

SESSION 2023

---

**AGRÉGATION  
CONCOURS INTERNE  
ET CAER**

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

**Option : SCIENCES INDUSTRIELLES DE L'INGÉNIEUR  
ET INGÉNIERIE MÉCANIQUE**

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

Durée : 4 heures

---

*Calculatrice autorisée selon les modalités de la circulaire du 17 juin 2021 publiée au BOEN du 29 juillet 2021.*

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

*Il appartient au candidat de vérifier qu'il a reçu un sujet complet et correspondant à l'épreuve à laquelle il se présente.*

*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. Le fait de rendre une copie blanche est éliminatoire.**

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

A

## INFORMATION AUX CANDIDATS

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

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

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

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAI	1414A	102	7048

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

Concours	Section/option	Epreuve	Matière
EAH	1414A	102	7048

# COMPOSITION DU SUJET

---

## **Texte du sujet :**

Description de la situation et des problématiques industrielles, parties à traiter par le (candidat, 19 pages

## **DT – Documents techniques :**

Documents spécifiques et relatifs au support de l'étude, données techniques.

- DT0 : Diagramme partiel des exigences
- DT1 : Dessin de définition du balourd supérieur
- DT2 : dessin de définition du balourd inférieur
- DT3 : Plan de l'ensemble vibreur
- DT4 : Documentation constructeur roulements SKF (2 pages)
- DT5 : Propriétés des fontes GJS
- DT6 : Opérations de traitement thermique des fontes moulées
- DT7 : Caractéristiques de l'acier S355 (2 pages)
- DT8 : Caractéristiques du centre d'usinage Forest-Liné Flexiix V
- DT9 : Gammes prévisionnelles d'usinage de l'anneau support de bol
- DT10 : Microstructure, caractéristiques mécaniques lors de traitements thermiques.

## **DR – Documents réponse**

Documents qui seront à compléter et à rendre par le candidat, tous les documents sont à rendre, même non complétés :

- DR1 : Feuille de calcul de roulements ;
- DR2 : Définition anneau support de bol.

Les feuilles de copie remises au candidat viendront compléter ces documents et permettront au candidat de répondre au questionnement.

Après avoir complété les en-têtes, le (la) candidat(e) remettra en fin d'épreuve ses copies paginées et les documents réponses aux questions.

## **Parties à traiter**

**Le sujet comporte 4 parties distinctes** (cf. durées conseillées indiquées) **qui peuvent être traitées de façon indépendantes**. Certaines sous-parties peuvent également être traitées de façon indépendante.

- Partie A : Génération des efforts de broyage
- Partie B : Durée de vie des éléments roulants des vibreurs
- Partie C : Relation Produit-Procédé-Matériau de la pièce anneau support de bol
- Partie D : Usinages de pièces de grandes dimensions

Si le (ou la) candidat estime avoir détecté une erreur ou un problème dans le sujet, il (ou elle) l'indique clairement dans sa copie et poursuit l'épreuve.



# SUJET

## CONCASSEUR FCB RHODAX® 4D

---

(Durée conseillée pour la lecture du sujet : 20 min)

### Mise en situation

#### L'entreprise

Le groupe FIVES est un groupe d'ingénierie industrielle français qui travaille dans plusieurs secteurs d'activités. FIVES développe, conçoit et réalise des machines, des équipements de procédé et des lignes de production pour de nombreux industriels, que ce soit en France et à l'international.

Ses domaines d'activités sont très nombreux, l'un d'eux concerne l'industrie cimentière. FIVES livre ainsi des cimenteries « clef en main » pour lesquelles il conçoit et réalise les équipements des usines. Les problématiques sont liées au concassage, au broyage, à la cuisson, au traitement des émissions et au contrôle et optimisation des installations.

Le groupe FIVES est également un des pionniers de la décarbonation de l'industrie. Depuis plus de 15 ans, le groupe dispose d'une avance technologique en matière de transition énergétique, qu'il met à disposition de ses clients soucieux de réduire leur impact environnemental. Parmi les nombreuses innovations mises en place, on trouve le concasseur FCB Rhodax® 4D qui est l'objet de cette étude.

#### Le concasseur FCB Rhodax® 4D

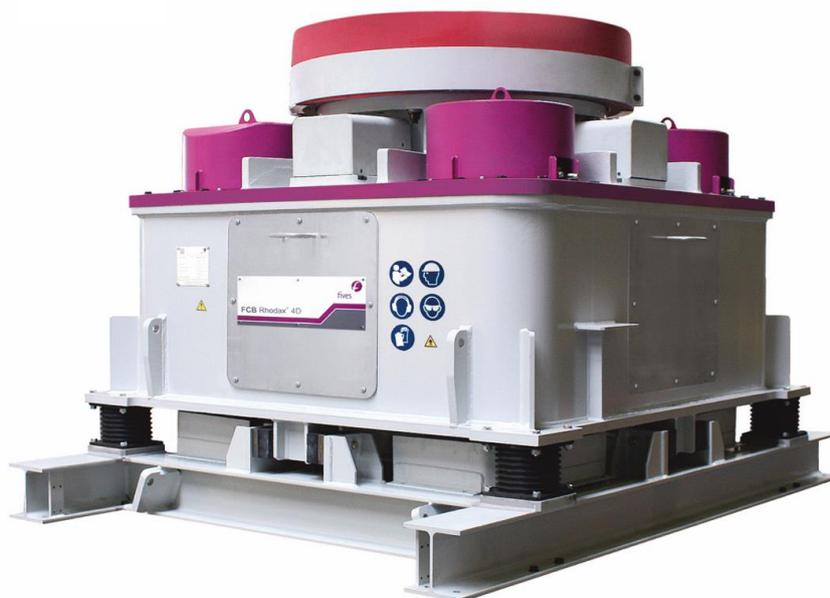


Figure 1 - Concasseur FCB Rhodax® 4D

(image FIVES : <https://www.fivesgroup.com/fr/cement-minerals/crushing-grinding/grinding-solutions/selective-crushing-fcb-rhodaxr>)

Le concasseur FCB Rhodax® 4D, qui utilise une technologie de concassage par compression, permet le recyclage des bétons de déconstruction. Le mode de broyage sélectif de cette technologie, lié à la compression en lit de matière, permet, sur cette application, une excellente libération des 3 fractions composant le béton : les granulats, le sable (0,125-2 mm) et la pâte de ciment (0-0,125 mm), qui seront ensuite séparés et récupérés.

Après une phase d'essais menés pour des acteurs majeurs du secteur, le FCB Rhodax® 4D a commencé à traiter industriellement du béton de déconstruction pour la première fois au second semestre 2022. Les bénéfices de ce maillon en termes d'économie circulaire sont nombreux, notamment face aux impositions de plus en plus exigeantes de valorisation des produits issus de la déconstruction : réutilisation des granulats et sable dans de nouveaux bétons et réutilisation de la pâte de ciment dans le procédé cimentier pour produire un clinker bas-carbone ou en tant qu'additif au ciment. Il est également prévu de recarbonater les fractions de sable et de pâte de ciment libérées avec du CO2 capté des gaz de cimenterie.

**Remarque générale : afin de respecter les exigences de confidentialité du groupe FIVES, dans l'étude qui va suivre, les valeurs numériques ou les données techniques sont différentes de celles du système commercial, tout en restant réalistes.**

Un diagramme de contexte en utilisation normale du concasseur FCB Rhodax® 4D est proposé en Figure 2.

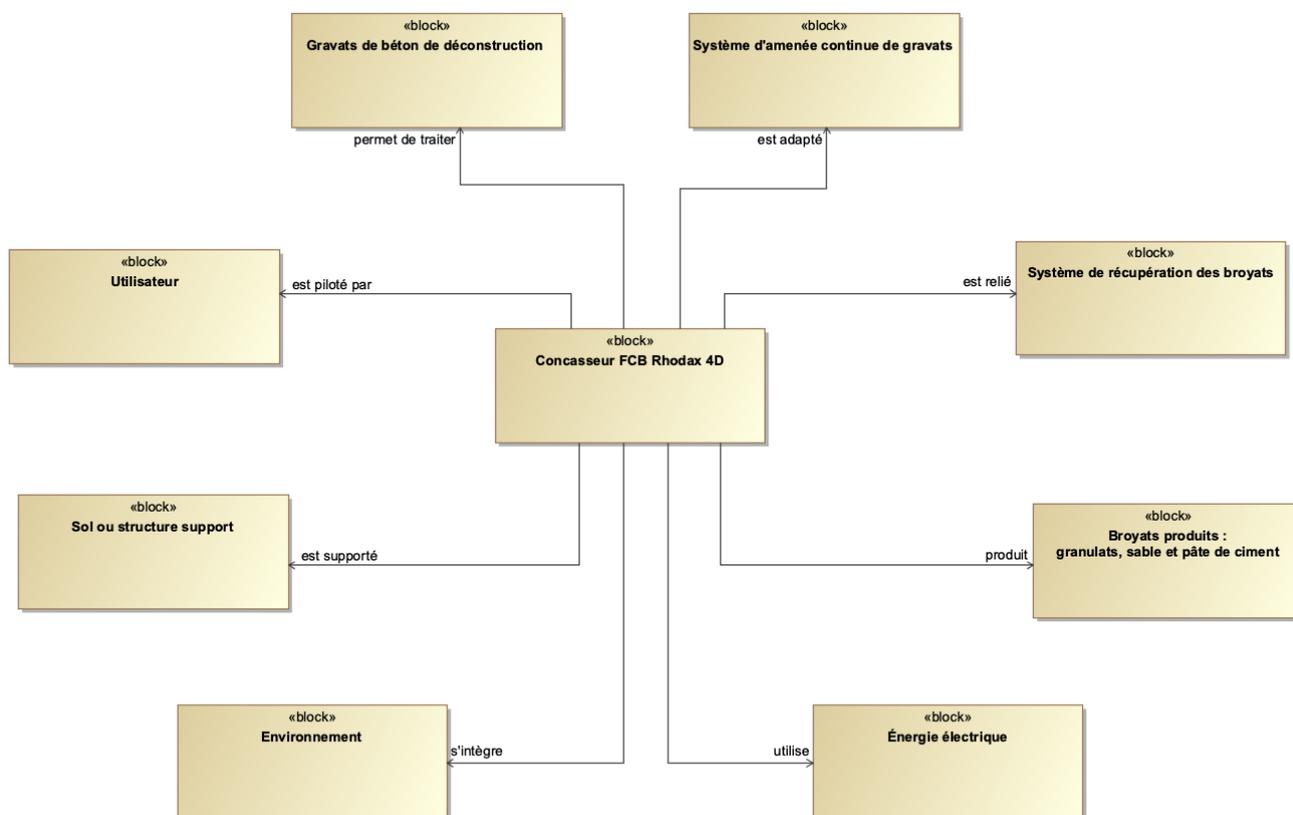


Figure 2 - Diagramme de contexte en utilisation standard du concasseur FCB Rhodax® 4D

## Principe de fonctionnement du concasseur :

Les différents éléments constitutifs du concasseur sont présentés brièvement dans les figures ci-dessous, qui représentent respectivement deux vues éclatées en rendu réaliste (Figure 3 et Figure 4) et un schéma technologique du système (Figure 5).

Le mécanisme de fonctionnement du FCB Rhodax® repose sur le mouvement relatif entre le bol de broyage (1) et un cône intérieur (4), mouvement qui est entraîné par la rotation indépendante de quatre ensembles vibrateurs, chacun composé d'un arbre (5), d'un boîtier de guidage, un balourd inférieur et un balourd supérieur. Ils provoquent un mouvement de translation circulaire dans le plan horizontal de la partie appelée anneau support du bol (1). Dans cette technologie, les éléments de la matière à traiter se compressent les uns les autres au lieu de supporter un choc, comme dans la majorité des concasseurs conventionnels. Il en résulte une libération optimale, une meilleure cubicité et un faible taux d'usure.

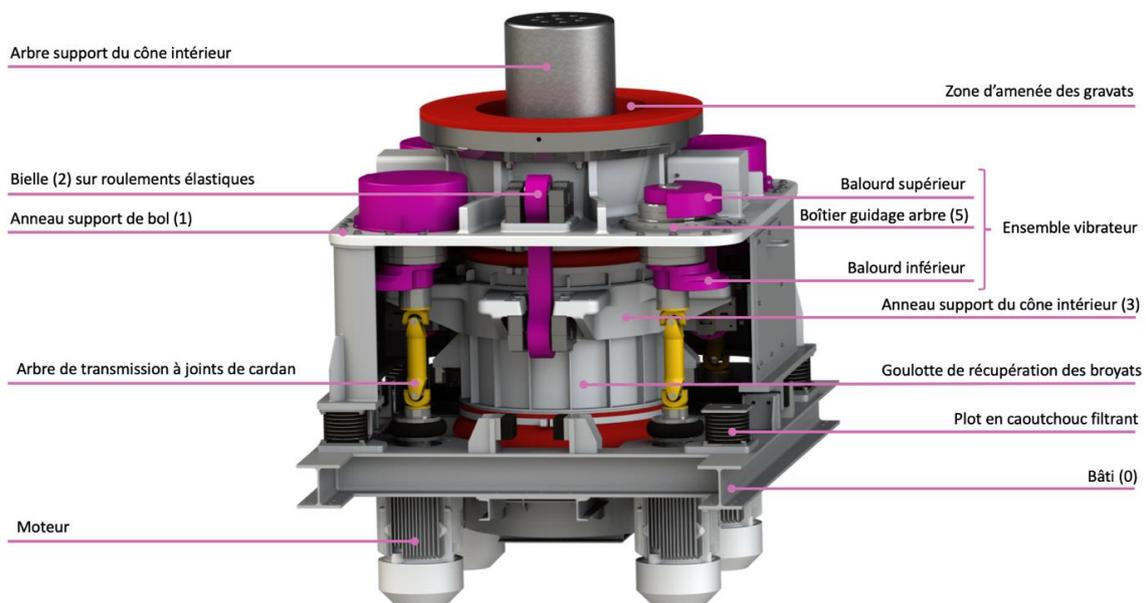


Figure 3 – Vue partiellement éclatée en rendu réaliste du concasseur (image FIVES)

