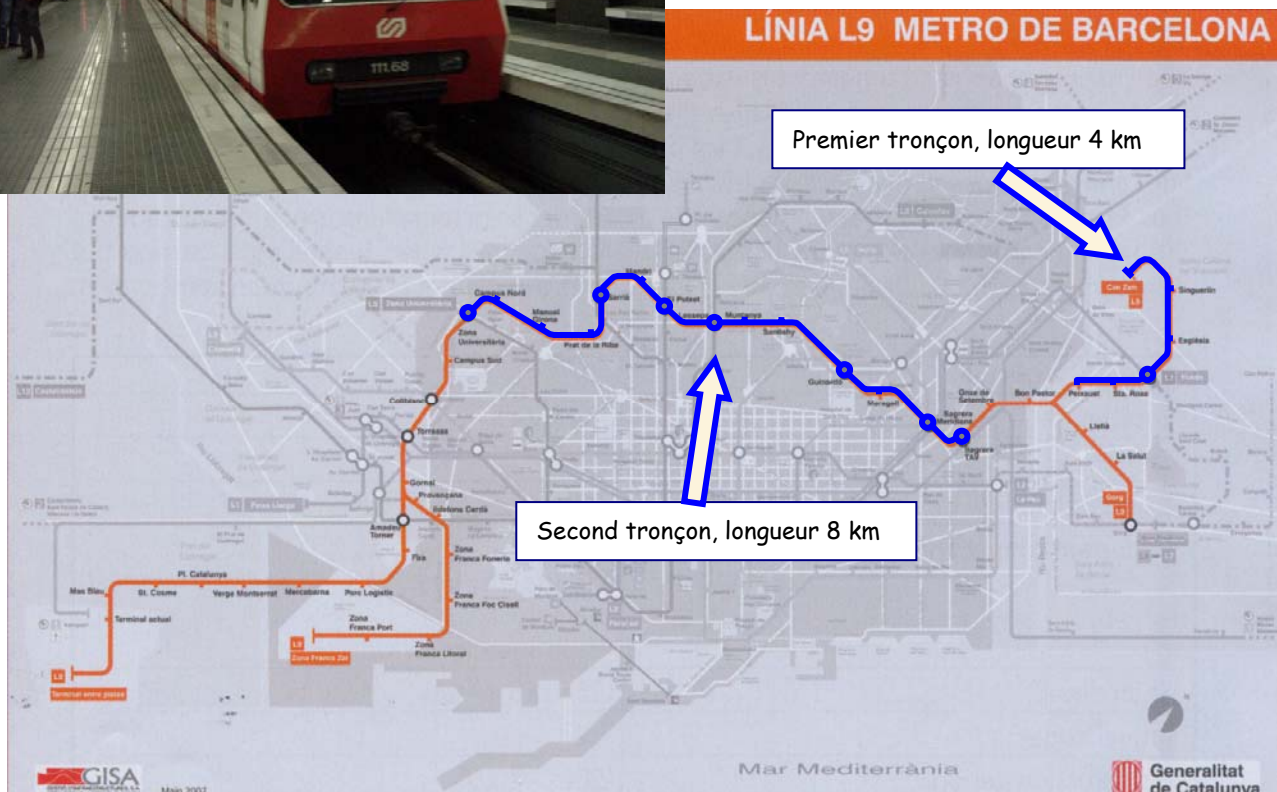


## LE PROJET "LIGNE 9" DU METRO DE BARCELONE

Barcelone compte près de 3 millions d'habitants, qui s'appuient en grande partie sur les transports publics pour effectuer chaque jour leurs déplacements. La nouvelle ligne 9 du métro, d'une longueur totale de 41 km, dont 34 km de tunnel, et comprenant 43 stations et plusieurs liaisons stratégiques (aéroport, ligne ferroviaire à grande vitesse, métro), augmentera considérablement les possibilités de transports dans la ville.



La grande diversité des sols, principalement des formations rocheuses, implique l'utilisation de différentes machines de forage. Pour la partie composée principalement de roches dures (granodiorites, schistes et cornubianites), une machine à bouclier pour roches dures de NFM Technologies - Framatome - a été choisie.



### Le tunnelier:

Le tunnelier doit forer un premier tronçon constitué de roches dures, d'une longueur d'environ 4 km, qui débute à la station **Can Zam**, et aboutit peu après la station **Can Peixauet**. Il doit ensuite être démonté, puis transporté jusqu'à la station **Zona Universitaria**. Après remontage, il doit réaliser le tronçon de 8 km menant à la station **Sagrera**.

La machine de forage, équipée de 81 outils (molettes) et pouvant exercer une poussée maximale de 110 000 kN, peut être facilement adaptée pour une utilisation dans un environnement de sols instables ou de zones de failles.

### Caractéristiques générales du tunnelier:

- Diamètre théorique de forage : 11,95 m
- Diamètre interne de la galerie : 10,9 m
- Longueur du bouclier : 12,6 m
- Longueur totale du tunnelier : 140 m (avec train suiveur)
- Poids total : 2 200 tonnes
- Puissance nominale totale de la machine : 8 150 kW
- Moteurs de la tête de coupe : 4 725 kW
- Poussée des 30 vérins : nominale : 90 000 kN ; maximale : 110 000 kN
- Couple nominal de forage : 29 000 kNm à 1,25 t/min
- Vitesse de rotation de la tête de coupe : 0 à 3,7 t/min
- Revêtement intérieur réalisé par voussoirs universels à clés.



---

### **Recommandations**

---

Les quatre parties de l'épreuve sont indépendantes.

Il est recommandé au candidat de répartir son temps de travail sur les différentes parties de l'étude de la façon suivante :

- **Lecture du sujet** 1 heure
- **Première partie :** principe de réalisation de la galerie du tunnel par voussoirs 1 heure
- **Deuxième partie :** étude de l'érecteur, manipulateur destiné à positionner et assembler les voussoirs 2 heures
- **Troisième partie :** étude géométrique de la partie terminale de l'érecteur 2 heures
- **Quatrième partie :** étude de conception d'un préhenseur mécanique 2 heures

Le candidat devra rendre

- quatre copies séparées correspondant aux quatre parties du sujet ;
- les documents réponses, qui seront insérés dans la copie afférente à la partie traitée.

## PRESENTATION DU TUNNELIER

Un tunnel est un ouvrage souterrain de dimensions importantes, destiné à livrer passage à une voie de communication routière ou ferroviaire. C'est un ensemble complexe dont l'utilisateur ne voit que le tout dernier revêtement.

A chaque nouveau forage se pose le problème de la satisfaction des exigences techniques -résistance, étanchéité...- à un coût raisonnable.

Les tunnels doivent fréquemment traverser des sols géologiquement complexes et parfois encombrés de réseaux d'eau, d'électricité ou de télécommunication. Le nombre de forages de tunnels allant croissant, ce n'est plus la géologie qui préside au choix des tracés, mais des considérations économiques, politiques et sociales.

La technique des tunneliers, mise en œuvre depuis les années 1990 en France permet, d'une part, de s'affranchir des nuisances occasionnées par la réalisation de tranchées ouvertes, telles que le bruit, la pollution, l'interruption du trafic, et d'autre part, de passer sous les réseaux existants.

Les tunneliers permettent des progressions de 3 à 20 cm par minute (suivant la nature géologique du terrain) dans des galeries de 3 à 15 m de diamètre.

Un tunnelier assure cinq fonctions principales :

- le forage du tunnel ;
- le soutènement du front de taille et du front latéral du tunnel (si nécessaire) ;
- le contrôle des charges d'eau (si nécessaire) ;
- l'évacuation des déblais vers la surface ;
- la pose du revêtement du tunnel.

Les photographies des figures 1 et 2 montrent l'allure générale d'un tunnelier et de son train suiveur, en vue de 3/4 avant et 3/4 arrière.



**Figure 1** : vue de la partie avant d'un tunnelier (bouclier, tête de coupe)



**Figure 2** : vue de la partie arrière du tunnelier (train suiveur) en cours de construction

Le FAST partiel du document 2 précise les fonctions du tunnelier.

---

## DESCRIPTION DU FONCTIONNEMENT DU TUNNELIER (documents 1 et 2)

---

### Forage

Le forage de la galerie est réalisé par la tête de coupe du tunnelier. Il s'agit d'un disque ajouré, mécano soudé, équipé d'outils rapportés, qui peuvent être fixes ou tournants par rapport à la tête de coupe, selon la nature du terrain à forer.

### Evacuation des déblais

Les éléments arrachés lors du forage sont dispersés au sein du fluide de marirage, évitant leur agglomération. L'évacuation est réalisée par deux composants successifs :

- une vis convoyeuse ou un convoyeur qui assure le transfert des déblais de la zone de creusement à la partie arrière du bouclier, à travers le mécanisme de pose des voussoirs ;
- une bande transporteuse qui réalise l'évacuation dans la partie du train suiveur.

### Pose des voussoirs (se référer au dossier industriel)

Il s'agit de constituer une paroi au moyen d'anneaux de béton armé préfabriqués, qui ont un double rôle :

- ils assurent la résistance de la galerie à la pression extérieure. La zone située entre la paroi brute de creusement et les voussoirs est comblée par injection de béton. Ils réalisent également la finition intérieure de la galerie ;

- ils offrent un appui axial à la partie active (tête de coupe + bouclier), pour assurer l'avancement du



tunnelier.

**Figure 3** : aspect d'une galerie de tunnel réalisée par anneaux de voussoirs

Le système de pose des voussoirs est situé dans la partie arrière du bouclier, c'est ce système qui est l'objet de cette étude.

## PREMIERE PARTIE : REALISATION DE LA GALERIE PAR VOUSSOIRS

Après forage d'une distance équivalente à la longueur d'un anneau, la tête de coupe est stoppée et la pose de l'anneau est effectuée.

Le document 3 présente la géométrie des voussoirs constituant un anneau. Il s'agit de 8 segments de béton armé : les éléments repérés (1), (2), (3) (4) et (5) sont appelés segments standards, bien que n'étant pas identiques. Les éléments (6) et (7) sont les segments contre clés, et le dernier élément (8) est appelé segment clé.

Durant la phase de forage, les huit voussoirs constituant un anneau sont transportés depuis le train suiveur jusqu'à une table de convoyage sur laquelle ils sont déposés, dans l'ordre de leur montage.

Chaque anneau affecte une forme générale cylindrique, limitée par deux faces planes symétriques par rapport à un plan orthogonal à l'axe du cylindre. Les faces font entre elles un angle noté  $\alpha$ . Cette disposition permet de donner une "courbure" à la galerie en jouant sur la position angulaire relative des voussoirs successifs.

La figure développée du document 3, sans échelle, donne les principales dimensions de l'anneau.

L'érecteur de voussoirs est le mécanisme de manutention qui permet la mise en place précise des segments, un à un, dans l'ordre de leurs repères. Ils sont alors fixés sur l'anneau précédent au moyen de chevilles et boulons spéciaux.

Ces éléments de fixation sont temporaires. Ils sont retirés après l'injection du béton destiné à remplir l'intervalle entre l'anneau - voussoir et la paroi brute de la galerie.

### Réalisation de la galerie par les anneaux voussoirs

#### Question 1-1

Décrire le principe de creusement d'une galerie en virage dans un plan horizontal. Pour cela, représenter en vue de dessus, sous forme schématique :

- le bouclier, en distinguant la partie avant (tête de coupe et bouclier frontal) de la partie arrière (bouclier arrière). Le train suiveur ne sera pas représenté ;
- la paroi brute de la galerie et les derniers anneaux de voussoirs posés ;
- les vérins assurant l'effort de poussée sur la tête de coupe.

L'usage de couleurs pour distinguer les différents éléments est recommandé.

#### Question 1-2

Le document en annexe décrit le principe de constitution de la galerie au moyen d'anneaux voussoirs, ainsi que les solutions retenues pour réaliser une galerie en courbe.

La figure 4 définit le rayon moyen  $R_c$  du virage associé à un anneau isolé, la longueur  $L$  de l'anneau au niveau de son axe, et l'angle  $\alpha$  formé par ses deux faces.

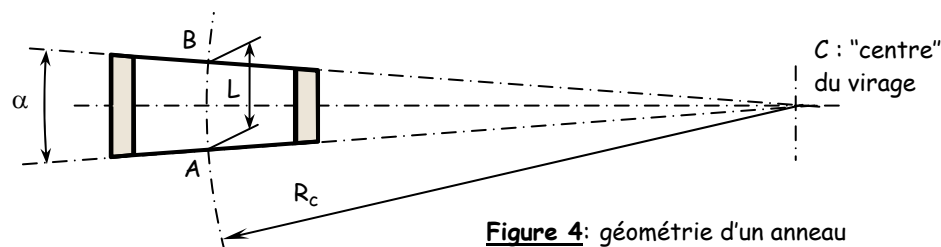


Figure 4: géométrie d'un anneau

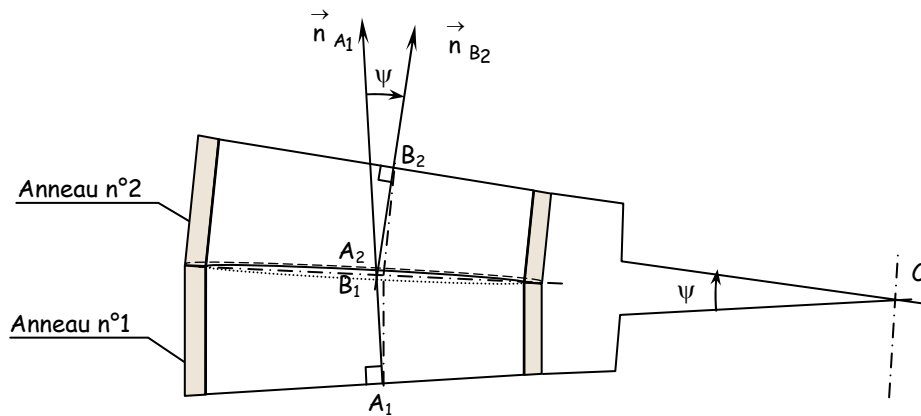
Donner l'expression du rayon  $R_c$  du virage en fonction de  $\alpha$  et  $L$ .

