



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION
NATIONALE

EAI SIM 2

SESSION 2019

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

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

Si vous repérez ce qui vous semble être une erreur d'énoncé, vous devez le signaler très lisiblement sur votre copie, en proposer la correction et poursuivre l'épreuve en conséquence. De même, si cela vous conduit à formuler une ou plusieurs hypothèses, vous devez la (ou les) mentionner explicitement.

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

Tournez la page S.V.P.

A

COMPOSITION DU SUJET

Durée conseillée pour la lecture du sujet : 20 min

TEXTE DU SUJET : description de la situation industrielle, des problématiques traitées, des parties et questions à traiter par le candidat, 14 pages (y compris celle-ci).

Le sujet comporte 5 parties distinctes : (durées conseillées indiquées)

Les parties et les questions dans chaque partie peuvent être traitées souvent de façon indépendante.

1^{re} partie : Conception de la pièce client (1h10 min)

2^e partie : Conception du brut de fonderie (20 min)

3^e partie : Conception de l'outillage et du process de fonderie (50 min)

4^e partie : Élaboration de l'alliage (40 min)

5^e partie : Définition du process d'usinage (40 min)

- Rédigez vos réponses de manière claire et concise.
- Détaillez vos calculs, ainsi que les applications numériques et les unités.
- Justifiez vos choix, vos hypothèses.

DT : DOCUMENTS TECHNIQUES : documents spécifiques et relatifs au support de l'étude, données techniques.

DT1 : Dessin de définition du produit : jante client usinée

DT2 : Extrait du cahier des charges

DT3 : Comportement au couple de serrage

DT4 : Étude de fatigue par corrélation

DT5 : Mécanique de la rupture

DT6 : Analyse fréquentielle

DT7 : Équilibrage dynamique

DT8 : Tolérances sur le brut

DT9 : Simulation de solidification

DT10 : Éjection de la pièce

DT11 : Guidage et dilatation

DT12 : Diagramme binaire Aluminium-Silicium

DT13 : Influence du Revenu sur Re et A%

DT14 : Essai de traction

DT15 : Processus d'usinage

DT16 : Coût horaire

DT17 : Capabilités

DR : DOCUMENTS RÉPONSES : à compléter et à rendre par le (ou la) candidat(e),
Tous les documents réponses sont à rendre, même non complétés.

DR1 : Étude de spécifications

DR2 : Gamme de fabrication

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

Sujet

Conception et production d'une jante de voiture

1. PRÉSENTATION

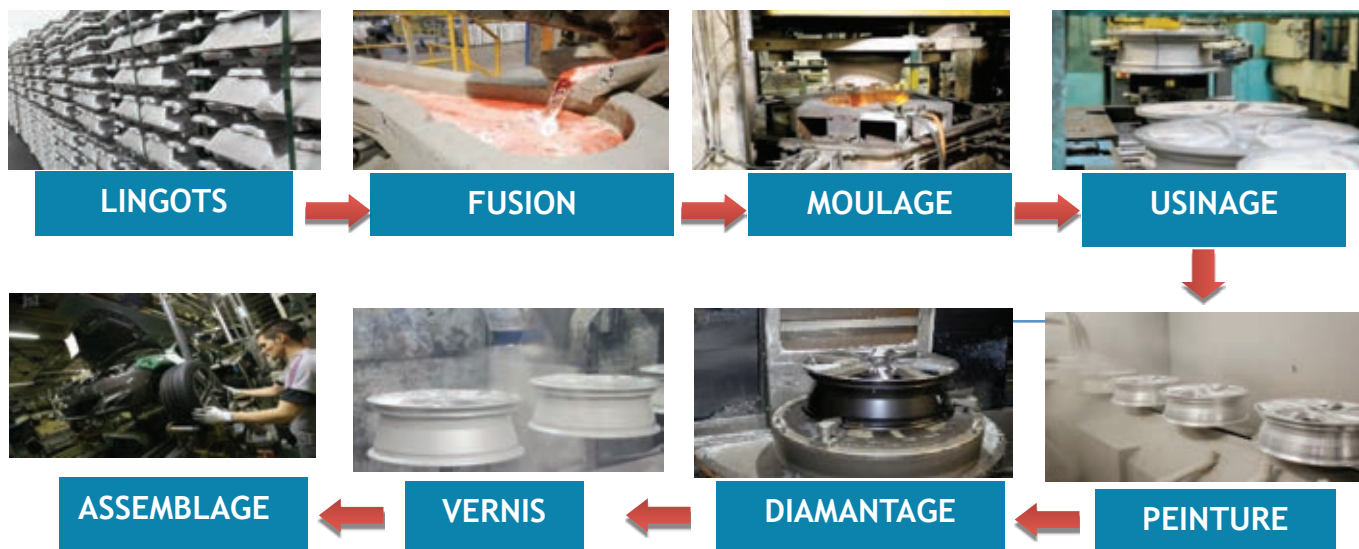
1.1. L'entreprise

La société Liberty Wheels France® basée à DIORS dans le département de l'Indre est spécialisée dans la conception et la production de jantes automobiles. Elle emploie 380 personnes qui transforment 14 millions de tonnes d'alliage d'aluminium pour produire 2,5 millions de pièces par an et pour un chiffre d'affaires de l'ordre de 70 millions d'euros. Les principaux clients sont les constructeurs automobiles Renault®, Nissan®, Peugeot®, Citroën®, Seat®, Fiat® et Aixam®.

Les produits proposés sont des jantes de 13 à 19 pouces. Elles sont à 50% diamantées (peintes, usinées puis vernies).

À partir d'un design client OEM (Original Equipment Manufacturer), dix ingénieurs conçoivent la pièce à livrer et définissent donc le brut, le processus de fonderie, d'usinage et de finition. La conception détaillée d'une jante est fournie, **voir DT1**.

Le process de fabrication peut être résumé ainsi :



Tout au long du process de réalisation, la société Liberty Wheels France® met en œuvre les contrôles et essais relatifs aux normes en vigueur et aux exigences des clients.

1.2. Le procédé de fonderie

L'alliage d'aluminium est élaboré à partir de lingots mis en fusion et il est ensuite traité pour correspondre au cahier des charges du constructeur automobile. Dans le procédé de fonderie basse pression, cet alliage est maintenu dans des fours situés au-dessous des moules métalliques. Ces moules sont poteyés et préchauffés. Une pression est exercée dans le four et fait remonter l'alliage dans un tube réfractaire jusqu'à l'empreinte. (voir figure 1 ci-dessous).

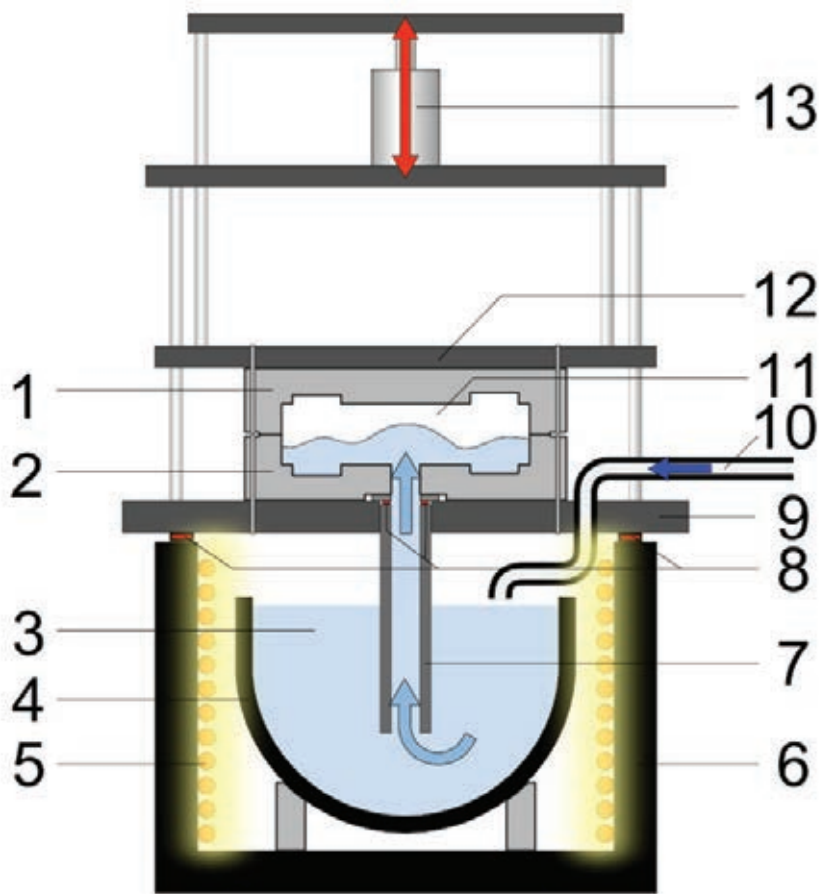


Figure 1 : procédé de fonderie basse pression, extrait de « Wikimedia.org »

1	Moule supérieur	8	Étanchéité
2	Moule inférieur	9	Plateau inférieur
3	Alliage liquide	10	Pression
4	Creuset	11	Empreinte
5	Chauffage	12	Plateau supérieur
6	Four de maintien	13	Vérin d'ouverture du moule
7	Tube réfractaire		

1.3. Le produit

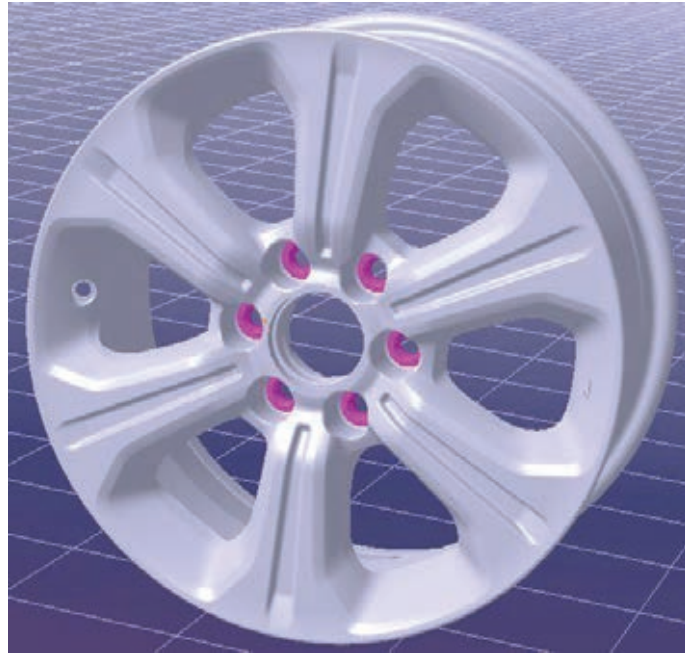


Figure 2 : la pièce client

Le produit étudié est une jante de 16 pouces (1 pouce = 25,4 mm) destinée à un constructeur automobile. Elle se monte sur des véhicules de type SUV (Sport Utility Véhicule) de taille moyenne. Les pneumatiques qu'elle reçoit sont de taille 205/70 R16 (205 est la largeur du pneu en mm, 70 la hauteur en pourcentage de la largeur et 16 la dimension de la jante en pouces). Ces roues sont fixées au véhicule par 6 écrous à appuis coniques. Le client exige la présence d'inserts en acier pour l'appui des écrous.

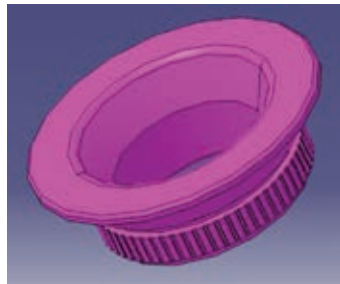


Figure 3 : inserts en acier

Le client fait parvenir à son fournisseur un design et un cahier des charges.

Le cahier des charges est un document de 30 pages qui définit certaines formes à respecter pour s'adapter au pneumatique, à la fixation prévue au véhicule et aux pièces proches (système de freinage notamment). Ce document définit aussi les marquages à indiquer sur la jante et les exigences de tenue mécanique.

Les clients s'appuient fortement sur l'expertise de la société pour qualifier le produit.

Un extrait du cahier des charges est fourni (**voir DT2**).

Le sujet propose d'analyser la démarche de conception et de définition du process

1^{RE} PARTIE : Conception de la pièce client
(Durée conseillée : 1h10 min)

Objectif : valider quelques éléments de la conception de la jante.

Le constructeur automobile fournit un design de la face externe de la jante. Le reste des formes et caractéristiques est défini par le cahier des charges général du constructeur automobile. Le fabricant de jantes doit donc adapter ce design aux formes fonctionnelles, au comportement mécanique ainsi qu'aux contraintes de fabrication.

La jante doit pouvoir s'adapter à son environnement et notamment pouvoir se fixer au moyeu de roue du véhicule. Les écrous de fixations ont un appui conique.

Question 1.1 : **Relever** les éléments de cotation de l'ensemble {jante + insert} relatifs au cône d'appui des écrous (**voir DT1**).
Expliquer succinctement pourquoi ces spécifications sont nécessaires.

Le comportement au couple de serrage est défini. **Voir DT3.**

Question 1.2 : **Démontrer** que le couple de frottement sur le cône peut s'écrire :

$$C = \frac{2}{3} (R^3 - r^3) \cdot \frac{\pi}{\sin(\alpha)} \cdot f \cdot P$$

Question 1.3 : **Déterminer** la relation liant l'effort axial dans l'écrou au couple de serrage.
Calculer l'effort axial dans l'écrou pour un couple de serrage préconisé de 120 N·m.

Question 1.4 : **Calculer** la pression de matage.
Conclure sur le choix de mettre en place des inserts en acier.

Le bureau d'étude s'assure aussi du bon fonctionnement de la pièce en dynamique et tout au long du cycle de vie. Les caractéristiques de l'essai de fatigue sont définies **sur le DT2.**

Question 1.5 : **Expliquer** pourquoi l'essai de fatigue préconisé est de $2 \cdot 10^6$ cycles.

Lors de la conception, l'entreprise effectue des simulations en statique et estime la durée de vie par corrélation (**voir DT4**).

Question 1.6 : **Expliquer** pourquoi le bureau d'étude travaille de cette manière.
Critiquer l'étude et la validité de la corrélation.

La rupture en fatigue provient de la propagation de défauts. Lors de la fabrication de produits industriels, il y a toujours des hétérogénéités. Sachant que le facteur d'intensité de contrainte (K_{IC}) de l'alliage utilisé est de $11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, et que la contrainte maximale dans la jante est de 200 MPa ;

Question 1.7 : **Calculer** la taille d'un éventuel défaut pouvant générer la rupture brutale de la jante (**voir DT5**).

En estimant que le défaut le plus grand dans la jante est de 0,3 mm et que la contrainte varie de 0 à 200 MPa

Question 1.8 : **Calculer** le facteur de concentration de contrainte K.
Comparer à ΔK_s .
Conclure sur la résistance de la jante.

Question 1.9 : **Calculer** la taille du défaut entraînant une propagation de la fissure sous cette sollicitation alternée.
Calculer au bout de combien de cycles la rupture est atteinte si le défaut initial fait 0,4mm.

Une analyse du comportement vibratoire de la jante est aussi réalisée (**voir DT6**).

Question 1.10 : **Montrer** que les fréquences de résonance sont hors d'atteinte dans le cas d'une utilisation normale du véhicule.
Citer les deux paramètres sur lesquels les techniciens peuvent agir pour modifier ces fréquences de résonance.

Actuellement, toutes les voitures doivent être équipées du système TPMS (Tyre Pressure Monitoring System). Parfois, la mesure est indirecte et utilise le système ABS, parfois, il y a une réelle mesure de pression par un capteur (de masse 20 grammes). On souhaite s'assurer de la tenue de la valve qui résiste à un effort d'arrachement de 9 kg d'après la documentation du constructeur.

Question 1.11 : **Calculer** l'effort généré sur la valve par ce système pour une vitesse de 130 km/h.
Conclure quant à la tenue de la valve.

Pour compenser cette masse, le bureau d'étude prévoit des évidements pour ramener le centre de gravité de la jante sur l'axe de rotation.

Question 1.12 : **Expliquer** pourquoi ce type d'équilibrage est appelé équilibrage statique.

Après essai sur un banc, un déséquilibre dynamique qui persiste est constaté (**voir DT7**).

Question 1.13 : **Déterminer** le balourd généré par une masse dans le repère tournant.