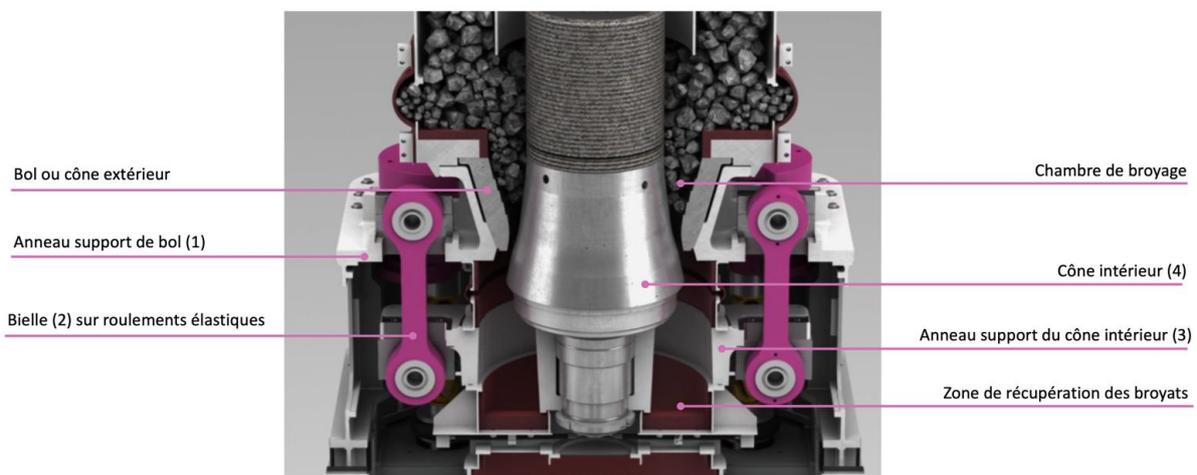


Figure 4 - Vue éclatée en rendu réaliste de l'intérieur du concasseur (image FIVES)

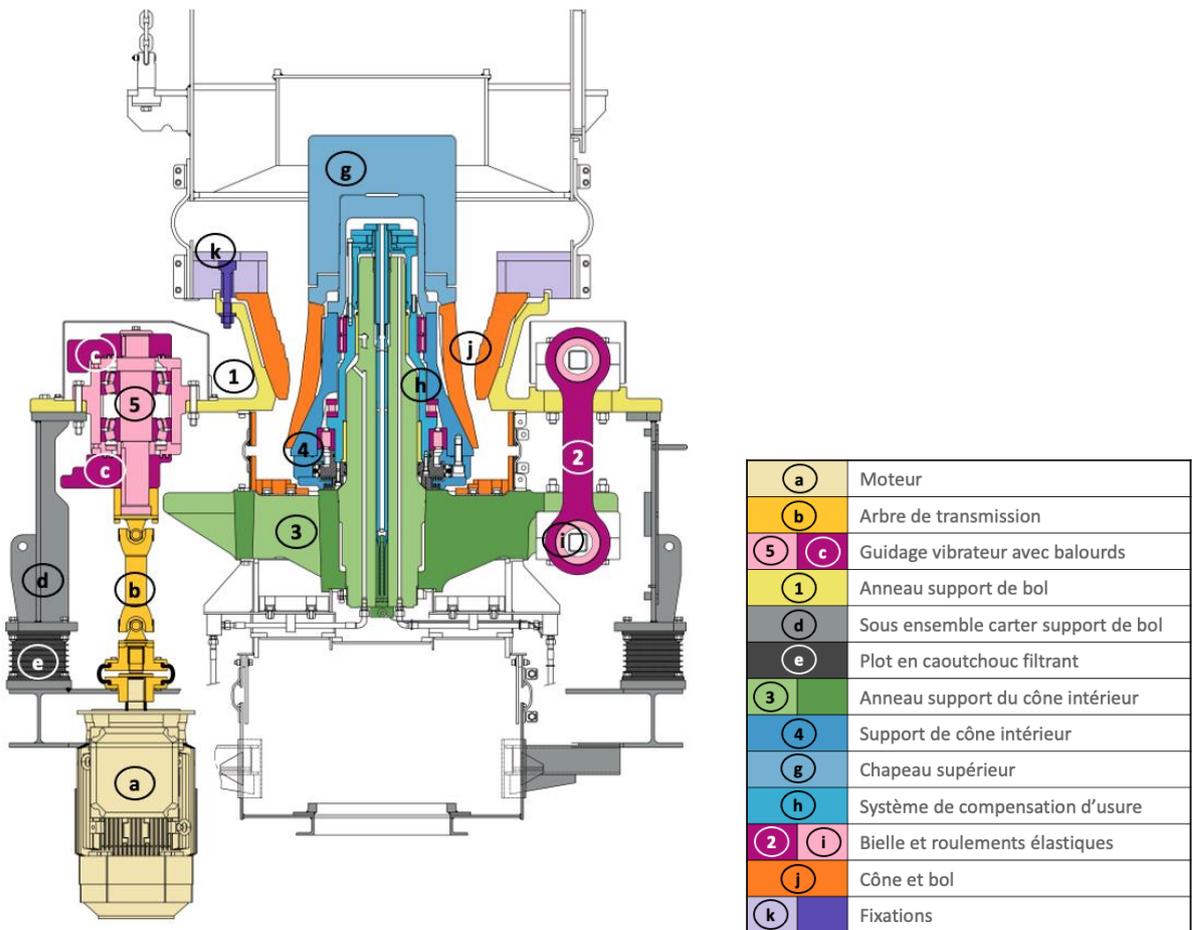


Figure 5 - Éléments constitutifs du concasseur avec nomenclature

On peut noter les particularités suivantes :

- le bol et l'anneau support de bol (1) sont animés d'un mouvement horizontal de translation circulaire induit par la rotation de 4 balourds ;
- l'alimentation en matériau à compacter arrive en continu par une goulotte d'alimentation suspendue ;
- le sous-ensemble support du cône intérieur (3) est suspendu au châssis support de bol (1) par l'intermédiaire de 4 bielles (2) supportées par des roulements élastiques ;
- le cône intérieur (4) est libre de pivoter sur lui-même ;
- un manchon coulissant sur l'arbre support du cône intérieur, servant de vérin hydraulique, permet d'ajuster la position verticale du cône et ainsi d'ajuster l'écart entre cône et bol en fonction de l'usure (h) ;
- l'anneau support de bol (1) réalise également le guidage en rotation de l'arbre (5) supportant les balourds avec des éléments roulants ;
- chacun des 4 ensembles vibrateurs (arbre (5) + balourds inférieur et supérieur) est motorisé, le carter moteur est fixé sur le bâti lié au sol et l'arbre moteur est couplé à l'arbre (5) par un arbre à double joint de cardan (b) ;
- le sous-ensemble carter support de bol (d) est monté sur plots en caoutchouc (e) filtrant les vibrations.

## Problématique

Le FCB Rhodax® 4D a été développé par itérations successives par ses concepteurs. Le DT0 représente un diagramme des exigences partiel du concasseur FCB Rhodax® 4D. Le questionnement qui suit est basé sur la validation des différentes exigences exprimées.

Dans le cadre de ce sujet, il s'agit de :

- de vérifier que les solutions technologiques permettent de satisfaire les principales exigences de performance fixées par le cahier des charges ;
- d'optimiser le triptyque produit – procédé – matériau dans le cadre d'une production en très petite série.

## Partie A : GÉNÉRATION DES EFFORTS DE BROYAGE

(Durée conseillée : 1h)

Cette partie porte sur la génération des efforts de broyage via les 4 ensembles vibrateurs entraînés par quatre moteurs dont on pilote le déphasage. On s'attachera en particulier à la validation des exigences 1.1.1, 1.1.2 et 1.1.3 concernant les efforts de broyage du diagramme des exigences du DT0.

Les centres de gravité  $G_{inf}$  et  $G_{sup}$  des balourds inférieur et supérieur sont situés respectivement à une distance  $r_{inf}$  et  $r_{sup}$  de l'axe entraîné par le moteur. Les masses des balourds sont notées  $M_{inf}$  et  $M_{sup}$ . Les dessins de définition des balourds sont donnés en documents techniques DT1 et DT2, le plan de l'ensemble vibrateur en document technique DT3.

Afin d'estimer les efforts générés, on considère le modèle simplifié de la Figure 6 ci-dessous de l'un des vibrateurs :

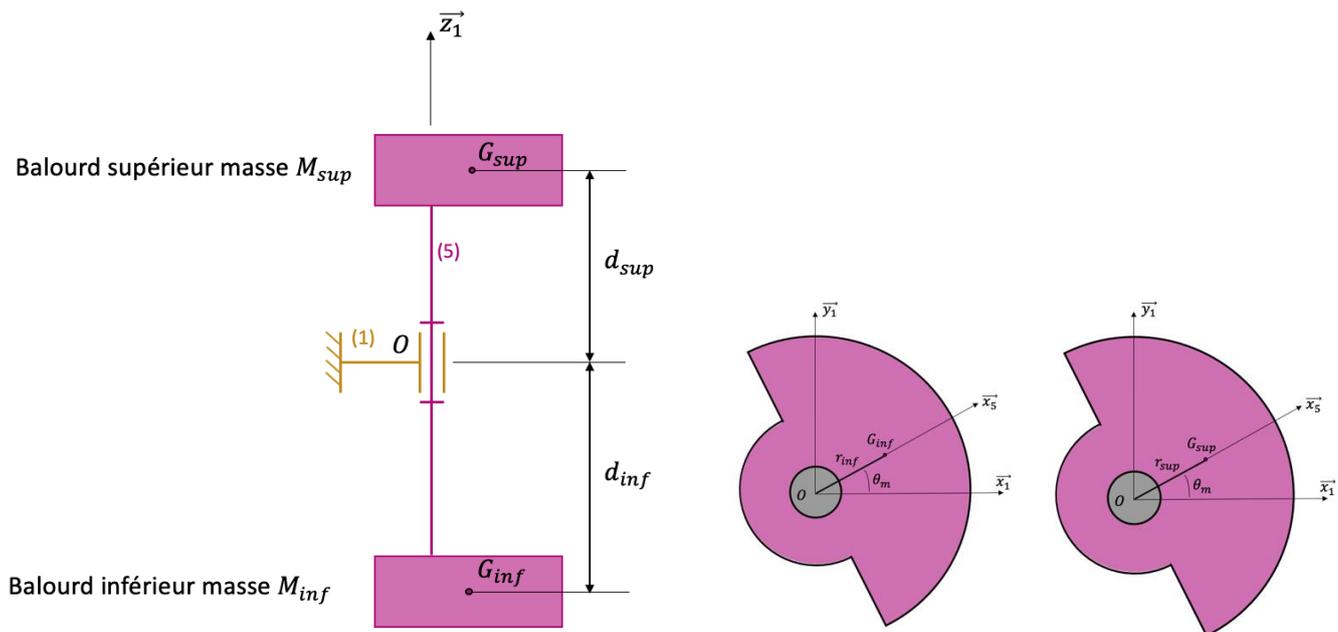


Figure 6 - Modèle simplifié d'un vibrateur et paramétrage de la position des deux balourds

On donne les valeurs numériques des paramètres de la Figure 6 :

- $r_{sup} = 87 \text{ mm}$
- $r_{inf} = 87 \text{ mm}$
- $d_{sup} = 215 \text{ mm}$
- $d_{inf} = 251 \text{ mm}$
- $M_{sup} = 148 \text{ kg}$
- $M_{inf} = 127 \text{ kg}$

On fait également les hypothèses simplificatrices suivantes :

- l'arbre d'entraînement du moteur est supposé être en prise directe avec l'arbre support des deux balourds (5), l'angle entre le châssis support de bol (2) et les balourds (5) est paramétré par l'angle moteur  $\theta_m$  ;
- l'arbre qui supporte les deux balourds (5) est guidé par une liaison pivot d'axe  $(O, \vec{x}_1)$  par rapport au châssis support de bol (1) ;
- on néglige le mouvement relatif du châssis support de bol (1) par rapport au bât fixe (0).

QUESTION A.1

Feuille de copie

**Déterminer** l'expression littérale du vecteur position  $\overrightarrow{OG_b}$  du centre de gravité  $G_b$  des deux balourds en utilisant les notations définies à la Figure 6. **Effectuer** l'application numérique et **commenter** le résultat obtenu.

Dans la suite, et quels que soient les résultats de la question A.1, on prendra  $\overrightarrow{OG_b} = r \cdot \vec{x}_5$  avec  $r = 87 \text{ mm}$ .

QUESTION A.2

Feuille de copie

**Calculer** l'expression littérale de la vitesse  $\vec{V}(G_b/1)$  du point  $G_b$  centre de gravité des deux balourds en utilisant les notations définies à la Figure 6.

QUESTION A.3

Feuille de copie

**Calculer** l'expression littérale de l'accélération  $\vec{\Gamma}(G_b/1)$  du point  $G_b$  centre de gravité des deux balourds en utilisant les notations définies à la Figure 6.

On se place en régime permanent pour lequel la vitesse de rotation du moteur est constante et vaut  $N = 700 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ .

QUESTION A.4

Feuille de copie

**Expliquer** en quoi il est légitime dans le calcul de la résultante dynamique de l'ensemble  $\Sigma = \{\text{arbre (5) + balourd supérieur + balourd inférieur}\}$ , dans son mouvement par rapport à l'anneau support de bol (1), de ne prendre en compte ni la masse de l'arbre (5) qui supporte les balourds ni la contribution de la masse de l'arbre (5) dans le calcul de la position du centre de gravité.

QUESTION A.5

Feuille de copie

**Donner** l'expression de la résultante dynamique de l'ensemble  $\Sigma$  dans son mouvement par rapport à l'anneau support de bol (1), en fonction des masses des balourds  $M_{inf}$  et  $M_{sup}$ , de la vitesse de rotation du moteur en  $rad \cdot s^{-1}$ ,  $\omega_m = \dot{\theta}_m$ , et du rayon  $r$ .

QUESTION A.6

Feuille de copie

**Appliquer** le théorème de la résultante dynamique à l'ensemble  $\Sigma$ .  
**Déterminer** la résultante des actions mécaniques de (1) sur  $\Sigma$ ,  $\overrightarrow{F(1 \rightarrow \Sigma)}$ , transmise par la liaison pivot d'axe  $(O, \overrightarrow{z_1})$ .  
**Donner** l'expression analytique et la valeur numérique des composantes de cette résultante situées dans le plan  $(\overrightarrow{x_1}, \overrightarrow{y_1})$ .

Dans la suite de l'étude, on considérera que chacun des quatre ensembles vibreurs  $\Sigma = \{\text{arbre 5} + \text{balourd supérieur} + \text{balourd inférieur}\}$  transmet en régime permanent (pour une vitesse du moteur constante) à l'anneau support de bol (1) une résultante mécanique notée  $\overrightarrow{R_{\Sigma 1}}$  dont l'expression analytique est :

$$\overrightarrow{R_{\Sigma 1}} = (M_{inf} + M_{sup}) \cdot r \cdot \omega_m^2 \cdot \overrightarrow{x_5}$$

La variation de l'effort de broyage durant les phases de démarrage et d'arrêt est gérée via les déphasages entre les 4 moteurs (voir Figure 7). Les vibreurs situés aux quatre angles de l'anneau support de bol sont synchronisés deux à deux. Ils sont commandés pour tourner tous à la même vitesse  $\omega_m = \dot{\theta}_m$  avec éventuellement un déphasage (également commandé) noté  $\varphi$ . Une variation progressive du déphasage permet d'avoir une somme de résultantes  $\overrightarrow{R_{\Sigma 1}}$  appliquées à l'anneau support de bol (1) qui va varier continument d'une norme nulle à une norme maximum. On se propose de calculer cette somme de résultantes.

