



Polycopié de cours (2ème Année Licence)

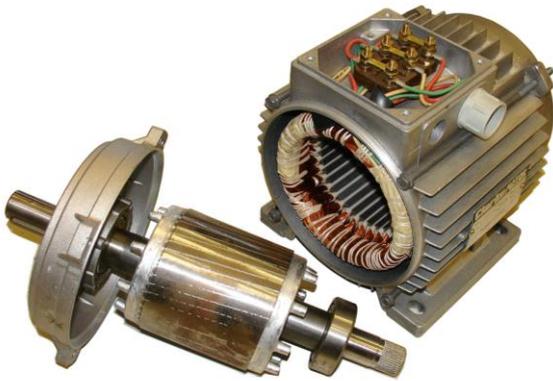
Domaine : science et technologie

Filière : génie minier

Module : Electromécanique minière

Dr. HOUAM Ala

Maître de Conférences classe A



Annee 2024/2025

Table des matières

Préface	i
Table de matières	ii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Chapitre I. : définitions et applications	
I.1. Introduction	1
I.2. Définitions	1
I.3. Applications	2
I.3. 1- Conception de systèmes mécaniques	2
I.3. 2- Dynamique de l'ingénieur :	2
I.3. 3- Conception des robots industriels:	2
I.3. 4- Systèmes hydrauliques et lubrification:	2
I.3. 5- Conception et choix des équipements miniers:	3
I.3. 7- Projet d'électromécanique minière:	3
I.3. 6- Électrotechnique	3
Chapitre II. Machines minières	
II.1. introduction	5
II.2. Machines de forage	5
II.2.1.Choix du mode de forage	5
II.2.2.Techniques de forage	6
II.2.2.1. Forage rotative ou rotary coupante	7
II.2.2.1.1. Paramètres de forage rotatif	8
II.2.2.2. forage percutant ou par battage	8
II.2.2.2.1. Marteaux perforateurs	8
II.2.2.2.2. Sondeuses percutantes	9
II.2.2.2.3. Avantages et Inconvénients du forage percutant	10
II.2.2.3. Forage roto- percutante	11
II.2.2.3.2. Le marteau fond de trou	12
II.2.2.3.1. le marteau hors de trou	12
II.2.3. Détermination de Productivité des machines de forages (sondeuses)	12
II.2.3.1. Calcul de la productivité théorique	12
II.2.3.3. Calcul de la productivité d'exploitation	12
II.2.3.4. exercice	
II.3. Machine de chargement	15
II.3.1. Choix d'engin de chargement	15
II.3.2. Type des engins de chargement	16
II.3.2.1 Les chargeuses	16
II.3.2.1.1 Chargeuses sur pneumatiques	16
II.3.2.1.2. Les chargeuses sur chenilles	17
II.3.2.2.Durée de cycle de la chargeuse « t_{ch} »	17
II.3.2.2. Les Pelles	18
II.3.2.2.1. Les pelles hydrauliques	18
II.3.4.1.1 Productivité technique horaire d'une pelle sans influence de ses déplacements	19
II.3.4.1.2 Productivité d'exploitation	19
II.4. Machine de transport	20
II.4.1 Choix d'engins du transport	20
II.4.2 Le convoyeur à bande	20
II.4.2.1 Eléments constitutifs d'un convoyeur a bande	20

II.4.3 Transport par camion	20
II.4.3.1 Choix du type de camion	21
a. rendement du camion et leur nombre	22
b. Nombre total de camions avec réserves	22
Exercice	23

Chapitre III. : Electrifications des travaux miniers

III.1. Introduction	26
III.2. Définition d'une ligne électrique	26
III.3. Définition d'un réseau électrique	26
III.4. Principaux composants des lignes aériennes	27
III.4.1. Les conducteurs	27
III.4.1.1. Type de conducteur	28
III.4.1.2. Choix de section du câble	28
III.4.1.2.1. Critère de courant nominal	28
III.4.1.2.2. Critère du courant de court-circuit	28
III.4.1.2.3. Critère de la chute de tension	29
III.4.2. Les pylônes	29
III.4.2.1. types de pylônes	29
III.4.2.1.1. Pylône autoportants	29
III.4.2.1.2. Pylône haubané	30
III.4.2.1.3. Les pylônes monomodes	30
III.4.2.2. Charges transmises aux pylônes	31
Exercice	32

Chapitre IV. Machines électriques

IV-1. Introduction	36
IV-2. Moteurs a courant continu	37
IV.2.1. Principe de fonctionnement	37
IV-2.2. Force électromotrice	38
IV .2.3. Classification des machines à courant continu	38
IV.2.4. Bilan des puissances et rendement	38
IV.2.5. Exercice (Machine a courant continu)	39
IV.3. Machines à courant alternatif	41
IV.3.1. Machine électrique et triphasée	41
IV.3.1.1. Equations des tensions :	42
IV.3.2. Glissement	42
IV.3.3. Vitesse de synchronisme	42
IV.3.4. Machines synchrones	43
IV.3.4.1. Fonctionnement en générateur	43
IV.3.4.2. Bilan des puissances et rendement	44
IV.5.1. Constitution	44
IV.5. Machines asynchrones	45
IV.5.2. Principes de fonctionnement	46
IV.5.3. Bilan de puissance	46
IV.5.4. Exercice (machine synchrone)	46
IV.5.5. Exercice (machine asynchrone)	47
bibliographie	48

Liste des figures

Figure	Nomenclature	Page
Chapitre II. Machines minières		
Figure II.1	Différent types d'action de forage dans l'attaque mécanique des roches	6
Figure II.2	Outil de forage	6
Figure II.3	Schéma représentatif du mode de forage rotatif	8
Figure II.4	Marteau perforateur (atlas copco roc f6)	9
Figure II.5	Les différents procédés de battage	10
Figure II.6	Schéma représentatif du mode de forage roto-percutant	11
Figure II.7	Sondeuse roto-percutante (atlas -copco Roc L8)	11
Figure II.8	Types des machines de chargement et d'excavation	13
Figure II.9	Chargeuse sur pneumatiques	14
Figure II.10	Chargeuses sur chenilles	15
Figure II.11	pelle hydraulique	16
Figure II.12	Schéma des principaux éléments d'un convoyeur à bande	18
Figure II.13	Camion (CATERPILLAR 775G)	19
Chapitre III. : Electrifications des travaux miniers		
Figure III.1	Différents types de conducteurs	25
Figure III.2	Modèle équivalent d'une liaison	26
Figure III.3	Pylône auto-stable (en treillis)	27
Figure III.4	Pylône haubané	27
Figure III.5	Pylônes monomodes	28
Chapitre IV. Machines électriques		
Figure IV.1	Schéma de fonctionnement des machines électrique	30
Figure IV.2	Différentes parties d'une machine électrique à courant continu	31
Figure IV.3	Principe de fonctionnement d'une machine électrique à courant continu	31
Figure IV.4	Modes d'excitation des la machines à courant continu	32
Figure IV.5	Diagramme des puissances d'une machine à courant continu à excitation séparée	33
Figure IV.6	Action d'un champ genere sur une aiguille aimantée a-monophasé b-triphasé	35
Figure IV.7	Représentation d'une machine a courant alternatif triphasée	35
Figure IV.8	Symboles électriques de la machine synchrone	37
Figure IV.9	Principe de machine à induit fixe et de machine à inducteur fixe	37
Figure IV.10	Diagramme de puissances d'un alternateur à excitation indépendante	38
Figure IV.11	Diagramme de puissances d'un moteur à excitation indépendante	38
Figure IV.12	Symboles du moteur asynchrone.	38
Figure IV.13	Machine asynchrone à rotor à cage	39
Figure IV.15	Machine asynchrone à rotor à cage età rotor bobiné	39
Figure IV.14	Stator d'un moteur asynchrone	40
Figure IV.15	Diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone.	40

Liste des tableaux

Tableau	Nomenclature	Pages
Tableau II.1	les paramètres des travaux de forage en fonction de dureté des roches et diamètre des trous	7
Tableau II.2	Classification des perforateurs selon le poids, Kg	9
Tableau III.1	Classification des niveaux de tension	23
Tableau III.2	Puissance et courant de court-circuit	26

Chapitre I. : définitions et applications

I.1. Introduction

I.2. Définitions

I.3. Applications

I.3. 1- Conception de systèmes mécaniques

I.3. 2- Dynamique de l'ingénieur :

I.3. 3- Conception des robots industriels:

I.3. 4- Systèmes hydrauliques et lubrification:

I.3. 5- Conception et choix des équipements miniers:

I.3. 7- Projet d'électromécanique minière:

I.3. 6- Électrotechnique

I.1. Introduction

Le domaine de l'électromécanique minière est un domaine vaste qui rassemble plusieurs domaines tel que l'électrotechnique, l'automatisme, le domaine mécanique et l'exploitation minière ; il a pour but d'analyser les problèmes dans les domaines des machines électriques, de l'électrification des sites miniers et des machines minières pour assurer le déroulement des travaux miniers et l'alimentation fiable et de qualité en énergie électrique dans les mines à ciel ouverts et souterraines,

I.2. Définitions

L'électromécanique minière permet aux ingénieurs de spécialiser dans le domaine minier afin qu'ils acquièrent une compréhension des systèmes mécaniques ainsi que des principes d'automatisation liés à l'exploitation minière et à la transformation du minerai. Les compétences acquises dans cette spécialité les rendront capables de concevoir ou de modifier les équipements miniers spécialisés. En fonction des connaissances acquises, ils pourront également travailler en instrumentation et en contrôle des procédés. Ainsi, Amener l'étudiant à développer un esprit de synthèse et d'innovation par la réalisation d'un projet d'ingénierie et la réalisation d'un travail sur un problème concret suggéré de préférence par l'industrie : analyse des différents aspects techniques et comprenant la conception et/ou l'implantation d'une solution novatrice faisant appel aux connaissances du domaine minier et de l'électromécanique.

Le spécialiste dans ce domaine peut aborder de nombreux sujets de préoccupation tel que :

- Choix des machines de transport et de chargement tel que pelles mécaniques, des camions et des outils de forage et l'optimisation des processus par la diminution des pertes internes et externes.