**Application numérique** : calculer la valeur de  $R_c$ .

#### Question 1-3 (Figure 5)

Pour moduler le rayon de courbure moyen  $R_c$  du virage, il convient de réaliser des groupements d'anneaux. On suppose dans cette question que deux anneaux, repérés (1) et (2) sont associés, en faisant coïncider les centres  $B_1$  et  $A_2$  des faces planes en contact, et en les décalant angulairement d'un angle  $\theta$  autour de la normale à cette face.

La géométrie des deux anneaux associés est similaire à celle d'un anneau unique, avec en particulier un rayon de virage  $R_c = CA_1 = CB_2$  et un angle formé par les faces planes extérieures noté  $\psi$ .



**Figure 5** : association de deux anneaux

**Nota** : pour permettre le boulonnage des voussoirs lors de la mise en place des deux anneaux, l'angle  $\theta$  doit être un multiple entier de  $2\pi/15$ .

Dans le cas de cette association de deux anneaux :

- établir les deux relations liant  $\psi$ ,  $R_c$ ,  $\alpha$ ,  $L$ , et  $\theta$ .
- **application numérique** : déterminer l'ensemble des valeurs possibles pour le rayon  $R_c$  du virage en fonction de l'angle  $\theta$ .

Expliquer pourquoi le constructeur du tunnelier déconseille d'utiliser sur une grande distance les anneaux dans la configuration du rayon mini déterminé ci-dessus.

---

## DEUXIEME PARTIE : ETUDE DE L'ERECTEUR DE VOUSOIRS

---

### Description de l'érecteur (documents 4, 5, 6 et 8)

---

La pose des voussoirs à l'intérieur de la zone arrière du bouclier est assurée par un érecteur qui doit manipuler des éléments dont le poids peut atteindre 80 kN.

L'érecteur est un manipulateur mécanique à commande hydraulique constitué de cinq éléments principaux :

- le bâti (0) fixe lors de la phase de manipulation des voussoirs ;
- le chariot axial (1), mobile en translation rectiligne suivant  $\vec{x}_0$  par rapport au bâti (0) ;
- l'unité rotative (2), mobile en rotation d'axe  $(B_1, \vec{x}_0)$  par rapport au chariot axial (1) ;
- le chariot radial (3), mobile en translation rectiligne suivant  $\vec{z}_3$  par rapport l'unité rotative (2) ;
- le préhenseur : il s'agit d'un ensemble fixé sur le chariot radial (3) qui assure la saisie du voussoir. Il permet de commander quatre mouvements de faibles amplitudes, qui réalisent le réglage fin de la position du voussoir au moment de son accostage sur l'anneau précédemment posé et sur le voussoir voisin.

L'érecteur assure la mise en place des voussoirs à l'intérieur de la jupe du bouclier en respectant le cycle suivant :

- extension de la table de convoyage (non représentée, située dans le train suiveur), préhension du voussoir par l'érecteur, retrait de la table de convoyage ;
- translation radiale de dégagement ;
- approche rapide de la position par rotation de l'unité rotative, translation du chariot axial et translation du chariot radial ;
- positionnement fin du voussoir jusqu'à sa position de boulonnage ;
- mise en charge des joints par poussée du chariot axial contre l'anneau précédent et de l'unité rotative contre le voussoir voisin ;
- boulonnage du voussoir sur l'anneau précédent ;
- relâchement des efforts de compression des joints et retour de l'érecteur à sa position initiale.

---

### Préhension d'un voussoir

---

Le système de préhension des voussoirs situé sur le chariot radial est de type "à aspiration".

Le positionnement d'un élément sur le préhenseur est réalisé par mise en contact de sa surface cylindrique intérieure avec la platine de préhension. Le contact s'établit sur un ensemble de quatre plots de petites dimensions visibles sur le document 6. Dans cette situation, des bandes de matériau synthétique situées sous le préhenseur délimitent des chambres étanches qui sont mises en dépression par une pompe aspirante.

Deux "pieds de positionnement" définis par le document 6 complètent la liaison.

**Hypothèse** : les actions des bandes d'étanchéité du préhenseur sur le voussoir sont supposées négligeables devant les autres efforts mis en jeu.

---

### Etude des efforts entre préhenseur et voussoir

---

Durant la phase dynamique d'approche rapide, les mouvements de translation axiale, de rotation et de translation radiale sont prédéfinis, avec rampe d'accélération, palier de vitesse constante et rampe de décélération. La mise en position fine du voussoir est ensuite réalisée, par commande manuelle de l'opérateur.

Chaque voussoir est ceinturé par un joint d'étanchéité, en caoutchouc alvéolaire, collé dans une gorge.

L'érecteur est chargé de comprimer ce joint contre l'anneau précédent (A) d'une part - joint frontal -, et contre le voussoir voisin (V) d'autre part - joint latéral -. Le document 7 illustre cette phase.

La compression des joints est maintenue pendant toute la durée de la mise en place des éléments filetés de fixation des voussoirs.

Les joints, disposés à proximité immédiate de la face interne du voussoir, sont soumis à une charge linéique  $q = 32 \text{ N/mm}$ .



## Objectif de l'étude

La vérification de l'aptitude du système de préhension à maintenir le voussoir en toutes circonstances impose d'effectuer son étude dynamique dans la phase d'approche et son étude statique lors de la compression des joints pour évaluer les efforts mis en jeu.

Ces études nécessitent de déterminer au préalable les caractéristiques massiques du voussoir considéré, ainsi que l'effort "d'aspiration" qui lui est appliqué.

## Géométrie des masses du voussoir

### Question 2-1

On retient pour l'étude de la géométrie du voussoir le plus volumineux - opposé à la clé - une approximation par un secteur cylindrique, défini sur la figure 6. La masse volumique du matériau, notée  $\mu$ , est supposée uniforme.

Donner les expressions de la masse  $M_V$  et du poids  $\{P_V\}$  du voussoir ( $V$ ) si  $\vec{z}$  est la verticale ascendante.

Déterminer la position de son centre de masse dans le repère  $(C_V; \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ .

Préciser les propriétés de sa matrice d'inertie (le calcul des termes de la matrice n'est pas demandé).

AN : déterminer les valeurs de la masse, du poids et la position du centre de masse du voussoir. On prendra  $\mu = 2,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  et  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ . Les valeurs des paramètres géométriques sont à relever sur le document 3.

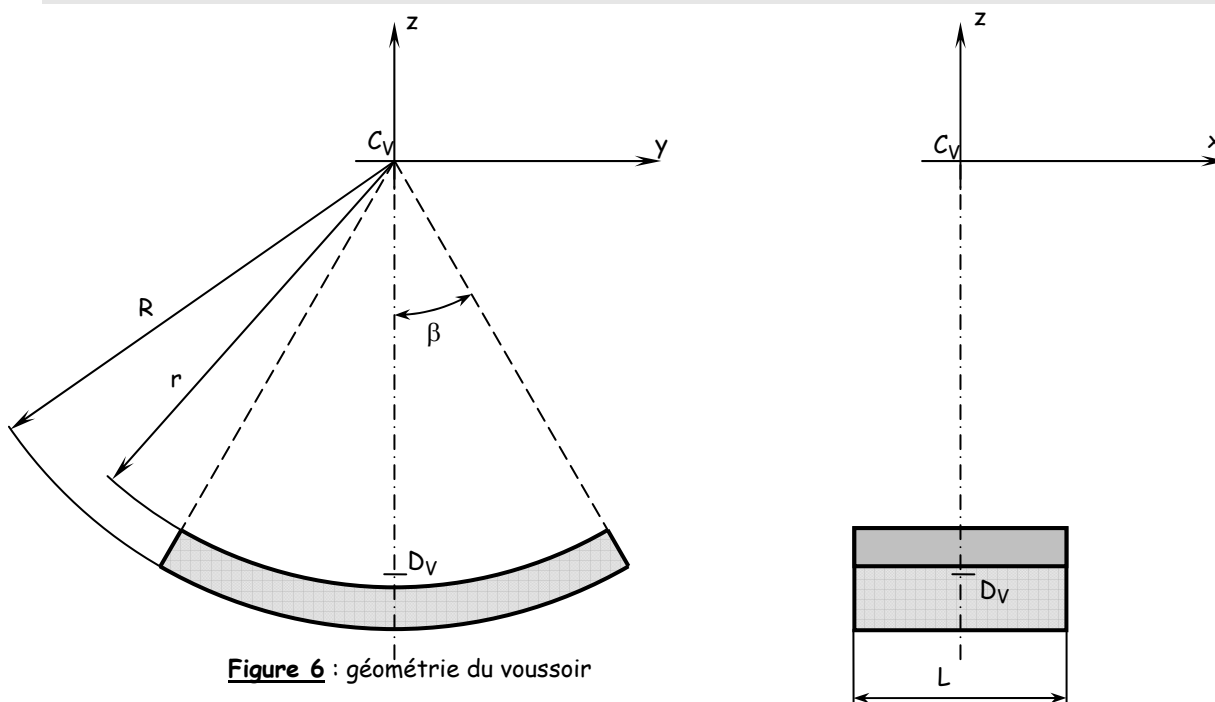


Figure 6 : géométrie du voussoir

### Hypothèses et notations

On supposera dans la suite de l'étude que la forme du voussoir est conforme à celle définie par la figure 6.  $C_V$  est le point de l'axe de l'anneau de voussoir situé dans le plan de symétrie des faces.

## Effort de maintien du voussoir

### Question 2-2 (document 6)

Le document 6 définit les contours des trois chambres d'aspiration assurant le maintien du voussoir.

En utilisant le document 6 à l'échelle 1/15, évaluer l'étendue de la surface d'action de chaque chambre, puis le torseur modélisant l'action exercée par l'air sur le voussoir, si la pression absolue vaut  $p = 15 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ .

On supposera la pression atmosphérique égale à  $p_0 = 100 \cdot 10^3 \text{ Pa}$ .

Préciser les hypothèses et simplifications retenues pour réaliser cette étude.

## Vérification du maintien du voussoir dans la phase de compression des joints

Cette partie de l'étude est destinée à vérifier que le voussoir reste au contact du préhenseur lors de la mise en compression des joints. Au cours de cette phase, le système est dans une situation statique.

### Question 2-3 (document 7)

En utilisant les schémas du document 7, définir les torseurs modélisant les actions de compression des joints lors de la mise en place du voussoir (V), contre le voussoir voisin (V') d'une part et contre l'anneau (A) d'autre part, en fonction de la charge linéique  $q$  et des paramètres géométriques.

**Application numérique** : évaluer les composantes des efforts ci-dessus si la charge linéique vaut  $q = 32 \text{ N/mm}$ . On supposera que  $R_j \approx r$ , rayon intérieur du voussoir.

### Question 2-4

Le document réponse 1 représente le voussoir dans une position angulaire quelconque, repérée par l'angle  $\theta$ .

Représenter graphiquement sur ce document :

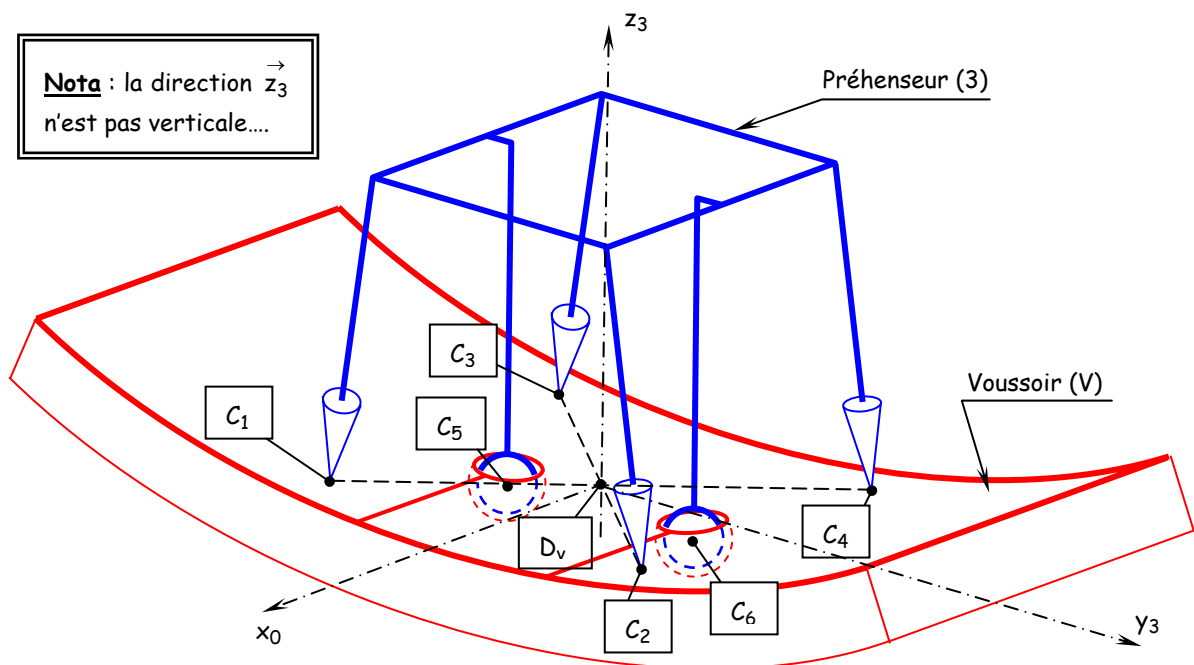
- l'action de pesanteur sur le voussoir ;
- les actions des joints lors de la phase de compression ;
- l'action "d'aspiration" du préhenseur.

