

3.7. Exemples d'applications au dimensionnement des mécanismes

3.7.1. Le portique à conteneurs

L'engin de levage que nous allons étudier est un portique de quai utilisé pour le chargement et le déchargement des navires porte-conteneurs.

Il dispose d'un outil spécifique de préhension appelé « spreader », capable de s'adapter aux différentes dimensions standardisées des conteneurs à manutentionner (tailles ISO 20 et 40 pieds* , sea land 35 pieds). Des dispositifs mécaniques à commande hydrauliques appelés « Flipper » assurent le guidage du spreader dans la phase délicate de positionnement (l'objectif est de placer à chaque angle supérieur du conteneur un verrou quart de tour d'accrochage de 5 x 20 cm dans un trou oblong 7x 25 cm et ceci à une distance d'environ 40 mètres).

La forte puissance électrique nécessaire pour assurer la commande des divers mécanismes de l'engin, (de 500 kW à plus de 1MW), nécessite que l'alimentation en énergie soit effectuée à partir de la moyenne tension. Un dispositif par enrouleur avec contact glissant permet d'assurer la continuité de l'alimentation électrique lorsque le portique se déplace le long de son chemin de roulement.

Nota :

Le pied est une ancienne unité de mesure de longueur anglo-saxonne encore utilisée dans les pays d'influence américaine valant 12 pouces soit 30.48 cm.

3.7.1.1. Description de l'engin

a) Description des mouvements principaux

La figure ci-dessous décrit la répartition des différents mécanismes et automatismes du portique.

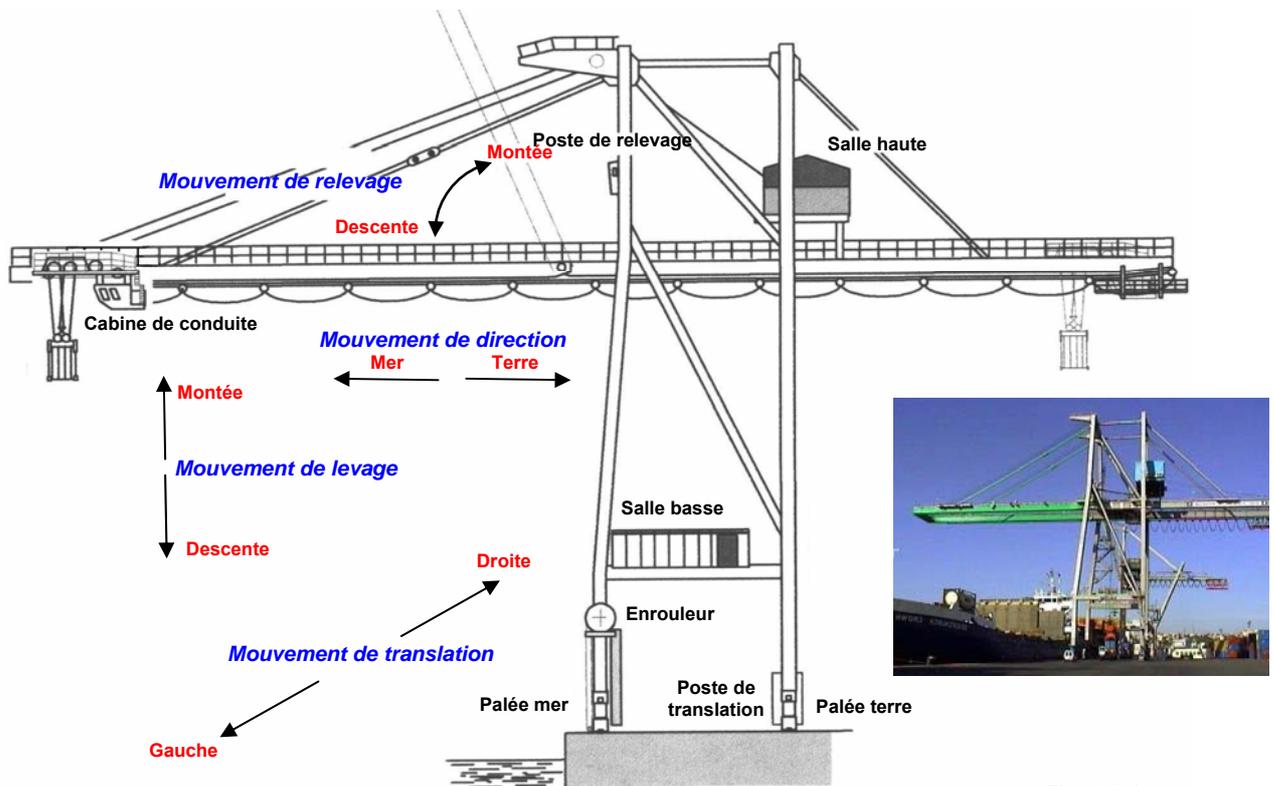


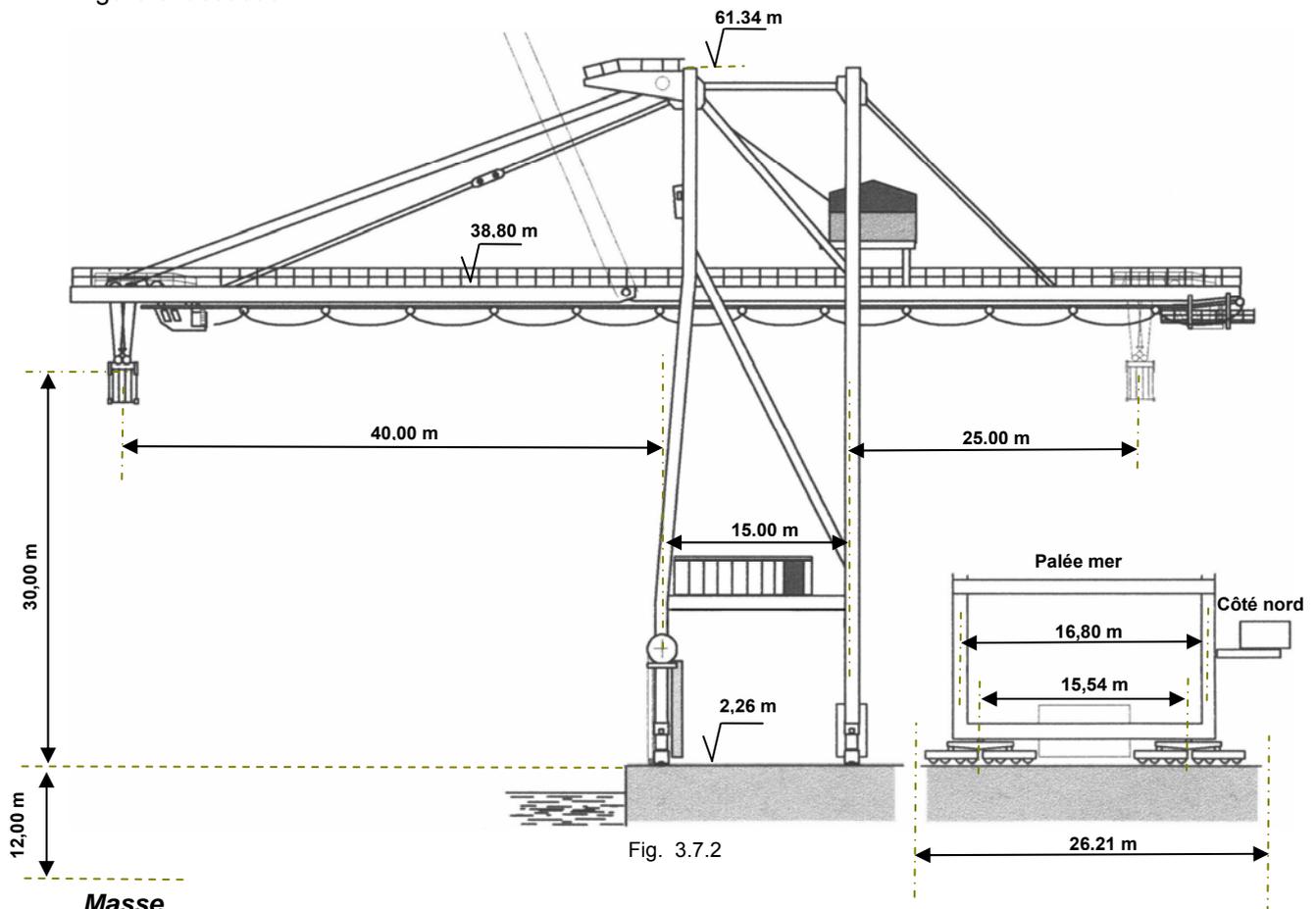
Fig. 3.7.1

Cet engin est animé de quatre mouvements principaux que nous étudierons dans la suite de ce chapitre :

- Levage
- Direction (chariot)
- Translation,
- Relevage

b) Caractéristiques mécaniques générales

Les caractéristiques mécaniques et performances principales du portique sont indiquées sur la figure ci-dessous :



Masse

Totale : **844 t** dont avant bec : **74t** et chariot : **32t**

Charge

Charge utile sous spreader de **13 t** : **40 t**

Vitesse des mouvements

Levage : **1 m/s** en charge et **2 m/s** à vide

Relevage : environ **5 mn**

Translation : **0,75 m/s**

Direction : **3 m/s**

c) Exemple de cycle type de fonctionnement

La figure ci-dessous illustre un exemple de cycle de chargement de conteneurs.

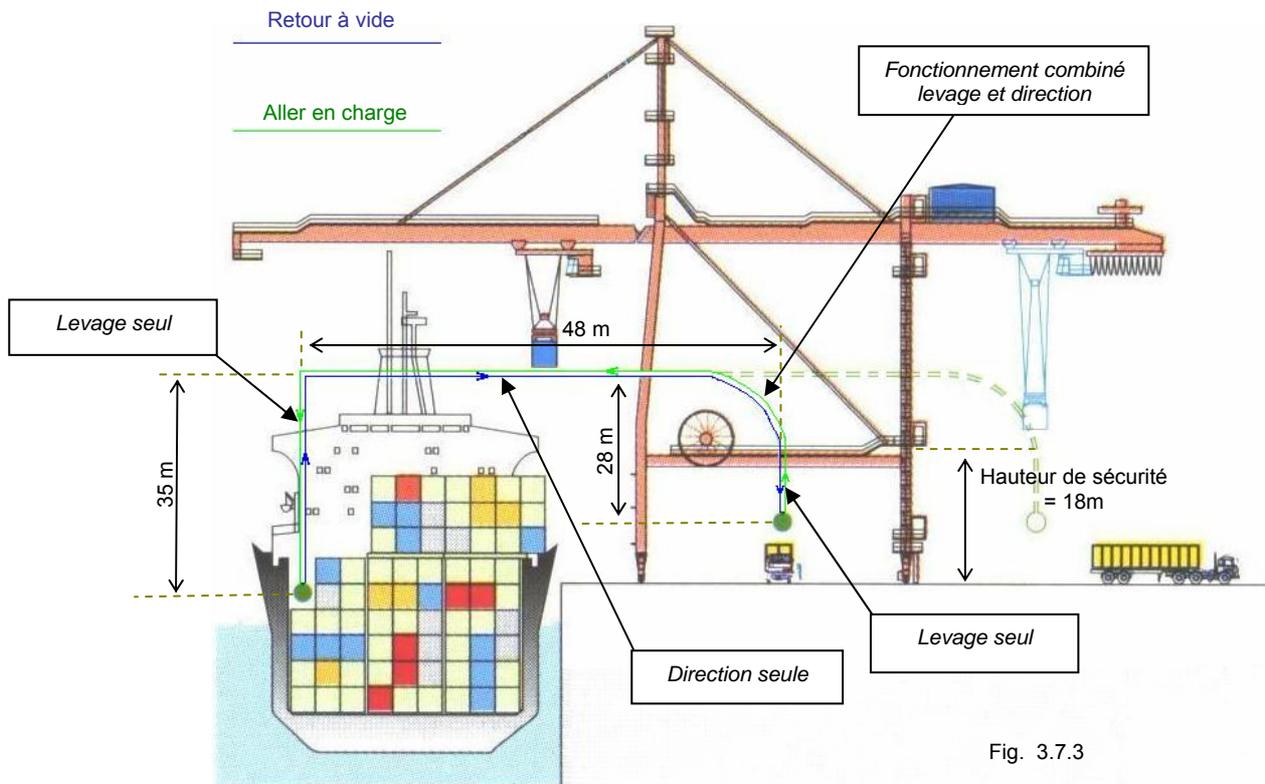


Fig. 3.7.3

Ce cycle comporte les phases suivantes :

Aller en charge :

- Durée de la montée à 1 m/s : **26,5 s**
- Acc. et ralentis. montée en charge : **1,5 s**
- Durée de la direction aller à 3 m/s : **12 s**
- Acc et ralentis. aller en charge : **4 s**
- Durée de la descente à 1 m/s : **33,5 s**
- Acc. et ralentis. descente en charge : **1,5 s**
- Décrochage du conteneur : **6 s**

Retour à vide :

- Durée de la montée à 2 m/s : **14,5 s**
- Acc. et ralentis. montée à vide : **3 s**
- Durée de la direction retour à 3 m/s : **12 s**
- Acc. et ralentis. retour à vide : **4 s**
- Durée de la descente à 2 m/s : **11 s**
- Acc. et ralentis. descente à vide : **3 s**

Dans cet exemple, nous avons négligé les temps d'approche et de positionnement du « spreader » en petite vitesse, car ils sont toujours très réduits afin d'optimiser le cycle de l'engin. Par ailleurs, il faut mentionner qu'il existe parfois des dispositifs particuliers de guidage à bord des navires porte conteneurs nécessitant une étape intermédiaire supplémentaire.