Question 1.14 : **Démontrer** que les efforts enregistrés par le banc sont de la forme :

$$F1 = \frac{D+E}{E} \cdot B1 \cdot \sin(\theta + \alpha_1) + \frac{D+E+L}{E} \cdot B2 \cdot \sin(\theta + \alpha_2) + \frac{\lambda + E}{E} \cdot P$$

$$F2 = -\frac{D}{E} \cdot B1 \cdot \sin(\theta + \alpha_1) - \frac{D+L}{E} \cdot B2 \cdot \sin(\theta + \alpha_2) - \frac{\lambda}{E} \cdot P$$

Sur le DT7, figure l'enregistrement de l'effet des balourds lors d'un essai à 140 tr·mn⁻¹. Les masses seront placées à 203 mm de l'axe de rotation.

Question 1.15 : **Déterminer** les valeurs des deux masses d'équilibrage et leurs positions angulaires pour obtenir un équilibrage dynamique.

2^E PARTIE : Conception du brut de fonderie (Durée conseillée : 20 min)

Objectif : valider la conception du brut moulé pour le remplissage et la solidification.

En parallèle de la définition de la jante client, le bureau d'étude définit le brut de fonderie. Cette conception doit permettre une production de fonderie de qualité ainsi que l'obtention d'un brut capable pour les opérations d'usinage.

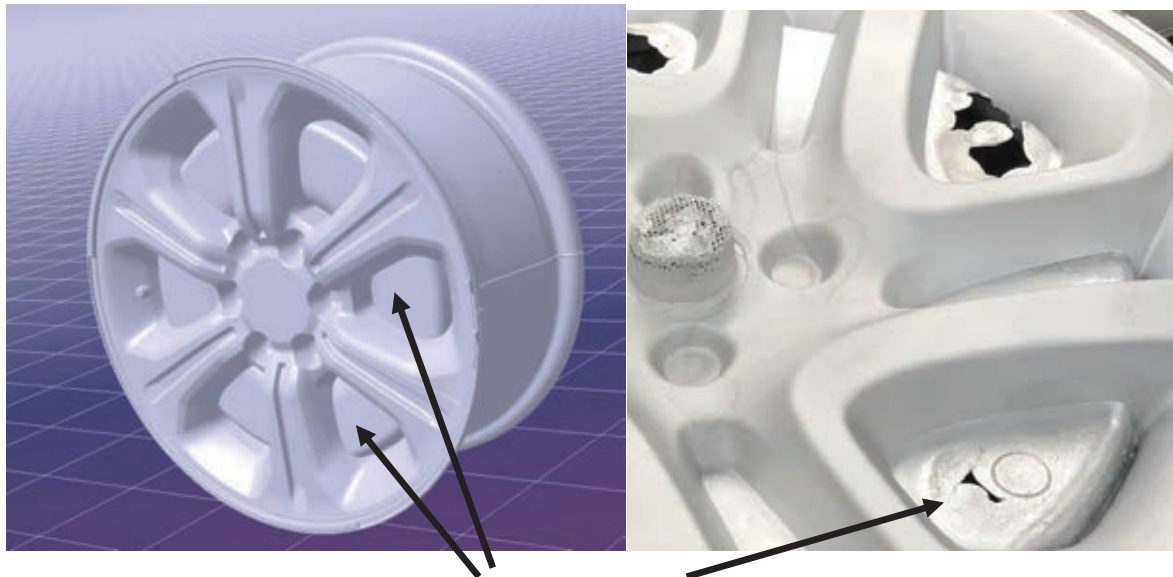


Figure 4 : « Voiles existants entre chaque bras »

Question 2.1 : Expliquer la nécessité d'ajouter un « voile » de 0,2 mm entre les bras de la jante.

L'entreprise définit les tolérances sur le brut (voir DT8).

L'épaisseur de la jante est de 4 ± 0.25 mm (voir DT1, vue de droite en coupe).

La quantité minimale de matière à usiner est de 3 mm.

Question 2.2 : Déterminer la cote de l'épaisseur du brut (dimension nominale + tolérances).

Lors du passage de l'état liquide à l'état solide, il y a une contraction volumique qui génère dans les alliages d'aluminium des micro-retassures qui diminuent les caractéristiques mécaniques. Des simulations de solidification sont effectuées (voir DT9).

Question 2.3 : Expliquer la nécessité de simuler le « cyclage » (plusieurs cycles de coulée consécutifs).

Question 2.4 : Proposer deux solutions pour ne plus avoir de dernières zones de solidification dans les bras de la jante.

3^E PARTIE : Conception de l'outillage et du process de fonderie (Durée conseillée : 50 min)

Objectif : valider le fonctionnement de l'outillage et le process de fonderie.

Une fois les dimensions du brut définies, il faut concevoir l'outillage en prenant en compte les phénomènes de solidification et de retrait.

Pour adapter leur moule aux bâtis des machines, les concepteurs ont à leur disposition plusieurs carcasses types correspondant aux dimensions de la machine basse pression.

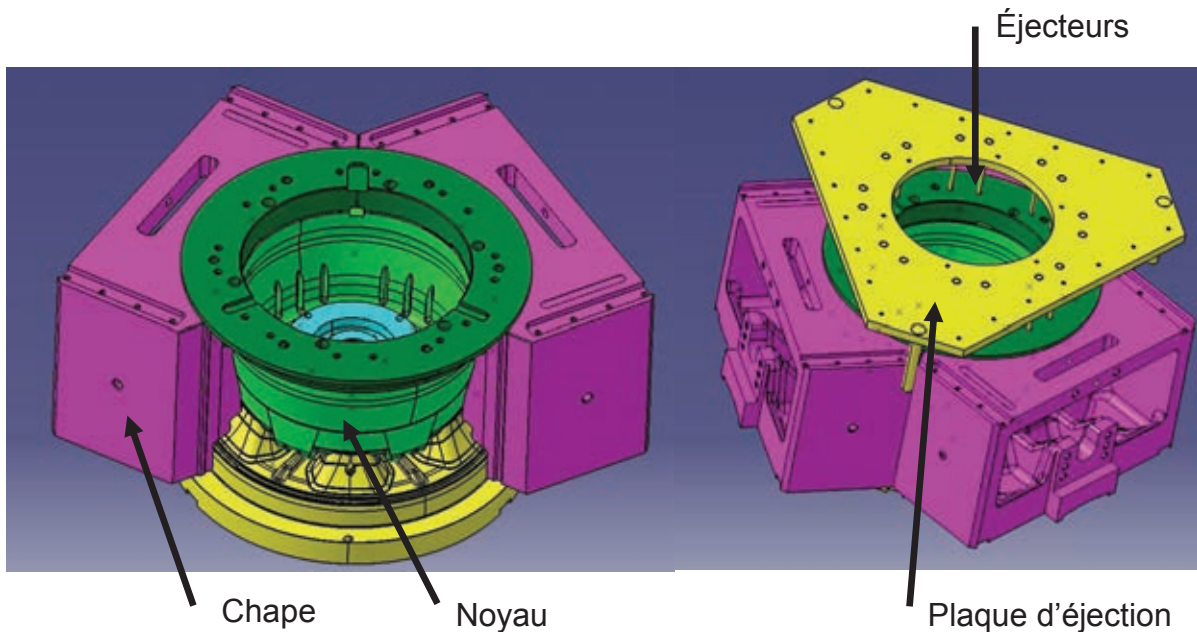


Figure 5 : éléments constitutifs de l'outillage

Question 3.1 : Citer les avantages du procédé basse pression par rapport au procédé gravitaire.

Le haut du moule se trouve à environ 1,2 m au-dessus de l'alliage liquide

Question 3.2 : Calculer la pression à appliquer sur l'alliage dans le four de maintien pour remplir le moule.

En fin de remplissage, on augmente la pression jusqu'à 1,3 bars.

Question 3.3 : Calculer l'effort de soulèvement du noyau en estimant la surface de poussée de l'alliage dans l'empreinte (voir DT1).

On s'intéresse au diamètre extérieur de la jante brute de 446 mm.

Si l'on considère que l'alliage est solide à 550°C alors que l'outillage est à 300°C et que les coefficients de dilatation linéaires (exprimés en degrés Kelvin) de l'alliage d'aluminium et de l'outillage sont respectivement de $23 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ et $11 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

Question 3.4 : Calculer le diamètre que doit avoir l'outillage à 20°C.

Lors du refroidissement, le retrait à l'état solide génère un serrage sur le noyau.
En prenant pour les calculs de serrage le diamètre moyen de 375 mm (**voir DT10**).

Question 3.5 : Calculer la pression de serrage exercée par l'alliage sur le noyau.

Question 3.6 : Réaliser un croquis simple pour modéliser l'éjection de la jante.
Calculer l'effort d'éjection nécessaire si la pression de serrage est de 8,5 MPa.

Question 3.7 : Vérifier qu'avec les 16 éjecteurs de diamètre 6 mm, on ne dépassera pas une pression de matage de 100 MPa pour ne pas marquer la pièce.

La chape est guidée sur la semelle par des rainures de largeur 30 mm (à 20°C). Lors de la simulation du procédé, on constate une différence de température entre la chape et la semelle (**DT11**).

Question 3.8 : Calculer le jeu minimum pour qu'il n'y ait pas de serrage en fonctionnement.

Pour simplifier le calcul suivant, on considèrera que la semelle est infiniment rigide. On fait l'hypothèse qu'elle se dilate mais ne se déforme pas sous la contrainte.

Question 3.9 : Calculer la contrainte induite par la dilatation s'il n'y avait pas de jeu.

4^E PARTIE : Élaboration de l'alliage (Durée conseillée : 40 min)

Objectif : valider l'élaboration du matériau liquide et du traitement thermique.

Une des particularités des alliages d'aluminium liquides est la propension à dissoudre l'hydrogène au cours du temps. Lors de la solidification, cette dissolution crée des porosités. Pour les prévenir, on dégaze alors l'alliage liquide en introduisant de l'azote. L'azote élimine l'hydrogène en remontant à la surface.

Pour contrôler si le dégazage est correct, les opérateurs coulent un petit échantillon d'alliage. Ils le pèsent ensuite dans l'air puis dans l'eau.



Figure 6 : balance de précision

Question 4.1 : Expliquer comment en pesant l'échantillon dans l'air puis dans l'eau, il est possible de vérifier si l'alliage est « gazé » (présence de bulles d'hydrogène).

Question 4.2 : L'alliage solidifié est polycristalin. Expliquer pourquoi.

Question 4.3 : Expliquer pourquoi la valeur de la résistance élastique (R_e) varie dans les différentes parties de la jante.

Question 4.4 : Expliquer comment la taille du grain influence la résistance élastique.

Question 4.5 : Décrire les transformations du matériau lors du refroidissement de 720°C à 20°C (DT12).

Question 4.6 : Proposer un traitement de l'alliage liquide pour diminuer la taille des grains dans la pièce.

Pour cet alliage, un modèle de détermination de la résistance élastique est le suivant :

$$R_e = R_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

Avec

- $R_0 = 70 \text{ MPa}$;
- $k = 20 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$;
- $d = \text{DAS}$, Dendritic Arm Spacing, représente la distance moyenne entre les bras de dendrite en mm.

En effet, la distance entre les bras des dendrites est fonction de la taille des dendrites qui sont une « image » de la taille du grain.



Figure 7 : Dendrites

Question 4.7 : Calculer le DAS maximum pour obtenir la résistance élastique de 240 MPa demandée par le client. Proposer un contrôle pour mesurer la valeur du DAS.

En pratique, le DAS minimum que l'on obtient est de 20 μm . Pour cette jante, les caractéristiques mécaniques sont modifiées par un traitement thermique de durcissement structural (Homogénéisation suivie d'une trempe puis d'un revenu).

Question 4.8 : **Expliquer** comment une modification de la structure cristalline peut augmenter la limite élastique.

La pièce subit donc une homogénéisation (mise en solution) pendant plusieurs heures. Les atomes se déplacent et leur diffusion augmente avec la température.

Question 4.9 : **Proposer** une température pour l'homogénéisation limitant le temps du traitement.
Justifier la valeur de cette température.

La pièce subit une trempe à l'eau, puis un revenu.

Question 4.10 : **Choisir** la température et la durée du revenu (**voir DT13**).
Justifier la valeur de la température et la durée du revenu.

Question 4.11 : **Tracer** la courbe du cycle thermique complet : $\theta=f(t)$.
Tracer en parallèle l'allure de la courbe de l'évolution de la dureté Brinell de l'alliage ($HB=f(t)$).

Les inclusions d'oxydes sont une autre source de microporosités et défauts impactant l'étanchéité et les caractéristiques mécaniques. Les jantes étant des organes de sécurité, l'entreprise effectue un contrôle à 100% des pièces produites.

Question 4.12 : **Proposer** un contrôle non destructif permettant de détecter ces défauts d'inclusions.

Pour contrôler les caractéristiques obtenues, on effectue des essais de traction. Une courbe relative à l'un de ces essais réalisé sur une éprouvette de dissection prélevée dans un bras de la jante est fournie (**voir DT14**).

Question 4.13 : **Calculer** la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% d'allongement ($R_{e0.2}$), la contrainte maximale (R_m) et l'allongement rémanent à rupture ($A\%$).
Conclure quant au respect du cahier des charges du client.

Des lois de comportement du type $s=s_0 \cdot e^n$ permettent de déterminer la valeur de la contrainte vraie en fonction de la déformation rationnelle dans le matériau.

Question 4.14 : **Déterminer** s_0 et n permettant de modéliser la courbe.

5^E PARTIE : Définition du process d'usinage (Durée conseillée : 40 min)

Objectif : Valider des choix technologiques de fabrication et déterminer des paramètres économiques d'une machine.

Suite aux opérations de moulage et traitement thermique, les jantes sont usinées. Chaque ligne automatique de production est composée de 2 tours verticaux W20/4 et d'un centre de perforation TF3-N, de convoyeurs et robots de chargement / déchargement. L'ensemble est implanté comme suit :

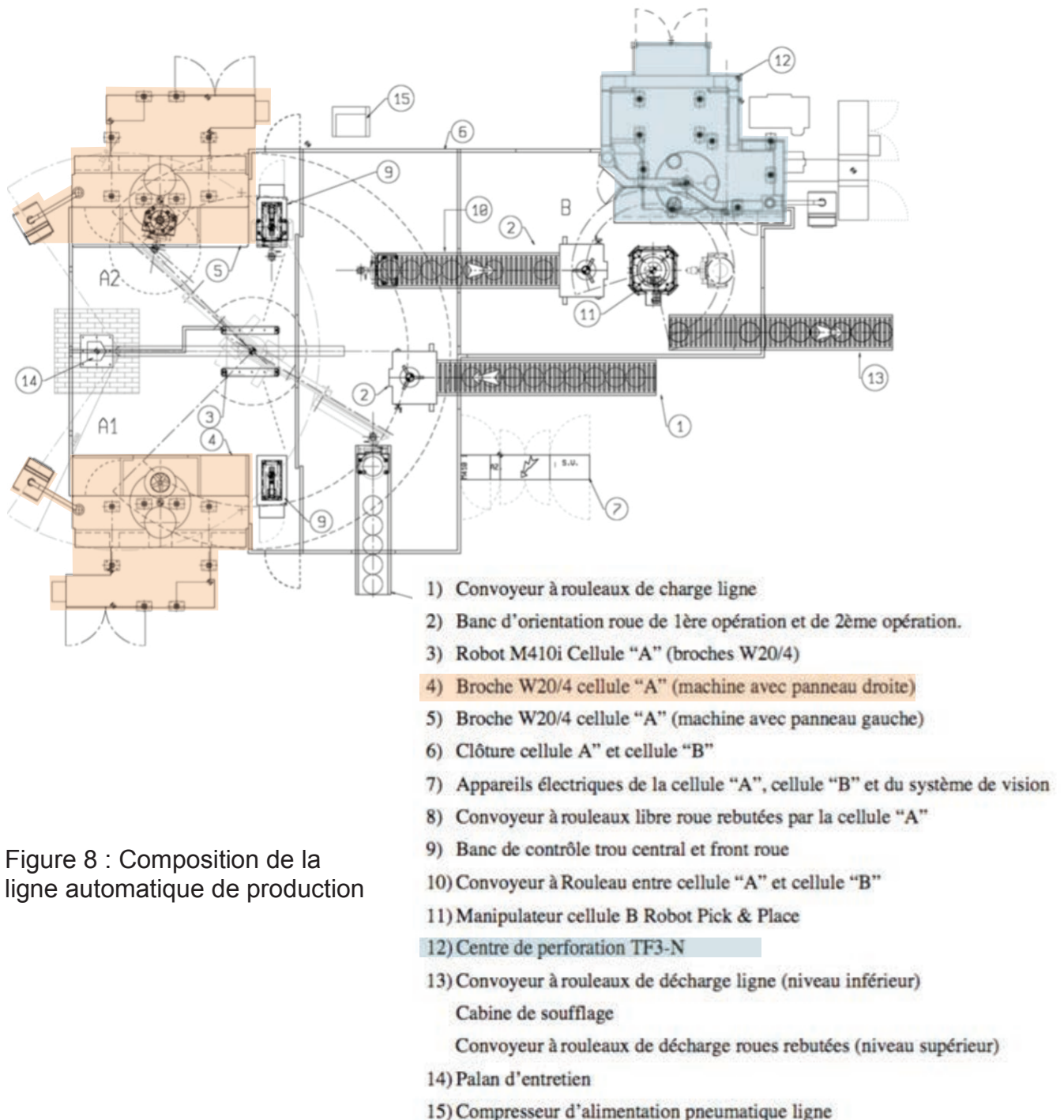


Figure 8 : Composition de la ligne automatique de production

La gamme d'usinage retenue présente 3 phases désignées par l'entreprise : OP1, OP2 et OP3. Le **DT15** donne des indications relatives à ce processus d'usinage.

