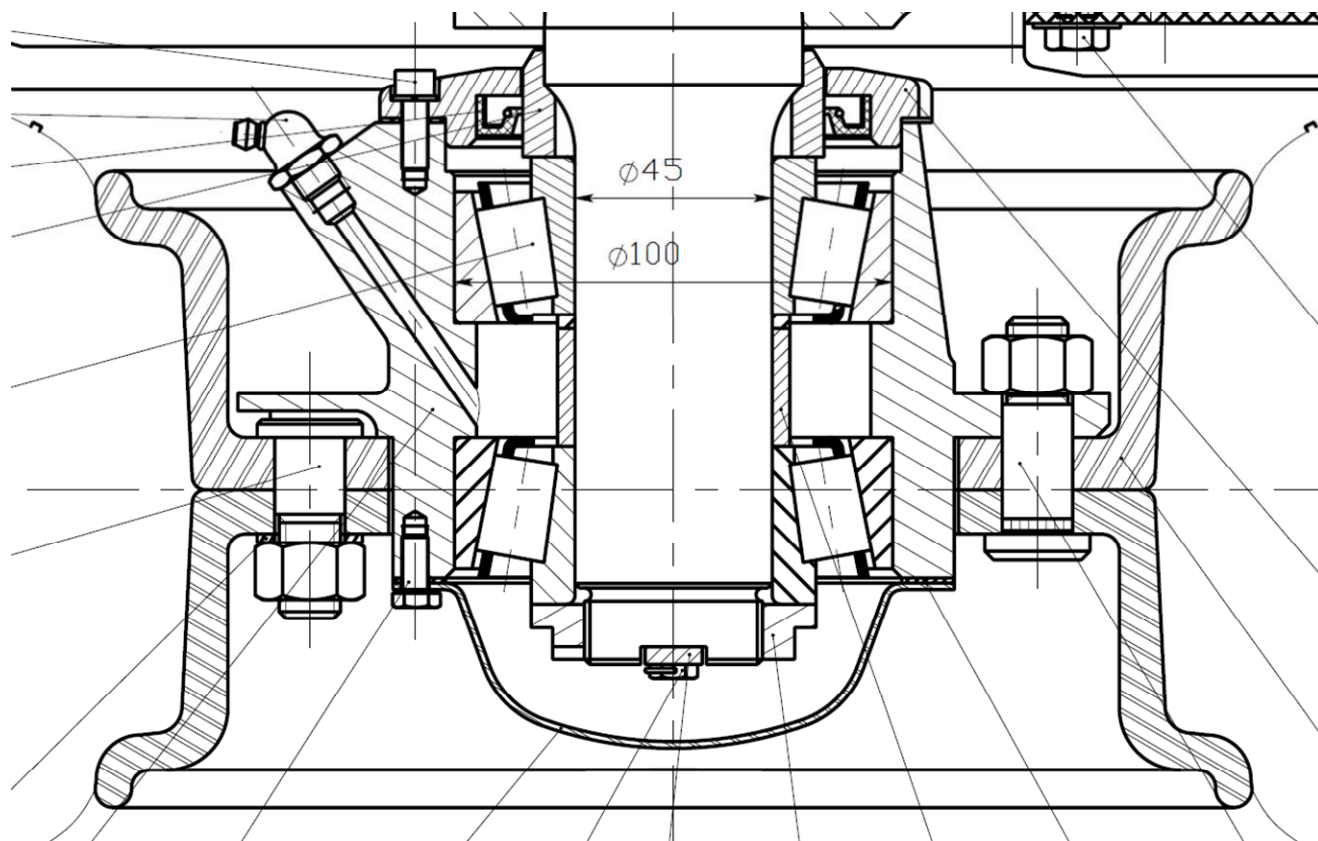
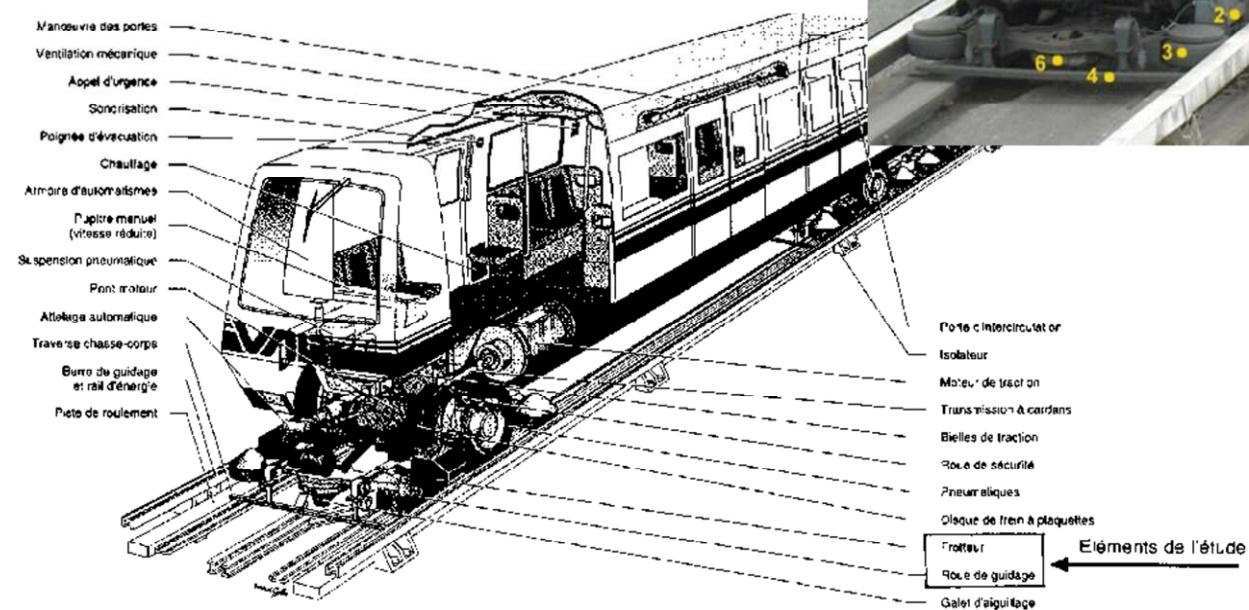