3.7.1.2. Etude du mouvement de levage

a) Données techniques complémentaires

➤ Chaîne cinématique

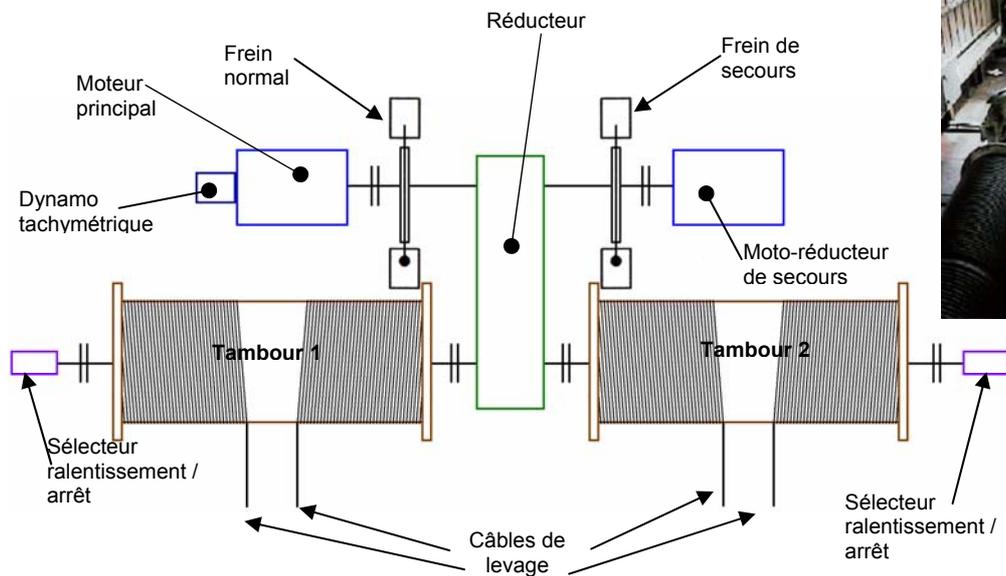


Fig. 3.7.4

Classement F.E.M. du mécanisme : **V4 – 3 – 5m** :

➤ Rappel des données techniques fondamentales au dimensionnement en puissance

- Hauteur moyenne de levage : $H_L = 30 \text{ m}$
- Charge utile nominale : $M_u = 40 \text{ tonnes}$
- Charge à vide (spreader seul + palonnier) : $M_v = 13 \text{ tonnes}$
- Vitesse de levage à vide : $v_v = 2 \text{ m/s}$
- Vitesse de levage en charge : $v_c = 1 \text{ m/s}$
- Temps d'accélération et de décélération :
 - à vide : $t_{acc} = t_{dec} = 1,5 \text{ s} \Rightarrow \gamma_L = 0,666 \text{ m/s}^2$
 - en charge : $t_{acc} = t_{dec} = 3 \text{ s} \Rightarrow \gamma_L = 0,666 \text{ m/s}^2$
- Tambours 1 et 2 : diamètre enroulement 725 mm ; inertie unitaire $J_t = 420 \text{ kg.m}^2$
- Réducteur principal :
 - rapport de réduction $n = 1/18,1823$
 - inertie $J_r = 2 \text{ kg.m}^2$
 - rendement $\eta_r = 0,88$
- Moteur principal :
 - vitesse nominale : $N_n = 1000 \text{ tr/mn}$;
 - inertie $J_m = 18 \text{ kg.m}^2$
- Freins normal et de secours de type à disque : inertie unitaire $J_f = 6,94 \text{ kg.m}^2$
- Accouplement moteur principal : $J_a = 1,7 \text{ kg.m}^2$

b) Calcul de la puissance mécanique et du couple à développer en régime établi (vitesse constante)

Nous utiliserons les formules générales

$$P_{(W)} = F_{(N)} \cdot v_{(m/s)} \quad \text{①}$$

$$P_{(W)} = C_{(N.m)} \cdot \omega_{(rd/s)} \quad \text{②}$$

$$\text{et} \quad \omega_{(rd/s)} = 2 \cdot \pi \cdot N_{(tr/mn)} / 60 \quad \text{③}$$

➤ **En charge montée (quadrant 1)**

Dans ce cas, la masse totale à déplacer à la vitesse de 1m/s est la somme de la charge utile nominale à laquelle il faut ajouter la masse des outils de préhension soit :

$$M_t = 40 + 13 = 53 \text{ tonnes} \quad \text{ou encore} \quad M_t = 53 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

Ceci représente une force de gravitation exprimée en Newton :

$$F_t = M_t \cdot g \text{ soit } F_t = 53 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \Rightarrow F_t = 519,93 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Le calcul de la puissance résistante en régime établi exprimée en Watts s'effectue à l'aide de la relation ① :

$$P_1 = 519,93 \cdot 10^3 \cdot 1 \text{ soit } P_1 = 519,93 \cdot 10^3 \text{ W ou encore } P_1 = 519,93 \text{ kW}$$

La puissance motrice à développer par le moteur d'entraînement devra tenir compte du rendement mécanique η du mécanisme, que nous approximerons pratiquement à celui η_r du réducteur de vitesse. Ceci conduit finalement à la puissance motrice à fournir suivante :

$$P_{m1} = 519,93 \cdot 10^3 / 0,88 \text{ soit finalement } P_{m1} = 590,83 \cdot 10^3 \text{ W ou encore } P_{m1} = 590,83 \text{ kW}$$

La vitesse nominale de rotation du moteur d'entraînement 1000 tr/mn correspond à la vitesse linéaire de la charge nominale de l'engin en régime stabilisé soit 1 m/s.

L'expression en radians par seconde de cette vitesse s'effectue à l'aide de la relation ③ soit :

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot 1000 / 60 \quad \text{d'où} \quad \omega_1 = 104,72 \text{ rd/s}$$

En régime de vitesse stabilisée montée, le moteur d'entraînement développe un couple moteur C_{m1} qui équilibre le couple résistant C_{r1} de la charge. Ce dernier est obtenu à partir de la relation ② :

$$C_{r1} = P_{m1} / \omega_1 \quad \text{soit} \quad C_{r1} = 590\,830 / 104,72$$

d'où finalement

$$C_{m1} = C_{r1} = 5642 \text{ N.m}$$

➤ **En charge descente (quadrant 4)**

En descente, en régime établi, la charge est motrice et le rendement du mécanisme participe au freinage de la masse totale en mouvement par dissipation de pertes par effet joule. La vitesse de déplacement et la masse sont identiques au cas précédent, mais le sens de déplacement est inversé. La puissance mécanique de freinage développée par le moteur d'entraînement devient alors :

$$P_{m2} = -519,93 \cdot 10^3 \cdot 0,88 \quad \text{soit} \quad P_{m2} = -457,54 \cdot 10^3 \text{ W}$$

ou encore

$$P_{m2} = -457,54 \text{ kW}$$

On obtient de la même façon que pour la phase de montée, la valeur du couple C_{m2} de freinage développé par le moteur en charge descente sachant que la vitesse nominale de la charge est supposée identique :

$$C_{r2} = P_{m2} / \omega_1 \text{ soit } C_{r2} = 457\,540 / 104,72$$

d'où finalement

$$C_{m2} = C_{r2} = 4369 \text{ N.m}$$

➤ **A vide (sans charge) en montée (quadrant 1)**

Dans ce cas, la masse totale à déplacer se limite à celle des outils de préhension, et la vitesse linéaire souhaitée est le double de celle sous charge nominale de 40 tonnes soit 2 m/s. On obtient alors :

$$M_v = 13 \text{ tonnes} \quad \text{ou encore} \quad \mathbf{M_v = 13 \cdot 10^3 \text{ kg}}$$

Ce qui représente une force de gravitation exprimée en Newton :

$$F_v = 13 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \quad \text{soit} \quad \mathbf{F_v = 127,53 \cdot 10^3 \text{ N}}$$

La puissance résistante en régime établi exprimée en Watts se calcule également à l'aide de la relation ❶ :

$$P_3 = 127,53 \cdot 10^3 \cdot 2 \quad \text{soit} \quad P_3 = 255,06 \cdot 10^3 \text{ W}$$

ou encore $\mathbf{P_3 = 255,06 \text{ kW}}$

La nouvelle puissance motrice à développer par le moteur d'entraînement devient alors :

$$P_{m3} = 255,06 \cdot 10^3 / 0,88 \quad \text{soit} \quad P_{m3} = 289,84 \cdot 10^3 \text{ W}$$

ou encore $\mathbf{P_{m3} = 289,84 \text{ kW}}$

La vitesse de rotation du moteur d'entraînement dans ce cas est le double de la vitesse sous charge nominale soit 2000 tr/mn.

En utilisant de nouveau la relation ❷ l'expression en radians par seconde de cette vitesse devient :

$$\omega_3 = 2 \cdot \pi \cdot 2000 / 60 \quad \text{d'où} \quad \mathbf{\omega_3 = 209,44 \text{ rd/s}}$$

On obtient la valeur du couple C_{m3} développé par le moteur à vide dans le sens montée à partir de la relation ❸ :

$$C_{r3} = P_{m3} / \omega_3 \quad \text{soit} \quad C_{r3} = 289\,840 / 209,44$$

d'où finalement $\mathbf{C_{m3} = C_{r3} = 1384 \text{ N.m}}$

➤ **A vide en descente (quadrant 4)**

La puissance mécanique de freinage développée dans ce cas par le moteur d'entraînement est alors :

$$P_{m4} = -255,06 \cdot 10^3 \cdot 0,88 \quad \text{soit} \quad P_{m4} = -224,45 \cdot 10^3 \text{ W}$$

ou encore $\mathbf{P_{m4} = -224,45 \text{ kW}}$

On obtient la valeur du couple C_{m4} développé par le moteur à vide en descente:

$$C_{r4} = P_{m4} / \omega_3 \quad \text{soit} \quad C_{r4} = 224\,450 / 209,44$$

d'où finalement $\mathbf{C_{m4} = C_{r4} = 1072 \text{ N.m}}$

c) calcul des couples et puissances à développer dans les phases transitoires de fonctionnement

La méthodologie consiste à ramener dans un premier temps toutes les inerties de la chaîne cinématique au niveau de l'arbre du moteur d'entraînement, puis à partir des données du cahier des charges, d'en tirer les valeurs des couples et des puissances à développer pour garantir les caractéristiques dynamiques attendues de l'engin. Les couples ainsi obtenus, s'ajouteront ou se retrancheront aux couples en régime établi précédemment calculés, en fonction de la phase de fonctionnement correspondante et de la nature du régime transitoire considéré (accélération ou ralentissement).

Nous utiliserons les formules générales:

$$J_{(kg.m^2)} = M_{(kg)} \cdot v_{(m/s)}^2 / \omega_{(rd/s)}^2 \quad \text{④}$$

si n est rapport du réducteur

$$J'_{(kg.m^2)} = J_{(kg.m^2)} \cdot n^2 \quad \text{⑤}$$

et enfin

$$C_{(N.m)} = J_{(kg.m^2)} \cdot d \omega_{(rd/s)} / dt_{(s)} \quad \text{⑥}$$

➤ **Calcul de l'inertie équivalente ramenée à l'arbre du moteur**

❖ Calcul de l'inertie équivalente du tambour d'enroulement des câbles de levage

Si, on appelle J_{Tr} le moment d'inertie du tambour, on obtient le moment d'inertie J'_{Tr} ramené à l'arbre moteur à l'aide de la relation ⑤. Le principe de la conservation d'énergie appliqué aux masses en rotation conduit à l'égalité suivante :

$$J'_{Tr} = J_{Tr} \cdot n^2 \quad \text{d'où} \quad J'_{Tr} = 420 \cdot (1 / 18,1823)^2$$

soit $J'_{Tr} = 1,27 \text{ kg.m}^2$

❖ Calcul de l'inertie équivalente de la charge de levage

Nous utiliserons la relation d'équivalence ④ (conservation de l'énergie cinétique d'une masse M animée d'un mouvement linéaire en une masse d'inertie J animée d'un mouvement de rotation). Nous avons deux cas à considérer :

- En charge :

Dans ce cas, nous avons déterminé que la masse totale à considérer était la somme de la charge utile nominale et de la masse des outils de préhension soit :

$$M_t = 53 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

Le calcul de l'inertie équivalente de la masse totale exprimée en kg.m^2 s'effectue à l'aide de la relation ④ :

$$J_c = M_t \cdot v_1^2 / \omega_1^2 \quad \text{d'où} \quad J_c = 53 \cdot 10^3 \cdot 1^2 / 104,72^2$$

soit $J_c = 4,83 \text{ kg.m}^2$

- A vide :

La masse totale à déplacer se limite à celle des outils de préhension, soit :

$$M_v = 13 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

Par ailleurs les vitesses linéaires et angulaires à considérer sont doubles de celles sous charge nominale ce qui conduit à la nouvelle expression :

$$J_v = M_v \cdot v_3^2 / \omega_3^2 \quad \text{d'où} \quad J_v = 13 \cdot 10^3 \cdot 2^2 / 209,44^2$$

soit $J_v = 1,18 \text{ kg.m}^2$

❖ Calcul de l'inertie totale équivalente ramenée à l'arbre moteur

L'inertie totale équivalente est la somme des inerties élémentaires ramenées à l'arbre moteur. Nous avons de nouveau deux cas à considérer :

- En charge :

$$J_{Tc} = J_m + 2 \cdot J_f + J_a + J_r + J'_{Tr} + J_c \quad \text{d'où} \quad J_{Tc} = 18 + 2 \cdot 6,94 + 1,7 + 2 + 1,27 + 4,83$$

soit finalement $J_{Tc} = 41,68 \text{ kg.m}^2$

- A vide :

$$J_{TV} = J_m + 2 \cdot J_f + J_a + J_r + J'_{Tr} + J_v \quad \text{d'où} \quad J_{TV} = 18 + 2 \cdot 6,94 + 1,7 + 2 + 1,27 + 1,18$$

soit finalement **$J_{TV} = 38,03 \text{ kg.m}^2$**

➤ **Calcul du couple accélérateur des inerties de la chaîne cinématique**

C'est la relation ⑥ qui permet d'en obtenir la valeur. Vu que les temps d'accélération et de ralentissement sont identiques d'une part, et que le rendement du mécanisme est peu influant sur la valeur du couple accélérateur réel d'autre part, (il intervient uniquement pour les inerties lentes J'_{Tr} et J_v ou J_c , ramenées à l'entrée du réducteur de vitesse), nous admettrons que les couples correspondants sont identiques en valeur mais de signe dépendant de la pente de la variation de vitesse.