Question 5.1 : **Décoder** sur le **DR1** les 2 spécifications extraites du dessin de définition (voir **DT1**).

Question 5.2 : **Décliner** les critères pris en compte pour choisir les surfaces de mise en position lors du départ d'usinage sur brut.

Question 5.3 : **Représenter** sur le **DR2**, pour chaque phase d'usinage, les surfaces usinées et une proposition de mise en position isostatique (mise en position et maintien en position). **Faire apparaître** le système d'axes normalisés de chaque machine.

Question 5.4 : **Décrire** les fonctions technologiques qu'un porte-pièce doit assurer.

Question 5.5 : **Indiquer** quel(s) avantage(s) tirer des associations d'outils retenues dans les OP1 et OP2.

Question 5.6 : **Préciser**, pour l'OP3, les trajectoires d'approche et d'usinage de l'outil EBTF.

Question 5.7 : **Citer** au moins 3 types de matériaux à outils de coupe, et indiquer leur composition chimique (grandes lignes), leur procédé d'obtention, et leurs caractéristiques techniques relatives.

L'entreprise souhaite estimer le coût horaire de la machine W20/4, se basant sur son prix d'achat, sa valeur actualisée (liée à sa décote), ses coûts cumulés de maintenance préventive et maintenance corrective, et enfin ses frais d'installation. (**Voir DT16**)

Question 5.8 : **Calculer** dans un horizon de 10 ans, le coût horaire annuel moyen, en fonction de l'âge de la machine.

Cette approche ne prend volontairement pas en compte l'ensemble des données technico-économiques possibles.

Question 5.9 : **Indiquer** quelles autres données sont habituellement utilisées dans ce type de calcul, et **caractériser** comment les résultats trouvés à la question précédente doivent être interprétés.

L'entreprise procède régulièrement à des campagnes de vérification de capabilités. La méthode retenue est celle définie dans la spécification technique ISO/TS 16949. Des éléments figurent sur le **DT17**. Le calcul proposé ici est un calcul de capacité à court terme, les 42 pièces de l'échantillon ayant été réalisées successivement, dans un laps de temps très court.

Formulaire

$$C_p = \frac{\textit{Tolérance}}{\textit{Dispersion court terme}} = \frac{LSS - LSI}{6 \cdot \sigma_{\textit{Court terme}}}$$

$$C_{pk} = \min \left(\frac{\textit{Moyenne} - LSI}{3 \cdot \sigma_{\textit{Court terme}}}; \frac{LSS - \textit{Moyenne}}{3 \cdot \sigma_{\textit{Court terme}}} \right)$$

$$C_{pm} = \frac{C_p}{\sqrt{1 + 9 \cdot (C_p - C_{pk})^2}}$$

L'objectif Six Sigma ($z > 6$) avec un décentrage de $1,5 \cdot \sigma$ peut se traduire par la relation :

$$z > 6 \rightarrow C_p > 2 \text{ et } C_{pk} > 1,5 ; C_{pm} > 1,11$$

Question 5.10 : Indiquer les différences que l'on peut observer avec ces résultats lors d'un calcul de capacité à long terme (indicateurs de performance). Préciser les causes de ces écarts.

Question 5.11 : Calculer les indicateurs de capacité courts termes C_p , C_{pk} et C_{pm} . Interpréter les résultats et conclure.

Lors de l'opération de décarottage (OP2 sur Tour vertical W20/4), l'entreprise observe une difficulté d'usinage : affaissement de la vitesse de broche et bruit important.

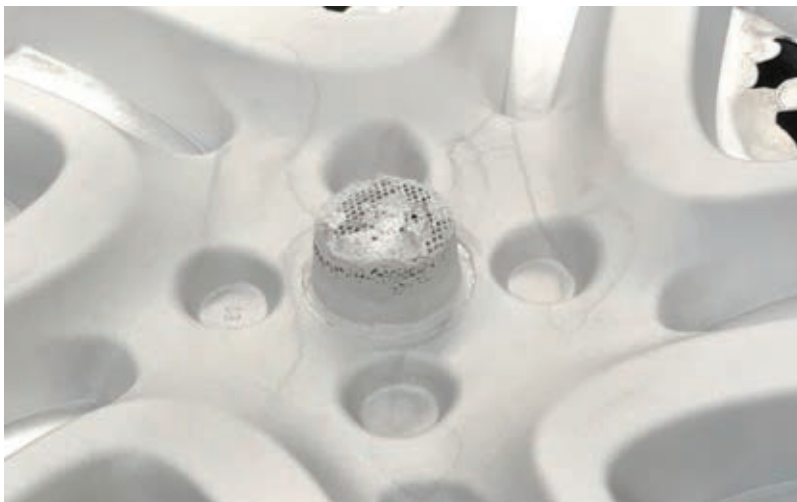


Figure 9 : Exemple de carotte d'injection.

Question 5.12 : Citer des causes probables de cette difficulté d'usinage. Proposer des modifications du processus de fabrication pouvant la réduire.

DOCUMENTS TECHNIQUES

DT1 : Dessin de définition du produit : jante client usinée

DT2 : Extrait du cahier des charges

DT3 : Comportement au couple de serrage (2 pages)

DT4 : Étude de fatigue par corrélation (2 pages)

DT5 : Mécanique de la rupture

DT6 : Analyse fréquentielle

DT7 : Équilibrage dynamique (2 pages)

DT8 : Tolérances sur le brut

DT9 : Simulation de solidification

DT10 : Éjection de la pièce

DT11 : Guidage et dilatation

DT12 : Diagramme binaire Aluminium-Silicium

DT13 : Influence du Revenu sur Re et A%

DT14 : Essai de traction

DT15 : Processus d'usinage (5 pages)

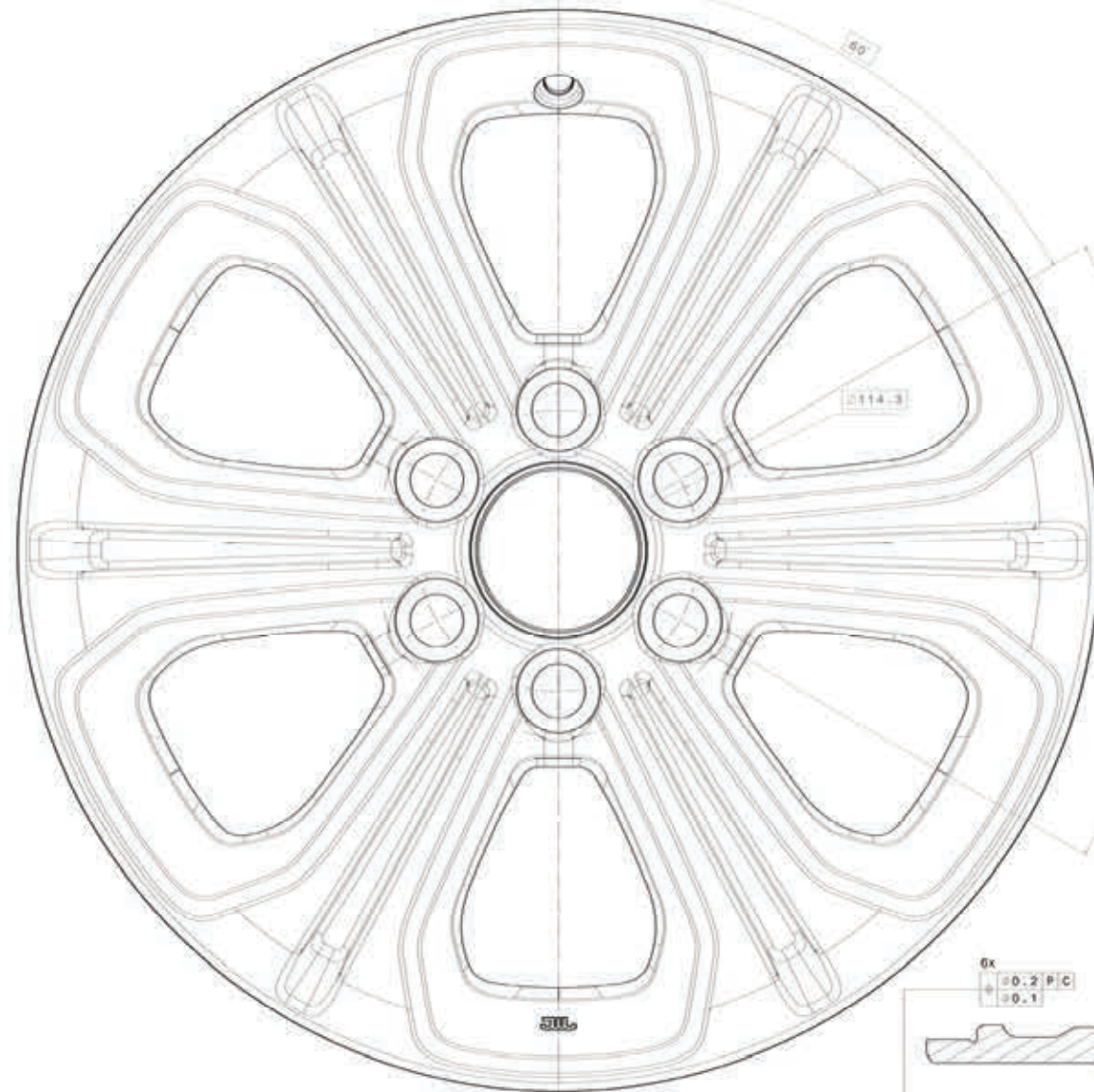
DT16 : Coût horaire

DT17 : Capabilités

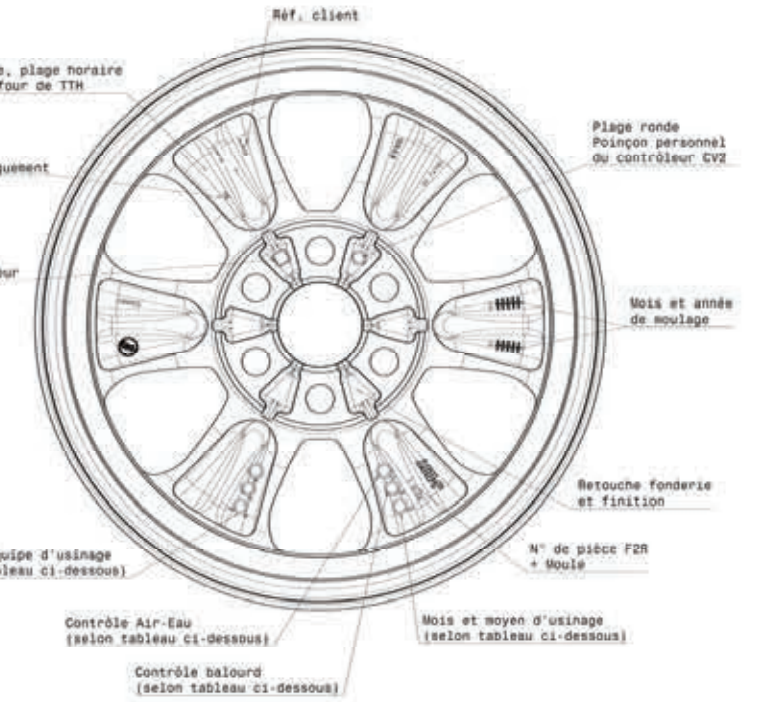
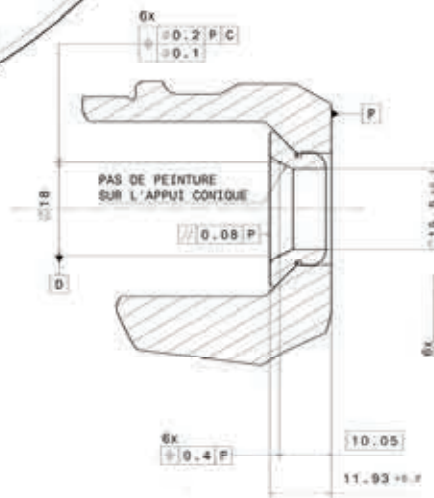
DT 1



Vue isométrique



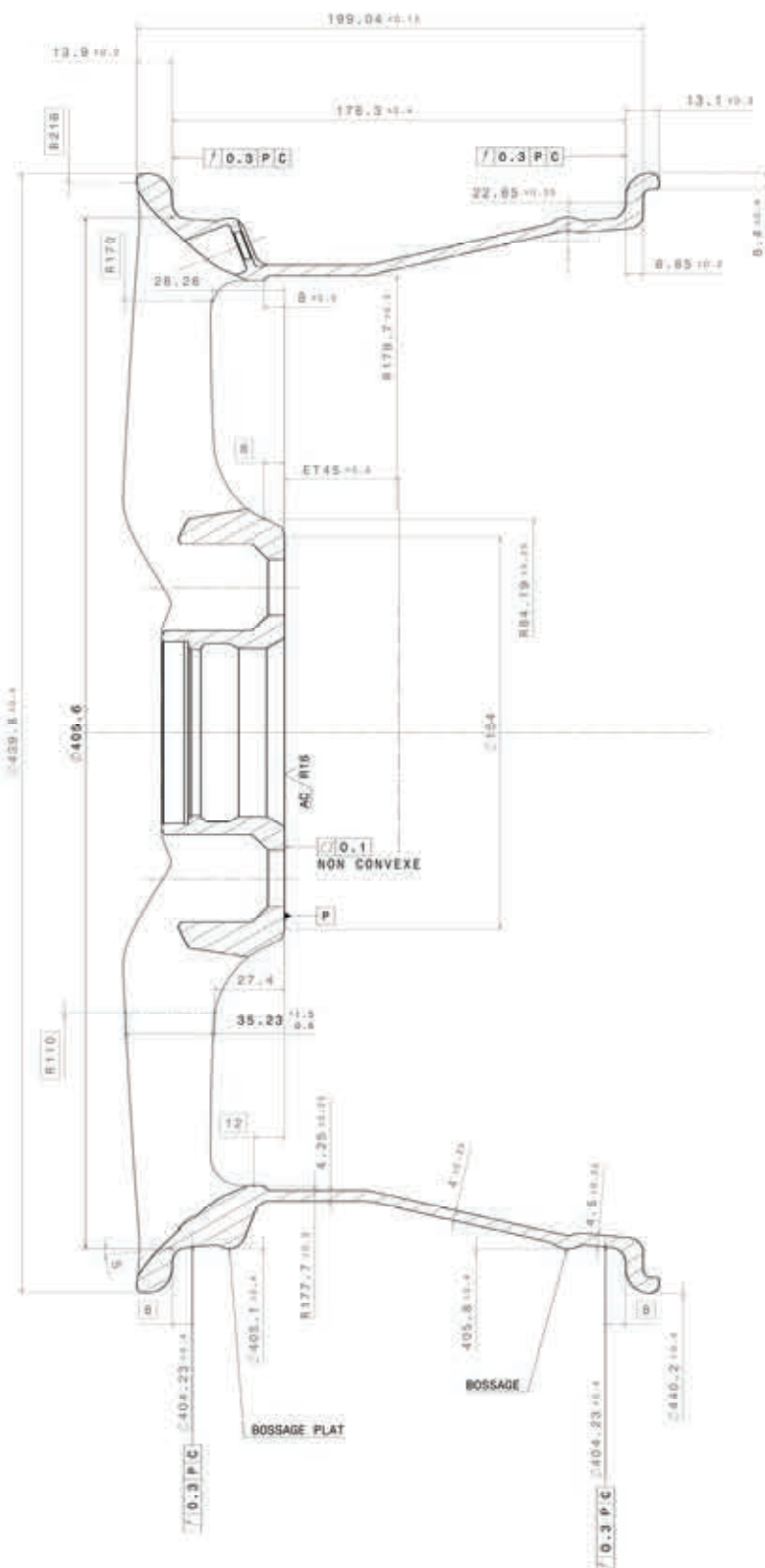
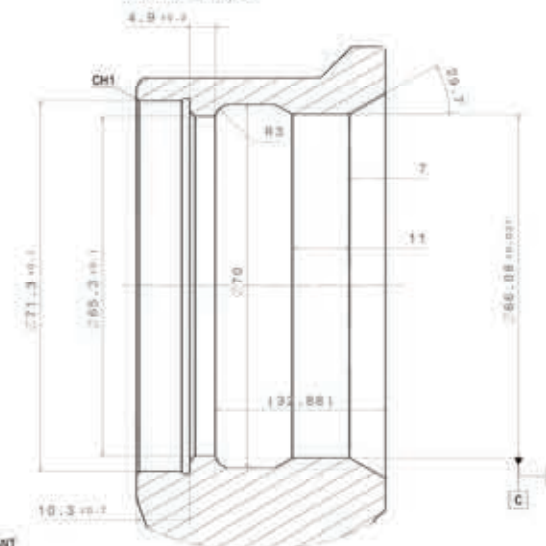
TROU DE FIXATION AVEC INSERT



