

SESSION 2013

AGRÉGATION
CONCOURS EXTERNE

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

**CONCEPTION PRÉLIMINAIRE D'UN SYSTÈME,
D'UN PROCÉDÉ OU D'UNE ORGANISATION**

Durée : 6 heures

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

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

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

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

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

Tournez la page S.V.P.

A

COMPOSITION DU SUJET

TEXTE DU SUJET

Support étudié : la pompe submersible AMAREX KRT

Présentation des études proposées dans le sujet

Questions à traiter dans les parties « A », « B », « C », « D », « E »

DOCUMENTS TECHNIQUES

DT1 : plan d'ensemble de la pompe AMAREX KRT ;

DT2 : dessin de définition de l'arbre de pompe ;

DT3 : dessin de la roue hydraulique (forme et encombrement).

DOCUMENTS RESSOURCES

Partie A - Étude du rendement du moteur de la pompe en fonctionnement

- **DR1** : extrait de la norme IEC de 2007 : circuit équivalent conventionnel par phase en modèle T d'une machine asynchrone ;
- **DR2** : extrait de catalogue, métaux ferromagnétiques ;
- **DR3.1 à DR3.3** : notions de construction et modélisation aux inductances d'une machine asynchrone.

Partie B - Étude du guidage en rotation de l'arbre moteur

- **DR4** : estimation des pertes énergétiques dans les guidages en rotation.

Partie C - Étude d'industrialisation de l'arbre de pompe

- **DR5.1 à DR5.2** : moyens de production mis en œuvre pour l'usinage de l'arbre ;
- **DR6** : efforts de coupe en tournage ;
- **DR7** : nuances de plaquettes et conditions de coupe pour les aciers inoxydables ;
- **DR8** : flambage, extraits ;
- **DR9** : technologie WIPER® pour le tournage de finition ;
- **DR10** : rugosité Rt et Ra, extrait « mécanique des structures, résistance des matériaux, poutres encastrées ».

Partie D - Optimisation de la relation « Produit – Matériau – Procédé »

- **DR11** : procédé de fabrication de moules et noyaux par prototypage ;
- **DR12.1 à DR12.3** : paramètres et résultats des simulations ;
- **DR13** : fiche Matière de la fonte EN-JN1039 ;
- **DR14** : diagramme en Transformation à Refroidissement Continu (TRC) et formule

Pas de documents ressources pour la partie E : conclusion

Avertissement :

- le (ou la) candidat(e) est invité(e) à formuler toutes les hypothèses nécessaires à la résolution du problème posé ;
- il sera tenu compte de la capacité du (ou de la) candidat(e) à résoudre, dans leurs globalités, les problèmes posés plutôt que de s'efforcer à répondre aux questions de façon dispersée ;
- il sera tenu compte, pour chaque étude, de la capacité du (ou de la) candidat(e) à décrire sa démarche de résolution de problème, les données et hypothèses utilisées, ses connaissances propres mobilisées ;
- il sera tenu compte, dans la correction, de la clarté et de la concision des réponses ;
- pour la partie D, le (ou la) candidat(e) utilisera les documents ressources fournis comme documents réponses pour répondre aux différentes questions et les joindra à la copie.

SUPPORT ÉTUDIÉ : la pompe submersible AMAREX KRT

Le **groupe KSB** possède une unité KSB-LILLE qui développe (R&D) et produit une gamme de pompes submersibles d'assainissement. L'unité accentue ses efforts de recherche, de développement et d'innovation afin de pouvoir accroître sa capacité à répondre aux enjeux et défis sociétaux et environnementaux, en réponse aux attentes des marchés en développement (Europe, Asie, États Unis), aux besoins des collectivités et des groupes industriels dans le domaine des services à l'environnement.

Elle déploie en interne, avec ses fournisseurs et pour ses donneurs d'ordres, un système de management environnemental (SME, ISO 14001) qui répond aux directives européennes concernant la limitation de substances dangereuses (directives RoHS) et concernant la réduction des déchets des équipements électriques (directive DEEE).

L'ensemble de la gamme de pompes submersibles produites fait l'objet de démarche d'éco-conception, d'une analyse de cycle de vie, d'un bilan carbone.

Le bilan carbone a été étendu à l'activité complète du site de l'unité KSB de LILLE.

Note générale	74 %
Protection de l'environnement, des ressources naturelles et de la biodiversité	70 %
Management environnemental	75 %
Conformité des installations et prestations avec les réglementations en vigueur	79 %
Eco conception et Analyse de cycle de vie du produit	67 %

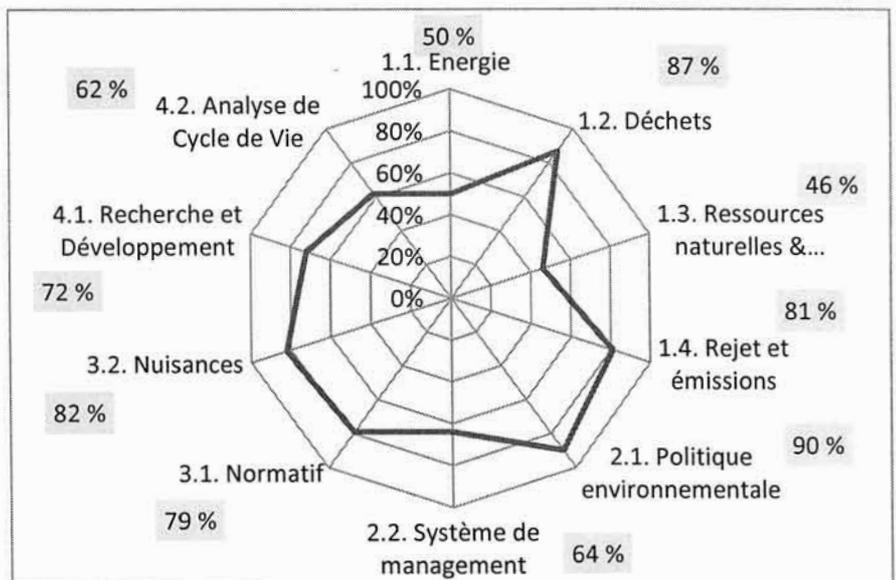
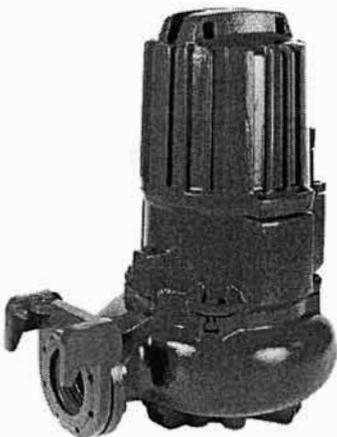


Figure 1 : bilan carbone, ACV



L'AMAREX KRT (voir DT1) appartient à une gamme de pompes submersibles de construction verticale, monobloc, avec différentes formes de roues adaptées. Elle est destinée au relevage des eaux usées de toute nature, dans le traitement des eaux résiduaires communales et industrielles pour des installations industrielles, des stations d'épuration principalement, pour des applications telles que la gestion, l'évacuation des eaux pluviales, chargées, usées et/ou des boues, le pompage de liquides qu'ils soient pollués, chargés de matières solides, de fibres courtes ou longues.

Débits jusqu'à : 10 000 m³/h.

Hauteurs de relevage jusqu'à : 100 m (selon le type de roues hydrauliques).

La pompe AMAREX fait l'objet d'une démarche d'amélioration continue de l'ensemble des phases du cycle de vie. Parmi toutes les phases liées à cette démarche, certaines font l'objet d'études proposées dans ce sujet, en particulier les phases « production matières premières » et « fabrication produit ».

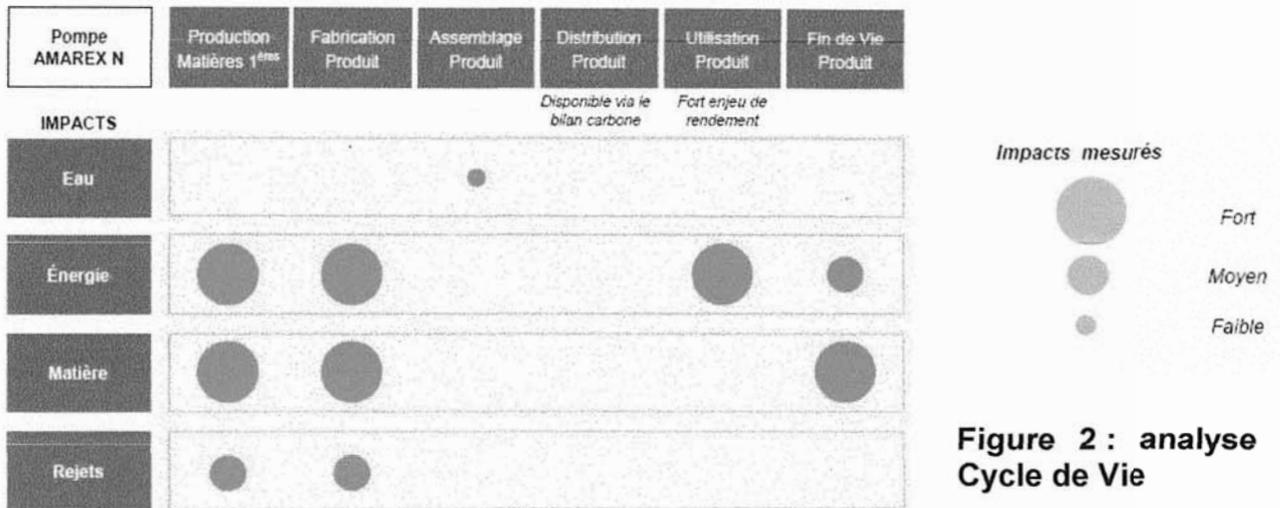


Figure 2 : analyse Cycle de Vie

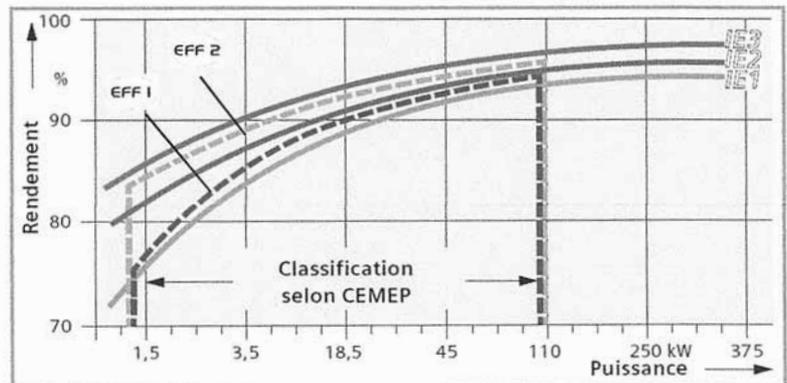
		OBJECTIFS DÉJÀ ATTEINTS par l'entreprise KSB	ÉTUDES PROPOSÉES dans le sujet
POMPE AMAREX KRT	Phase : utilisation du produit	Amélioration du rendement de l'AMAREX KRT par réduction des masses en jeu.	Partie A : optimisation de l'efficacité énergétique et du rendement du moteur ; Optimisation des pertes thermiques et magnétiques pour atteindre les objectifs des normes à venir.
	Phase : fabrication Produit (Conception détaillée & Industrialisation du produit)	Suppression du collage des stators. Réduction des consommations d'énergie lors des phases d'usinage des corps de pompe. Mise en œuvre de la norme ISO 14001 : Système de Management de l'Environnement.	Partie B : optimisation de la conception du guidage en rotation de l'arbre moteur, évaluation des pertes énergétiques. Partie C : optimisation de la stratégie d'usinage de l'arbre moteur, analyse de rentabilité.
	Phase : production matières premières	Réduction de 18 % des matières nécessaires pour réaliser le carter de la pompe avec maintien du produit Débit x Hauteur.	Partie D : optimisation du procédé d'obtention de la roue D, adéquation produit matériaux
		Partie E : conclusion sur le bilan carbone et l'analyse cycle de vie du produit	

PARTIE A – ÉTUDE DU RENDEMENT DU MOTEUR DE LA POMPE EN FONCTIONNEMENT

A-1 : étude et optimisation du rendement du moteur de la pompe

Le contexte : les motorisations électriques utilisées par l'entreprise KSB seront assujetties à une nouvelle norme IEC à l'horizon 2017 (IEC 60034-30 : 2008). L'entreprise KSB souhaite anticiper cette future évolution.

Cette norme établit des classes de rendement IE (International Efficiency) pour les machines asynchrones : IE1 (rendement standard), IE2 (haut rendement), IE3 (rendement Premium) en remplacement des anciennes classes eff1 et eff2. Les évolutions en termes de rendement sont succinctement représentées par



les courbes ci-contre. Pour que l'entreprise KSB puisse proposer à l'horizon 2017 une gamme de pompes utilisant des machines asynchrones classes IE2 et IE3, il apparaît nécessaire d'améliorer le rendement de ces machines. Il est, de ce fait, envisagé d'améliorer la qualité des tôles constituant le circuit magnétique de la MAS, d'augmenter la section des bobinages statoriques, de changer la nature des matériaux constituant la cage d'écurieuil (à ce jour un alliage à base d'aluminium).

Remarque : les machines asynchrones seront dénommées MAS dans la suite de ce sujet.

Le problème à résoudre : quels effets et bénéfiques peuvent avoir les solutions envisagées par l'entreprise en termes de rendement et d'impacts environnementaux ?

À partir du rendement actuel de la pompe AMAREX KRT et en s'appuyant sur la norme IEC de 2007 (IEC 60034-2-1 : 2007) qui recommande la méthode du circuit équivalent (modèle en T, cf. figure 1, cf. DR1), les objectifs de cette étude sont d'étudier et de déterminer les moyens permettant d'améliorer le rendement de la MAS, puis de déterminer les impacts des solutions technologiques envisagées pour améliorer le rendement de la MAS.

