

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/s<sup>2</sup>, 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.

### 3.8.1.2. Les effets du vent

Nous avons montré dans les exercices précédents, que le vent a une influence sur le dimensionnement des engins de levage. Cette force, proportionnelle à la projection de l'engin sur un plan perpendiculaire à la direction du vent, peut atteindre des valeurs considérables pour les engins importants.

Il est souvent imposé que le fonctionnement reste possible avec des vents exerçant une pression de 300 à 400 N.m<sup>2</sup>, ce qui correspond à des vitesses de 60 à 75 km/h. Dans ces conditions, il est souvent, admis que la durée des manœuvres soit allongée. Il faut de plus que les moteurs puissent vaincre l'effort supplémentaire qui leur est imposé, surtout comme nous l'avons montré au cours de la phase de démarrage de l'orientation de la grue lorsque la flèche se déplace contre le vent. Il faut veiller également à ce que les couples de freinage soient suffisants lorsque le vent est entraînant.

Certains appareils de levage, tels les portiques ou les grues, atteignent de très grandes hauteurs. L'effort du vent dans les superstructures, ramené au niveau de la voie de roulement, se traduit par un moment de renversement qui augmente la charge des galets sur les rails d'un côté et au contraire, la diminue de l'autre. Cet effet est défavorable pour les conditions d'adhérence et doit être soigneusement pris en compte au moment de l'étude.

### 3.8.1.3. La limite d'adhérence

La notion d'adhérence intervient lorsque le mobile roule sur des rails et assure son entraînement par l'intermédiaire de galets. C'est le cas par exemple des mouvements de translation de ponts roulants, de grues, de portiques ou des mouvements de direction de chariots automoteurs.

Nous avons montré que lorsque la limite d'adhérence est dépassée, le galet glisse sur le rail au lieu de rouler. Ce phénomène de patinage se traduit par une diminution considérable de la force appliquée au mobile. S'il se produit au cours d'un démarrage, la vitesse tend à s'annuler. au contraire, pendant un freinage l'effet est inverse et le ralentissement n'est plus assuré, ce qui peut être beaucoup plus dangereux.

Le retour aux conditions normales d'adhérence n'intervient en pratique qu'après la suppression du glissement. Il faut annuler pendant un temps le couple transmis par les galets puis le rétablir aussi progressivement que possible.

La difficulté est de savoir en pratique quelle valeur il faut attribuer au coefficient d'adhérence car celui-ci varie beaucoup selon l'état de surface du rail. L'expérience montre que l'adhérence est fortement réduite pour les engins exploités à l'extérieur quand le chemin de roulement est légèrement mouillé par un brouillard dense ou par une pluie fine. Les traces d'huile ou de graisse ont également un effet très défavorable.

Compte tenu de ces incertitudes, on retient généralement pour le coefficient d'adhérence une valeur de l'ordre de 0,10 à 0,12. Rappelons également que l'adhérence est d'autant plus réduite que le diamètre des galets moteurs est réduit.

Les gros engins d'un poids élevé sont munis d'un nombre important de galets. Il est bien sûr tentant, dans un souci de simplification mécanique, de n'assurer l'entraînement que par une partie des galets qui sont appelés « moteurs », les autres n'ayant qu'une fonction de porteurs sont également appelés « galets fous ».

Il ne faut pas oublier, que dans ces conditions le poids adhérent est réduit à celui supporté par les galets moteurs. L'adhérence de l'engin s'en trouve donc réduite d'autant.

Le critère d'adhérence limite donc rapidement les possibilités d'accroître les accélérations. Les mouvements rapides, direction de chariot par exemple, nécessitent par conséquent des distances d'accélération et de ralentissement importantes.

A titre d'exemple, il faut une distance minimale de 9m pour amener une masse à une vitesse nominale de 3 m/s en partant de l'arrêt et autant pour le ralentissement. Ces distances peuvent représenter une part importante du parcours total à effectuer.

De ces considérations, il résulte que le choix de la vitesse de régime doit être fait avec discernement et que son augmentation ne se traduit pas toujours par une réduction correspondante du temps total du trajet.

Il en ressort également que les systèmes de régulation, imposant une accélération constante pendant les régimes transitoires, permettent d'optimiser les distances correspondantes lorsque la rampe de la consigne de vitesse est réglée au voisinage de la limite d'adhérence.

Pour les grands portiques, une solution permet de s'affranchir de cette contrainte. Elle consiste à entraîner le chariot de direction par l'intermédiaire d'un système de câbles mû par un treuil fixe. Le poids, et par conséquent l'inertie du chariot sont considérablement réduits et la notion d'adhérence n'est plus à considérer

La valeur à retenir pour le poids adhérent est également à examiner avec soin. Souvent il n'est pas possible de prendre simplement en considération la répartition statique des poids lorsque l'appareil est à l'arrêt. En effet, lors des accélérations, les engins de grande hauteur sont soumis à un moment de cabrage qui décharge une partie des galets, par exemple ceux à l'avant dans le sens du démarrage.