Ceci conduit aux cas suivants :

- En charge :

$$C_{ac} = J_{Tc} \cdot d\omega_{1/2} / dt_{1/2} \quad \text{d'où} \quad C_{ac} = 41,68 \cdot (+/-) 104,72 / 1,5$$

soit **$C_{ac} = (+/-) 2909,8 \text{ N.m}$**

- A vide :

$$C_{av} = J_{Tv} \cdot d\omega_{3/4} / dt_{3/4} \quad \text{d'où} \quad C_{av} = 38,03 \cdot (+/-) 209,44 / 3$$

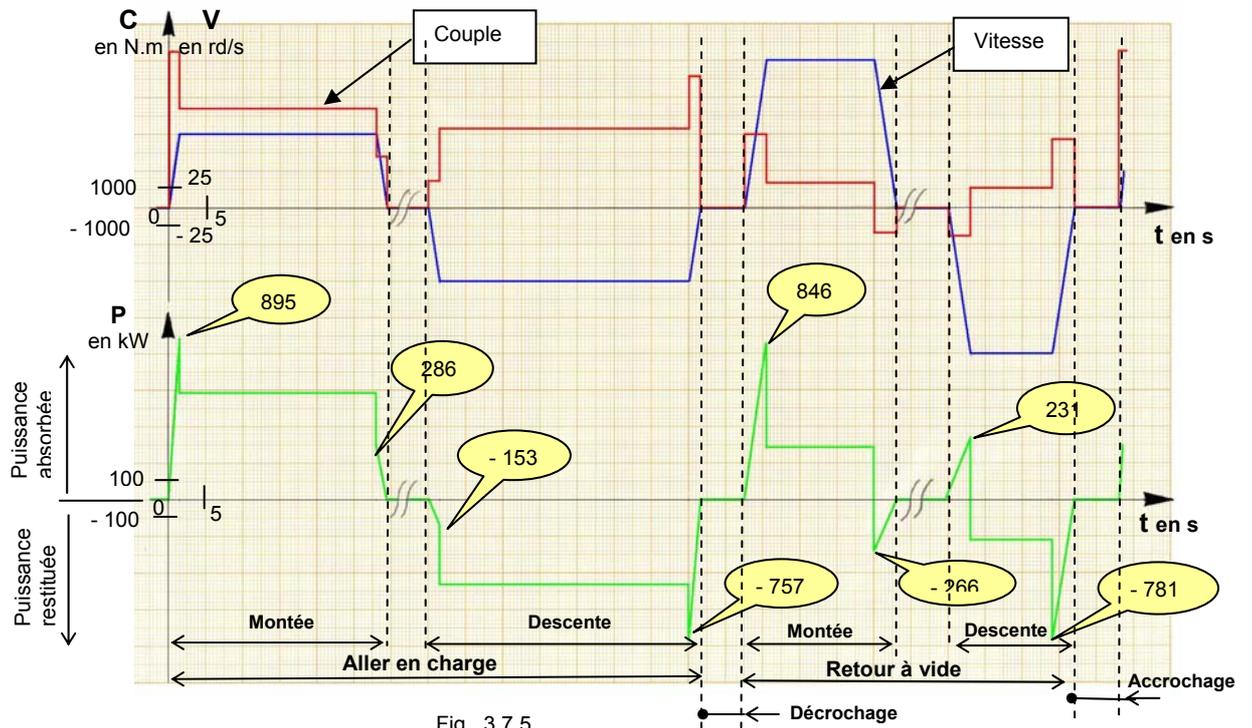
soit **$C_{av} = (+/-) 2655 \text{ N.m}$**

➤ **Détermination du couple sur l'arbre moteur pour chacune des phases du cycle de l'engin**

Pour chacune des phases élémentaires du cycle on obtient les valeurs de couple moteur suivantes :

- 1) Accélération montée en charge $C_m = C_{r1} + C_{ac}$ d'où $C_m = 5642 + 2909,8 \Rightarrow C_m = 8551,8 \text{ N.m}$
- 2) Vitesse stabilisée montée en charge $C_m = C_{r1}$ d'où $C_m = 5642 \Rightarrow C_m = 5642 \text{ N.m}$
- 3) Décélération montée en charge $C_m = C_{r1} + C_{ac}$ d'où $C_m = 5642 - 2909,8 \Rightarrow C_m = 2732,2 \text{ N.m}$
- 4) Accélération descente en charge $C_m = C_{r2} + C_{ac}$ d'où $C_m = 4369 - 2909,8 \Rightarrow C_m = 1459,2 \text{ N.m}$
- 5) Vitesse stabilisée descente en charge $C_m = C_{r2}$ d'où $C_m = 4369 \Rightarrow C_m = 4369 \text{ N.m}$
- 6) Décélération descente en charge $C_m = C_{r2} - C_{ac}$ d'où $C_m = 4369 + 2909,8 \Rightarrow C_m = 7227,8 \text{ N.m}$
- 7) Arrêt (décrochage conteneur) **$C_m = 0$**
- 8) Accélération montée à vide $C_m = C_{r3} + C_{av}$ d'où $C_m = 1384 + 2655 \Rightarrow C_m = 4039 \text{ N.m}$
- 9) Vitesse stabilisée montée à vide $C_m = C_{r3}$ d'où $C_m = 1384 \Rightarrow C_m = 1384 \text{ N.m}$
- 10) Décélération montée à vide $C_m = C_{r3} + C_{av}$ d'où $C_m = 1384 - 2655 \Rightarrow C_m = -1271 \text{ N.m}$
- 11) Accélération descente à vide $C_m = C_{r4} + C_{av}$ d'où $C_m = 1072 - 2655 \Rightarrow C_m = -1583 \text{ N.m}$
- 12) Vitesse stabilisée descente à vide $C_m = C_{r4}$ d'où $C_m = 1072 \Rightarrow C_m = 1072 \text{ N.m}$
- 14) Décélération descente à vide $C_m = C_{r4} + C_{av}$ d'où $C_m = 1072 + 2655 \Rightarrow C_m = 3727 \text{ N.m}$
- 15) Arrêt (accrochage conteneur) **$C_m = 0$**

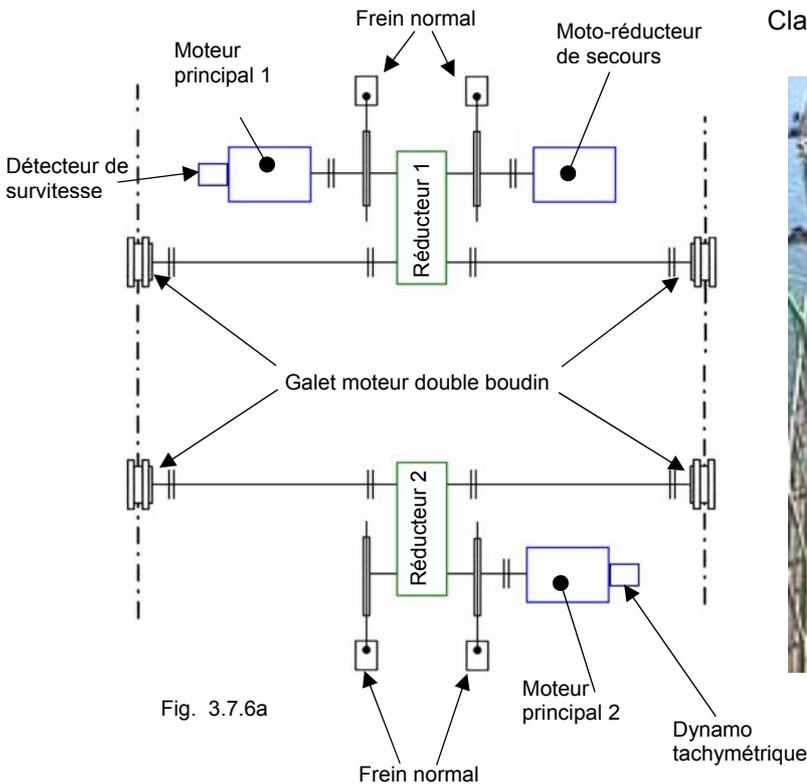
➤ Représentation graphique des couples et puissances mécaniques du moteur



3.7.1.3. Etude du mouvement de direction

a) Données techniques complémentaires

➤ Chaîne cinématique



Classement F.E.M. du mécanisme : **V4 – 3 – 5m**



➤ **Rappel des données techniques fondamentales au dimensionnement en puissance**

- Longueur maximale du chemin de roulement :	$H_L = 80 \text{ m}$
- Masse du chariot de direction avec spreader + palonnier :	$M_{dv} = 45 \text{ tonnes}$
- Charge utile nominale :	$M_u = 40 \text{ tonnes}$
- Vitesse à vide et en charge :	$v_d = 3 \text{ m/s}$
- Temps d'accélération et de décélération à vide et en charge :	$t_{acc} = t_{dec} = 4 \text{ s}$
soit	$\gamma_d = 0,75 \text{ m/s}^2$
- Réducteurs 1 et 2 :	
Rapport de réduction :	$n = 1/19,14$
Inertie :	$J_d = 0,25 \text{ kg.m}^2$
Rendement :	$\eta_d = 0,86$
- Moteurs principaux 1 et 2 :	
Vitesse nominale :	$N_n = 1500 \text{ tr/mn}$
Inertie :	$J_m = 0,85 \text{ kg.m}^2$
- Freins normaux (Q = 4) de type à disque ; inertie unitaire	$J_f = 0,581 \text{ kg.m}^2$
- Accouplement de chaque moteur principal : inertie unitaire	$J_a = 0,18 \text{ kg.m}^2$
- Galet moteur à double boudin (2 par moteur d'entraînement) :	$\Phi 630 \text{ mm}$
- Coefficient de frottement de roulement :	$\delta/R = 0,065 \text{ N/kg}$
- Coefficient d'adhérence :	$f = 0,18$
- Surface totale du chariot + charge (conteneur + spreader) :	60 m^2
- Pression du vent maximal de fonctionnement :	250 N/m^2

b) Calcul de la puissance mécanique et du couple moteur à vitesse nominale constante sans vent

Nous utiliserons les formules générales suivantes :

$$P_{(W)} = F_{(N)} \cdot v_{(m/s)} \quad \text{①}$$

$$P_{(W)} = C_{(N.m)} \cdot \omega_{(rd/s)} \quad \text{②}$$

et $\omega_{(rd/s)} = 2 \cdot \pi \cdot N_{(tr/mn)} / 60 \quad \text{③}$

➤ **Aller en charge (quadrant 1)**

En régime stabilisé de vitesse et ballant nul, la masse totale déplacée à 3 m/s est la somme de la masse du chariot et de la charge utile nominale à laquelle il faut ajouter la masse des outils de préhension soit :

$$M_{dt} = 32 + 40 + 13 = 85 \text{ tonnes} \quad \text{ou encore} \quad M_{dt} = 85 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

La force de déplacement liée au coefficient de frottement de roulement exprimée en Newton a pour valeur :

$$F_{dt} = 85 \cdot 10^3 \cdot 0,065 \quad \text{soit} \quad F_{dt} = 5525 \text{ N}$$

Le calcul de la puissance résistante en régime établi exprimée en Watts s'effectue à l'aide de la relation ① :

$$P_1 = F_{dt} \cdot v = 5525 \cdot 3 \quad \text{soit} \quad P_1 = 16575 \text{ W} \quad \text{ou encore} \quad P_1 = 16,575 \text{ kW}$$

En tenant compte du rendement du mécanisme de direction, la puissance motrice à développer par les moteurs d'entraînement s'écrit :

$$P_{m1} = P_1 / \eta \Rightarrow P_{m1} = 16\,575 / 0,86 \text{ soit finalement } P_{m1} = 19\,273 \text{ W ou encore } \mathbf{P_{m1} = 19,273 \text{ kW}}$$

La vitesse nominale de rotation des moteurs d'entraînement 1500 tr/mn correspond à la vitesse linéaire de 3 m/s du chariot de direction en régime stabilisé.

L'expression en radians par seconde de cette vitesse s'effectue à l'aide de la relation ③ soit :

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot 1500 / 60 \quad \text{d'où} \quad \omega_1 = \mathbf{157,08 \text{ rd/s}}$$

En régime de vitesse stabilisée, chaque moteur d'entraînement développe un couple moteur $C_{m1/2}$ qui équilibre la moitié du couple résistant C_{r1} du chariot avec la charge. Ce couple C_{r1} est obtenu à partir de la relation ② :

$$C_{r1} = P_{m1} / \omega_1 \quad \text{d'où} \quad C_{r1} = 19\,273 / 157,08 \Rightarrow C_{r1} = 122,7 \text{ N.m}$$

soit

$$\mathbf{C_{m1/2} = (1/2) \cdot C_{r1} = 61,3 \text{ N.m}}$$

➤ Retour à vide (quadrant 3)

Le retour du chariot de direction s'effectue sans charge. Dans ce cas, la masse totale à déplacer se limite à celle du chariot et du spreader, et la vitesse linéaire est identique à celle de l'aller.

On obtient alors :

$$M_{dv} = 45 \text{ tonnes} \quad \text{ou encore} \quad \mathbf{M_{dv} = 45 \cdot 10^3 \text{ kg}}$$

La nouvelle force de déplacement liée au coefficient de frottement de roulement a pour valeur :

$$F_{dv} = 45 \cdot 10^3 \cdot 0,065 \quad \text{soit} \quad \mathbf{F_{dv} = 2925 \text{ N}}$$

La puissance résistante en régime établi devient :

$$P_2 = 2\,925 \cdot 3 \quad \text{soit} \quad P_2 = 8\,775 \text{ W} \quad \text{ou encore} \quad \mathbf{P_{m2} = 8,775 \text{ kW}}$$

On en tire la puissance motrice à développer par les moteurs d'entraînement :

$$P_{m2} = P_2 / \eta \Rightarrow P_{m2} = 8\,775 / 0,86 \text{ soit finalement } P_{m1} = 10\,203 \text{ W}$$

ou encore

$$\mathbf{P_{m1} = 10,203 \text{ kW}}$$

La vitesse de rotation des moteurs d'entraînement étant identique en valeur, mais de sens inverse à celui de l'aller, ceci qui conduit à la nouvelle expression :

$$\omega_2 = - \omega_1 \quad \text{d'où} \quad \omega_2 = \mathbf{- 157,08 \text{ rd/s}}$$

En régime de vitesse stabilisée, chaque moteur d'entraînement développe un couple moteur $C'_{m1/2}$ qui équilibre la moitié du couple résistant C_{r2} du chariot à vide obtenu également à partir de la relation ② :

$$C_{r2} = P_{m2} / \omega_2 \Rightarrow C_{r2} = 10\,203 / (-157,08) \Rightarrow C_{r2} = - 65 \text{ N.m}$$

d'où

$$\mathbf{C'_{m1/2} = (1/2) C_{r2} = - 32,5 \text{ N.m}}$$

c) Calcul des couples et puissances à développer dans les phases transitoires de fonctionnement

La méthodologie utilisée est identique à celle employée pour le mouvement de levage.