DETAIL TROU DE VALVE



DETAIL MOYEU



MARQUAGE / STAMPS (FRANCE)	
A	REPERE EQUIPE MATIN / MORNING SHIFT
B	REPERE EQUIPE SOIR / EVENING SHIFT
N	REPERE EQUIPE NUIT / NIGHT SHIFT
X	REPERE RADIO / X-RAY STAMP
C	REPERE CONTROLE / CONTROL STAMP
B	REPERE BALOURD / BALANCE STAMP
E	REPERE PRESSION (AIR/EAU) / PRESSURE TEST (AIR/WATER)
+ 2 CALENDRIERS / + 2 CALENDARS	

- MATIERE:**
EN AC A1517M03 ETAT T6
- ESSAI ETANCHEITE:**
3 bar PENDANT 25 SECONDES (AIR/EAU) OU FUITE AUTORISEE CORRESPONDANT A UNE PERTE DE PRESSION DE 0.2 bar SUR 6 MOIS (AIR/HELIUM)
- BALOURD STATIQUE MAXI:**
700 g.cm soit 30g - CONTROLE AVEC VALVE 27g
- ENCOMBREMENT DES FREINS:**
SUIVANT ENVELOPPE MAXI ROUE GARANTI SUR 360°
- TOLERANCES GENERALES:**
TOLERANCES NON SPECIFIEES: 0.5
TOLERANCES GENERALES ANGULAIRES: 1°
DEPOUILLE GENERALE: B°
ETAT DE SURFACE: FACE AVANT SI USINEE

PLAN USINE	
ROUE / WHEEL	


DT2 - Extrait du cahier des charges

1 - MATÉRIAU

EN AC AISi7Mg03 État T6 conforme aux spécifications du constructeur
Masse volumique minimale : $2\,650\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

2 - TOLÉRANCES GÉNÉRALES

Tolérances non spécifiées

Surfaces usinées : $\pm 0,5\text{ mm}$ Surfaces brutes : $\pm 0,8\text{ mm}$
Tolérances angulaires : $\pm 1^\circ$ Dépouille générale : 8°
Rugosité de la face style 

3 - PIÈCES COMPATIBLES

Pneus : 205/70 R16 111H

4 - LE MATÉRIAU DOIT ÊTRE CONFORME À LA NORME CONSTRUCTEUR

Dureté 85 HB

Les propriétés mécaniques d'un échantillon test (Cylindre $\varnothing 13,8\text{ mm}$, issu du matériau de fonderie) :

Résistance à la traction R_e : 240 MPa R_m : 280 MPa

Allongement : 3%

5 - ESSAI DE FATIGUE

Couple de serrage : 147 N·m Moment (charge) : 3,65 kN·m

Nombre de cycles : $F(t) 5\% > 280.000$ cycles

Diamètre de la surface d'appui : $>\varnothing 154\text{ mm}$

6 - ESSAI DE CHOC TROTTOIR À 13°

Masse d'essai : 720 kg Pneu : 255/70/R16

Pression : 19 610 kPa Couple de serrage : 118 N·m

7 - ESSAI D'ENDURANCE

Distance : 1 500 km Charge : 21,19 kN

Pneu : 255/70 R16 Pression : 490 kPa

8 - TEST DE RIGIDITÉ DU SIÈGE D'ÉCROU (DT3)

Couple élastique minimum : 176.5 N·m

Variation minimale du couple : 225.6 N·m à 576 N·m

Déformation maximale à 576 N·m : 2 mm

9 - ESSAI DE FATIGUE APRÈS ESSAI D'IMPACT à 90°

Hauteur d'essai : 66.5 mm

Masse d'essai : 900 kg (Masse principale) + 100 kg (Masse auxiliaire)

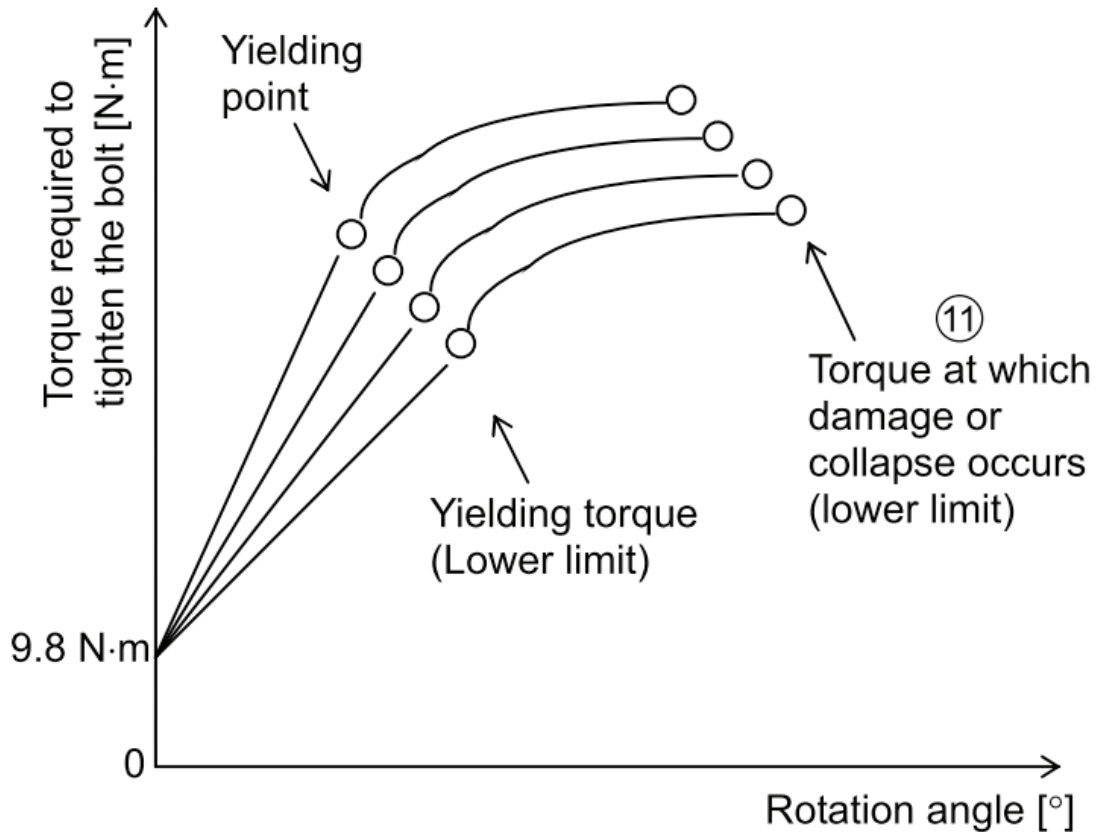
Nombre de cycles : 2 000 000

Pneu : 255/70 R16

Moment : 1 910 N·m

DT3 Comportement au couple de serrage – 1/2

Exigence de résistance au serrage de l'écrou : (Extrait du cahier des charges client) : Fixer la roue sur une surface plane avec les écrous spécifiés. Serrer les écrous jusqu'à obtenir un couple de 9,8 N·m, puis augmenter le couple et mesurer l'angle de rotation de l'écrou.



NUT SEAT RIGIDITY TEST

MINIMUM YIELD TORQUE: 176.5Nm

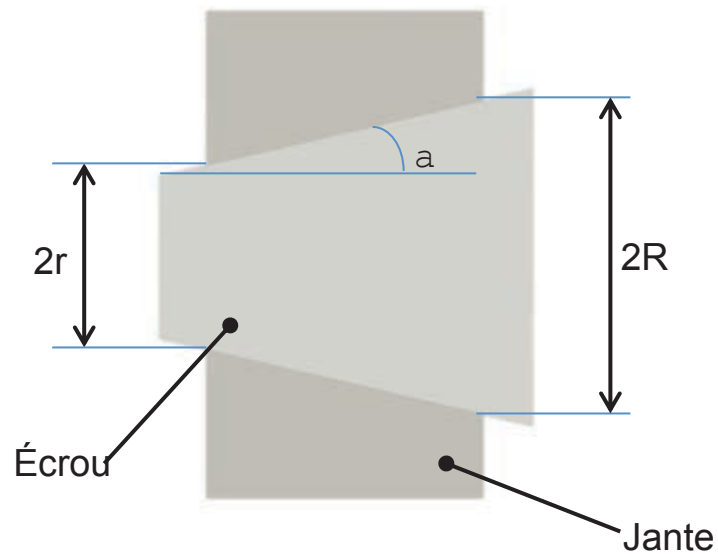
MINIMUM DEPRESSION TORQUE : 225.6Nm AT 576°

EQUIVALENT DEPRESSION AT 576° : 2mm

Hypothèses de serrage de l'écrou :

- 80% des frottements ont lieu dans la surface de contact conique et 20% dans le filetage ;
- Au niveau du cône, la répartition de la pression est uniforme.

DT3 Comportement au couple de serrage – 2/2



Notations :

- P : pression de contact lors du serrage ;
- F : effort axial de l'écrou sur la jante ;
- f : coefficient de frottement (0,4) ;
- α : angle du demi-cône (28°) ;
- $R=10$ mm et $r=7,5$ mm.

On admet

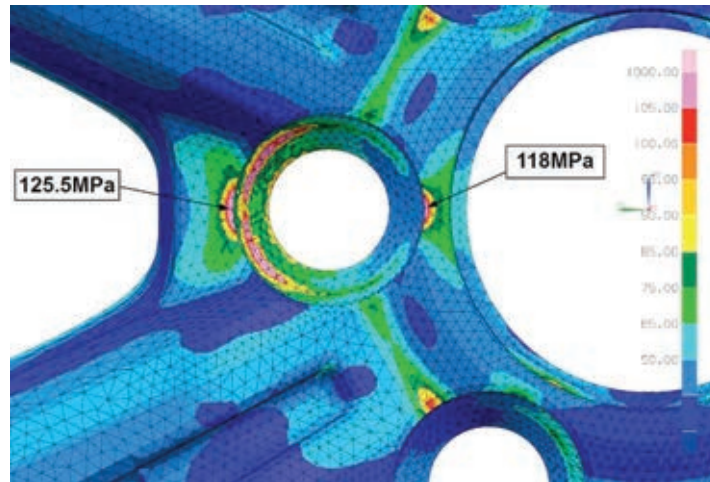
$$P = \frac{F \cdot \tan(\alpha)}{\pi(R^2 - r^2) \cdot f + \tan(\alpha)}$$

DT4 Étude de fatigue par corrélation – 1/2

Le client demande que lors de l'essai sous une charge de 3.65 kN·m, les pièces ne fissurent pas (à 95%) après 280 000 cycles.

Contraintes sous cas de charge statique :

ROTARY BENDING TEST
 TIGHTENING TORQUE: 147Nm
 MOMENT: 3.65kNm <1>
 NUMBER OF CYCLES: F(t) 5%>280,000 times



Plusieurs essais de fatigue sur banc d'essai ont été menés avec trois cas de chargement afin d'estimer la durée de vie de la roue.

- 7 pièces testées à 4.11 kN·m (Contraintes en calcul =125 MPa)
- 2 pièces testées à 5.34 kN·m (Contraintes en calcul =167 MPa)
- 2 pièces testées à 6.17 kN·m (Contraintes en calcul =187 MPa)

Les pièces utilisées pour les essais sont issues de la fabrication série et prélevées de façon aléatoire.

Tableau résumé des essais et du nombre de cycles à rupture :

Rotary Bending test results					
N°	Reference	Overload coef	Stress (Mpa)	Moment (kN.m)	Cycle number
1	11L392	1	125	4,11	1 093 107
2	10L392	1	125	4,11	1 215 884
3	5L392	1	125	4,11	1 303 800
4	4L392	1	125	4,11	1 708 136
5	7L392	1	125	4,11	2 394 272
6	1L392	1	125	4,11	2 695 000
7	9L392	1	125	4,11	3 519 085
8	3L392	1,3	167	5,34	461 168
9	2L392	1,3	167	5,34	828 370
10	8L392	1,5	187	6,17	339 840
11	6L392	1,5	187	6,17	483 714

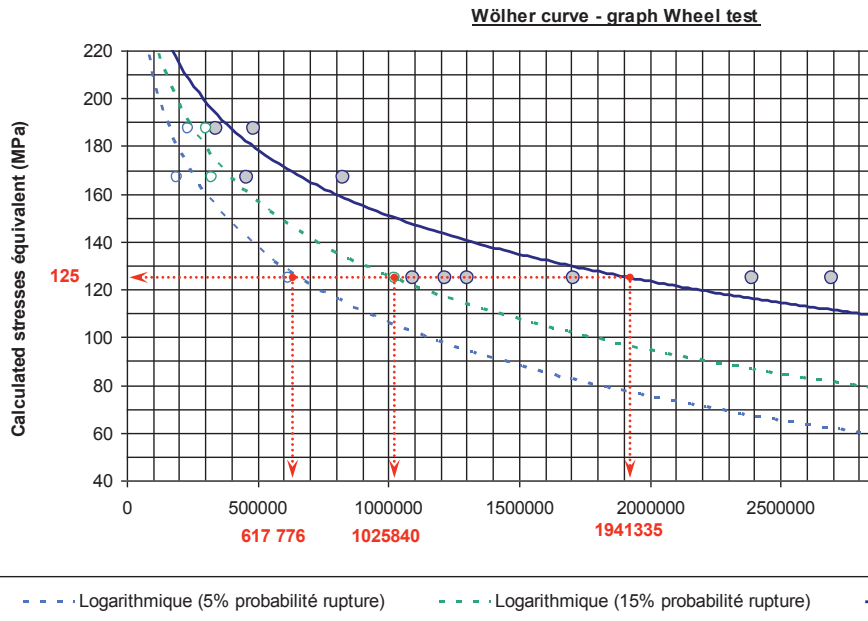
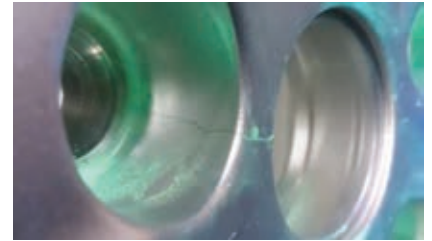
Overload coef : coefficient de surcharge

Stress : Contrainte

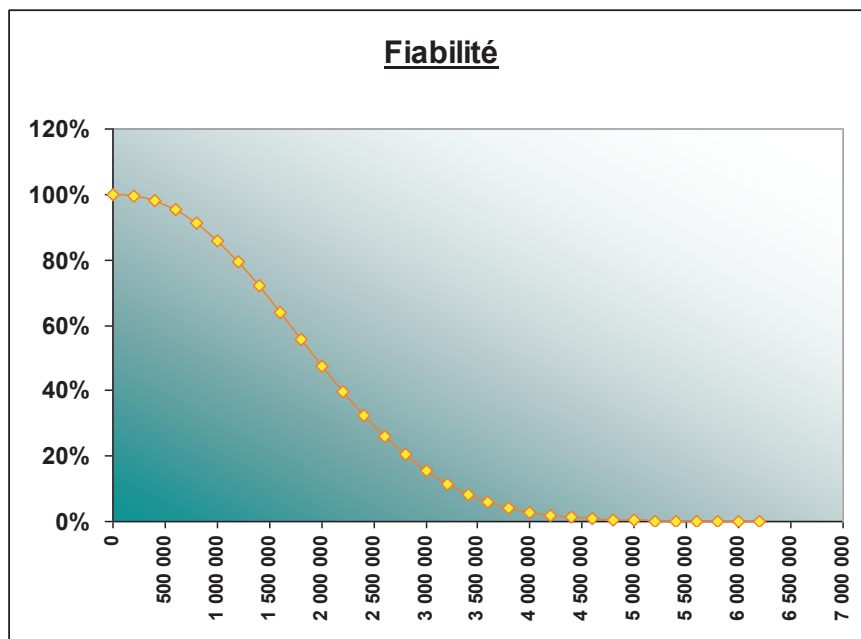
DT4 Étude de fatigue par corrélation – 2/2

Les fissures s'initient sur les zones mises en évidence par les simulations statiques.