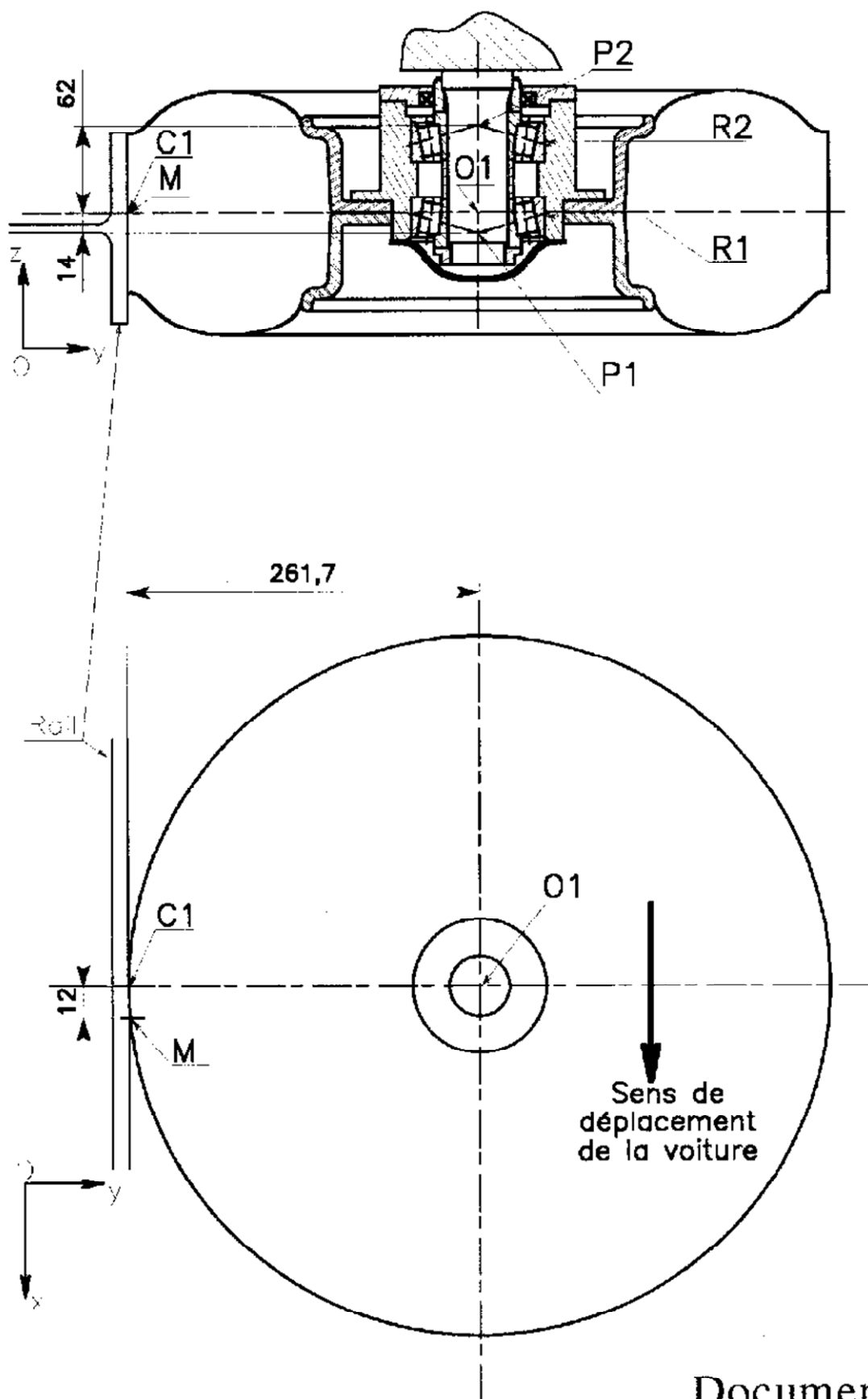