Données :

- le circuit équivalent conventionnel par phase en modèle T d'une machine asynchrone (MAS), (cf. figure 1, cf. DR1) ;
- la vitesse de rotation nominale de l'arbre de la pompe est $N = 1\,395$ tr/min ;
- la tension simple d'alimentation de la pompe a pour valeur efficace $V_s = 230$ V ;
- la machine asynchrone (MAS) est alimentée en 50Hz ;
- une identification des valeurs des paramètres du modèle en T de la MAS, en utilisant les protocoles d'essais définis par la norme IEC de 2007, donne les résultats suivants (cf. figure 1) :

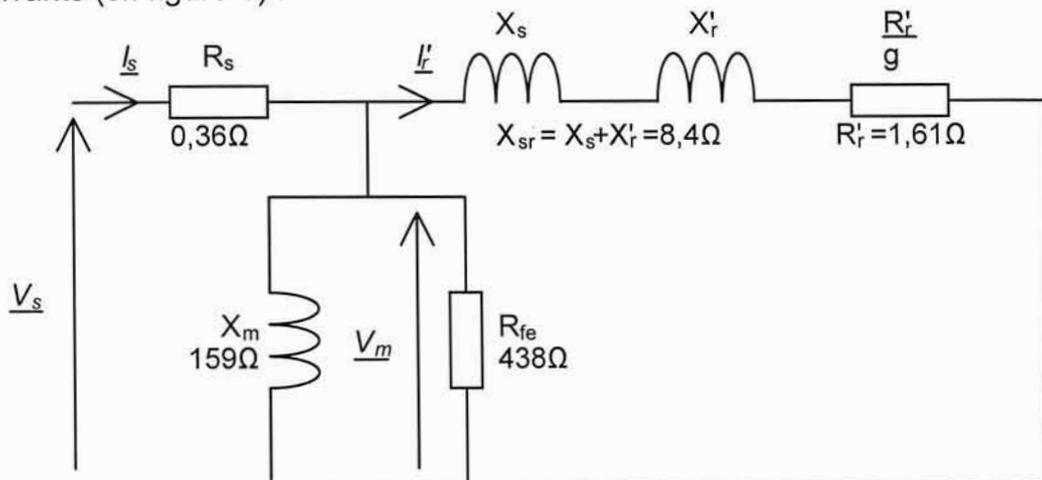


Figure 1 : Circuit équivalent par phase modèle T simplifié d'une MAS

- les valeurs efficaces des courants et des tensions sont $V_m = 226,7$ V ; $I_s = 10,30$ A ; $I'_r = 9,26$ A.

Afin de simplifier l'analyse, dans cette modélisation, on néglige :

- la chute de tension sur X_s afin de remonter sur le modèle en T les branches X_m et R_{fe} . (cf. figure 1) ;
- les pertes parasites en charge P_{LL} , les pertes résiduelles P_{Lr} , les pertes par frottement et par ventilation P_{fv} .

Question 1 : proposer un ou des éléments légitimant cette simplification.

Question 2 : déterminer numériquement les différentes pertes dissipées par la MAS, à savoir les pertes fer P_{fe} représentées par l'effet de R_{fe} , les pertes joules rotoriques P_{Rr} représentées par l'effet de R'_r , les pertes joules statoriques P_{Rs} représentées par l'effet de R_s .

Question 3 : déterminer le rendement η de la MAS et préciser dans quelle classe de rendement IE se trouve cette MAS, IE1 (rendement standard $\eta \geq 84,7$ %) ou IE2 (haut rendement $\eta \geq 87,7$ %) ou IE3 (rendement Premium $\eta \geq 89,6$ %).

Données :

➤ *Puissances et champ d'induction*

Quels que soient les résultats obtenus aux questions précédentes, on considère une MAS dont le point de fonctionnement nominal fait apparaître les puissances suivantes :

- $P_{fe} = 350$ W, pertes dans le fer, dans les parties actives et pertes supplémentaires à vide dans les autres parties métalliques ;
- $P_{fw} = 50$ W, pertes par frottement et par ventilation ;
- $P_u = 5\,500$ W, puissance utile sur l'arbre de la MAS ;
- $P_{Rs} = 110$ W, pertes dans les enroulements du stator ;
- $P_{Rr} = 410$ W, pertes dans les enroulements du rotor ;
- $P_{LL} + P_{Lr} = 60$ W, pertes parasites en charge et pertes résiduelles ;
- Le champ d'induction magnétique peut atteindre 1,5T.

➤ *Matériaux ferromagnétique :*

- la masse des tôles du circuit magnétique du stator de la MAS est de 30 kg ;
- l'entreprise KSB envisage de remplacer le matériau des tôles CRNGO (Cold-Rolled Non-Grain Oriented silicon steel) P800-100A constituant le circuit magnétique par un autre matériau (cf. DR2).

➤ *Les résistivités des matériaux constituant les circuits électriques à la température d'utilisation sont :*

- pour l'alliage d'aluminium $\rho_{alu} = 26 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$;
- pour l'alliage de cuivre $\rho_{cu} = 16 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$.

Question 4 : déterminer le rendement de la MAS avec les valeurs de puissance proposées. Déterminer la valeur des pertes à compenser par modification de cette MAS pour passer en IE2 et IE3.

Question 5 : déterminer le gain des pertes joules en watt, dans la cage d'écureuil du rotor si l'entreprise KSB substitue un alliage de cuivre à l'alliage d'aluminium.

Question 6 : déterminer le pourcentage de la section des enroulements statoriques que devra rajouter l'entreprise KSB pour obtenir un gain en pertes joules statoriques de 37 W (matériau et courants non modifiés au stator).

Question 7 : en reprenant les gains sur les pertes joules statoriques et rotoriques obtenus précédemment, déterminer les gains que doit obtenir l'entreprise KSB sur les pertes fer de sa MAS pour obtenir une MAS de classe IE2 et IE3.

Question 8 : déterminer, s'il existe dans le tableau du document ressource DR2, le matériau qui permettrait d'obtenir une MAS en classe IE2 et IE3. Proposer le matériau ayant les pertes massiques les plus élevées.

Question 9 : conclure quant aux résultats des questions précédentes et argumenter, du point de vue du développement durable sur les impacts liés à l'augmentation de la section des enroulements. Dans le cas d'impossibilité d'obtenir une MAS en classe IE2 ou/et IE3 avec les éléments fournis dans ce sujet, proposer les moyens à envisager pour atteindre cet objectif.

A-2 : étude de la valeur de l'entrefer (e)

Le contexte : l'épaisseur de l'entrefer (e) influence la génération du couple électromagnétique moteur dans la machine asynchrone (dénommé MAS dans le sujet).

Le problème à résoudre : quelle que soit la nature des fluides transportés, quels que soient les contextes d'exploitation de la pompe, est-il possible de déterminer une valeur de l'entrefer qui garantisse un couple électromagnétique et une performance énergétique de la pompe satisfaisants ? Le constructeur s'est fixé une valeur de l'entrefer (e) de 0,2 mm, cette valeur est-elle satisfaisante vis-à-vis de la performance attendue ?

Les objectifs de cette étude sont de déterminer la valeur maximale de l'entrefer permettant de garantir un rendement nominal du moteur de la pompe AMAREX KRT de 86% et de vérifier que cette valeur est compatible avec celle recherchée actuellement par le constructeur.

Données :

- documents ressources DR3.1 à DR3.3 ;
- la pompe choisie possède une MAS dont la puissance utile nominale Pu_n est 5,5 kW et possède deux paires de pôles alimentée sous 50 Hz ;
- le rendement au nominal est estimé à 86 % avec 9 % de pertes en aval de la puissance électromagnétique générée par la MAS ;
- une modélisation aux inductances de la MAS est proposée, cf. DR3.2 et DR3.3 ;
- l'équation permettant de déterminer le couple électromagnétique dans une MAS est la suivante : $Cem = \frac{1}{2} I_r^T \left\{ \frac{d}{d\theta} [\ell] \right\} I_s = I_s^T \left\{ \frac{d}{d\theta} [M_{sr}(\theta)] \right\} I_r^T$ (cf. DR3.3) ;
- une analyse chiffrée du couple électromagnétique Cem_n montre que celui-ci est lié à l'épaisseur d'entrefer (e) par un coefficient numérique de $0,0116 \text{ kg}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-2}$.

Question 10 : en analysant l'équation donnant le couple électromagnétique Cem en fonction des courants et des inductances, montrer que celui-ci dépend de la valeur de l'entrefer (e). Préciser sous quelle forme (linéaire, quadratique, autre...). Conclure.

Question 11 : déterminer le couple électromagnétique nominal Cem_n que peut fournir cette MAS et en déduire la valeur de l'entrefer (e) à respecter prenant en compte le coefficient numérique de $0,0116 \text{ kg}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-2}$.

Question 12 : comparer la valeur recherchée par le constructeur (e = 0,2 mm) avec la valeur déterminée. Préciser quels sont les éléments qui ont amené le constructeur à cette valeur.

PARTIE B - ÉTUDE DU GUIDAGE EN ROTATION DE L'ARBRE DE POMPE

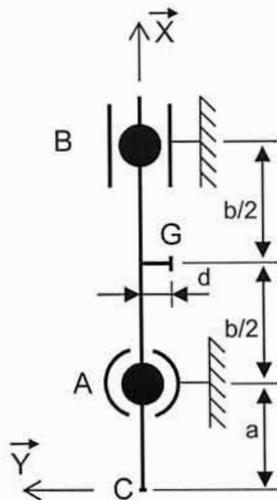
Le contexte : pour obtenir un couple électromagnétique et donc un rendement moteur satisfaisant, l'entreprise KSB a décidé que l'entrefer (e) du moteur à respecter devrait être au maximum de 0,2 mm.

Problème à résoudre : les efforts hydrauliques ainsi que les résultantes dynamiques liées à la conception du guidage en rotation de l'arbre moteur ont-ils des effets sur la valeur de l'entrefer (e), sur le comportement énergétique de l'ensemble tournant (pertes) et donc sur le rendement attendu ? Les solutions technologiques actuelles sont-elles satisfaisantes ?

L'objectif de cette étude consiste à justifier que les solutions technologiques et constructives retenues par le constructeur vis à vis de la conception du guidage en rotation de l'ensemble tournant (arbre moteur et composants), garantissent un entrefer maximal de 0,2 mm. Il s'agit de vérifier que les conditions d'étanchéité et de durée de vie prévues par le constructeur sont respectées et d'évaluer les effets de ces choix technologiques constructifs sur les pertes énergétiques induites.

B-1 : estimation des effets dynamiques et hydrauliques sur l'entrefer (e)

Données : en première approximation, l'ensemble tournant est assimilé à un modèle poutre ci-dessous.



Caractéristique du modèle :

- E, module d'Young - 203 000 MPa ;
- G, centre de gravité de l'ensemble tournant ;
- D, diamètre moyen de l'arbre - 60 mm ;
- a, distance roue palier - 250 mm ;
- b, distance inter palier - 400 mm ;
- d, distance de G à l'axe de rotation - 0,02 mm ;
- m_G , masse de l'ensemble tournant - 10 kg ;
- N, fréquence de rotation de l'arbre - 1 500 tr/min ;
- P_m , puissance motrice en régime établi - 4 kW.

L'action du poids est négligée et les actions hydrauliques F_h du fluide sur la roue sont modélisées par une résultante au point C : $\vec{F}_h = F_h \vec{Y}$ avec $F_h = 5\,000$ N.

Question 13 : déterminer la flèche maximale de la poutre due aux effets dynamiques liés à l'excentration du centre de gravité. Déterminer la flèche maximale de la poutre due aux actions hydrauliques. Conclure quant aux conséquences de cette flèche sur l'entrefer. Sur quels paramètres est-il possible d'agir pour diminuer cette flèche ?

Question 14 : analyser le guidage en rotation de l'arbre, justifier le choix des roulements jumelés près de la roue, critiquer le modèle retenu et proposer un modèle plus pertinent.

Question 15 : avec le modèle proposé à la question précédente, expliquer la démarche (équations et données nécessaires) de calcul qui permettrait de déterminer la déformée et d'en déduire la flèche.

B-2 : estimation des pertes énergétiques dans le guidage en rotation de l'arbre

Données :

- documents ressources DT1 et DR4.

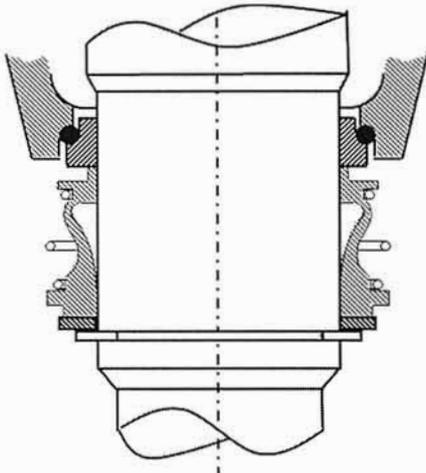
En moyenne les actions radiales dans les roulements sont :

- $F_A = 2\,000\text{ N}$ sur les deux roulements jumelés (6 211N) ;
- $F_B = 1\,200\text{ N}$ sur le roulement à rouleaux (NJ209EG15).

Question 16 : calculer la durée de vie des roulements à 99% en heure.

Question 17 : calculer les pertes énergétiques dans chaque roulement et en déduire le rendement sur le guidage en rotation de l'arbre. Conclure quant à la valeur de ces pertes et de leurs influences sur le rendement de la pompe.

B-3 : étude des pertes énergétiques dans le système d'étanchéité (voir DT1)



Caractéristiques mécaniques du joint à garniture :

- F_{res} , effort du ressort presseur ;
- f , coefficient de frottement entre surfaces frottantes – 0,08 ;
- P , pression à étanchéifier ;
- p , pression de contact entre surfaces frottantes – 0,1 MPa ;
- R_e , rayon extérieur de la surface frottante - 27 mm ;
- R_i , rayon intérieur de la surface frottante - 29 mm ;
- N , fréquence de rotation de l'arbre - 1500 tr/min ;
- P_m , puissance motrice en régime établi - 4 kW.

Question 18 : proposer plusieurs critères (4 minimum) pour dimensionner la surface de contact du joint, le ressort, et les matériaux du joint à garniture.

Question 19 : expliquer le double rôle du joint torique dans le joint à garniture. Expliquer le rôle du joint à garniture supérieur. Expliquer les différents rôles de l'huile autour de ce joint.

Question 20 : en expliquant les hypothèses réalisées, calculer des pertes énergétiques dans la garniture. En déduire le rendement du joint. Conclure quant à la valeur de ces pertes et leurs influences sur le rendement de la pompe.

Données :

- le joint à garniture supérieur tourne dans une chambre à huile de paraffine ;
- le constructeur propose en option un capteur d'humidité placé dans la partie basse du moteur ;
- afin de valider l'étanchéité dynamique globale de la pompe, le constructeur utilise les éléments d'analyse des modes de défaillance et criticité (AMDEC) suivants :

Éléments de fiabilité probabiliste des systèmes d'étanchéité dynamique

Pourcentage de composants n'atteignant pas la durée de vie nominale	
Chicanes	0 %
Joint à lèvres	5 %
Joint à garniture	10 %
Joint 4 lobes	12 %
Joint V-ring	16 %

Classification des probabilités de défaillance par l'indice de fréquence P	
P=10	proba > $3/10^3$
P=8	$6/10^4 < \text{proba} < 3/10^3$
P=4	$6/10^5 < \text{proba} < 6/10^4$
P=1	proba < $6/10^6$

Classification simplifiée de la gravité des défauts par le facteur G	
G=3	Défaut mineur
G=6	Arrêt de moins de 10 minutes
G=8	Arrêt de plus de 10 minutes sans coût important
G=10	Arrêt de plus de 10 minutes impliquant coût important

Question 21 : au travers de cette AMDEC, préciser le rôle de la chambre de récupération.