Nous utiliserons les formules générales:

$$\mathbf{J_{(kg.m^2)} = M_{(kg)} \cdot v_{(m/s)}^2 / \omega_{(rd/s)}^2} \quad \text{④}$$

et

$$\mathbf{C_{(N.m)} = J_{(kg.m^2)} \cdot d \omega_{(rd/s)} / dt_{(s)}} \quad \text{⑤}$$

➤ **Calcul de l'inertie équivalente globale ramenée aux arbres des moteurs**

❖ Calcul de l'inertie équivalente de la masse déplacée

Nous utiliserons la relation d'équivalence ④ (conservation de l'énergie cinétique d'une masse M animée d'un mouvement linéaire en une masse d'inertie J animée d'un mouvement de rotation). Nous avons deux cas à considérer :

- Aller (en charge) :

Dans ce cas, nous avons déterminé que la masse totale déplacée était : $M_{dt} = 85.10^3 \text{ kg}$

Le calcul de l'inertie équivalente de la masse totale exprimée en kg.m^2 s'effectue à l'aide de la relation ④ :

$$J_c = M_{dt} \cdot v_1^2 / \omega_1^2 \quad \text{d'où} \quad J_c = 85.10^3 \cdot 3^2 / 157,08^2 \quad \text{soit} \quad J_c = 31 \text{ kg.m}^2$$

- Retour (à vide) :

La masse totale à déplacer se limite à celle du chariot et du spreader soit : $M_{dv} = 45.10^3 \text{ kg}$

Par ailleurs les vitesses linéaires et angulaires à considérer sont doubles de celles sous charge nominale ce qui conduit à la nouvelle expression :

$$J_v = M_{dv} \cdot v_2^2 / \omega_2^2 \quad \text{d'où} \quad J_v = 45.10^3 \cdot (-3)^2 / (-157,08)^2 \quad \text{soit} \quad J_v = 16,41 \text{ kg.m}^2$$

❖ Calcul de l'inertie totale équivalente ramenée aux arbres des moteurs

On constate que, la charge en mouvement en sortie des réducteurs de vitesse présente une inertie prépondérante par rapport aux inerties des arbres rapides de la chaîne cinématique. En conséquence, contrairement au mouvement de levage nous devons tenir compte du rendement du mécanisme de direction dans le calcul du couple accélérateur et de ralentissement. C'est pourquoi, pour chaque mode de fonctionnement, nous regrouperons en deux groupes J_L et J_R les inerties équivalentes :

- En charge :

$$J_{Tc} = 2 \cdot J_m + 4 \cdot J_f + 2 \cdot J_a + 2 \cdot J_r + J_c \Rightarrow J_{Tc} = 2 \cdot 0,85 + 4 \cdot 0,581 + 2 \cdot 0,18 + 2 \cdot 0,25 + 31$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{J_R} \quad \underbrace{\hspace{2em}}_{J_L} \quad \text{soit} \quad J_{Tc} = 4,88 + 31 \Rightarrow J_{Tc} = 35,88 \text{ kg.m}^2$$

- A vide :

$$J_{Tv} = 2 \cdot J_m + 4 \cdot J_f + 2 \cdot J_a + 2 \cdot J_r + J_v \Rightarrow J_{Tv} = 4,88 + 16,41 \Rightarrow J_{Tv} = 21,29 \text{ kg.m}^2$$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{J_R} \quad \underbrace{\hspace{2em}}_{J'_L}$$

➤ **Calcul du couple accélérateur global des inerties de la chaîne cinématique**

C'est la relation ⑤ qui permet d'en obtenir la valeur. En raison du fait que les temps d'accélération et de ralentissement sont identiques d'une part, mais que le rendement du mécanisme est influant sur la valeur du couple accélérateur réel d'autre part, nous aurons quatre cas à considérer :

- Accélération en charge :

$$\omega_1 > 0 \Rightarrow d\omega_1 / dt_1 > 0 \text{ (la pente de croissance de la vitesse est positive)}$$

$$C_{a1} = (J_R + J_L / \eta) \cdot d\omega_1 / dt_1 \Rightarrow C_{a1} = (4,88 + 31 / 0,86) \cdot 157,08 / 4 \Rightarrow C_{a1} = 1607 \text{ N.m}$$

- Ralentissement en charge :

$$\omega_1 > 0 \Rightarrow d \omega_1 / dt_1 < 0 \text{ (la pente de diminution de la vitesse est négative)}$$

$$C_{a2} = (J_R + J_L \cdot \eta) \cdot d \omega_1 / dt_1 \Rightarrow C_{a2} = (4,88 + 31 \cdot 0,86) \cdot (-157,08) / 4 \Rightarrow C_{a2} = -1239 \text{ N.m}$$

- Accélération à vide :

$$\omega_2 < 0 \Rightarrow d \omega_2 / dt_2 < 0 \text{ (la pente de croissance de la vitesse est négative)}$$

$$C_{a3} = (J_R + J'_L / \eta) \cdot d \omega_2 / dt_2 \Rightarrow C_{a3} = (4,88 + 16,41 / 0,86) \cdot (-157,08) / 4 \Rightarrow C_{a3} = -941 \text{ N.m}$$

- Ralentissement à vide :

$$\omega_2 < 0 \Rightarrow d \omega_2 / dt_2 > 0 \text{ (la pente de décroissance de la vitesse est positive)}$$

$$C_{a4} = (J_R + J'_L \cdot \eta) \cdot d \omega_2 / dt_2 \Rightarrow C_{a4} = (4,88 + 16,41 \cdot 0,86) \cdot 157,08 / 4 \Rightarrow C_{a4} = 746 \text{ N.m}$$

➤ **Détermination du couple sur l'arbre de chaque moteur pour chacune des phases du cycle**

Pour chacune des phases élémentaires du cycle, les moteurs devront fournir un couple mécanique égal à la moitié de la somme du couple résistant et du couple accélérateur correspondant soit :

1) Accélération aller en charge

$$C_m = (1/2) \cdot (C_{r1} + C_{a1}) \Rightarrow C_m = (1/2) \cdot (122,7 + 1607) \Rightarrow C_m = 864,8 \text{ N.m}$$

2) Vitesse stabilisée aller en charge

$$C_m = (1/2) \cdot C_{r1} \Rightarrow C_m = (1/2) \cdot 122,7 \Rightarrow C_m = 61,3 \text{ N.m}$$

3) Décélération aller en charge

$$C_m = (1/2) \cdot (C_{r1} + C_{a2}) \Rightarrow C_m = (1/2) \cdot (122,7 - 1239) \Rightarrow C_m = -558,1 \text{ N.m}$$

4) Arrêt

$$C_m = 0$$

5) Accélération retour à vide

$$C_m = (1/2) \cdot (C_{r2} + C_{a3}) \Rightarrow C_m = (1/2) \cdot (-65 - 941) \Rightarrow C_m = -503 \text{ N.m}$$

6) Vitesse stabilisée retour à vide

$$C_m = (1/2) \cdot C_{r2} \Rightarrow C_m = (1/2) \cdot (-65) \Rightarrow C_m = -32,5 \text{ N.m}$$

7) Décélération retour à vide

$$C_m = (1/2) \cdot (C_{r2} + C_{a4}) \Rightarrow C_m = (1/2) \cdot (-65 + 746) \Rightarrow C_m = 340,5 \text{ N.m}$$

8) Arrêt

$$C_m = 0$$

➤ **Représentation graphique des couples et puissances mécaniques de chaque moteur**

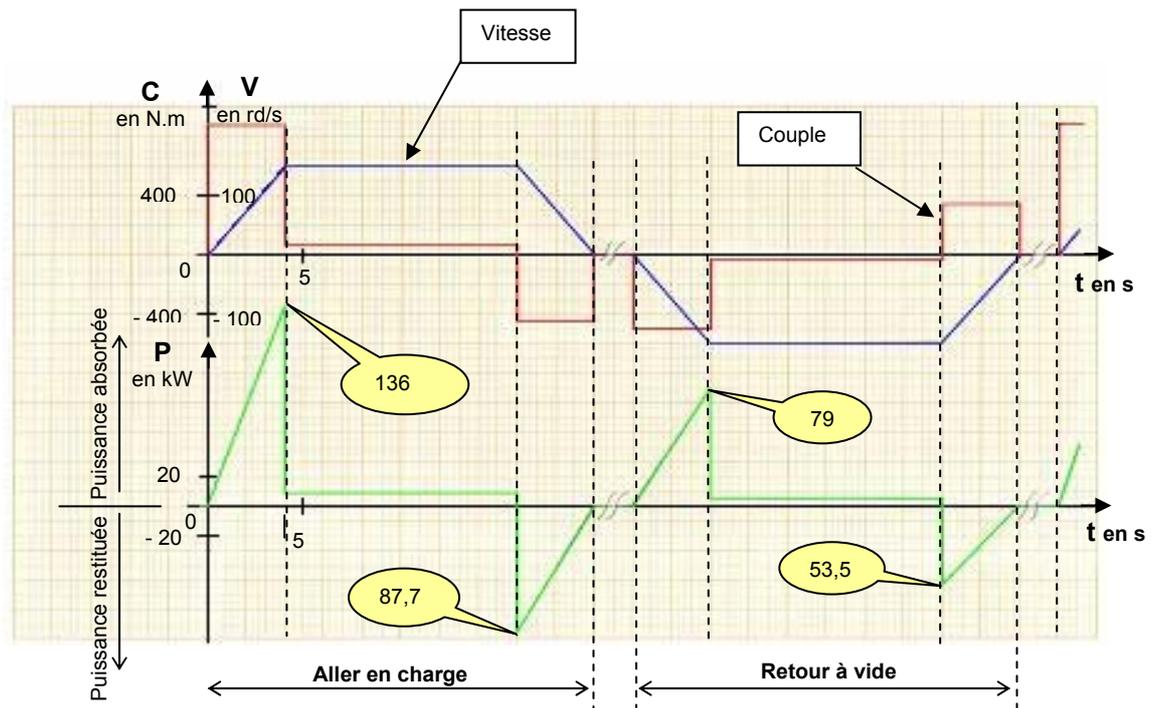


Fig. 3.7.7

d) Calcul du couple de patinage sans vent

Le chariot est entraîné par 4 galets moteurs de diamètre 630 mm. Si l'on suppose que l'ensemble mécanique est parfaitement équilibré, il en résulte que chaque galet supportera le quart de la charge totale.

➤ **Chariot chargé (masse totale déplacée 85 tonnes)**

- Calcul de charge par galet :

$$F_{Gmc} = M_{dt} \cdot g / 4 \quad \text{soit} \quad F_{Gmc} = 85\,000 \cdot 9,81 / 4 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{F_{Gmc} = 208\,462\,N}$$

- Vitesse de rotation des galets

Nombre de tours par seconde :

$$N = v / \pi \cdot D \quad \text{soit} \quad N = 3 / 3,14 \cdot 0,63 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{N = 1,5158\,tr/s}$$

Ou encore exprimé en radians par seconde

$$\omega_G = 2 \cdot \pi \cdot N = 2 \cdot v / D \quad \Rightarrow \quad \mathbf{\omega_G = 9,524\,rd/s}$$

- Le couple de patinage au niveau des galets est déterminé par la relation :

$$C_{pGc} = F_{Gmc} \cdot f \cdot D / 2 \quad \Rightarrow \quad C_{pGc} = 208\,462 \cdot 0,18 \cdot 0,630 / 2 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_{pGc} = 11\,820\,N.m}$$

- Vérification du respect de la condition de non patinage sous charge nominale :

Nous avons calculé au paragraphe c) précédent que le couple moteur est maximum au cours de la phase d'accélération aller. A partir de cette valeur (valable pour 2 galets situés en sortie du réducteur), on obtient le couple de propulsion développé au niveau de chaque galet moteur par la relation :

$$C_{mGc} = C_{mc} \cdot n \cdot \eta / 2 \quad \text{d'où} \quad C_{mGc} = 864,8 \cdot 19,14 \cdot 0,86 / 2 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_{mGc} = 7\,117\,N.m}$$

Puisque le couple moteur C_{mGc} est inférieur au couple de patinage C_{pGc} , il n'y a pas de phénomène de perte d'adhérence au cours de la phase d'accélération du chariot de direction.

➤ **Chariot à vide**

- Charge par galet :

$$F_{Gmv} = 45\,000 \cdot 9,81 / 4 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{F_{Gmv} = 110\,362\,N}$$

- Le couple de patinage au niveau des galets est déterminé par la relation :

$$C_{pGv} = F_{Gmv} \cdot f \cdot D / 2 \quad \text{d'où} \quad C_{pGv} = 110\,362 \cdot 0,18 \cdot 0,630 / 2 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_{pGc} = 6\,258\,N.m}$$

- Vérification du respect de la condition de non patinage à vide:

De la même façon que pour le chariot chargé on obtient le couple de propulsion développé au niveau de chaque galet moteur lorsque le chariot est à vide par la relation :

$$C_{mGv} = C_{mv} \cdot n \cdot \eta / 2 \quad \text{d'où} \quad C_{mGv} = 503 \cdot 19,14 \cdot 0,86 / 2 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_{mGc} = 4\,140\,N.m}$$

Le couple moteur C_{mGc} est également inférieur au couple de patinage C_{pGc} , et il n'y a pas de phénomène de perte d'adhérence au cours de cette autre phase d'accélération du chariot de direction.

e) Influence du vent sur le calcul des couples et puissances

Le cas de fonctionnement le plus défavorable correspond au déplacement d'un conteneur de 40 pieds face au vent maximal autorisé de service de l'engin. La surface équivalente frontale au vent est estimée à $60\,m^2$.