Cet effet peut se combiner avec le moment de renversement dû au vent qui a déjà été évoqué précédemment. C'est bien entendu la valeur la plus faible du poids adhérent, dans le cas le plus défavorable, qui est prise en compte.

Lorsque les conditions d'adhérence sont particulièrement difficiles à respecter, il peut être nécessaire de prendre en compte cette spécificité dans l'automatisme de contrôle, pour adapter en temps réel, les couples développés aux circonstances du travail effectué.

Ce résultat peut être obtenu lorsque les moteurs sont alimentés par des variateurs de vitesse car il devient alors possible de déséquilibrer les couples mis en œuvre sur une palée par rapport à l'autre.

Par exemple, pour une grue, une charge suspendue au crochet et déplacée à une grande portée soulage les pieds du côté opposé. Il faut parfois, en fonction de la position de la flèche, réduire en translation les couples appliqués aux galets de deux pieds et renforcer au contraire les couples des deux autres pieds

#### **3.8.1.4. Le balancement de charge**

Nous avons montré au paragraphe 3.4.4. que toute variation de la vitesse d'une charge suspendue avait pour conséquence de générer un balancement risquant de constituer une gêne puisque la stabilisation peut entraîner une perte de temps.

Les procédés de démarrage « classiques » des moteurs asynchrones à bagues que l'on rencontre encore sur les équipements anciens, provoquent des pointes de couple importantes au moment du court-circuitage des sections de résistances rotoriques. Cela a pour effet d'entraîner des variations indésirables de l'accélération qui n'est plus du tout constante. Ceci a pour effet d'augmenter le balancement naturel de la charge.

L'emploi généralisé aujourd'hui des systèmes de régulation de vitesse permet d'assurer une commande précise de la vitesse à chaque instant. Il est alors possible d'imposer une loi de consigne de vitesse au démarrage et à l'arrêt permettant d'obtenir une accélération parfaitement contrôlée.

C'est au moment de l'arrêt que le balancement est le plus gênant. En effet, il n'est pas admissible, en général, de poser la charge tant que celle-ci est en mouvement.

En commande manuelle, c'est le conducteur de l'engin qui, souvent avec une grande habileté, après avoir arrêté le point d'attache haut de la charge et généré ainsi le mouvement oscillatoire, redonne une brève impulsion afin de ramener le point d'attache à la verticale de la charge.

En commande automatique, le réglage du temps de mise en vitesse ou de ralentissement permet de maîtriser le phénomène. En effet, nous avons vu au chapitre 3.4.4. que l'accélération  $\gamma$  au niveau de la charge oscille entre les valeurs 0 et  $2\Gamma$ . Si on connaît la longueur du câble, il est possible d'arriver à la vitesse nulle au moment où l'accélération  $\gamma$  est également nulle (angle d'élongation nul). Dans ces conditions, la charge s'immobilise sans retard.

Ce principe trouve une application intéressante pour les opérations où la longueur du pendule est constante. C'est le cas par exemple pour les portiques de déchargement à benne pour lesquels un cycle automatique amène la benne au-dessus d'une trémie. L'ouverture peut alors s'effectuer en l'absence de balancement.

L'utilisation quasi généralisée des automates programmables dans les équipements électriques a permis d'intégrer des modèles mathématiques permettant d'optimiser les trajectoires des charges dans l'espace tout en contrôlant et maîtrisant leur balancement en temps réel. Ces systèmes, plus ou moins sophistiqués selon les constructeurs, sont réalisés avec ou sans capteur.

Les plus performants sont :

- efficaces pendant les mouvements combinés (par exemple levage et direction sur les portiques, plus translation pour les ponts-roulants),
- insensibles aux perturbations extérieures
- ne génèrent pas de balancement secondaire
- tolèrent des charges excentrées

Ces systèmes permettent aux conducteurs de se concentrer sur l'optimisation de la trajectoire de la charge sans avoir à se soucier du ou des mouvements horizontaux. Ils réduisent de fait le taux de stress et de fatigue du conducteur.

### **3.8.1.5. La précision du positionnement**

Là encore, en commande manuelle, la dextérité de l'opérateur est primordiale. Sa tâche est toutefois facilitée si le dispositif de commande permet d'obtenir une petite vitesse très basse et stable.

L'insertion de résistances rotoriques pour augmenter le glissement des machines asynchrones à bagues, avait l'inconvénient majeur de rendre la vitesse du moteur, donc de la charge, très dépendante du couple résistant. Le positionnement était rendu très difficile et nécessitait fréquemment au conducteur de terminer la manœuvre par une série de petites impulsions de commande.

Ce résultat était devenu insuffisant face à l'accroissement des vitesses nominales demandées aux engins. Ceci a entraîné une évolution majeure des techniques de commande des moteurs d'entraînement.