D'après la loi de Weibull, pour avoir un B15 (85% de pièces non cassées) on peut leur faire subir 1 025 840 cycles pour une exigence à 840 000 cycles.



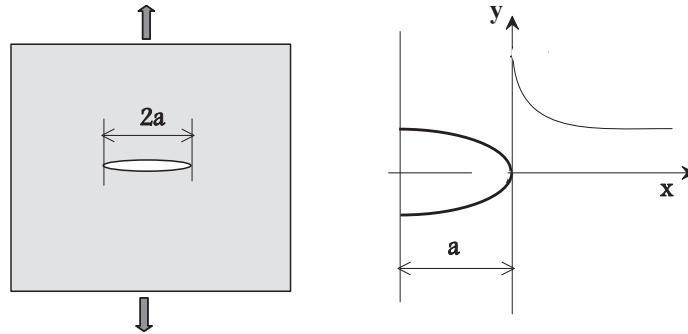
D'après la loi de Weibull, pour un B15 à 840 000 cycles, 9.8% des pièces vont casser.



Nota : cette courbe indique la probabilité qu'une jante ne fissure pas en fonction du nombre de cycles.

DT5 Mécanique de la rupture

Influence de la présence d'un défaut de type « fissure » sur la concentration de contrainte dans le matériau.

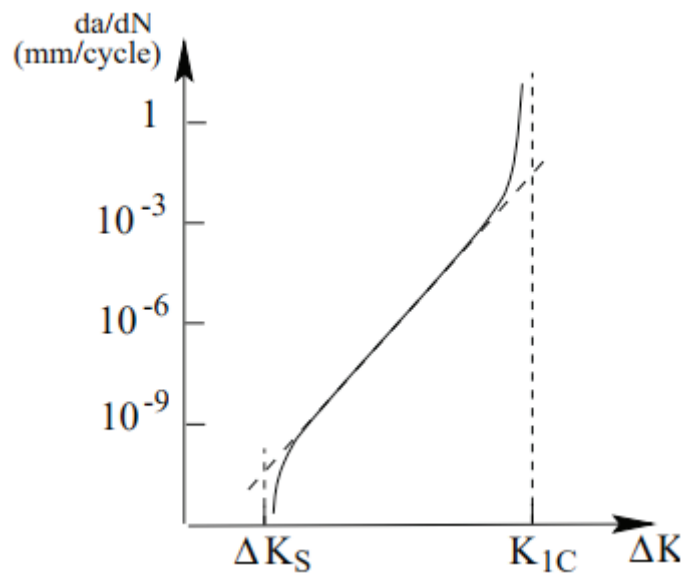


Facteur d'intensité de contrainte : $K_{IC} = \sigma\sqrt{\pi a}$

Le seuil de propagation de la fissure en sollicitation alternée est :

$$\Delta K_S = 4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$$

Loi de propagation de fissure



La partie linéaire est modélisable de la forme :

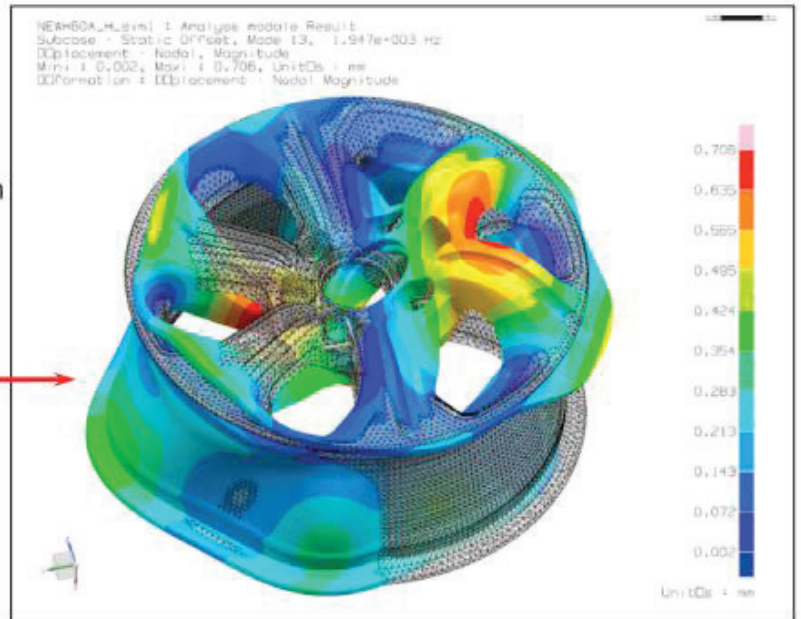
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Avec $m=3$ et $C=2,9 \cdot 10^{-9}$

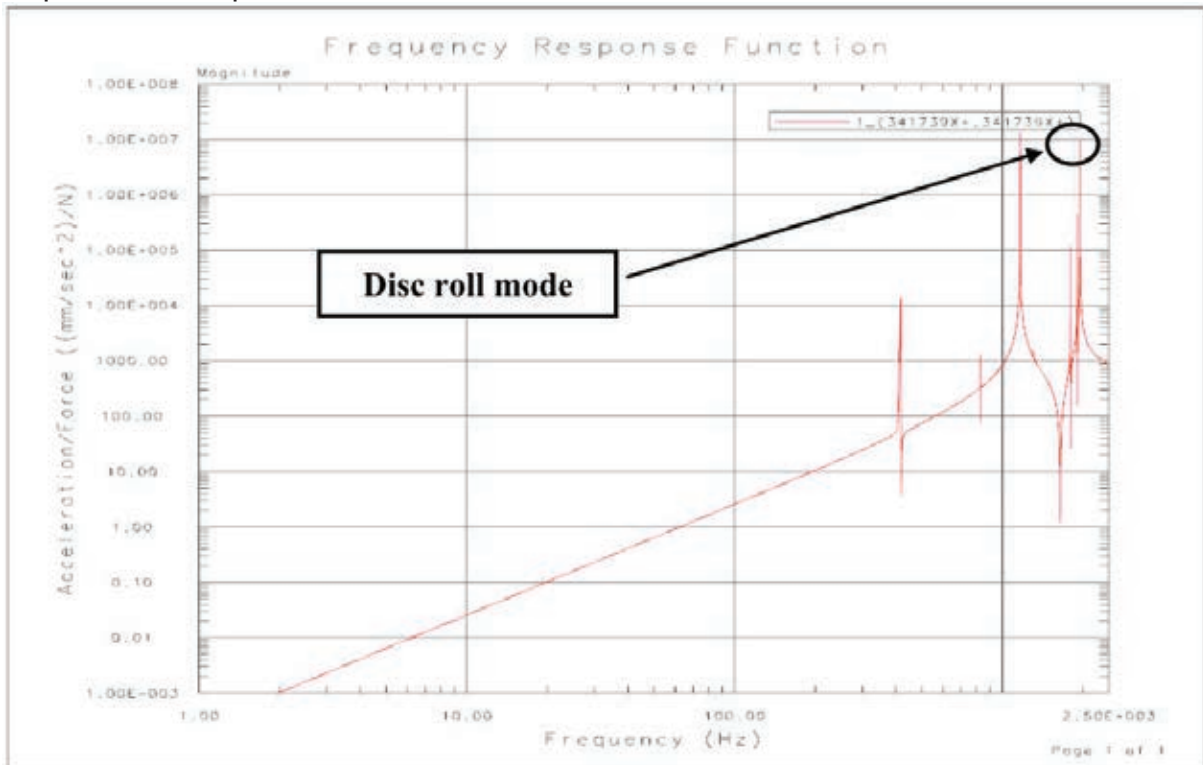
DT6 Analyse fréquentielle

Analyse modale :

- 418.4 Hz: first resonance of rim
- 828.5 Hz: second resonance of rim
- 1165Hz: resonance of disc
- 1306 Hz: third resonance of rim
- 1798Hz: fourth resonance of rim
- 1903Hz: fifth resonance of rim
- 1947 Hz: resonance of disc**
Disc roll mode

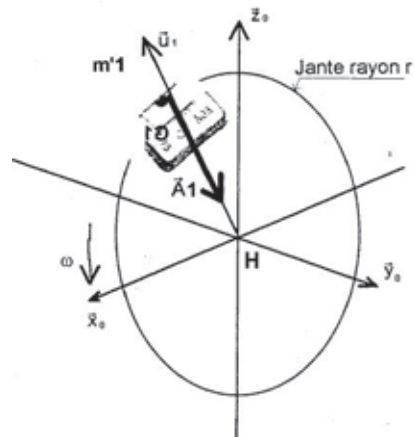


Réponse en fréquence de la roue :

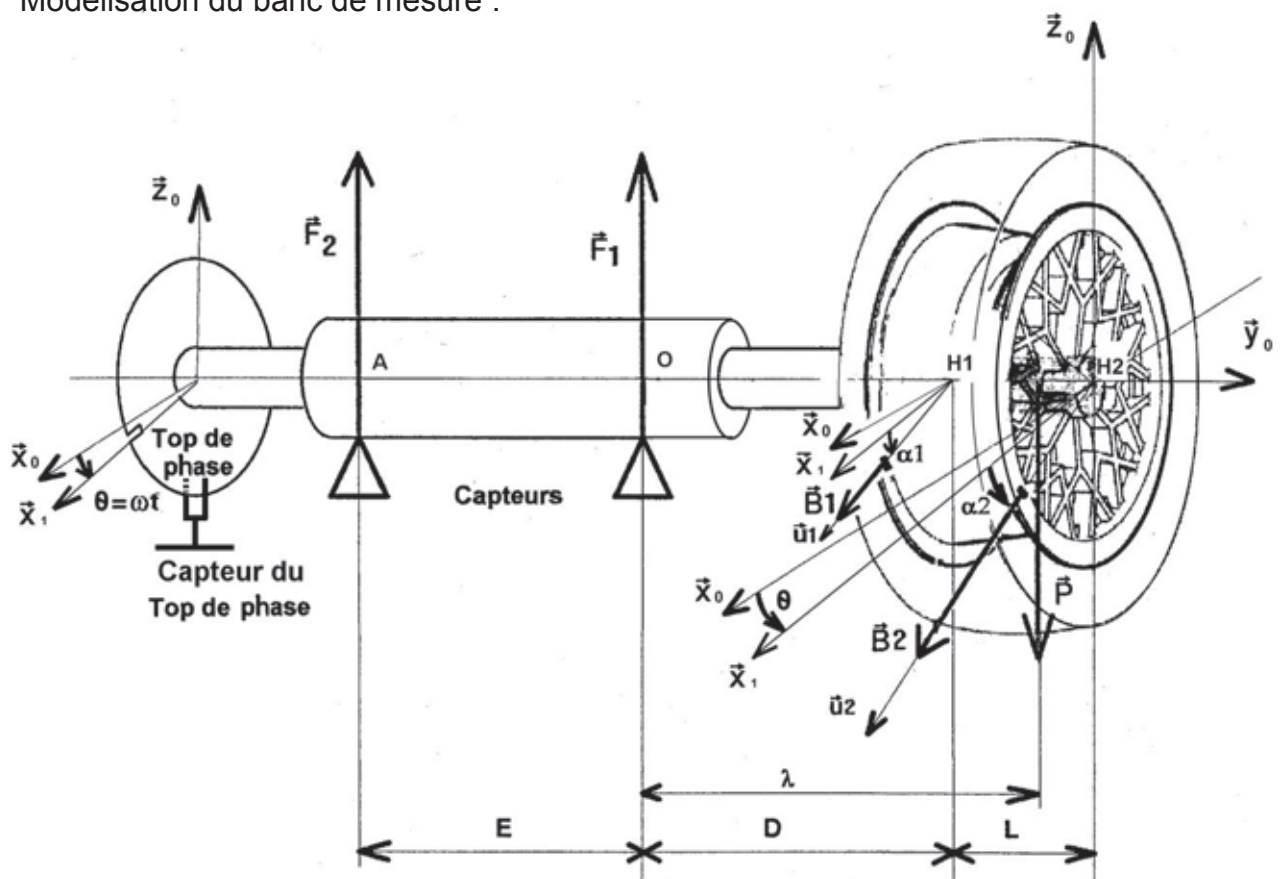


DT7 Équilibrage dynamique – 1/2

Une masse m génère un balourd :

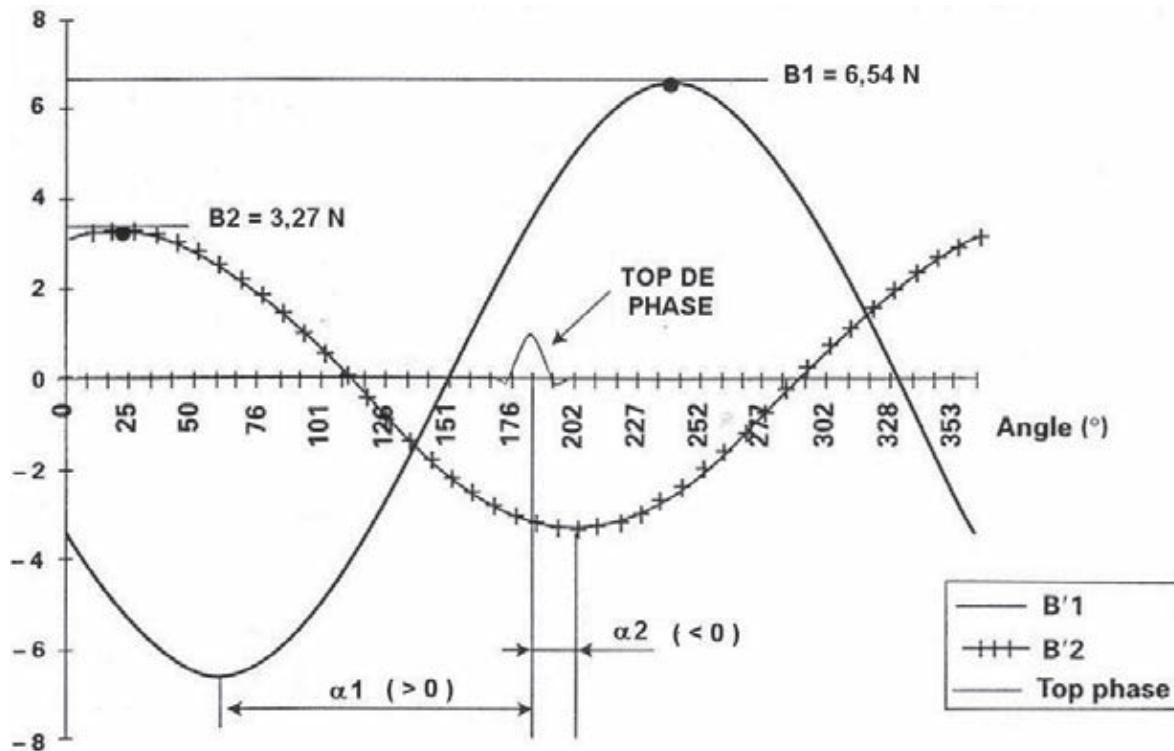


Modélisation du banc de mesure :