On obtient la force résistante supplémentaire opposée par le vent au déplacement horizontal de la charge par la relation :

$$\mathbf{F_{vent} (N) = p (N/m^2) \cdot S (m^2)}$$

avec S la surface totale du chariot et de la charge face au vent
 p la pression du vent par unité de surface

$$\text{soit ici :} \quad F_{vent} (N) = 250 \cdot 60 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{F_{vent} (N) = 15\,000\,N}$$

On s'aperçoit que cette valeur est loin d'être négligeable puisqu'elle est supérieure à la force de traction en régime de vitesse stabilisée ($F_{dt} = 5\,525\,N$).

Les deux forces s'ajoutant, si l'on désire conserver les mêmes performances de vitesse et d'accélération que lorsque le vent est nul, on aboutit pour chacun des moteurs d'entraînement aux résultats principaux suivants :

- Accélération aller en charge

$$C_m = (1/2) \cdot (C_{r1} + C_{a1}) \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/2) \cdot (455,8 + 1607) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = 1\,031,4\,N.m}$$

- Vitesse stabilisée aller en charge

$$C_m = (1/2) \cdot C_{r1} \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/2) \cdot 455,8 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = 227,9\,N.m}$$

Cette augmentation de couple n'est pas suffisante pour modifier pas les conditions d'adhérence des galets moteurs sur le chemin de roulement.

3.7.1.4. Etude du mouvement de translation

a) Données techniques complémentaires

➤ Chaîne cinématique

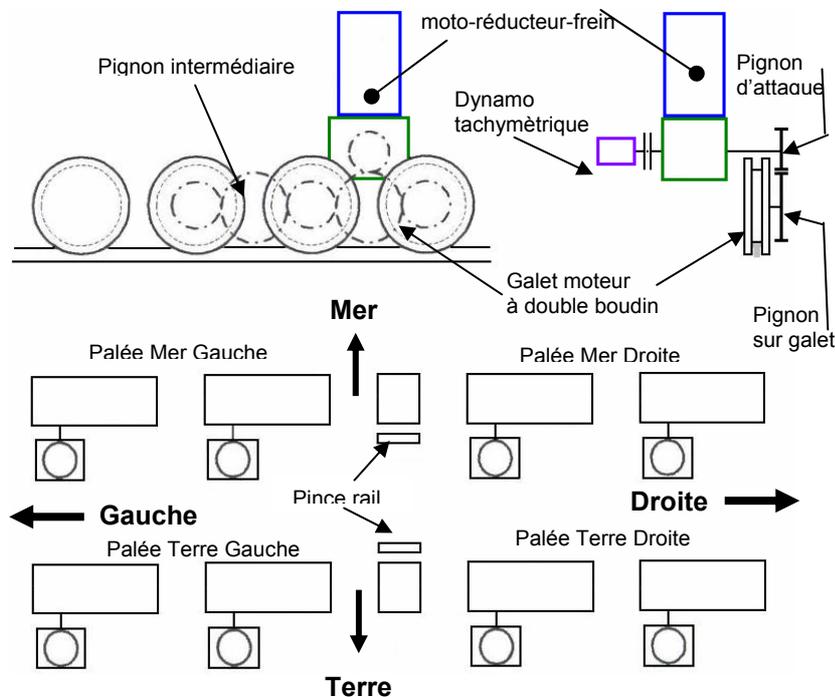


Fig. 3.7.8a



Fig. 3.7.8b

Classement F.E.M. du mécanisme : **V3 – 3 – 4m**

➤ Rappel des données techniques fondamentales au dimensionnement en puissance

- Masse du portique (avec chariot de direction et spreader + palonnier) : $M_{dv} = 857$ tonnes
- Vitesse à vide et en charge : $v_t = 0,75$ m/s
- Temps d'accélération et de décélération à vide et en charge :
 $t_a = t_d = 4$ s $\Rightarrow \gamma = 0,1875$ m/s²
- Ensemble moto-réducteur-frein : Qté = 8 (1 par bogie)

vitesse nominale	$N_n = 1500$ tr/mn;
rapport de réduction	$n = 1/34$
inertie	$J_t = 0,65$ kg.m ² ;
rendement mécanique global	$\eta_t = 0,85$
- Galet moteur à double boudin : Qté = 24 (3 par bogie) Φ 800 mm
- Galet fou à double boudin : Qté = 8 (1 par bogie) Φ 800 mm
- Pignon d'attaque : $dp = 228$ mm ; 19 dents ; $m = 12$
- Pignon sur galet : $dp = 528$ mm ; 44 dents ; $m = 12$
- Pignon intermédiaire : $dp = 540$ mm ; 45 dents ; $m = 12$
- Coefficient de frottement de roulement : $\delta/R = 0,065$ N/kg
- Coefficient d'adhérence : $f = 0,18$
- Surface totale latérale équivalente du portique : 900 m²
- Pression du vent maximal de fonctionnement : 380 N/m²

b) Calcul de la puissance mécanique et du couple moteur à vitesse nominale constante sans vent

Nous utiliserons les formules générales :

$$P_{(W)} = F_{(N)} \cdot v_{(m/s)} \quad \text{①}$$

$$P_{(W)} = C_{(N.m)} \cdot \omega_{(rd/s)} \quad \text{②}$$

$$\text{et} \quad \omega_{(rd/s)} = 2 \cdot \pi \cdot N_{(tr/mn)} / 60 \quad \text{③}$$

➤ **Déplacement droite du portique (quadrant 1)**

En préalable, il est important de signaler que ce mouvement n'a pas le caractère intensif des deux mouvements étudiés précédemment.

En régime stabilisé de vitesse, la masse totale déplacée à 0,75 m/s est :

$$M_{Tt} = 857 \text{ tonnes} \quad \text{ou encore} \quad M_{Tt} = 857 \cdot 10^3 \text{ kg}$$

La force de déplacement liée au coefficient de frottement de roulement exprimée en Newton a pour valeur :

$$F_{Tt} = 857 \cdot 10^3 \cdot 0,065 \quad \text{soit} \quad F_{Tt} = 55\,705 \text{ N}$$

Le calcul de la puissance résistante en régime établi exprimée en Watts s'effectue à l'aide de la relation ① :

$$P_1 = F_{Tt} \cdot v = 55\,705 \cdot 0,75 \quad \text{soit} \quad P_1 = 41\,779 \text{ W} \quad \text{ou encore} \quad P_1 = 41,779 \text{ kW}$$

En tenant compte du rendement mécanique global du mécanisme de translation, la puissance motrice à développer par les moteurs d'entraînement devient :

$$P_{m1} = P_1 / \eta \Rightarrow P_{m1} = 41\,779 / 0,85 \quad \text{soit finalement} \quad P_{m1} = 49\,151 \text{ W} \quad \text{ou encore} \quad P_{m1} = 49,151 \text{ kW}$$

La vitesse nominale de rotation des moteurs d'entraînement 1500 tr/mn correspond une vitesse linéaire de translation 0,75 m/s du portique en régime stabilisé.

L'expression en radians par seconde de cette vitesse de rotation des moteurs s'effectue à l'aide de la relation ③ soit :

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot 1500 / 60 \quad \text{d'où} \quad \omega_1 = 157,08 \text{ rd/s}$$

En régime de vitesse stabilisée, chacun des huit moteurs d'entraînement développe un couple moteur $C_{m1/8}$ qui équilibre le huitième du couple résistant C_{r1} du chariot avec la charge. Ce couple C_{r1} est obtenu à partir de la relation ② :

$$C_{r1} = P_{m1} / \omega_1 \quad \text{d'où} \quad C_{r1} = 49\,151 / 157,08 \Rightarrow C_{r1} = 312,9 \text{ N.m} \quad \text{soit} \quad C_{m1/8} = (1/8) \cdot C_{r1} = 39,11 \text{ N.m}$$

➤ **Déplacement gauche du portique (quadrant 3)**

La masse considérée est inchangée aussi, les puissances développées sont identiques au cas précédent.

La puissance résistante en régime établi est donc :

è

De même, le couple moteur développé par chacun des moteurs d'entraînement est également identique au cas précédent mais de sens opposé soit :

$$C_{r2} = -C_{r1} \quad \Rightarrow \quad C_{r2} = -312,9 \text{ N.m} \quad \text{d'où} \quad C'_{m1/8} = -39,11 \text{ N.m}$$

c) Calcul des couples et puissances à développer dans les phases transitoires de fonctionnement

La méthodologie utilisée est identique à celle utilisée pour les mouvements de levage et de direction.

Les formules utilisées sont:

$$J_{(\text{kg.m}^2)} = M_{(\text{kg})} \cdot v_{(\text{m/s})}^2 / \omega_{(\text{rd/s})}^2 \quad \textcircled{4}$$

et enfin $C_{(\text{N.m})} = J_{(\text{kg.m}^2)} \cdot d\omega_{(\text{rd/s})} / dt_{(\text{s})} \quad \textcircled{5}$

➤ **Calcul de l'inertie équivalente globale ramenée aux arbres des moteurs**

❖ Calcul de l'inertie équivalente de la masse totale du portique déplacée (droite ou gauche)

La relation d'équivalence $\textcircled{4}$ conduit à l'égalité suivante :

$$J_p = M_{Tt} \cdot v_1^2 / \omega_1^2 \quad \text{d'où} \quad J_p = 857 \cdot 10^3 \cdot 0,75^2 / 157,08^2 \quad \text{soit} \quad J_p = 19,54 \text{ kg.m}^2$$

❖ Calcul de l'inertie totale équivalente ramenée aux arbres des moteurs

Comme pour l'étude du mouvement de direction, nous regrouperons en deux groupes J_L et J_R les inerties équivalentes des parties rapides et lentes de la chaîne cinématique de translation :

$$J_{Tc} = \underbrace{8 \cdot J_m}_{J_R} + \underbrace{J_p}_{J_L} \quad \text{d'où} \quad J_{Tc} = 8 \cdot 0,65 + 19,54 = 5,2 + 19,54 \quad \Rightarrow \quad J_{Tc} = 24,74 \text{ kg.m}^2$$

➤ **Calcul du couple accélérateur global des inerties de la chaîne cinématique**

C'est la relation $\textcircled{5}$ qui permet d'en obtenir la valeur. En raison du fait que les temps d'accélération et de ralentissement sont identiques d'une part, mais que le rendement du mécanisme est influé sur la valeur du couple accélérateur réel d'autre part, nous aurons les cas suivants à considérer :

Accélération droite :

$$\omega_1 > 0 \Rightarrow d\omega_1 / dt_1 > 0 \quad (\text{la pente de croissance de la vitesse est positive})$$

$$C_{a1} = (J_R + J_L / \eta) \cdot d\omega_1 / dt_1 \quad \text{d'où} \quad C_{a1} = (5,2 + 19,54 / 0,85) \cdot 157,08 / 4 \Rightarrow C_{a1} = 1107 \text{ N.m}$$

Ralentissement droite :

$$\omega_1 > 0 \Rightarrow d\omega_1 / dt_1 < 0 \quad (\text{la pente de diminution de la vitesse est négative})$$

$$C_{a2} = (J_R + J_L \cdot \eta) \cdot d\omega_1 / dt_1 \quad \text{d'où} \quad C_{a2} = (5,2 + 19,54 \cdot 0,85) \cdot (-157,08) / 4 \Rightarrow C_{a2} = -856 \text{ N.m}$$

Accélération gauche :

$$\omega_2 < 0 \Rightarrow d\omega_2 / dt_2 < 0 \quad (\text{la pente de croissance de la vitesse est négative})$$

$$C_{a3} = (J_R + J_L / \eta) \cdot d\omega_2 / dt_2 \quad \text{d'où} \quad C_{a3} = (5,2 + 19,54 / 0,85) \cdot (-157,08) / 4 \Rightarrow C_{a3} = -1107 \text{ N.m}$$

Ralentissement gauche :

$$\omega_2 < 0 \Rightarrow d\omega_2 / dt_2 > 0 \quad (\text{la pente de décroissance de la vitesse est positive})$$

$$C_{a4} = (J_R + J_L \cdot \eta) \cdot d\omega_2 / dt_2 \quad \text{d'où} \quad C_{a4} = (5,2 + 19,54 \cdot 0,85) \cdot 157,08 / 4 \Rightarrow C_{a4} = 856 \text{ N.m}$$

➤ **Détermination du couple sur l'arbre de chaque moteur pour chacune des phases du cycle**

Pour chacune des phases élémentaires du cycle, les moteurs devront fournir un couple mécanique égal au huitième de la somme du couple résistant et du couple accélérateur correspondant soit :

1) Accélération droite

$$C_m = (1/8) \cdot (C_{r1} + C_{a1}) \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (312,9 + 1107) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = 177,5 N.m}$$

2) Vitesse stabilisée droite

$$C_m = (1/8) \cdot C_{r1} \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot 312,9 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = 39,11 N.m}$$

3) Décélération droite

$$C_m = (1/8) \cdot (C_{r1} + C_{a2}) \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (312,9 - 856) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = - 67,89 N.m}$$

4) Arrêt

$$\mathbf{C_m = 0}$$

5) Accélération gauche

$$C_m = (1/8) \cdot (C_{r2} + C_{a3}) \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (- 312,9 - 1107) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = - 177,5 N.m}$$

6) Vitesse gauche

$$C_m = (1/8) \cdot C_{r2} \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (- 312,9) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = - 39,11 N.m}$$

7) Décélération gauche

$$C_m = (1/8) \cdot (C_{r2} + C_{a4}) \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (- 312,9 + 856) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = 67,89 N.m}$$

8) Arrêt

$$\mathbf{C_m = 0}$$

d) Influence du vent sur le calcul des couples et puissances

Nous ferons les hypothèses suivantes :

- le vent souffle de façon constante durant le temps de translation du portique
- l'orientation du vent est inverse au sens de déplacement droite du portique..