### Question 2-5

La figure 7 ci-dessous propose une modélisation de la liaison entre le préhenseur (3) et le voussoir (V) :

- les plots sont modélisés par des contacts ponctuels ( $L_1$ ), ( $L_2$ ), ( $L_3$ ) et ( $L_4$ ), de centres respectifs  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  et  $C_4$ , sommets d'un rectangle ;
- les deux "pieds" de positionnement, de forme conique dans la zone de contact, sont modélisés par deux rotules unilatérales ( $L_5$ ), et ( $L_6$ ), de centres  $C_5$  et  $C_6$ .

$D_V$  est le point "centre" de la liaison encastrement entre le préhenseur (3) et le voussoir (V). Il est situé à l'intersection des diagonales du rectangle ( $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_4$ ,  $C_3$ ) et défini par :  $\vec{C}_V D_V = -h \vec{z}_3$ .



**Figure 7** : modélisation de la liaison préhenseur - voussoir

**Notations** :

$$\vec{C}_1 C_3 = \vec{C}_2 C_4 = -2a \vec{x}_0 \qquad \vec{C}_1 C_2 = \vec{C}_3 C_4 = 2b \vec{y}_3$$

$$\vec{D}_V C_5 = -c \vec{y}_3 - d \vec{z}_3 \qquad \vec{D}_V C_6 = c \vec{y}_3 - d \vec{z}_3$$

Commenter le modèle de liaison entre préhenseur et voussoir proposé par la figure 7 et préciser son caractère iso-hyperstatique.

On considère la position du voussoir définie par le document réponse 1. Procéder à l'étude statique du voussoir et écrire les équations correspondantes.

**Question 2-6**

On suppose que la liaison voussoir - préhenseur est à la limite du décollement. Certaines composantes des actions dans les liaisons (L<sub>1</sub>) à (L<sub>6</sub>) vont s'annuler, du fait de la rupture du contact, mais les déplacements sont suffisamment petits pour supposer que l'effort d'aspiration est toujours appliqué sur le voussoir.

Formuler des hypothèses sur les composantes des actions dans les liaisons (L<sub>1</sub>) à (L<sub>6</sub>), compatibles avec l'hypothèse de début de décollement dans la position du document réponse 1.

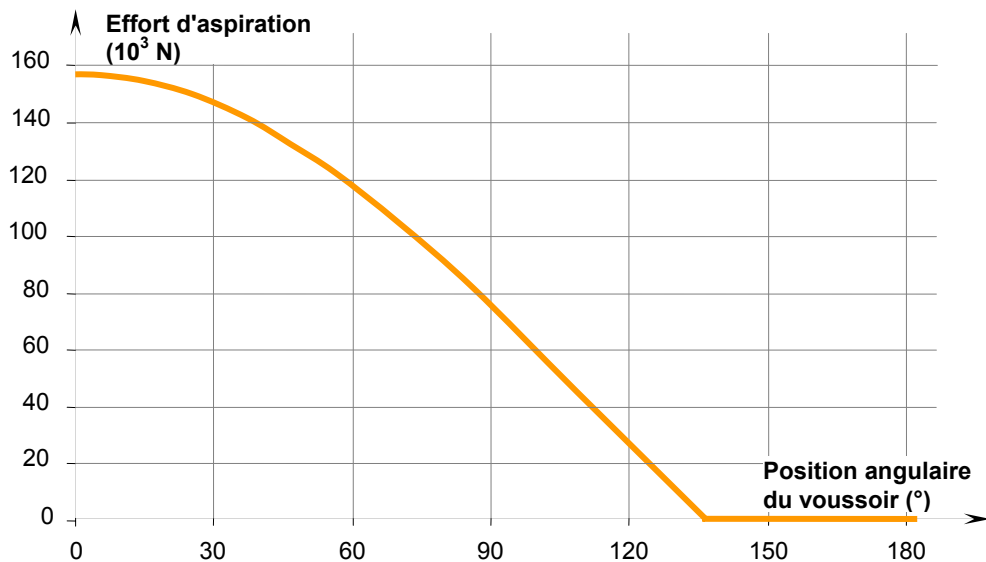
Analyser le système d'équations traduisant l'équilibre du voussoir. Discuter la possibilité de résoudre le système.

La résolution n'est pas demandée.

**Question 2-7**

Une résolution numérique permet de déterminer la valeur de l'effort d'aspiration correspondant à la limite du maintien de contact, conformément aux hypothèses ci-dessus, en fonction de la position angulaire  $\theta$  du voussoir.

Cet effort est représenté sur la figure 8.



**Figure 8** : effort d'aspiration en phase de compression des joints

Proposer une définition du "coefficient de sécurité" du système de maintien de la liaison par aspiration.

Déterminer la valeur numérique mini de ce coefficient de sécurité.

Cette valeur vous paraît-elle compatible avec la présence de personnel à proximité de la zone d'évolution de l'érecteur ?

**Vérification du maintien du voussoir dans la phase dynamique**

**Question 2-8 (document 8)**

**Paramétrage géométrique :**

- translation du chariot axial (1) par rapport au bâti (0) :  $\vec{A}_0\vec{B}_1 \cdot \vec{x}_0 = \lambda_{10}$
- rotation de l'unité rotative (2) par rapport au chariot axial (1) :  $(\vec{y}_0, \vec{y}_3) = (\vec{z}_0, \vec{z}_3) = \theta_{21}$
- translation du préhenseur (3) par rapport à l'unité rotative (2) :  $\vec{C}_2\vec{D}_V \cdot \vec{z}_3 = \mu_{32}$

- position du centre de masse du voussoir (V) depuis le centre de la liaison encastrement sur le préhenseur

$$(3) : D_V \vec{G}_V = a \vec{x}_0 + b \vec{z}_3$$

Effectuer l'étude dynamique du voussoir dans l'hypothèse de trois mouvements simultanés,  $\lambda_{10}$ ,  $\theta_{21}$  et  $\mu_{32}$  supposés connus en fonction du temps.

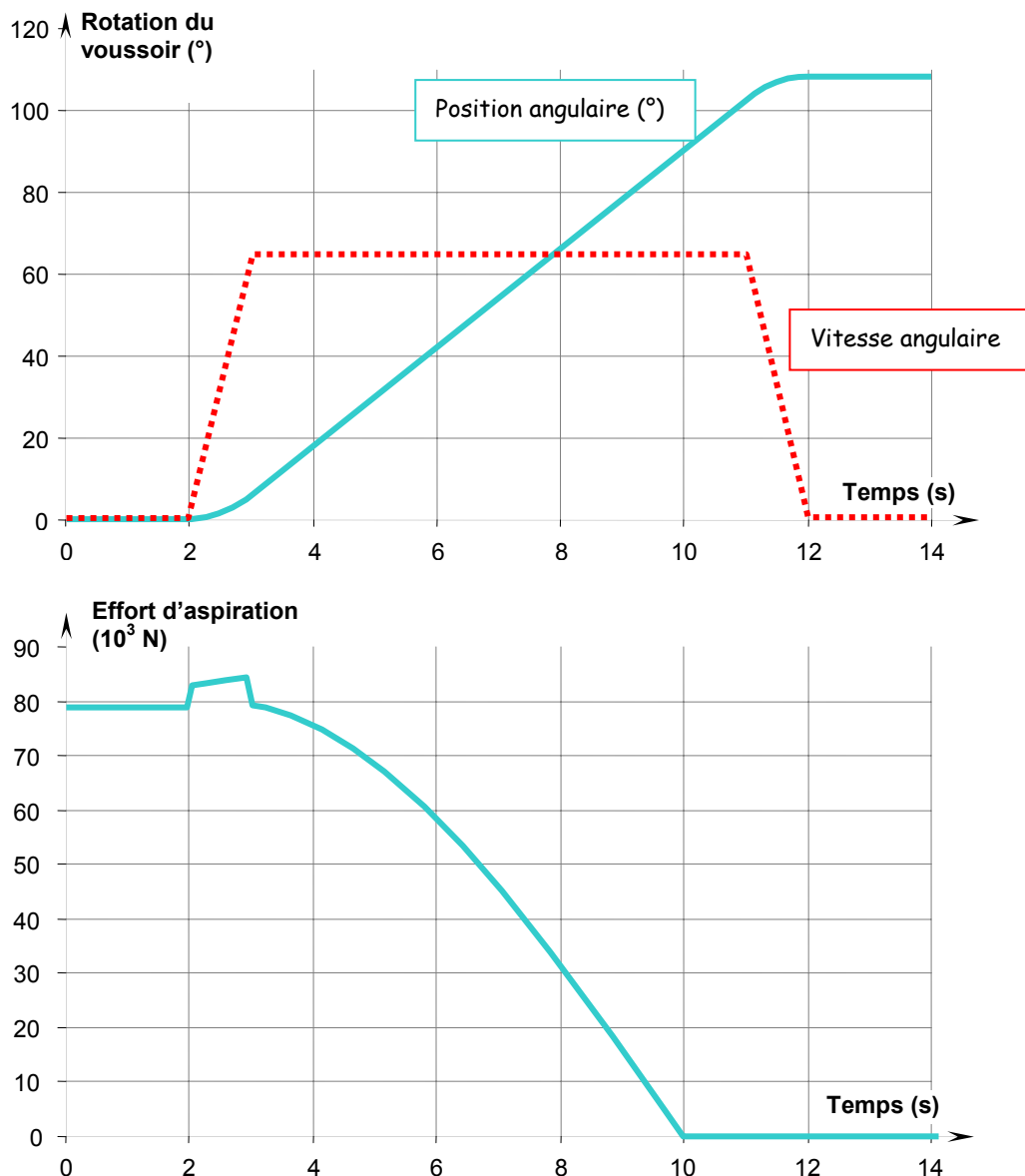
En déduire l'expression globale du torseur des actions dans l'encastrement entre préhenseur et voussoir.

### Question 2-9

Les courbes de la figure 9 représentent des paramètres physiques issus d'une résolution numérique du problème dynamique, dans un cas particulier du mouvement étudié ci-dessus.

La position initiale correspond à la fin de la phase de saisie du voussoir sur la table de convoyage. Le centre de masse  $G_V$  du voussoir est alors dans sa position la plus basse, à la verticale de l'axe de rotation de l'érecteur.

Les deux vitesses de translation  $\dot{\lambda}_{10}$  et  $\dot{\mu}_{32}$  sont nulles au cours du temps.



**Figure 9** : position angulaire effort d'aspiration en phase de mouvement

La commande du moteur impose à la rotation  $\theta_{21}$  une loi de vitesse en trapèze au cours du temps:

- montée linéaire en vitesse depuis l'arrêt, pendant 1 s ;
- maintien à vitesse constante pendant 8 s ;
- ralentissement linéaire jusqu'à l'arrêt en 1 s.

Les courbes de la figure 9 représentent en fonction du temps la position angulaire  $\theta_{21}$  de l'unité rotative de l'érecteur, et l'effort d'aspiration nécessaire au maintien du contact, à la limite du décollement.

Analyser et commenter ces courbes.

Quelle est la valeur mini du coefficient de sécurité du système de préhension dans la phase dynamique ?

## TROISIEME PARTIE : ETUDE GEOMETRIQUE DE LA PARTIE TERMINALE DE L'ERECTEUR

### Objectif

Cette partie de l'étude est destinée à dimensionner les vérins chargés d'assurer la mise en position fine des voussoirs au moment de la pose, en particulier leur course utile, et à définir une expression approchée de la loi de commande géométrique.

Le document 9 représente le schéma de principe, dans une position dite de référence, de la partie terminale de l'érecteur.

Elle est constituée (les repères diffèrent de ceux de la seconde partie) :

- du chariot radial (0) supposé fixe dans cette partie ;
- du préhenseur (1) lié au chariot (0) par un ensemble de liaisons équivalente à une liaison linéaire annulaire ;
- de quatre vérins :  $(V_1) = \{0, 1\}$ ,  $(V_2) = \{2, 2'\}$ ,  $(V_3) = \{3, 3'\}$  et  $(V_4) = \{4, 4'\}$ . Ces vérins sont liés au préhenseur par des rotules de centres  $C_1, C_2, C_3, C_4$ , et au chariot (0) par des rotules de centres  $B_2, B_3$  et  $B_4$ .

### Notations :

- Dans la position de référence, les différents points sont repérés par :

$$\vec{OC}_1 = -L_1 \vec{x}_0$$

$$\vec{OC}_2 = -d_1 \vec{y}_0$$

$$\vec{C}_2 \vec{B}_2 = d_0 \vec{z}_0$$

$$\vec{B}_4 \vec{C}_4 = L_4 \vec{x}_4$$

$$L_1 = 830 \text{ mm}$$

$$a_1 = 210 \text{ mm}$$

$$L_4 = 356 \text{ mm}$$

$$\vec{OC}_3 = d_1 \vec{y}_0$$

$$\vec{C}_3 \vec{B}_3 = d_0 \vec{z}_0$$

$$(\vec{x}_0, \vec{x}_4) = (\vec{y}_0, \vec{y}_4) = \alpha_4$$

$$d_1 = 950 \text{ mm}$$

$$b_1 = 710 \text{ mm}$$

$$\alpha_4 = -41^\circ$$

$$\vec{OC}_4 = -a_1 \vec{x}_0 + b_1 \vec{y}_0 + c_1 \vec{z}_0$$

$$d_0 = 240 \text{ mm}$$

$$c_1 = 40 \text{ mm}$$

- Depuis la position de référence, on note  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  et  $\Delta_4$  les déplacements des pistons par rapport aux cylindres dans les vérins  $(V_1), (V_2), (V_3)$  et  $(V_4)$ .