Question 22 : sans prendre en compte le capteur d'humidité, calculer l'indice de fréquence P de la pompe et en déduire l'indice de probabilité des risques (IPR) réduit ici au produit de l'indice de probabilité et de l'indice de gravité (PxG).

Question 23 : justifier l'utilisation d'un capteur d'humidité. Recalculer le nouvel indice de prévention des risques (IPR) en prenant en compte ce capteur.

PARTIE C - ÉTUDE D'UNE ÉCO-INDUSTRIALISATION

Description du contexte de production

À partir d'un lopin d'acier inoxydable, l'arbre (cf. DT2) est usiné en plusieurs phases :

- mise à longueur et usinage des trous de centre ;
- usinage ébauche, ½ finition, finition des diamètres et longueurs ;
- rectification des portées de roulement ;
- nettoyage.

L'arbre est mis en position à l'aide d'un outillage spécifique (entraîneur frontal, voir DR5.1 à DR5.2), du côté du nez de broche et à l'aide d'une contrepointe tournante à l'autre extrémité. Le maintien en position est assuré par la poussée axiale de la contrepointe à l'extrémité de l'arbre. Le déplacement du fourreau recevant la contrepointe est réalisé par un vérin pneumatique piloté.

C-1 : industrialisation de l'arbre de la pompe (phase d'ébauche)

Problème à résoudre : en ébauche, l'utilisation d'un entraîneur frontal qui contraint l'environnement de production et qui limite les possibilités offertes par la machine, permet-il d'atteindre la qualité attendue, ne pénalise-t-il pas la productivité ?

Objectif de l'étude : dans cet environnement de production contraint par les capacités de la machine et des outillages, déterminer les conditions d'usinage optimales, en ébauche, qui permettent à la fois de respecter les spécifications portées sur le dessin de définition (qualité) et de garantir un usinage dans de bonnes conditions (sécurité, productivité).

Données :

- dessin de définition de l'arbre (DT2) ;
- documentation technique sur le tour à commande numérique (DR5.1) ;
- description de l'outillage spécifique ROHM® (DR5.1 à DR5.2) ;
- formulaire pour la détermination des efforts de coupe en tournage (DR6) ;
- nuances de plaquettes recommandées en tournage d'ébauche (DR7) ;
- désignation des plaquettes outils et conditions de coupe recommandées en ébauche (DR7).

Données fournies pour l'usinage en ébauche de l'arbre de pompe :

- acier inoxydable «austéno-ferritique», X5CrNiMo 18-10, norme EN 10027 ou Z6CND 17-11 norme NFA 35 573 ;
- résistance = f(dureté HB de la pièce) $\approx 100 \text{ daN/mm}^2$;
- effort spécifique de coupe, $K_s = 200 \text{ daN/mm}^2$;
- coefficient de frottement copeau-plaquette outil $\varphi \approx 50^\circ$;
- angle de coupe $\gamma = -6^\circ$ en ébauche.

À l'aide des documents ressources et données techniques fournies, à partir de l'étude du contexte de production :

Question 24 : justifier le tolérancement géométrique indiqué sur la portée cylindrique de l'arbre qui recevra le rotor. Préciser la gamme et les moyens de contrôle de ce tolérancement.

Question 25 : en analysant les spécifications indiquées sur le dessin de définition de l'arbre moteur, réaliser l'inventaire des problèmes soulevés par l'industrialisation de l'arbre en ébauche. Indiquer les conditions de mise en œuvre du porte-pièce permettant de réaliser l'usinage dans de bonnes conditions.

Question 26 : déterminer, pour les opérations d'ébauche, les conditions de coupe compatibles avec l'outillage spécifique retenu, avec les caractéristiques et spécifications de l'arbre de la pompe. Préciser les hypothèses, les données mobilisées dans la démarche de résolution de ce problème et ayant abouti à une prise de décision.

Question 27 : à l'aide du document ressource DR8, vérifier l'absence de risque de flambage de l'arbre pendant la phase d'ébauche.

C-2 : augmentation de la productivité par la suppression d'une phase de production

Problème à résoudre : les spécifications géométriques et dimensionnelles imposent, en l'état actuel, de réaliser une phase de rectification, opération longue, coûteuse. Peut-on envisager d'augmenter la productivité en supprimant cette phase de rectification par l'optimisation des conditions de coupe en finition ?

Objectif de l'étude : déterminer si l'utilisation d'une technologie de plaquette outil WIPER® en tournage de finition permet de supprimer la phase de rectification, tout en garantissant le respect des spécifications attendues.

Données :

- extrait du catalogue décrivant la technologie Wiper (DR9) ;
- abaque associant l'avance par tour (f) à la rugosité Ra et Rt (DR10) ;
- formulaire pour la détermination des flèches dans le cas de différents systèmes de poutres (DR10).

Question 28 : justifier l'intérêt de supprimer la phase de rectification.

Question 29 : par l'utilisation d'une technologie de plaquette Wiper®, déterminer les conditions de coupe en finition. Vérifier que les spécifications fonctionnelles associées à la portée du double roulement peuvent être obtenues. Lors de l'usinage, proposer une solution technologique qui garantirait le respect des spécifications attendues.

C-3 : augmentation de la productivité par l'introduction d'un moyen de production plus performant

Contexte : l'ingénieur de production envisage d'investir dans un moyen de production plus performant (caractéristiques machines, capacité, impact environnemental, ...).

Proposition technique et financière, configuration envisagée : investissement dans un tour TCN de plus grosse capacité, équipé d'une broche permettant un passage de barre, d'un axe C, équipé d'une contre pointe programmable, d'une lubrification haute pression, d'un convoyeur à copeau, avec filtration de la lubrification, extension de garantie, installation et mise en service durant les 2 jours de formation.

Code article	Désignation	Prix Unitaire
Machine de base		
	Courses X 215 mm, Z 905 mm	
	Nez de broche A2-6, mandrin diam. 210 mm, sans contre pointe	
	VDI-40-1 Tourelle VDI 40 - 10 positions	
	Ports USB, Capacité mémoire 1 MB	
	R-TAP Taraudage rigide, l'ensemble au prix de	41 995 €
	Broche 5000 tr/min, 22 kW, mandrin diamètre 165 mm	1 795 €
	Axe C et outils tournants	16 995 €
	Contre pointe entièrement programmable CM4	4 295 €
	Arrosage haute pression (jusqu'à 69 bar) ; inclut un filtre auxiliaire de liquide d'arrosage	8 595 €
	Système de filtration du lubrifiant (filtre 25 microns)	1 395 €
	Ravitailleur de barres courtes ou longues	9 995 €
	Extension de garantie pièces d'un an	4 295 €
	Transport	2 500 €
	Mise à niveau, branchements et tests de fonctionnement	1 000 €
	Formation à la conduite de la machine (forfait 2 jours)	2 600 €

Problème à résoudre : cet investissement permettra-t-il de baisser les coûts de revient de l'arbre (augmentation de la cadence de production et usinage de plusieurs familles d'arbres ou roues) et de prolonger la démarche environnemental de l'entreprise durant la phase de production du cycle de vie de ses produits ? L'ingénieur de production de l'entreprise peut-il avoir une idée précise de la rentabilité de cet investissement ?

Objectif de l'étude : dans le cas du renouvellement du moyen de production actuel par ce Tour à Commande Numérique jugé plus performant, déterminer la quantité d'arbres à produire pour atteindre un seuil de rentabilité raisonnable (retour sur investissement de moins ou égal à 2 ans).

Données :

- prix de revient à considérer pour l'étude - **7 euros / arbre usiné** ;
- durée d'utilisation de la nouvelle unité de production envisagée - **5 ans** ;
- au terme de ces 5 ans, la valeur résiduelle ou valeur à la fin de la durée d'amortissement du moyen est **négligée** ;
- charges d'exploitations supplémentaires (matières, main d'œuvre, charges) dues à l'investissement réalisé - **30 000 euros / an / 5 ans** ;
- taux d'imposition des bénéfices - **33,33 %** ;
- mode d'amortissement **linéaire** retenu sur les 5 années de durée de vie estimée.

Étapes de calcul :

Pour une année :

- flux nets de trésorerie = résultat après impôt + dotation aux amortissements
- résultats après impôt = résultats avant impôt – impôts sur les bénéfices
- résultats avant impôt = Chiffre d'affaire – charge d'exploitation – dotation aux amortissements

Question 30 : argumenter sur le choix de cet investissement. Déterminer la quantité annuelle d'arbres à produire pour atteindre le seuil de rentabilité envisagé.

PARTIE D - OPTIMISATION DE LA RELATION PRODUIT (ROUE D) MATÉRIAU (FONTE) PROCÉDÉ (MOULAGE)

Contexte : la conception et la réalisation des roues hydrauliques (cf. DT3) participent à l'obtention du point de fonctionnement optimal des pompes AMAREX KRT. Lorsque les pompes sont utilisées de façon continue, en présence de fluides fortement chargés, les roues ayant atteint leur durée de vie ou présentant des anomalies ou un niveau d'usure avancé doivent être remplacées dans les plus brefs délais. Dans le processus d'obtention des roues par moulage, l'opération de modelage reste une opération longue, peu productive. Les conditions de moulage et de traitement thermique appliquées aux roues hydrauliques ont une incidence directe sur la santé de la pièce et sa durée de vie.

D-1 : optimisation de la relation PRODUIT (ROUE D) – PROCÉDÉ (MODELAGE par FRITTAGE LASER de SABLE CRONING®)

Problème à résoudre : l'entreprise KSB propose de substituer le modelage conventionnel par un procédé de fabrication du moule par « frittage au laser de sables Croning® » (Direct Croning®). L'introduction de cette innovation au sein de l'entreprise comporte-t-elle des avantages, lesquels ?

Objectif de l'étude : en tant qu'aide à la décision, rédiger un argumentaire (avantages, inconvénients, impacts économiques, environnementaux, qualitatifs) qui compare le procédé de modelage actuel et le procédé envisagé.

Données :

- le dessin de la roue, cf. DT3 ;
- le matériau de la roue est une fonte ;
- le diamètre de la roue est de 220 mm pour une hauteur de 140 mm ;
- la masse de la pièce, brute de moulage, est de 11 kg ;
- la description du procédé de fabrication de moules et noyaux par « frittage au laser de sable Croning® », Document Ressource DR11 ;
- les paramètres de simulation, DR12 ;
- les résultats des simulations effectuées simultanément avec un moule réalisé en sable à vert et avec une carapace obtenue par laser Croning®
 - résultat comparé sur la compacité de la pièce, DR12 ;
 - résultat comparé sur le temps de solidification, DR12.

Pour cette partie D, les documents ressources fournis seront utilisés comme documents réponses, à joindre à la copie, pour répondre aux différentes questions.

Question 31 : par analogie avec un procédé de prototypage, par comparaison avec le procédé conventionnel de modelage et de moulage en sable, dégager les avantages, les inconvénients, les impacts économiques, environnementaux et qualitatifs de cette technique de modelage par frittage laser de sables Croning®.

Question 32 : proposer une conception du moule définissant le volume de la carapace englobant la roue et représentant le moule et les systèmes de remplissage et d'alimentation de la roue. Justifier la conception.

Question 33 : déterminer le temps unitaire de réalisation du moule par frittage laser de sables Croning® de la roue. Calculer la cadence horaire de moules pouvant être réalisée.

Question 34 : expliquer la raison pour laquelle les capacités thermiques du sable à vert et celle obtenue par laser de sables Croning® évoluent brutalement vers 100°C. À la température de 600°C, pour le procédé de moulage par frittage laser de sables Croning®, expliquer l'évolution brutale de la valeur de la capacité thermique du sable Croning®.

Question 35 : à partir des résultats des simulations réalisées, expliquer l'influence des paramètres de simulation sur les écarts constatés au niveau des temps, durant et en fin de solidification entre ces deux procédés, localiser les zones de défauts potentiels, indiquer le type de défauts pouvant être rencontrés, les techniques de prévention et de détection à mettre en œuvre.

Question 36 : rédiger, en quelques lignes, un argumentaire sur l'opportunité d'introduire cette nouvelle technique de réalisation de moules. Conclure.

D-2 : optimisation de la relation PRODUIT (ROUE D) – MATÉRIAU (FONTE)

Contexte : La société KSB a observé pour les roues hydrauliques des niveaux d'usure importants, usure due à des fluides fortement chargés en particules abrasives (relevage de boues) et/ou à un phénomène de cavitation. L'usure (abrasive et écaillage) diminue les performances de la pompe entraînant ainsi une perte significative en termes d'efficacité énergétique. Pour garantir la longévité de la roue, l'entreprise KSB envisage d'utiliser une fonte alliée EN-JN3029 à 20% de Chrome-Molybdène et qui dispose d'une excellente résistance à l'abrasion. Par ailleurs, le groupe KSB souhaiterait supprimer l'opération de traitements thermiques, opération énergivore, longue et coûteuse.

Problème à résoudre : pour garantir la longévité de la roue, la dureté à obtenir pourra-t-elle être proche de 850 HV (dureté Vickers) ? Dans cette perspective, la solution, qui consisterait à effectuer un décochage du moule, à une certaine température (qui reste à déterminer) du moule, pour ensuite imposer un refroidissement, permettrait-elle d'atteindre cette dureté exigée ?

Objectif de l'étude : vérifier que le matériau envisagé est capable de garantir le niveau de dureté spécifié et que les cinétiques de refroidissement et de transformation de la fonte soient compatibles avec l'obtention de la dureté et la composition attendues.

Hypothèses et données :

- la géométrie de la roue n'est pas remise en cause ;
- fiche Matière - Fonte EN-JN1039, Document ressource DR13 ;
- diagramme en Transformation à Refroidissement Continu (TRC) – Fonte alliée Cr-Mo, Document Ressource DR14 ;
- détermination du pourcentage d'austénite résiduelle à température ambiante, Document Ressource DR14.

Question 37 : justifier l'intérêt de l'emploi du chrome dans cette fonte alliée.