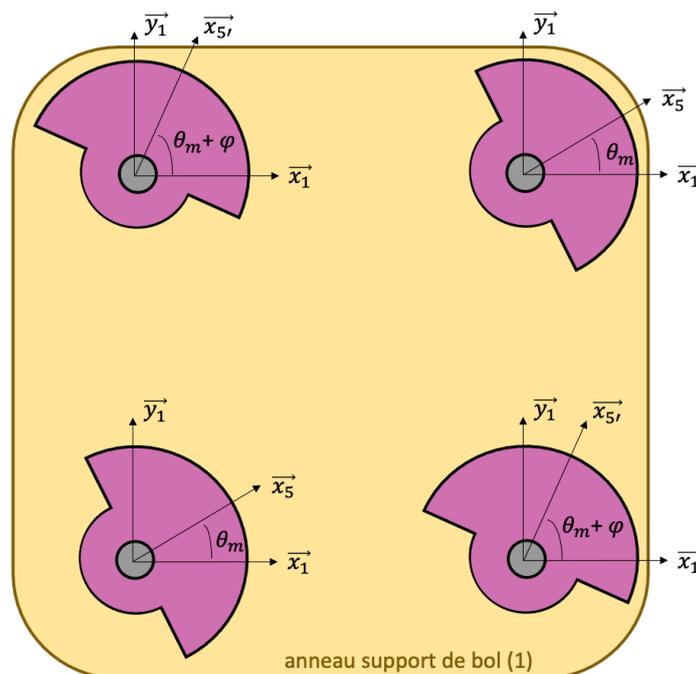


Figure 7 - Schéma de paramétrage du déphasage des vibreurs 2 à 2

QUESTION A.7

Feuille de copie

**Expliquer** à l'aide de trois schémas ce qui se produit lorsque le déphasage  $\varphi$  vaut :  $\varphi = 180^\circ$  ;  $\varphi = 0^\circ$  et pour une valeur de  $\varphi$  intermédiaire.

QUESTION A.8

DT4

Feuille de copie

**Calculer** analytiquement la somme des résultantes  $\vec{R}_{\Sigma 1}$  appliquées à l'anneau support de bol (1) par les quatre ensembles vibrateurs en fonction du déphasage  $\varphi$  et des données de l'étude.

**Caractériser** cette somme de résultantes en commentant la dépendance de sa norme en  $\varphi$ , sa direction, ses valeurs minimale et maximale.

En réalité, l'anneau support de bol (1) n'est pas fixe et se déplace dans le plan  $(\vec{x}_1, \vec{y}_1)$ , notamment par rapport au cône intérieur (4), son mouvement étant contraint par les quatre bielles (2). Il transmet les efforts des ensembles vibrateurs aux gravats de déconstruction contenus entre le bol (1) (ou cône extérieur) et le cône intérieur (4). Cet effort constitue l'effort de broyage, voir Figure 8.

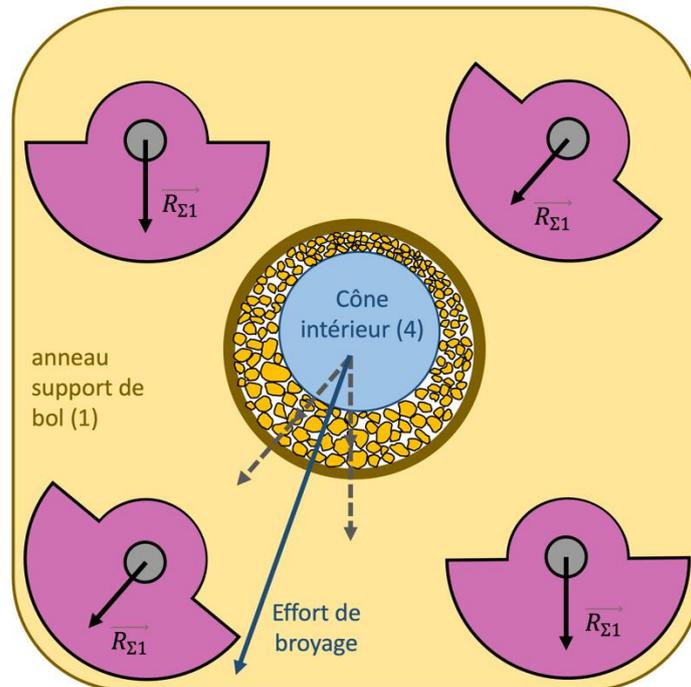


Figure 8 - Principe de la génération de l'effort de broyage

QUESTION A.9

Feuille de copie

**Conclure** vis-à-vis des exigences 1.1.1, 1.1.2 et 1.1.3 (voir DT0) concernant les efforts de broyage.

QUESTION A.10

Feuille de copie

**Discuter** du(des) paramètre(s) modifiable(s) par le constructeur sur le système en cas de nécessité d'augmenter l'effort de broyage de 30%.

## Partie B : DURÉE DE VIE DES ÉLÉMENTS ROULANTS DES VIBRATEURS

(durée conseillée : 45 min)

Pour cette partie, il s'agit d'étudier de la durée de vie du guidage en rotation de l'ensemble  $\Sigma = \{\text{arbre (5) + balourd supérieur + balourd inférieur}\}$  par rapport à l'anneau support de bol (1) (voir Figure 3, Figure 4 et Figure 5 pour la définition des pièces). Le plan de réalisation du guidage en rotation des ensembles vibrateurs est donné en document technique DT3, la documentation technique associée aux roulements retenus est donnée en DT4.

On retient la modélisation de la Figure 9 ci-dessous pour la liaison entre  $\Sigma$  et (1) : l'ensemble  $\Sigma$  est guidé en rotation par rapport à l'anneau support de bol (1) par l'intermédiaire d'une liaison rotule en  $A$  et d'une liaison sphère-cylindre en  $B$ .  $G_\Sigma$  est le centre de masse de l'ensemble  $\Sigma$ , tel que  $\overrightarrow{OG_\Sigma} = l \cdot \vec{x}_5$ .

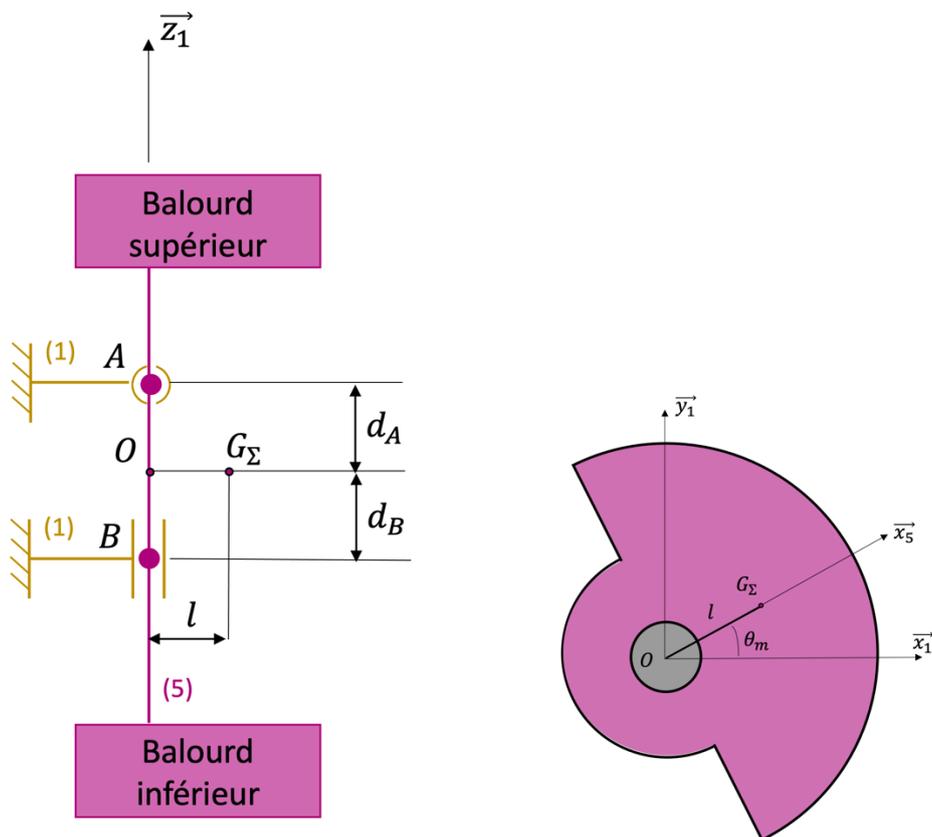


Figure 9 - Modèle de guidage en rotation du vibreur  $\Sigma$

On donne les valeurs numériques des paramètres de la Figure 9 :

- $l = 55 \text{ mm}$
- $d_A = 80 \text{ mm}$
- $d_B = 80 \text{ mm}$

QUESTION B.1  
DT3 & DT4  
Feuille de copie

À partir du plan de l'ensemble vibreur donné en DT3 et de la documentation sur les éléments roulants utilisés du DT4, **commenter** et **justifier** la modélisation retenue à la Figure 9.

QUESTION B.2  
DT3 & DT4  
Feuille de copie

À partir du plan de l'ensemble vibreur donné en DT3 et de la documentation sur les éléments roulants utilisés du DT4, **commenter** les ajustements retenus entre l'arbre (5) et la bague intérieure des roulements, d'une part, et le boîtier et la bague extérieure des roulements, d'autre part.

Le bureau d'études a effectué un bilan des actions mécaniques extérieures auxquelles est soumis l'ensemble  $\Sigma$ , dont les formes sont données ci-dessous :

- Action dans la liaison rotule en A

$$\{\mathcal{T}_{1 \rightarrow \Sigma}^A\} = \begin{pmatrix} X_A & 0 \\ Y_A & 0 \\ Z_A & 0 \end{pmatrix}_{(A, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_1)}$$

- Action dans la liaison sphère-cylindre en B

$$\{\mathcal{T}_{1 \rightarrow \Sigma}^B\} = \begin{pmatrix} X_B & 0 \\ Y_B & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_{(B, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_1)}$$

- Action du poids de l'ensemble  $\Sigma = \{\text{arbre (5) + balourd supérieur + balourd inférieur}\}$

$$\{\mathcal{T}_{poids}\} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -P & 0 \end{pmatrix}_{(G_\Sigma, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_1)}$$

- Action du moteur

$$\{\mathcal{T}_{moteur}\} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & C_m \end{pmatrix}_{(O, \vec{x}_5, \vec{y}_5, \vec{z}_1)}$$

En complément de ces actions mécaniques extérieures, lorsqu'on appliquera le principe fondamental de la dynamique, il faudra tenir compte du torseur dynamique  $\{\mathcal{D}(G_\Sigma \in \Sigma/1)\}$  de l'ensemble  $\Sigma$  dans son mouvement par rapport à l'anneau support de bol (1) dont la résultante dynamique en régime permanent  $\overrightarrow{R(\Sigma/1)}$  a été déterminée à la partie 1 (et est rappelée ci-dessous) et dont le moment dynamique  $\overrightarrow{\delta(G_\Sigma \in \Sigma/1)}$  en régime permanent est donnée également ci-dessous :

$$\{\mathcal{D}(G_\Sigma \in \Sigma/1)\} = \begin{pmatrix} \overrightarrow{R(\Sigma/1)} = -(M_{inf} + M_{sup}) \cdot r \cdot \dot{\theta}_m^2 \vec{x}_5 \\ \overrightarrow{\delta(G_\Sigma \in \Sigma/1)} = -E \cdot \dot{\theta}_m^2 \vec{y}_5 \end{pmatrix}_{(G_5)}$$

Avec  $E$  le produit d'inertie par rapport au plan  $(G_\Sigma, \vec{x}_5, \vec{z}_1)$  de l'ensemble  $\Sigma$ .

QUESTION B.3  
Feuille de copie

**Expliquer** pourquoi le moment dynamique en régime permanent,  $\overrightarrow{\delta(G_\Sigma \in 5/1)}$ , ne possède qu'une composante non nulle suivant  $\vec{y}_5$ ,  $-E \cdot \dot{\theta}_m^2 \vec{y}_5$ .

QUESTION B.4

Feuille de copie

En utilisant le principe fondamental de la dynamique appliqué à l'ensemble  $\Sigma$ , **écrire** les équations reliant les composantes des actions mécaniques, celles du torseur dynamique définies ci-dessus et les paramètres géométriques. **Montrer** que l'on peut ainsi calculer l'ensemble des inconnues de liaison en  $A$  et en  $B$ . La résolution des équations n'est pas demandée.

Une résolution des équations précédentes a permis d'établir, qu'en régime permanent, les inconnues de liaison en  $A$  et en  $B$  ont pour valeurs :

- $Y_A = Y_B = 0 \text{ N}$
- $Z_A = P = 6000 \text{ N}$
- $X_A = 70\,000 \text{ N}$
- $X_B = 60\,000 \text{ N}$

On s'intéresse dans la suite de l'étude à la vérification de la durée de vie de ces roulements, dont une documentation technique est donnée en DT4, en utilisant une feuille de calcul fournie par le constructeur SKF. Une première partie des données est pré remplie dans le document réponse DR1 : types de roulements, dimensions et références.

QUESTION B.5

DT4  
Feuille de copie  
DR1

**Compléter** la feuille de calcul SKF du document réponse DR1 avec les choix à cocher (cercles rouges) et les valeurs appropriées dans les cases vides (encadrées en rouge).

La feuille de calcul permet d'obtenir les charges dynamiques équivalentes qui s'appliquent sur chacun des roulements et la durée de vie en heures des roulements. Le résultat est donné à la Figure 10 ci-dessous.