### Question 3-1

#### Etude géométrique

Les mouvements du préhenseur (1) par rapport au chariot (0) sont de faible amplitude. Ils peuvent être définis, au voisinage de la position de référence, par un torseur des petits déplacements, dont les composantes de rotation sont notées  $\delta\alpha, \delta\beta, \delta\gamma$  et les composantes de translation  $\delta u, \delta v$  et  $\delta w$ .

Ecrire le torseur des petits déplacements de (1) par rapport à (0) à partir des notations proposées.

Etablir les relations liant les translations  $\Delta_i$  dans les vérins et les composantes de ce torseur.

Discuter le système mis en place.

Les courbes du document 10 sont déduites de trois simulations informatiques successives. Elles sont établies dans le cadre des hypothèses suivantes :

- le vérin  $V_1$  est toujours immobile, dans sa position de référence ;
- chaque simulation est réalisée en pilotant en translation un seul des trois vérins  $(V_2), (V_3)$  ou  $(V_4)$  successivement. Lors du mouvement, les deux autres vérins sont immobiles, dans leur position de référence.

Les paramètres représentés sont les angles  $\delta\alpha, \delta\beta$  et  $\delta\gamma$  en fonction du déplacement du vérin piloté.

### Question 3-2

#### Application numérique

Compte tenu des dispersions dimensionnelles des voussoirs et des défauts géométriques de l'anneau précédemment posé, les capacités de réglage angulaire doivent être les suivantes :

$$\delta\alpha = 6^\circ (\pm 3^\circ) \qquad \delta\beta = 6^\circ (\pm 3^\circ) \qquad \delta\gamma = 6^\circ (\pm 3^\circ)$$

En exploitant les courbes issues des simulations, déterminer les valeurs numériques des courses des vérins pour respecter ces contraintes.

Justifier la validité de l'hypothèse de l'étude en petits déplacements.

### Question 3-3

#### Lois de commande de la partie terminale du préhenseur

Expliquer comment les courbes de la simulation peuvent être exploitées pour concevoir le système de commande de déplacement fin du voussoir.

On pourra illustrer la démarche en s'appuyant sur la recherche de la seule rotation  $\delta\beta$  ( $\delta\alpha = 0$  et  $\delta\gamma = 0$ ).

Les valeurs numériques utiles sont à relever sur les courbes.

### Question 3-4

#### Spécifications géométriques

Dans cette étude, nous allons analyser la liaison rotule bilatérale entre le châssis de l'érecteur et l'un des deux vérins de balance.

La géométrie des différentes pièces constituant cette rotule a une importance considérable sur la qualité de son fonctionnement et le respect du cahier des charges.

Nous allons nous attacher à l'analyse et à la mise en place de certaines spécifications géométriques.

Sur les différents dessins de définitions fournis sur le document réponse DR2, traduire qualitativement, et en respectant la norme ISO, les contraintes géométriques suivantes :

- permettre l'assemblage ;
- garantir le jeu de fonctionnement.

Remarque : on utilisera au maximum trois spécifications géométriques par dessin de définition, en prenant soin de justifier leur intérêt.

---

## QUATRIEME PARTIE : REALISATION DU VERIN CENTRAL ET DE LA LIAISON TETE-ERECTEUR/TABLE

---

Rappel des données principales du cahier des charges relatif au fonctionnement de la tête de l'érecteur :

Permettre la rotation de +/- 3° de la table autour des deux points de balance.

Permettre une translation de 100 mm de l'ensemble Table inférieure (partie2) par rapport à l'ensemble Table supérieure (partie1).

Assurer un effort maxi de 110 kN pour le déplacement de l'ensemble Table inférieure (partie2) + voussoir clé.

Supporter les efforts statiques.

Assurer la rotation de +/- 3° autour des axes 1-2 et 1-3.

Etre d'une conception robuste.

Pression d'alimentation des différents vérins de la tête de l'érecteur : 180 bar.

### Question 4-1

Après l'analyse des différentes contraintes associées, déterminer sous forme de graphes fonctionnels, schémas d'architecture et (ou) de schémas technologiques les différentes solutions que vous envisagez.

### Question 4-2

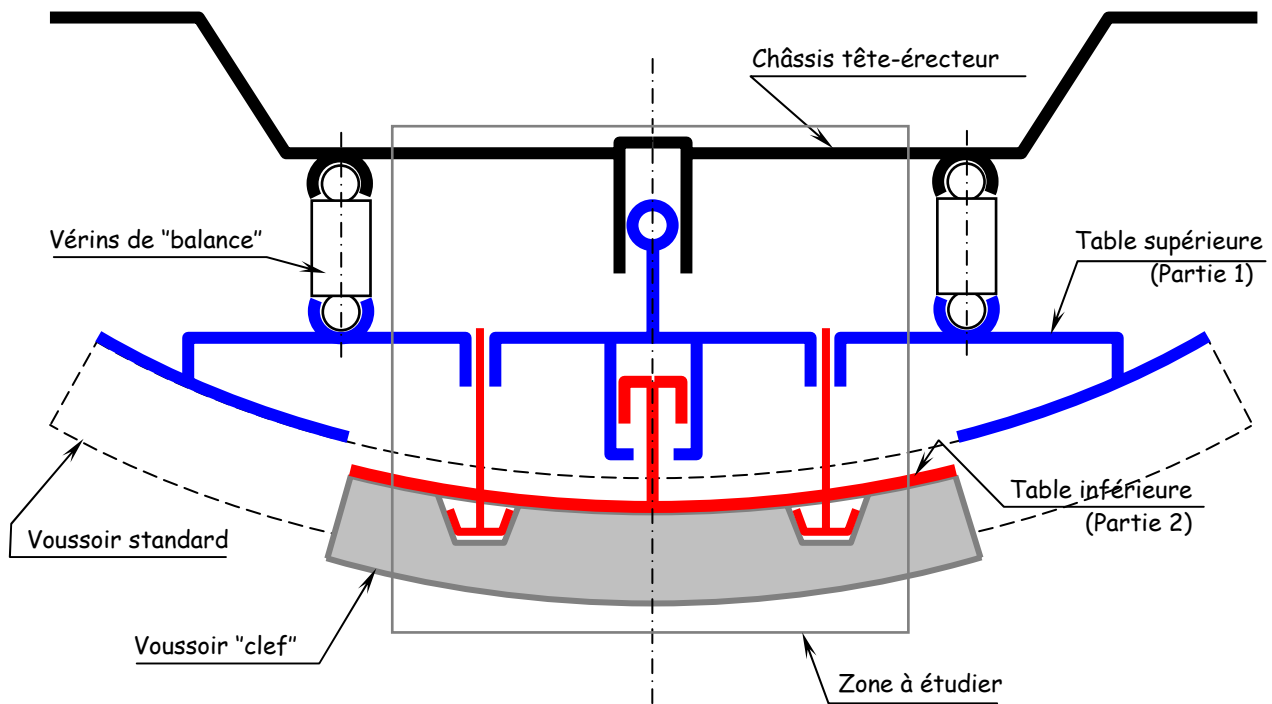
Sur le document DR3, établir le dessin d'ensemble à l'échelle 1:5 de la solution composée de deux vérins coaxiaux (figure 10) :

- le premier assure le déplacement de la table supérieure (partie 1) par rapport au châssis tête-érecteur. Sa course est d'environ 110 mm et il contribue au réglage fin de la position du voussoir. Il doit donc permettre les mouvements de rotation imposés par les vérins de balance ;
- le second permet de dégager la partie centrale du préhenseur lors de la manipulation du voussoir clef. Le déplacement de la table inférieure (partie 2) par rapport à la table supérieure (partie 1) est d'environ 100 mm. Le mouvement est une translation rectiligne, le guidage est assuré par les colonnes de fixation des pieds de positionnement. Des contacteurs détectent la taille du voussoir, ce qui a pour effet d'informer le système de commande de sa nature particulière, et de gérer le système en conséquence (en particulier, seule la chambre centrale est en dépression...).

La position géométrique des différents composants correspondra à la position pour laquelle la partie table-clé est translattée (déplacement maxi) par rapport aux deux parties extérieures. Des vues ou coupes complémentaires, en plan ou perspective, doivent être utilisées si elles facilitent la compréhension.

Ce dessin, au crayon, sera effectué de préférence aux instruments, les éléments normalisés seront définis et représentés de la manière la plus réaliste possible.



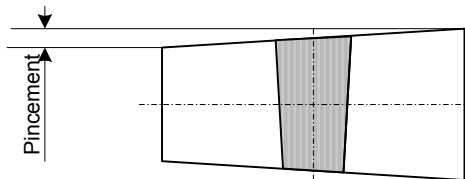


**Figure 10 :** schéma d'architecture de la tête d'érecteur

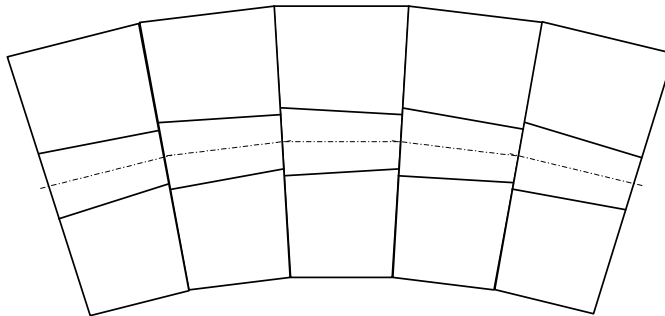
## VOUSSOIRS

### 1. Généralités

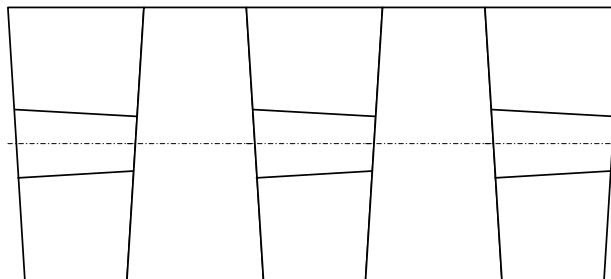
Il existe différents types de voussoirs, chaque entreprise développant un principe fonction d'une technique propre. Aujourd'hui, le principe le plus répandu est de type universel. L'anneau de voussoirs universel est constitué de plusieurs voussoirs de formes et tailles similaires, et d'une clé plus petite que les voussoirs courants. Les faces en contact de la clé avec les voussoirs courants ne sont pas parallèles



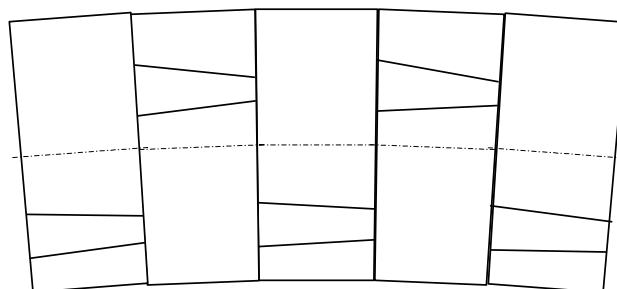
Vu de profil, l'anneau a ses deux faces non parallèles (forme de trapèze). Pour réaliser un virage de rayon mini, on aligne toutes les clés de chaque anneau:

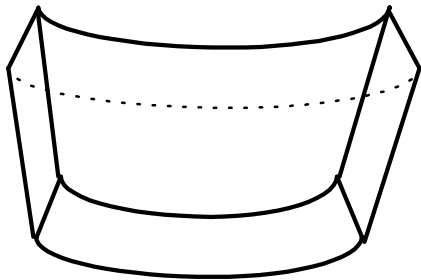


Pour réaliser un tunnel rectiligne, on alterne une clé en haut et une clé en bas.



Pour réaliser un virage de plus grand rayon, on positionne les clés sur une des positions intermédiaires:

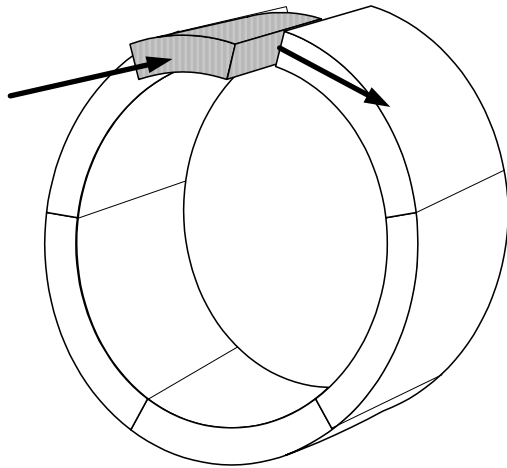
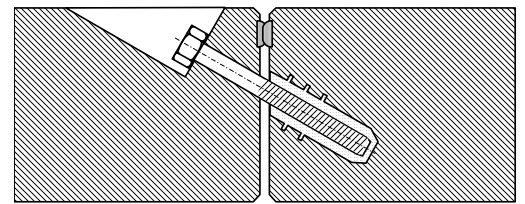




Chaque voussoir est boulonné sur l'anneau précédemment posé par des boulons vissés manuellement. Ces boulons sont mis en place pour maintenir le voussoir pendant la pose. Ils ne sont pas nécessaires à la tenue du tunnel au cours de son exploitation, et peuvent même dans certains cas être démontés avant les travaux de finition du tunnel. Les voussoirs d'un même anneau peuvent aussi être boulonnés entre eux, mais la tendance actuelle consiste

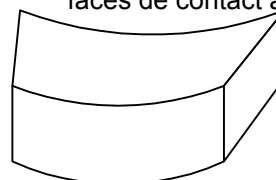
à ne boulonner que la clé sur les contre clés.