Question 38 : déterminer la vitesse de refroidissement compatible pour une dureté 850 HV. Déterminer le pourcentage d'austénite transformée en martensite pour cette vitesse critique de refroidissement. Indiquer le traitement thermique après trempe permettant de réduire l'austénite résiduelle.

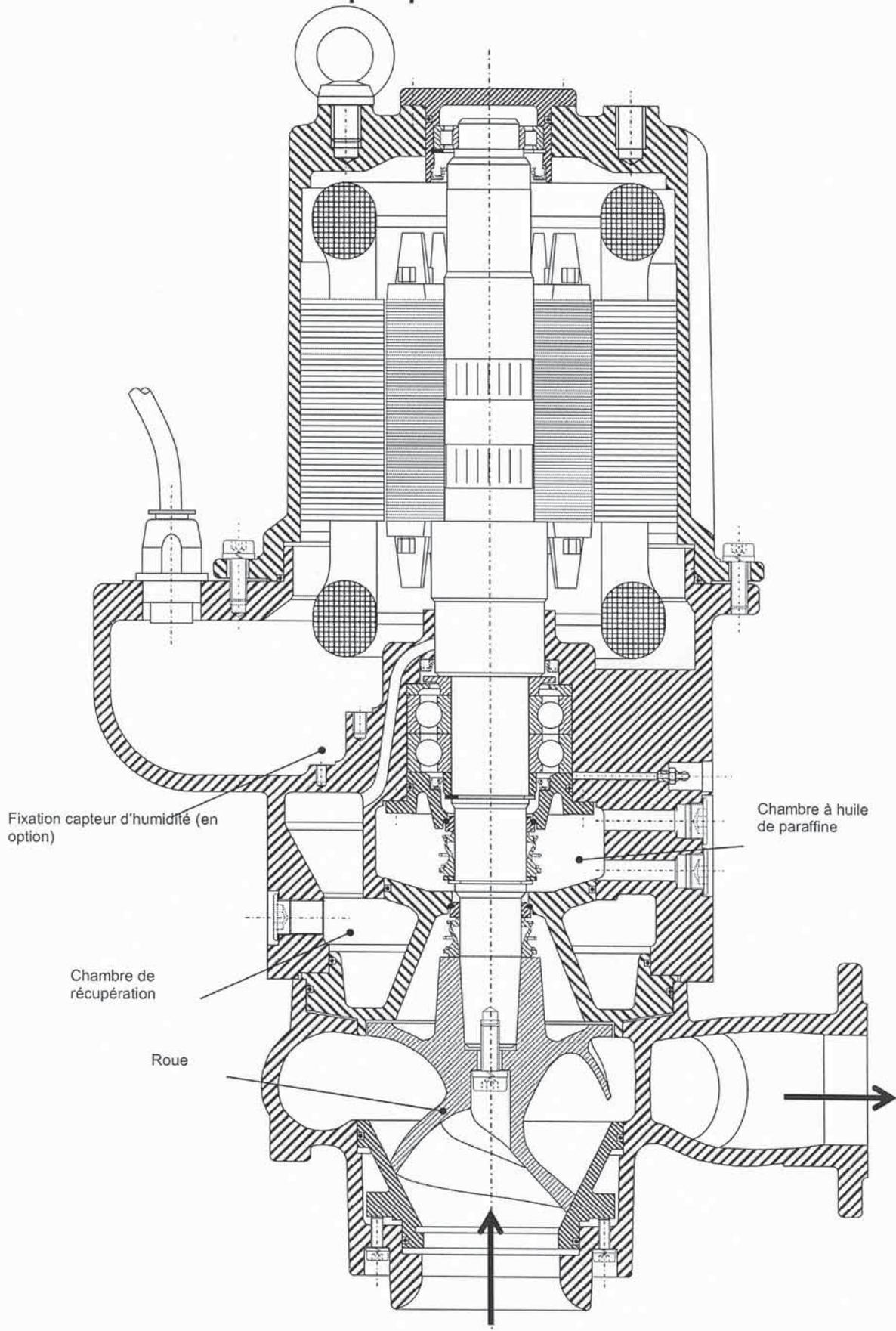
Question 39 : proposer un traitement de surface qui permettrait de générer des contraintes résiduelles de compression pour obtenir une dureté superficielle équivalente. Justifier votre proposition en termes de respect des spécifications attendues et en termes d'impact environnemental.

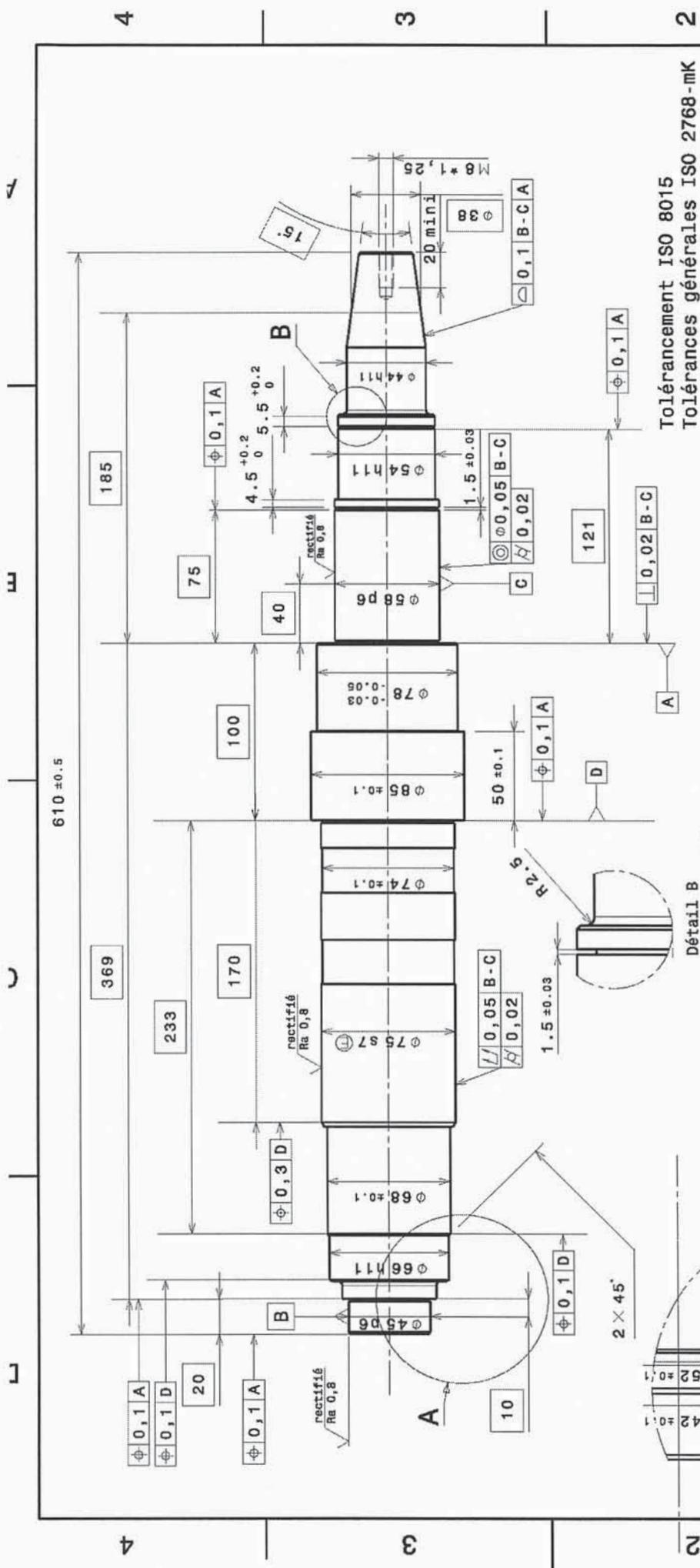
PARTIE E - CONCLUSION

Question 40 : à partir des éléments de contexte présentés au travers des quatre études proposées, par comparaison et en reprenant les critères indiqués sur les figures 1 et 2 du sujet, et à partir de vos propres conclusions, évaluer les bénéfices (impacts environnementaux, bilan carbone, analyse de cycle de vie) de ces quatre études. Rédiger, en quelques lignes, une conclusion sur la capacité de l'entreprise à répondre aux enjeux et défis sociétaux et environnementaux en mettant à la disposition de ses clients et fournisseurs cette pompe AMAREX KRT. Identifier pour les différentes phases de vie du produit, d'autres possibilités d'amélioration.

DOCUMENTS TECHNIQUES ET DOCUMENTS RESSOURCES

DT1 – Plan d'ensemble de la pompe AMAREX





Tolérancement ISO 8015
 Tolérances générales ISO 2768-mK
 Tolérance cône ISO 3040

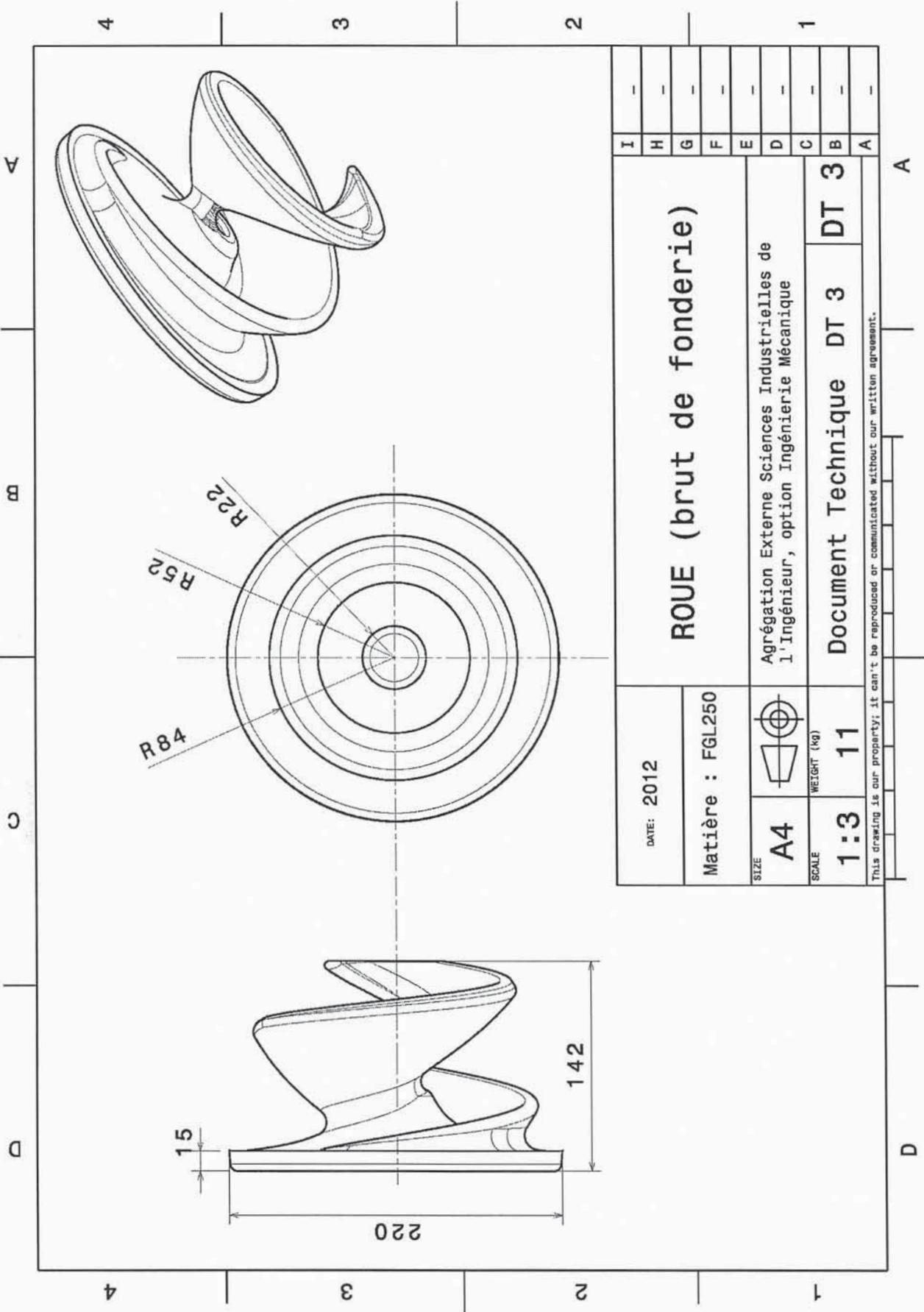
1	Arbre Pompe	Acier inoxydable X5CrNiMo 18-10	Observation
Rep	Référence	Matériau	

DATE:	2012	Document Technique DT2	
-------	------	------------------------	--

FORMAT	A4	ARBRE DE POMPE	
--------	----	----------------	--

ECHELLE	1:3	Agrégation externe Sciences Industrielles de l'Ingénieur, option Ingénierie Mécanique	
---------	-----	---	--





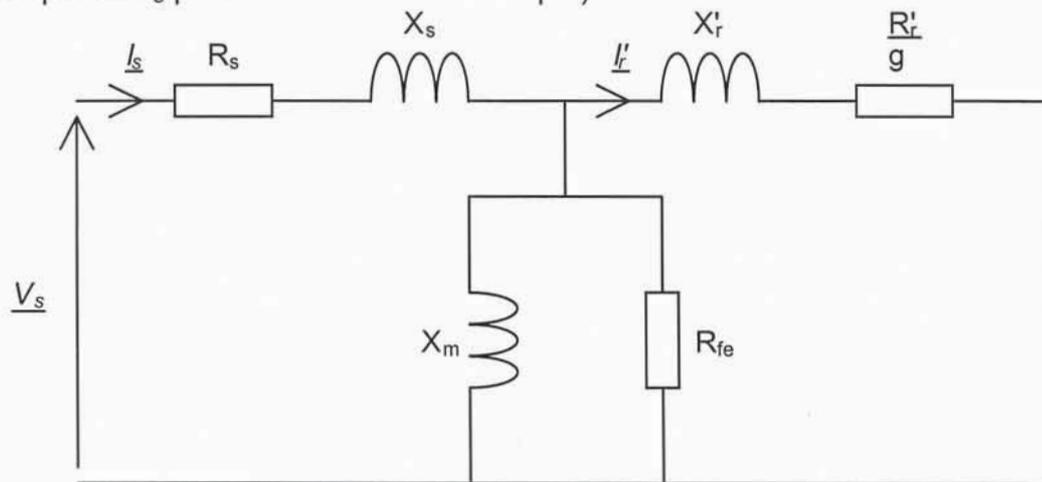
DATE: 2012		ROUE (brut de fonderie)		I	-
Matière : FGL250				H	-
SIZE	A4	Agréation Externe Sciences Industrielles de l'Ingénieur, option Ingénierie Mécanique		G	-
SCALE	1:3	Document Technique DT 3		F	-
WEIGHT (kg)	11	DT 3		E	-
				D	-
				C	-
				B	-
				A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

DR1 – Document Ressource 1 : extrait de la norme IEC de 2007 (IEC 60034-2-1 : 2007) - Circuit équivalent conventionnel par phase en modèle T d'une MAS.