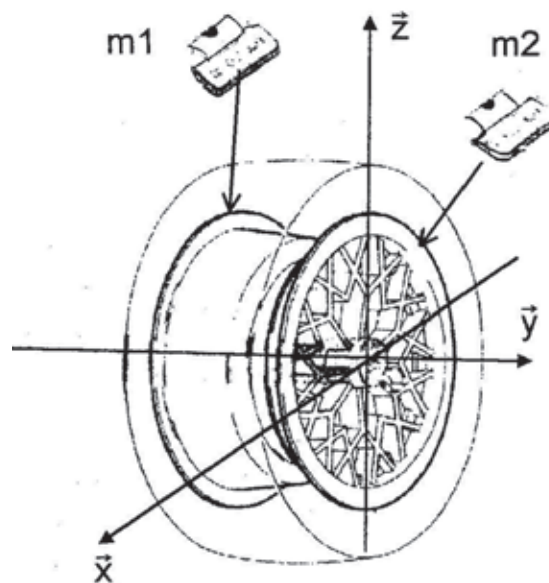


DT7 Équilibrage dynamique – 2/2

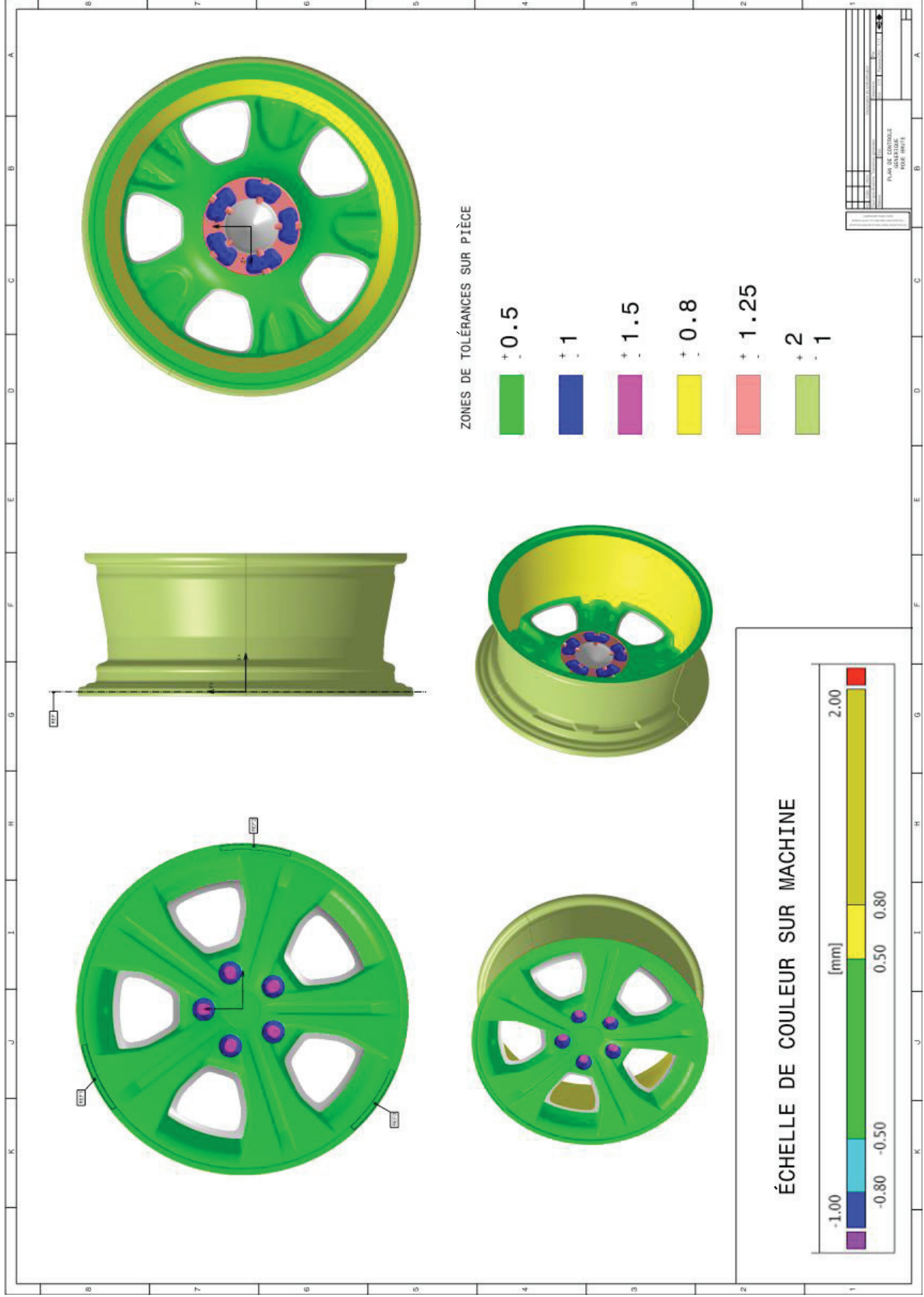
Courbe obtenue pour un essai à $140 \text{ tr}\cdot\text{mn}^{-1}$.



Pour équilibrer la roue, deux masselottes ($m1$) et ($m2$) seront fixées à la jante dans des plans radiaux différents : les rebords intérieur et extérieur de la jante.

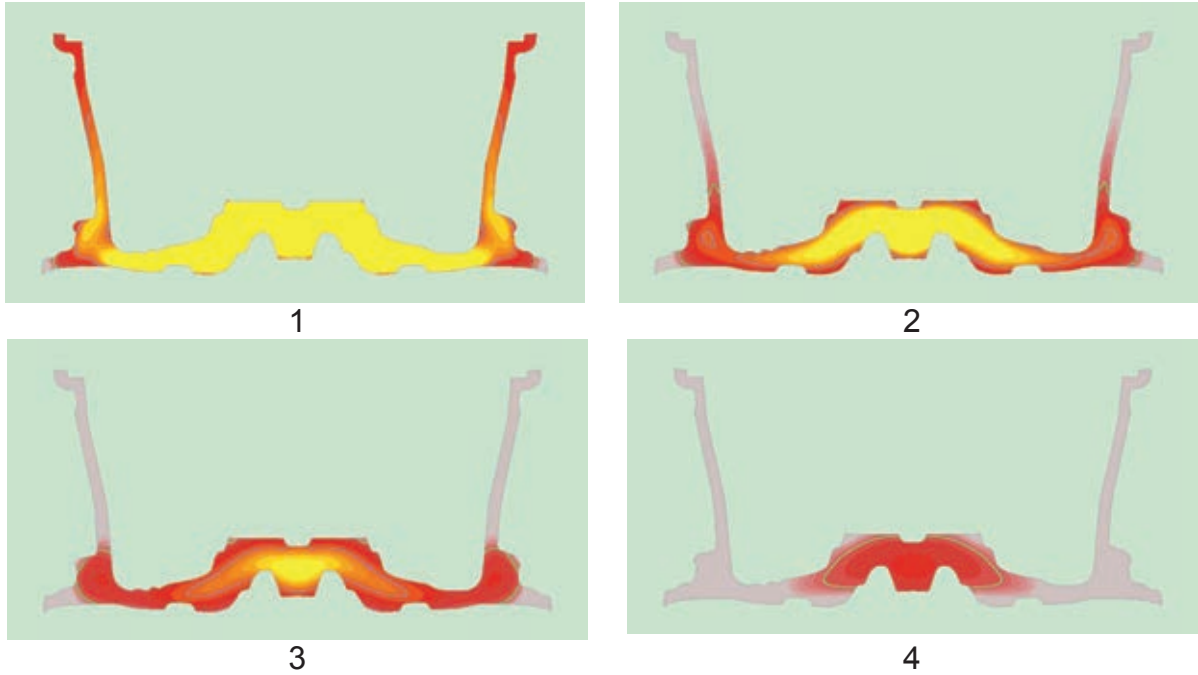


DT8 Tolérances sur le brut

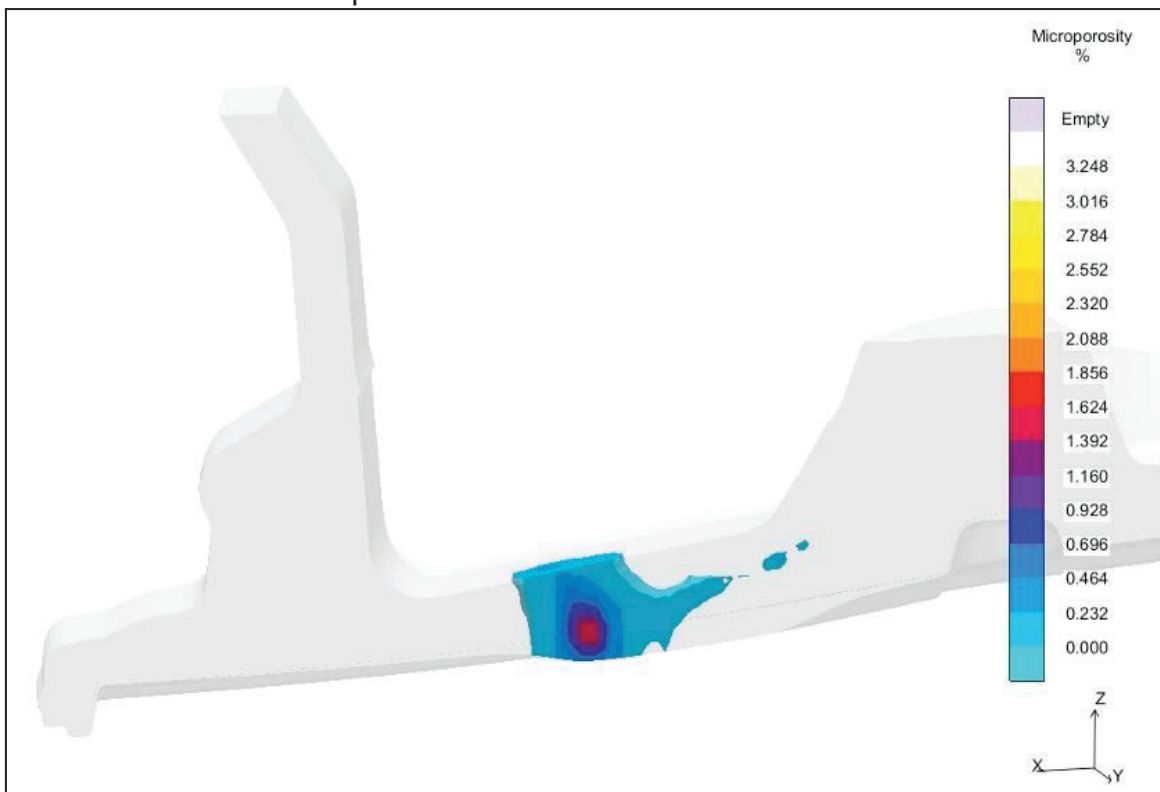


DT9 Simulation de solidification

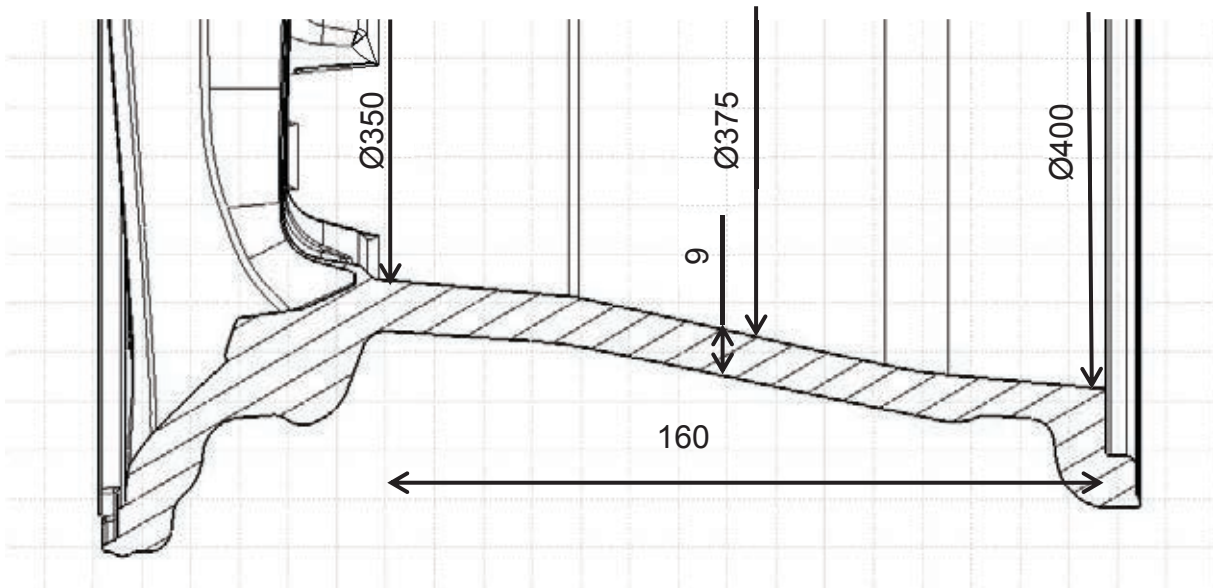
Représentation de l'évolution de la fraction liquide dans le moule lors du refroidissement :



Prévision de microporosités :



DT10 Éjection de la pièce



Hypothèses :

- pression de serrage uniforme ;
- diamètre mini= 350 mm ;
- diamètre maxi= 400 mm ;
- épaisseur moyenne 9 mm ;
- hauteur de serrage 150 mm ;
- coefficient de frottement : 0,25.

On considère que la jante a un diamètre moyen de 375 mm et que le serrage (s) est de 1 mm.

On montre que la pression de serrage peut être estimée par

$$P = \frac{s \cdot (D^2 - d^2)}{d \cdot ((a_j - a_n) \cdot d^2 + (b_j + a_n) \cdot D^2)} \quad \text{s étant la différence de diamètre (serrage)}$$

Avec :

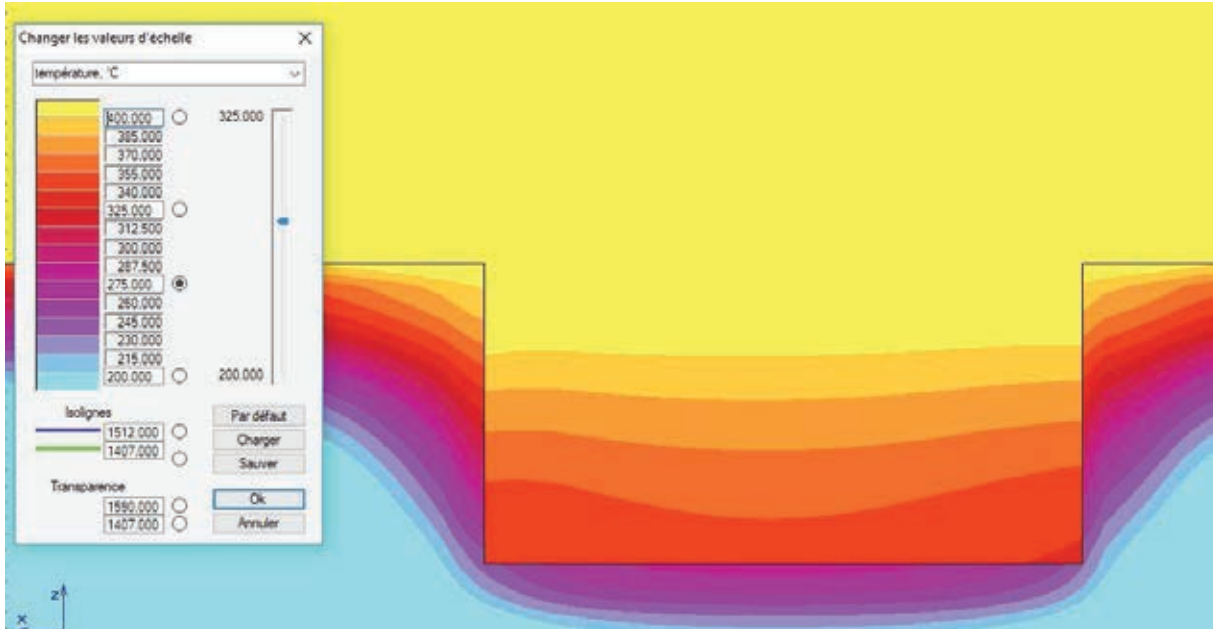
$$\text{Pour la jante, } a_j = \frac{1 - \nu_j}{E_j}, \quad b_j = \frac{1 + \nu_j}{E_j}$$

$$\text{Pour le noyau } a_n = \frac{1 - \nu_n}{E_n}$$

$$\nu_n = 0,35, \quad \nu_j = 0,25, \quad E_n = 210\,000 \text{ MPa et } E_j = 70\,000 \text{ MPa}$$