Chaque voussoir est entouré d'un joint caoutchouc alvéolaire collé dans une gorge. Les joints sont compressés l'un sur l'autre au moment de la pose afin d'assurer l'étanchéité:

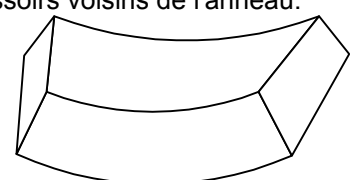


La clé est l'élément installé en dernier. Son rôle est de fermer l'anneau en écartant les voussoirs sous l'effet d'une poussée axiale lors de son montage, de façon à assurer la compression des joints entre voussoirs de l'anneau, et réaliser l'étanchéité.

La forme de la clé peut être de deux types, fonctions des faces de contact avec les voussoirs voisins de l'anneau:



A faces radiales

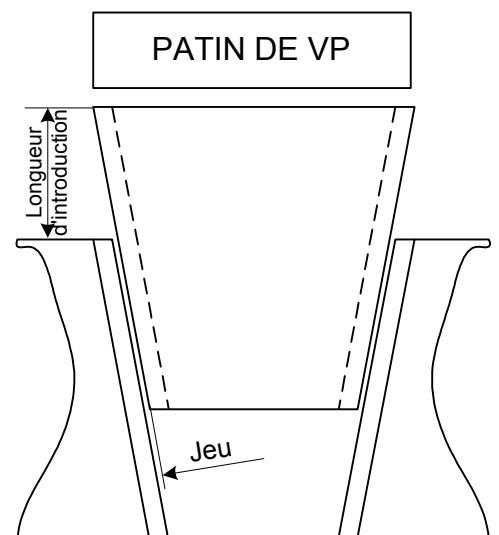


A faces parallèles

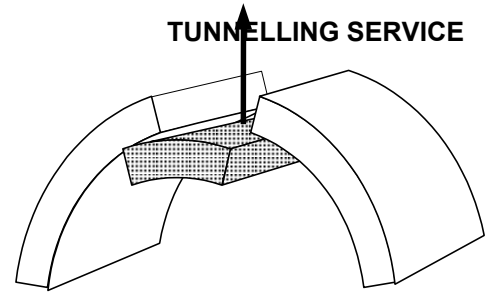
La clé à face radiale est la forme qui donne la meilleure répartition d'effort dans l'anneau sous le chargement de pression. Mais la forme à face parallèle permet d'avoir une longueur d'introduction beaucoup plus courte.

Aucun des voussoirs n'a la même forme à cause du pincement général de l'anneau.

La longueur d'introduction est la distance nécessaire pour introduire la clé entre les deux contre clés lors du montage, afin de laisser un jeu latéral suffisant (entre 20 et 30 mm).

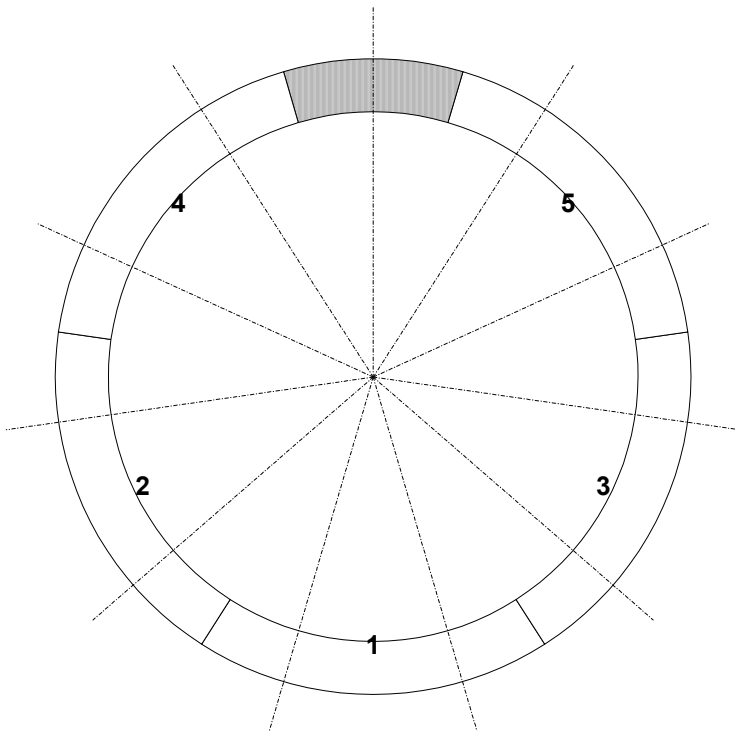


Cette longueur d'introduction entre dans le calcul de la course des vérins de poussée axiale, puisque le jeu entre les patins complètement rétractés et l'anneau en cours de pose doit être toujours plus grand que cette longueur.



## 2. Voussoir universel

Dans un voussoir universel, on divise le cercle en n parties égales, n étant appelé nombre de positions de clé.



Dans l'exemple ci-contre, à 5 voussoirs plus une clé, le nombre de positions de clé est de 11. A chaque position de clé correspond un boulon de fixation. Chaque voussoir occupe  $2/11^{\text{ème}}$  du cercle et la clé  $1/11^{\text{ème}}$ . La clé peut être posée dans chacune des 11 positions définies par les traits d'axe.

Chaque vérin de poussée de la tête de coupe (ou couple de vérin) est positionné en face de chaque position de clé, soit au total 11 ou 22 vérins.

En résumé, le tableau ci-dessous présente la valeur du nombre de positions de clé en fonction du nombre de voussoirs et le décalage angulaire entre deux positions voisines.

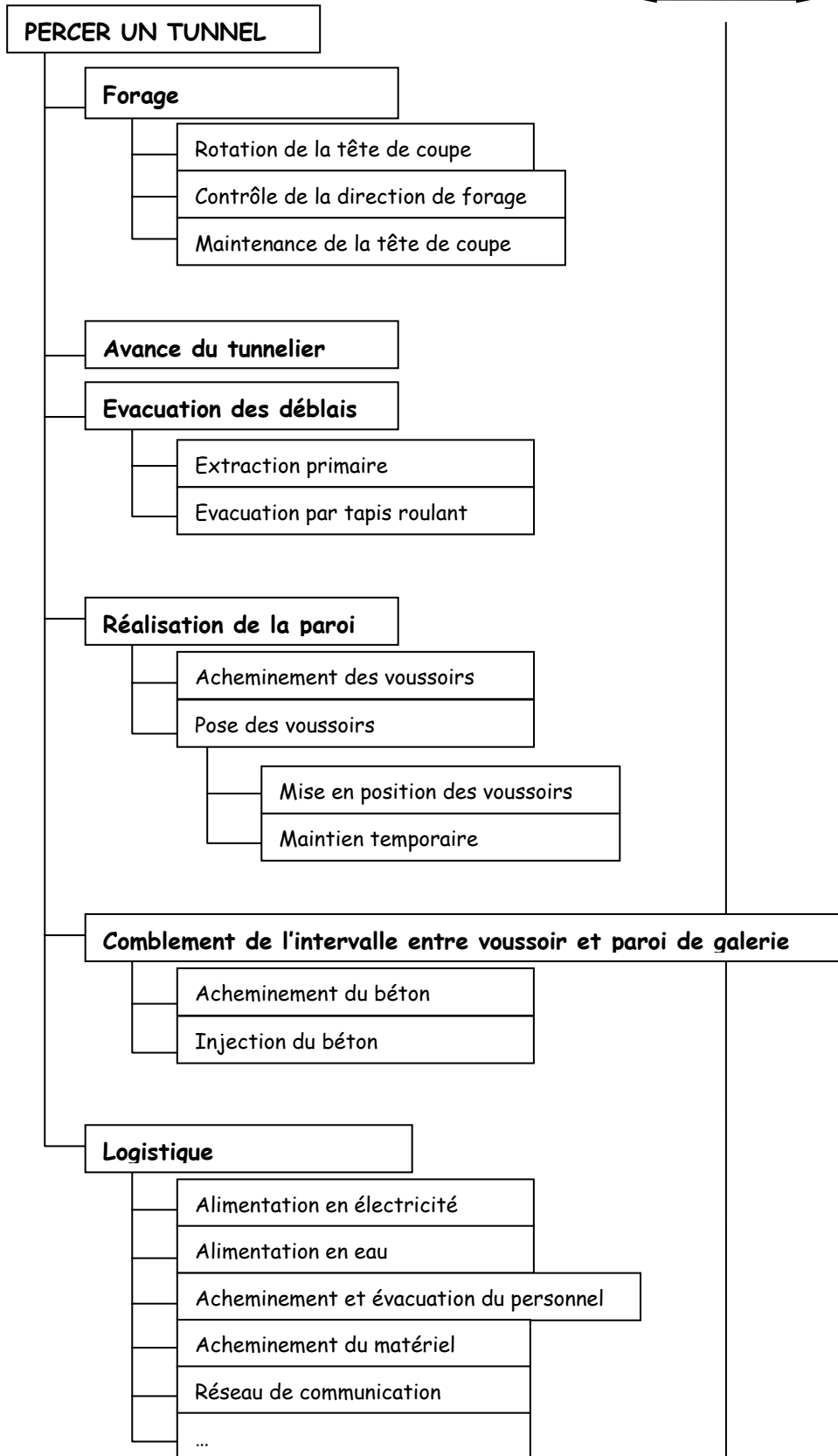
Nombre de voussoirs	Nombre de positions	Décalage angulaire
5 + 1	11	32,7°
6 + 1	13	27,7°
7 + 1	15	24,0°
8 + 1	17	21,2°
9 + 1	19	18,9°
10 + 1	21	17,1°

# Fonctions

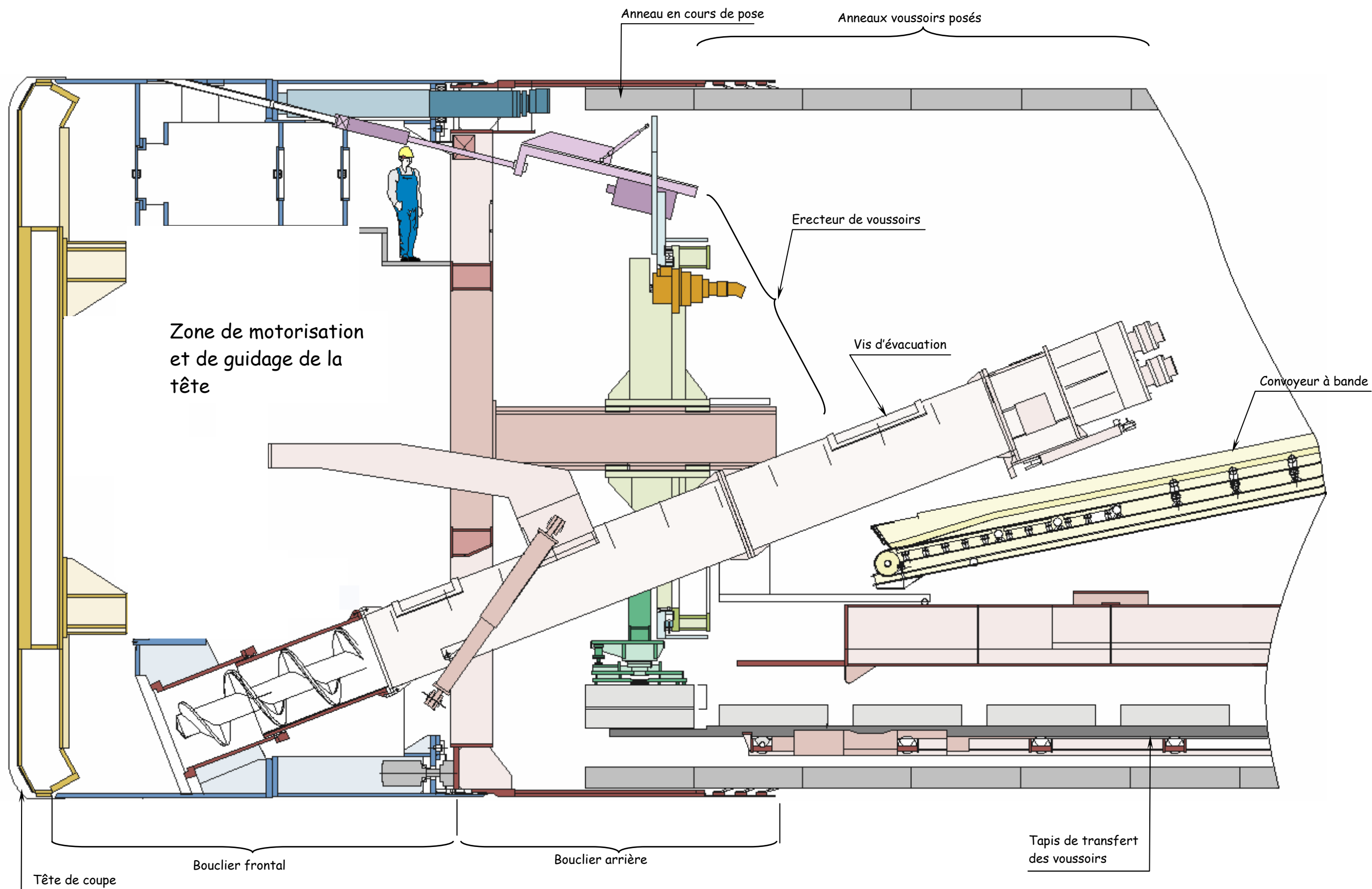
Pourquoi ?

Comment ?

