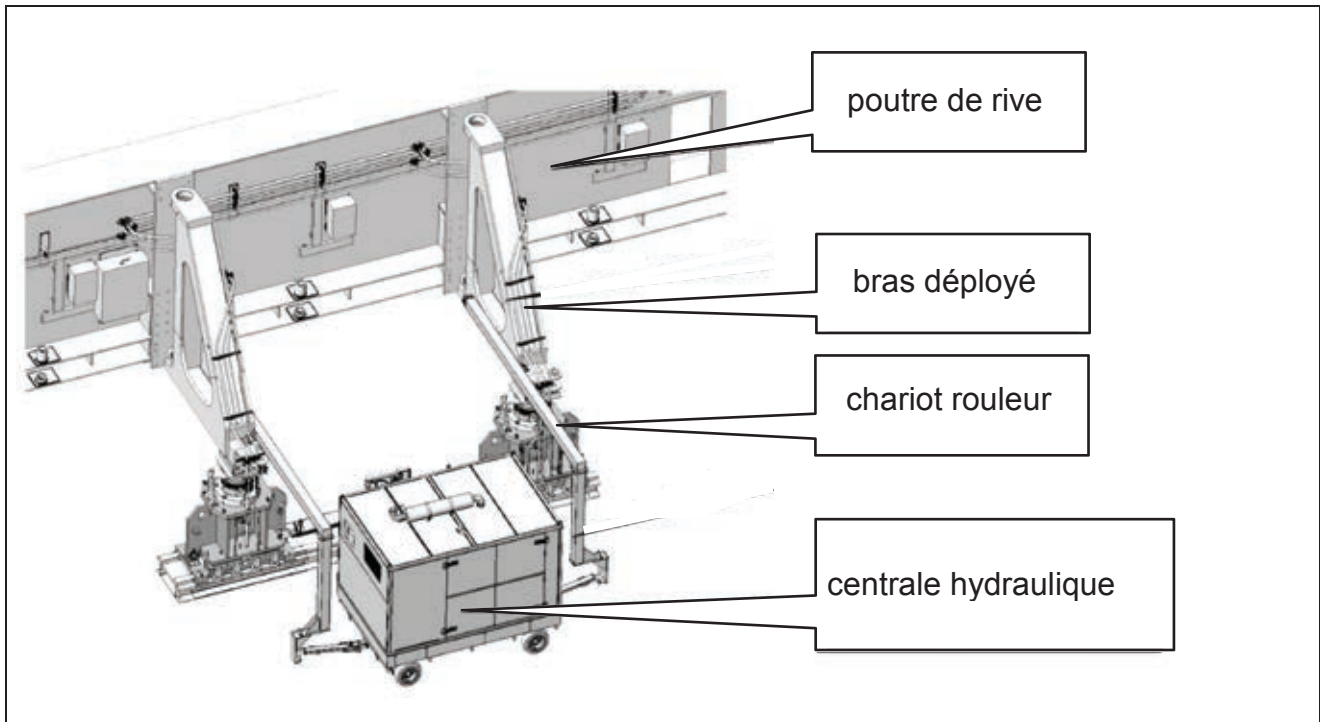


Figure 25 : bras de translation posés sur les chariots rouleurs

Chaque unité de translation est constituée d'un vérin de translation muni d'un capteur de position, et d'une pince hydraulique de serrage du rail (figures 26 et 27). Le transfert complet du plateau mobile sur 63 m se déroule en cycles successifs de 0,9 m suivant la direction de l'axe  $\vec{z}$  dans le sens négatif. Chaque cycle a une durée de 50 secondes et il n'y a aucun délai entre deux cycles successifs.

Les étapes de translation pas par pas sont les suivantes :

- ouverture de la pince ;
- sortie de tige du vérin de translation ;
- fermeture de la pince ;
- rentrée de tige du vérin de translation et mouvement du plateau.

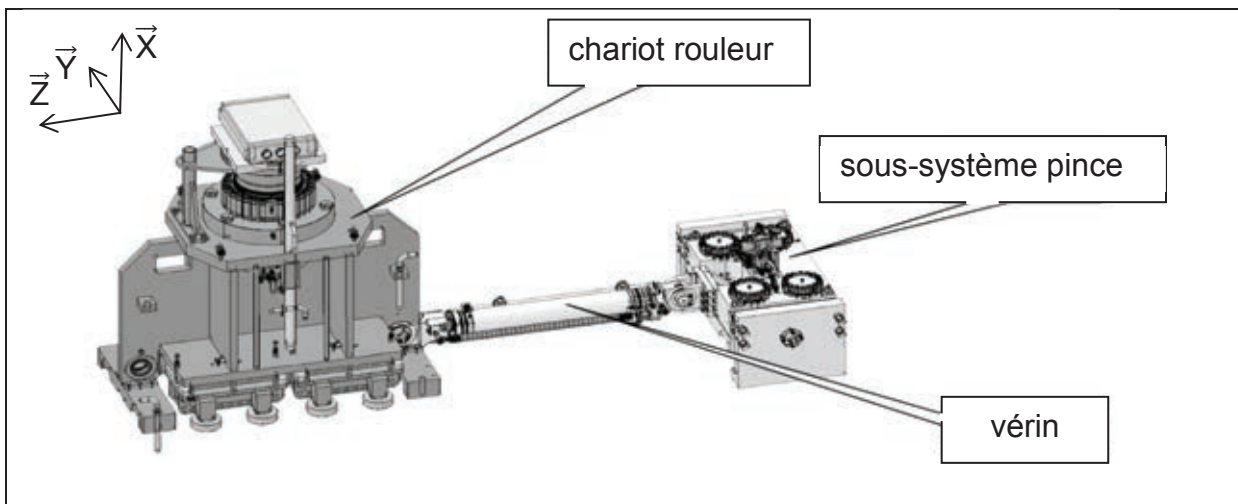


Figure 26 : unité de translation couplée au chariot rouleur (rail non représenté)

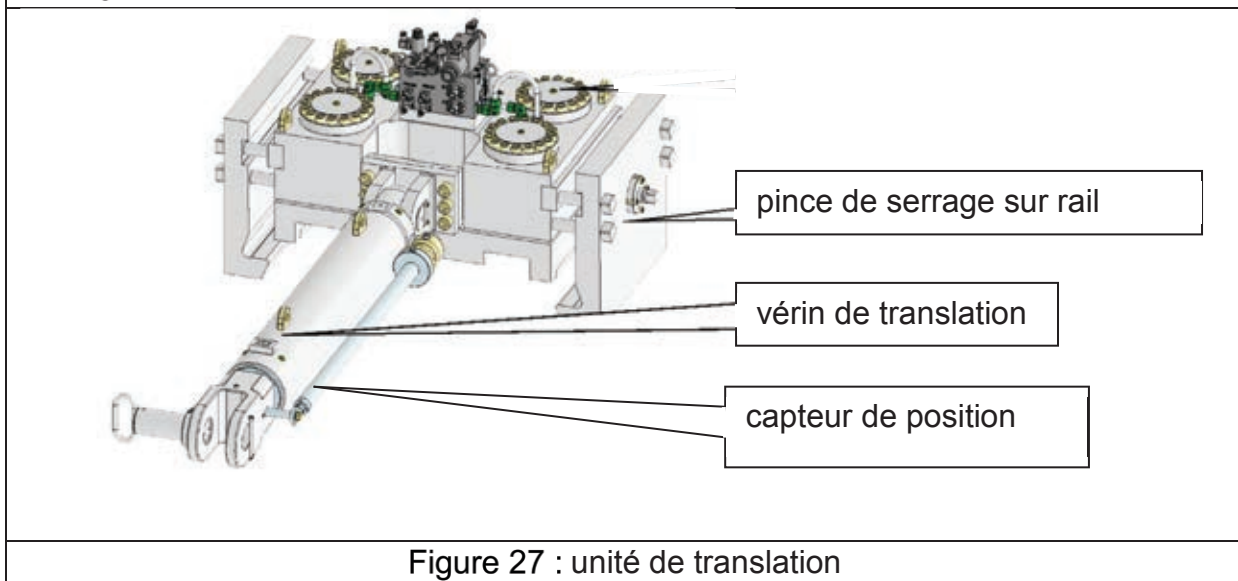


Figure 27 : unité de translation

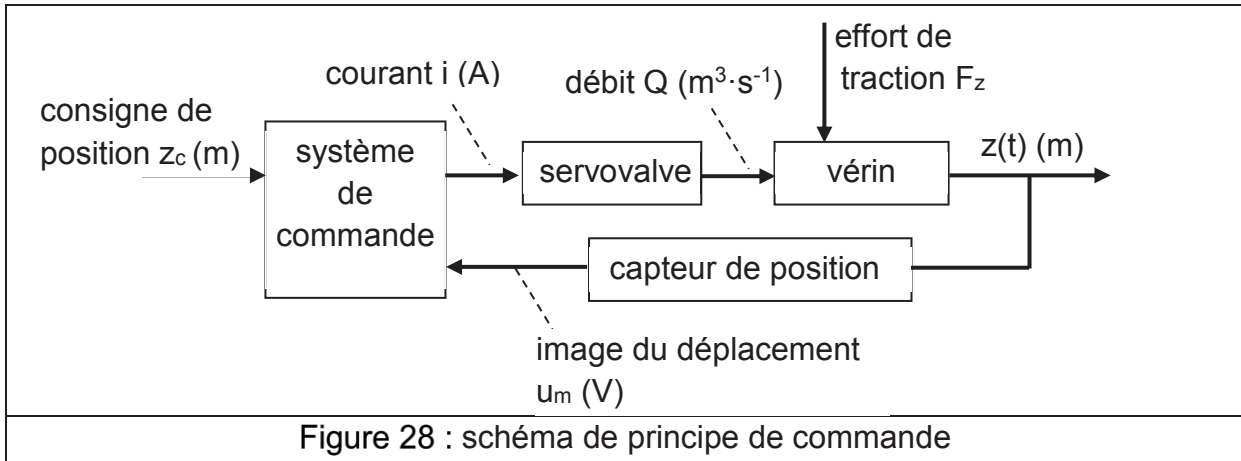
L'objectif est de synchroniser l'ensemble des dispositifs de translation afin que le plateau reste parfaitement parallèle aux rails et ne dérive pas latéralement. Pour cela il est nécessaire de maîtriser la position de chacune des tiges des vérins.