La surface équivalente latérale au vent est estimée à 900 m². On obtient la force résistante supplémentaire opposée par le vent au déplacement horizontal de la charge par la relation :

$$\mathbf{F_{vent} (N) = p (N/m^2) \cdot S (m^2)}$$

avec S la surface totale du chariot et de la charge face au vent
 p la pression du vent limite autorisant la translation par unité de surface

$$\text{soit} \quad F_{vent} (N) = 380 \cdot 900 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{F_{vent} (N) = 342\,000 N}$$

On s'aperçoit que la valeur de cette force parasite occasionnelle est très supérieure à la force de traction en régime de vitesse stabilisée du portique ($F_{dt} = 55\,705N$). Elle aura un rôle déterminant pour la détermination thermique des moteurs d'entraînement.

Si l'on suppose conserver les mêmes performances de vitesse et d'accélération que lorsque le vent est nul, on aboutit pour chacun des huit moteurs d'entraînement aux valeurs de couple moteur suivantes :

1) Accélération droite

$$C_m = (1/8) \cdot (C_{r1} + C_{a1}) \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (2234 + 1107) \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = 417,6 N.m}$$

2) Vitesse stabilisée droite

$$C_m = (1/8) \cdot C_{r1} \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot 2234 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{C_m = 279,2 N.m}$$

3) Décélération droite

$$C_m = (1/8) \cdot (C_{r1} + C_{a2}) \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (2234 - 1107) \Rightarrow C_m = 140,9 \text{ N.m}$$

4) Arrêt (freins serrés)

$$C_m = 0$$

5) Accélération gauche

$$C_m = (1/8) \cdot (C_{r2} + C_{a3}) \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (1162 - 856) \Rightarrow C_m = 38,2 \text{ N.m}$$

6) Vitesse gauche

$$C_m = (1/8) \cdot C_{r2} \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (1162) \Rightarrow C_m = 145,2 \text{ N.m}$$

7) Décélération gauche

$$C_m = (1/8) \cdot (C_{r2} + C_{a4}) \quad \text{d'où} \quad C_m = (1/8) \cdot (1162 + 856) \Rightarrow C_m = 252,2 \text{ N.m}$$

8) Arrêt (freins serrés)

$$C_m = 0$$

Remarque :

Les résultats précédents montrent que la force du vent seule est suffisante, dès que les freins sont desserrés, pour entraîner le portique sur son chemin de roulement. Au de-là d'une vitesse de vent limite, le fonctionnement du portique est arrêté et celui-ci est immobilisé au sol par des pinces rail de sécurité.

➤ **Représentation graphique des couples et puissances mécaniques de chaque moteur**

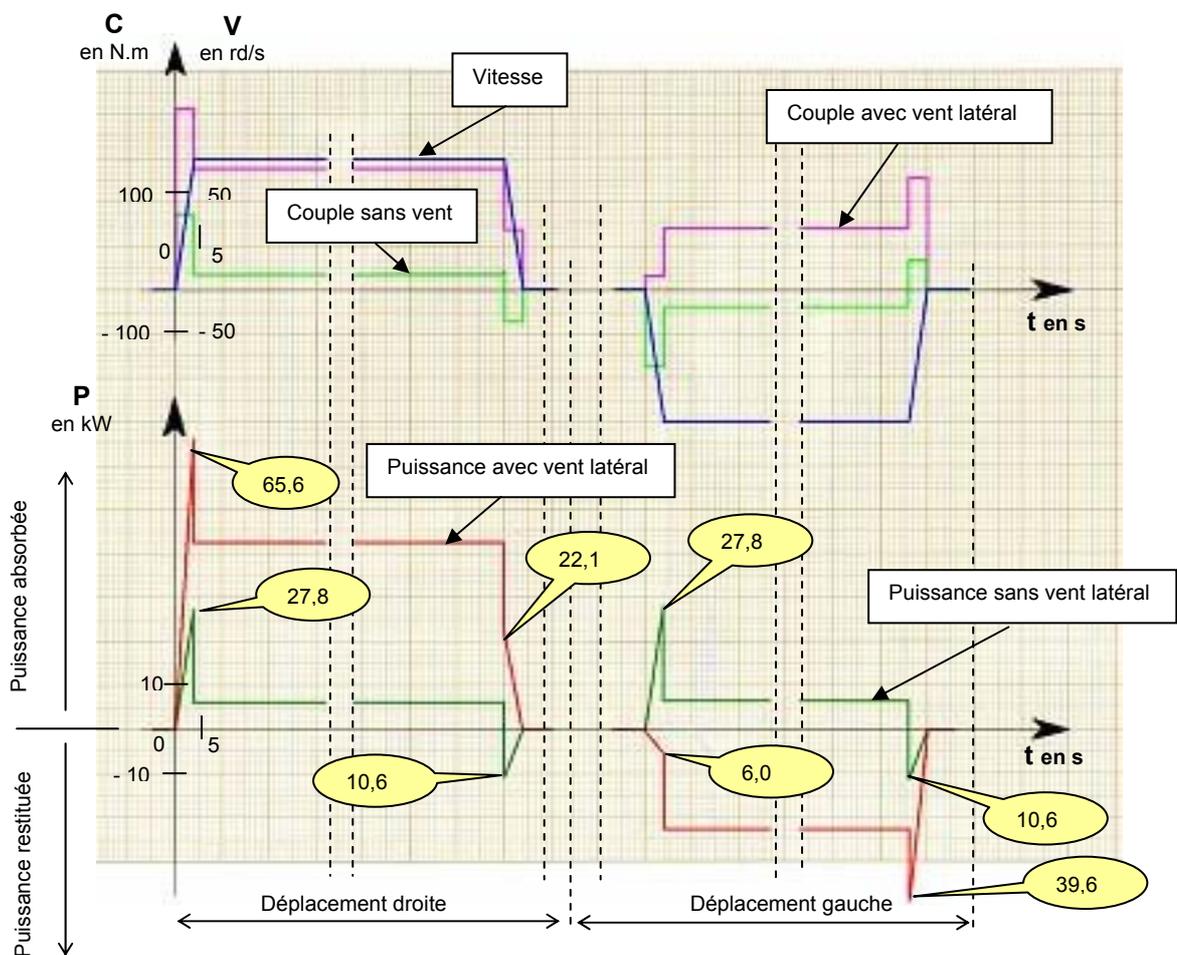


Fig. 3.7.9

3.7.1.5. Etude du mouvement de relevage

a) Données techniques complémentaires

➤ Chaîne cinématique

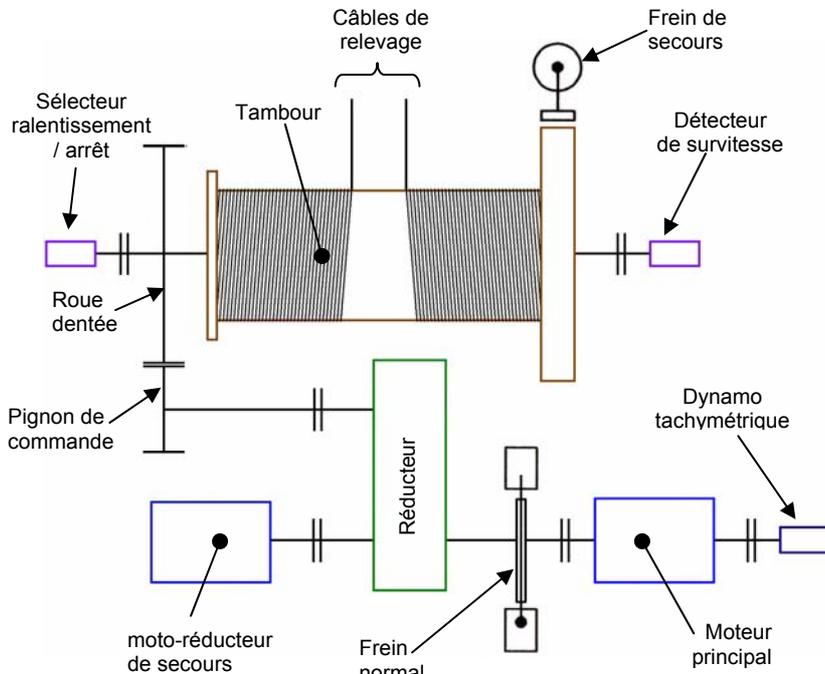


Fig. 3.7.10a

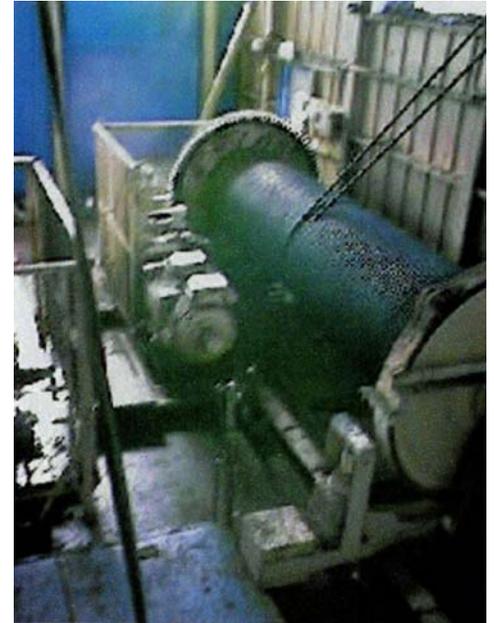


Fig. 3.7.10b

Classement F.E.M. du mécanisme : **V4 – 3 – 5m**

➤ Rappel des données techniques fondamentales au dimensionnement en puissance

- | | |
|---|--|
| - Angle maximum de relevage : | $\alpha_r = 70^\circ$ |
| - Masse de l'avant bec : | $M_b = 74 \text{ tonnes}$ |
| - Temps de relevage à vitesse constante : | $T_r = 5 \text{ mn}$ |
| - Vitesse des câbles en sortie du tambour de relevage : | $v_r = 0,5 \text{ m/s}$ |
| - Mouflage : $n = 2 \times 5$ brins ; rendement des poulies : | $\eta_p = 0,93$ |
| - Temps d'accélération : | $t_{acc} = 4 \text{ s}$; |
| - Temps de décélération : | $t_{dec} = 10 \text{ s}$ |
| - Tambour : | |
| | diamètre enroulement $\Phi 875 \text{ mm}$; |
| | inertie unitaire $J_t = 710 \text{ kg.m}^2$ |
| - Réducteur principal : | |
| | rapport de réduction $n = 1/17,86$; |
| | inertie $J_r = 0,62 \text{ kg.m}^2$; |
| | rendement $\eta_r = 0,90$ |

- Moteur principal :

vitesse nominale	$N_n = 1450 \text{ tr/mn}$;
inertie	$J_m = 1,9 \text{ kg.m}^2$
- Pignon de commande : $dp = 208 \text{ mm}$; 13 dents ; $m = 16$
- Roue dentée : $dp = 1552 \text{ mm}$; 97 dents ; $m = 16$
- Freins normal de type à disque : inertie unitaire $J_f = 1,28 \text{ kg.m}^2$
- Frein de secours de type à bande : 150x8x1945/18A
- Accouplement moteur principal : $J_a = 0,5 \text{ kg.m}^2$

b) Calcul de la puissance mécanique et du couple à développer en régime établi (vitesse constante)

Lorsque les portiques ne sont pas en exploitation, les avant becs sont systématiquement relevés (position haute) afin de faciliter les opérations d'accostage et de manœuvre à quai des navires.

Le mouvement de relevage, critique par ailleurs pour la stabilité de l'engin, est peu intensif, car en général il n'est effectué qu'une seule fois au cours des opérations de manutention d'un navire porte conteneurs.

L'estimation de la force de tirage exercée par les câbles du treuil de relevage est relativement complexe car celle-ci évolue tout au long du pivotement de l'avant bec. On montre que cette force est maximale lorsque l'avant bec est horizontale puis décroît progressivement jusqu'à l'arrêt du mouvement de relevage en position haute (angle α_r voisin de 70°).

Remarque :

L'angle formé par les câbles de tirage et la poutre de l'avant bec reste sensiblement constant ($\cong 20^\circ$) entre 0° et 60° d'inclinaison de la poutre.

Le calcul des puissances et couples nécessitera l'usage des relations suivantes :

$$P_{(W)} = F_{(N)} \cdot v_{(m/s)} \quad \text{①}$$

$$P_{(W)} = C_{(N.m)} \cdot \omega_{(rd/s)} \quad \text{②}$$

et $\omega_{(rd/s)} = 2 \cdot \pi \cdot N_{(tr/mn)} / 60 \quad \text{③}$

➤ **Montée de l'avant bec (quadrant 1)**

Dans le cas du portique étudié, la masse de l'avant bec est évaluée à 74 tonnes. Si l'on suppose que la masse de l'avant bec est uniformément répartie, le centre de gravité se situe à égale distance de l'axe de pivotement et de l'extrémité de la poutre côté mer. L'équilibre des moments permet de déterminer la force de tirage au niveau de l'accrochage des poulies du mouflage. Cette force évolue entre :

$$F_{\max} = 1\,061 \cdot 10^3 \text{ N} \quad \text{en position horizontale et}$$

$$F_{\min} = 480 \cdot 10^3 \text{ N} \quad \text{en position haute.}$$

D'autre part, la vitesse v_a au point d'accrochage est égale à la vitesse du câble v_c à la sortie du tambour de relevage divisée par le nombre de brins du mouflage soit :

$$v_p = v_c / n \quad \Rightarrow \quad v_p = 0,5 / 5 \quad \text{soit finalement} \quad v_p = 0,1 \text{ m/s}$$

On obtient la valeur de la puissance résistante maximale en régime établi à l'aide de la relation ① :

$$P_{\max} = 1\,061 \cdot 10^3 \cdot 0,1 \quad \text{soit} \quad P_{\max} = 106,1 \cdot 10^3 \text{ W} \quad \text{ou encore} \quad P_{\max} = 106,1 \text{ kW}$$

La puissance motrice P_{m1} à développer par le moteur d'entraînement devra tenir compte du rendement mécanique du mécanisme (approximé à celui du réducteur de vitesse) et des poulies du mouflage.

Ce qui conduit à l'expression de la puissance motrice à fournir suivante :

$$P_{m1} = 106,1 \cdot 10^3 / (0,9 \times 0,93) \quad \text{soit finalement } P_{m1} = 126,8 \cdot 10^3 \text{ W ou encore } \mathbf{P_{m1} = 126,8 \text{ kW}}$$

La vitesse nominale de rotation du moteur d'entraînement 1450 tr/mn correspond à la vitesse linéaire en régime stabilisé de 0,5 m/s des câbles à la sortie du tambour de relevage.