- La ventilation des sites miniers qui constitue la plus grande part de la consommation d'énergie des mines souterraines plus de 50 %.

- Dimensionnement des turbo-machines tel que les pompes roto-dynamiques, les ventilateurs, les compresseurs et les soufflantes.

- Installations d'exhaure

- Conception et réparation des pompes

- Conception et réparation des systèmes de tuyauteries,

- Dimensionnement des compresseurs,

- Conception et opération de systèmes d'air comprimé

- Treuil (équipements mécanique)

- Cinématique et dynamique des systèmes de treuils,

- La robotique minière et à la commande à distance,

- Sécurité des équipements.

- Systèmes hydrauliques et pneumatiques
- :Maintenance et réparation des équipement de forage, chargement et transport des mines a ciel ouvert et souterraine.
- Asservissement et régulation industriell
- Energie et environnement
- Installations d'extraction

I.3. Applications

I.3. 1- Conception de systèmes mécaniques :

Acquérir des notions de design des systèmes mécaniques par le biais d'un projet de conception en équipe. Contenu : Les éléments de machines dont ceux ci-après mentionnés. Facteur de sécurité, critères d'écoulement. Fatigue : diagramme de Goodman, cumul de dommage. Vis : mécanique de la vis, autoblocage, couple-tension. Boulons : mécanique d'un joint boulonné, résistance. Assemblages : modes de rupture, analyse des efforts. Roulements : nomenclature, calcul des charges et de durée. Engrenages droits : nomenclature, géométrie, résistance. Soudure : mécanique, résistance. Ressorts : ressorts cylindriques hélicoïdaux, contraintes admissibles. Joints de cardan et joints homocinétiques. Cames. Transmission par chaînes. Trains d'engrenages. Freins. Embrayages. Lubrification.

I.3. 2- Dynamique de l'ingénieur :

Être capable de calculer les forces et les déplacements dans des systèmes dynamiques. Contenu : Application des concepts fondamentaux de la mécanique rationnelle à l'étude des mécanismes et machines : lois de Newton, travail - énergie, quantité de mouvement, impulsion, puissance. Dérivation des équations du mouvement par les principes généralisés de Newton, de Alembert et de Lagrange. Systèmes vibrants à un et deux degrés de liberté. Réponse libre et forcée, isolation des vibrations.

I.3. 3- Conception des robots industriels:

Appliquer les techniques modernes de conception des robots industriels. Contenu : Les outils essentiels permettant l'analyse et la synthèse des sous-systèmes d'un robot industriel typique à savoir : le système mécanique, le système d'entraînement, le système sensoriel et le système de commande. L'évolution de la technologie dans le temps et les constantes empiriques nécessaires à la conception des robots. Les éléments de construction de ceux-ci et leurs modes d'interactions. Réalisation d'un projet.

I.3. 4- Systèmes hydrauliques et lubrification:

Acquérir des notions de lubrification et des systèmes hydrauliques applicables dans l'industrie. Contenu : Systèmes hydrauliques. Notions de base et symboles pour représentation graphique. Étude des composantes de base : pompes, moteurs, vérins et valves. Détermination du cycle de travail et des charges mécaniques. Pertes et rendements, températures de fonctionnement. Moyens d'améliorer le rendement énergétique. Caractéristiques des transmissions hydrostatiques. Autres valves et composantes. Commande tout ou rien et commande proportionnelle. Lubrification. Frottement sec, usure et fini de surface. Lubrifiants

: type et propriétés. Étude des paliers lisses fonctionnant en régime hydrodynamique. Conception de paliers lisses fonctionnant en régime mixte ou onctueux.

I.3. 5- Conception et choix des équipements miniers:

Être capable de concevoir, modifier et sélectionner les équipements mécaniques propres aux opérations minières. Contenu : La ventilation et le drainage (dimensionnement des turbomachines, ventilation, climatisation et chauffage: conception et opération, pompes: systèmes de tuyauteries, conception et opération), systèmes d'air comprimé (dimensionnement des compresseurs, conception et opération de systèmes d'air comprimé). Treuil (équipements mécaniques, cinématique et dynamique des systèmes de treuils, conception et opération d'équipements associés). Introduction à la robotique minière et à la commande à distance, sécurité des équipements. Sélections des chargeuses, des pelles mécaniques, des camions et des outils de forage.

I.3. 6- Électrotechnique :

Développer chez l'étudiant un esprit pointu d'analyse et de synthèse nécessaire, lui permettant non seulement de comprendre les principes physiques qui sont à la base du fonctionnement des appareillages et transformateurs, mais également de pouvoir les vérifier à partir des essais et des mesures lors des séances de laboratoire. Contenu : Outils et concepts d'analyse des installations électriques : vecteurs, complexes et phaseurs, caractéristiques des signaux en régime permanent périodique, série de Fourier, charges linéaires et non linéaires, Puissance actives, réactives et apparentes d'une installation en régime non linéaire. Analyse des circuits monophasés en régime permanent sinusoïdale : méthode d'analyse en série et en parallèle, puissance active, puissance apparente, puissance réactive, mesure de puissance, résonances série et parallèle, compensation de facteur de puissance, théorème de Boucherot, montages en filtres des circuits RLC. Circuits triphasés équilibré : méthode d'analyse, différents couplages, circuit monophasé équivalent, évaluation des puissances, compensation du facteur de puissance, théorème de Boucherot en triphasé. Circuit triphasés déséquilibrés : méthode d'analyse et évaluations des puissances composantes symétriques. Circuit magnétique : inductance, réductance, circuits couplés. Transformateurs monophasés et triphasés. Présentation d'un réseau électrique : modèle unifilaire, conversion en pu, calcul des courants de court-circuit.

I.3. 7- Projet d'électromécanique minière:

Amener l'étudiant à développer un esprit de synthèse et d'innovation par la réalisation d'un projet d'ingénierie dans le domaine de l'électromécanique minière. Contenu : Réalisation d'un travail sur un problème concret suggéré de préférence par l'industrie : analyse des différents aspects techniques et comprenant la conception et/ou l'implantation d'une solution novatrice faisant appel aux connaissances du domaine minier et de l'électromécanique.

Chapitre II. Machines minières

II.1. introduction

II.2. Machines de forage

II.3. Machine de chargement

II.4. Machine de transport

Exercices

II.1. introduction

L'exploitation d'une mine consiste à extraire des roches ou minerais ayant une valeur économique. Elle comprend de nombreuses tâches diverses, allant du forage de trous jusqu'au transport du minerai vers le point de stockage ou la mise à terre. Pour effectuer chacune de ces tâches une large gamme des équipements lourde et spécifiques capables de supporter des conditions difficiles non seulement dans les mines à ciel ouvert mais aussi dans les mines souterraines est nécessaire tel que les machines de forages, les machines de chargement et terrassement et les machines de transport.

II.2. Machines de forage

Le forage c'est l'action de creuser un trou de diamètre allant jusqu'à 75 mm ou un sondage dont le diamètre est supérieur à 75mm de forme cylindrique dans le massif par la destruction de la roche. Il est effectué au moyen d'outils spéciaux dont l'action peut être le cisaillement, la coupe et abrasion.

Le forage des trous de mines à réaliser pour but essentiel, est les chargés par certaines quantités d'explosive bien déterminé en fonction des types de carrières et de matériaux en carrière. On peut dire l'optimisation des paramètres de forage fait partie intégrante du succès ou de l'échec économique de toute opération minière.

II.2.1.Choix du mode de forage :

Le choix du mode de forage repose sur la détermination de la force de pénétration de l'outil de forage dans la roche et est dépend de :

- La productivité de la mine ou carrière.
- Les paramètres de tir (diamètre du trou, angle d'inclinaison, type et quantité d'explosifs, distance entre les trous) ;
- Les propriétés physico-mécaniques des roches (dureté, abrasivité, etc.) ;
- L'indice de forabilité ;
- Les coefficients qui caractérisent l'organisation du travail (coefficient d'utilisation de la machine et temps de manœuvre).

Le choix de ces modes dépend l'indice de forabilité (selon l'académicien V.RJEVESKI); qui se base sur la dureté et la densité de la roche, par la formule suivante:

$$D_f = 0.007(\sigma_{\text{comp}} + \sigma_{\text{cis}}) + 0.7\gamma \dots \dots \dots \text{(II.1)}$$

Où:

σ_{com} : Résistance à la compression des roches : $\sigma_{\text{com}} = 100 * f$; Kgf / cm²

f : dureté de la roche

σ_{cis} : Résistance au cisaillement (déplacement) σ_{cis} (0,16-0,33) Kgf / cm²

γ : Masse volumique de la roche en t/m³ kg/dm³

II.2.2. Techniques de forge :

Plusieurs techniques de forage sont utilisées selon les formations géologiques, toutes les techniques existant actuellement utilisent :

- Un mouvement de rotation ;
- Un mouvement d'avancement accompagné ou non d'un mouvement de percussion ;
- Un soufflage d'air comprimé destiné à permettre la remontée des débris de foration (l'air comprimé peut, dans certains cas, être remplacé par une injection d'eau, de boue ou de mousse).

Les différentes manières dont les exercices de percussion, rotary, et de combinaison attaquent la roche sont comparées dans la figure suivante:

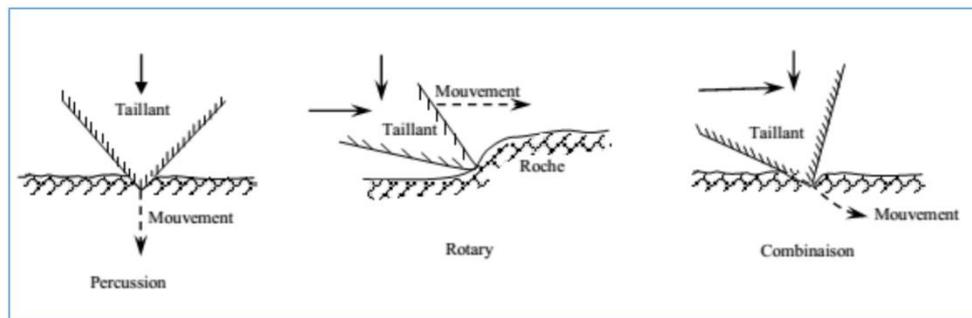


Figure II.1 : Différent types d'action de forage dans l'attaque mécanique des roches.