L'étude qui suit va permettre de déterminer un modèle de connaissance du couple (vérin - charge) afin d'élaborer un signal de commande optimal en fonction des performances attendues.

Il s'agit donc de déterminer la relation liant le débit délivré par la servovalve et la position de la tige du vérin.

La structure globale de commande en position du vérin de translation est représentée sur la figure 28.





### 5.1 Détermination de l'effort $\vec{F}_Z$ nécessaire pour tracter le plateau mobile.

Différentes simulations par éléments finis ont permis de déterminer l'effort vertical, exprimé en Newton, supporté par les chariots rouleurs. En mode de translation normal, avec les douze rouleurs opérationnels, le plus chargé supporte  $\vec{F}_X = -228,6 \cdot 10^4 \vec{x}$ . Les rouleurs supportent également un effort  $F'\vec{x}$  généré par les décalages de la géométrie du rail et les écarts de position des bras. Ces écarts de position verticaux peuvent atteindre 8 mm. Les simulations ont permis de déterminer une surcharge de  $58,1 \cdot 10^4 \text{ N}$  pour 2 mm de d'écart.

**Q40)** Compte-tenu des valeurs obtenues par simulation, et en considérant une évolution linéaire des efforts en fonction du dénivelé, déterminer l'effort supporté par le rouleur le plus chargé en mode de fonctionnement normal.

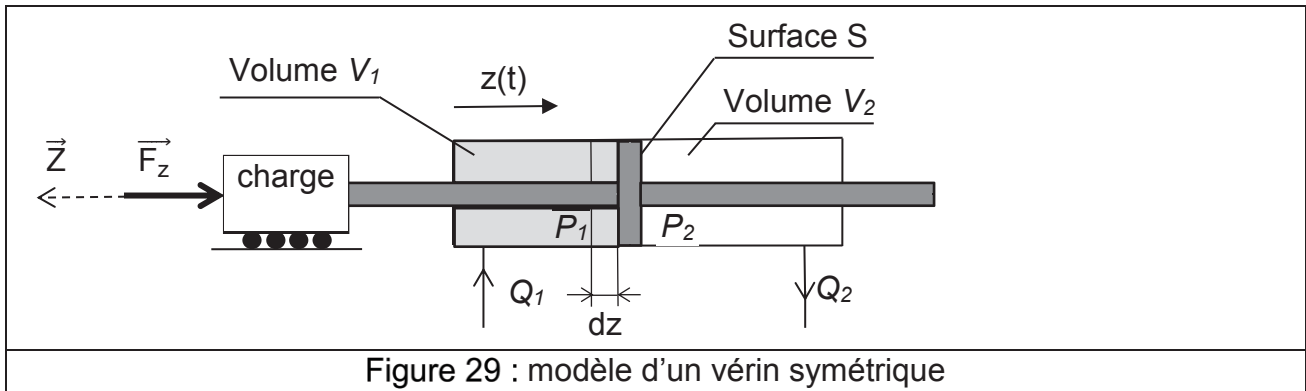
L'effort ainsi déterminé est supérieur à la valeur maximale autorisée pour un chariot rouleur. L'entreprise fait donc le choix de mettre en place un vérin de compensation hydraulique sous chacun des bras afin de répartir les charges équitablement et garantir que chacun des bras supporte le même effort en marche normale avec dénivelé. Ces vérins de compensation uniformisent la répartition des efforts induits par les défauts géométriques du plateau et du sol. Ils sont reliés hydrauliquement entre eux de manière à constituer une bascule.

Pour la suite de l'étude, ceci nous permet de poser l'hypothèse que chaque bras supporte un effort constant vertical, et donc chaque unité de translation exerce un effort de traction constant en Newton :  $\vec{F}_Z = -447\,800 \vec{z}$ .

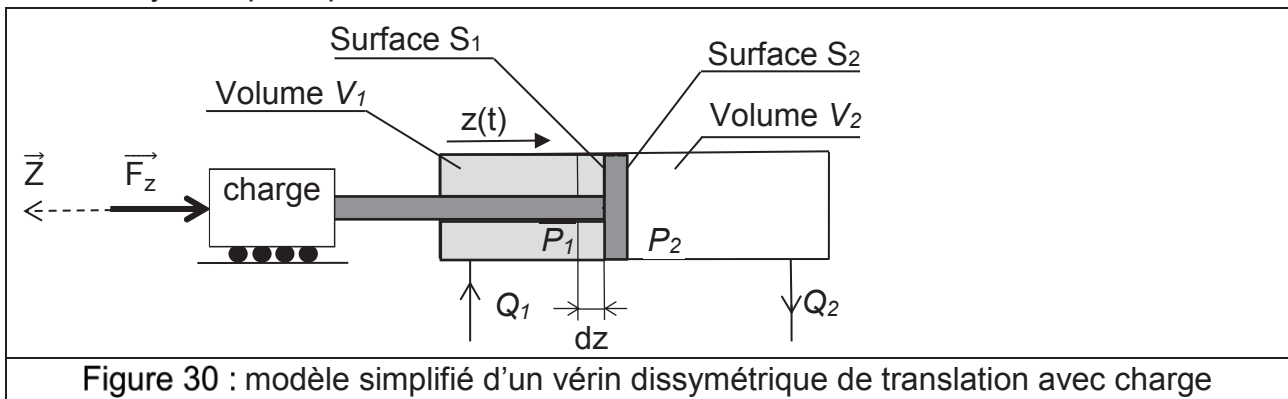
### 5.2 Détermination du modèle de comportement de l'ensemble {vérin + charge}.

L'analyse du comportement de l'ensemble {vérin + charge} est une étape préliminaire pour élaborer la loi de commande de déplacement du plateau. Pour répondre aux exigences de positionnement, il est nécessaire de considérer la compressibilité du fluide afin d'obtenir un modèle de connaissance réaliste.

Le modèle de commande de l'actionneur hydraulique nécessite l'obtention d'une relation reliant les variables fonctionnelles débit-déplacement. Dans le cas d'un vérin symétrique, représenté sur la figure 29, il est possible d'établir une relation entre le débit moyen  $Q = \frac{Q_1+Q_2}{2}$  échangé avec le vérin, la pression différentielle  $\Delta P = P_1 - P_2$  et le déplacement en translation de la tige  $z(t)$ .



Dans le cas d'un vérin dissymétrique comme ceux de translation du plateau mobile, représenté en figure 30, il est possible de transposer les relations établies pour le vérin symétrique en définissant une section équivalente  $S_{eq}$ . Cette étude permet d'obtenir un modèle symétrique équivalent.



Notations :

- sur les figures 29 et 30, les indices (1) précisent les caractéristiques d'alimentation et (2) les caractéristiques de sortie.  $P_i$  représente la pression,  $Q_i$  le débit volumique,  $S_i$  la section utile,  $V_i$  le volume de la chambre  $i$ .
- la transformée de Laplace de la fonction  $f(t)$  sera notée  $F(p) = L[f(t)]$  et les conditions d'Heaviside sont vérifiées.

Hypothèses :

- le fluide est compressible ;
- le débit de la pompe est constant ;
- les pertes de charges régulières dans les conduites sont négligées ;
- le débit de fuite entre les deux chambres est négligé ;
- chaque vérin de translation exerce un effort de traction constant  $\vec{F}_z$  sur la charge.

Données :

- $m$  masse de la tige et de la charge,
- $f_v$  coefficient de frottement visqueux entre la charge et le rail,
- $\beta$  module de compressibilité élastique en Pa supposé constant.

Le principe de la conservation de la masse appliquée à un volume  $V_i$  fournit une équation de continuité, le débit  $Q_i$  pour la chambre (i) s'exprime comme  $Q_i(t) = S_i \frac{dz(t)}{dt} \pm \frac{V_i}{\beta} \frac{d}{dt} P_i(t)$ .

### 5.2.1 Étude d'un modèle de vérin symétrique (figure 29)

**Q41)** En appliquant le principe de conservation de la masse et les théorèmes généraux de la dynamique au vérin symétrique, démontrer la relation suivante :

$$Z(p) \left[ mp^2 + f_v p + \beta S^2 \frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \right] - F_z(p) = \frac{\beta S}{p} \left[ \frac{V_2 Q_1(p) + V_1 Q_2(p)}{V_1 V_2} \right]$$

Pour la suite de l'étude, les hypothèses simplificatrices sont les suivantes:

- vérin en position médiane donc  $V_1 = V_2 = V_0$  ;
- on considère que le débit moyen instantané est peu différent de celui en régime établi sur une charge hydraulique symétrique, ce qui conduit à  $Q_1 = Q_2 = Q$ .