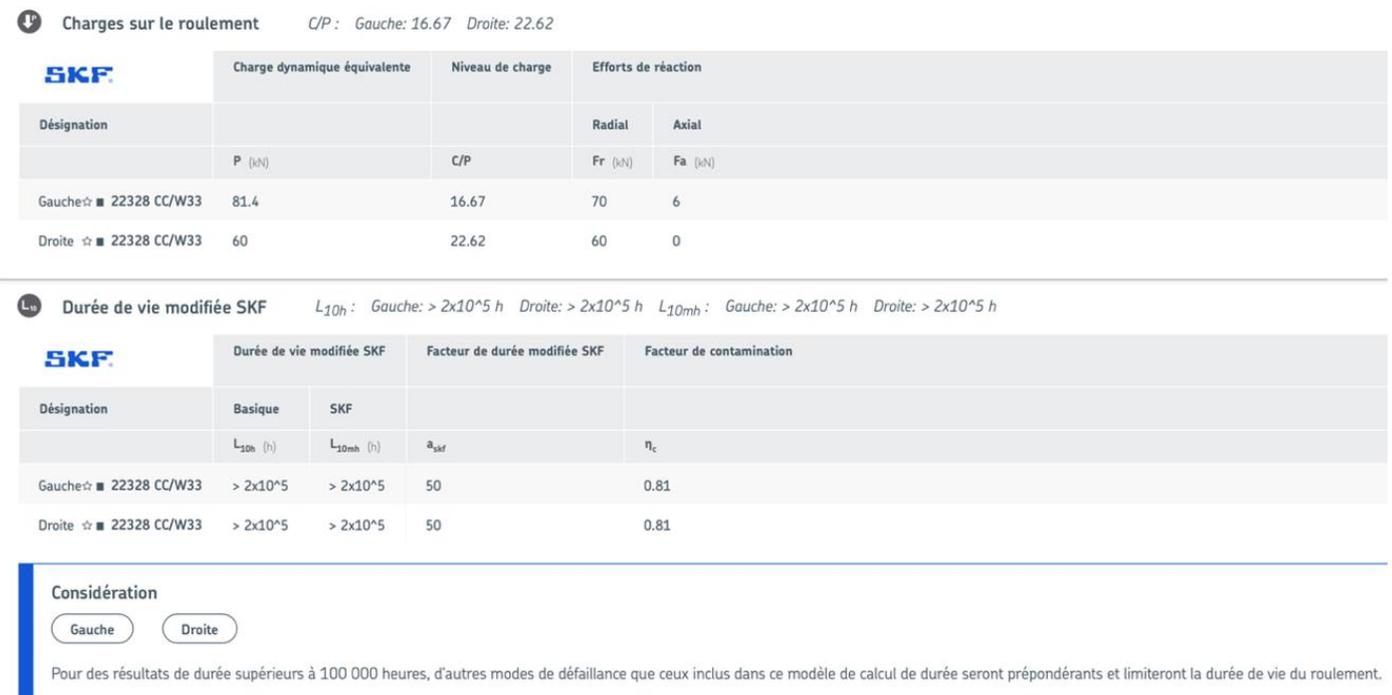


Figure 10 - Extrait du résultat de la feuille de calcul SKF

QUESTION B.6  
DT4  
Feuille de copie

À partir de la documentation technique sur les roulements DT4, **expliquer** la méthode de calcul (sans effectuer les applications numériques) de :

- la charge dynamique équivalente  $P$  ;
- la durée de vie  $L_{10}$  des roulements en millions de tours ;
- la durée de vie  $L_{10}$  des roulements en heures.

QUESTION B.7  
Feuille de copie

**Commenter** le résultat obtenu vis-à-vis de l'exigence 1.4.2 concernant la durée de vie des éléments roulants.

## Partie C : RELATION PRODUIT-PROCÉDÉ-MATÉRIAU DE L'ANNEAU SUPPORT DE BOL

(durée conseillée : 1h)

Cette partie s'intéresse à l'adéquation entre les comportements recherchés en déformation et fatigue de l'anneau support de bol (1) durant les cycles de fonctionnement du broyeur et les choix réalisés quant à sa géométrie, à son matériau et au processus de réalisation à mettre en œuvre.



Figure 11 – Vue en rendu réaliste de l'anneau support de bol (1) (cas de brut réalisé en fonderie sable)

Le mouvement de l'anneau support de bol est engendré par les 4 ensembles vibrateurs mis en position par l'intermédiaire des boîtiers de guidage arbre (voir DT3) dans 4 alésages  $\varnothing 406$  H7 avec un ajustement de type glissant.

La résultante de l'effort de broyage est considérée normale à la surface conique intérieure de l'anneau support de bol (1). (voir Figure 8)

Afin de générer une résultante de charge de broyage la plus proche du modèle de déphasage choisi, on considère que l'écart des surfaces réelles par rapport au modèle nominal de la pièce devra être inférieur à 0,2 mm (résultante tridimensionnelle des écarts pour une pièce non contrainte).

QUESTION C.1  
DT3  
Feuille de copie  
DR2

**Proposer** sur le DR2 un tolérancement géométrique partiel de l'anneau support de bol (1) permettant d'assurer la montabilité des 4 ensembles vibrateurs et de garantir une situation relative satisfaisante des surfaces influentes dans le cadre de l'exigence 1.1.3 du cahier des charges du DT0.

Le procédé de brut retenu en première approche pour la réalisation de l'anneau support de bol est la fonderie en sable de fonte EN-GJS-400-18 LT. Le matériau a été sélectionné entre autres pour sa bonne ductilité.

QUESTION C.2  
DT5  
Feuille de copie

**Détailler** la signification de chacun des termes de la désignation de ce matériau. **Préciser** la nature de la microstructure prédominante de cette fonte.

QUESTION C.3  
DT5  
Feuille de copie

**Définir** la caractéristique de ductilité et **justifier** le choix de cette nuance de fonte parmi celles présentées sur le DT5 d'un point de vue global.

QUESTION C.4  
DT6  
Feuille de copie

**Déterminer** le traitement thermique adapté au procédé de réalisation de l'anneau support de bol (1) et **justifier** le choix réalisé au regard des exigences. **Proposer** une gamme de fabrication complète du produit incluant cette étape de traitement.

Dans le cadre d'une recherche d'optimisation technico-économique de processus, on souhaite étudier la possibilité de réaliser l'anneau support de bol en version mécano-soudée, en conservant une géométrie finale sensiblement identique (une plaque de base, 8 goussets et un bol conique central).

Le matériau retenu est l'acier de construction S355.

QUESTION C.5  
DT5 & DT7  
Feuille de copie

**Expliquer** la raison principale pour laquelle la fonte EN-GJS-400-18 LT précédemment utilisée présente une mauvaise soudabilité et **justifier** le choix de l'acier de construction S355 pour cette version mécano-soudée.

L'étude prévisionnelle du mode opératoire de soudage concernant la réalisation des cordons d'angle pour les épaisseurs envisagées montre qu'une température de préchauffage des pièces de l'ordre de 200°C doit être prévue avant la première passe afin d'éviter la zone martensitique.

QUESTION C.6  
DT7  
Feuille de copie

**Préciser** la nature du défaut que ce processus permet d'éviter. **Justifier** votre réponse à l'aide du diagramme TRCS.

QUESTION C.7  
DT7  
Feuille de copie

À l'aide des courbes S/N fournies en DT7, **déterminer** les valeurs de résistance à la fatigue (prises conventionnellement à  $2 \cdot 10^6$  cycles) du S355 dans le cas d'une tôle pleine, d'une tôle entaillée et d'un assemblage par soudure d'angle. **Proposer** une solution de conception permettant de conserver ce matériau et ce type d'assemblage, tout en améliorant la résistance à la fatigue de l'ensemble.

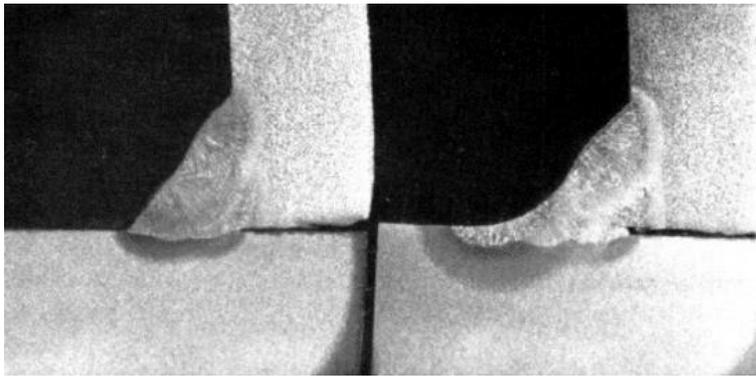


Figure 12 - Refusion de pieds de cordons (source : 6èmes journées nationales du soudage)

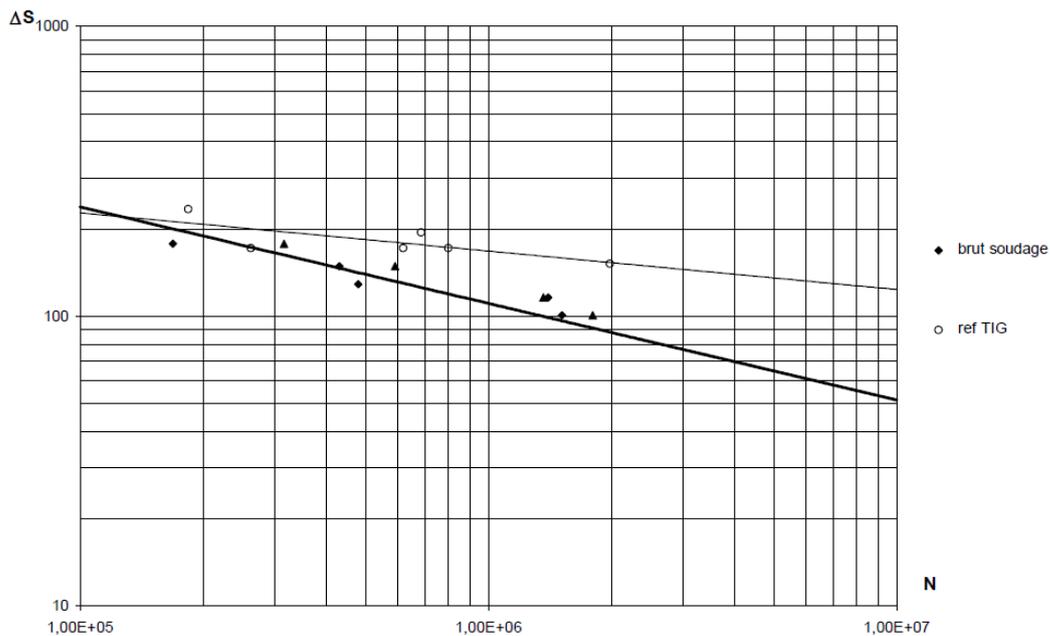


Figure 13 – Courbe S/N après refusion des pieds de cordons

Une refusion des pieds de cordons (Figure 12) permet d'obtenir les résultats de la Figure 13 concernant la résistance en fatigue des soudures d'angle.

QUESTION C.8

Feuille de copie

**Chiffrer et commenter** le gain potentiel. **Proposer** une explication de ce résultat.

QUESTION C.9

Feuille de copie

**Choisir** en la justifiant une méthode de contrôle non destructif adaptée à ce problème de fatigue.

QUESTION C.10

Feuille de copie

**Proposer** une gamme de fabrication complète de l'assemblage mécano-soudé (sans détailler les paramètres de chaque phase), incluant toutes les étapes de réalisation des pièces et assemblages et précisant les procédés et/ou outillages mise en œuvre.

## Partie D : USINAGE DE PIÈCES DE GRANDES DIMENSIONS

(durée conseillée : 1h15)

L'étude suivante propose d'étudier la compatibilité des performances du centre de tournage fraisage 5 axes Forest-Liné Flexiax V (voir Figure 14), destiné à l'usinage de pièces de grandes dimensions et disponible dans l'entreprise, avec les caractéristiques des opérations d'enlèvement de matière nécessaires pour la réalisation de l'anneau support de bol (1) dans sa version moulée au sable et les balourds supérieurs et inférieurs.

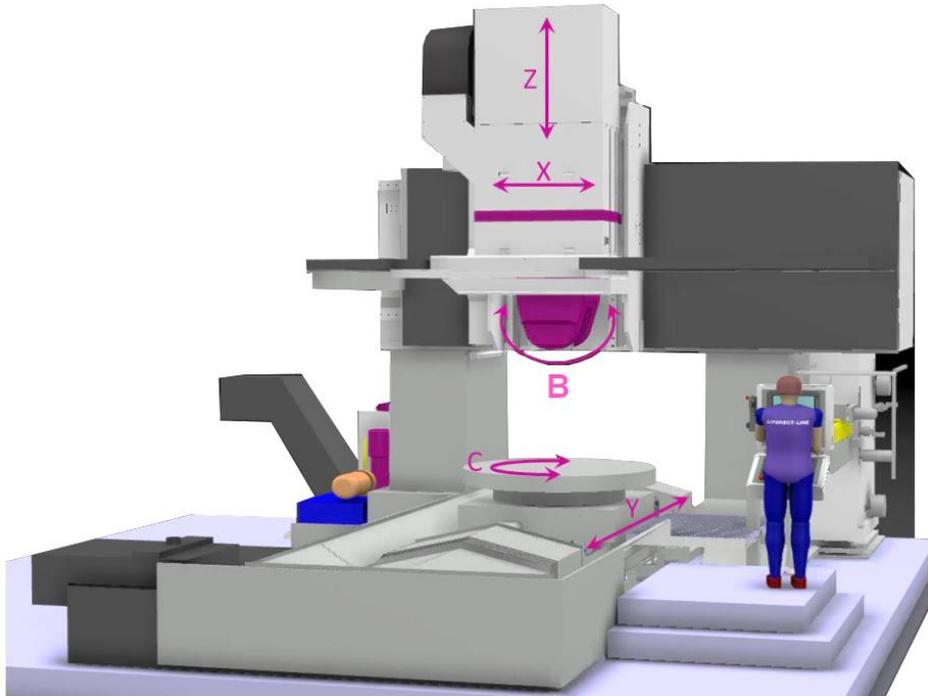


Figure 14 – Centre de tournage fraisage Forest-Liné Flexiax V

On propose d'étudier 2 solutions possibles d'ordonnancement des phases et opérations d'usinage limitées aux surfaces étudiées en partie C et à la face inférieure de la pièce (voir Figure 11, DT9 et DR2 pour les dimensions utiles).

On considérera pour la suite de l'étude qu'il n'y a pas de risque de collision avec les carters ou le bâti de la machine malgré l'encombrement du brut supérieur aux dimensions du plateau porte-pièce.

QUESTION D.1  
DT8 & DT9  
Feuille de copie

**Proposer** une analyse technique comparative des 2 nomenclatures des phases envisagées du point de vue de l'accessibilité aux surfaces à usiner et des conséquences sur les caractéristiques des outils, les cinématiques nécessaires et les problèmes de qualité attendus.

La situation relative des 4 alésages  $\varnothing 406$  H7 est définie à la Figure 15.