Ce circuit comporte :

- une résistance équivalente R_{fe} pour les pertes dans le fer parallèle à la réactance de champ principale X_m (magnétisant) ;
- des paramètres rotoriques ramenés du côté stator ; ceci est indiqué par la présence d'une apostrophe ' et de l'indice r sur le nom des paramètres (X'_r pour la réactance rotorique et R'_r pour la résistance rotorique) ;
- des paramètres statoriques ; ceci est indiqué par l'indice s (X_s pour la réactance statorique et R_s pour la résistance statorique).



Circuit équivalent par phase modèle T d'une MAS

Notations :

- g glissement ($g = (N_s - N) / N_s$ avec N_s la vitesse de rotation au synchronisme = 1 500tr/min dans le cas de cette étude et N la vitesse de rotation de l'arbre) ;
- R_{fe} , résistance équivalente des pertes dans le fer ;
- R'_r , résistance ramenée rotorique ;
- R_s , résistance statorique ;
- X_m , réactance magnétisante ;
- X'_r , réactance de fuite ramenée rotorique ;
- X_s , réactance de fuite statorique.

Les pertes dans la MAS se décomposent suivant la norme :

- P_c , pertes constantes ; somme des pertes dans le fer, par frottement et par ventilation ;
- P_{fe} , pertes dans le fer, dans les parties actives et pertes supplémentaires à vide dans les autres parties métalliques ;
- P_{fw} , pertes par frottement et par ventilation ;
- P_L , pertes en charge, sommes des pertes dans les enroulements du stator et du rotor ;
- P_{RS} , pertes dans les enroulements du stator ;
- P_{LL} , pertes parasites en charge ;
- P_{Lr} , pertes résiduelles ;
- P_{Rr} : pertes dans les enroulements du rotor.

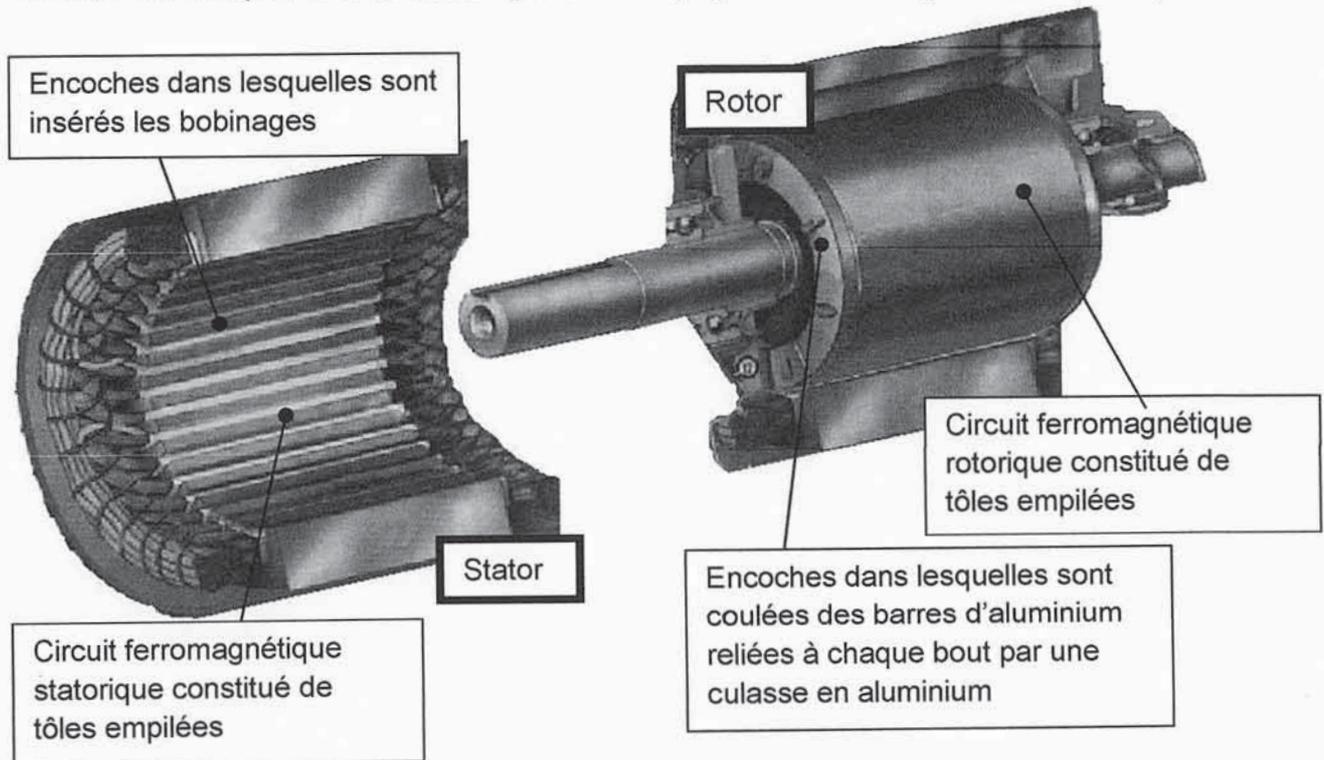
DR2 – Document Ressource 2 : extrait de catalogue de matériaux ferromagnétiques

Typical Magnetic Properties

Grade		Thickness (mm)	Core Loss (W/kg)				Magnetic Induction (T)								
Reference	ArcelorMittal Inox Brasil		1.0 T		1.5 T		B2500	B5000	B10000						
			50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz									
P800-100A	E233	1.00	3.08	4.14	6.59	8.93	1.67	1.75	1.86						
P470-65A	E233	0.64	1.73	2.26	3.74	4.92	1.66	1.76	1.86						
M600-65A	E230		1.83	2.35	3.97	5.16	1.62	1.74	1.82						
M470-65A	E185		1.76	2.27	3.84	5.01									
M450-65A	E170		1.69	2.20	3.70	4.85									
M400-65A	E157		1.61	2.09	3.57	4.70									
M530-54A	E230		0.54	1.56	2.01	3.37				4.36	1.62	1.72	1.82		
P400-50A	E233	0.50	1.41	1.81	3.08	3.97				1.66	1.75	1.85			
M530-50A	E230		1.51	1.92	3.29	4.21	1.62	1.72	1.82						
M470-50A	E185		1.46	1.88	3.19	4.10									
M400-50A	E170		1.42	1.83	3.10	4.00									
M370-50A	E157		1.38	1.77	3.02	3.90									
M350-50A	E145		1.33	1.72	2.94	3.82									
M330-50A	E137		1.24	1.60	2.77	3.58				1.60	1.70	1.82			
M310-50A	E125		1.11	1.42	2.54	3.28									
M290-50A	E115		1.08	1.38	2.48	3.21									
M270-50A	E110		1.04	1.34	2.42	3.13									
M250-50A	E105		1.01	1.30	2.40	3.11									
M230-50A	E100		0.93	1.20	2.26	2.93							1.59	1.69	1.81
M330-35A	E170		0.35	1.23	1.53	2.72				3.41	1.60	1.70	1.80		
M300-35A	E157			1.16	1.46	2.59				3.26					
M290-35A	E145	1.10		1.39	2.49	3.15									
M270-35A	E137	1.04		1.31	2.37	2.99	1.59	1.70	1.79						
M250-35A	E125	0.98		1.23	2.25	2.83									
M235-35A	E115	0.93		1.17	2.14	2.69									
M210-35A	E110	0.84		1.08	2.05	2.60									
M195-35A	E100	0.82		1.04	1.93	2.46				1.62				1.72	1.79

DR3.1 – Document Ressource 3.1 : notions de construction et de modélisation aux inductances d'une machine asynchrone (MAS)

La MAS est composée d'un stator (partie statique) et d'un rotor (partie tournante).



Le stator et le rotor sont concentriques. Ils sont constitués de tôles feuilletées empilées.

Dans les encoches du stator sont insérés les trois enroulements de n_s spires chacun des trois phases d'alimentation décalés deux à deux de 120° repérés S1, S2 et S3 (cf figure ci-dessous).

Dans les encoches du rotor sont coulées des barres d'aluminium formant un circuit fermé nommé usuellement cage d'écureuil. Le comportement de cette cage sera considéré comme identique à un circuit de trois enroulements bobinés de n_r spires chacun décalés deux à deux de 120° repérés R1, R2 et R3 (Cf. figure ci-après).

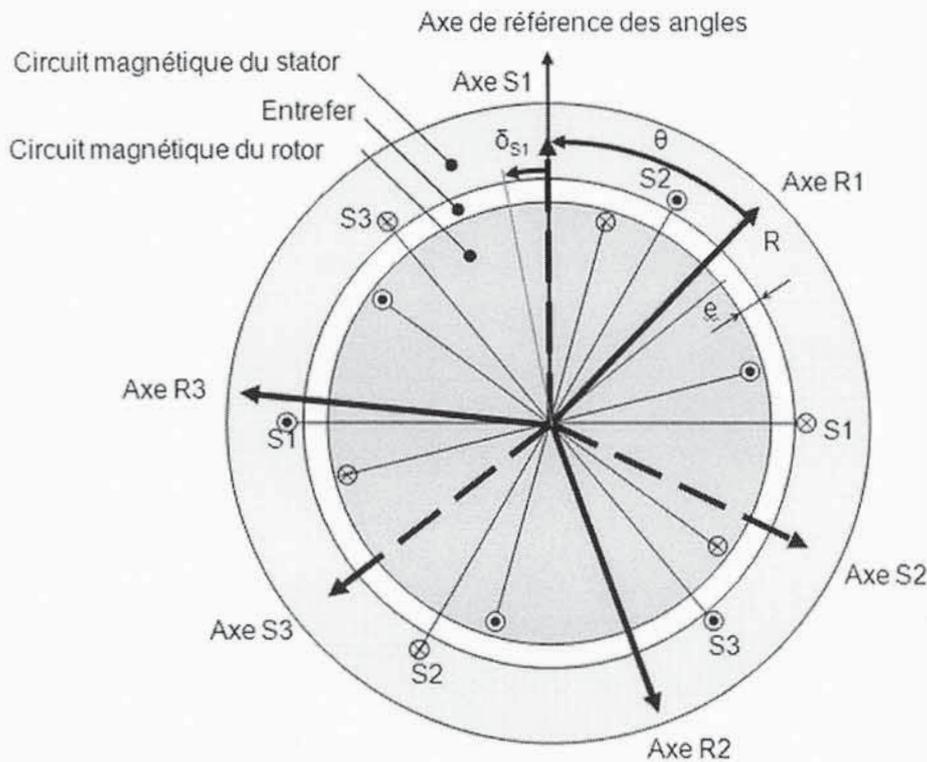
L'angle entre le rotor et le stator est noté θ (cf. figure ci-après).

Hypothèses :

- on considère que la MAS est à pôles lisses sans effet de denture (l'entrefer e est d'épaisseur constante) ;
- l'épaisseur de l'entrefer e est considérée comme négligeable devant les rayons du rotor et du cylindre intérieur du stator ;
- la perméabilité magnétique de l'air dans l'entrefer e est égale à celle du vide μ_0 ;
- on considère un comportement linéaire des matériaux ferromagnétiques. La perméabilité magnétique de ces matériaux μ_{fer} sera considérée comme infinie.

DR3.2 – Document Ressource 3.2 : modélisation aux inductances d’une machine asynchrone (MAS). Notations

Les enroulements seront représentés massés. La machine asynchrone (MAS) peut être représentée en coupe comme suit :



Notations :

- L , Longueur utile du rotor (m) ;
- k_u , coefficient de bobinage stator (k_s) et rotor (k_r) ;
- n_u , nombre de spires d'un enroulement stator (n_s) et rotor (n_r) ;
- R , rayon d'entrefer moyen de la MAS (m) ;
- $[\ell_r]$, sous matrice des inductances rotoriques ;
- $[\ell_s]$, sous matrice des inductances statoriques.
- $[M_{sr}(\theta)]$, sous matrice des mutuelles inductances statoriques/rotoriques ;
- L_r , inductance propre d'un enroulement rotorique ;
- L_s , inductance propre d'un enroulement statorique ;
- M_r , mutuelle inductance entre deux enroulements rotoriques ;
- M_s , mutuelle inductance entre deux enroulements statoriques ;
- M_{sr} , valeur constante de la mutuelle inductance entre un enroulement statorique et un enroulement rotorique.

DR3.3 – Document Ressource 3.3 : modélisation aux inductances d'une machine asynchrone (MAS). Équations

Définition des variables :

$\underline{\Phi}(t) = [\Phi_{s1}(t) \ \Phi_{s2}(t) \ \Phi_{s3}(t) \ \Phi_{r1}(t) \ \Phi_{r2}(t) \ \Phi_{r3}(t)]^T$ de composantes les trois flux statoriques et les trois flux rotoriques ;

$\underline{I}(t) = [\underline{I}_s(t) \ \underline{I}_r(t)]^T$ de composantes le vecteur des trois courants statoriques

$\underline{I}_s(t) = [i_{s1}(t) \ i_{s2}(t) \ i_{s3}(t)]^T$ et le vecteur des trois courants rotoriques $\underline{I}_r(t) = [i_{r1}(t) \ i_{r2}(t) \ i_{r3}(t)]^T$ (courants sinusoïdaux d'amplitude et de fréquence fixe).