## 6. Guidage d'une roue du métro VAL

Objectif: Vérification de la durée de vie des roulements à rouleaux coniques guidant en rotation une roue de guidage

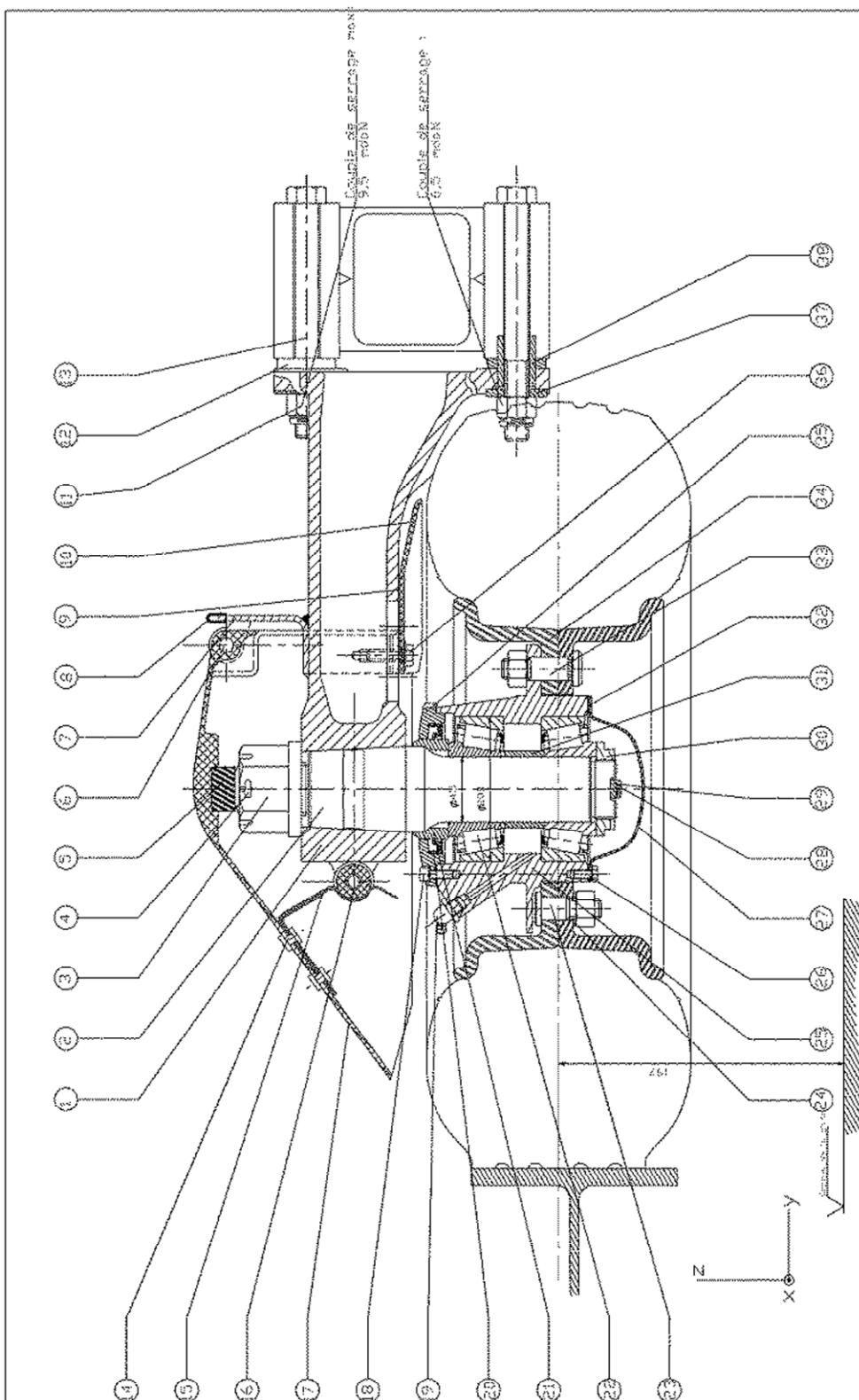


## Points caractéristiques de la roue de guidage



Document 3

FBV.4



Document 2			
Echelle: 1 : 4			
Roue de guidage			
ASHAR			
Matériau	Observations	Matériau	Observations
13. 4	13. 4	13. 4	13. 4
14. 4	14. 4	14. 4	14. 4
15. 4	15. 4	15. 4	15. 4
16. 4	16. 4	16. 4	16. 4
17. 4	17. 4	17. 4	17. 4
18. 4	18. 4	18. 4	18. 4
19. 4	19. 4	19. 4	19. 4
20. 4	20. 4	20. 4	20. 4
21. 4	21. 4	21. 4	21. 4
22. 4	22. 4	22. 4	22. 4
23. 4	23. 4	23. 4	23. 4
24. 4	24. 4	24. 4	24. 4
25. 4	25. 4	25. 4	25. 4
26. 4	26. 4	26. 4	26. 4
27. 4	27. 4	27. 4	27. 4
28. 4	28. 4	28. 4	28. 4
29. 4	29. 4	29. 4	29. 4
30. 4	30. 4	30. 4	30. 4
31. 4	31. 4	31. 4	31. 4
32. 4	32. 4	32. 4	32. 4
33. 4	33. 4	33. 4	33. 4
34. 4	34. 4	34. 4	34. 4
35. 4	35. 4	35. 4	35. 4
36. 4	36. 4	36. 4	36. 4
37. 4	37. 4	37. 4	37. 4
38. 4	38. 4	38. 4	38. 4
39. 4	39. 4	39. 4	39. 4
40. 4	40. 4	40. 4	40. 4
41. 4	41. 4	41. 4	41. 4
42. 4	42. 4	42. 4	42. 4
43. 4	43. 4	43. 4	43. 4
44. 4	44. 4	44. 4	44. 4
45. 4	45. 4	45. 4	45. 4
46. 4	46. 4	46. 4	46. 4
47. 4	47. 4	47. 4	47. 4
48. 4	48. 4	48. 4	48. 4