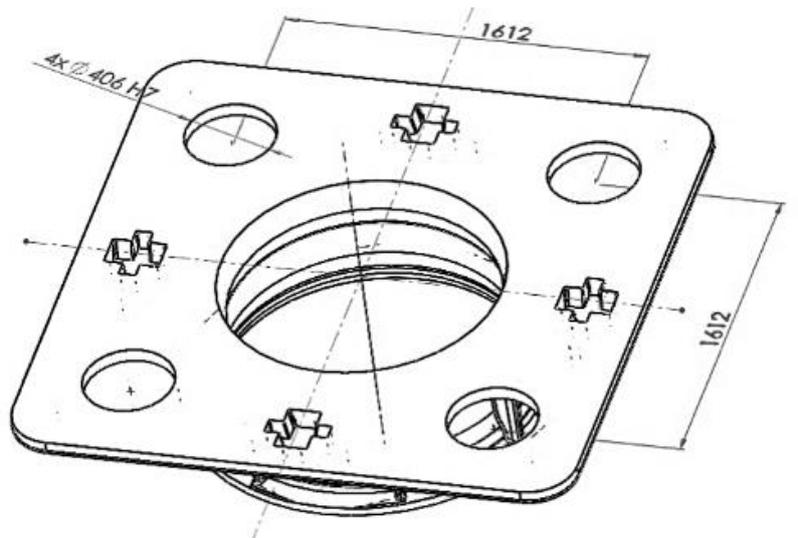


Figure 15 – Positions relatives des 4 alésages  $\varnothing 406$  H7 dans le support de bol (1)

Dans le cas de la gamme n°1, il est choisi de réaliser ces alésages en finition à l'aide d'une fraise 2 tailles cylindrique de  $\varnothing 40$ mm.

QUESTION D.2  
DT8  
Feuille de copie

En tenant compte des capacités du centre d'usinage, **définir** la combinaison d'axes nécessaire à la réalisation des 4 alésages à l'aide de cycles d'interpolation circulaire. **Choisir** et **représenter** sur un croquis une direction d'avance et **justifier** votre choix du point de vue de la formation du copeau.

La portée intérieure conique est inclinée de  $15^\circ$  par rapport à la direction perpendiculaire à la face inférieure de l'anneau support de bol (1) (voir Figure 16).

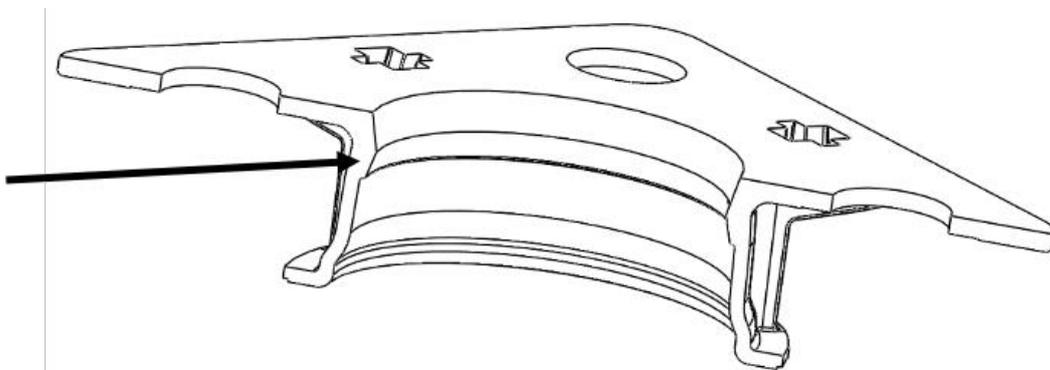


Figure 16 – Coupe de l'anneau support de bol (1) : la flèche indique la portée intérieure conique

QUESTION D.3

Feuille de copie

**Définir** la combinaison d'axes nécessaire, dans le cas de la gamme n°1, afin de générer en roulant la surface conique inclinée et **commenter** la possibilité d'utiliser ce mode de génération dans le cas de la gamme n°2.

On souhaite étudier la possibilité de réaliser la portée conique par un travail d'enveloppe, toujours en mode fraisage.

QUESTION D.4

Feuille de copie

**Proposer** une géométrie d'outil associée à un système d'axes permettant ce mode de génération et **commenter** cette stratégie.

On envisage la possibilité de réaliser la portée conique en utilisant le mode tournage du centre d'usinage, dans le cas de la gamme n°1. La plaquette choisie et les conditions de coupe recommandées sont données en Figure 17.



Figure 17 - Plaquette choisie et conditions de coupe recommandées pour l'usinage de l'EN-GJS-400-18 LT

QUESTION D.5

DT8

Feuille de copie

Sachant que le diamètre de la portée conique varie de 1 188 mm à 1 237 mm, **proposer** une fréquence de rotation du plateau adaptée.

Le choix de l'orientation de la broche permet d'agir sur l'angle d'orientation d'arête de l'outil de tournage (voir Figure 18).

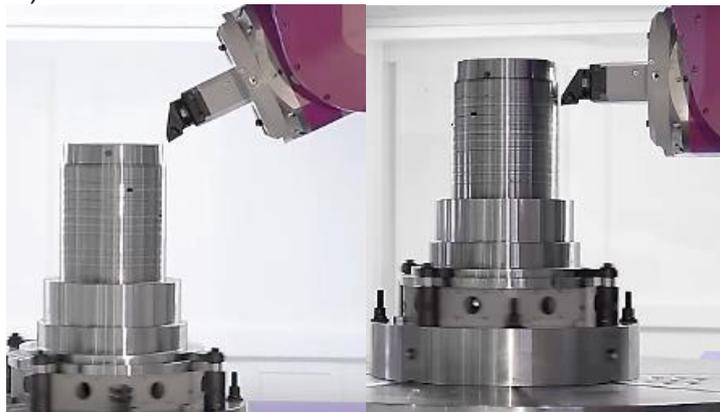


Figure 18 – Exemples de choix d'orientation de la broche

QUESTION D.6

Feuille de copie

**Préciser** la nature de l'influence de l'orientation d'arête sur l'opération de coupe et **justifier** l'intérêt de maîtriser ce paramètre.

QUESTION D.7

Feuille de copie

**Expliquer** quelle procédure particulière de positionnement de la pièce sur le plateau doit être mise en œuvre dans le cas d'une phase de tournage.

Les balourds bruts supérieurs et inférieurs (Figure 19) sont réalisés en acier moulé GE 300 normalisé.



Figure 19 – Balourds inférieur (à gauche) et supérieur (à droite)

QUESTION D.8

DT1 & DT3

Feuille de copie

**Analyser** les spécifications de battement radial, axial et total en illustrant les éléments et zones de tolérance par des schémas. **Proposer** une justification de l'ordre de grandeur des intervalles de tolérance au regard des jeux d'assemblage indiqués sur le DT3 et des éventuelles causes de non-conformités de ces spécifications.

QUESTION D.9

DT1

Feuille de copie

**Proposer** sous forme de croquis, d'esquisses et d'explications, un montage de contrôle permettant de vérifier ces 3 spécifications.

La réalisation des opérations d'usinage concernant la surface plane, les chicanes et l'alésage est envisagée sur le centre de tournage fraisage Forest-Liné Flexiax V.

QUESTION D.10

DT1

Feuille de copie

**Détailler** les contraintes liées au choix d'une réalisation en mode tournage, en précisant les caractéristiques principales du porte-pièce ainsi que la géométrie de l'outil permettant la génération des gorges frontales.

Le traitement de normalisation de l'acier engendre des modifications au niveau du grain.

QUESTION D.11

DT1 & DT10

Feuille de copie

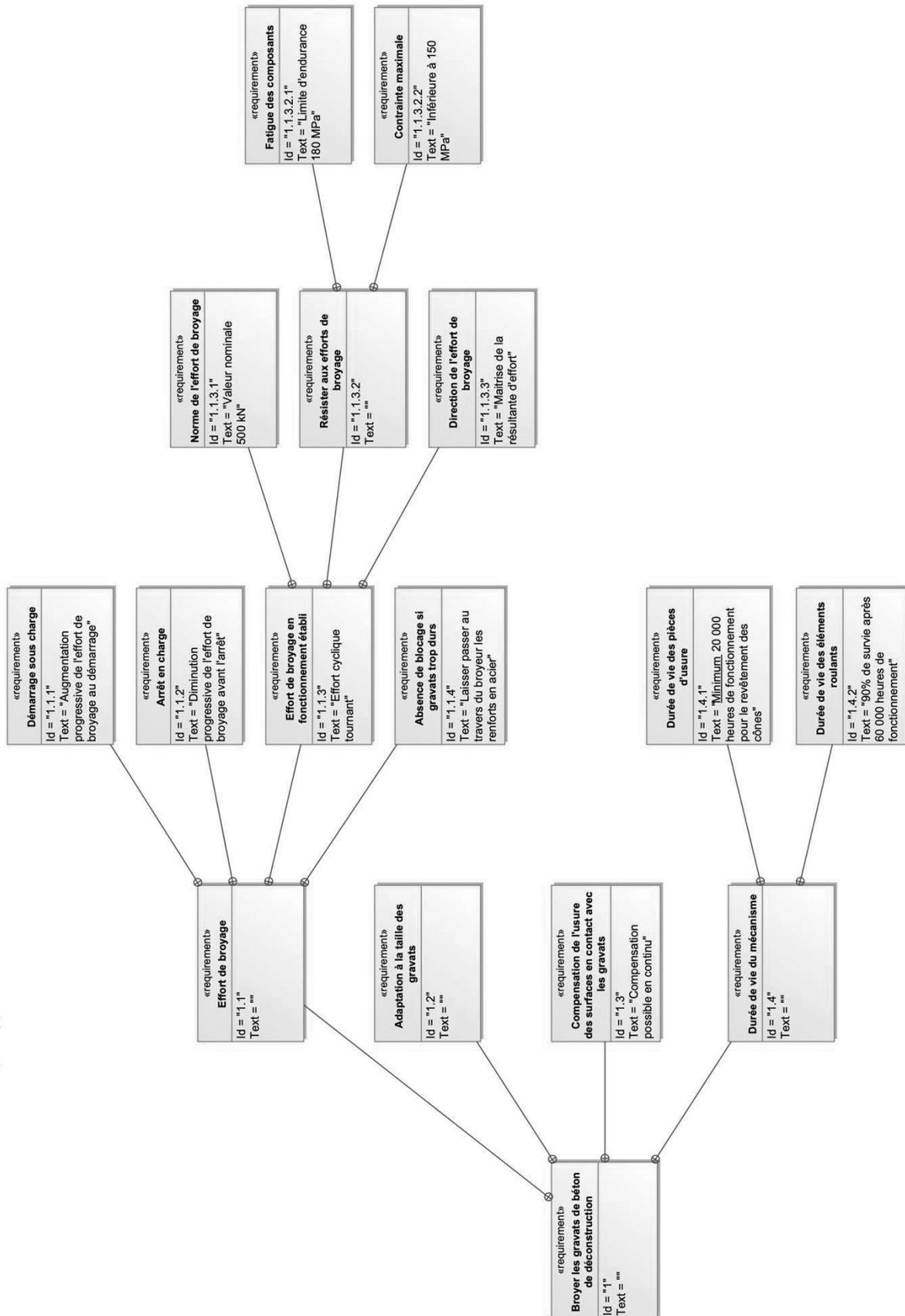
**Expliquer** en quoi consiste ce traitement et **détailler** les conséquences vis-à-vis des caractéristiques mécaniques et du processus global de fabrication.

## DT – Documents techniques

**Documents spécifiques et relatifs au support de l'étude, données techniques.**

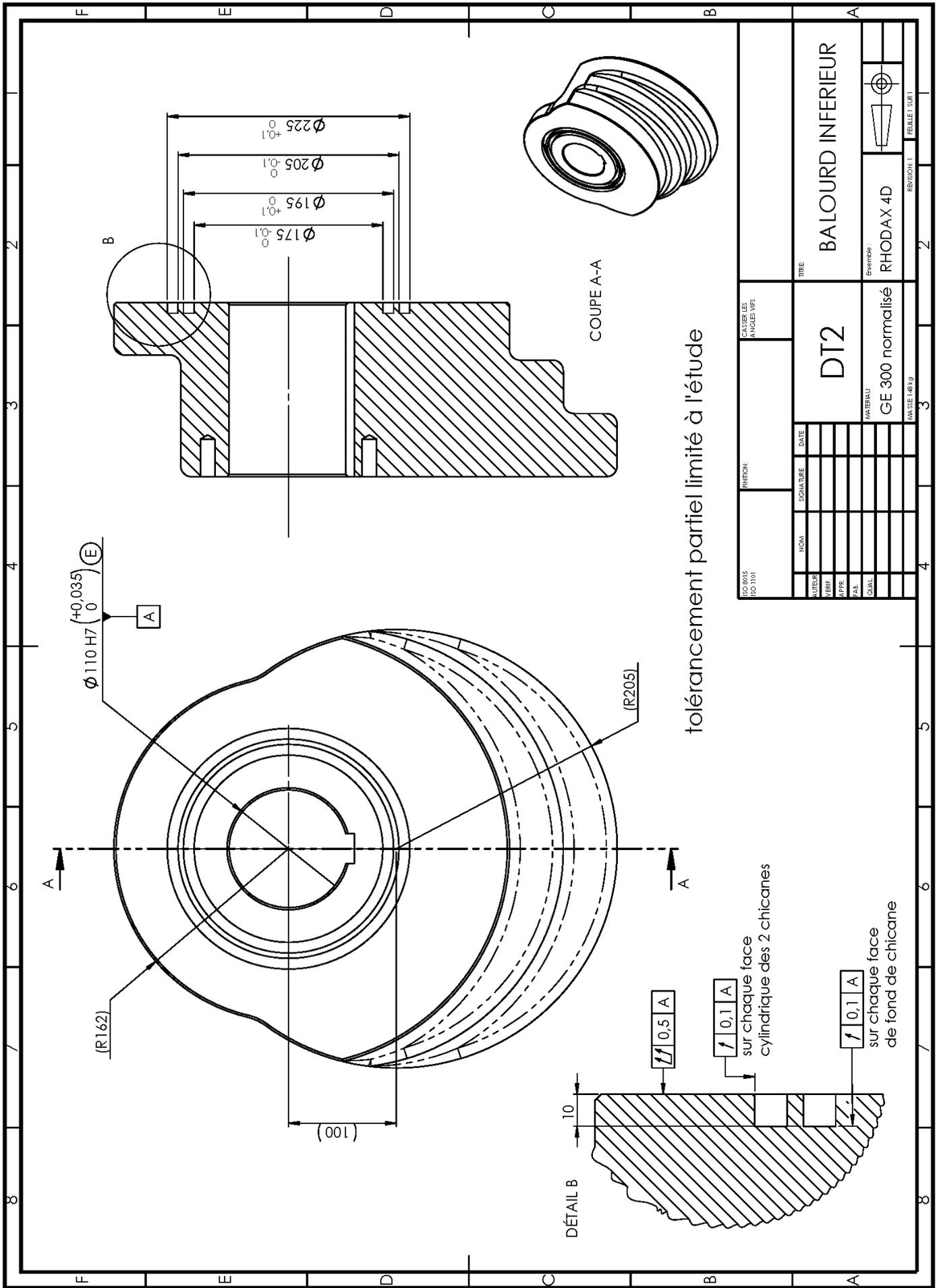
DT0 : Diagramme des exigences partiel
DT1 : Données de définition du balourd supérieur
DT2 : Données de définition du balourd inférieur
DT3 : Plan de l'ensemble vibreur
DT4 : Documentation constructeur roulements SKF (2 pages)
DT5 : Propriétés des fontes GJS
DT6 : Opérations de traitement thermique des fontes moulées
DT7 : Caractéristiques de l'acier S355 (2 pages)
DT8 : Caractéristiques du centre d'usinage Forest-Liné Flexiax V
DT9 : Gammes prévisionnelles d'usinage de l'anneau support de bol
DT10 : Microstructure, caractéristiques mécaniques lors de traitements thermiques