Les systèmes de commande puissance actuels permettent d'obtenir des vitesses très basses, de l'ordre de 2 à 5% de la vitesse nominale de fonctionnement, sans difficultés particulières, aussi bien avec des moteurs asynchrones à bagues ou à cage, qu'avec bien sûr des machines à courant continu. Ceci a été rendu possible par l'utilisation généralisée de la variation de vitesse électronique grâce aux progrès technico-économiques considérables au cours de ces 30 dernières années. Ces différentes techniques seront évoquées dans les chapitres 5 et 8 de cet ouvrage.

Si l'arrêt doit être obtenu au cours d'un cycle automatique, c'est à dire sans intervention d'un conducteur, il convient alors d'aborder le contact de fin de course provoquant l'arrêt, à une vitesse d'autant plus basse que la précision exigée du positionnement est grande.

Dans ce but un premier contact déclenche la commande du ralentissement. Si une référence de basse vitesse est appliquée instantanément, le système freine suivant ses caractéristiques propres.

La décélération et par conséquent la distance parcourue varient selon les inerties et les couples résistants mis en jeu.

A titre de sécurité, l'emplacement du contact de ralentissement est donc déterminé en fonction des conditions de fonctionnement les plus défavorables.

Dans les autres cas, la petite vitesse est atteinte alors qu'une distance notable reste à parcourir à petite allure. Il peut en résulter une perte de temps importante.

Aussi, il est préférable d'agir sur le signal de référence suivant une rampe, contrôlant ainsi la vitesse à chaque instant. La distance parcourue est alors beaucoup plus constante (répétitive) et la durée totale du trajet est la plus courte possible.

### **3.8.2. Les mouvements verticaux**

#### **3.8.2.1. L'inertie du rotor du moteur d'entraînement est déterminante**

Nous avons vu au cours de l'étude du mouvement de levage d'un portique à conteneurs, que le moteur doit produire d'une part un couple équilibrant la charge à lever et d'autre part un couple accélérateur opposé à l'inertie des masses à mettre en mouvement. Dans la chaîne des masses concernées par cette accélération, c'est l'inertie du rotor du moteur d'entraînement qui est souvent la plus grande. Ceci est d'autant plus vrai aujourd'hui, que les solutions modernes de commande puissance utilisent des variateurs de vitesse convertisseurs de fréquence, même pour les machines de fortes puissances ( $P_{nom} > 100$  kW), qui pilotent des moteurs asynchrones à cage dont les hauteurs d'axe sont nettement supérieures aux machines à courant continu ou aux machines asynchrones à bagues de puissance mécanique équivalente pour un service attendu identique, dont l'usage était fréquent jusque ces dernières années.

Il faut néanmoins rappeler, en particulier en-cas de rénovation d'anciens mécanismes de levage, que l'utilisation de freins à tambour de grandes dimensions sur l'arbre rapide, peut avoir une incidence non négligeable dans l'étude dynamique de la chaîne cinématique de l'engin. Cela est particulièrement vrai sur certains anciens portiques à minerais équipés de deux freins à tambours.

Les mécanismes récents incorporent des freins à disques plus rapides et possédant une inertie beaucoup plus petite que celle des freins à tambours.

#### **3.8.2.2. Le couple moteur et le couple résistant**

Nous garderons en mémoire qu'en levage, le couple nominal du moteur reste voisin du couple résistant dû à la charge en régime établi.

En général, le dimensionnement des machines ne prend pas en compte des conditions de marche exceptionnelles ou accidentelles, par exemple si le conducteur accroche involontairement le crochet de l'engin au sol. Dans ce cas, ce sont les organes de sécurité qui actionnés au moyen de dispositifs tels qu'une détection de surcharge ou un non suivi de la consigne de vitesse, permettront d'arrêter le mouvement.

Dans le cas particulier où il est prévu contractuellement de manutentionner des charges exceptionnelles, ou d'autoriser le fonctionnement en marche dégradée (un moteur au lieu de deux par exemple), le dimensionnement en couple et en puissance des machines devra évidemment tenir compte de cette spécificité du cahier des charges d'usage de l'engin.

#### **3.8.2.3. La variation de la tension du câble pendant les accélérations**

Pendant les accélérations, la force exercée par la charge sur le câble auquel elle est suspendue, varie sous l'influence de l'inertie. A la force de traction exercée au repos par la charge de masse  $m$  s'exprimant par l'expression  $P = m \cdot g$ , il faut ajouter ou retrancher selon son sens de déplacement, la quantité  $F = m \cdot \gamma$ ,  $\gamma$  étant l'accélération linéaire de la charge.

Les variations de la tension du câble peuvent être importantes et doivent être prises en compte par le constructeur mécanicien en fonction du cahier des charges de l'engin de levage. Ce composant toujours difficile à choisir est sujet à une détérioration rapide lorsqu'il est mal adapté à la spécificité du mécanisme de levage auquel il est intégré.