Une modélisation aux inductances de la MAS donne la relation flux-courant $\underline{\Phi}(t) = [\ell] \underline{I}(t)$ suivante :

$$\underline{\Phi}(t) = [\ell] \underline{I}(t) = \begin{bmatrix} \Phi_{s1}(t) \\ \Phi_{s2}(t) \\ \Phi_{s3}(t) \\ \Phi_{r1}(t) \\ \Phi_{r2}(t) \\ \Phi_{r3}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\ell_s] & [M_{sr}(\theta)] \\ [M_{sr}(\theta)]^T & [\ell_s] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s1}(t) \\ i_{s2}(t) \\ i_{s3}(t) \\ i_{r1}(t) \\ i_{r2}(t) \\ i_{r3}(t) \end{bmatrix}$$

La matrice d'inductances $[\ell]$ se décompose en sous-matrice comme suit :

$$[\ell_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [\ell_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}(\theta)] = \begin{bmatrix} M_{sr} \cos(p\theta) & M_{sr} \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(p\theta) & M_{sr} \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ M_{sr} \cos(p\theta + \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(p\theta - \frac{2\pi}{3}) & M_{sr} \cos(p\theta) \end{bmatrix}$$

Les coefficients des sous-matrices de $[\ell]$ dépendent des paramètres comme suit :

$$L_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{LR}{e} k_s^2 n_s^2 ; L_r = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{LR}{e} k_r^2 n_r^2 ; M_{sr} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{L.R}{e} k_s n_s k_r n_r$$

$$M_s = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{LR}{e} k_s^2 n_s^2 \cos(\pm \frac{2\pi}{3}) = -\frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{LR}{e} k_s^2 n_s^2 = -\frac{L_s}{2}$$

$$M_r = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{LR}{e} k_r^2 n_r^2 \cos(\pm \frac{2\pi}{3}) = -\frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{LR}{e} k_r^2 n_r^2 = -\frac{L_r}{2}$$

p = nombre de paires de pôles de la MAS (2 dans le cas de l'étude).

Le couple électromagnétique Cem résultant de cette modélisation s'exprime :

$$Cem = \frac{1}{2} \underline{I}^T \left\{ \frac{d}{d\theta} [\ell] \right\} \underline{I} = \underline{I}_s^T \left\{ \frac{d}{d\theta} [M_{sr}(\theta)] \right\} \underline{I}_r$$

DR4 – Document Ressource 4 : estimation des pertes énergétiques dans les guidages en rotation

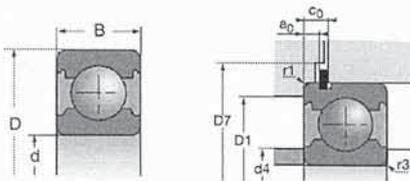
Un moyen d'estimer l'énergie perdue par le guidage en rotation est d'utiliser un coefficient de frottement équivalent μ pour le diamètre moyen de chaque roulement.

Les roulements en A (6305)

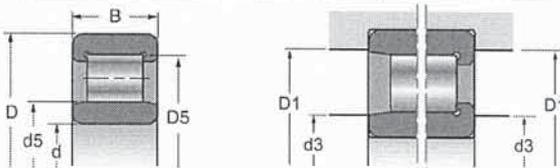
Le roulement en B (NJ 209 EG15)

Coefficient de frottement	μ
Roulement à billes à contact radial	0,0015
Roulement à rotule sur billes	0,0010
Roulement à billes à contact oblique	
• à une rangée de billes	0,0020
• à deux rangées de billes	0,0024
Butée à billes	0,0013
Roulement à rouleaux cylindriques	0,0050
Roulement à rouleaux coniques	0,0018
Roulement à rotule sur rouleaux	0,0018

Fiabilité 100 %	a_1
90	1
95	0,64
96	0,55
97	0,47
98	0,37
99	0,25
99,2	0,22
99,4	0,19
99,6	0,16
99,8	0,12



d	Références		D	B	$10^6 N$		t_r/min^*		a_0 min	a_0 max
mm			mm	mm	$10^6 N$	$10^6 N$	t_r/min^*	t_r/min^*	mm	mm
58	6011 N	6011 NR	90	18	28,5	21,3	6800	8500	2,67	2,87
	6211 N	6211 NR	100	21	43,5	29	6200	7400	3,07	3,28
	6311 N	6311 NR	120	29	71	44,5	5200	6500	3,86	4,06
	6411 N	6411 NR	140	33	100	62	4800	5800	4,65	4,9



d	Références		D	B	D5 (Ø sur rouleaux)	d5 (Ø sous rouleaux)	$10^6 N$	
mm			mm	mm	mm	mm	$10^6 N$	$10^6 N$
40	NUP 308 EG15		90	23	—	52	81,5	78
	NJ 2308 EG15		90	33	—	52	112	120
	NU 2308 EG15		90	33	—	52	112	120
	NJ 408		110	27	—	58	93	86,5
	NU 408		110	27	—	58	93	86,5
45	N 209 EG15		85	19	76,5	—	61	63
	NJ209E		85	19	—	54,5	60,4	62,8
	NJ 209 EG15		85	19	—	54,5	61	63
	NU209E		85	19	—	54,5	60,4	62,8
	NJ 209 EG15		85	19	—	54,5	61	63
	NUP209E		85	19	—	54,5	60,4	62,8
	NUP 209 EG15		85	19	—	54,5	61	63
	NJ 2209 EG15		85	23	—	54,5	73,5	81,5

DR5.1 – Document Ressource 5.1

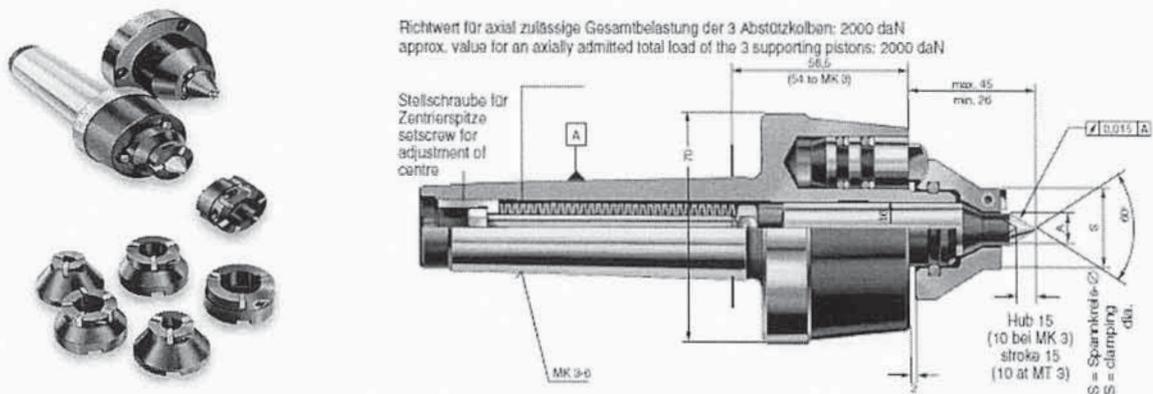
Moyens de production mise en œuvre pour l'usinage de l'arbre

TOUR à Commande Numérique :

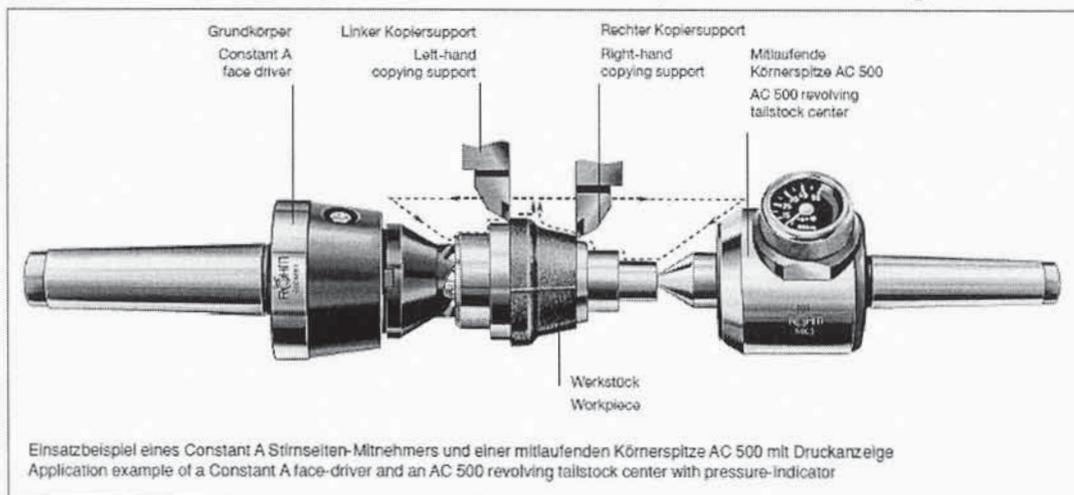
- moteur entraînant la broche de puissance 10 kW et de rendement 80 % ;
- contre pointe de poussée de 2 à 6 bars, réglable.

Entraîneur frontal ROHM©, extrait du catalogue :

- coté nez de broche, pointe fixe équipée d'entraîneurs frontaux ;



- Coté poupée mobile pointe tournante montée dans un fourreau conique monté sur un vérin pneumatique délivrant une poussée axiale réglable.



La poussée axiale nécessaire au maintien de la pièce lors de l'usinage est déterminée à partir d'un abaque qui prend en compte le rapport des diamètres usinés et entraînés frontalement, la résistance de la pièce, la section du copeau.

Exemple A : tournage en direction de la poupée fixe, section du copeau = $6 \times 0,4 = 2,4 \text{ mm}^2$, résistance de la pièce à usiner 83 daN/mm^2 , rapport de serrage (\varnothing usiné / \varnothing diamètre frontal entraîné = $60 / 50 = 1,2$)

→ **Poussée axiale selon le diagramme = 450 daN**

DR5.2 – Document Ressource 5.2

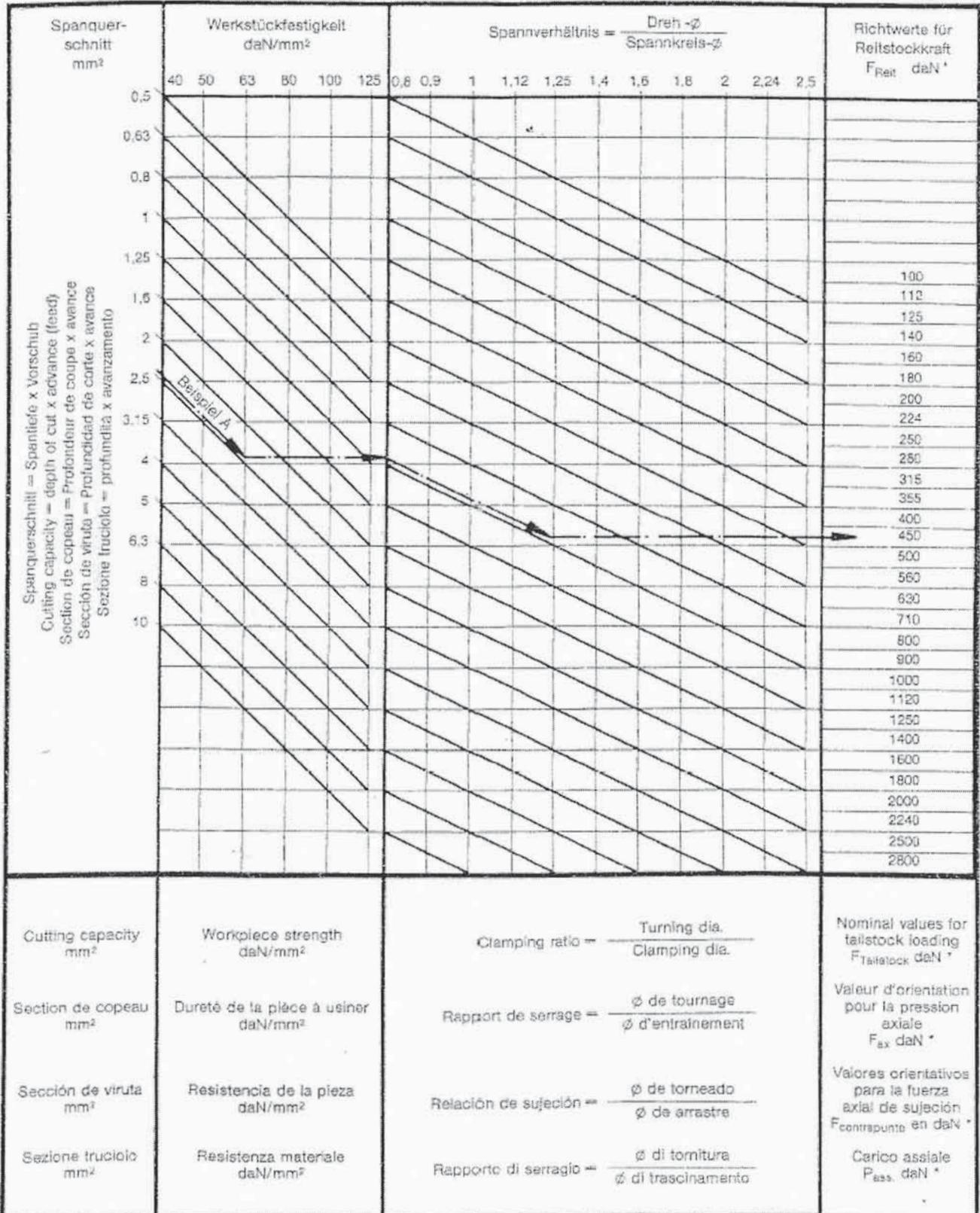
RÖHM Spannkraft-Schaubild für Constant Stirnseiten-Mitnehmer

Clamping Power Diagram for Constant Face Drivers

Diagramme pour le choix des pressions axiales pour entraîneurs frontaux Constant

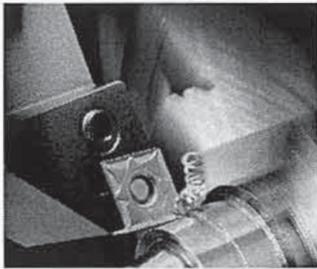
Diagrama de selección de la fuerza de sujeción para arrastradores frontales Constant

Diagramma per la determinazione del carico assiale per trascinatori frontali Constant



DR6 – Document Ressource 6

Efforts de coupe en tournage



L'enlèvement de matière à l'outil coupant provoque, sur l'outil, un effort F , qui se décompose en (voir figure ci-dessous) :

- un effort principal de coupe F_c ;
- un effort d'avance F_f ;
- un effort de refoulement F_p .

Calcul de l'effort principal de coupe : $F_c = K_s a f_n$

avec

- a , profondeur de passe en mm ;
- f_n , avance en mm/tr ;
- K_s , pression spécifique de coupe (en N/mm²).