# DT0 – Diagramme des exigences partiel



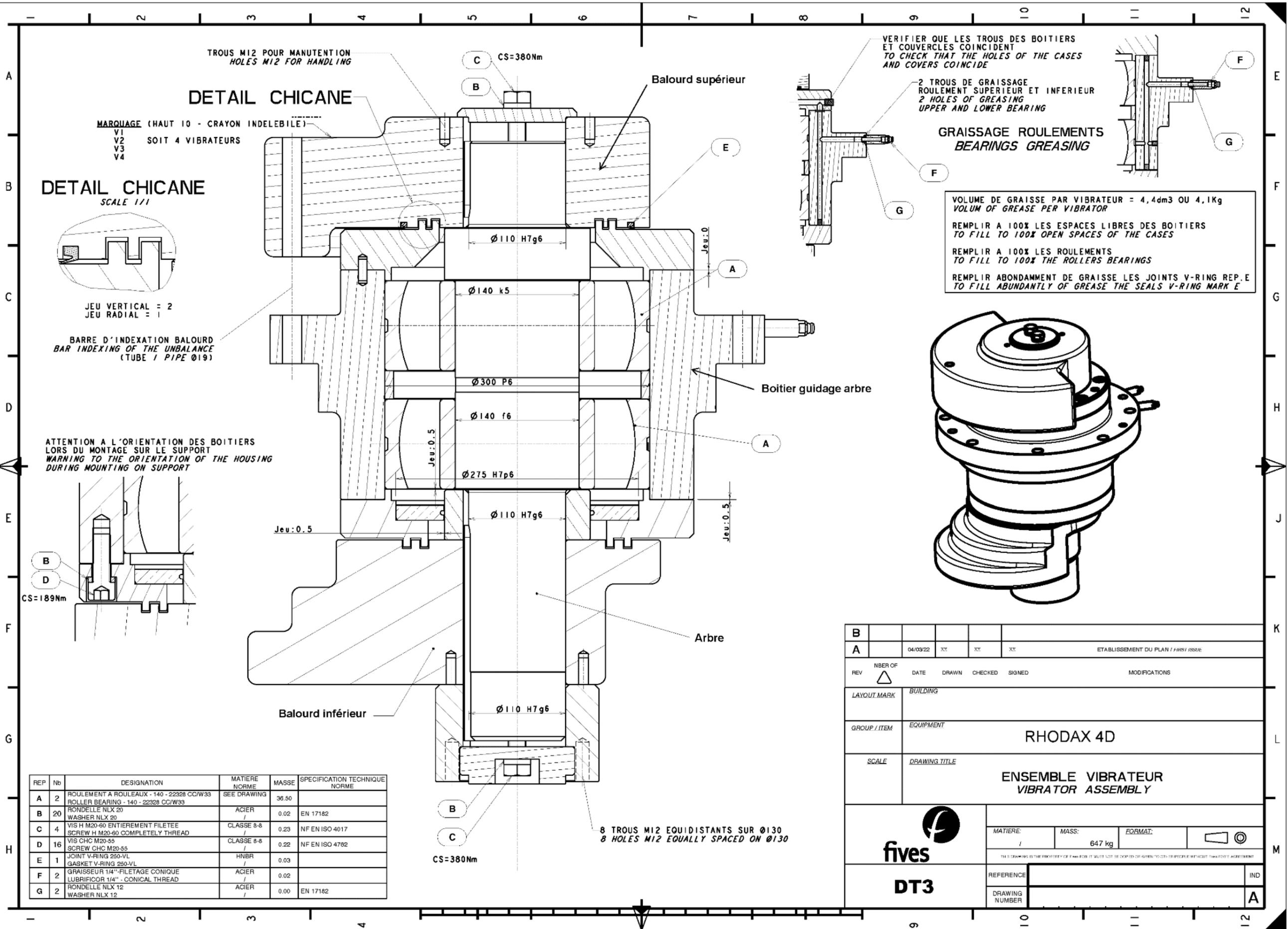


# DT2 – Dessin de définition du balourd inférieur



ISO 8015 ISO 101		FINITION: CASSER LES ANGLES VIFS		TITRE <b>DT2</b>		BALOIRD INFÉRIEUR	
NOM	SIGNATURE	DATE					
AUTEX							
VERIF.							
APPE.							
PAV.							
CAVAL.							
MATERIAU GE 300 normalisé				Exemple: RHODAX 4D		REVISIONS	
PASSÉ 14/12/9						REVISÉ (SURT)	

DT3 – Plan ensemble vibrateur (échelle ajustée au format de la page)

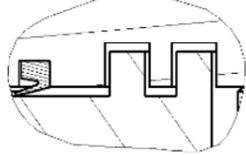


TROUS M12 POUR MANUTENTION  
HOLES M12 FOR HANDLING

DETAIL CHICANE

MARQUAGE (HAUT 10 - CRAYON INDELEBILE)  
V1  
V2 SOIT 4 VIBRATEURS  
V3  
V4

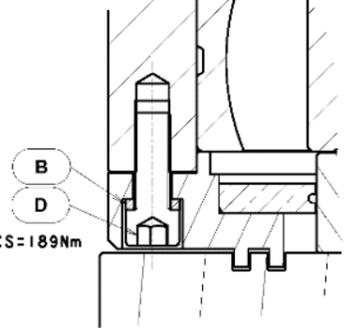
DETAIL CHICANE  
SCALE 1/1



JEU VERTICAL = 2  
JEU RADIAL = 1

BARRE D'INDEXATION BALOURD  
BAR INDEXING OF THE UNBALANCE  
(TUBE / PIPE Ø19)

ATTENTION A L'ORIENTATION DES BOITERS  
LORS DU MONTAGE SUR LE SUPPORT  
WARNING TO THE ORIENTATION OF THE HOUSING  
DURING MOUNTING ON SUPPORT



CS=189Nm

REP	Nb	DESIGNATION	MATIERE NORME	MASSE	SPECIFICATION TECHNIQUE NORME
A	2	ROULEMENT A ROULEAUX - 140 - 22328 CC/W33 ROLLER BEARING - 140 - 22328 CC/W33	SEE DRAWING	36.50	
B	20	RONDELLE NLX 20 WASHER NLX 20	ACIER	0.02	EN 17182
C	4	VIS H M20-60 ENTIEREMENT FILETEE SCREW H M20-60 COMPLETELY THREAD	CLASSE 8-8	0.23	NF EN ISO 4017
D	16	VIS CHC M20-55 SCREW CHC M20-55	CLASSE 8-8	0.22	NF EN ISO 4782
E	1	JOINT V-RING 250-VL GASKET V-RING 250-VL	HNBR	0.03	
F	2	GRAISSEUR 1/4" - FILETAGE CONIQUE LUBRIFICOR 1/4" - CONICAL THREAD	ACIER	0.02	
G	2	RONDELLE NLX 12 WASHER NLX 12	ACIER	0.00	EN 17182

VERIFIER QUE LES TROUS DES BOITERS  
ET COUVERCLES COINCIDENT  
TO CHECK THAT THE HOLES OF THE CASES  
AND COVERS COINCIDE

2 TROUS DE GRAISSAGE  
ROULEMENT SUPERIEUR ET INFERIEUR  
2 HOLES OF GREASING  
UPPER AND LOWER BEARING

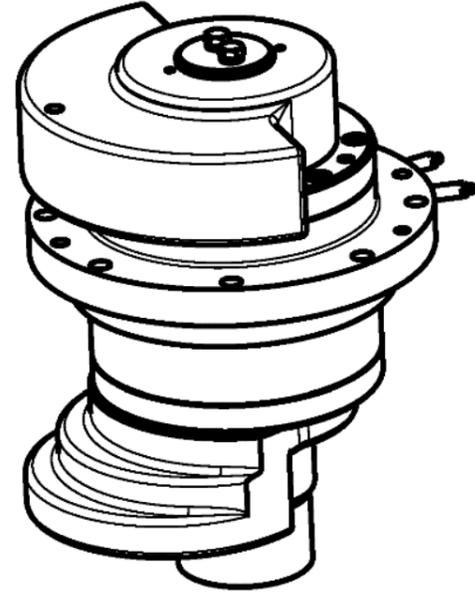
GRAISSAGE ROULEMENTS  
BEARINGS GREASING

VOLUME DE GRAISSE PAR VIBRATEUR = 4,4dm3 OU 4,1Kg  
VOLUM OF GREASE PER VIBRATOR

REMPILIR A 100% LES ESPACES LIBRES DES BOITERS  
TO FILL TO 100% OPEN SPACES OF THE CASES

REMPILIR A 100% LES ROULEMENTS  
TO FILL TO 100% THE ROLLERS BEARINGS

REMPILIR ABONDANMENT DE GRAISSE LES JOINTS V-RING REP. E  
TO FILL ABUNDANTLY OF GREASE THE SEALS V-RING MARK E



B									
A	04/09/22	XX	XX	XX	ETABLISSEMENT DU PLAN / FIRST ISSUE				
REV	NBER OF	DATE	DRAWN	CHECKED	SIGNED	MODIFICATIONS			
LAYOUT MARK	BUILDING								
GROUP / ITEM	EQUIPMENT								
SCALE	DRAWING TITLE								
<b>RHODAX 4D</b>									
<b>ENSEMBLE VIBRATEUR VIBRATOR ASSEMBLY</b>									
 <b>DT3</b>		MATIERE:	MASS:	FORMAT:					
		/	647 kg						
THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF FIVES FOR IT MUST NOT BE COPIED OR GIVEN TO OTHERS WITHOUT THE FIVES AGREEMENT									
REFERENCE									IND
DRAWING NUMBER									A

## DT4 – Documentation constructeur roulements SKF (feuille 1/2)

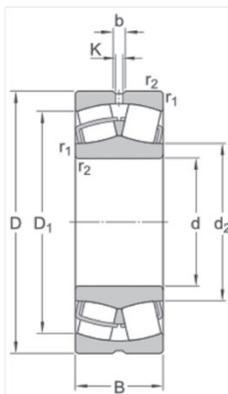
Extrait de la documentation technique associée aux roulements à rotule sur rouleaux utilisés dans le vibreur du DT3 (source site SKF : <https://www.skf.com/fr> )



22328 CC/W33

### Spécifications techniques

#### Conception



#### Dimensions

d	140 mm	Diamètre d'alésage
D	300 mm	Diamètre extérieur
B	102 mm	Largeur
d <sub>2</sub>	≈ 175 mm	Diamètre de l'épaulement de la bague intérieure
D <sub>1</sub>	≈ 247 mm	Diamètre d'épaulement/d'embranchement de la bague extérieure
b	16.7 mm	Largeur de la rainure de lubrification
K	9 mm	Diamètre du trou de lubrification
r <sub>1,2</sub>	min. 4 mm	Dimension d'arrondi

#### Données de calcul

Charge dynamique de base	C	1 357 kN
Charge statique de base	C <sub>0</sub>	1 560 kN
Limite de fatigue	P <sub>u</sub>	132 kN
Vitesse de référence		1 700 r/min
Vitesse limite		2 200 r/min
Valeur limite	e	0.35
Coefficient de charge axiale	Y <sub>1</sub>	1.9
Coefficient de charge axiale	Y <sub>2</sub>	2.9
Coefficient de charge axiale	Y <sub>0</sub>	1.8

# DT4 – Documentation constructeur roulements SKF (feuille 2/2)

Extrait du tableau des tolérances normales (source site SKF : <https://www.skf.com/fr> )

tableau 1 - Tolérances normales pour roulements radiaux, sauf roulements à rouleaux coniques

**Bague intérieure**

d	$f_{\Delta dmp}^{1)}$		$f_{VDsp}^{1)}$			$f_{VDmp}$	$f_{\Delta Bs}$	$f_{VBs}$	$f_{K\alpha}$			
	>	≤	Série de diamètres									
	U	L	7, 8, 9 <sup>2)</sup>	0, 1	2, 3, 4	Tout	Normale	Modifié <sup>3)</sup>				
mm	μm		μm			μm	μm	μm	μm			
–	2,5	0	-8	10	8	6	6	0	-40	–	12	10
2,5	10	0	-8	10	8	6	6	0	-120	-250	15	10
10	18	0	-8	10	8	6	6	0	-120	-250	20	10
18	30	0	-10	13	10	8	8	0	-120	-250	20	13
30	50	0	-12	15	12	9	9	0	-120	-250	20	15
50	80	0	-15	19	19	11	11	0	-150	-380	25	20
80	120	0	-20	25	25	15	15	0	-200	-380	25	25
120	180	0	-25	31	31	19	19	0	-250	-500	30	30
180	250	0	-30	38	38	23	23	0	-300	-500	30	40
250	315	0	-35	44	44	26	26	0	-350	-500	35	50
<sup>1)</sup> 315	400	0	-40	50	50	30	30	0	-400	-630	40	60
<sup>2)</sup> 3400	500	0	-45	56	56	34	34	0	-450	–	50	65