49. 4	49. 4	49. 4	49. 4
50. 4	50. 4	50. 4	50. 4
51. 4	51. 4	51. 4	51. 4
52. 4	52. 4	52. 4	52. 4
53. 4	53. 4	53. 4	53. 4
54. 4	54. 4	54. 4	54. 4
55. 4	55. 4	55. 4	55. 4
56. 4	56. 4	56. 4	56. 4
57. 4	57. 4	57. 4	57. 4
58. 4	58. 4	58. 4	58. 4
59. 4	59. 4	59. 4	59. 4
60. 4	60. 4	60. 4	60. 4
61. 4	61. 4	61. 4	61. 4
62. 4	62. 4	62. 4	62. 4
63. 4	63. 4	63. 4	63. 4
64. 4	64. 4	64. 4	64. 4
65. 4	65. 4	65. 4	65. 4
66. 4	66. 4	66. 4	66. 4
67. 4	67. 4	67. 4	67. 4
68. 4	68. 4	68. 4	68. 4
69. 4	69. 4	69. 4	69. 4
70. 4	70. 4	70. 4	70. 4
71. 4	71. 4	71. 4	71. 4
72. 4	72. 4	72. 4	72. 4
73. 4	73. 4	73. 4	73. 4
74. 4	74. 4	74. 4	74. 4
75. 4	75. 4	75. 4	75. 4
76. 4	76. 4	76. 4	76. 4
77. 4	77. 4	77. 4	77. 4
78. 4	78. 4	78. 4	78. 4
79. 4	79. 4	79. 4	79. 4
80. 4	80. 4	80. 4	80. 4
81. 4	81. 4	81. 4	81. 4
82. 4	82. 4	82. 4	82. 4
83. 4	83. 4	83. 4	83. 4
84. 4	84. 4	84. 4	84. 4
85. 4	85. 4	85. 4	85. 4
86. 4	86. 4	86. 4	86. 4
87. 4	87. 4	87. 4	87. 4
88. 4	88. 4	88. 4	88. 4
89. 4	89. 4	89. 4	89. 4
90. 4	90. 4	90. 4	90. 4
91. 4	91. 4	91. 4	91. 4
92. 4	92. 4	92. 4	92. 4
93. 4	93. 4	93. 4	93. 4
94. 4	94. 4	94. 4	94. 4
95. 4	95. 4	95. 4	95. 4
96. 4	96. 4	96. 4	96. 4
97. 4	97. 4	97. 4	97. 4
98. 4	98. 4	98. 4	98. 4
99. 4	99. 4	99. 4	99. 4
100. 4	100. 4	100. 4	100. 4