En considérant que le copeau frotte sur la face de coupe, en tenant compte des efforts d'avance et de refoulement, on trouve les relations suivantes :

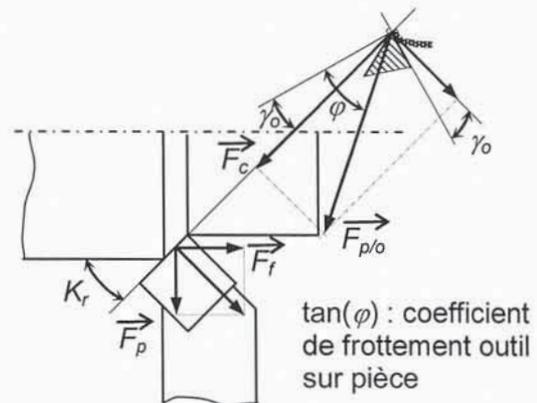
- Effort d'avance :
 $F_f = F_c \tan(\varphi - \gamma_o) \sin(K_r)$

Avec ici, $\gamma_o > 0$,

Avec l'angle φ à associer au frottement du copeau sur la plaquette

- Effort de refoulement
(pour un K_r de 95°)

$$F_p \approx 0,3F_c$$



$\tan(\varphi)$: coefficient de frottement outil sur pièce

Puissance absorbée par la coupe, cas du tournage :

- $P_c = F_c V_c + F_f V_f$ (Le terme $F_f V_f$ étant souvent négligeable) ;

- $P_c = \frac{K_s a f V_c}{60 \cdot 10^3}$;

- avec P_c en kW, K_s en N/mm², $a f$ en mm², V_c = Vitesse de coupe en m/min ;
- angle de direction d'arête $K_r = 95^\circ$, plaquette de type C.

DR7 – Document Ressource 7

Nuances de plaquette pour les aciers inoxydables

GC1105 – M15 (M05-M20)

- Nuance carbure à revêtement PVD TiAlN fin avec excellente adhérence sur le substrat dur à grain fin à 6 % de Co doté d'une résistance à chaud élevée et d'une bonne résistance à la déformation plastique et à l'usure en dépouille.
- Performances élevées, arêtes vives et tenaces.
- Finition des aciers inoxydables à vitesses de coupe élevées.

GC2015 – M15 (M05-M25)

- Nuance carbure à revêtement CVD résistant à l'usure sur substrat supportant les températures élevées.
- Ébauche légère à finition des aciers inoxydables avec vitesses de coupe modérées à élevées.
- Choix prioritaire pour les coupes continues.

GC235 – M35 (M25-M40)

- Nuance carbure à revêtement CVD avec substrat tenace.
- Ébauche des aciers inoxydables et moulages d'acier inoxydable avec croûte difficile à vitesse faible à modérée.
- Très bonne sécurité d'arête autorisant les coupes fortement interrompues.

Conditions de coupe recommandées pour les aciers inoxydables : extrait du catalogue TOURNAGE GENERAL SANDWICK Coromant©

	Pression spécifique de coupe K_s en N/mm ²	Dureté Brinell HB	Résistance à l'usure		
			GC1105	GC2015	GC235
			Avance f mm/tr à Kr 90-95°		
			0,1- 0,2- 0,3	0,2- 0,4- 0,6	0,2- 0,4- 0,6
Vitesse de coupe Vc, m/min					
Austénitique-ferritique (Duplex) Barres forgées Non soudable > 0,05 %C Soudable < 0,05 %C	2000	230	315-255-205	220-180-145	105- 95- 80
	2450	260	280-225-185	190-150-120	95- 80- 70

DR8 – Document Ressource 8. Flambage (extraits)

Extrait 1 : le flambage ou flambement est un phénomène d'instabilité d'une structure, qui soumise à un effort normal de compression, a tendance à fléchir et se déformer dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression (passage d'un état de compression à un état de flexion). Il se développe un moment de flexion parasite amplifié par les déformations et déplacements de la poutre chargée. Le flambage est un phénomène d'instabilité élastique. Le modèle de résistance des matériaux met en évidence des instabilités dont la charge critique d'Euler est un exemple simple. Pour une poutre d'inertie constante soumise à un effort normal de compression simple, la charge critique de flambage *théorique* est donnée par la formule d'Euler :

$$F = \frac{\pi^2 EI}{l_k^2}$$

- E est le module de Young du matériau ici **203 Gpa pour un acier inoxydable** ;
- I est le moment quadratique de la poutre ;
- l_k est la longueur de flambement de la poutre.

Extrait 2 : Guide de Mécanique, JL FANCHON, NATHAN®, longueur effective L_e

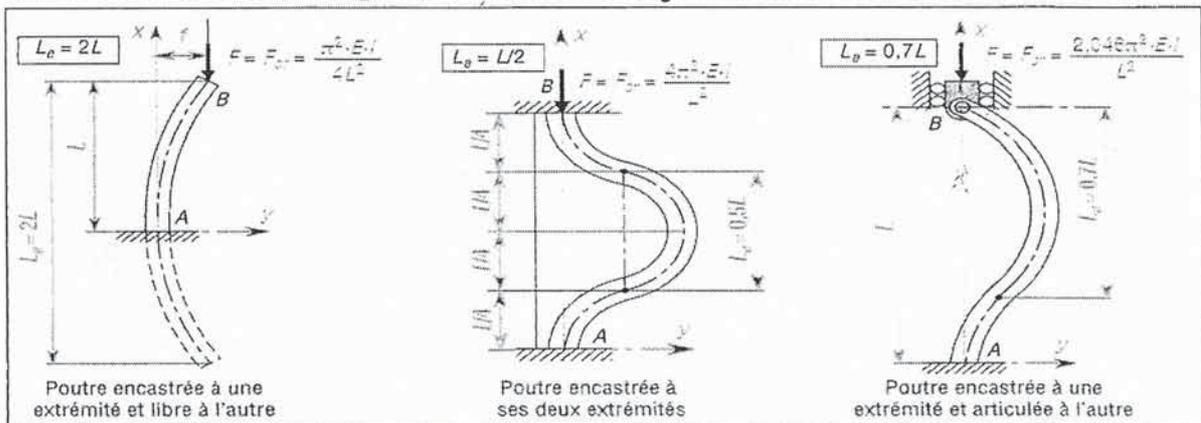


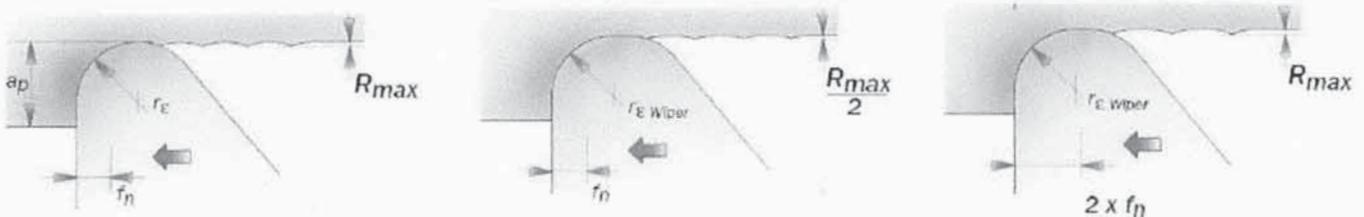
Fig. 8. Déformations types par flambage : cas divers avec longueur effective L_e .

Remarque : les charges critiques peuvent être obtenues en remplaçant L par L_e dans la formule générale de la charge critique d'Euler : $F_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2}$

$L_e = 2L$	$L_e = L/2$	$L_e = 0,7L$
$F = \frac{\pi^2 EI}{4L^2}$	$F = \frac{4\pi^2 EI}{L^2}$	$F = \frac{2,048\pi^2 EI}{L^2}$

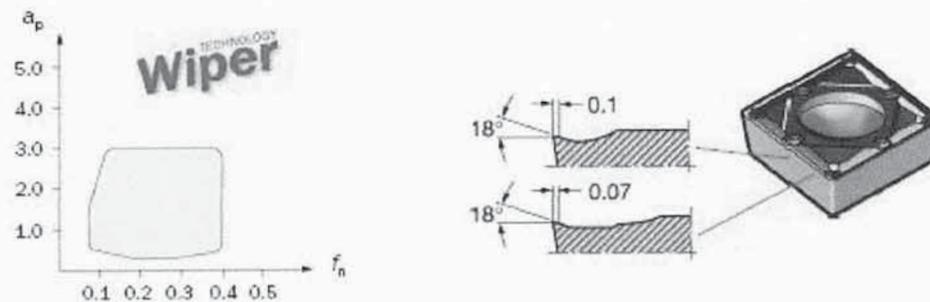
DR9 – Document Ressource 9

TECHNOLOGIE WIPER - WF – pour le tournage de finition : l'augmentation de l'avance avec des plaquettes Wiper© est une solution pour améliorer la productivité en tournage. Ces plaquettes peuvent réaliser d'excellents états de surface, éliminer les opérations de rectification, garantir une excellente cylindricité. Si l'avance est doublée, le temps de coupe peut être divisé par 2. La conception du rayon de bec des plaquettes permet d'augmenter l'avance sans modifier l'état de surface ou modifier l'état de surface sans modifier l'avance, ni la profondeur de passe.



sans la technologie Wiper©	avec la technologie Wiper©	
Pour une avance et une profondeur de passe donnée.	Même avance, même profondeur de passe : diminution de la rugosité.	Pour une même rugosité, possibilité de doubler l'avance.

PLAQUETTE OUTIL : technologie WIPER®, plaque de planage



Domaine d'utilisation de la plaquette CCMT 09 T3 04-WF :

$a_p = 0,3 - 3,0$ mm, avec une valeur recommandée de 1 mm ;

$f_n = 0,07 - 0,3$ mm/tr, avec une valeur recommandée de 0,2 mm/tr.

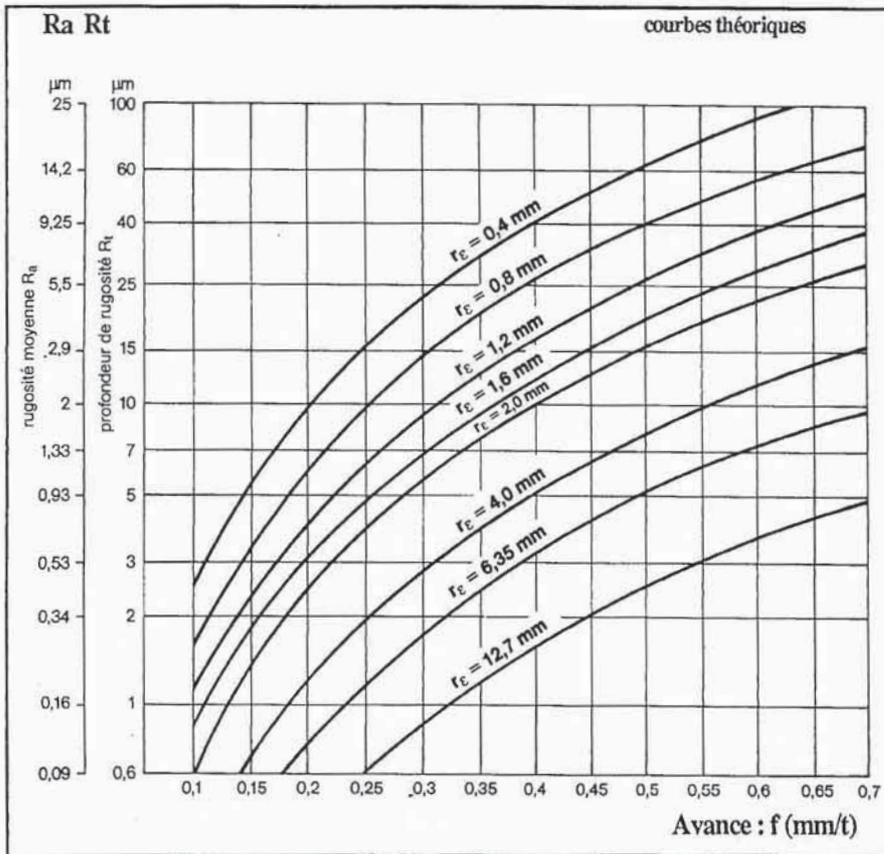
• Désignation de la plaquette

- 1 : forme de plaquette, type C, 80°
- 2 : angle de dépouille de la plaquette, 7°
- 3 : tolérance métrique, $\pm 0,13$ mm
- 4 : type de plaquette,
- 5 : longueur d'arête de coupe, 9 mm
- 6 : épaisseur de la plaquette, 3,97 mm
- 7 : rayon de bec r_ϵ , 0,4 mm
- 8 et 9 : non renseignés

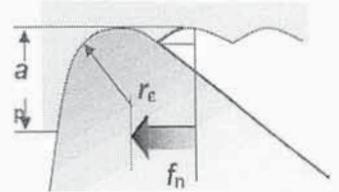
C	C	M	T	09	T3	04	-		-	WF
1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	

12 : plaquette de finition, technologie Wiper®

DR10 – Document Ressource 10 : rugosité totale Rt et rugosité arithmétique Ra, théoriques en fonction de l'avance f et du rayon de plaquette r_e.



$$R_{\text{maxi}} = \frac{f_n^2 \times 1000}{8 \times r_e}$$



Rt maxi donné pour une plaquette de technologie courante.

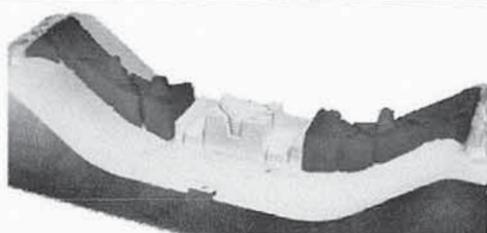
Rt maxi à diviser par 2 pour une avance f conservée et une technologie Wiper®

Extrait : « Mécanique des structures, résistance des matériaux », DUNOD®, cas d'une poutre encastree à une extrémité et en appui à l'autre extrémité.

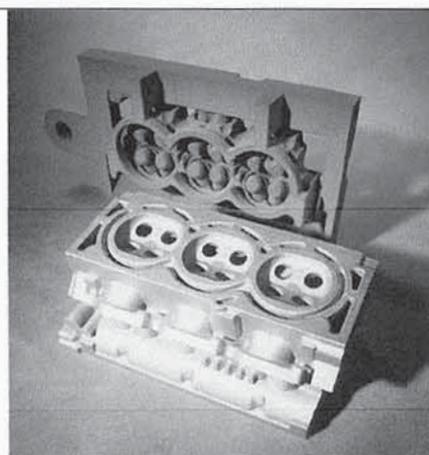
Géométrie et Chargement	Réaction d'appui	Moments	Flèche	Rotation
	$R_{xA} = \frac{Pb^2}{2l}(3l - b)$ $R_{xB} = \frac{Pa}{2l}(3l^2 - a^2)$	$M_B = -\frac{Pab}{2l^2}(2a + b)$ $M_C = \frac{Pab^2}{2l^3}(3l - b)$	$f_C = -\frac{Pa}{96EI}(3l^2 - 5a^2)$	$\theta_A = -\frac{Pab^2}{4EI}$
	$R_{xA} = \frac{5P}{16}$ $R_{xB} = \frac{11P}{16}$	$M_{\text{max}} = M_B = -\frac{3Pl}{16}$ $M_C = \frac{5Pl}{32}$	$f_C = \frac{7Pl^3}{768EI}$	$\theta_A = -\frac{Pl^2}{32EI}$

DR11 – Document Ressource 11 : procédé de fabrication de moules et de noyaux pour le prototypage rapide

Le procédé de fabrication du moule et des noyaux par « frittage au laser de sables Croning® » permet de produire des moules et noyaux en sable supprimant ainsi la réalisation de modèles et de boîtes à noyaux. Cette machine est capable de produire des formes qui sont généralement très complexes, voire impossible par les techniques classiques. Un fichier CAO (STL) est transmis à la machine afin de produire moule et noyau pour la fabrication de pièces dans tous alliages (magnésium, aluminium, aciers et fontes alliés).