Les mouvements de rotation et de descente, ainsi que le soufflage d'air sont assurés par un train de tiges ou de tubes solidaires d'un outil (taillant, tricône, outil de coupe) situé à la base du trou.



-a- taillant pour tarière

-b- taillant pour marteau

-c- tricône

Figure II.2. Outils de forage

On peut classer les procédés de forage comme suit: le forage percutant, rotatif et le forage combiné (roto-percutant).

Dans le tableau ci-dessous on résume les paramètres des travaux de forage en fonction de dureté des roches et diamètre des trous à forer dans les carrières et mines à ciel ouvert avec les différentes sondeuses utilisées et leurs caractéristiques

Tableau II.1. Les paramètres des travaux de forage en fonction de dureté des roches et diamètre des trous

Mode de forage	Machine de forage	Dureté des roches	Diamètre de trous (mm)	Profondeur de trous (m)
Rotatif	Sondeuse rotative à – Outil coupant	≤ 6	110-160	30
	-Outil à molette	6-20	160-320	40
percutant	Equipement de forage avec perforateurs	6-20	40-85	20
	Sondeuses à battage	6-20	150-300	40
Roto percutant	Sondeuse avec percuteur pneumatique plongé au fond du trou	10-20	85-200	30
	Sondeuse avec percuteur pneumatique hors trous	8-20	50-125	30
	Sondeuse avec percuteur pneumatique à rotation indépendante	8-20	40-100	30

II.2.2.1. Forage rotative ou rotary coupante

La méthode de forage rotatif utilise un outil (trépan ou couronne) mis en rotation depuis la surface du sol par l'intermédiaire d'un train de tiges (tiges vissées les unes aux autres), animé d'un mouvement de rotation de vitesse variable et d'un mouvement de translation verticale sous l'effet d'une partie du poids de la ligne de sonde ou d'une pression hydraulique. L'avancement de l'outil s'effectue par abrasion du terrain, sans choc, Les tiges sont creuses et permettent l'injection de boue au fond du forage.

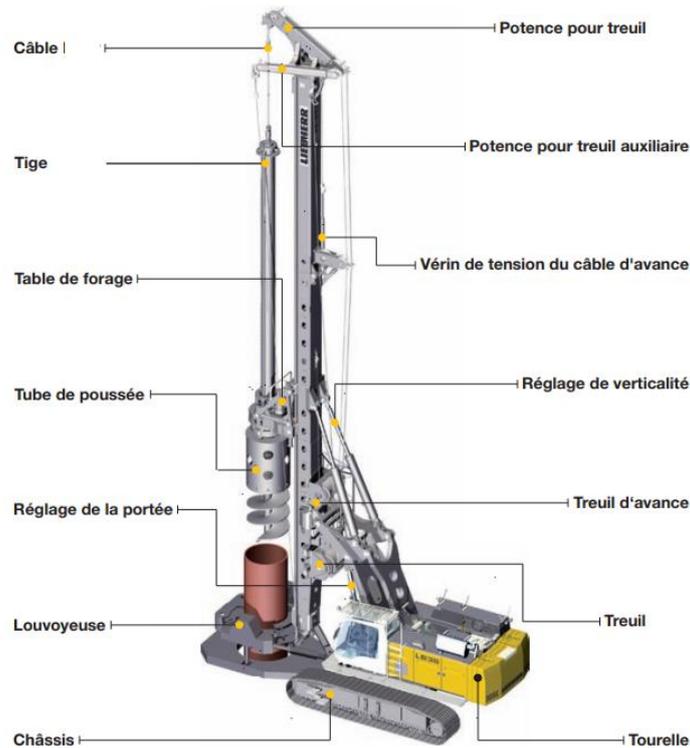


Figure II. 3. Schéma représentatif du mode de forage rotatif

Il existe plusieurs types de forage rotatif :

- a. Forage rotatif par découpage (indice de forabilité Cf varie entre VI-VII)..
- b. Forage rotatif par usure (indice de forabilité Cf varie entre VI-XII).
- c. Forage rotatif par écrasement (indice de forabilité Cf varie entre V-XII).

II.2.2.1.1. Paramètres de forage rotatif:

Pour avoir le meilleur rendement d'un atelier de forage rotary, il convient d'être très vigilant sur les trois paramètres suivants :

- Le poids sur l'outil.
- La vitesse de rotation.
- Le débit des pompes (à boue, à air).

II.2.2.2. forage percutant ou par battage

C'est la technique la plus ancienne, utilisée par les Chinois depuis plusieurs milliers d'année, L'applicateur de cette méthode s'appuie sur l'utilisation d'un outil formé par bouton clouté ou de burin qui attaque la roche avec un marteau comme le coup. L'effort efficace en cassant les actes de roche essentiellement dans une direction axiale et d'une façon de palpitation.

II.2.2.2.1. Marteaux perforateurs

Les marteaux perforateurs ou perforateurs sont destinés au forage des trous de mines dans les formations très dures, dures et moyennes. On les utilise souvent dans les mines souterraines, dans les exploitations à ciel ouvert et dans le domaine de la construction.

a- principe de fonctionnement.

Le fonctionnement du perforateur est assuré à l'aide du dispositif de distribution de l'air comprimé qui alimente successivement les chambres gauche et droite du cylindre. Cela permet au piston d'effectuer son mouvement alternatif (va et vient) et un mouvement de rotation au fleuret.



Figure II. 4. Marteau perforateur (atlas copco roc f6)

b- Typres des marteaux perforateurs

On peut classer les Marteaux perforateurs selon certains indices:

- L'énergie utilisée – électrique, pneumatique ou hydraulique ;
- La destination – perforateur à main, à colonne et télescopique ;
- Le poids ;

Le tableau suivant donne une Classification des perforateurs selon le poids

Tableau II.2. Classification des perforateurs selon le poids, Kg.

Perforateurs	à main	à colonne	télescopique
Léger	< 15	<40	<35
Moyen	15 – 25	40-50	35 – 40
Lourd	>25	>50	>40

II.2.2.2.2. Sondeuses percutantes

Ce type est destinée au forage des roches très dure et surtout lorsque le terrain dur est en surface (ça permet pas d'utiliser suffisamment de poids en Rotary) comme en terrains karstiques ou fissurés (pas de risque de perte de boue). Elle consiste à soulever un outil très lourd (trépan) qui est suspendu à un câble relié à un balancier qui communique à l'ensemble un mouvement alternatif. A chaque retombée le trépan désagrège la roche, à la manière d'un burin. La rotation permet au taillant d'heurter la roche dans une tache différente sur les coups consécutifs, un mécanisme appelé l'indexation de coup, qui forme des cratères contigus et finalement un trou dirigé dans la roche.

On distingue deux principaux types des Sondeuses percutantes

a- à câble (procédé Pennsylvanien) : Où le trépan est à accrocher directement au câble sous une masse tige (tige très lourde), il est bien développé aux USA.

b- A trépan fixe (procédé Canadien) : Dans ce cas, le trépan est fixé sous un train de tiges pleines. Il est surtout utilisé dans l'Europe de l'est.

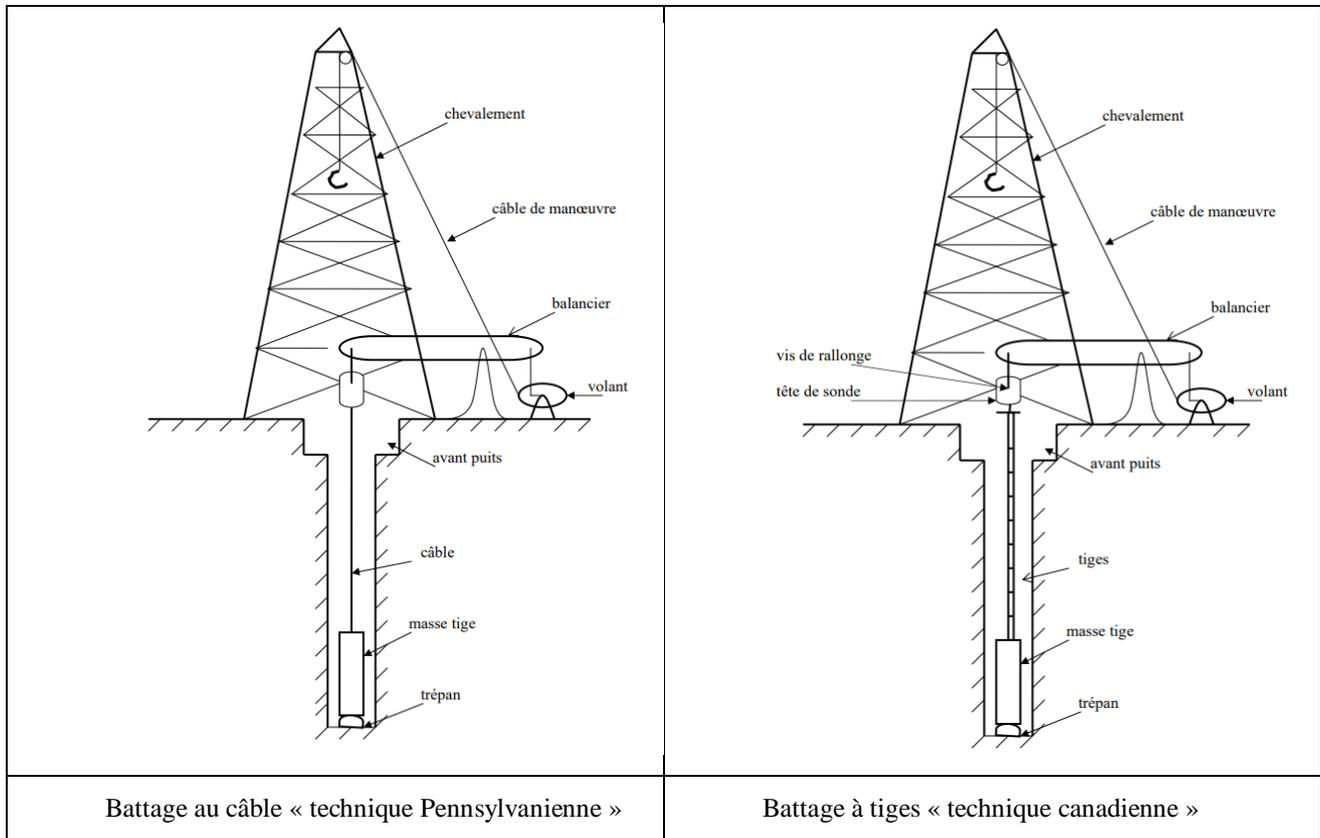


Figure II.5. Les différents procédés de battage

II.2.2.3. Avantages et Inconvénients du forage percutant :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Simple et relativement peu coûteux • Il n'y a pas de fluide de forage (boues) et pas de risques de pollution de la nappe. • Le trépan peut être rechargé, reforgé et affûté sur le chantier. • bien adaptée pour les forages de moyenne profondeur. • Les résultats sont très bons dans les terrains fissurés (pas de pertes) 	<ul style="list-style-type: none"> • Vitesse d'avancement assez faible induisant un coût. • Peu adaptée dans les terrains plastiques ou éboulant • Difficultés pour équilibrer des venues d'eau artésiennes jaillissantes • Absence d'information sur les niveaux producteurs (qualité - production)