# Solutions techniques

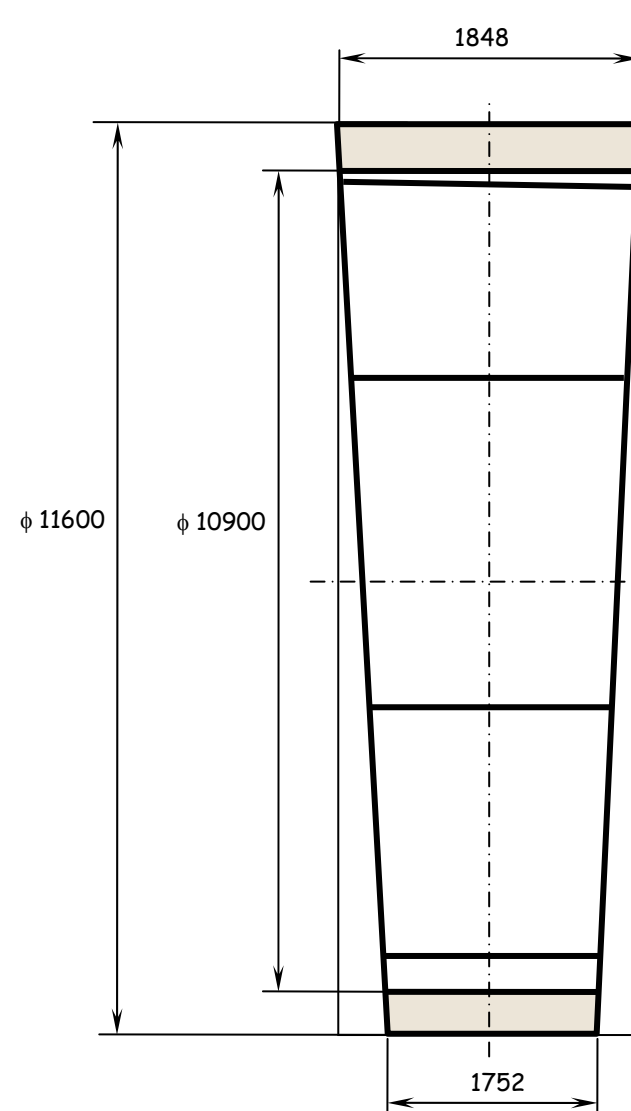
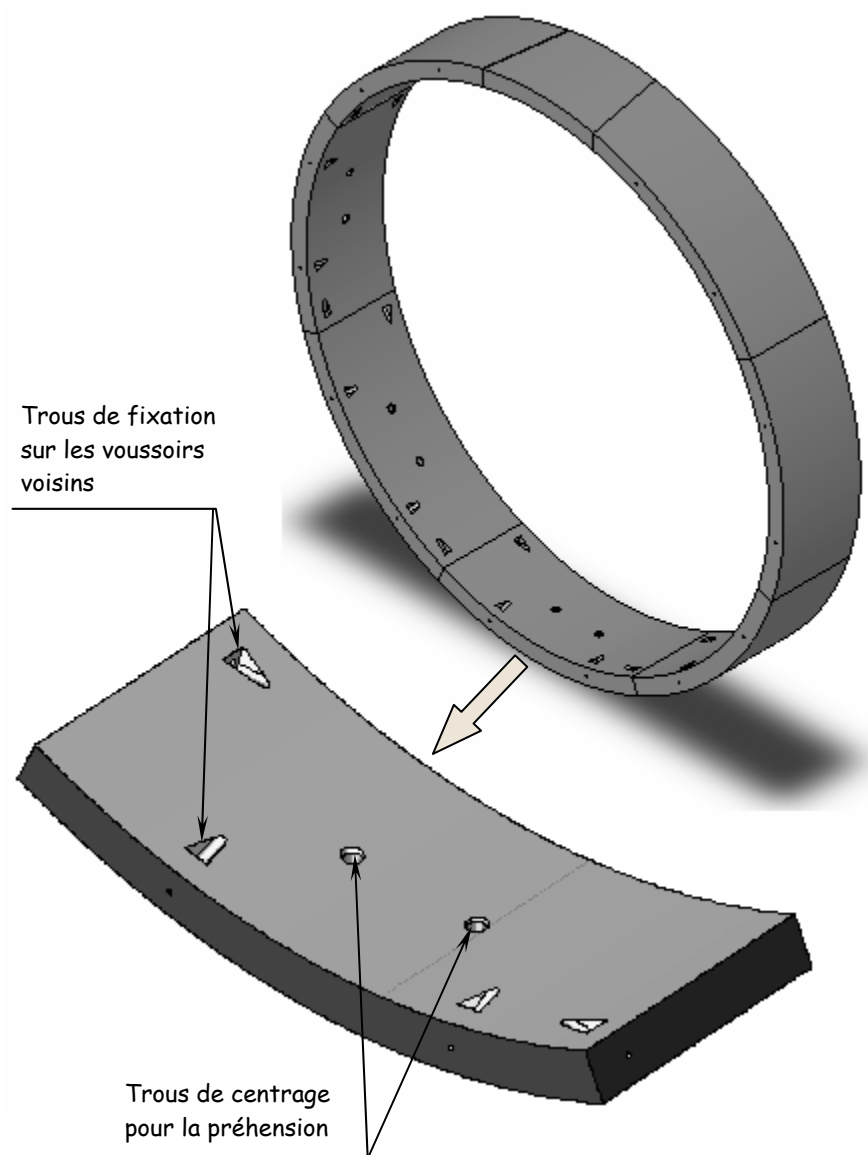


**DOCUMENT 2**  
**Diagramme FAST du**  
**tunnelier**

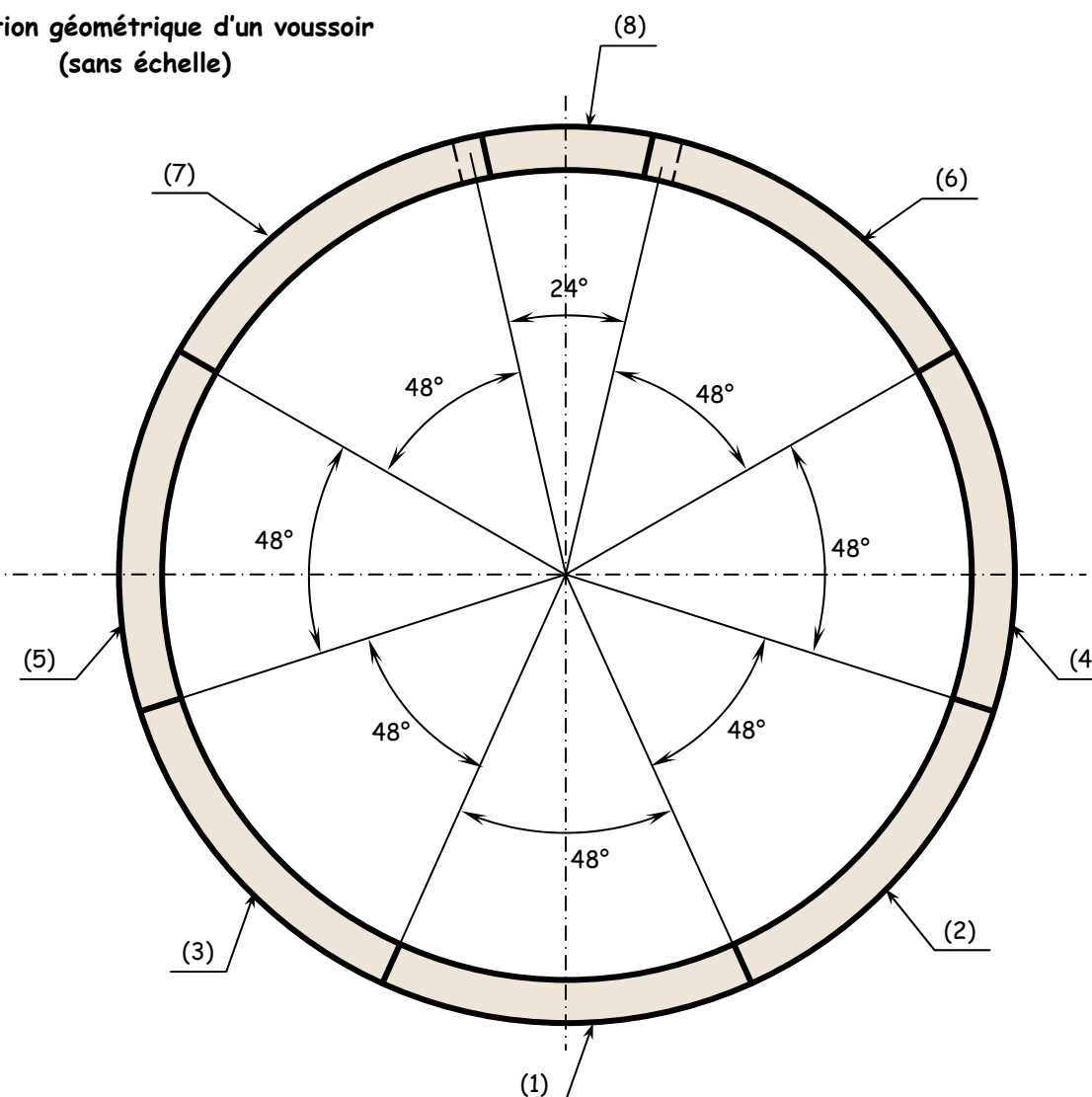


**DOCUMENT 1 : principaux éléments du tunnelier**

**DOCUMENT 3 : géométrie  
d'un anneau - voussoir**



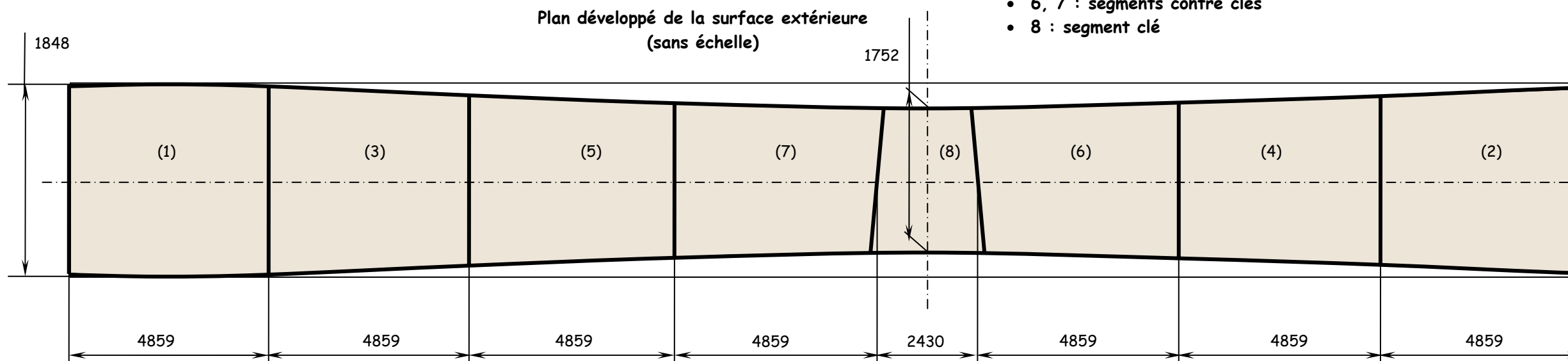
Définition géométrique d'un voussoir  
(sans échelle)

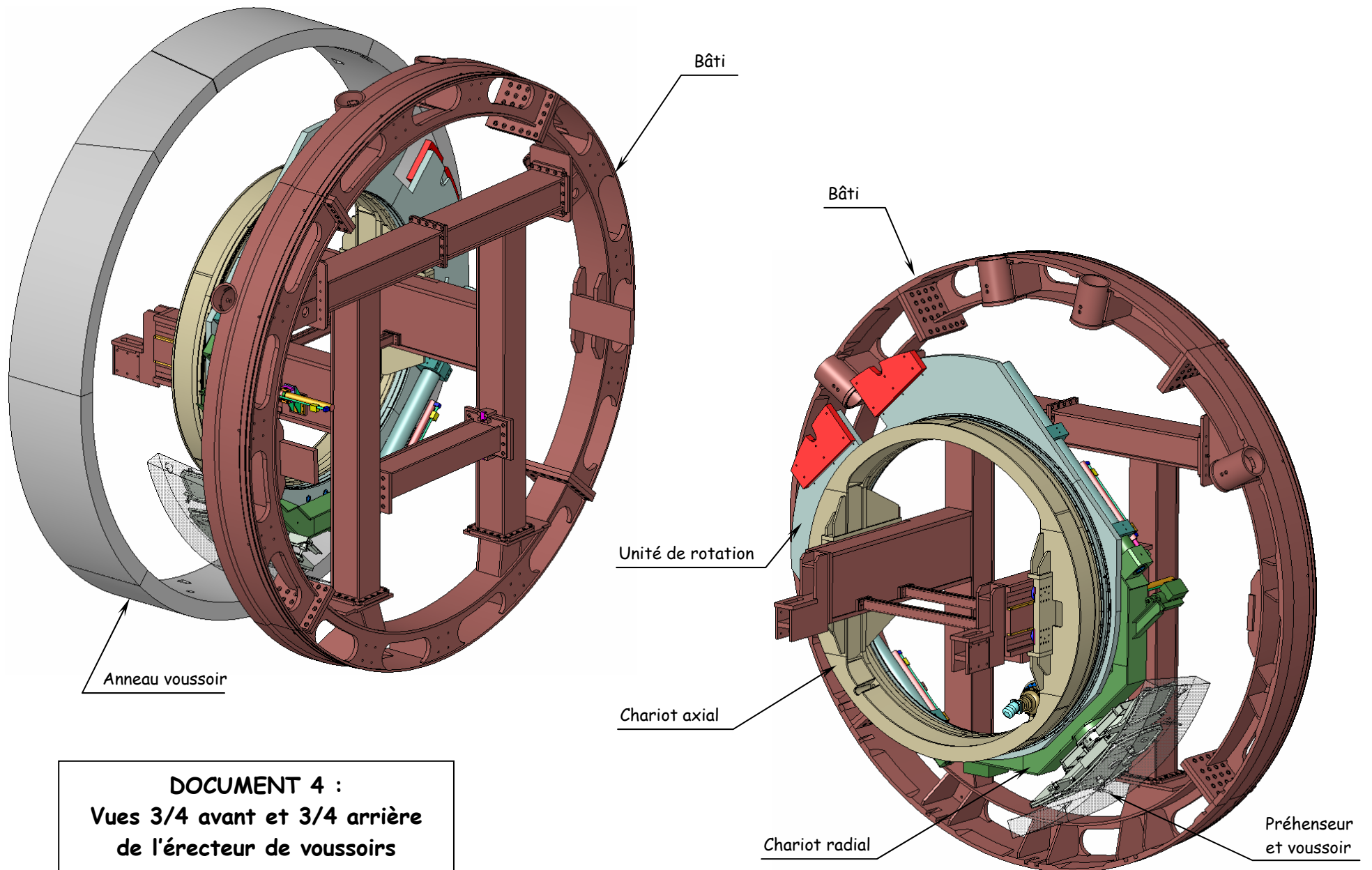


**Repérage des voussoirs :**

- 1, 2, 3, 4, 5 : segments standards
- 6, 7 : segments contre clés
- 8 : segment clé