**Bague extérieure**

D	$f_{\Delta Dmp}$		$f_{VDsp}^{4)}$			$f_{VDmp}^{4)}$	$f_{\Delta Cs}$	$f_{K\alpha}$	
	>	≤	Roulements ouverts Série de diamètres						Roulements avec étanchéités intégrées <sup>5)</sup>
	U	L	7, 8, 9 <sup>2)</sup>	0, 1	2, 3, 4	2, 3, 4			
mm	μm		μm			μm	μm	μm	
2,5	18	0	-8	10	8	6	10	6	Identique 15
18	30	0	-9	12	9	7	12	7	à $f_{\Delta Bs}$ et 15
30	50	0	-11	14	11	8	16	8	$f_{VBs}$ d'une bague 20
50	80	0	-13	16	13	10	20	10	intérieure du même roulement 25
80	120	0	-15	19	19	11	26	11	du même roulement 35
120	150	0	-18	23	23	14	30	14	que la bague extérieure 40
150	180	0	-25	31	31	19	38	19	45
180	250	0	-30	38	38	23	–	23	50
250	315	0	-35	44	44	26	–	26	60
315	400	0	-40	50	50	30	–	30	70
400	500	0	-45	56	56	34	–	34	80
500	630	0	-50	63	63	38	–	38	100

## DT5 – Propriétés des fontes GJS

Indication selon norme DIN EN 1563			EN-GJS-350-22-LT	EN-GJS-400-18-LT	EN-GJS-400-15	EN-GJS-450-10	EN-GJS-500-7	EN-GJS-600-3	EN-GJS-700-2	EN-GJS-800-2	EN-GJS-450-18	EN-GJS-500-14	EN-GJS-600-10	
Analyse de référence	C		3,50 - 3,70	3,50 - 3,70	3,50 - 3,70	3,20 - 3,50	3,50 - 3,70	3,50 - 3,70	3,50 - 3,70	3,50 - 3,70	3,20 - 3,50	3,00 - 3,30	2,80 - 3,10	
pour épaisseur de paroi moyenne	Si		1,80 - 2,00	2,30 - 2,60	2,30 - 2,60	2,80 - 3,20	2,30 - 2,60	2,30 - 2,60	2,30 - 2,60	2,30 - 2,60	2,80 - 3,20	3,40 - 3,80	3,90 - 4,30	
	Mn		max. 0,2	max. 0,25	max. 0,25	max. 0,40	max. 0,50	max. 0,50	max. 0,50					
	Mo		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Ni		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Microstructure			 Ferrite 100:1	 Ferrite 100:1	 Ferrite et perlite 100:1	 Ferrite et perlite 100:1	 Ferrite et perlite 100:1	 Perlite et ferrite 100:1	 Perlite et ferrite 100:1	 Perlite et ferrite 100:1	 Perlite 100:1	 Ferrite 100:1 (trempé de la solution solide)	 Ferrite 100:1 (trempé de la solution solide)	 ferrite 100:1 (trempé de la solution solide)
<b>Propriétés mécaniques <sup>1)</sup></b>														
Résistance à la rupture	R <sub>m</sub>	MPa	350	400	400	450	500	600	700	800	450	500	600	
Limite élastique 0,2	R <sub>p0,2</sub>	MPa	220	240	250	310	320	370	420	480	350	400	470	
Allongement de rupture	A <sub>5</sub>	%	22	18	15	10	7	3	2	2	18	14	10	
Module d'élasticité	E	GPa	169	169	169	169	169	174	176	176	170	170	170	
Résilience <sup>2)</sup>	à +23°C (RT)	Joule	17	14	-	-	-	-	-	-	8	3	-	
	à -20°C (LT)	Joule	-	12	-	-	-	-	-	-	4	3	-	
	à -40°C (LT)	Joule	12	-	-	-	-	-	-	-	3	2	-	
Dureté Brinell	HBW		< 160	130 - 175	135 - 180	160 - 210	170 - 230	190 - 270	225 - 305	245 - 335	170 - 200	185 - 215	200 - 230	
Durabilité <sup>3)</sup>		MPa	180	195	-	210	224	248	280	304	210	225	275	
Limite d'endurance <sup>4)</sup>		MPa	114	122	-	128	134	149	168	182	130	140	165	
<b>Propriétés technologiques</b>														
Température de fonctionnement <sup>5)</sup>			< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	< 500	
Usinabilité			excellente	excellente	excellente	bonne	bonne	bonne	moyenne	moyenne	bonne	bonne	bonne	
Résistance à l'usure			moindre	moindre	moindre	moindre	bonne	bonne	excellente	excellente	moindre	moindre	moindre	
Trempe superficielle à la flamme ou par induction			moindre	moindre	moindre	moindre	moindre	bonne	excellente	excellente	moindre	moindre	moindre	
Durcissement superficiel par nitruration			bonne	bonne	bonne	bonne	bonne	bonne	excellente	excellente	bonne	bonne	bonne	
Soudabilité			soudable sous réserve avec des électrodes spéciales				soudable sous réserve avec des électrodes spéciales				soudable sous réserve avec des électrodes spéciales			
<b>Propriétés physiques</b>														
Densité	ρ	kg/dm <sup>3</sup>	7,10	7,10	7,20	7,10	7,10	7,20	7,20	7,20	7,1	7,0	7,0	
Conductivité thermique	λ à 300°C	W/(K*m)	36,2	36,2	36,2	36,2	35,2	35,2	31,1	31,1	-	-	-	
Coefficient de dilatation	α jus-qu'à 400°C	10 <sup>-6</sup>	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	-	-	-	
Matériaux spéciaux ou variétés non mentionnées sur demande														
<sup>1)</sup> Propriétés mécaniques de la fonte de fer à graphite sphéroïdal dans éprouvettes Y moullées (valeurs minimales) <sup>2)</sup> Valeur moyenne à partir de trois éprouvettes ISO-V (DIN 50115) <sup>3)</sup> Limite d'endurance Wöhler en flexion rotative, éprouvette lisse <sup>4)</sup> Limite d'endurance Wöhler en flexion rotative, éprouvette avec entaille <sup>5)</sup> Valeurs théoriques														

(source : <https://www.vonroll-casting.ch/fr/fonte-a-graphite-spheroidal.html>)

## DT6 – Opérations de traitement thermique des fontes moulées

Tableau regroupant les opérations de traitements thermique des fontes moulées

Opération	Nature	But	Conditions d'utilisation
<b>Traitement de détente</b> (§ 2.1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>chauffage à une température inférieure à celle de la transformation <math>\alpha - \gamma</math> (550 à 650 °C) (fontes non alliées) ou à celle de la température de revenu (fontes alliées)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>diminuer les risques de rupture en service en réduisant les contraintes résiduelles de tension de solidification ou introduites lors d'opérations d'usinage ou de rectification</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>recommandé pour des pièces ayant de fortes variations d'épaisseur ou de forme complexe</li> </ul>
<b>Traitement d'adoucissement</b> (§ 2.2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>recuit complet à haute température, supérieure à 900 °C (notamment malléabilisation)</li> <li>recuit à température moyenne, supérieure à la température de transformation <math>\alpha - \gamma</math></li> <li>recuit à basse température, au-dessous de l'intervalle de transformation <math>\alpha - \gamma</math> (ferritisation)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>faciliter l'usinage</li> <li>améliorer la ductilité</li> <li>améliorer la tenue aux chocs des fontes à graphite sphéroïdal</li> <li>abaisser le niveau de dureté</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>recuit complet réalisé par le fondeur dans le cycle de fabrication de la fonte malléable et des fontes à graphite lamellaire coulées en moule métallique</li> <li>effectué occasionnellement pour l'élimination des carbures libres indésirables</li> <li>recuit à température moyenne pour dissoudre de fins carbures dispersés conduisant à une dureté trop élevée</li> <li>recuit de ferritisation par dissociation de la perlite correspondant à une dureté trop élevée</li> </ul>
<b>Traitement de normalisation ou d'homogénéisation</b> (§ 2.3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>refroidissement à l'air à partir d'une température supérieure à l'intervalle de transformation <math>\alpha - \gamma</math> ou à la suite d'un traitement de recuit à haute température</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>accroître la dureté et les caractéristiques mécaniques par rapport à celles obtenues à la coulée</li> <li>améliorer la résistance à l'usure tout en conservant une usinabilité raisonnable</li> <li>avoir une excellente réponse à la trempe superficielle par induction ou au chalumeau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>deuxième phase du traitement de malléabilisation pour une nuance perlitique</li> <li>mise en conformité avec le cahier des charges : pièces refroidies trop lentement, par exemple, dans le moule au lieu d'avoir été décochées avant que leur température n'atteigne celle de l'intervalle de transformation <math>\alpha - \gamma</math></li> <li>pièces destinées à être trempées superficiellement</li> </ul>
<b>Traitement de durcissement</b> (§ 2.4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>chauffage à température supérieure à celle de l'intervalle de transformation suivi d'une trempe directe ou isotherme et d'un revenu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>obtenir la dureté la plus élevée possible pour répondre aux exigences de service de la pièce</li> <li>améliorer durablement la résistance à l'usure</li> <li>obtenir le meilleur compromis résistance mécanique/tenue aux chocs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pièces soumises à une forte usure (pression élevée)</li> <li>pièces en fontes à graphite lamellaire ou sphéroïdal à très hautes caractéristiques mécaniques</li> <li>pièces en fonte GS légèrement alliées à caractéristiques élevées y compris aux chocs</li> </ul>
<b>Traitement superficiel</b> (§ 2.5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>trempe superficielle, refroidissement à l'eau après chauffage (induction, chalumeau) à température supérieure à l'intervalle de transformation <math>\alpha - \gamma</math></li> <li>diffusion de carbone</li> <li>diffusion d'azote</li> <li>diffusion simultanée des deux éléments</li> <li>diffusion de soufre/azote</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>obtenir une résistance à l'usure élevée tout en conservant des propriétés de ductilité de l'alliage au cœur de la pièce</li> <li>accroître la résistance à la fatigue et au grippage</li> <li>améliorer la tenue à l'oxydation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pièces à structure perlitique (caractéristique élevée) pour lesquelles la tenue au frottement est associée à une bonne ductilité et/ou pour lesquelles un bon comportement en fatigue est nécessaire.</li> <li>Selon l'épaisseur de la pièce concernée par l'usure, le choix du traitement se portera sur le traitement thermique seul (forte épaisseur : millimètre) ou sur un traitement thermo-chimique (quelques centaines de micromètres)</li> </ul>

(source : Techniques de l'Ingénieur, traitements thermiques des fontes : guide de choix M1146)

## DT7 – Caractéristiques de l'acier S355 (feuille 1/2)

**No de matière:** 1.0570 / 1.0557  
**Abréviation:** S355J2 / S355J2+N  
**Analyse:** C ≤ 0,22 Si ≤ 0,55 Mn ≤ 1,6  
P ≤ 0,025 S ≤ 0,025 Cu ≤ 0,55%

### Application

L'acier de construction S355J2 est bien soudable et usinable. Il est destiné à la construction de machines en général, spécialement aux pièces non soumises aux hautes exigences de résistance. Grâce à sa bonne soudabilité, il est utilisé en constructions d'aciers soudés. Son application s'étend souvent aux pièces découpées au chalumeau car il n'y a aucun danger de durcissement superficiel lors de l'oxycoupage.

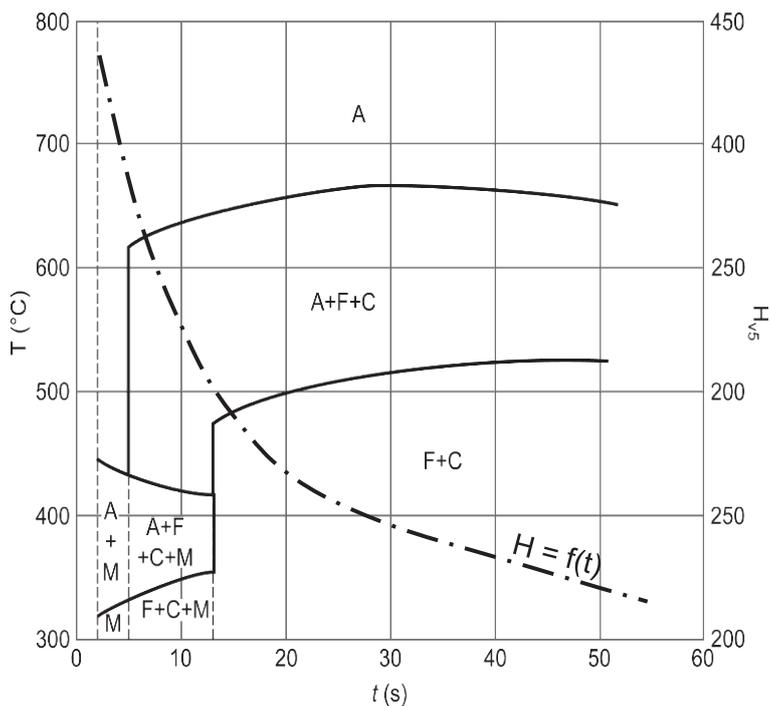
Recuit de détente : 550-580°C (après échauffement à cœur pendant 2 heures, refroidissement au four jusqu'à 500°C, ensuite à l'air).

### Mechanische Eigenschaften

### Propriétés mécaniques

Anlieferungszustand FF (vollberuhigt) Etat de livraison FF (calmé spécialement)	Zugfestigkeit $R_m$ Résistance à la traction $R_m$ N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze $R_e$ Limite élastique $R_e$ min. N/mm <sup>2</sup>	Dehnung Allongement min. % (L = 5 d)
Abmessung Dimension			
bis Ø 16 mm jusqu'à	490-630	355	21
> 16-40 mm	490-630	345	21
> 40-63 mm	490-630	335	20
> 63-80 mm	490-630	325	19

[www.hertsch.ch](http://www.hertsch.ch)



La dureté de la zone soudée est exprimée en HV5.

t (s) correspond à la durée de refroidissement de 800°C à 500°C.