II.2.2.3. Forage roto- percutant

Le forage roto-percutant est particulièrement destinée au forage des roches dures, et adapté à des formations rocheuses ou indurées n'absorbant pas les percussions. Ce type de forage consiste à appliquer à l'outil de forage, ou taillant, un couple de rotation et une énergie de frappe qui atteignent jusqu'à 1 500 coups/min. Cependant il est possible de traverser les formations tendres telles que des argiles et des marnes.

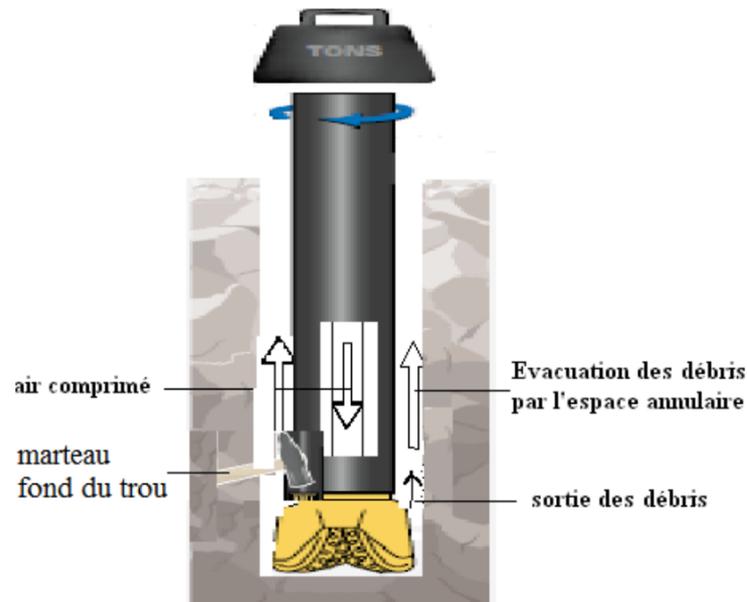


Figure II.6. Schéma représentatif du mode de forage roto-percutant

C'est le mode de forage le plus utilisé dans les différents secteurs d'industrie. Cette technique permet de traverser des terrains durs comme le rocher (granites) ou sédimentaires consolidées (gris, calcaires). Un taillant, boutons en carbure de tungstène fixé directement sur un marteau pneumatique, est mis en rotation et percussion pour casser et broyer la roche du terrain foré

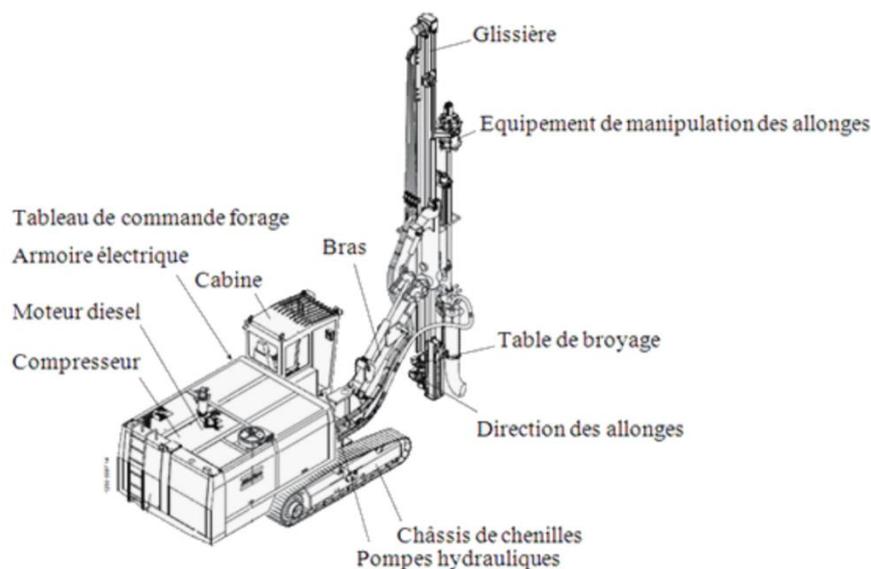


Figure II.7. Sondeuse roto-percutante (atlas -copco Roc L8)

Il existe deux modes le marteau hors de trou, le marteau fond du trou.

II.2.2.3.1. le marteau hors de trou :

dans ce type, une partie de l'énergie de frappe se perd dans le train de tiges (flambement, élasticité, frottements contre les parois du trou), et ce d'autant plus que le trou est plus profond. ce type de foration nécessite un choix soigneux du couple tige-taillant. Les couples suivants sont les couples optimaux

II.2.2.3.2. Le marteau fond de trou :

est un marteau à percussion. Comme leur nom l'indique, il travaille au fond du trou, à l'extrémité du train de tiges, et le piston de percussion frappe directement la queue du taillant. L'air comprimé arrive au marteau par les tiges de forage. L'air d'échappement est évacué par le taillant et assure le soufflage du trou foré.

II.2.3. Détermination de Productivité des machines de forages (sondeuses):

L'efficacité d'une machine minière peut être caractérisée par quelques paramètres parmi lesquels nous distinguons en premier lieu la productivité. La connaissance de cette dernière pour les machines de forage permet de savoir le volume de forage à réaliser, ce paramètre dépend de plusieurs facteurs qui pour les sondeuses rotopercutantes, peuvent être divisés en facteurs reflétant ; - Les conditions d'exploitation (propriétés physico-mécaniques des roches, diamètre et profondeur des trous forés)

En ceux qui caractérisent le degré de l'utilisation des sondeuses pendant le temps. C'est pourquoi il est nécessaire de distinguer la productivité théorique, technique et d'exploitation.

La plupart des méthodes de détermination de la productivité est basée sur les suppositions suivantes :

- La productivité théorique correspond à la vitesse mécanique de forage,
- La productivité technique tient compte des pertes de temps qui sont liées à la réalisation des opérations auxiliaires ayant lieu lors du forage du trou, tout en tenant compte de la nécessité d'exercer les opérations préparatoires,

II.2.3.1. Calcul de la productivité théorique.

C'est le nombre de mètres de trous forés pendant l'unité de temps.

$$Q_{th} = V \cdot T; \text{ m}^3/\text{P} \dots \dots \dots (\text{II.2})$$

II.2.3.2. Calcul de la Productivité technique

Est déterminée d'après la formule

$$Q_{tech} = \frac{t - t_{pr}}{\left(\frac{1}{V_f} + t_{au}\right) \times k_{rep}}, \quad \text{m}^3/\text{p} \dots \dots \dots (\text{II.3})$$

t : Durée d'un poste de travail, (min);

t_{pr}: Durée des opérations préparatoires, (min) ;

V_f: vitesse théorique de foration (m/min)

t_{aux}: Durée des opérations auxiliaires réduites pour un mètre de trou foré (min/m);

K_{rep} : Coefficient tenant compte de la pause des ouvriers, (0,3-0,5).

II.2.3.3. Calcul de la productivité d'exploitation

Elle tient compte des pertes de temps qui portent le caractère Fortuit (pannes imprévues des mécanismes de la sondeuse). La productivité d'exploitation est exprimée par la formule :

$$Q_{exp} = Q_{tech} \times K_u \dots \dots \dots (II.4)$$

K_u : coefficient d'utilisation de la sondeuse durant un poste ;

II.2.3.4.Exercice

Pour effectuer un forage dans une mine à ciel ouvert on dispose d'un groupe de forage (chariot +compresseur Atlas Copco) état mauvais et une sondeuse SOOSAN STD11 d'une bonne état.