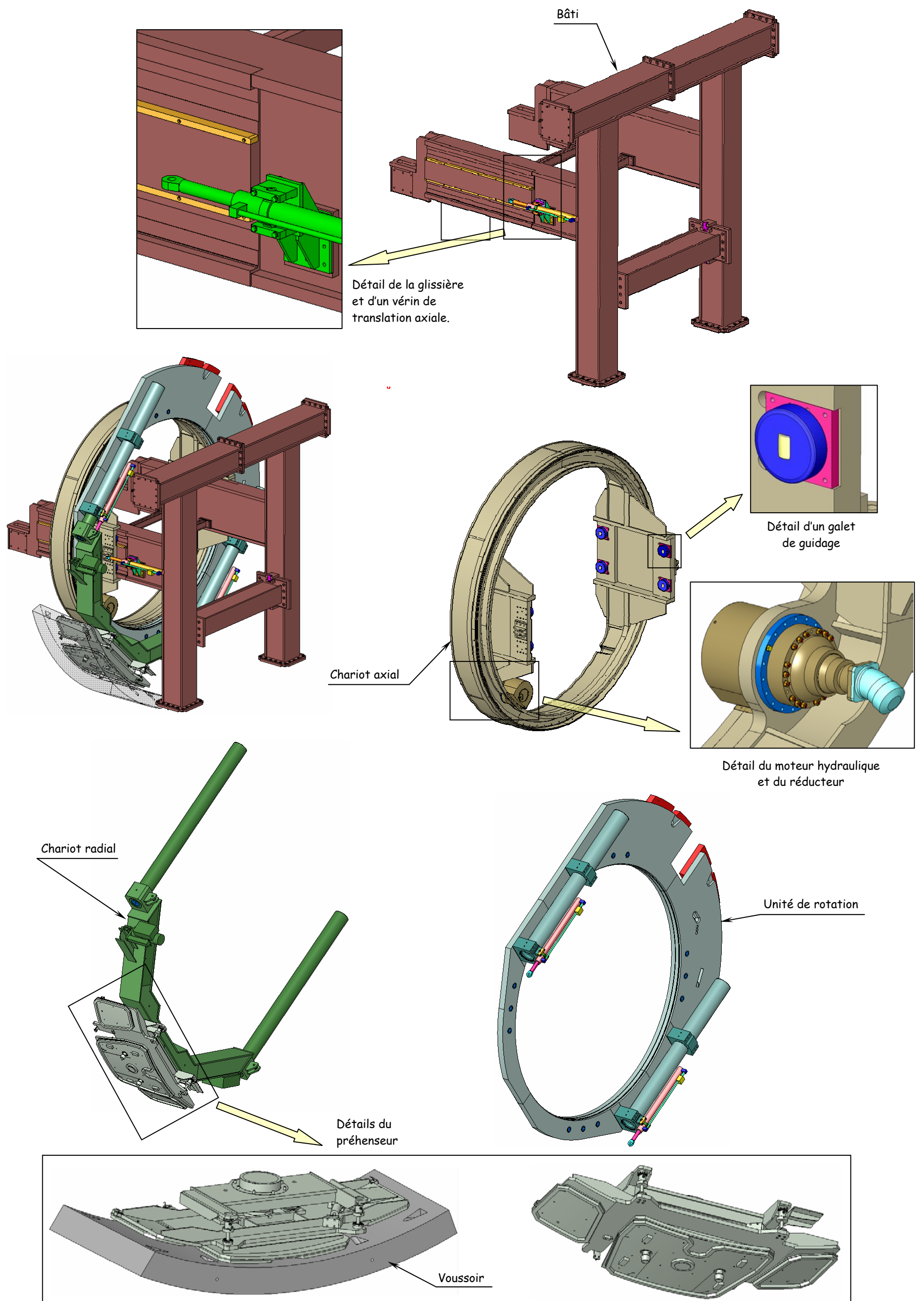
Plan développé de la surface extérieure  
(sans échelle)





**DOCUMENT 4 :**  
**Vues 3/4 avant et 3/4 arrière**  
**de l'érecteur de voussoirs**

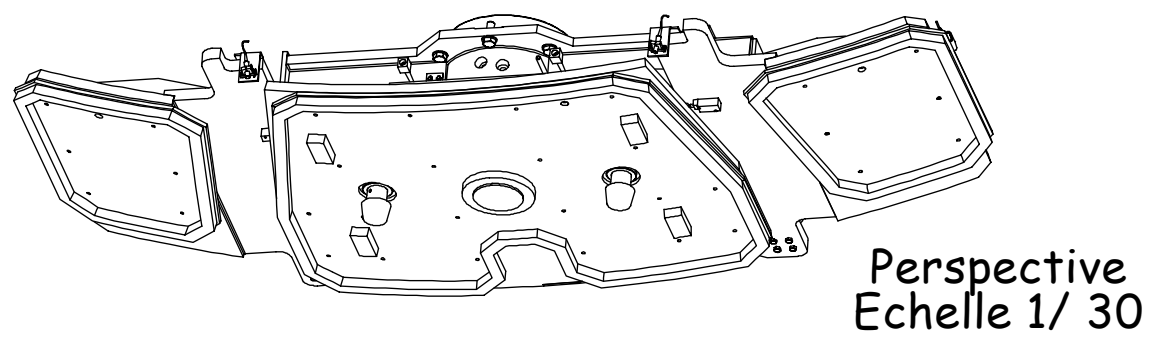
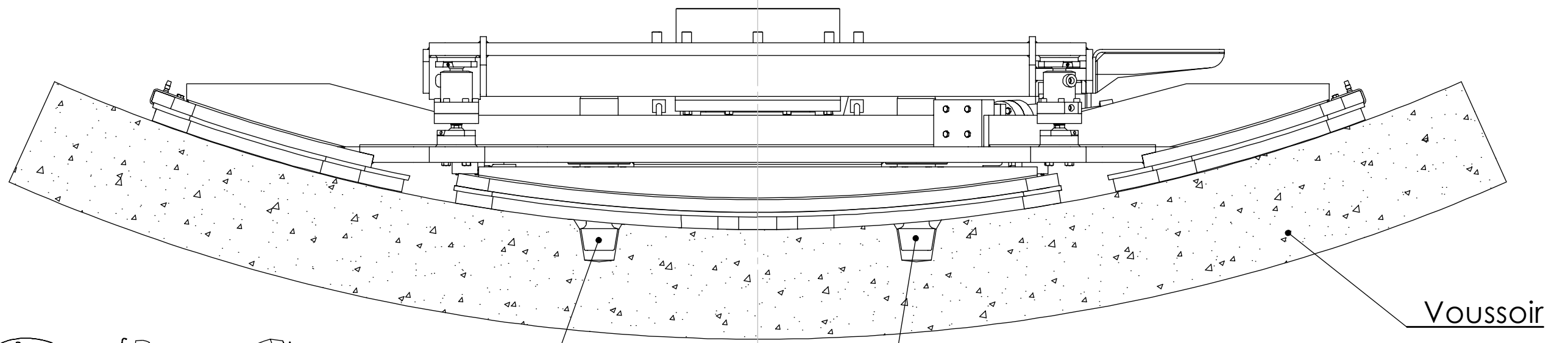
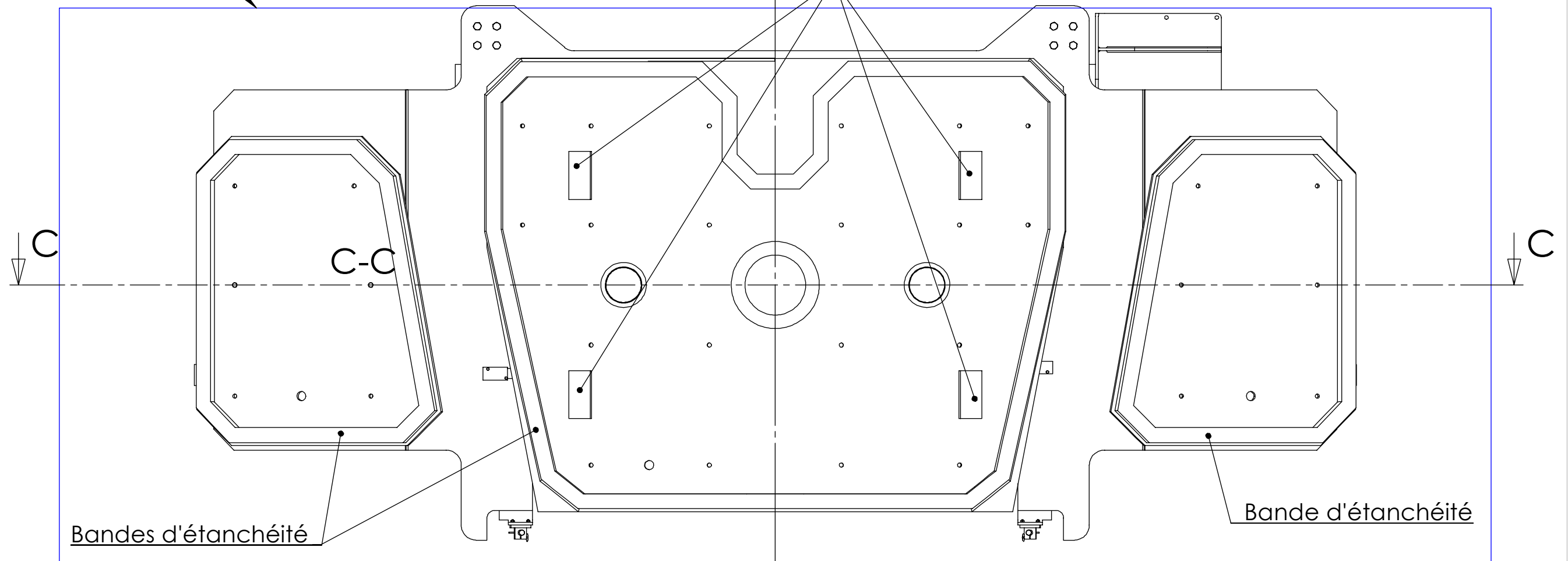