Solution DirectCast avec EOSINT S 750 : fabrication de traverse et usinage modèle support



Solution DirectCast avec EOSINT S 750 : fabrication de culasse

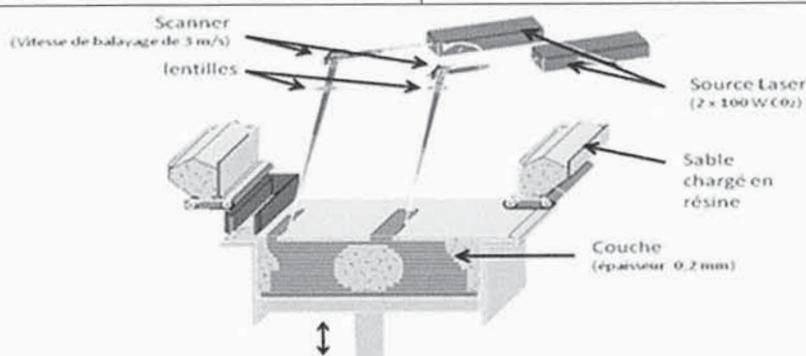


Schéma de principe

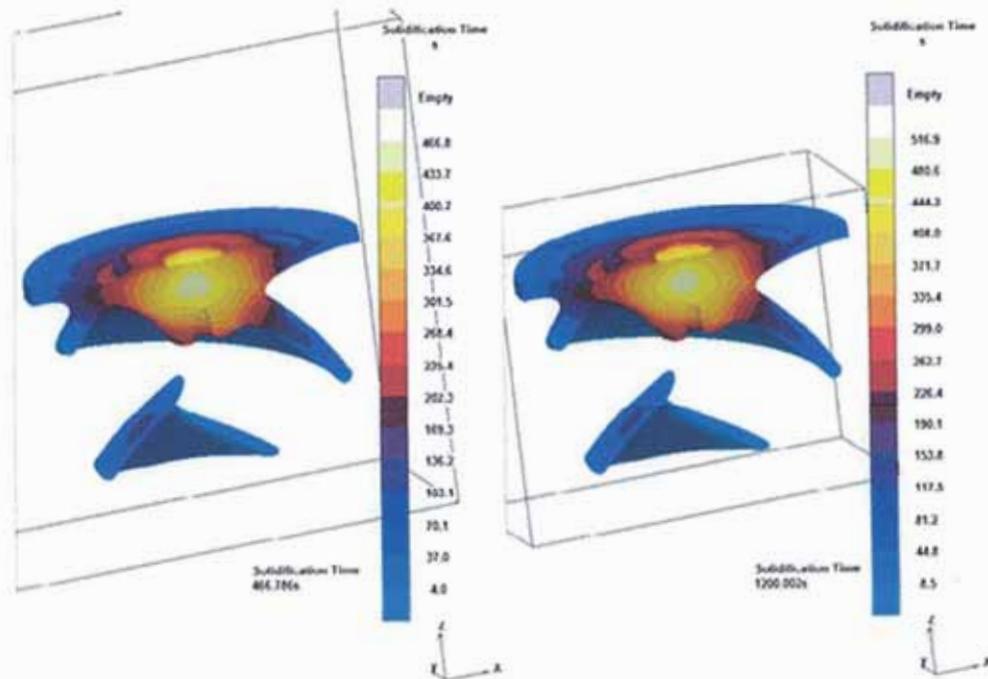
Les performances machines (données partielles)

Vitesse de construction	2500 cm ³ ·h ⁻¹
Epaisseur de la couche	0,2 mm
Vitesse de scanning	3 m·s ⁻¹
Type Laser	2 x 100 W, CO ₂
Dimension table	610 mm x 800 mm x 1830 mm (BxLxH)
Sable utilisé	Silice avec ou sans résine

DR12 – Document Ressource 12 : paramètres et résultats de simulation

DR12.1 : temps de solidification

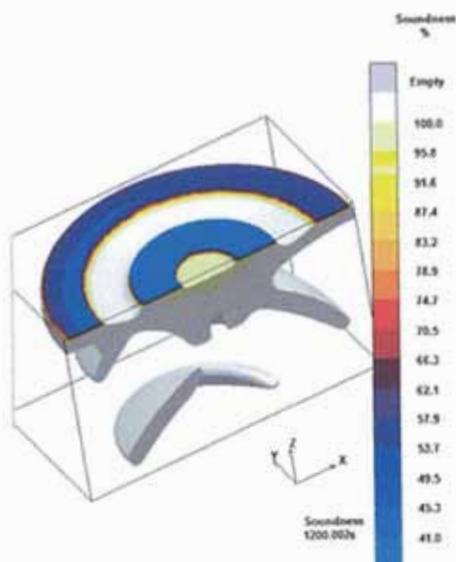
La figure ci-dessous représente le résultat de simulation thermique (figure a) avec le moule en sable à vert, le moule obtenu par frittage laser de sables Croning® (figure b). Les figures a et b montrent les zones représentatives de la solidification. Le temps de solidification est exprimé en seconde.



(a) moule en sable à vert

(b) moule en sable obtenu par Croning®

DR 12.2 : compacité



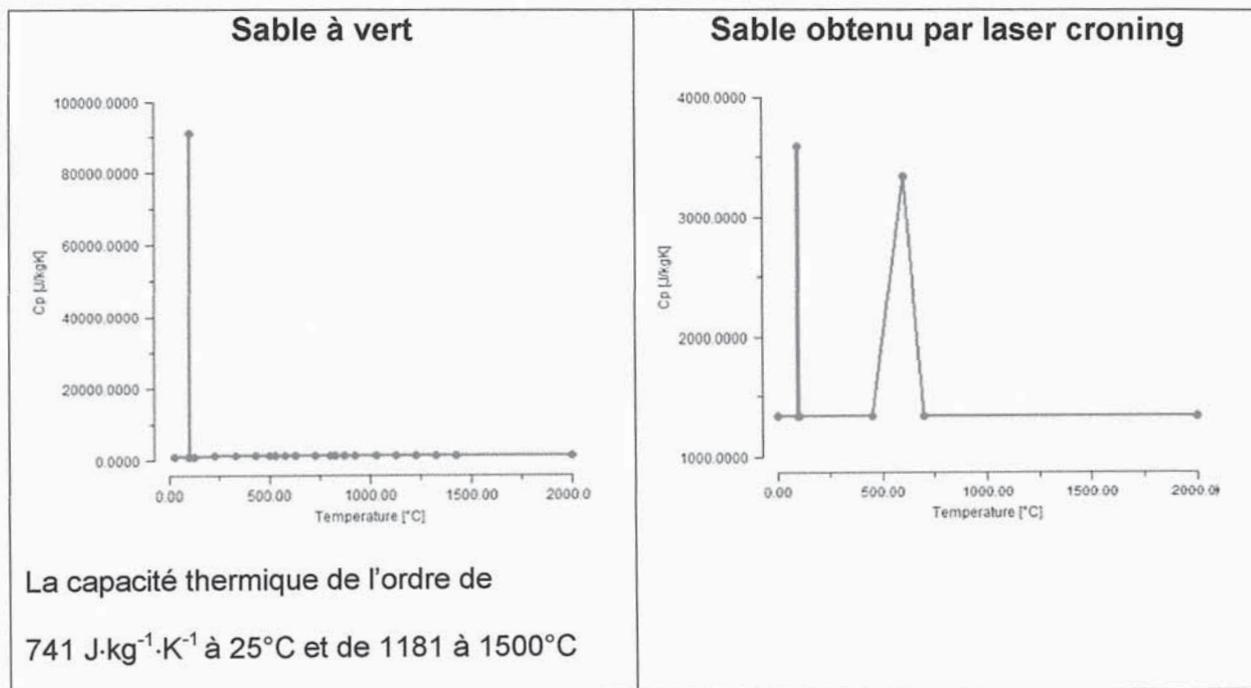
La figure ci-contre représente le résultat de simulation thermique pour le moulage de la pièce obtenue avec un moule réalisé par frittage laser de sables Croning®.

La pièce a été représentée partiellement en vue de montrer les zones représentatives et leurs niveaux de compacité.

DR12.3 : paramètre de simulation

Évolution du coefficient de la capacité thermique (C_p) en fonction de la température.

La capacité thermique est exprimée en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$



DR13 – Document Ressource 13 : fiche matière de la fonte EN-JN1039

La composition chimique est définie par le tableau ci-après.

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	Cu
1,8	max	0,5	max	max	max	max	max	max
à 3,6	1	à 1,5	2	0,08	0,08	14 à 18	3	1,2

Étendue de la valeur de dureté exigée (HRC/HV)

Échelle de dureté	HRC	HV
valeur mini	61	740
valeur maxi	68	930

Micrographie :

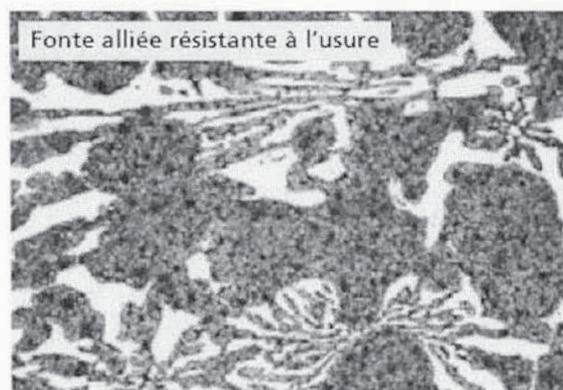
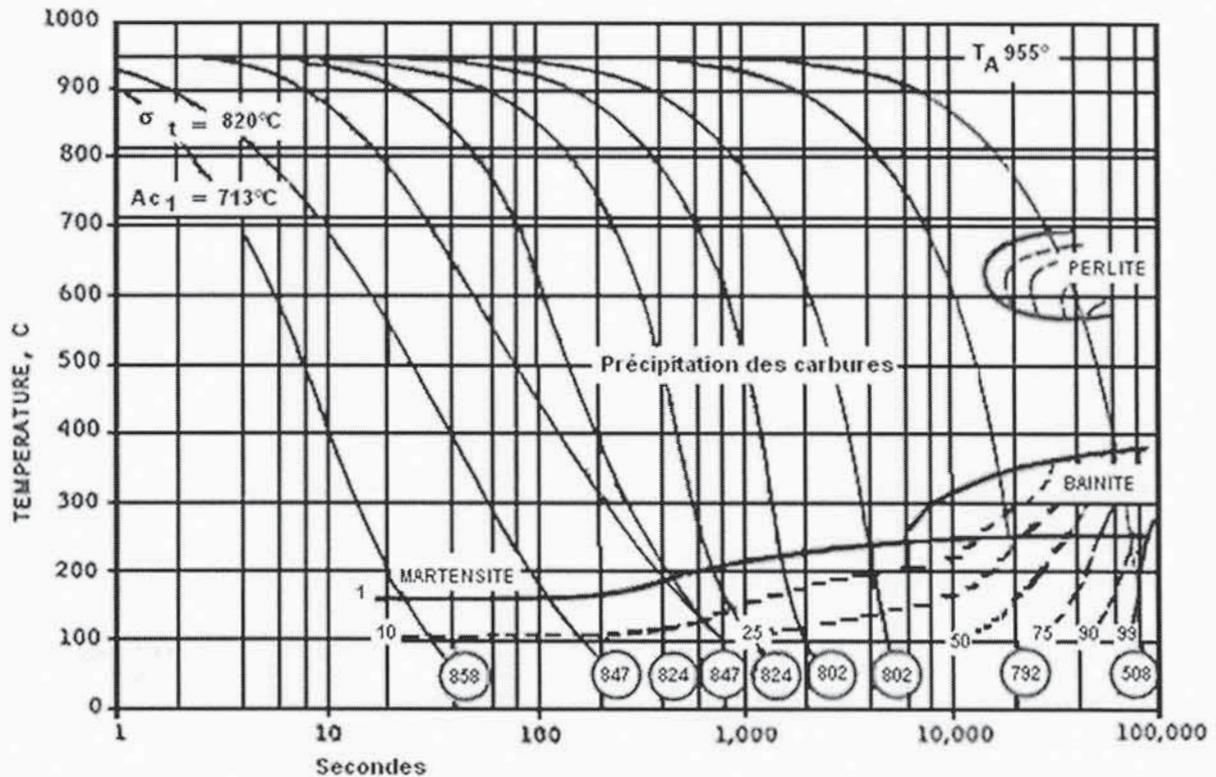


Figure : structure métallographique d'une fonte alliée à 18% Cr-Mo

DR14 – Document Ressource 14 : diagramme en Transformation à Refroidissement Continu (TRC) – Fonte alliée Cr-Mo



Données associées à la fonte alliée Cr-Mo :

Température d'austénitisation	955°C
Dureté Vickers	HV
Domaine de formation de perlite	700 à 600°C
Dans le domaine martensitique	les valeurs en pourcentage (10 %, 25 %, 50 %, 75 %, 90 % et 99 %), courbes en pointillés représentent le pourcentage d'austénite transformée en martensite.

Détermination du pourcentage d'austénite résiduelle à température ambiante

Le pourcentage en austénite résiduelle Y peut être calculé à partir de la formule de Koistinen et Marburger modifiée :

$$Y_{\text{austénite résiduelle}} = (1 - X)e^{-k(M_s - T_i)(1 - \mu)}$$

$$\mu = 0,41[1 - e^{-0,03\Delta t^{0,6}}]$$

X : fraction massique d'austénite transformée avant Ms ;

T_i : température pour laquelle on effectue le calcul ;

k : constante voisine de 0,011 ;

Δt : intervalle de temps, en secondes, pour refroidir de 700 à 300°C ;

M_S : température de début de transformation martensitique ;

μ : fonction décrivant la loi de refroidissement μ = f (Δt).