Chariot de forage CM351



Foreuse Soosan STD11

Sachant que la productivité demande de cette mine a ciel ouvert est 900 000 tonnes/an , La vitesse moyenne de foration du chariot R_c est de l'ordre de 0.22 ML/min Le temps de poste des ou le groupe de foration faisons la foration est 07 heures

Argumentez que ces moyens de forage citée sont suffisants pour la production_ci-dessus

Solution

1. Rendement du groupe de Foration (chariot –compresseur)

$$R_{SP} = 60 \times T_p \times K_u \times R_c$$

$$R_{SP} = 60 \times 7 \times 0.7 \times 0.22$$

La production par post $R_{SP}=65$ ml/P

Le rendement annuel du groupe de Foration est de:

$$R_{SA} = R_{SP} \times N_p \times N_{Jo}$$

Où:

N_{jo} : Nombre de jour ouvrable,

N_p : Nombre de poste

R_{sa} : rendement annuel du chariot

R_{sp} : rendement postier du chariot

K_u : coefficient d'utilisation,

T_p : temps d'un poste

Le volume foisonné de la roche après le tir d'un trou de mine (13 m) est de:

$$V_T = h \times a \times b \times \gamma$$

h : la hauteur du gradin $h = 12$ m

a : Distance entre les trous $a = 2.5$ m

b : Distance entre les rangées $b = 2.5$ m

$$V_t = 195 \text{ t}$$

Le rendement journalier du groupe de Foration en Tout -Venant (roches abattues) est estimé à :

$$R_j = V_T \times N_p \times N_T$$

$$R_j = 975 \text{ t/j}$$

2. Rendement de foreuse

$R_{sp} = 200$ ml / poste. Soit ≈ 15 trous de 13 m par jour, $N_t = 15$ trous

Le rendement annuel de foreuse est de: $R_{sa} = 50\,800$ ml/an

Le volume foisonné de la roche après le tir d'un trou de mine (13 m) est de: $V_t = 211.25$ t

Le rendement journalier de foreuse en Tout -Venant est estimé à :

$$R_j = V_t \times N_t \times N_p = 211.25 \times 15 \times 1$$

$$R_j = 3\,168.75 \text{ t/j}$$

La somme des rendements journaliers des moyens de forage est comme suite:

$$R_{jt} = 975 + 3\,168.75 = 4\,143.75 \text{ t/j}$$

La somme des rendements annuels des moyens de forage est comme suite:

$$R_{at} = 4\,143.75 \times 254$$

Donc les moyens de forage de la mine à ciel ouvert sont largement suffisants pour effectuer la production projetée

II.3. Machine de chargement :

Le chargement fait partie des opérations minières fondamentales, et est très déterminante pour le succès de tout projet minier du fait que la production minière dépend pratiquement de la quantité des déblais chargés. Il est à noter qu'il est plus judicieux de parler de déblayage au lieu de chargement du fait que les opérations minières dépendent de la méthode d'exploitation arrêtée.

II.3.1. Choix d'engin de chargement :

La détermination du type d'engin d'excavation et chargement se base sur les facteurs suivants:

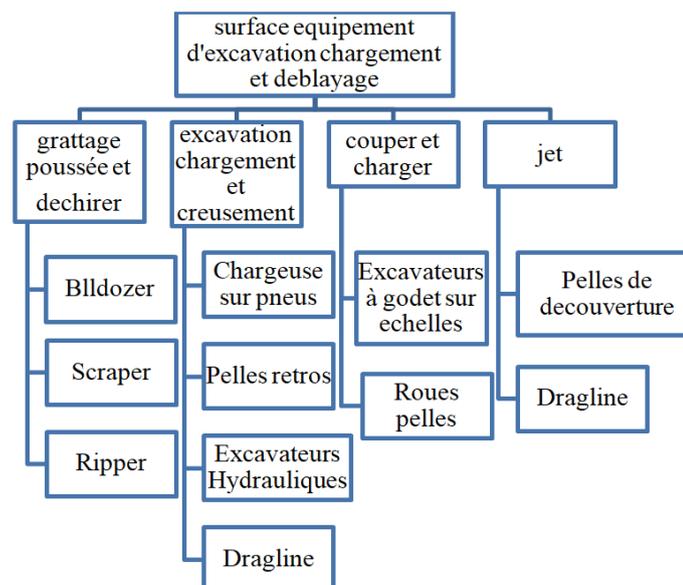
- La nature des matériau
- La méthode d'exploitation
- La production envisagée et les distances du transpor
- Les mesures de sécurités

II.3.2. Type des engins de chargement :

Parmi les engins de chargement utilisés dans les mines à ciel ouvert, on distingue deux types fondamentaux selon leur mode de fonctionnement ou de travail:

Les engins dont le fonctionnement s'effectue d'une manière cyclique, c'est-à-dire les opérations élémentaires d'un cycle complet d'excavation et de chargement se réalisent successive. Ce sont des excavateurs à godet unique (pelle mécanique ou hydraulique, chargeuse frontale, dragline).

Les engins dont le fonctionnement s'effectue d'une manière continue, c'est-à-dire les opérations élémentaires d'un cycle complet d'excavation et de chargement y compris le déplacement se réalisent simultanément. Ce sont des excavateurs à godets multiples (roue- pelle, excavateurs à chaîne).



Chapitre II.8. Types des machines de chargement et d'excavation

II.3.2.1 Chargeuses :

Dans les mines à ciel ouvert, les chargeuses sont utilisées lorsque la mission n'est pas seulement d'excaver les matériaux (stériles et minerais), mais également les transporter jusqu'aux lieux de déversement pour la mise à terre ou le stockage des minerais non loin du chantier d'exploitation. On trouve deux types de chargeuses frontales : les chargeuses sur chenilles ou sur pneus.

II.3.2.1.1 Chargeuses sur pneumatiques :

Elles sont montées sur un châssis articulé, mais l'articulation travaille seulement dans un plan horizontal, l'essieu arrière étant monté sur un balancier, le godet pelleteur disposé en avant, doit avoir une largeur plus grande que l'empattement des pneus pour les protéger. En conditions d'adhérence précaires il est possible d'adapter des systèmes de chaînes ou de tuiles pour réduire l'usure des pneus et améliorer la pénétration au tas. Dans ce mode de chargement le tombereau se placera, l'arrière au tas, avec un angle d'environ 45° . La position relative chargeur / tombereau sera telle que le parcours soit minimum. Cette distance dépend du rayon de braquage maximum de la machine.



Figure II.9 : Chargeuse sur pneumatiques

II.3.2.1.2. Les chargeuses sur chenilles :

Ce type d'engin est l'évolution d'un tracteur sur chaînes équipé d'un système à godet chargeur. Son utilisation principale consiste à extraire les matériaux du tas abattu ainsi que l'extraction directe des matériaux alluvionnaires secs ou humide.



Figure II.10. Chargeuses sur chenilles

II.3.2.2. Durée de cycle de la chargeuse « t_{ch} » :

Le temps de cycle de la chargeuse est déterminé selon plusieurs paramètres

$$t_{ch} = t_{ch} + t_{déch} + t_m + t_{ret}, S \dots \dots \dots \quad (II-5)$$

t_{ch} : temps de chargement,

$t_{déch}$: temps de déchargement,

t_m : temps de manœuvre du chargeur,

t_{ret} : temps de retour de la chargeuse à la position initiale,

Débit horaire d'une chargeuse frontale

Le rendement horaire effectif d'une chargeuse frontale est calculé

par la formule suivante :

$$D = \frac{3600 \cdot C_g \cdot N \cdot K_r}{t_{cyf}}; m^3/h \dots \dots \dots \quad (II-6)$$

Avec :

C_g : la capacité nominale du godet en m^3

K_r : le coefficient de remplissage

f : le coefficient de foisonnement

t_{cy} : le temps de cycle de la chargeuse en s

II.3.2.2. Pelles :

Ce sont des engins d'excavation et de chargement les plus répandus en mines à ciel ouvert et qui sont destinés à travailler dans tout type de terrain. On distingue deux types de pelles : Les pelles mécaniques ou à câbles et les pelles hydrauliques. La détermination du type de pelle se fait à partir des éléments suivants:

- La production envisagée ;
- La nature des matériaux ;
- La granulométrie ;

- La hauteur du front de taille ;
- D'autres facteurs entrent également en compte :
- La mobilité nécessaire de l'appareil de chargement
- Sa rapidité (cycle de base)
- Le mode de déchargement (trémie ou tombereaux)

Sur le plan financier ces machines comportent des dépenses d'investissement, donc des frais d'amortissement élevés mais permettent d'obtenir des coûts opérationnels très bas.

II.3.2.2.1. Pelles hydrauliques :

C'est le type des pelles le plus utilisée dans les travaux publics et les mines grâce à leur souplesse d'emploi due à la transmission hydraulique. Les possibilités de travailler en butte ou en rétro à diverses hauteurs offre au mineur un choix de solutions techniques qui en font un outil polyvalent. Par ailleurs sa force de pénétration élevée ainsi que le mouvement de cavage du godet conduit assez fréquemment .Sa course plane au sol, sa possibilité d'attaquer à la hauteur voulue pour disloquer les matériaux ou purger un front d'abattage est autant d'élément qui contribuent à son développement.



Figure II.11. Pelle hydraulique

II.3.4.1.1 Productivité technique horaire d'une pelle sans influence de ses déplacements :

D'une manière générale, sans tenir compte des déplacements de l'engin en cours d'excavation, le débit horaire théorique en place est exprimé par la formule suivante :

$$Q_{tech} = \frac{3600 \times C_g \times N \times K_{cond} \times K}{t_c \times K_f}; m^3/h \dots\dots\dots(II-7)$$

Avec :

C_g : la capacité nominale du godet en m^3

K_f : le coefficient de foisonnement des produits abattus

K_{cond} : le coefficient groupant divers facteurs de correction suivants :

K_r : le facteur de remplissage

K_g : le facteur de giration

K_l : le facteur de course d'attaque

II.3.4.1.2 Productivité d'exploitation :

La productivité d'exploitation horaire Q_{exp} en place est calculée par l'expression suivante :

$$Q_{exp} = Q_{tech} \times K_u \times \rho_{ch} \dots \dots \dots (II-8)$$

Avec :

- Q_{exp} : le débit horaire théorique en m^3/h ;
- K_u : coefficient d'utilisation de la machine ;
- ρ_{ch} : le rendement général du chantier

II.4. Machine de transport

Le but principal du transport dans les mines est le déplacement de la masse minière du chantier aux points de déchargement qui sont les terrils pour les roches stériles et les stocks ou les trémies de réception des usines de traitement pour les minéraux utiles.

Le transport des minéraux utiles et des roches stériles est l'un des principaux processus dans les mines à ciel ouvert, dont le pourcentage dans le prix de revient total d'exploitation atteint 70%. Il prédétermine le mode d'ouverture du gisement, le choix de la méthode d'exploitation, les équipements miniers et le mode de mise à terril...etc.

II.4.1 Choix d'engins du transport :

Le choix des moyens de transport dépend des facteurs suivants :

- La production annuelle de la carrière
- La distance de transport
- Le type d'engin de chargement
- La nature des roches à transporter
- La méthode d'exploitation
- La méthode d'ouverture.