DT11 Guidage et dilatation

Une simulation de la température de l'outillage pendant la production donne les températures d'outillage suivantes :

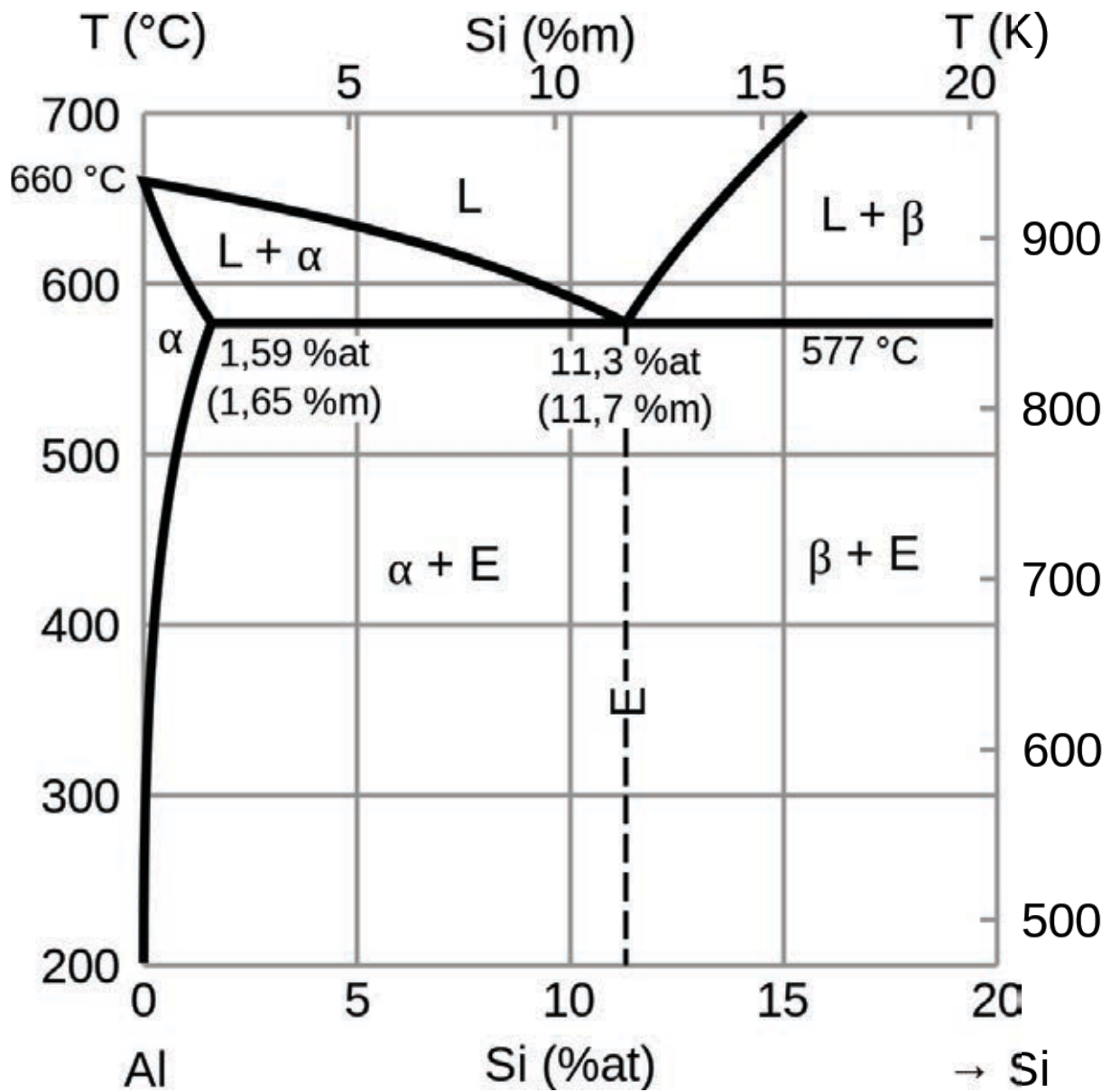


Les chapes sont guidées sur la semelle par des rainures de 30mm de large et 10 mm de profondeur. Lors des coulées, il y a un écart de température de 100°C environ entre les chapes et la semelle. (Respectivement 350°C et 250°C).

Données :

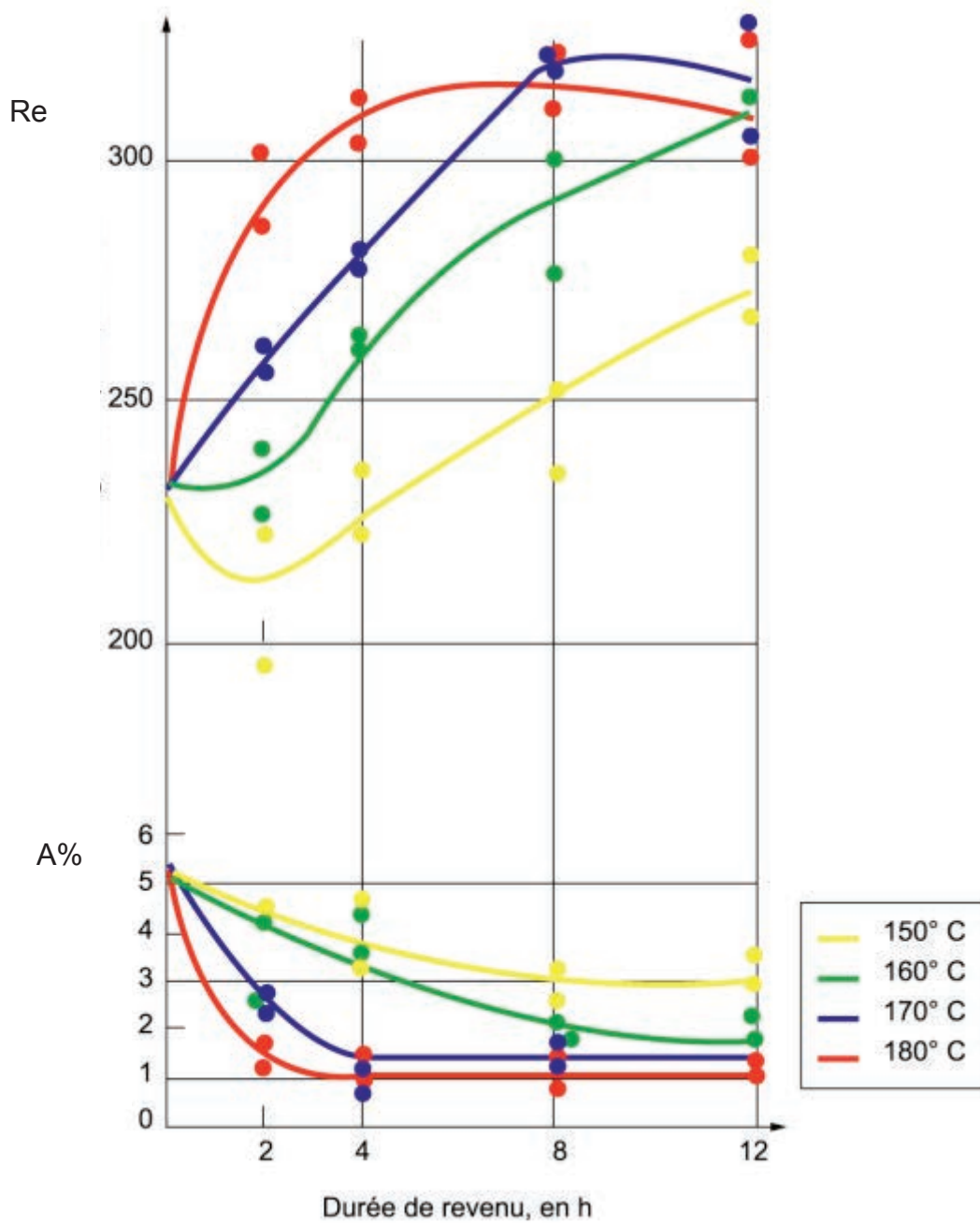
- coefficient de dilatation linéaire (degrés Kelvin) de l'outillage est : $11 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$;
- module d'élasticité de l'outillage : $E = 210 \text{ GPa}$.

DT12 Diagramme binaire Aluminium Silicium



DT13 Influence du Revenu sur Re et A%

Influence de la durée et de la température du revenu sur les caractéristiques mécaniques de l'échantillon test.

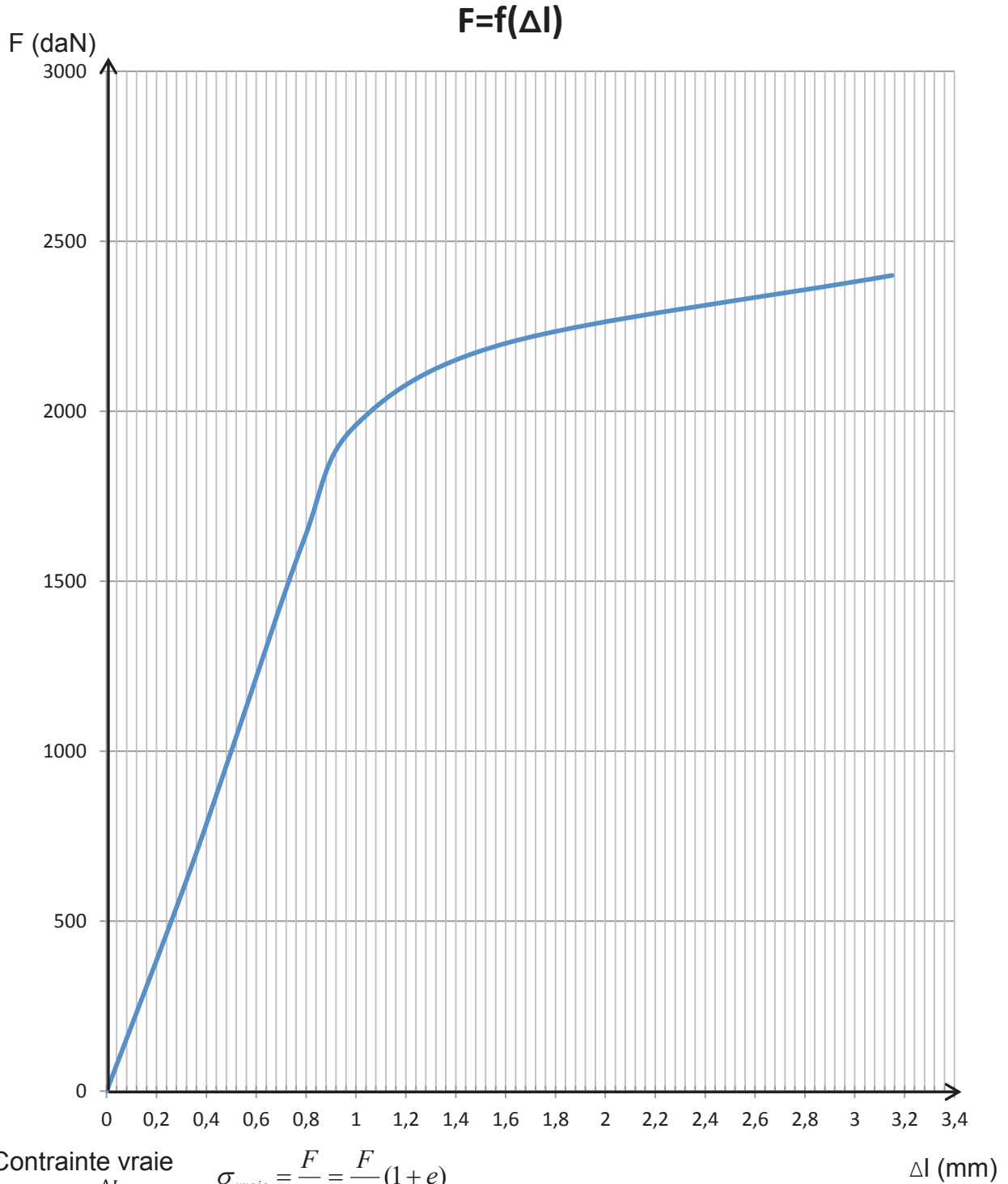


DT14 Essai de traction

Effort en fonction du déplacement de la traverse de la machine

Diamètre de l'éprouvette : 10 mm

Longueur utile L_0 : 50 mm



Contrainte vraie

avec $e = \frac{\Delta L}{L_0}$

$$\sigma_{vraie} = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0}(1+e)$$

Δl (mm)

Déformation rationnelle

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = Ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = Ln(1+e)$$

DT15 Processus d'usinage - 1/5

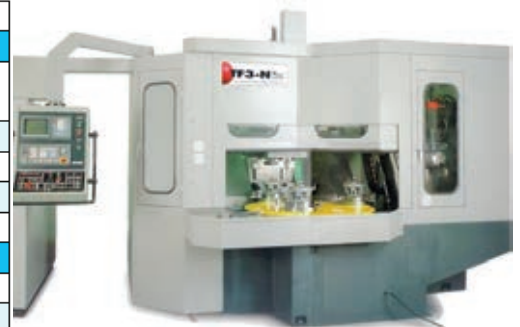
Tour Vertical W20/4

BROCHE	
Diamètre maximal à tourner	540 mm
Diamètre maximal admis	640x200 mm du plan auto centreur
Puissance moteur broche	37 KW
Fréquence max. broche	Version standard - 2500 t/min
Attache broche	A11 DIN 55021 (ASA 11")
GLISSIERES	
Courses axes "X1 - X2"	450 mm
Courses axes "Z1 - Z2"	450 mm
Couple moteur axe	12 Nm (X) - 12 Nm (Z)
Charge axiale	1000 N
Vitesses rapides	14 m/min
Pas des vis à billes	6 mm (X) - 6 mm (Z)
Nombre de glissières en croix	2
TOURELLE	
Nombre d'outils en tourelle	Droite 6 - Gauche 6
Poids outil moyen	~ 4 Kg
DONNEES GENERALES	
Poids total machine	~ 10.000 Kg



Centre de perforation TF3-N

UNITE DE PERFORATION DES TROUS DE FIXATION	
BROCHE	
Fréquence maxi	8.000 t/min (10.000 t/min option)
Puissance	11KW
Réfrigérant à travers le mandrin (option)	12 bars
Connexion rapide changements outils	ISO 40
Magasin outils	12 positions
GLISSIERES	
Course axe "X"	550 mm
Course axe "Y"	400 mm
Course axe "Z"	450 mm
Avances rapides	15 m/min
Charge axiale max.	1200 daN
UNITE PERFORATION VALVE	
No.2 MANDRINS DE PERFORATION TROU VALVE ET CONTRE LAMAGE	
Connexion cylindrique	Ø 32 mm
Vitesse programmable	1.000 - 3.500 t/min
Puissance moteur	3,5 KW
GLISSIERES	
Course travail axe "X"	300 mm
Course travail axe "Y"	240 mm
Course travail axe "Z"	215 mm
Axe positionnement angulaire auto. "W"	0° - 45°
DONNEES GENERALES	
Poids total	~ 13.000 Kg
Tension d'alimentation standard	400 V - 50 Hz