**Q42)** Montrer que  $Z(p)$  peut se mettre sous la forme :  $Z(p) = H_1(p)Q(p) + H_2(p)F_z(p)$  .  
avec  $H_1(p) = \frac{2\beta S}{p(2\beta S^2 + V_0 p(mp + f_v))}$  et  $H_2(p) = \frac{V_0 p}{p(2\beta S^2 + V_0 p(mp + f_v))}$

### 5.2.2 Étude d'un modèle de vérin dissymétrique (figure 30)

En mettant en œuvre la même démarche que précédemment, on obtient

$$Z(p) \left[ mp^2 + f_v p + \beta \frac{S_1^2 V_2 + S_2^2 V_1}{V_1 V_2} \right] - F_z(p) = \frac{\beta}{p} \left[ \frac{S_1 V_2 Q_1(p) + S_2 V_1 Q_2(p)}{V_1 V_2} \right] \text{ et } S_{eq} = \frac{S_1^2 V_2 + S_2^2 V_1}{S_1 V_2 + S_2 V_1}$$

Cette notion de section équivalente permet de proposer un modèle de comportement de l'ensemble actionneur – charge représenté sous forme d'un schéma-bloc (figure 31).

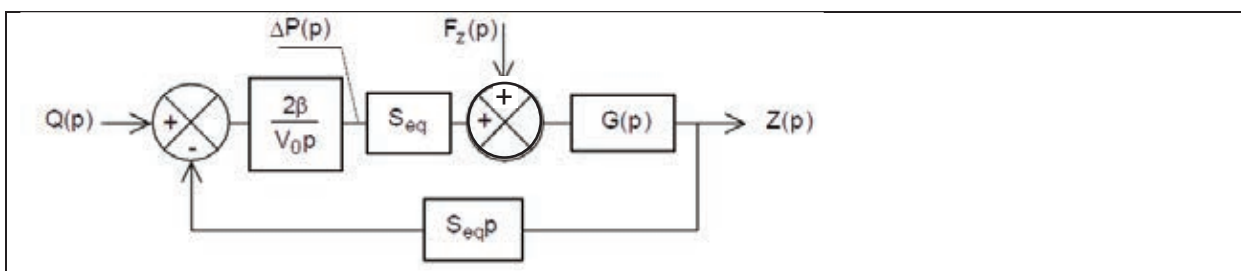


Figure 31 : modèle de l'actionneur + charge

**Q43)** A partir des relations établies précédemment, déterminer l'expression de la fonction de transfert  $G(p)$  en fonction de  $m$  et  $f_v$ .

## 5.3 Synthèse phase de translation

Ce modèle de connaissance permet de réaliser l'asservissement en position de la tige du vérin. Cette commande permet un déplacement à une vitesse moyenne de  $1,08 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ , en intégrant le cycle complet de pas de pèlerin. La translation s'effectue sur 63 m.

**Q44)** Conclure au regard de l'exigence relative au changement de configuration du stade du diagramme d'exigences (DT1).

## 6 SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Le changement de configuration permet de laisser place à une salle de spectacle, couverte, d'une capacité de 30 000 places, dont 5 500 par des tribunes télescopiques, ajoutées dans la fosse. Lors de la conception du projet, l'exigence initiale était que ce changement ne dépasse pas 24 h.

L'ensemble des cinq étapes nécessaires à l'ouverture du plateau lors de ce changement de configuration est décrit dans le diagramme de Gantt simplifié de la figure 32.

**Q45)** En vous aidant du DT4 relatif à la phase de levage et de la description de la phase de translation en début de partie 5, déterminer les durées de levage du plateau en position haute et de translation du plateau mobile. Afin d'assurer la marge de sécurité nécessaire, arrondir ces valeurs à 10 min près supérieures.

**Q46)** À l'aide des durées précédentes, qui complètent le diagramme de Gantt, déduire la durée totale d'ouverture du plateau mobile. Valider l'exigence sur la durée d'un changement de configuration et justifier l'exigence relative à la fréquence maximum de changement de configuration.

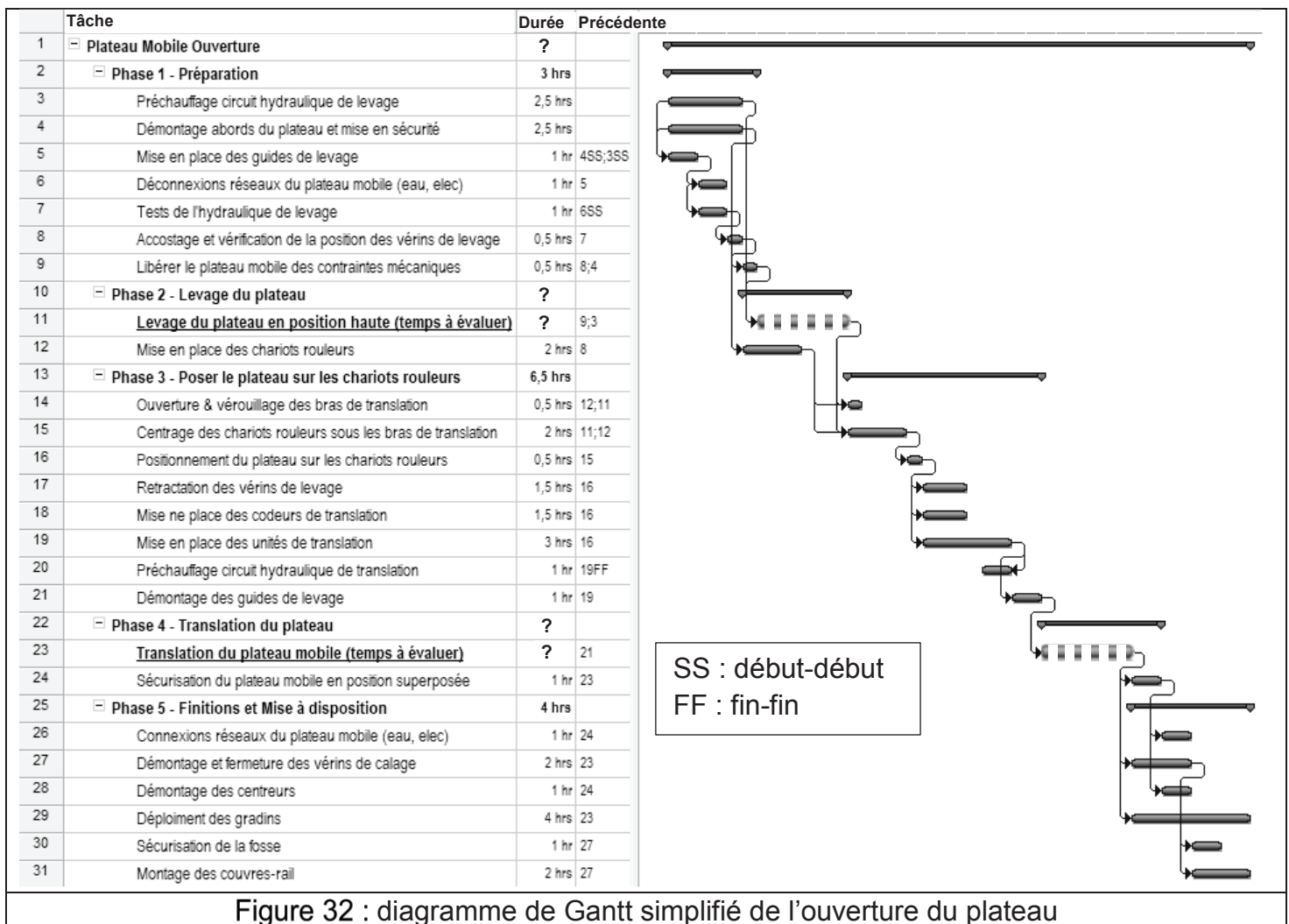
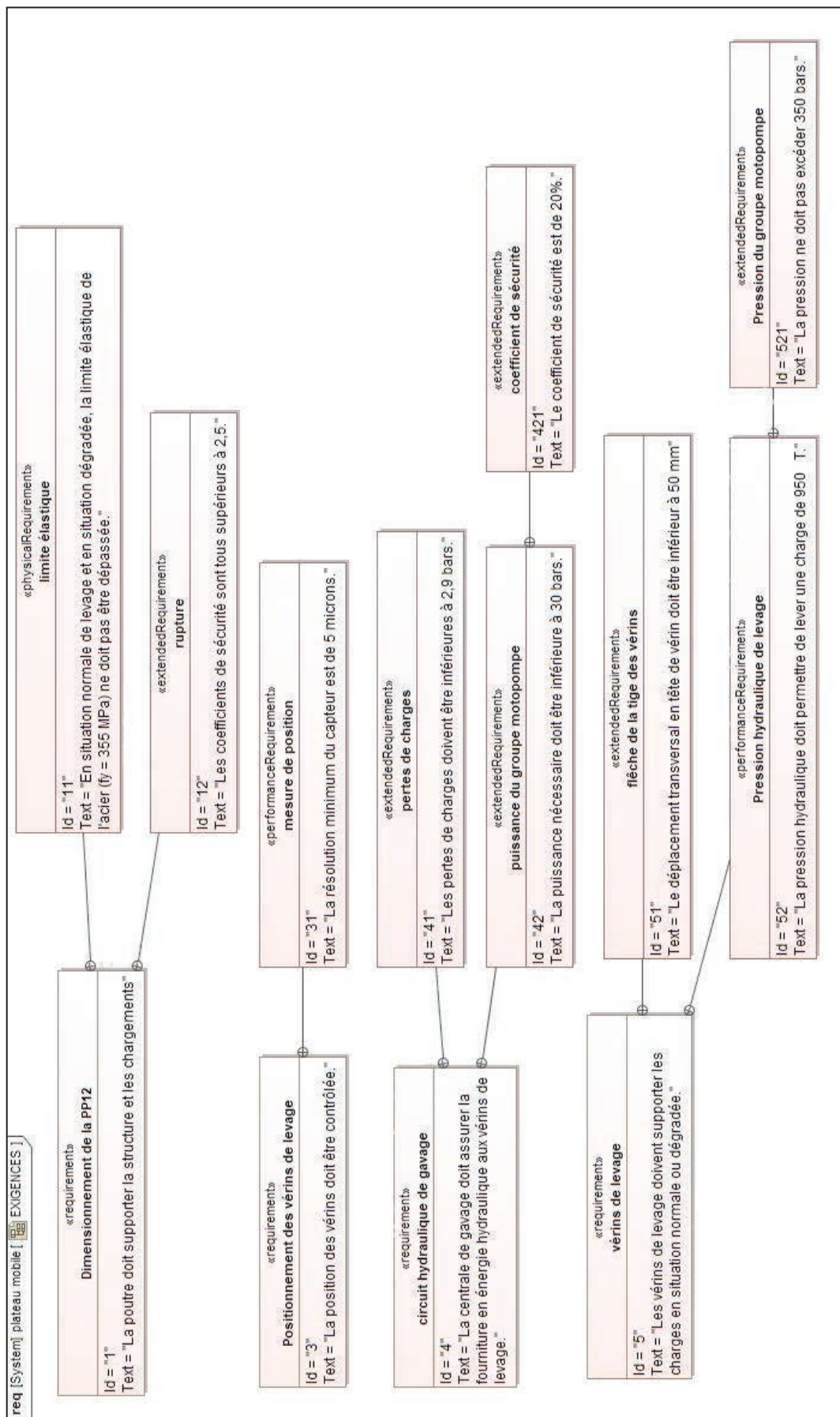
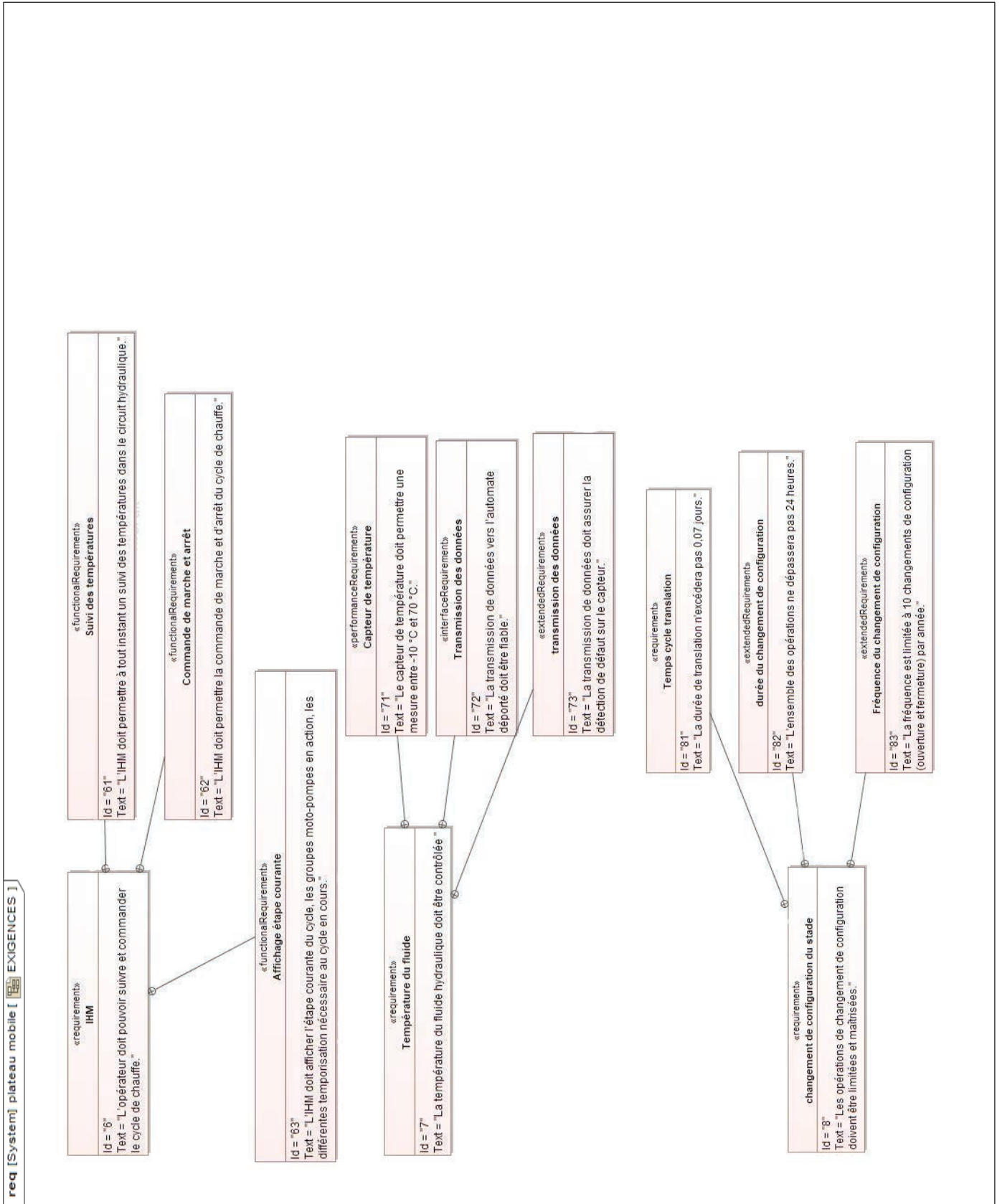