Il existe deux principales catégories des engins de transport dans les mines à ciel ouvert

a - transports continus

- Les bandes transporteuses
- Le transport hydraulique ou pneumatique (airlift et airoglissière).

b - transports discontinus :

- Les tombereaux articulés (dumpers articulés)
- Les tombereaux rigides (dumpers rigides)
- Les décapeuses (scrapers).

II.4.2 Le convoyeur à bande :

Les convoyeurs à bande sont utilisés pour le transport des roches tendres ou des produits bien fragmentés. La pente admissible pour les convoyeurs à bandes est de (18° à 20°), la largeur de la bande varie entre (800 à 3000 mm) avec une vitesse de (3 à 6 m/s) étant donnée le rendement important des convoyeurs, la production de la carrière doit être grande pour justifier les dépenses d'investissement pour ce genre de transport.

Suivant l'endroit où les convoyeurs sont installés et leur usage, on distingue :

- Les convoyeurs de taille;

- Les convoyeurs de concentration;
- Les convoyeurs d'élévations.

II.4.2.1 Eléments constitutifs d'un convoyeur a bande:

Les convoyeurs a bande sont essentiellement constitué d'une carcasse textile ou métallique destinée à supporter les efforts liées au fonctionnement et de revêtement assurant la protection de la carcasse et la résistance à l'usure vis-à-vis des contacts extérieurs.

Le schéma ci-dessous indique les principaux éléments d'un convoyeur à bande :

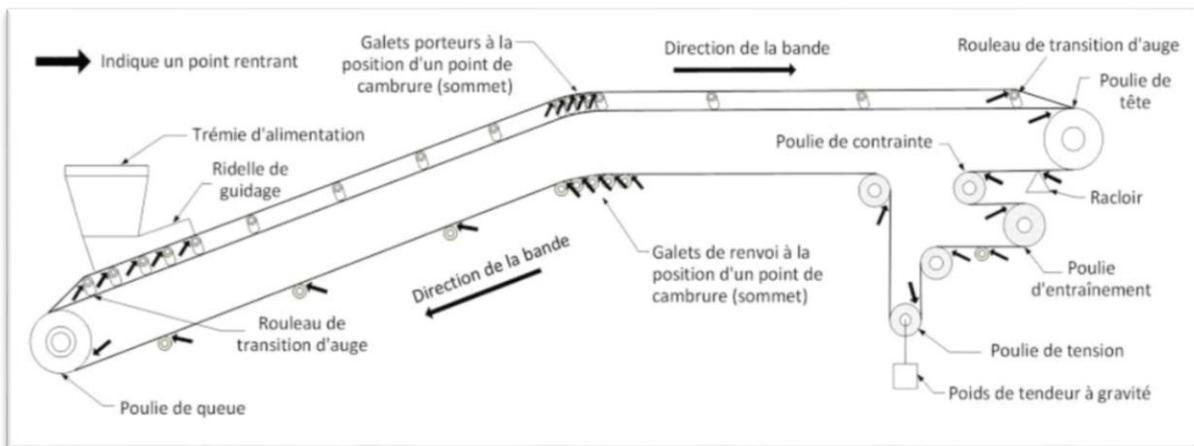


Figure II.12. Schéma des principaux éléments d'un convoyeur à bande

II.4.3 Transport par camion :

Le transport par camion est le plus répandu dans les carrières contemporaines. Il est rationnel lors de l'exploitation des gisements compliqués, de la construction et l'exploitation sélective. Il est répandu lors de l'exploitation des gisements compliqués, de la construction et de l'approfondissement des fosses minières. La grande efficacité du transport sur roue des minéraux utiles et roches stériles sur une distance relativement courte, la simplicité de construction des engins de transport, la manœuvrabilité, la possibilité de surmonter la pente élevée, la simplicité d'organisation de travail caractérisent fort bien cette méthode de transport.



Figure II.13. Camion (CATERPILLAR 775G)

II.4.3.1 Choix du type de camion :

Actuellement pour l'exploitation à ciel ouvert, on a tendance à utiliser les camions de grande capacité. Cela réduit les frais d'exploitation, la main d'œuvre, l'entretien et de la réparation.

En outre, l'utilisation d'une grande capacité diminue le coefficient de la tare, c'est pourquoi il est important de choisir correctement le type de camion d'après la relation entre capacité du godet de l'excavateur et celle de la benne de camion.

Cette relation est fonction de la distance de transport, ainsi :

- Pour une distance de transport jusqu'à 1,5km, le choix du type de camion doit se faire d'après la relation suivante :

$$V_b = (4 - 6) \cdot E ; m^3 \dots\dots\dots(\text{II-9})$$

- Pour une distance de 1,5 à 5km, le camion doit être choisi d'après la relation suivante :

$$V_b = (6 - 10) \cdot E ; m^3 \dots\dots\dots(\text{II-10})$$

- Pour une distance de 5 à 7km et plus, le camion doit être choisi d'après la relation suivante :

$$V_b = (8 - 12) \cdot E ; m^3 \dots\dots\dots(\text{II-11})$$

Où:

V_b : le volume du camion à choisir (m^3)

E : la capacité du godet de l'excavateur en (m^3)

II.4.3.2. rendement du camion et leur nombre :

Le nombre de camion se calcule en fonction de la production à assurer et du temps de rotation planifié par la carrière. Pour servir un seul engin de chargement il est nécessaire d'avoir le nombre de camion suivant :

$$N_C = \frac{t_{par}}{t_{ch}} ; \text{camion} \dots\dots\dots(\text{II-12})$$

Où :

T_{par} : Durée de parcours d'un camion, min ;

T_{ch} : Durée de chargement d'un camion, min ;

La durée de parcours se calcule comme suit :

$$t_{par} = t_{ch} + t_r + t_d + t_m ; \text{min} \dots\dots\dots(\text{II-13})$$

Où :

T_{tr} ; T_d ; T_m : sont respectivement durée du trajet (en charge et vide), de déchargement et de manœuvres, min.

D'après ces expressions :

$$N_C = \frac{t_{tr} + t_d + t_m}{t_{ch}} + 1 ; \text{camion} \dots\dots\dots(\text{II-14})$$

La durée de chargement d'un camion se détermine comme suite :

$$t_{ch} = n_g \times t_c ; \text{min} \dots\dots\dots(\text{II-15})$$

Où :

n_g : Nombre de godet déversés dans la benne du camion ;

t_c : Durée d'un cycle de l'engin de chargement ; min ;

La durée de chargement d'un camion par les roches légères :

$$t_{ch} = \frac{V_b \times K_{ch}}{0,9 \cdot E \times K_r} \times t_{cy}; \text{min} \dots \dots \dots \text{(II-16)}$$

La durée de chargement d'un camion par les minerais lourds :

$$t_{ch} = \frac{G_c \times K_f}{E \times K_r \times \gamma} \times t_{cy}; \text{min} \dots \dots \dots \text{(II-17)}$$

Où

E:capacite du godet de l'engin de chargement (m³)

K_f: coefficient de foisonnement dans le godet de l'engin de chargement

γ: coefficient de la variation du K_f dans la benne du camion ;

K_{ch} : coefficient du chargement de la benne avec chapeau (1,1÷1,15)

G_c: Capacité de la benne du camion,

La durée de parcours du camion à vide et en charge est :

$$t_{parv} = \frac{L}{V_v}; \text{min} \quad \text{Et} \quad t_{parch} = \frac{L}{V_c}; \text{min}$$

Où :

L: distance moyenne de transport ;

V_v Et V_c : sont respectivement la vitesse du camion vide et chargé ;

Le choix du type de camion dépend principalement du rendement, des caractéristiques de la charge à transporter, de la distance de transport et du type de l'excavateur. Pour les carrières de grande productivité il convient de choisir des camions de grande capacité de charge.

Le volume de la benne du camion sur le volume du godet de l'excavateur est un rapport qui dépend de la distance de transport, à partir de ces conditions on aboutit à un choix rationnel des camions assurant la production planifiée de la carrière.

$$n_g = \frac{V_b}{E} \dots \dots \dots \text{(II-18)}$$

a. Rendement du camion :

Le rendement du camion est déterminé par la formule suivante :

$$R_C = \frac{60 \cdot G_c \cdot K_u \cdot T_p \cdot K_r}{t_c \cdot K_f}; \text{t/poste} \dots \dots \dots \text{(II-19)}$$

Où :

T_p: Durée d'un poste,

G_c : Capacité de la benne du camion,

K_u : Coefficient d'utilisation,

K_r : Coefficient de remplissage,

K_f : Coefficient de foisonnement,

T_c : Durée du cycle du camion,

b. Nombre de camion :

Le nombre de camion est égale à :

$$N_C = \frac{K_i \cdot W_c}{R_c \cdot N_p} ;$$

K_i : Coefficient d'irrégularité du travail de la carrière = (1,1÷1,15)

W_c : Trafic de la carrière par jour (t)

N_p : Nombre de poste de travail par jour

R_c : Rendement effectif du camion par poste (t /p)

Nombre total de camions avec réserves :

Cette réserve garantit la production du chantier .On compte généralement au moins un camion en réserve sur six en marche. Cette réserve augmente en fonction du délai d'exploitation des camions. Donc, le nombre total de camions avec réserve sera :

$$N_{C,t} = \frac{N_C}{(0.7:0.8)}$$

Exercice

Pour excaver un sol argileux on utilise une pelle hydraulique sur chenille. Le godet de la pelle a une capacité de 2 500 litres. La rotation pour le chargement des bennes de camion est de 90°. Durée du cycle = 0,45 min

La pelle charge des camions de type « 10 roues » ayant une capacité de chargement de 12,65m³. Le temps requis pour évacuer un camion plein et installer un camion vide sous le godet de la pelle est de 0,5 minute.

1. Calculer la production horaire théorique de cette pelle sachant que le taux de travail est de 50 minutes par heure ?
2. Calculer la productivité réelle de l'ensemble pelle-camion ?

Corrige

a) Calcul de nombre de cycle par période de référence (heure)

Nombre de cycles par heure = 50 min ÷ 0,45 min/cycle = 111,11 cycles

b) Calcul de la productivité horaire théorique de la pelle:

$$R_{h\ th} = N_c \times G \times K_{exc}$$

$$R_{h\ th} = 111.11 \times 2.5 \times 0.95$$

$$R_{h,th}=263,9\ m^3/h$$

Ou :

N_c : Le nombre de cycle par unité de référence.