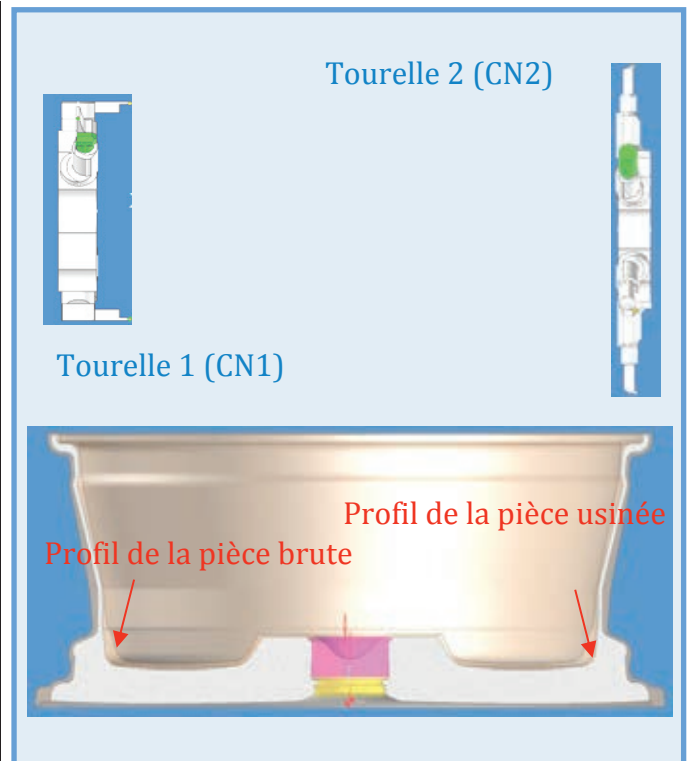


DT15 Processus d'usinage - 2/5

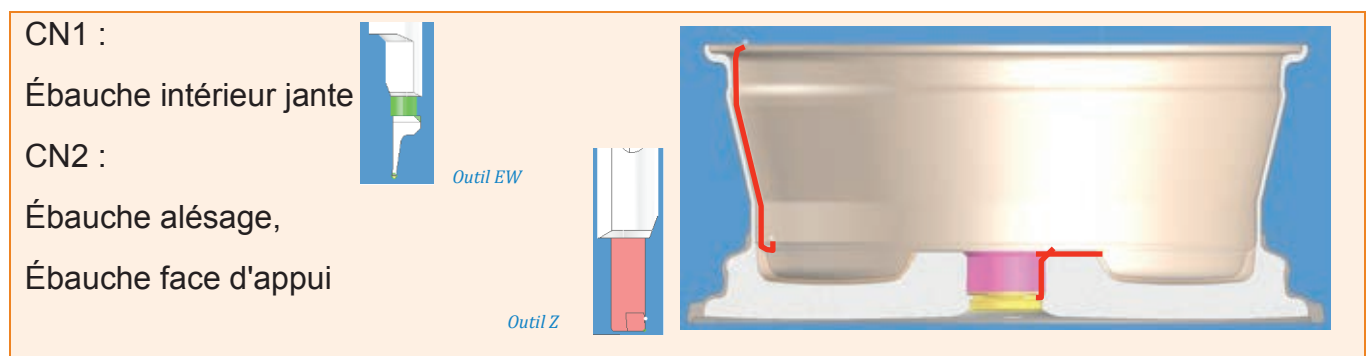
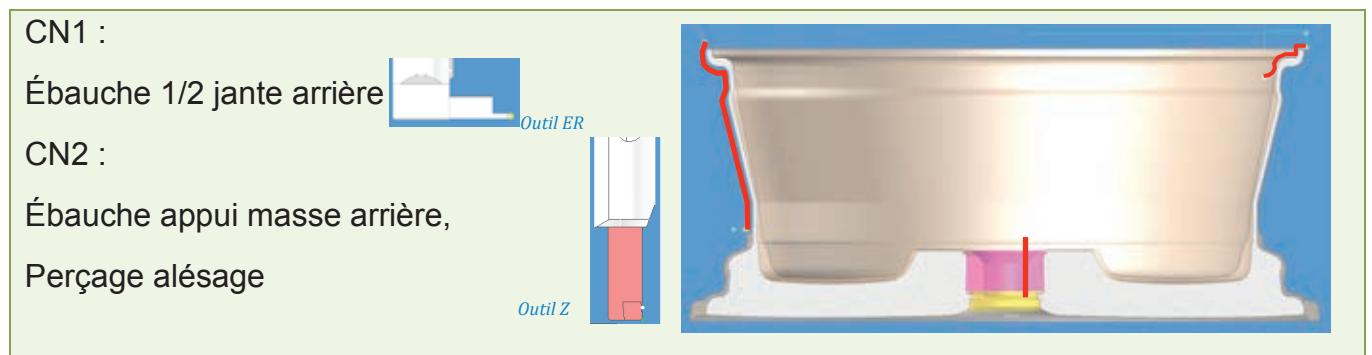
Présentation de la gamme d'usinage :

OP1 (sur Tour vertical W20/4)

Position	N° outil	Désignation des opérations
Tourelle 1 (CN1)		
T1100	ER	Ébauche 1/2 jante arrière
T1200	EW	Ébauche intérieur jante, Ébauche moyeu
T1400	R	Finition 1/2 jante arrière
T1500	W	Finition moyeu
Tourelle 2 (CN2)		
T2200	EA	Finition rayon lumières, Intérieur jante, Face d'appui
T2400	E	Chanfrein et Alésage
T2600	Z	Ébauche appui masse arrière, Perçage alésage, Ébauche alésage, Ébauche face appui




Chronologie des usinages :



DT15 Processus d'usinage - 3/5

CN1 :
Ébauche moyeu

CN2 :
Finition face d'appui,
Finition intérieur jante



Outil EW

Outil EA

CN1 :
Finition moyeu

CN2 :
Finition rayon lumière



Outil W

Outil EA

CN1 :
Finition 1/2 jante arrière

CN2 :
Finition chanfrein et alésage



Outil R

Outil E


DT15 Processus d'usinage - 4/5

OP2 (sur Tour vertical W20/4)


Position	N° outil	Désignation des opérations
Tourelle 1 (CN1)		
T1100	ER	Ébauche 1/2 jante avant
T1400	R	Finition 1/2 jante arrière
Tourelle 2 (CN2)		
T2100	D8	Diamètre cabochon
T2300	Z1	Décarottage
T2500	AE	Largeur + diamètre accrochage cabochon

Chronologie des usinages:

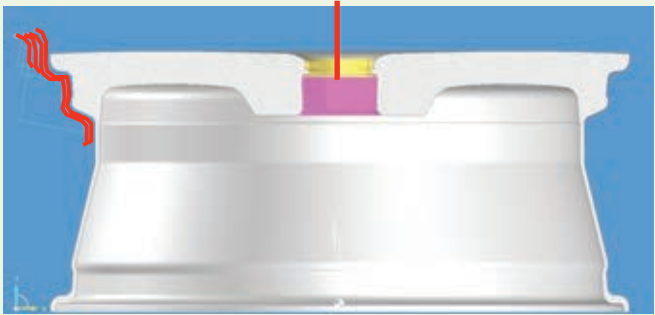
CN1 :
Ébauche 1/2 jante avant



Outil ER



Outil Z1




CN1 :
Ébauche et finition diamètre cabochon



Outil D8




CN1 :
Finition 1/2 jante avant




Outil R

CN2 :
Largeur + diamètre accrochage cabochon



Outil AE



DT15 Processus d'usinage - 5/5

OP3 (sur Centre de perforation TF3-N)

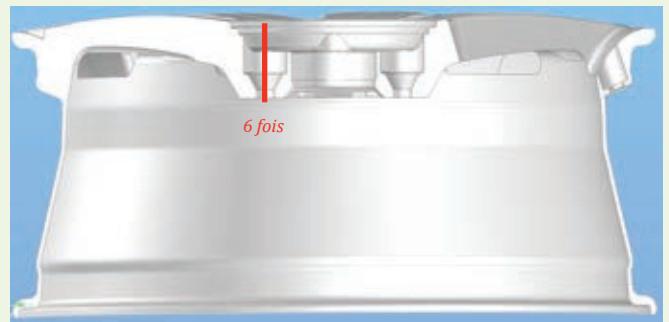
Position	N° outil	Désignation des opérations
T3100	FCTF	Fraisage combiné trou de fixation + finition
T3200	EBTF	Ébavurage trou de fixation
T3300	FTDV	Perçage trou de valve
T3400	FLTDV	Lamage trou de valve

Chronologie des usinages:

Fraisage combiné et finition du trou de fixation



Outil FCTF



Ébavurage trou de fixation



Outil



Perçage trou de valve



Outil

Lamage trou de valve

Outil FLTDV



DT16 Coût horaire

Prix d'achat de la machine : 425 000€.

Coût des interventions liées à l'installation, et réglages sur la machine neuve (Maintenances initiales) : 25 000€.

Décote annuelle de la machine : 10% du prix initial.

Données moyennes annuelles

- Base : 250 jours / an et 7 h / jour

- Maintenance préventive systématique MPS:

Contrats de maintenance, salaires équivalents, locations, etc	12 000€
Durée des interventions	60h
Coût horaire technicien	50€/h
Coût des pièces et consommables	5 500€

- Maintenance corrective MC, coût total estimé pour l'ensemble des interventions :

t (années)	MC(€)
1	10 000
2	10 000
3	10 000
4	10 200
5	10 500
6	11 000
7	11 800
8	13 000
9	15 000
10	17 000

- Les calculs se feront année par année, formulés au regard de l'âge t de la machine. Les dépenses cumulées pour la machine seront donc calculées comme suit :

$P(t) = P_{\text{achat}} - \text{Valeur actualisée} + \text{Cumul(MPS)} + \text{Cumul(MC)} + \text{Maintenances initiales}$

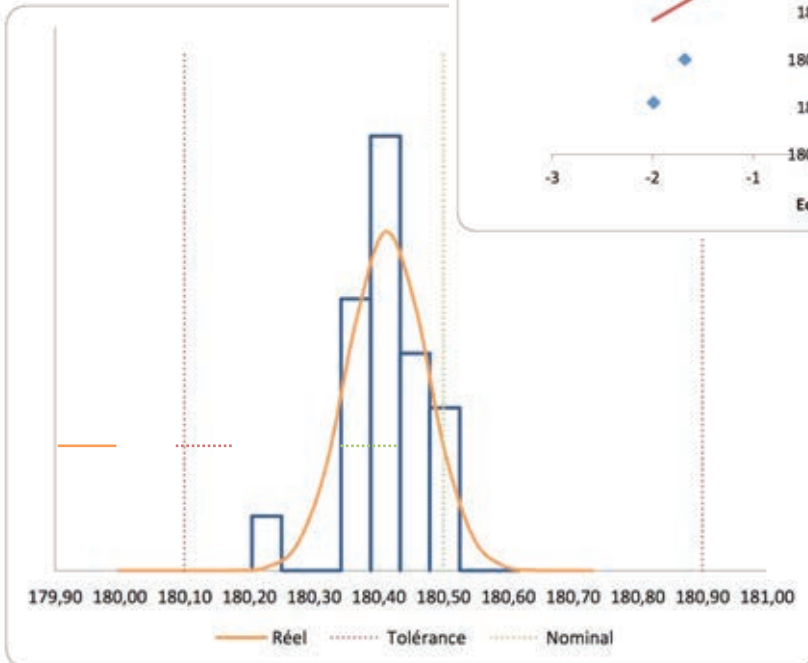
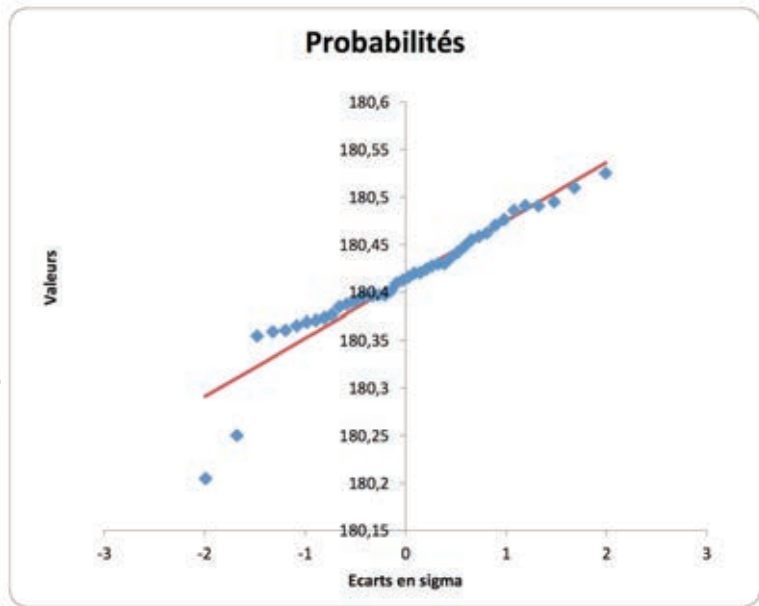
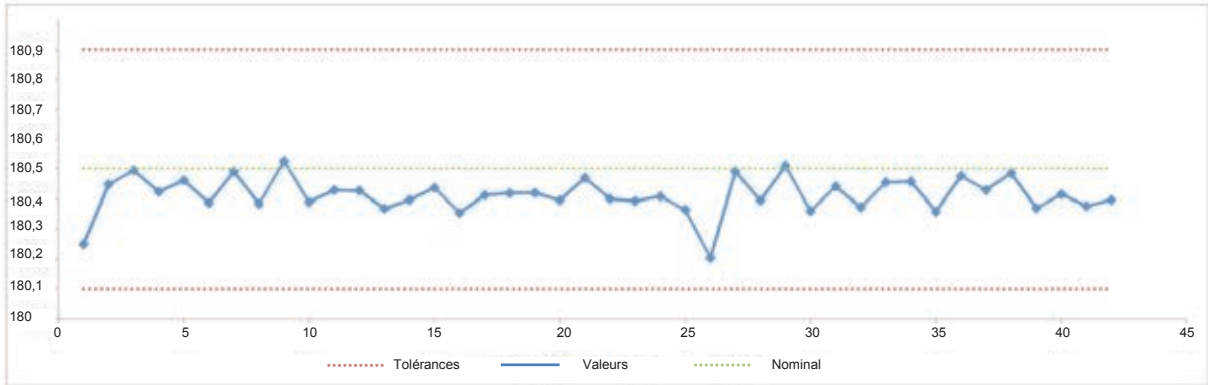
- Le coût moyen de fonctionnement par année sera calculé comme suit:

$$C_{mf}(t) = P(t) / t$$

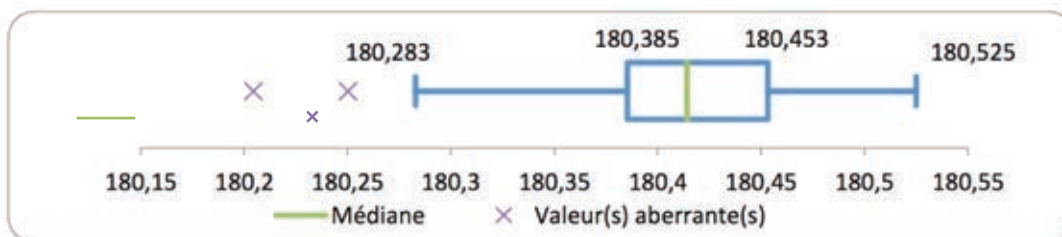
- Les coûts des maintenances préventives et correctives seront donc à intégrer au sens des coûts cumulés :

Exemple à t = 4 ans le coût cumulé de maintenance corrective est égal à $MC(1) + MC(2) + MC(3) + MC(4)$

DT17 Capabilités : Extrait des mesures sur les 42 pièces



Statistique	
Effectif	42
Moyenne	180,413
Ecart type	0,061



NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DR1- Étude de spécifications 1/2

Type de spécification	Élément(s) tolérancé(s)	Élément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance et condition de conformité								
Forme Orientation Position Battement	Unique Groupe	Unique Multiples	Simple Commune Système	Simple Composée								
<p>Spécification:</p> <p>6x</p> <table border="1"><tr><td>⊕</td><td>⊕0.2</td><td>P</td><td>C</td></tr><tr><td></td><td>⊕0.1</td><td></td><td></td></tr></table>	⊕	⊕0.2	P	C		⊕0.1						
⊕	⊕0.2	P	C									
	⊕0.1											

DR1- Étude de spécifications 2/2

Type de spécification	Élément(s) tolérancé(s)	Élément(s) de référence	Référence(s) spécifiée(s)	Zone de tolérance et condition de conformité
Forme Orientation Position Battement	Unique Groupe	Unique Multiples	Simple Commune Système	Simple Composée
<p style="text-align: center;">Spécification:</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin: 5px auto;"> / 0.3 P C </div>				

NE RIEN ECRIRE DANS CE CADRE

DR2 Gamme de fabrication – 1/2

Analyse de fabrication, mise en position, maintien en position

Phase : OP1	Machine : Tour Vertical W20/4
Pièce : Jante	Réf : XXX
Croquis :	Mise en position : Maintien en position : Justifications :
Phase : OP2	Machine : Tour Vertical W20/4
Pièce : Jante	Réf : XXX
Croquis :	Mise en position : Maintien en position : Justifications :

DR2 Gamme de fabrication – 2/2

Analyse de fabrication, mise en position, maintien en position

Phase : OP3	Machine : Centre de perforation TF3-N
Pièce : Jante	Réf : XXX
Croquis :	Mise en position :
	Maintien en position :
	Justifications :