Figure 32 : diagramme de Gantt simplifié de l'ouverture du plateau

## DT1 - Diagramme d'exigences partiel 1/2



## DT1 - Diagramme d'exigences partiel 2/2

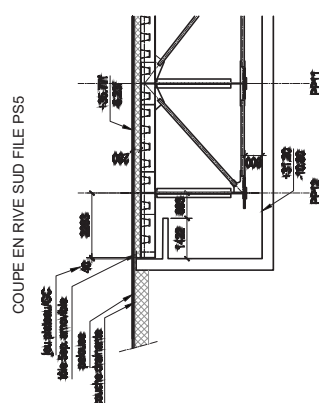
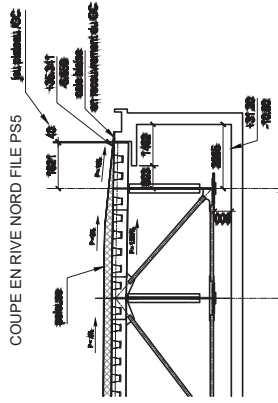
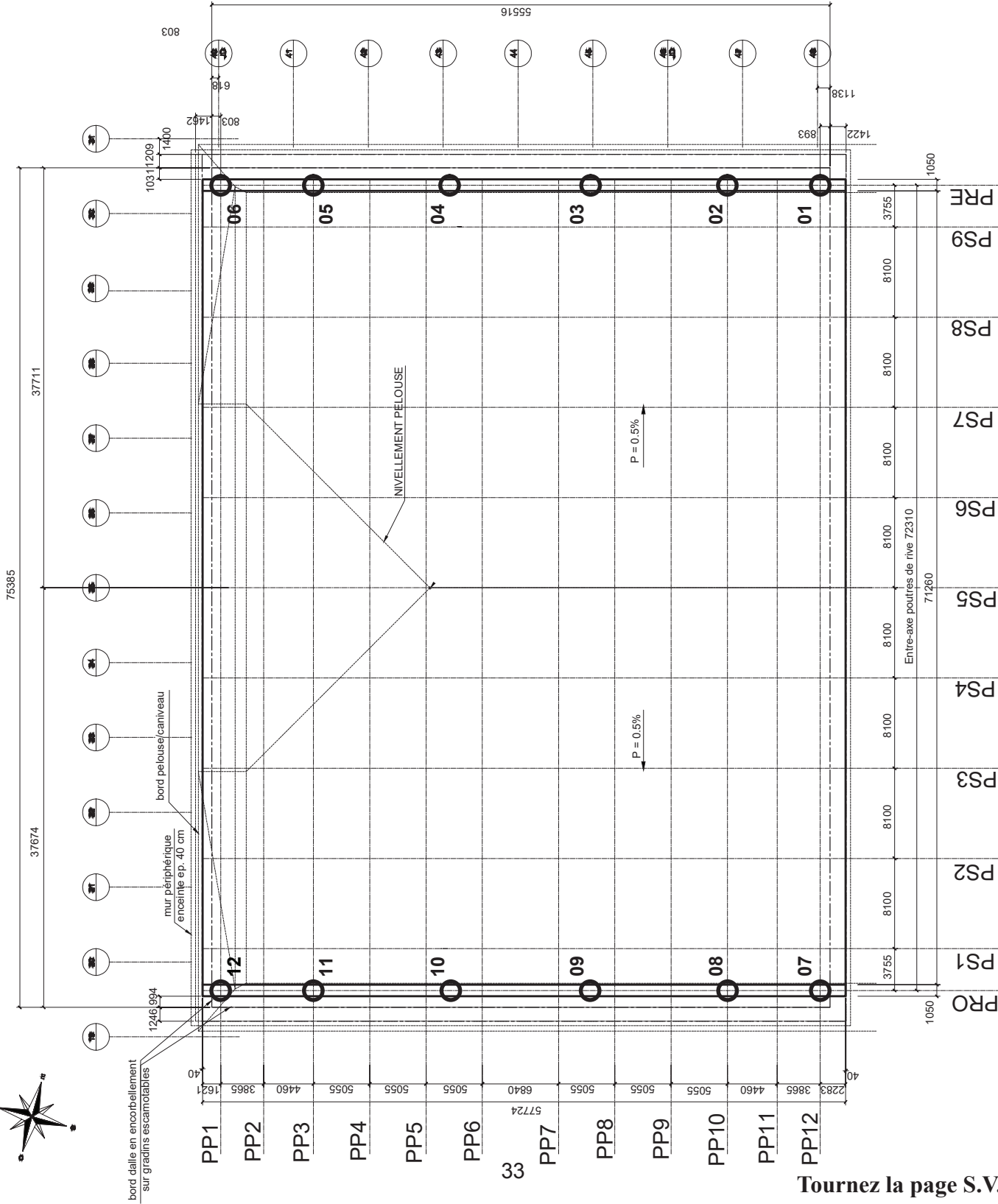