### Hypothèses:

- Les poids propres sont négligés, sauf le poids de la roue de guidage,
- Le contact du rail sur la roue est considéré ponctuel,
- Les actions de frottement du joint d'étanchéité 20 sur l'entretoise 21 sont négligées,
- Les actions sur les roulements à rouleaux coniques sont exprimées en  $P_1$  et  $P_2$ ,
- Sur un trajet type, par rapport à la longueur parcourue totale, on estime 60% de ligne droite, 20% de virage à droite et 20% de virage à gauche. Les roues de guidage situées à l'intérieur du virage ne supportent aucun effort radial.

### On donne:

- Le torseur de l'action de contact en  $M$  de la roue de guidage située à l'extérieur du virage

$$\{\mathcal{S}_{rail \rightarrow roue}\} = \begin{Bmatrix} -275 & 0 \\ 6000 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{M, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}}$$

- Le torseur de l'action de contact en  $M$  dans le cas de déplacement en ligne droite (Précontrainte de la roue de

$$\text{guidage}) \{\mathcal{S}_{rail \rightarrow roue}\} = \begin{Bmatrix} -114 & 0 \\ 2500 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{M, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}}$$

- Le poids de l'ensemble tournant (roue de guidage + moyeu + ...) appliqué en  $O_1$  est donné par le torseur:

$$\{\mathcal{S}_{pesanteur \rightarrow roue}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -300 & 0 \end{Bmatrix}_{O_1, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z}}$$

### ➔ Déterminer les actions sur les roulements à rouleaux coniques aux centres de poussée $P_1$ et $P_2$

a - Dans le cas de déplacement du véhicule en ligne droite,

b - Dans le cas de déplacement du véhicule en virage.

L'isolement de la roue donne :  $\{\mathcal{S}_{rail \rightarrow roue}\} + \{\mathcal{S}_{pes \rightarrow roue}\} + \{\mathcal{S}_{arbre \rightarrow roue P_1}\} + \{\mathcal{S}_{arbre \rightarrow roue P_2}\} = \{0\}$

Compte tenu du sens des efforts, on fait l'hypothèse que le roulement R1 support une charge axiale et radiale tandis que le roulement R2 ne supporte qu'une charge radiale. On transporte tous les torseurs en  $P_1$  le point qui comporte le plus d'inconnues.