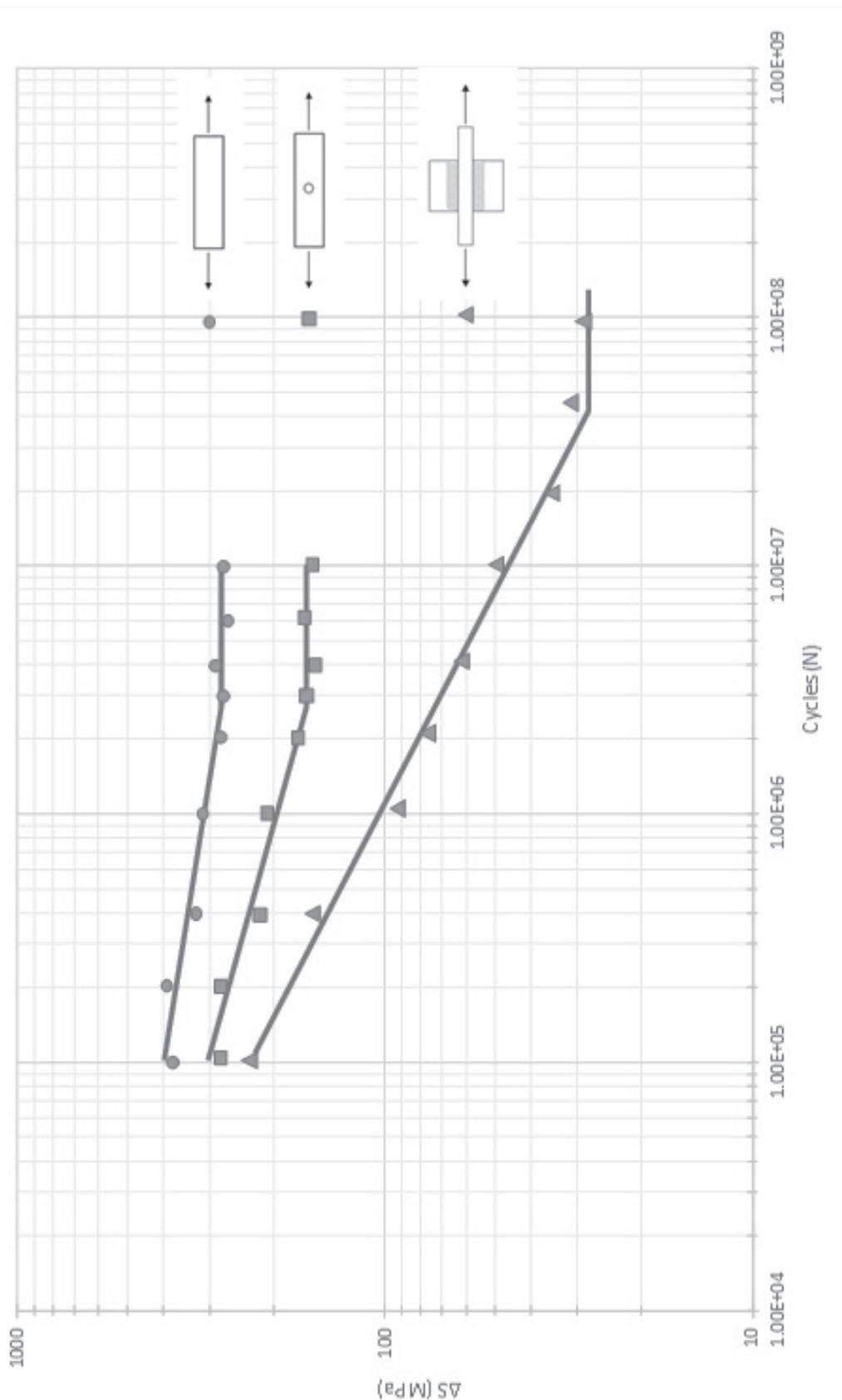
A, F, C et M désignent les différentes microstructures obtenues.

Diagramme TRCS (Transformation au Refroidissement en Condition de Soudage) du S355

## DT7 – Caractéristiques de l'acier S355 (feuille 2/2)

Courbes de résistance à la fatigue obtenues sur éprouvettes en acier S355.

Plaques pleines (●), plaques entaillées (■), plaques assemblées par des cordons de soudure d'angle à 2 raidisseurs (▲).



# DT8 – Caractéristiques du centre d'usinage Forest-Liné Flexiax V

**Centre de tournage fraisage 5 axes**

**Courses (mm) :**

- X1950 ; Y2000 ; Z1000 ;
- C infini, B +/- 110° ;

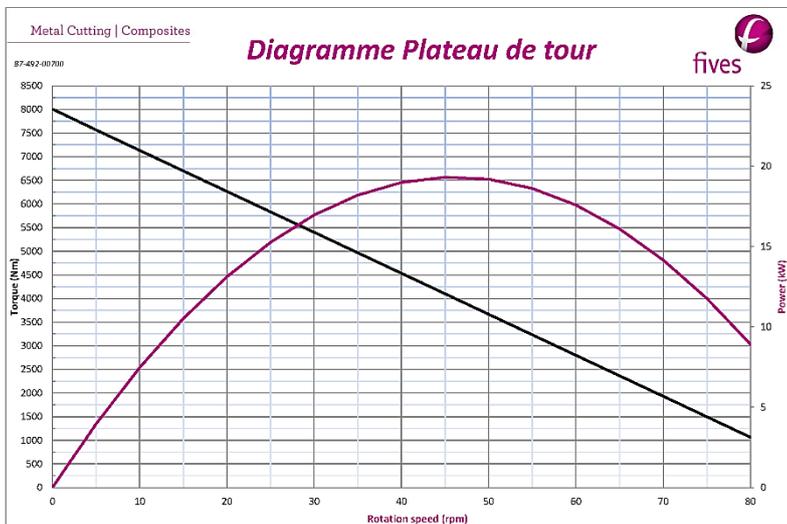
**Vitesse rapides** 40 m·min<sup>-1</sup> ;

**Accélération** 1 m·s<sup>-2</sup> ;

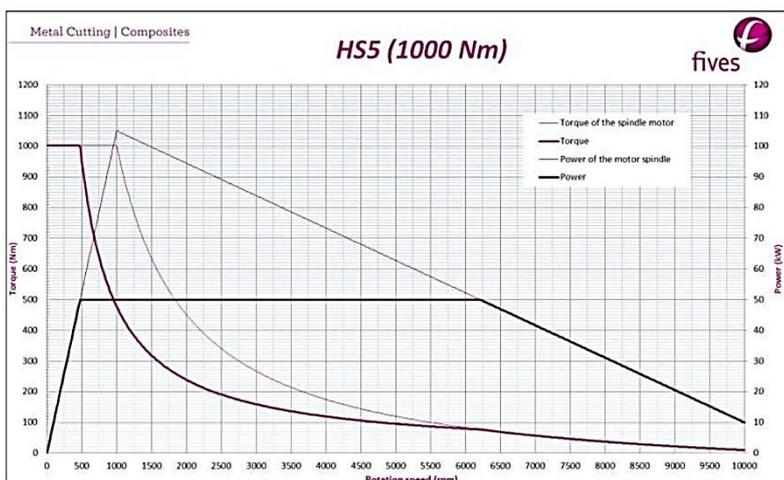
**Arrosage** 70 bars, 60 l·min<sup>-1</sup>.



Plateau Ø1 600 mm ;  
 Charge 5 000 kg maximum ;  
 Puissance 19 kW ;  
 N = 80 tr·min<sup>-1</sup>



Broche de fraisage HSK-A100 ;  
 Puissance 100 kW ;  
 N = 10 000 tr·min<sup>-1</sup>.



## DT9 – Gammes prévisionnelles d'usinage de l'anneau support de bol

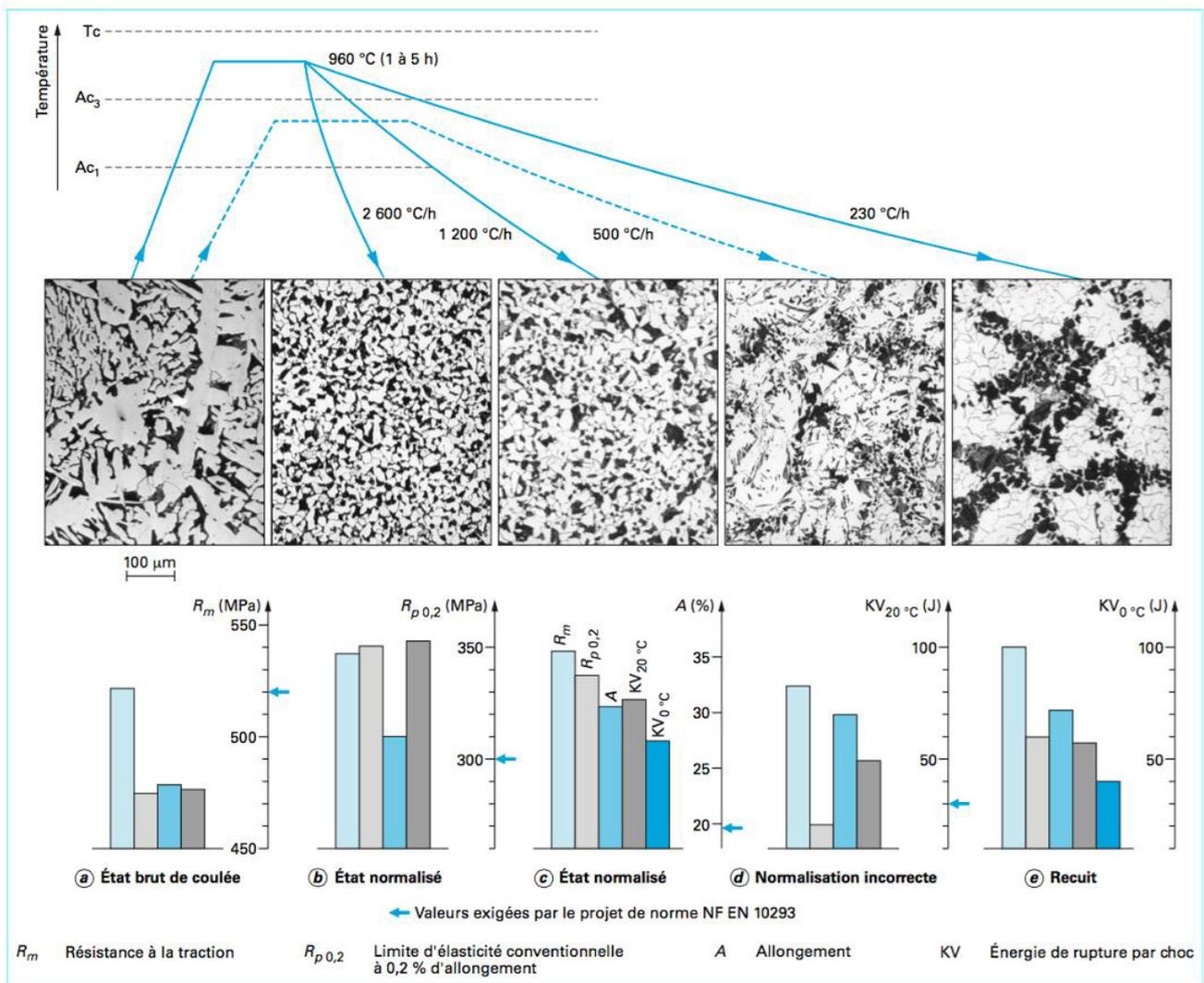
<b>PROCESSUS PRÉVISIONNEL N°1</b>			
<b>Nomenclature des phases</b>			
Ensemble : FCB RHODAX 4D		Élément : anneau support de bol	
		Matière : EN-GJS-400-18 LT	
N° Phase	Machine Outil	Désignation	Croquis
10	Forest-Liné Flexiix V	<ul style="list-style-type: none"> <li>Surfaçage face</li> <li>Réalisation des 4 alésages <math>\varnothing 406H7</math></li> <li>Usinage portée cônica intérieure</li> </ul>	
20	Forest-Liné Flexiix V	<ul style="list-style-type: none"> <li>Surfaçage des 8 portées planes</li> <li>Usinage face supérieure + épaulement</li> <li>Perçages</li> </ul>	

<b>PROCESSUS PRÉVISIONNEL N°2</b>			
<b>Nomenclature des phases</b>			
Ensemble : FCB RHODAX 4D		Élément : anneau support de bol	
		Matière : EN-GJS-400-18 LT	
N° Phase	Machine Outil	Désignation	Croquis
10	Forest-Liné Flexiix V	<ul style="list-style-type: none"> <li>Surfaçage face</li> </ul>	
20	Forest-Liné Flexiix V	<ul style="list-style-type: none"> <li>Surfaçage des 8 portées planes</li> <li>Réalisation des 4 alésages <math>\varnothing 406H7</math></li> <li>Usinage portée cônica intérieure</li> <li>Usinage face supérieure + épaulement</li> <li>Perçages</li> </ul>	

## DT10 – Microstructure, caractéristiques mécaniques lors de traitements thermiques

Effet de la température d'austénitisation et de la vitesse de refroidissement sur la structure et les caractéristiques mécaniques de l'acier GE 300 :

- les diagrammes correspondent aux propriétés mécaniques des microstructures situées au-dessus ;
- chaque diagramme représente par des barres de couleurs les propriétés mécaniques :  $R_m$ ,  $R_{p0,2}$ ,  $A$ ,  $KV$  à 20 et à 0°C. (une couleur = une propriété) ;
- les échelles des propriétés mécaniques sont communes à plusieurs diagrammes.



(source : Techniques de l'Ingénieur, traité matériaux métalliques - Traitements thermiques des pièces en aciers moulés M1148)



**NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE**

## Données d'entrée requises

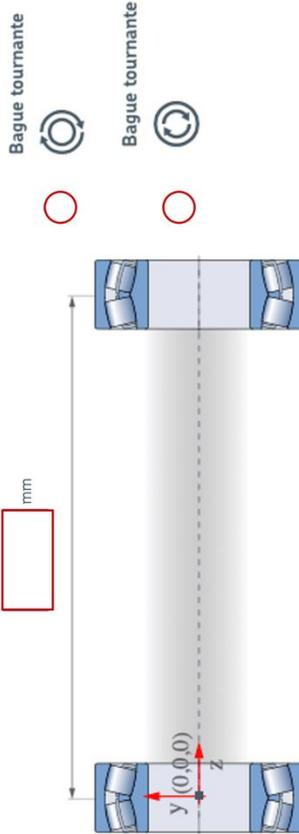
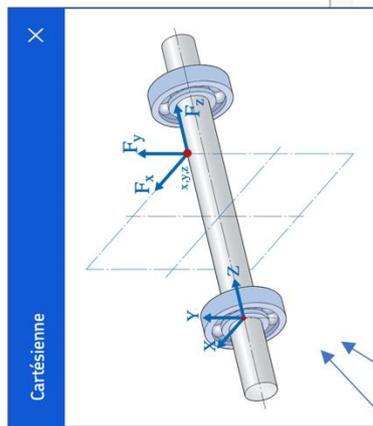
Exigences de Système

Roulement reprenant la charge axiale <sup>①</sup>

Gauche  Droite  Aucune (charge axiale négligée)  Horizontal  Vertical

Orientation de l'arbre

Entraxe des roulements

 mm


### Cas de charge

Type de coordonnées

Cartésienne (x,y) | Polaire (r,θ)

F1  (x,y)  (r,θ)

F2  (x,y)  (r,θ)

Efforts

Fx|Fr Fy|Fθ Fz


Coordonnées

x|r mm y|θ mm/deg z mm


Vitesse

r/min

Température <sup>①</sup>

Gauche Droite °C

Bague intérieure	70
Bague extérieur	65

Température du roulement de droite identique à celle du roulement de gauche

# DR2 – Définition anneau support de bol