DT2



# VUE EN PLAN



## LEGENDE :

- PP : Poutre principale Treillis
- PS : Poutre secondaire Treillis
- PRE, PRO : Poutres de Rive Ouest et Est

○ Position des Vérins (x12)

DT2 : Plateau mobile  
 CHARPENTE METALLIQUE  
 DU PLATEAU MOBILE

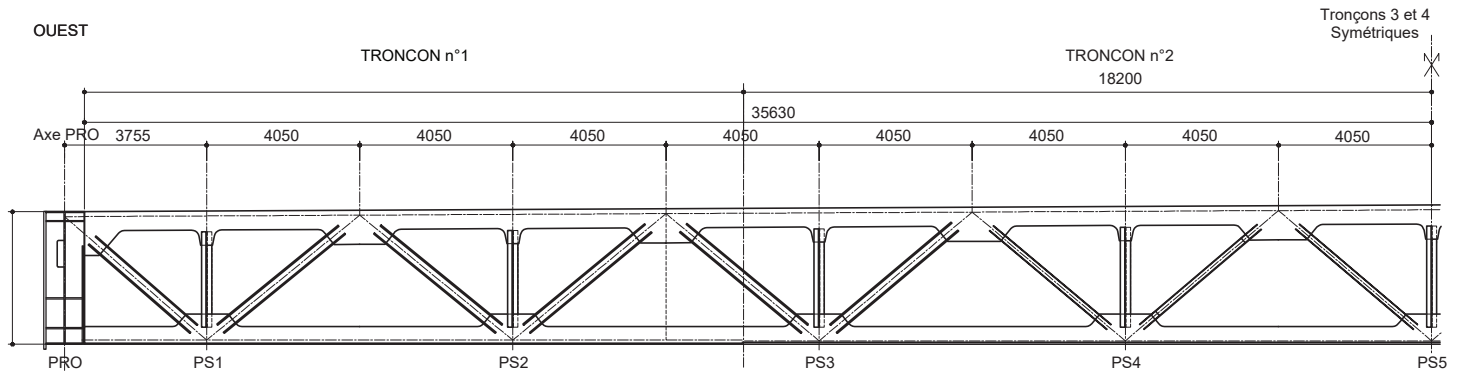
PLAN D'IMPLANTATION  
 DES POUTRES

POSITION DES VERINS

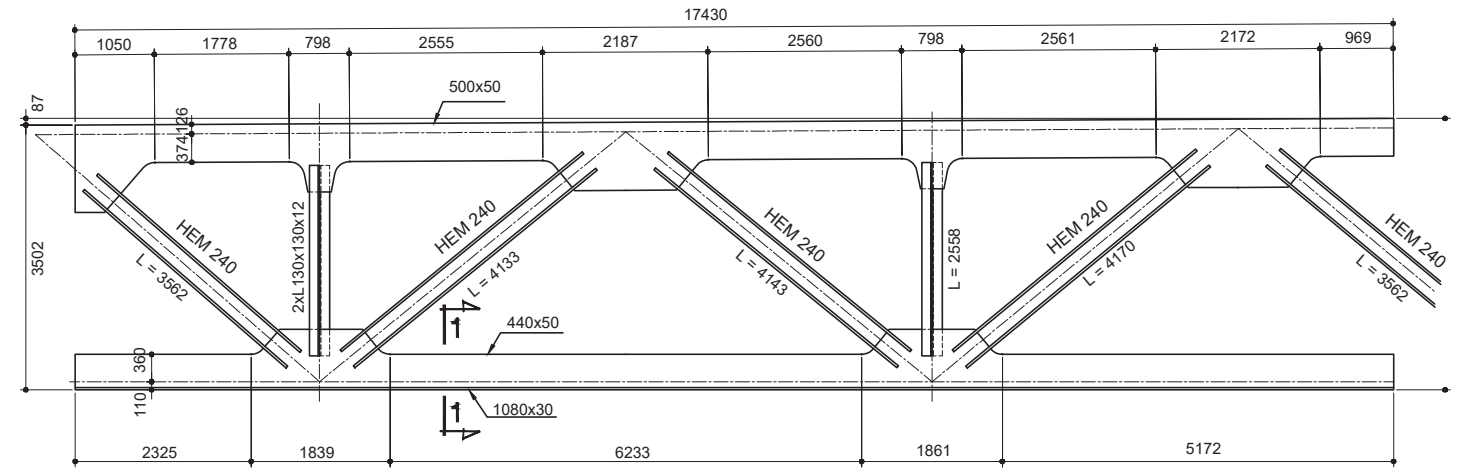
Echelle : 1:500  
 Cotes en mm

Tournez la page S.V.P.

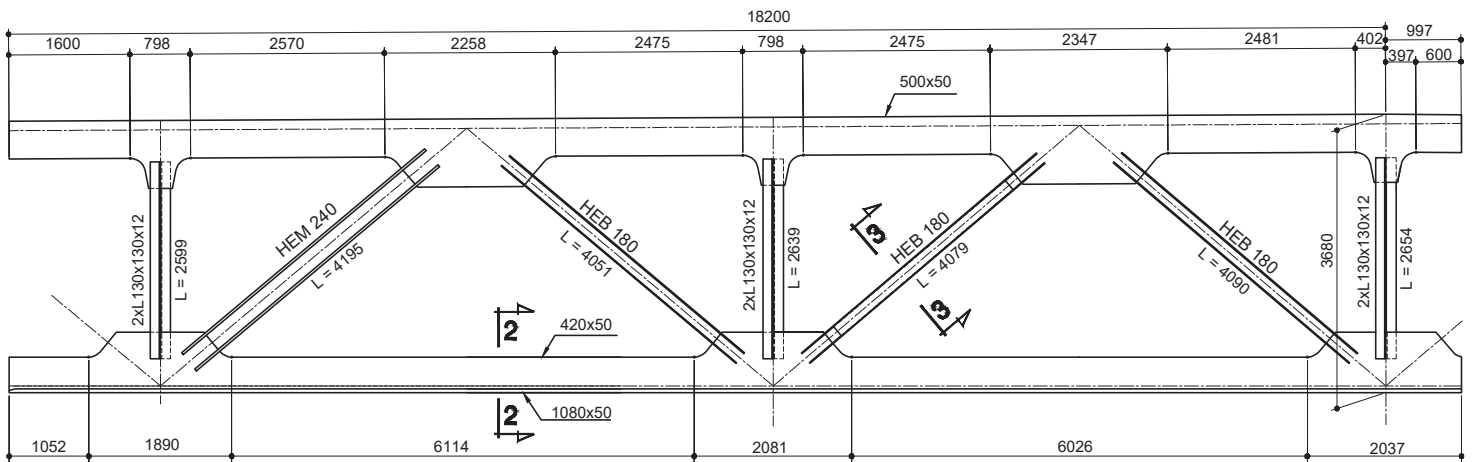
# POUTRE PRINCIPALE PP12 - DECOUPAGE EN TRONCONS - Ech : 1:200



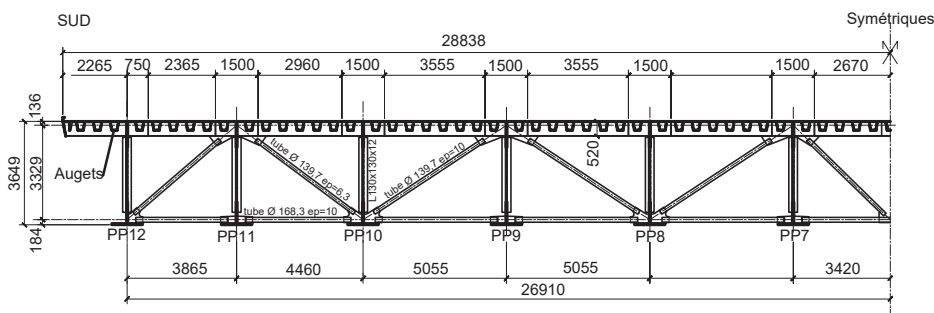
DETAILS TRONCON 1 - Ech : 1:100



DETAILS TRONCON 2 - Ech : 1:100



## POUTRE SECONDAIRE TYPE - Ech : 1:300



La tôle ép.10mm de la dalle n'est pas représentée.