L'expression en radians par seconde de cette vitesse s'effectue à l'aide de la relation ③ soit :

$$\omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot 1450 / 60 \quad \text{d'où} \quad \omega_1 = \mathbf{151,84 \text{ rd/s}}$$

En régime de vitesse stabilisée montée, le moteur d'entraînement développe un couple moteur C_{m1} qui équilibre le couple résistant C_{r1} de l'avant bec. Ce dernier est obtenu à partir de la relation ② :

$$C_{r1} = P_{m1} / \omega_1 \quad \text{soit } C_{r1} = 126\,800 / 151,84 \quad \text{d'où finalement } \mathbf{C_{m1} = C_{r1} = 835,1 \text{ N.m}}$$

En position haute de relevage, les valeurs de puissance et de couple à développer par le moteur d'entraînement deviennent :

$$\mathbf{P'_{m1} = 57,35 \text{ kW}}$$

$$\mathbf{C'_{m1} = 377,7 \text{ N.m}}$$

➤ **Descente de l'avant bec (quadrant 4)**

En descente, en régime établi, la charge est entraînée et le rendement du mécanisme participe au freinage de la masse totale en mouvement par dissipation de pertes par effet joule. La vitesse de déplacement et la masse sont identiques au cas précédent, mais le sens de déplacement est inversé. La puissance mécanique et le couple de freinage développés par le moteur d'entraînement deviennent alors :

- en position haute de relevage :

$$\mathbf{P'_{m2} = -40,17 \text{ kW}}$$

$$\mathbf{C'_{m2} = 264,6 \text{ N.m}}$$

- en position basse de relevage (valeurs maximales) :

$$\mathbf{P_{m2} = -88,80 \text{ kW}}$$

$$\mathbf{C_{m2} = 584,8 \text{ N.m}}$$

c) calcul des couples et puissances à développer dans les phases transitoires de fonctionnement

La méthodologie employée reste identique à celle utilisée pour les mouvements étudiés précédemment.

Les formules utilisées sont:

$$\mathbf{J_{(kg.m^2)} = M_{(kg)} \cdot v_{(m/s)}^2 / \omega_{(rd/s)}^2} \quad \mathbf{④}$$

$$\text{et enfin} \quad \mathbf{C_{(N.m)} = J_{(kg.m^2)} \cdot d\omega_{(rd/s)} / dt_{(s)}} \quad \mathbf{⑤}$$

➤ **Calcul de l'inertie équivalente ramenée à l'arbre du moteur**

Remarque préliminaire :

La très faible vitesse de déplacement du centre de gravité de la poutre de l'avant bec d'une part et de la faible vitesse angulaire du tambour d'enroulement des câbles de relevage d'autre part, justifie que ces inerties ramenées à l'arbre rapide sont suffisamment petites par rapport à celles du moteur d'entraînement et du frein de service pour être négligées.

En conséquence, l'inertie totale équivalente se résume à la somme des inerties présentes au niveau de l'arbre rapide moteur soit :

$$J_{Tr} = J_m + J_f + J_a + J_r + \quad \text{d'où} \quad J_{Tc} = 1,9 + 1,28 + 0,5 + 0,62$$

$$\text{soit finalement} \quad J_{Tr} = 4,3 \text{ kg.m}^2$$

➤ **Calcul des couples accélérateurs des inerties de la chaîne cinématique**

C'est la relation ⑥ qui permet d'en obtenir les valeurs dont le signe dépend de la pente de la variation de vitesse. Ceci conduit aux cas suivants :

❖ Calcul du couple accélérateur (montée ou descente)

$$C_{ac} = J_{Tr} \cdot d\omega / dt \quad \text{d'où} \quad C_{ac} = 4,3 \cdot 151,84 / 4 \quad \text{soit} \quad C_{ac} = (+/-) 163,2 \text{ N.m}$$

❖ Calcul du couple de ralentissement (montée ou descente)

$$C_{d\acute{e}c} = J_{Tr} \cdot d\omega / dt \quad \text{d'où} \quad C_{d\acute{e}c} = 4,3 \cdot 151,84 / 10 \quad \text{soit} \quad C_{d\acute{e}c} = (+/-) 65,3 \text{ N.m}$$

➤ **Détermination du couple sur l'arbre moteur pour chacune des phases du cycle de l'engin**

Pour chacune des phases élémentaires du cycle on obtient les valeurs de couple moteur suivantes :

1) Accélération montée avant bec :

$$C_m = C_{r1} + C_{ac} \quad \text{d'où} \quad C_m = 853,1 + 163,2 \quad \Rightarrow \quad C_m = 1016,3 \text{ N.m}$$

2) Vitesse stabilisée début de montée :

$$C_m = C_{r1} \quad \text{d'où} \quad C_m = 853,1 \quad \Rightarrow \quad C_m = 853,1 \text{ N.m}$$

3) Vitesse stabilisée fin de montée :

$$C_m = C_{r1} \quad \text{d'où} \quad C_m = 377,7 \quad \Rightarrow \quad C_m = 377,7 \text{ N.}$$

4) Décélération montée avant bec :

$$C_m = C_{r1} + C_{ac} \quad \text{d'où} \quad C_m = 377,7 - 65,3 \quad \Rightarrow \quad C_m = 312,4 \text{ N.m}$$

5) Arrêt en position haute de l'avant bec :

$$\Rightarrow \quad C_m = 0 \text{ N.m}$$

6) Accélération descente l'avant bec :

$$C_m = C_{r2} + C_{ac} \quad \text{d'où} \quad C_m = 264,6 - 163,2 \quad \Rightarrow \quad C_m = 101,4 \text{ N.m}$$

7) Vitesse stabilisée début de descente :

$$C_m = C_{r2} \quad \text{d'où} \quad C_m = 264,6 \quad \Rightarrow \quad C_m = 264,6 \text{ N.m}$$

8) Vitesse stabilisée fin de descente :

$$C_m = C_{r1} \quad \text{d'où} \quad C_m = 584,8 \quad \Rightarrow \quad C_m = 584,8 \text{ N.m}$$

9) Décélération descente avant bec :

$$C_m = C_{r2} - C_{ac} \quad \text{d'où} \quad C_m = 584,8 + 65,3 \quad \Rightarrow \quad C_m = 650,1 \text{ N.m}$$

10) Arrêt en position basse de l'avant bec :

$$\Rightarrow \quad C_m = 0 \text{ N.m}$$

3.7.2 La grue à crochet

L'engin de levage que nous allons étudier partiellement est une grue portuaire utilisée pour le chargement et le déchargement des navires.

Cet engin dispose d'un crochet permettant de fixer les différentes élingues nécessaires à l'accrochage des produits à manutentionner.

La puissance électrique nécessaire pour assurer la commande des divers mécanismes de l'engin varie de 250 à 500 kW selon le service attendu de l'engin. En général, l'alimentation en énergie électrique est assurée en basse tension (400Volts). Comme pour les portiques de quai, un dispositif par enrrouleur avec contact glissant permet d'assurer la continuité de l'alimentation électrique lorsque la grue se déplace le long de son chemin de roulement.

3.7.2.1. Description de l'engin

a) Description des mouvements principaux

La figure ci-dessous décrit succinctement la répartition des différents mécanismes et automatismes de la grue.

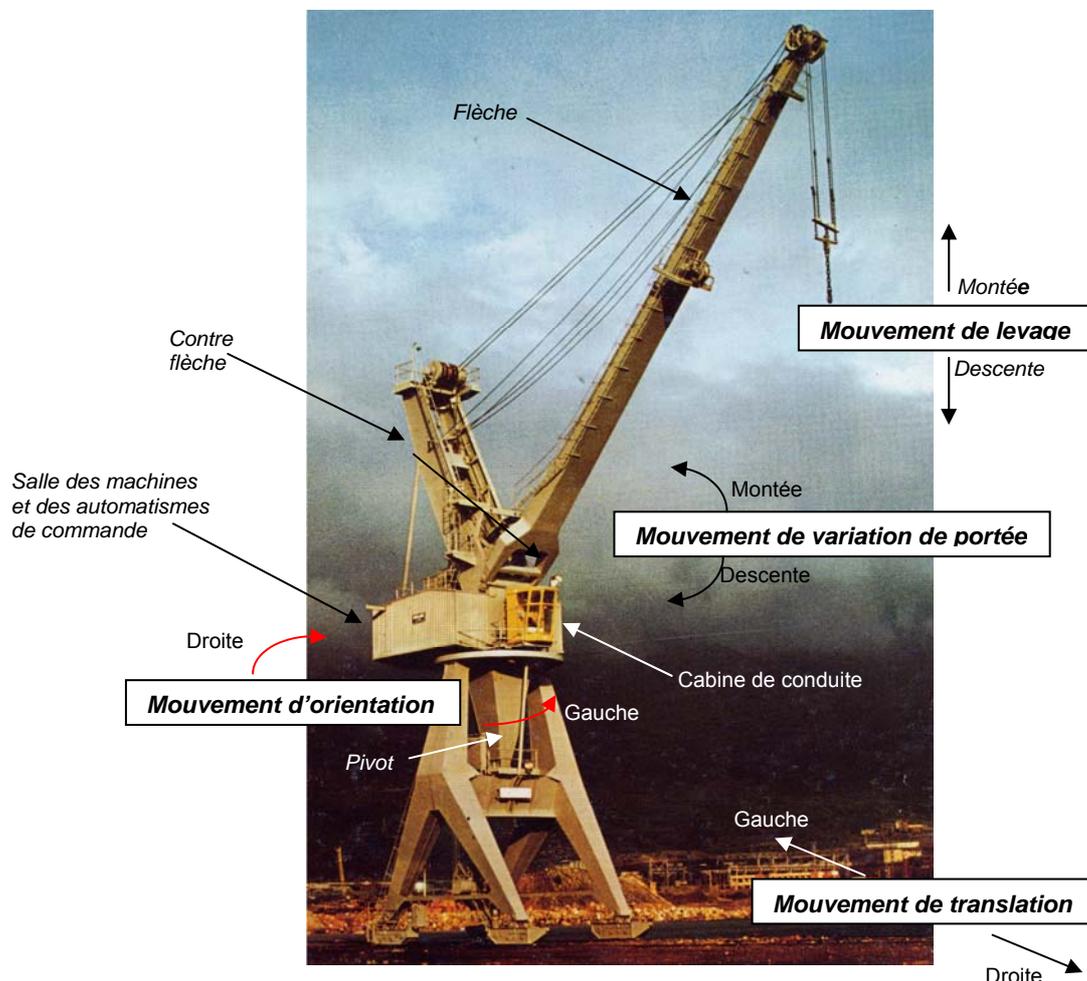


Fig. 3.7.11

Cet engin de levage encore appelé grue à flèche droite est animé des quatre mouvements suivants :

- ❖ Levage
- ❖ Orientation (giration)
- ❖ Variation de portée
- ❖ Translation

La manutention des charges nécessite très fréquemment de combiner les trois mouvements principaux levage, variation de portée et orientation.

Les treuils de levage et de variation de portée sont situés dans une salle des machines sur la partie tournante de la grue.

De même, la salle électrique regroupant les commandes de puissance et les automatismes de contrôle est également située sur cette même plate-forme.

Une couronne solidaire du pivot et munie de bagues et de frotteurs adaptés assure entre les parties fixe et tournante de la grue la continuité :

- ❖ de l'alimentation en énergie électrique
- ❖ des ordres de contrôle/commande

b) Caractéristiques mécaniques générales

Les caractéristiques mécaniques et performances générales de la grue sont les suivantes :

Masse totale de la grue :	$M_t = 230$ tonnes environ
Force de levage :	$F_L = 15$ t de 11,50 m à 23,20m de portée ; $F_L = 24$ t de 11,50 m à 35,20 m de portée
Vitesse de levage :	$v_L = 1,3$ m/s jusqu'à 12 tonnes $v_L = 0,63$ m/s au-delà de tonnes
Vitesse d'orientation :	$v_O = 1,5$ tr/mn
Vitesse de variation de portée :	$v_p = 1$ m/s
Vitesse de translation :	$v_T = 30$ m/mn

3.7.2.2. Etude du mouvement d'orientation

a) Données techniques complémentaires

➤ Chaîne cinématique

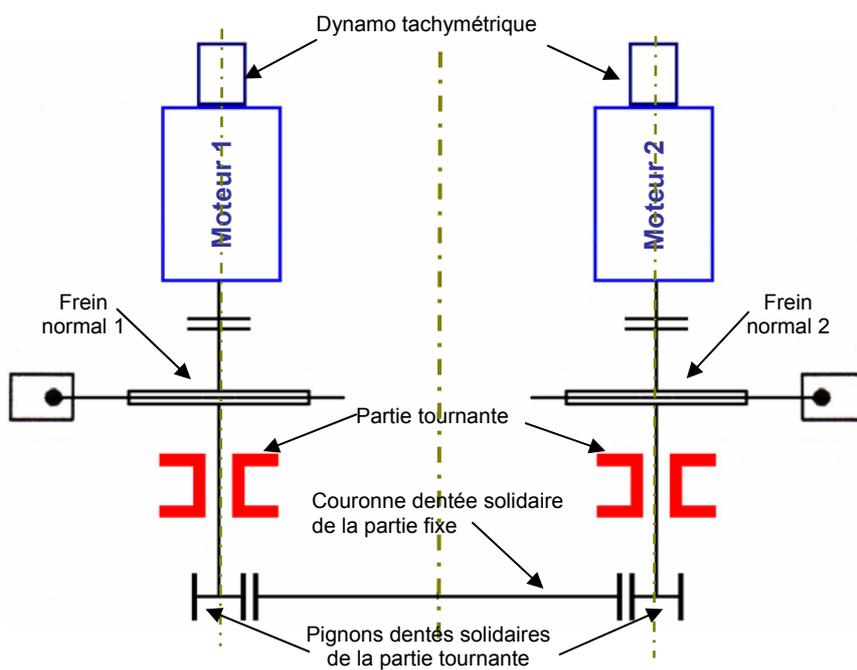


Fig. 3.7.12a



Fig. 3.7.12b

➤ **Rappel des données techniques fondamentales au dimensionnement en puissance**