$$\{\mathcal{S}_{rail \rightarrow roue}\} = \begin{Bmatrix} F_X \vec{x} + F_Y \vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_M = \begin{Bmatrix} F_X \vec{x} + F_Y \vec{y} \\ \overrightarrow{P_1 M} \wedge (F_X \vec{x} + F_Y \vec{y}) \end{Bmatrix}_{P_1} = \begin{Bmatrix} F_X \vec{x} + F_Y \vec{y} \\ -14F_Y \vec{x} + 14F_X \vec{y} + (12F_Y + 261,7F_X) \vec{z} \end{Bmatrix}_{P_1}$$

$$\{\mathcal{S}_{pes \rightarrow roue}\} = \begin{Bmatrix} -300 \vec{z} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{O_1} = \begin{Bmatrix} -300 \vec{z} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{P_1}$$

$$\{\mathcal{S}_{arbre \rightarrow roue P_2}\} = \begin{Bmatrix} X_{P_2} \vec{x} + Y_{P_2} \vec{y} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{P_2} = \begin{Bmatrix} X_{P_2} \vec{x} + Y_{P_2} \vec{y} \\ -66Y_{P_2} \vec{x} + 66X_{P_2} \vec{y} \end{Bmatrix}_{P_1}$$

$$\{\mathcal{S}_{arbre \rightarrow roue P_1}\} = \begin{Bmatrix} X_{P_1} \vec{x} + Y_{P_1} \vec{y} + Z_{P_1} \vec{z} \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{P_1}$$

Remarque : on peut vérifier que  $\vec{F}$  et  $\overrightarrow{O_1 M}$  sont quasiment colinéaires. On fait le choix ici de négliger l'équation de moment autour de  $\vec{z}$ , par ailleurs sans influence sur les forces dans les roulements.

D'où le système d'équations :

$$\begin{cases} X_{P1} + X_{P2} + F_X = 0 \\ Y_{P1} + Y_{P2} + F_Y = 0 \\ Z_{P1} - 300 = 0 \\ -14F_Y - 66Y_{P2} = 0 \\ 14F_X + 66X_{P2} = 0 \\ (12F_Y + 261,7F_X \approx 0) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} X_{P2} = -14/66 F_X \\ Y_{P2} = -14/66 F_Y \\ Z_{P1} = 300 \\ X_{P1} = \left(-1 + 14/66\right) F_X \\ Y_{P1} = \left(-1 + 14/66\right) F_Y \\ (12F_Y + 261,7F_X \approx 0) \end{cases}$$

En virage :

$$\begin{cases} X_{P2} = 58,33N \\ Y_{P2} = -1273N \\ Z_{P1} = 300 \\ X_{P1} = 217N \\ Y_{P1} = -4727N \end{cases}$$

En ligne droite :

$$\begin{cases} X_{P2} = 24,2N \\ Y_{P2} = -530N \\ Z_{P1} = 300 \\ X_{P1} = 89,8N \\ Y_{P1} = -1970N \end{cases}$$

On constate que c'est le roulement de centre  $P_1$  qui est le plus chargé.

Les valeurs précédentes sont déterminées à partir des préconisations du constructeur pour des roulements à rouleaux coniques montés en opposition appliquées au roulement équipant la roue : 32309 B:

On en déduit la charge équivalente en virage :  $5095N$

On en déduit la charge équivalente en ligne droite :  $2335N$

On constate dans la question suivante que les valeurs retenues sont légèrement sous estimées.

**→ Déterminer la durée de vie, en millions de kilomètres, pour le roulement le plus chargé R1 en s'aidant des documents constructeur fournis avec :**

- **En ligne droite:** Charge dynamique équivalente :  $P_1 = 2040 \text{ N}$

- **En virage:** Charge dynamique équivalente :  $P_2 = 4900 \text{ N}$

Pour prendre en compte le profil de mission de la roue (répartition entre fonctionnement en ligne droite et fonctionnement en virage), on utilise la formule du constructeur en considérant, 60% du temps en ligne droite, 20% du temps en virage, et 20% en charge purement axiale :  $P_{eq} = 3060 \text{ N}$

A partir de la formule de calcul de la durée de vie, on détermine une durée de vie du roulement de 254025 millions de tour. L'avance pour un tour étant de 1,644 m (déterminée à partir du rayon de la roue). On en déduit une durée de vie de 418 millions de km valeur qui semble très confortable au regard des préconisations.

Il reste à noter que tout le calcul effectué ne prend pas en compte une éventuelle (et très probable) précontrainte du montage.