DT3 : Plans des poutres

CHARPENTE METALLIQUE  
DU PLATEAU MOBILE

POUTRES  
Cotes en mm

## DT4 - Description du cycle de levage et du circuit hydraulique 1/2

Le cycle de levage se décompose en sept phases :

- phase de fonctions préliminaires comprenant le démarrage des groupes de gavages, l'exécution d'un cycle de chauffe et l'exécution d'un cycle d'auto test des vérins de levage ;
- phase d'accostage comptant 5 étapes qui permettent une initialisation de la position des vérins autour d'une hauteur de plateau de 200 mm ;
- phase de libération de contraintes ;
- phase de levage du plateau en mode régulation de position. La vitesse de levage du plateau en position haute (en attente du dépôt sur les chariots rouleurs) est de  $70 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  ;
- phase d'ouverture manuelle des bras présentés sur la figure 5 ;
- une phase de transfert du plateau mobile sur les chariots rouleurs en mode régulation de pression ;
- une phase de descente à vide des vérins de levage.

La phase de levage du plateau peut être détaillée par les étapes suivantes :

- commande de montée à vide des vérins de levage ;
- levage du plateau mobile : montée en charge avec synchronisation de positions des 12 vérins ;
- arrêt intermédiaire programmé à 2 200 mm pour permettre une opération de câblage ;
- levage du plateau mobile à la côte de 5 700 mm.

L'ordre de lancement de ces différentes phases et étapes est donné par un personnel technique via une l'interface homme-machine (IHM).

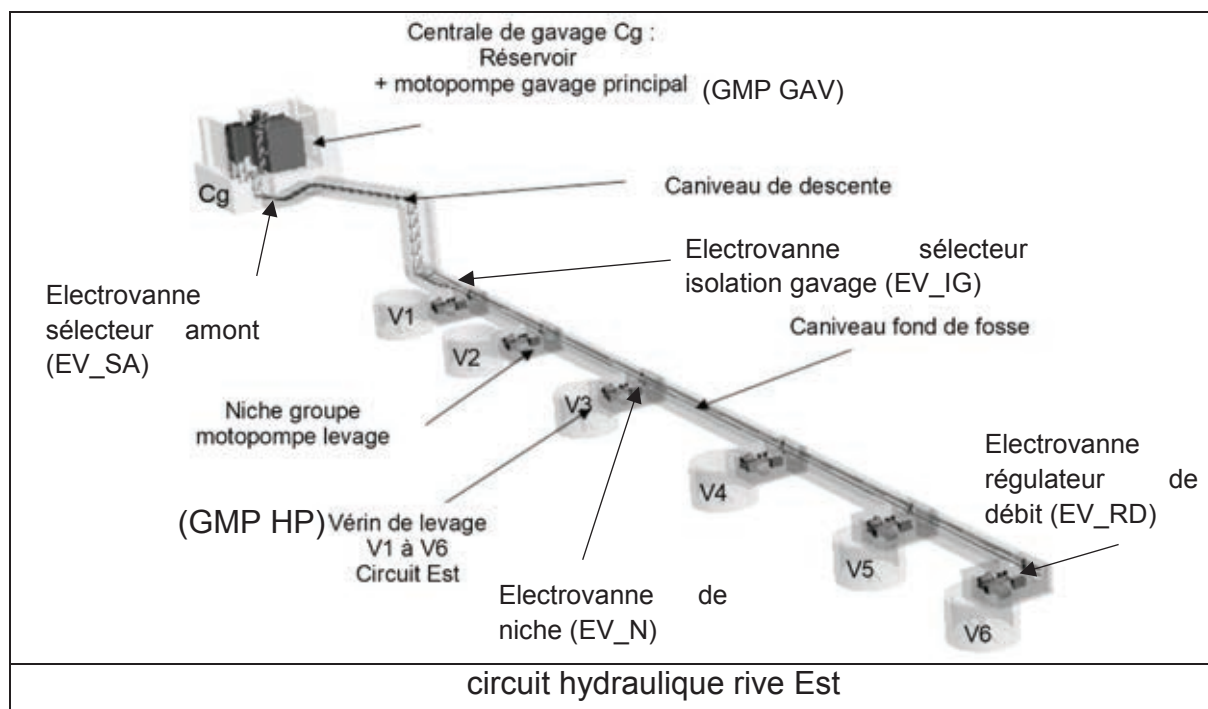
La température des fluides requise pour initialiser le levage du plateau mobile est de  $12^{\circ}\text{C}$ . Elle est mesurée par sonde analogique dans les réservoirs au niveau de chaque centrale de gavage. Le groupe motopompe de gavage est utilisé pour assurer la chauffe de chacune des rives (Est et Ouest). Tant que cette température de fonctionnement n'est pas atteinte, il ne sera pas permis de démarrer les pompes haute pression.

Le système de levage est composé de deux circuits hydrauliques :

- ils sont indépendants, l'un situé sur la rive Est et l'autre sur la rive Ouest ;
- chaque circuit est composé d'une centrale de gavage qui alimente 6 groupes motopompes haute pression ; chaque groupe motopompe haute pression alimente un vérin ;

## DT4 - Description du cycle de levage et du circuit hydraulique 2/2

La centrale hydraulique Est est présentée ci-dessous. Cette centrale permet la fourniture de l'énergie hydraulique aux vérins 1 à 6 de montée/descente du plateau mobile.



Les éléments principaux de chaque centrale hydraulique de gavage sont :

- un moteur asynchrone de 37 kW et une pompe hydraulique au niveau du réservoir d'huile formant le groupe motopompe de gavage principal ;
- une électrovanne sélecteur amont permettant d'isoler la ligne de gavage de la centrale et de sélectionner la pompe qui assurera la fonction gavage (EV\_SA) ;
- une électrovanne de pilotage régulateur de débit (EV\_RD) ;
- une électrovanne d'isolation aval de la ligne de gavage : permet d'isoler la pompe principale du circuit de gavage général en cas de panne sur le point de levage, sans intervention humaine (EV\_IG) ;
- des électrovannes liées à chacune des niches des groupes motopompes de levage (EV\_N) ;
- un pressostat ;
- un filtre qui protège les pompes de levage en cas de défaillance d'une pompe de gavage.

Le réseau hydraulique de gavage principal est constitué de trois circuits regroupés dans les caniveaux d'approvisionnement « de descente » et « fond de fosse » :

- le circuit de gavage au départ de la centrale hydraulique GMP GAV (groupe motopompe gavage) qui réalise la mise en chauffe de l'huile et l'alimentation des 6 groupes motopompes de levage haute pression GMP HP ;
- le circuit de retour principal de l'huile des pompes de levage vers la centrale de gavage ;
- le circuit de retour drainage (drain) qui récupère l'excédent de débit des pompes de levage et assure la lubrification des pièces mécaniques.

## DT5 - Fluide circuit hydraulique 1/2

### Théorème de Bernoulli généralisé

Le théorème de Bernoulli traduit la conservation de l'énergie d'un fluide en écoulement.

Lors d'un écoulement d'un fluide réel, supposé incompressible et stationnaire, entre deux points (1) et (2) d'un circuit hydraulique, il peut y avoir des échanges d'énergie entre ce fluide et le milieu extérieur :

- par travail à travers une machine, pompe ou turbine ; la puissance hydraulique échangée étant noté  $P_H$ .
- par pertes de charge aux frottements du fluide, différence de pression notée  $\Delta p$ .

$$\Delta \left[ p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g z \right]_1^2 = \underbrace{\left( p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 \right)}_{\text{charge à la sortie}} - \underbrace{\left( p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 \right)}_{\text{charge à l'entrée}} = \underbrace{\frac{P_H}{Q_v}}_{\substack{\text{pression hydraulique} \\ \text{de la pompe}}} - \underbrace{\Delta p}_{\text{perte charge}}$$

avec :

P pression statique du fluide	en Pa	
$\rho$ masse volumique du fluide	en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	
v vitesse moyenne d'écoulement du fluide	en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	
g accélération de pesanteur	en $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	$g = 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$
z côte	en m	
$P_H$ puissance hydraulique de la pompe	en W	
$Q_v$ débit volumique	en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	
$\Delta p$ perte de charge	en Pa	

### Pertes de charge régulière dans une conduite

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho v^2 L}{2 D}$$

Avec

L longueur de conduite	en m
D diamètre de conduite	en m
$\lambda$ coefficient de perte de charge	adimensionnel

Le coefficient  $\lambda$  dépend de la nature de l'écoulement et ainsi de la valeur du nombre de Reynold  $R_e = \frac{vD}{\nu}$  avec  $\nu$  viscosité cinématique du fluide.