DOCUMENT 5 : Structure de l'érecteur de voussoirs

Contour du voussoir

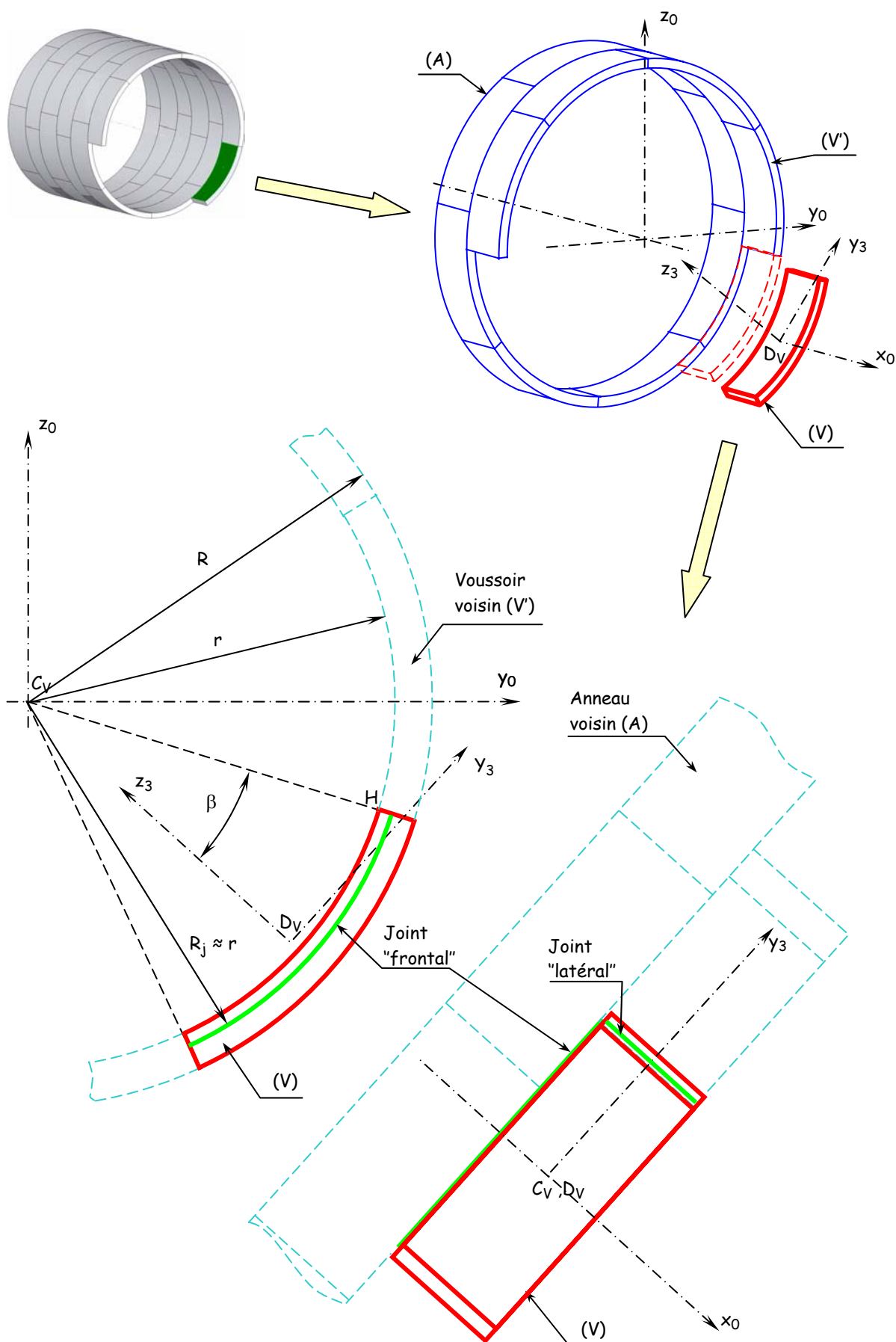
4 plots d'appui du voussoir



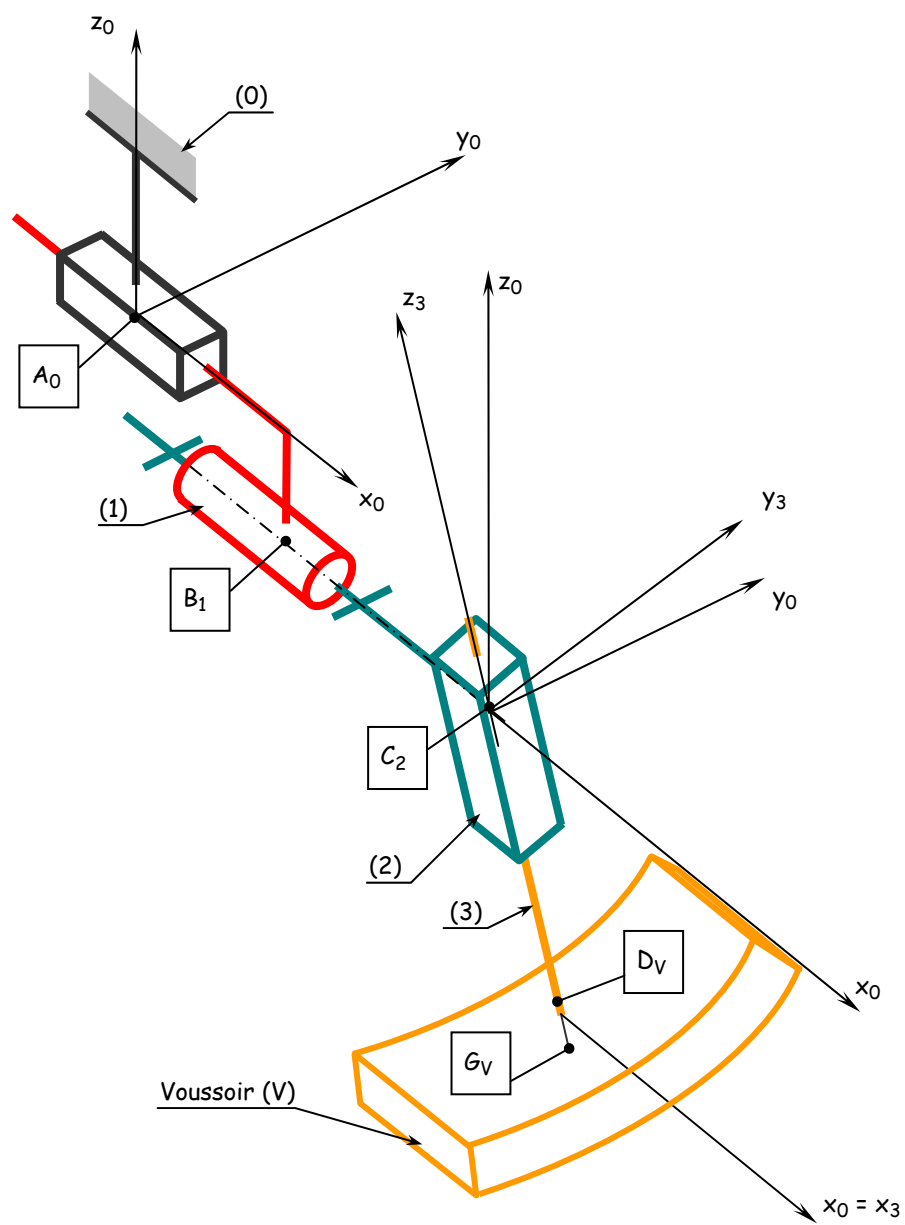
Echelle 1 : 15

DOCUMENT 6

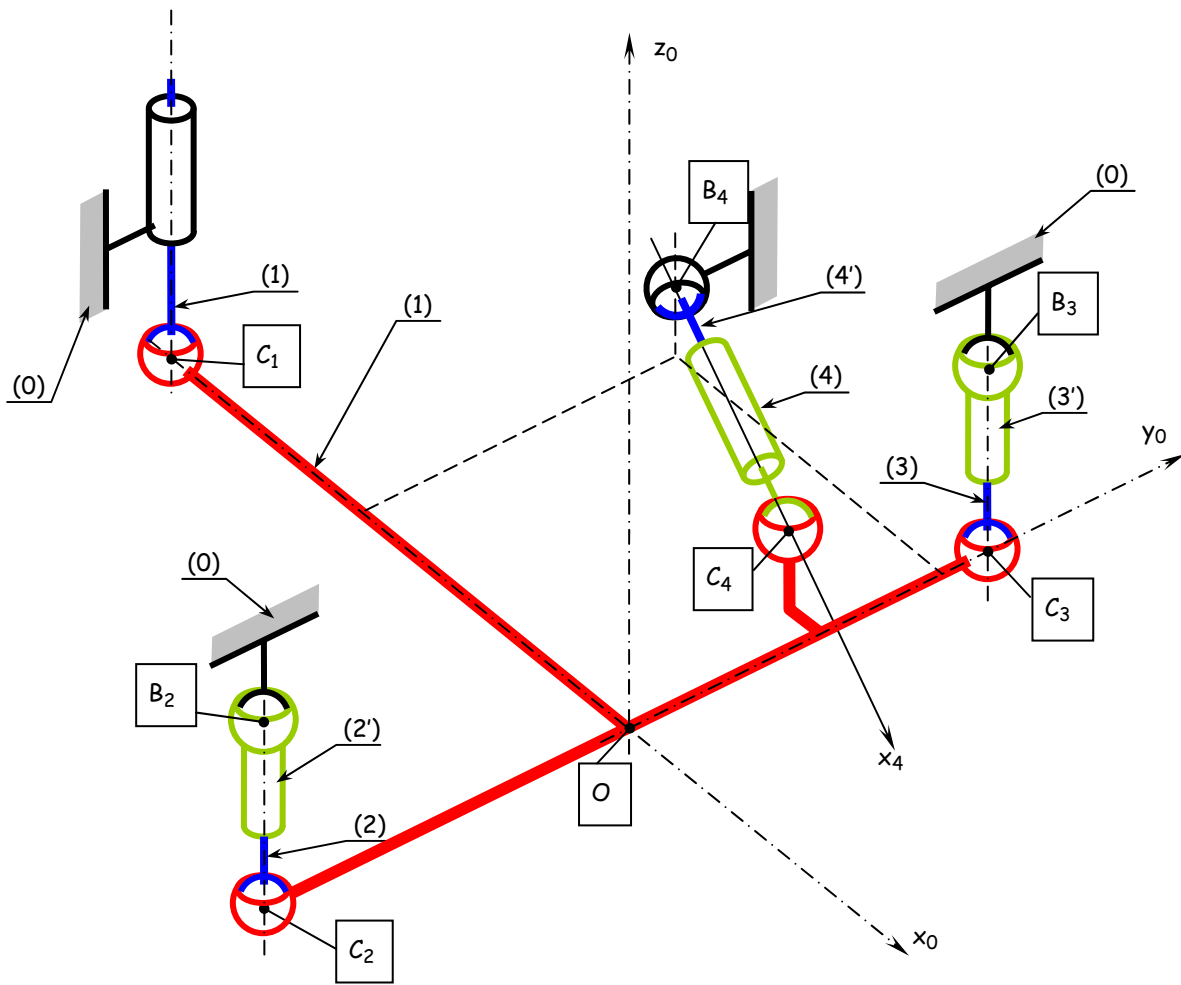
# PREHENSEUR



**DOCUMENT 7**  
**Compression des joints lors de la**  
**mise en place d'un voussoir**

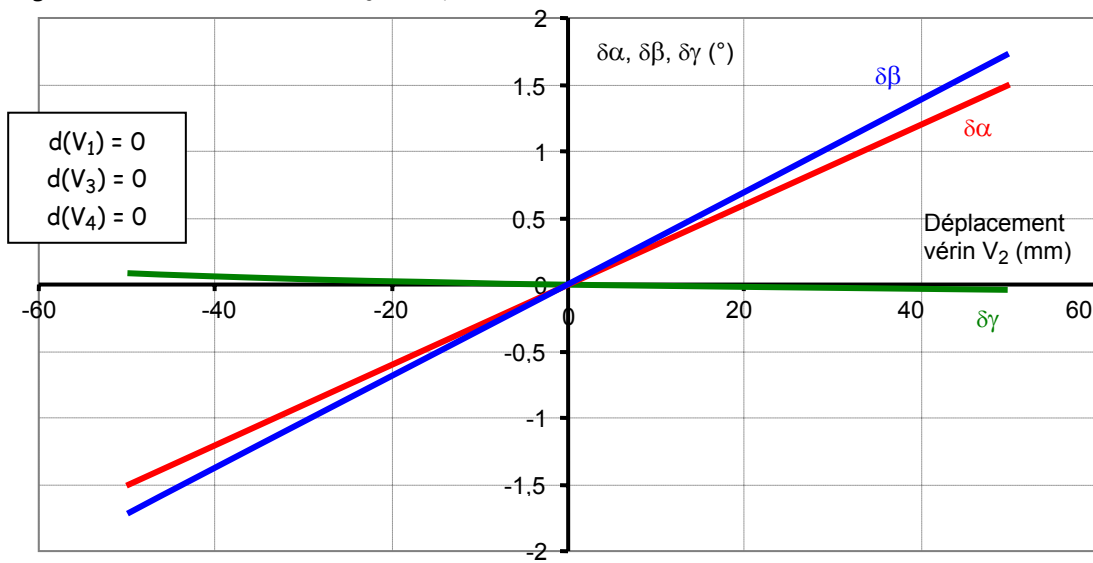


**DOCUMENT 8**  
**Modèle cinématique de l'érecteur**

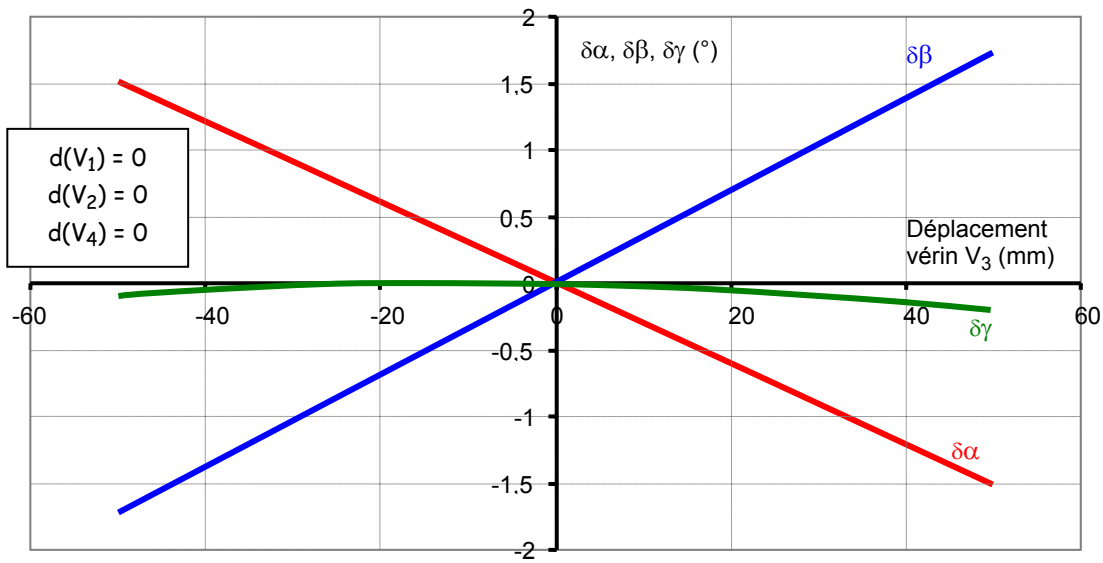


**DOCUMENT 9**  
 Modèle géométrique de la partie terminale de l'érecteur

Pilotage du vérin  $V_2$ , vérins  $V_1$ ,  $V_3$  et  $V_4$  fixes



Pilotage du vérin  $V_3$ , vérins  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_4$  fixes



Pilotage du vérin  $V_4$ , vérins  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  fixes