## Capacité de charge, durée et documentation relative aux roulements R1 et R2

### Extraits des documents SKF

Le type de roulement étant choisi, les dimensions sont déterminées en fonction des charges appliquées et des exigences de durée et de sécurité de fonctionnement, en faisant intervenir la notion de charge de base. Les valeurs de la charge dynamique de base  $C$  et de la charge statique de base  $C_0$  sont données dans les tableaux de roulements.

#### Charges de base

**La charge dynamique de base  $C$**  est utilisée pour le calcul de la durée des roulements en rotation. C'est la charge pour laquelle la durée nominale ISO du roulement considéré atteint 1 million de tours, sous certaines conditions d'application: charge constante en intensité et en direction, radiale dans le cas d'un roulement radial, axiale et centrée dans le cas d'une butée.

La détermination des charges dynamiques de base des roulements SKF a été faite par un calcul conforme à ISO 281:1990. Les valeurs sont basées sur la matière et les techniques utilisées dans la fabrication SKF standard.

**La charge statique de base  $C_0$**  est utilisée pour le calcul de roulements, soit à l'arrêt, soit en rotation à basse vitesse ou animés de faibles mouvements d'oscillation. Elle doit aussi être prise en considération lorsque des chocs importants de courte durée s'exercent sur un roulement en rotation.

La charge statique de base est définie conformément à ISO 76:1987 comme la charge statique qui correspond par calcul à une contrainte, au centre du contact élément/chemin le plus chargé, égale à

- 4 600 MPa pour les roulements à rotule sur billes,
- 4 200 MPa pour tous les autres roulements à billes,
- 4 000 MPa pour tous les roulements à rouleaux.

Cette contrainte produit une déformation permanente totale (élément et chemin) d'environ 0,0001 du diamètre de l'élément roulant, les conditions d'application étant celles déjà définies pour la charge dynamique de base.

#### Durée

On appelle durée d'un roulement le nombre de tours (ou le nombre d'heures de fonctionnement à vitesse constante) que celui-ci peut effectuer avant l'apparition des premiers signes de fatigue (écaillage) sur une bague ou un élément roulant.

Cependant les applications pratiques et les essais de laboratoire ont prouvé que des roulements identiques fonctionnant dans les mêmes conditions n'ont pas la même durée. Il faut donc donner au terme "durée" une définition plus précise. D'où la notion de durée nominale qui, conformément aux recommandations ISO, est la durée atteinte ou dépassée par 90 % de roulements apparemment identiques fonctionnant dans les mêmes conditions.

La durée moyenne, atteinte ou dépassée par 50 % des roulements, est d'environ cinq fois la durée nominale.

Il existe plusieurs autres "durées" de roulements. L'une d'elles est la "durée de service", qui est la durée réelle atteinte par un roulement donné avant qu'il ne périclite. La défaillance n'est généralement pas due en premier lieu à la fatigue mais à l'usure, à la corrosion, à des joints défectueux, etc. Il existe aussi des durées correspondant aux spécifications ("spécification life") établies par un organisme extérieur et ayant pour base des données hypothétiques de charge et de vitesse fournies par cet organisme. Il s'agit généralement d'une durée  $L_{10}$  (durée nominale) requise et il est présumé que l'organisme a tenu compte de l'expérience acquise avec des machines similaires, de façon à obtenir la durée de service adéquate.

## Choix des dimensions du roulement à l'aide des formules de durée

La durée d'un roulement peut être calculée de façon plus ou moins sophistiquée, selon la précision avec laquelle les conditions de fonctionnement peuvent être définies.

### Formule de durée nominale:

La méthode la plus simple de calcul de la durée consiste à utiliser la formule ISO pour la durée nominale,

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^n \quad \text{ou} \quad \frac{C}{P} = L_{10}^{\frac{1}{n}}$$

$L_{10}$  = durée nominale, millions de tours

$C$  = Charge dynamique de base, N (tableau des roulements)

$P$  = charge dynamique équivalente (voir ci-après), N

$n$  = un exposant qui est fonction du contact entre pistes et éléments roulants

- $n = 3$  pour les roulements à billes
- $n = 10/3$  pour les roulements à rouleaux

Lorsque la vitesse de rotation est constante, il est généralement plus pratique d'exprimer la durée nominale en heures de fonctionnement. La formule de durée s'écrit alors :

$$L_{10h} = \frac{1.000.000}{60N} \left( \frac{C}{P} \right)^n \quad \text{ou} \quad L_{10h} = \frac{1.000.000}{60N} L_{10}$$