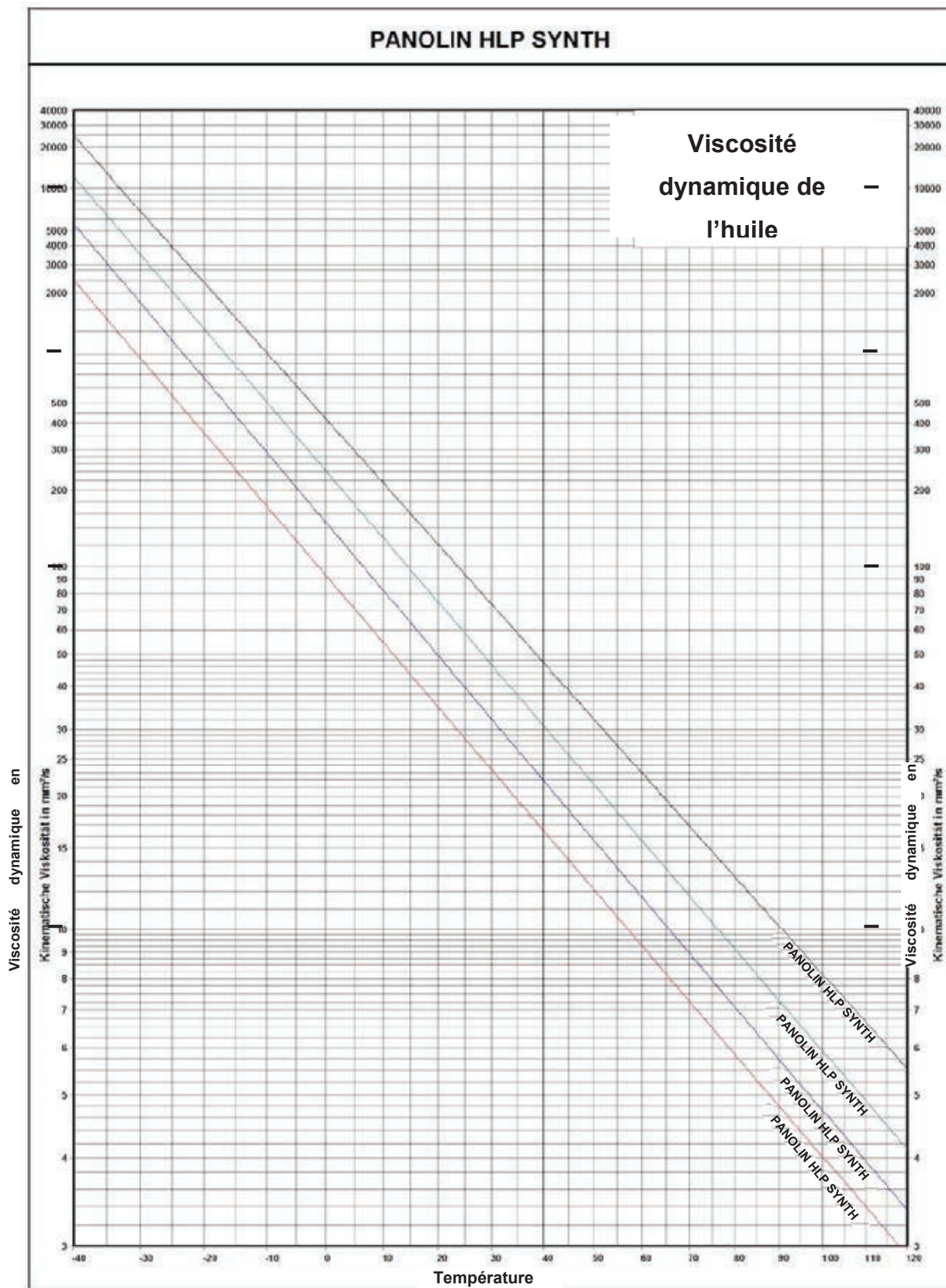
Pour simplifier l'étude on considèrera les relations suivantes :