Chaîne cinématique

- Vitesse de rotation : $v_r = 1,5 \text{ tr/mn}$
- Temps d'accélération et de décélération pour une portée de 35,20 m : $t_{\text{acc/déc}} = 7 \text{ s}$
- Rendement du mécanisme : $\eta = 0,8$
- Inertie de la partie tournante (avec charge de 15 tonnes à 35.20 m) : $J_{fc} = 30\,000\,000 \text{ kg.m}^2$
- Inertie Mr^2 sur arbre rapide, hors moteurs (pignon, freins et accouplements) : $J_r = 7 \text{ kg.m}^2$
- Moteur principal (Q = 2) :
 - vitesse nominale : $N_n = 725 \text{ tr/mn}$
 - inertie : $J_m = 0,65 \text{ kg.m}^2$
- Rapport de réduction pignon couronne : $r = 1/475$

Couples résistants

- Frottement de la crapaudine : $C_{rc} = 800 \text{ N.m}$
- Frottement des galets d'orientation : $C_{rg} = 18\,050 \text{ N.m}$
- Vent limite de service (25 daN/m²) : $C_{rv} = 300 \cdot 10^3 \text{ N.m}$ (portée 35,20 m charge 15 tonnes)

b) Calcul de la puissance mécanique et du couple à développer en régime établi (vitesse constante)

Le calcul des puissances et couples nécessitera l'usage des relations suivantes :

$$P_{(W)} = C_{(N.m)} \cdot \omega_{(rd/s)} \quad \text{①}$$

et $\omega_{(rd/s)} = 2 \cdot \pi \cdot N_{(tr/mn)} / 60 \quad \text{②}$

❖ Calcul du couple résistant et de la puissance lorsque le vent est nul

Si ΣC_{ri} est la somme des couples résistants s'opposants au mouvement d'orientation, on obtient la valeur globale du couple résistant par l'équation suivante :

$$C_{r1} = (\Sigma C_{ri}) / (\eta \cdot r) \quad \text{③}$$

- avec $\Sigma C_{ri} \Rightarrow$ la somme des couples résistants
- $r \Rightarrow$ le rapport de réduction pignon couronne
- $\eta \Rightarrow$ le rendement du mécanisme

En portant dans cette relation les données numériques du constructeur de la grue on obtient :

$$C_{r1} = (18,05 + 0,8) \cdot 10^3 / (0,8 \cdot 475) \quad \text{soit finalement} \quad C_{r1} = 49,61 \text{ N.m}$$

La relation ② permet d'exprimer la vitesse de rotation du moteur en radians par secondes soit :

$$\omega_{m1} = 2 \cdot \pi \cdot 725 / 60 \quad \Rightarrow \quad \omega_{m1} = 75,92 \text{ rd/s}$$

En remplaçant dans l'équation de la puissance ① le couple et la vitesse par les valeurs C_{r1} et ω_{m1} que nous venons de calculer, on obtient :

$$P_1 = 49,61 \cdot 75,92 \quad \Rightarrow \quad P_1 = 3\,766 \text{ W}$$

❖ Calcul du couple résistant et de la puissance avec vent limite de service

Supposons que la grue soit toujours animée d'un mouvement de rotation droite ($\omega > 0$), alors quelle est soumise au vent limite de service. Sur une moitié totale de l'aire balayée, le vent s'oppose à la rotation de la flèche et le couple résistant occasionné par le vent sur la partie tournante s'ajoute aux autres couples résistants. Le couple résistant devient maximal lorsque la flèche est orientée perpendiculairement à la direction du vent (quadrant 1).

En portant dans la relation ④ les nouvelles valeurs numériques on obtient le couple résistant maximal par le calcul suivant :

$$C_{r2} = (300 + 18,05 + 0,8) \cdot 10^3 / (0,8 \cdot 475) \quad \text{soit finalement} \quad C_{r1} = 839,08 \text{ N.m}$$

Avec le vent limite de service, la puissance mécanique motrice sur l'arbre rapide a pour valeur :

$$P_2 = 839,08 \cdot 75,92 \quad \Rightarrow \quad P_2 = 63\,704 \text{ W}$$

Sur l'autre moitié de l'aire balayée par la flèche, le vent entraîne le mouvement de rotation et le couple résistant occasionné par le vent sur la partie tournante se retranche alors aux autres couples résistants.

On obtient les valeurs numériques suivantes : a

$$C'_{r2} = (-300 + 18,05 + 0,8) \cdot 10^3 \cdot 0,8 / 475 \quad \text{soit finalement} \quad C'_{r1} = -473,52 \text{ N.m}$$

Les moteurs devront présenter un couple global de freinage (quadrant 2). La puissance maximale atteinte dans ce nouveau cas aura pour valeur :

$$P'_2 = -473,52 \cdot 75,92 \quad \Rightarrow \quad P'_2 = -35\,950 \text{ W}$$

c) calcul des couples et puissances à développer dans les phases transitoires de fonctionnement

La méthodologie employée reste identique à celle utilisée pour les mouvements étudiés précédemment.

Les formules utilisées sont:

$$\frac{1}{2} J_{1(\text{kg.m}^2)} \cdot \omega_{1(\text{rd/s})}^2 = \frac{1}{2} J_{2(\text{kg.m}^2)} \cdot \omega_{2(\text{rd/s})}^2 \quad \text{④}$$

$$\text{et enfin} \quad C_{(\text{N.m})} = J_{(\text{kg.m}^2)} \cdot d \omega_{(\text{rd/s})} / dt_{(\text{s})} \quad \text{⑤}$$

➤ **Calcul de l'inertie équivalente ramenée à l'arbre du moteur**

La relation ④ permet de déterminer l'inertie équivalente de la partie tournante ramenée à l'arbre rapide.

Si, J_{fc} représente l'inertie totale de la partie tournante, r le rapport des vitesses entre les arbres lent et rapide et η le rendement de la chaîne cinématique, on obtient les relations suivantes :

- en régime moteur :

$$J_{tr} = (J_{fc} \cdot r^2) / \eta \quad \Rightarrow \quad J_{tr} = 30 \cdot 10^6 / 475^2 / 0,8 \quad \text{d'où} \quad J_{tr} = 166,2 \text{ kg.m}^2$$

- en régime frein :

$$J'_{tr} = (J_{fc} \cdot r^2) \cdot \eta \quad \Rightarrow \quad J'_{tr} = 30 \cdot 10^6 / 475^2 \cdot 0,8 \quad \text{d'où} \quad J'_{tr} = 106,4 \text{ kg.m}^2$$

L'inertie totale équivalente ramenée à l'arbre moteur est égale à la somme des inerties présentes au niveau de l'arbre rapide :

$$\Sigma J = 2 \cdot J_m + J_r + (J_{tr} \text{ ou } J'_{tr}) \quad \text{soit finalement en portant les données numériques on obtient :}$$

$$\text{- en régime moteur :} \quad J_i = 174,5 \text{ kg.m}^2$$

$$\text{- en régime frein :} \quad J'_i = 114,7 \text{ kg.m}^2$$

➤ **Calcul des couples transitoires des inerties de la chaîne cinématique**

C'est la relation ⑨ qui permet d'en obtenir les valeurs dont le signe dépend de la pente de la variation de vitesse. Ceci conduit aux cas suivants :

❖ Calcul du couple accélérateur en régime moteur

- en régime moteur :

$$C_{ac} = J_i \cdot d\omega / dt \quad \Rightarrow \quad C_{ac} = 174,5 \cdot 75,92 / 7 \text{ soit } \mathbf{C_{ac} = (+/-) 1\,892,6 \text{ N.m}}$$

❖ Calcul du couple de ralentissement en régime de freinage

- en régime frein:

$$C_{d\acute{e}c} = J'_i \cdot d\omega / dt \Rightarrow C_{d\acute{e}c} = 114,7 \cdot 75,92 / 7 \text{ soit } \mathbf{C_{d\acute{e}c} = (+/-) 1\,244 \text{ N.m}}$$

➤ **Détermination du couple sur l'arbre moteur pour chacune des phases du cycle de l'engin**

❖ fonctionnement de la grue sans vent

Si la grue est animée d'un mouvement de rotation droite ($\omega > 0$), à chacune des phases élémentaires du cycle, les moteurs fournissent un couple mécanique égal à la moitié de la somme (en valeur et en signe) du couple résistant et du couple accélérateur de la phase correspondante soit :

Accélération droite :

$$C_m = \frac{1}{2} \cdot (C_{r1} + C_{a1}) \quad \text{d'où } C_m = \frac{1}{2} \cdot (49,61 + 1\,892,6) \Rightarrow \mathbf{C_m = 971,1 \text{ N.m}}$$

Vitesse stabilisée droite :

$$C_m = \frac{1}{2} \cdot C_{r1} \quad \text{d'où } C_m = \frac{1}{2} \cdot 49,61 \Rightarrow \mathbf{C_m = 24,80 \text{ N.m}}$$

Décélération droite :

$$C_m = \frac{1}{2} \cdot (C_{r1} + C_{a2}) \quad \text{d'où } C_m = \frac{1}{2} \cdot (49,61 - 1\,244) \Rightarrow \mathbf{C_m = -597,19 \text{ N.m}}$$

La puissance mécanique (quadrant 1) est maximale en fin d'accélération droite et atteint la valeur unitaire pour chacun des moteurs du mouvement d'orientation :

$$\mathbf{P_{max} = 73\,726 \text{ W}}$$

Il est intéressant de remarquer par ailleurs que le couple résistant en régime établi est très petit par rapport au couple nécessaire pour respecter le temps d'accélération demandé.

On obtient les mêmes résultats pour une orientation gauche de la flèche, mais les signes des couples sont inversés car la vitesse est alors devenue négative.

❖ fonctionnement de la grue avec vent limite de service

Supposons que la grue reste toujours animée d'un mouvement de rotation droite ($\omega > 0$), mais que maintenant le vent s'oppose à ce mouvement. Il est intéressant de calculer les nouvelles valeurs du couple mécanique d'entraînement pour chacune des phases de fonctionnement. Nous considérerons chaque fois le cas le plus défavorable, c'est à dire lorsque la direction du vent est perpendiculaire à la flèche.

On obtient alors les nouvelles valeurs :

Accélération droite :

$$C_m = \frac{1}{2} \cdot (C_{r2} + C_{a3}) \quad \text{d'où } C_m = \frac{1}{2} \cdot (839,08 + 1\,892,6) \Rightarrow \mathbf{C_m = 1\,365,8 \text{ N.m}}$$

Vitesse stabilisée droite :

$$C_m = \frac{1}{2} \cdot C_{r2} \quad \text{d'où} \quad C_m = \frac{1}{2} \cdot (839,08) \quad \Rightarrow \quad C_m = 419,6 \text{ N.m}$$

3) Décélération droite :

$$C_m = \frac{1}{2} \cdot (C_{r2} + C_{a4}) \quad \text{d'où} \quad C_m = \frac{1}{2} \cdot (839,08 - 1\,244) \quad \Rightarrow \quad C_m = 202,46 \text{ N.m}$$

La puissance mécanique maximale de chaque moteur d'orientation en fin d'accélération droite atteint alors la nouvelle valeur suivante :

$$P_{\max} = 103\,695 \text{ W}$$

On constate ainsi en comparant les modes de fonctionnement avec ou sans vent, une différence significative de puissance qui doit impérativement être prise en compte dans le dimensionnement de la motorisation de l'engin.

3.8. Caractéristiques spécifiques aux mouvements de levage

3.8.1. Les mouvements horizontaux

3.8.1.1. La prépondérance des forces d'inertie

Les exemples précédents ont mis en évidence que l'effort nécessaire à entretenir la vitesse horizontale d'une masse en cours de déplacement sert uniquement, en l'absence de vent, à compenser la résistance à l'avancement, c'est à dire à l'effet des pertes dues au roulement. Cet effort est couramment de l'ordre de 70 à 80 newton par tonne déplacée.

Par ailleurs, la force à exercer pour appliquer à cette même masse d'une tonne une accélération de 0,3 à 0,4 m/s², valeurs fréquemment retenues en pratique, est de 300 à 400 newtons.

Compte tenu des surcouples limités que peuvent normalement développer les moteurs d'entraînement, on constate que la puissance installée est essentiellement déterminée par les conditions de démarrage. Il en résulte qu'en régime établi, la puissance utile est généralement très inférieure à la valeur nominale des machines. Cette puissance nominale est définie suivant un des services normalisés (se reporter au chapitre 6 – 1), qui précise une classe de démarrage et un facteur de marche. Il reste alors bien entendu à vérifier que le cycle réel d'utilisation, compte tenu de la durée des pointes de surcouple, des marches en régime établi, des arrêts, est au plus thermiquement équivalent au service normalisé choisi.

La résistance au roulement relativement faible justifie l'impossibilité d'obtenir une vitesse lente et suffisamment stable en insérant des résistances mêmes de valeurs élevées dans le circuit rotorique des moteurs asynchrones à bagues. Si l'engin doit effectuer des manœuvres délicates ou des positionnements précis, il convient de choisir un système plus perfectionné permettant, par un procédé de régulation, de contrôler efficacement la vitesse.

Pendant les démarrages et les freinages, le couple accélérateur subit des variations plus ou moins importantes. Pour obtenir le couple moyen nécessaire, un démarreur rotorique provoque des pointes temporaires d'autant plus élevées que son nombre de crans est plus réduit. L'endurance des éléments mécaniques peut, en conséquence, être sensiblement réduite. De plus, des difficultés peuvent se rencontrer en ce qui concerne l'adhérence et les balancements de charge.

Ces considérations donnent aujourd'hui un avantage décisif aux procédés de commande de puissance faisant appel à une régulation (les variateurs de vitesse électroniques à variation de fréquence). Dans ce cas, il est possible d'introduire la référence vitesse par une rampe qui fixe l'accélération à une valeur convenable. Cette valeur reste constante pendant toute la durée des modifications de vitesse.

Il est à noter que pour les mouvements verticaux, le problème se pose différemment puisque l'effort nécessaire en régime établi est égal précisément au poids de la charge à déplacer. En valeur relative, les effets de l'inertie sont donc très réduits.