Avec  $L_{10h}$  = durée nominale, heures de fonctionnement

$N$  = vitesse de rotation, tr.min<sup>-1</sup>

### Cas des roulements à rouleaux coniques

## Charge dynamique équivalente

### I - Charge variable

Lorsque la direction et l'intensité de la charge varient dans le temps, il faut calculer les charges équivalentes  $P_1, P_2, \dots$  pour les différentes périodes  $U_1, U_2, \dots$  afin de déterminer une charge équivalente moyenne constante donnée par la relation ci-dessous:

$$P_m = \sqrt[3]{\frac{P_1^3 U_1 + P_2^3 U_2 + P_3^3 U_3 + \dots}{U}}$$

dans laquelle:  $P_m$  = charge équivalente moyenne constante, (N)

$P_1, P_2, \dots$  = charges équivalentes agissant pendant  $U_1, U_2, \dots$  tours, (N)

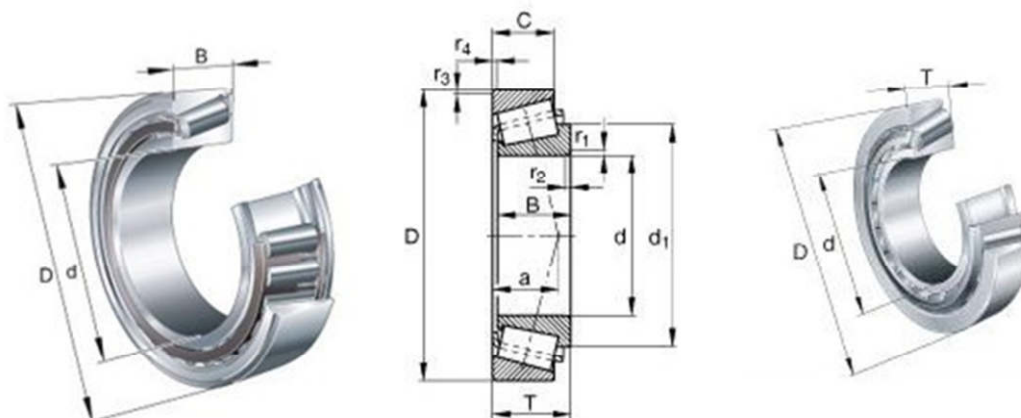
$U$  = nombre total de tours ( $U = U_1 + U_2 + \dots$ ) pendant lesquels agissent les charges équivalentes  $P_1, P_2, \dots$

## II - Durées normalement souhaitables pour différents types de véhicules

Type de véhicule	L <sub>10s</sub> Millions de km
<u>Roues de véhicules routiers :</u>	
Voitures particulières	0,3
Camions, autocars	0,6
<u>Essieux de véhicules ferroviaires :</u>	
Wagons (type UIC, charge maximale constante sur l'essieu)	0,8
Véhicules de transport urbain et suburbain	1,5
Voitures de grandes lignes	3
Autorails de grandes lignes	3 - 4
Locomotives diesel ou électriques de grandes lignes	3 - 5

## III - Documentation relative aux roulements R1 et R2

### Extrait du catalogue SKF



Dimensions d'encombrement			Charges de base		Vitesse limite		Désignation		
			Dyn.	Stat.	Lubrification				
d	D	T	C	C <sub>0</sub>	à la graisse	à l'huile		e	Y
mm			N		tr.min <sup>-1</sup>				
45	80	26	84200	114000	4500	6000	33109	0,37	1,6
	85	32	108000	143000	4000	5300	33209	0,4	1,5
	100	27,25	101000	72000	4000	5300	33309	0,35	1,7
	100	27,25	85800	60000	3400	4500	31309	0,83	0,72
	100	38,25	132000	102000	3600	4800	32309	0,35	1,7
	100	38,25	128000	102000	3600	4800	32309 B	0,54	1,1

Pour les roulements à rouleaux coniques, le fabricant préconise de prendre en compte la charge

dynamique équivalente :

$$P = F_r + 1,1.Y.F_a \quad \text{si } F_a / F_r \leq e$$

$$P = 0,67F_r + 1,68.Y.F_a \quad \text{si } F_a / F_r > e$$