$$R_e < 2000 \quad \lambda = \frac{64}{R_e}$$

$$R_e > 2000 \quad \lambda = 0,316 \times R_e^{-0,25}$$

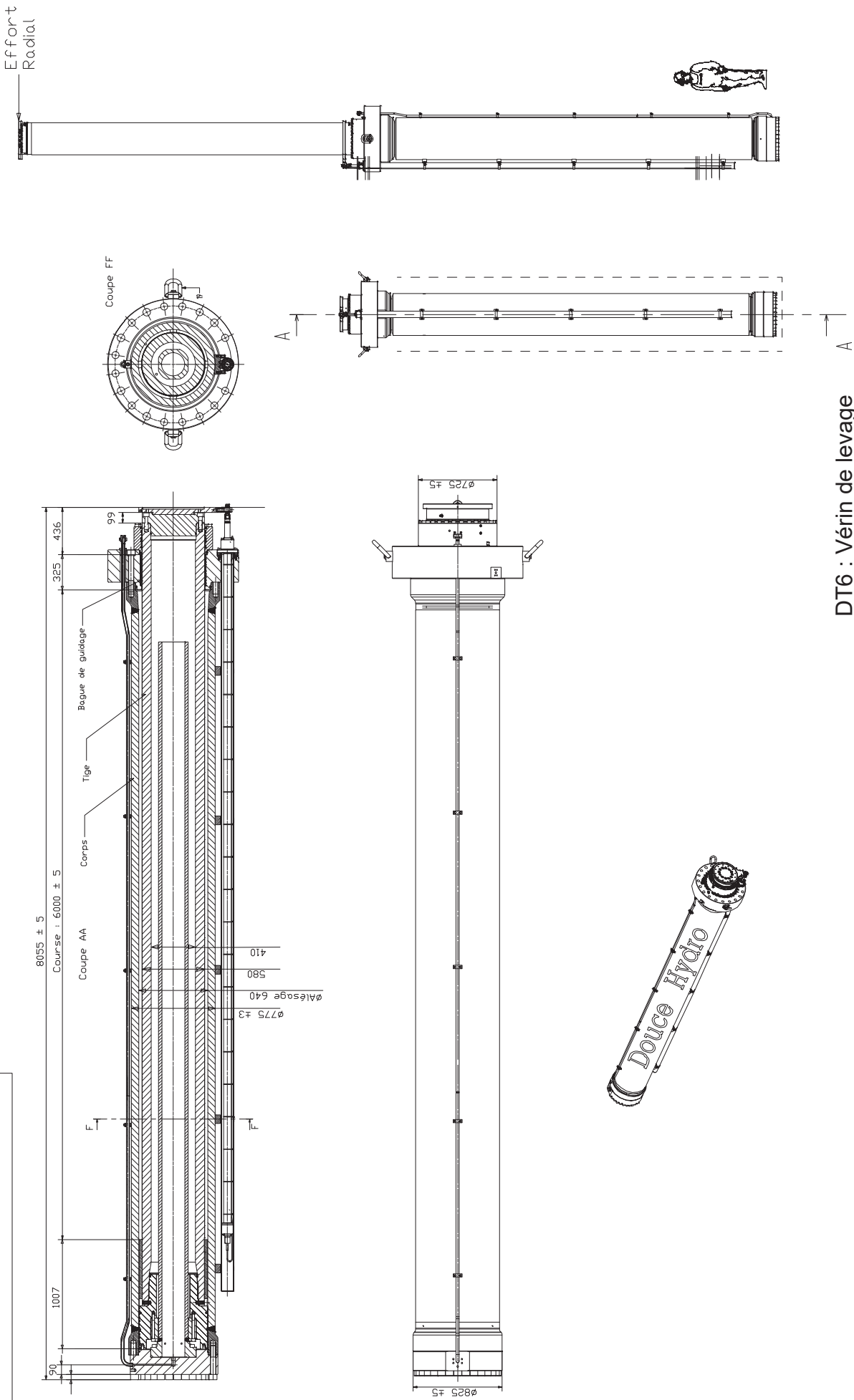


# DT5 - Fluide circuit hydraulique 2/2





Pression hydraulique à l'entrée :  
350 bars maximum

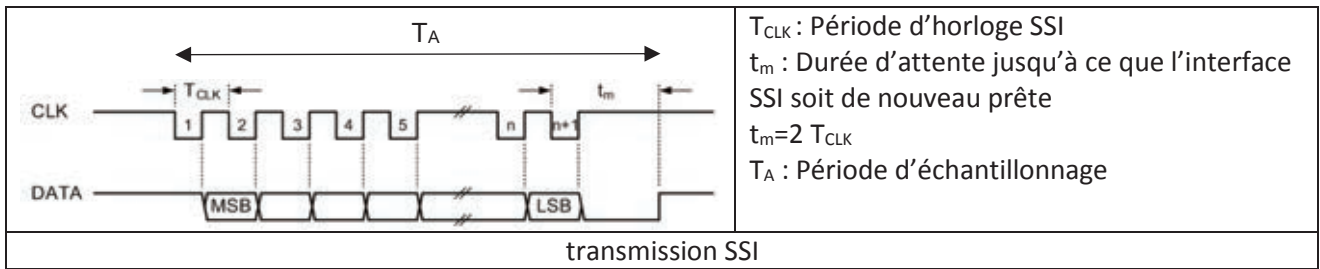


DT6 : Vérin de levage

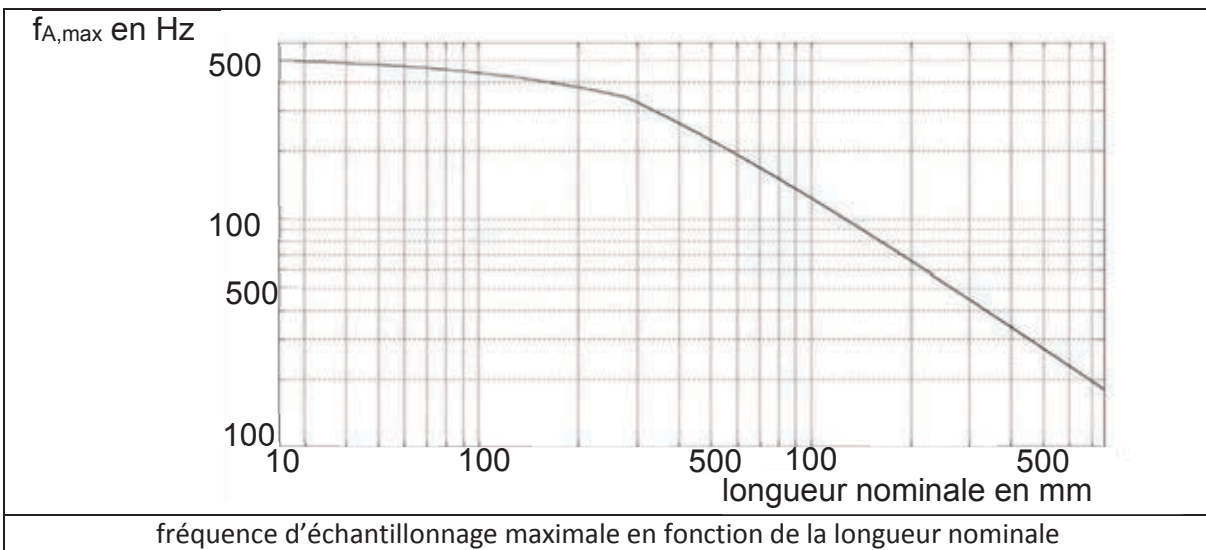
EXTRAIT DE PLAN D'ENSEMBLE VERIN DE LEVAGE  
Ech : 1:50

## DT7 - Capteur de position

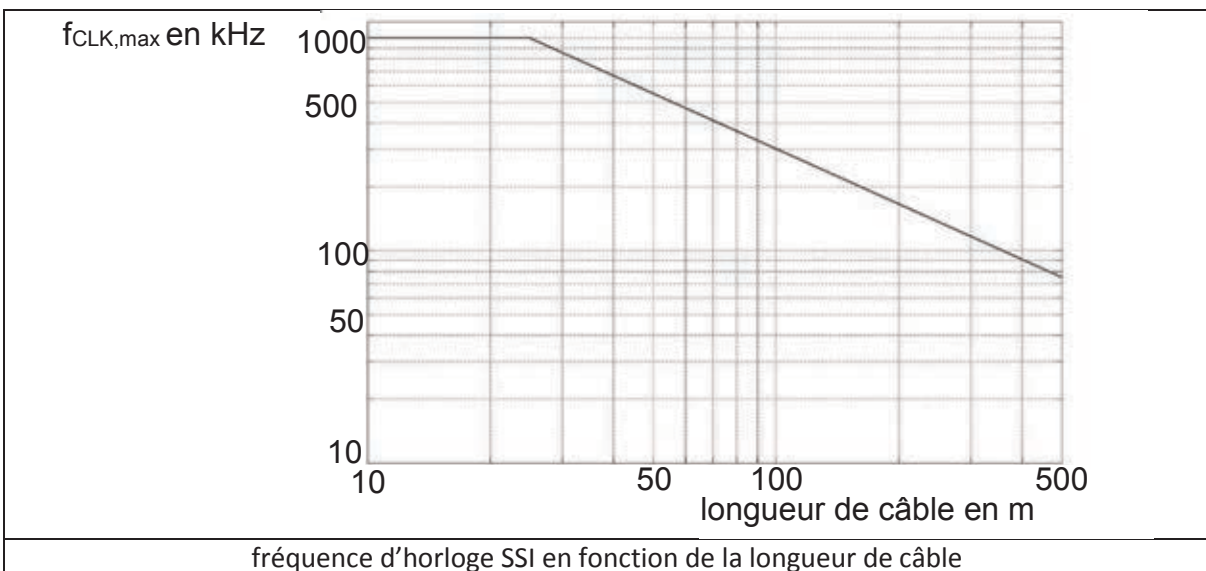
Le principe d'une transmission SSI peut être décrit par les chronogrammes suivants :



Le graphique suivant permet de déterminer la fréquence d'échantillonnage maximale  $f_{A,max}$ :



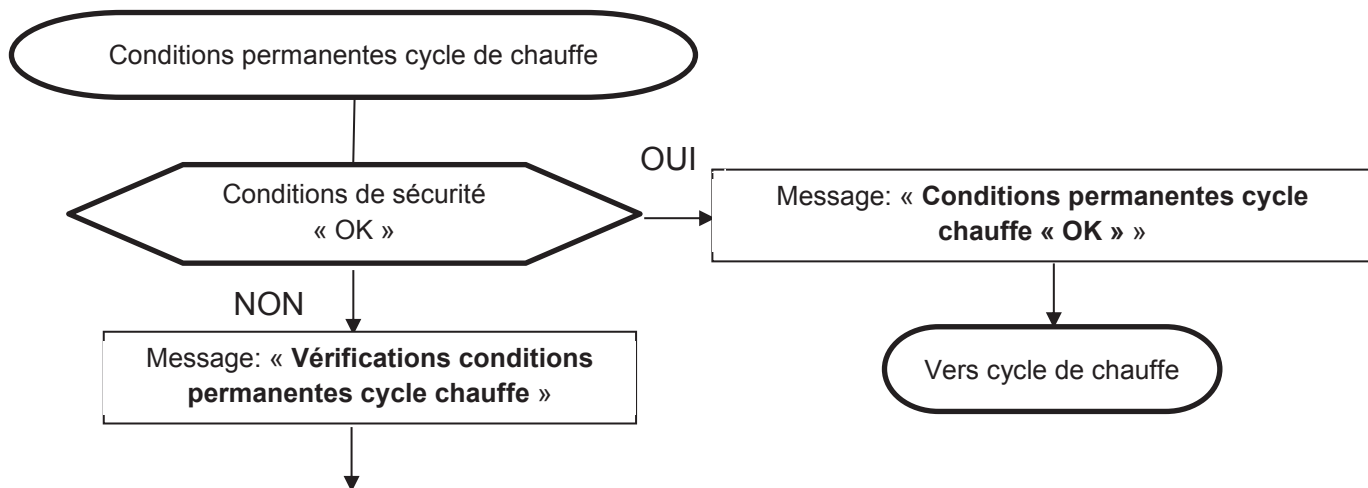
La fréquence d'horloge SSI maximale  $f_{CLK,max}$  dépend de la longueur du câble :



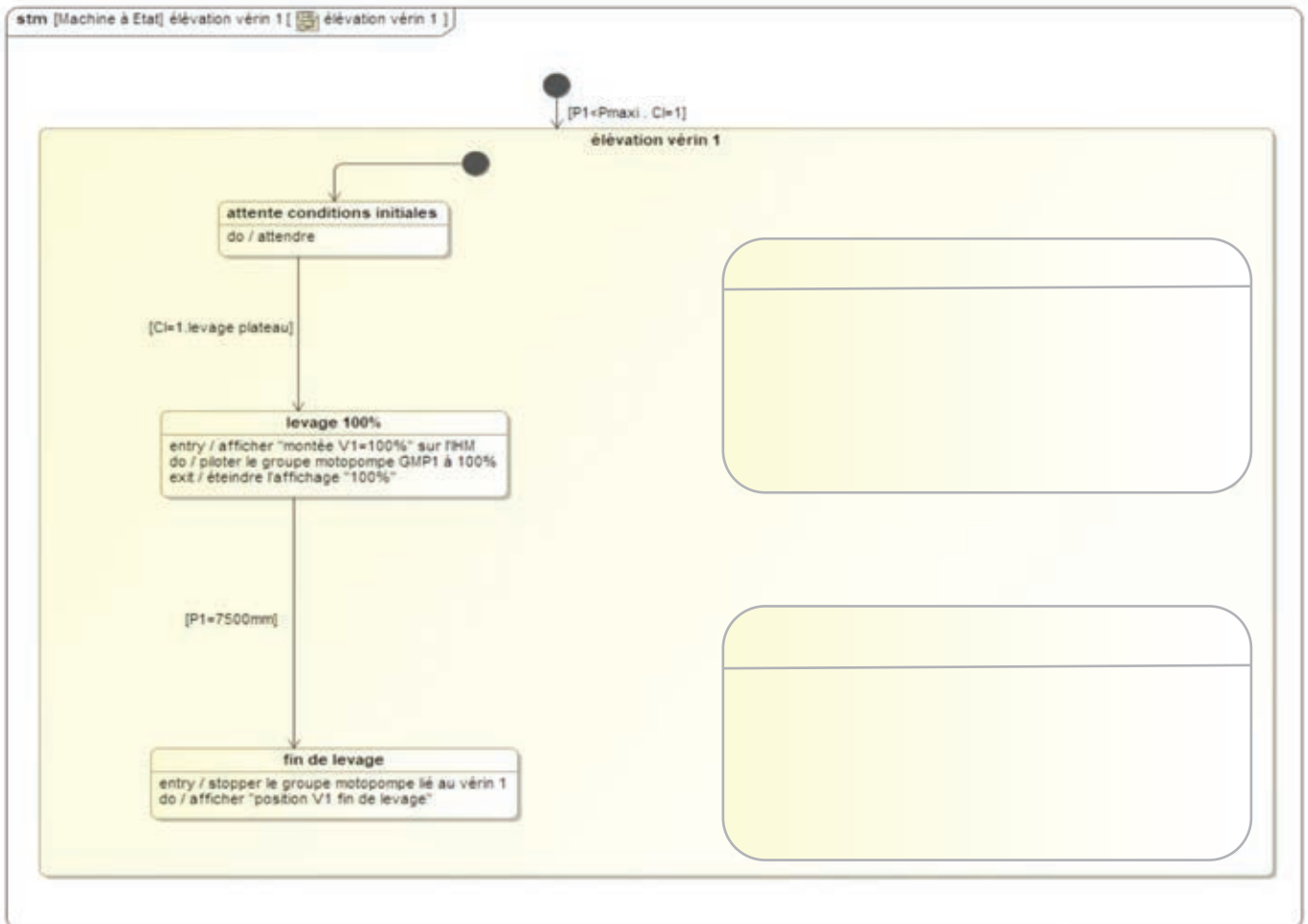


NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

### DR1 - Logigramme de vérification des conditions permanentes



## DR2 - Machine d'état « élévation vérin 1 »



Notations :

P1 : position du vérin 1

CI : conditions initiales (non détaillées ici)

### DR3 - Diagramme partiel des blocs internes du plateau mobile