G : La capacité de godet de la pelle.

K_{exc} : Le coefficient d'excavation $K_{exc}=K_r/K_f$.

$R_{h,th}$: La productivité théorique horaire.

c) Calcule la production horaire réelle de cette pelle

$R_{h,th}$ représente la production théorique, car dans ce calcul, on ne prend pas en compte le temps requis pour la mise en place de la benne des camions sous la portée du godet de la pelle.

Nombre de coups de godet requis pour remplir une benne de camion

$$N_{CG} = C_b \div (G \times K_{exc})$$

$$N_{CG} = 12.65 \div (2.5 \times 0.95)$$

$$N_{CG}=5,32 \text{ coups}$$

Soit 5 coups pour 11,875 m³

Durée de chargement = 5 coups de godet x 0,45 min/cycle = 2,25 minutes

Durée de la mise en place de la benne = 0,5 minute

Durée totale du chargement = 2,25 min + 0,5 min = 2,75 minutes

Nombre de chargements à l'heure = 50 min ÷ 2,75 min/chargement = 18,18 chargements

Production = 18,18 charges. x 11,875 m³/charge.

$R_{h,R}=215,9 \text{ m}^3/\text{h}$
--

Exercice 02

Dans une carrière de gravier on utilise une chargeuse sur roue et des camions de type « 10 roues »

Le godet de la chargeuse a une capacité de 4 450 litres. Le gravier exploité a une teneur moyenne en eau de 10%, sa masse volumique sèche en place est de 1,8 t/m³ et ses foisonnements initial et final sont respectivement de 14% et de 2%.

Les camions ayant des bennes d'une capacité de chargement de 16 m³ ou de 24 tonnes. Le temps requis pour évacuer un camion plein et installer un camion vide sous le godet de la chargeuse est de 0,4 minute.

- a) calculer la production horaire théorique de cette chargeuse sachant que le taux de travail est de 55 minutes par heure.
- b) On demande la production horaire réelle de cette chargeuse ?

Corrige

Calcul de la Masse volumique en place

$$(W=10\%) = 1,8 \text{ t/m}^3 \times 1,1 = 1,98 \text{ t/m}^3$$

Masse volumique foisonnée

$$= 1,98 \text{ t/m}^3 \div 1,14 = 1,737 \text{ t/m}^3$$

$$V_{eff,ch} = V_{ch} / (W_{10\%})$$

$$V_{eff,ch} = 13,82 \text{ m}^3$$

$$NG / C = 13,82 \text{ m}^3 \div 4,45 \text{ m}^3/\text{godet} = 3,1 \text{ godets}$$

soit 3 godets pour 13,35 m³ = (3 x 4,45m³ x 100%)

Durée du cycle de remplissage des camions = $(3 \times 0,40 \text{ min/godet}) + 0,4 \text{ min} = 1,6 \text{ min/chargement}$

Production horaire = $55 \text{ min} \div 1,6 \text{ min/chargement} \times 13,35 \text{ m}^3$

$$\mathbf{R_{h,R}=458,9 \text{ m}^3/\text{h}}$$

Chapitre III. : Electrifications des travaux miniers

III.1. Introduction

III.2. Définition d'une ligne électrique

III.3. Définition d'un réseau électrique

III.4. Principaux composants des lignes aériennes

Exercice

III.1. Introduction

L'électrification des travaux minier est un processus visant à remplacer l'utilisation des énergies fossile tel que le charbon et les dérivés de pétrole ; pour l'équipement minier par des équipements alimenté en électricité.

Cela peut offrir plusieurs avantages aux mines notamment une réduction d'émission des gaz à effet de serre, et une amélioration de la santé et de la sécurité des travailleurs et par conséquent diminuer le coût d'exploitation de la mine.

III.2. Définition d'une ligne électrique

Une ligne électrique est l'une des principales formes d'infrastructures énergétiques et le composant principal des réseaux d'électricité, Elle permet de transporter l'énergie électrique, des centrales électriques vers les réseaux de distribution qui alimentent les consommateurs selon leurs besoins. Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt ce terme aux liaisons aériennes. Ces types de ligne peuvent être classés selon le mode de transport d'énergie électrique en:

- lignes de grand transport : entre un centre de production et un centre de consommation ou un grand poste d'interconnexion ;
- lignes d'interconnexion : entre plusieurs régions ou plusieurs pays (secours mutuel) ;
- lignes de répartition : entre grands postes et petits postes ou gros clients nationaux ;
- lignes de distribution : vers les consommateurs BT.

Tableau III.1: Classification des niveaux de tension

Symboles	TBT	BTA	BTB	HTA	HTB
Tension	Très Basse Tension	Basse Tension A	Basse Tension B	Haute Tension A	Haute Tension B
Courant alternatif	$U \leq 50$ volts	$50 < U \leq 500$ volts	$500 < U \leq 1000$ volts	$1000 < U \leq 50$ kV	$U > 50$ kV
Courant continu	$U \leq 120$ volts	$120 < U \leq 750$ volts	$750 < U \leq 1500$ volts	$1500 < U \leq 75$ kV	$U > 75$ kV
Sécurité du voisinage	Aucun danger	$D \geq 30$ cm	$D \geq 30$ cm	$D \geq 2$ mètres	$D \geq 3$ mètres

III.3. Définition d'un réseau électrique

Les réseaux électriques permettent de créer des synergies entre systèmes de production différents (hydraulique, solaire et éolien renouvelables mais dépendent de la disponibilité de la source primaire tandis que le thermique (classique, nucléaire, géothermal),

Les réseaux d'électricité ont été conçus dans le but de veiller à :

- la fiabilité de la fourniture de l'énergie électrique. Les réseaux relient entre elles toutes les unités de production et visent à assurer une fonction de secours en cas de pannes et/ou de défaillances.
- L'optimisation de la disponibilité de l'énergie électrique aux consommateurs, ainsi les réseaux permettent d'acheminer l'énergie produite par des sources délocalisées vers les points de consommation.
- visent à assurer l'acheminement de l'énergie produite en masse à un endroit défini par

des machines raccordées en grande partie aux niveaux de tension supérieurs vers des consommateurs en général disséminés sur un territoire donné et raccordés à des niveaux de tension inférieurs.

- permettent de créer des synergies entre systèmes de production différents (hydraulique , solaire et éolien renouvelables mais dépendent de la disponibilité de la source primaire tandis que le thermique (classique, nucléaire, géothermal).

Donc le but principal d'un réseau électrique est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité :

$$\text{Production} = \text{Consommation} + \text{pertes}$$

III.4. Principaux composants des lignes aériennes

Les lignes aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, de types pylônes ou poteaux. Ces supports peuvent être faits de bois, d'acier, de béton, d'aluminium ou parfois en matière plastique renforcée, des isolateurs et des autres accessoires tels que les pinces de suspension, les jonctions de connecteurs, et les amortisseurs dynamiques, ...).

Le dimensionnement d'une ligne aérienne dans le cadre d'un régime permanent se fait en deux parties : choix de la section du conducteur et choix du gabarit des pylônes. En réalité, il faudrait optimiser le coût global (câble + pylône) en tenant compte des contraintes techniques et des pertes. C'est alors un calcul plus complexe auquel nous ajoutons le choix du niveau de tension et la longueur de portée moyenne.

III.4.1. Les conducteurs

Il sera le moins résistant possible pour perdre le moins possible d'énergie en cours de route. On exprime la qualité conductrice d'un matériau avec la résistivité ρ qui a pour unité $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$. Plus cette résistivité est grande moins le conducteur sera de bonne qualité, on trouve la résistance totale par la formule :

$$R = \frac{\rho \times L}{S}; \text{ohm} \dots \dots \dots \text{(III.1)}$$

R : Résistance en ohms

L: Longueur du conducteur en mètres

S: Section du conducteur en mm^2

ρ : Résistivité en $\text{ohms} \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ($\rho = 17.241 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ pour le cuivre et $\rho = 28.264 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ pour l'aluminium)

Actuellement les câbles les plus couramment utilisés pour les lignes haute tension sont les conducteurs en aluminium avec âme en fils d'acier connus sous le diminutif de ACSR (Aluminium Conductor Steel Reinforced), les conducteurs homogènes en alliage d'aluminium connus sous le diminutif de AAAC (All Aluminium Alloy Conductor) et, dans une moindre mesure les conducteurs en alliage d'aluminium avec âme en fils d'acier connus sous le diminutif de ACAR (Aluminium Conductor Alloy Reinforced).

III.4.1.1. Type de conducteur :

Appelé aussi «âme» le conducteur peut être rigide ou souple. Dans le cas où il est rigide, l'âme est constituée d'un seul brin de matériaux conducteur. Dans le cas où l'âme est souple elle est constituée de plusieurs brins. On lui donnera un chiffre compris entre 1 et 6, plus le chiffre est élevé, plus le conducteur sera souple. Ce chiffre est appelé « classe » de l'âme du conducteur.



Figure III.1. Différents types de conducteurs

III.4.1.2. Choix de section du câble

Afin de choisir la section du câble, nous devons vérifier trois choses :

- Quel est le courant nominal qui circule dans le câble ?
- Supporte-t-il la puissance de court-circuit ?
- La chute de tension est-elle bien inférieure à la limite ?

A partir d'un certain niveau de tension, nous devons aussi vérifier que l'effet couronne ne devient pas trop important. Nous aboutissons ainsi à une section techniquement optimale mais non normalisée. Il faut décider donc de prendre une section normalisée supérieure. Le calcul des différents coûts de la ligne nous aide à choisir celle qui convient le mieux. Très souvent, le niveau de tension est imposé et les longueurs de portée également (emplacement des pylônes imposé par la disponibilité du terrain).

D'un point de vue mécanique, le calcul de la résistance des conducteurs est soumis aux réglementations internationales. Les conditions climatiques doivent être connues (givre, températures, intensité du vent,...).

III.4.1.2.1. Critère de courant nominal

Nous devons vérifier que le câble supporte le courant nominal sur toute sa durée de vie. Vu $P_{\text{départ}}$ et a donnés, nous déterminons tout d'abord la puissance circulant dans le câble après les T années d'utilisation par la relation:

$$P_T = P_{\text{départ}} \times (1 + a)^T; \quad \text{MW} \dots \dots \dots \text{(III.2)}$$

Nous en déduisons le courant circulant alors dans chaque phase du câble :

$$I_{N,T} = \frac{P_T}{\sqrt{3} \times U \times \cos \phi}; \quad \text{KA} \dots \dots \dots \text{(III.3)}$$

III.4.1.2.2. Critère du courant de court-circuit

Le courant de court-circuit triphasé (en kA) d'une ligne aérienne est indiqué en puissance apparente de court-circuit S_{cc} (en MVA) par le distributeur d'énergie. De cette valeur est déduite l'impédance équivalente Z_s du réseau amont.

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \times U}; \text{ KA} \dots \dots \dots \text{(III.4)}$$

Tableau III.2. Puissance et courant de court-circuit

Tension phase/phase U [kV]	Puissance de court-circuit S _{cc} [MVA]	Courant de court-circuit I _{cc} [kA]
150	8000	30,8
70	2500	20,6
15	350	13,5
6	120	11,6

III.4.1.2.3. Critère de la chute de tension

La chute de tension Dans une ligne électrique se produit lorsqu'un courant traverse le câble. Elle est liée à la résistance ou à l'impédance du flux de courant avec des éléments passifs dans les circuits, y compris les câbles, les contacts et les connecteurs affectant le niveau de chute de tension.

La valeur de la chute de tension est calcul par la formule suivante:

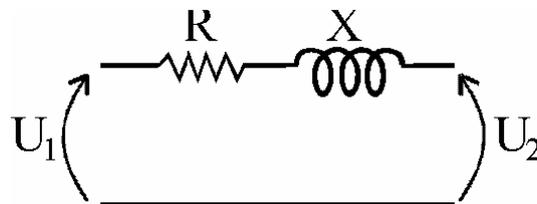


Figure III.2. Modèle équivalent d'une liaison

$$\frac{\Delta U}{U} = \sqrt{3} \times \frac{I_N}{U_N} \times (R'_{70} \times I \times \cos(\varphi) + X' \times \sin(\varphi)) \dots \dots \dots \text{(III.5)}$$

III.4.2. Les pylônes

Les pylônes sont des structures généralement réalisées avec des éléments métalliques ou en béton pour des raisons de légèreté et de résistance. Et est destiné à porter des câbles aériens (pylône de ligne électrique), des antennes de toutes sortes (pylône GSM), les ponts suspendus, l'éclairage public etc....

III.4.2.1. types de pylônes

Il existe plusieurs types des pylônes selon les contraintes engendrés, leurs formes, leurs matériaux constitutifs. Selon les matériaux, on distingue les pylônes métalliques, en béton, et en bois.

Les pylônes électrique peuvent se subdiviser en trois (03) grandes catégories selon les contraintes engendrées : les pylônes monomodes, autoportants et haubanés.

III.4.2.1.1. Pylône autoportants:

Les pylônes autoportants sont des structures métalliques constituées par un assemblage de membrures formant un treillis rigides fixées au sol par des fondations en béton et dotés d'une structure ouverte ou fermée. Ils sont destinés à la plupart des lignes de transport de l'électricité, sous forme de courant alternatif ou de courant continu et sont plus adapté pour les grandes hauteurs. Ces structures sont légères non encombrantes, et ne présente pas une grande surface exposée au vent. Il existe plusieurs modèles de pylônes à treillis : Pylône à deux et Pylône à un triangle.



Pylône chat



Pylône à trois triangles

Figure III.3. Pylône auto-stable (en treillis)**III.4.2.1.2. Pylône haubané**

Les pylônes haubanés sont plus légers, Ces derniers doivent résister à des efforts obliques d'arrachement. C'est un mât soutenu par des haubans ou câbles en acier, ils sont en général de sections triangulaire constante tout au long de la structure. Les membrures et treillis sont en cornières à 90° ou 60°, ou en tube galvanisé. Les haubans sont en câble d'acier galvanisé. Ils sont fixés au pylône tous les 15 à 30m. L'ancrage des haubans peut être assuré par massif en béton enterré ou par remblai fixant la semelle du dispositif d'ancrage. Ce type de pylône n'est pas assez rigide car la section transversale du treillis et les sections des barres qui le constituent sont faibles. En plus cette solution représente un inconvénient majeur qui est l'encombrement des câbles. Il existe deux types : Pylône haubané en V et haubané à chaînette.



Pylône électrique haubané en V



Pylône électrique à chaînette

Figure III.4. Pylône haubané**III.4.2.1.3. Les pylônes monomodes**

Les pylônes monomodes qui appliquent des efforts horizontaux et des moments de renversement sur la fondation, sont généralement de forme cylindrique en béton, ce qui permet de les construire selon le procédé des coffrages glissants. Ils présentent l'avantages qu'ils nécessitent un entretien beaucoup moins important que les pylônes métalliques

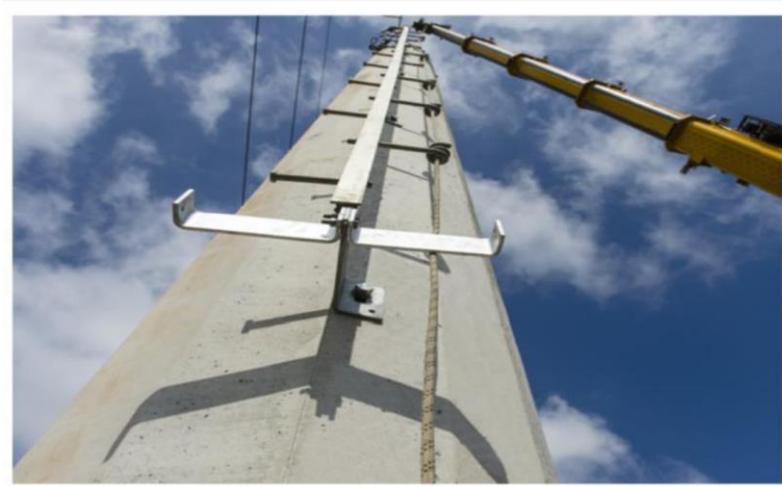


Figure III.5. Pylônes monomodes

III.4.2.2. Charges transmises aux pylônes

Les charges transmises par les conducteurs et les câbles de garde peuvent être décomposées suivant trois directions orthogonales choisies de manière à simplifier les calculs. Par convention on appelle:

- Face élévation, la face perpendiculaire à l'axe de la ligne.
- Face profil, le plan parallèle à la ligne.

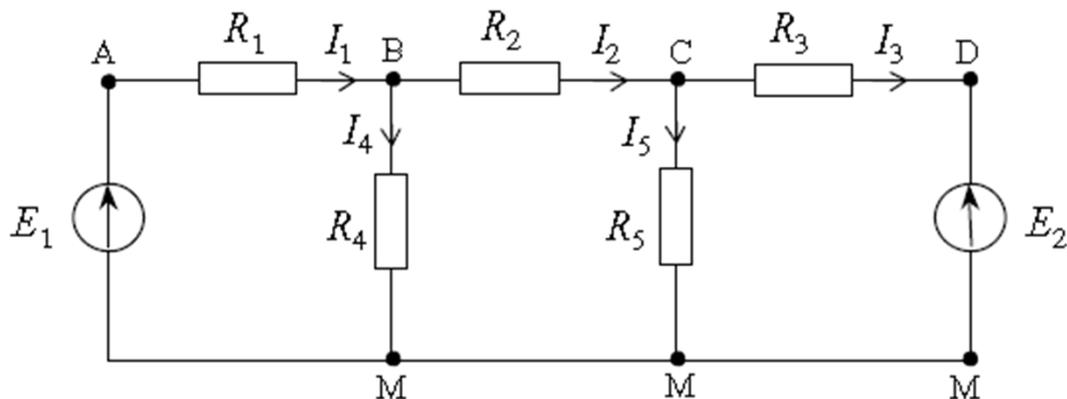
Il est important de choisir comme charges de référence :

Les charges verticales (V) : Ils sont dus :

- Au poids propre du pylône, des conducteurs, des câbles de garde et des chaînes d'isolateurs.
- Au poids du givre sur les câbles.
- A la composante verticale due à la tension des conducteurs et des câbles de garde pour les pylônes dénivelés (pylônes chargés ou déchargés)

Les charges horizontales transversales (H), perpendiculaires à la ligne dues à l'action du vent soufflant transversalement sur les conducteurs, les câbles de garde (avec ou sans givre) et les chaînes d'isolateurs.

Les charges horizontales longitudinales (L), qui agissent dans le sens de la ligne. Charges verticales (V) dues aux conducteurs et aux câbles de garde. Charges horizontales transversales (H) : Ces charges sont dues à l'action du vent soufflant perpendiculairement à la ligne et agissent sur les faces élévation du pylône.

Exercice01 :

Déterminer en fonction des éléments du montage les intensités I_1 , I_2 , I_3 , I_4 et I_5 dans chaque branche du réseau, Application numérique : $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_4 = R_5 = 2 \text{ k}\Omega$, $E_1 = 10 \text{ V}$ et $E_2 = 20 \text{ V}$

Exercice02 :

Pour dimensionner une jonction aérienne à 36kV devant transiter une puissance de 10MW (facteur de puissance 0,9 inductif) ; nous utilisons un conducteur en AMS (alliage Al, Mg, Si) de 35 km. Nombre d'années projetées $T=20$ ans; avec une augmentation annuelle de la puissance 3%. Ce conducteur en alliage AMS possède une résistivité de $0,357 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ à 20°C et son coefficient de température « α » vaut $0,004 \text{ K}^{-1}$.

Nous admettrons une chute de tension maximale de 9%.

Nous pouvons tabler sur une utilisation de 2000 heures par an à pleine charge.

1. Calculer le courant nominal $I_{N,20}$?
2. calculer le courant de court-circuit?
3. calculer le critère de la chute de tension?
4. Trouver la section minimale supportant chaque critère ?

Corrige

Exercice 1 :

Nous pouvons utiliser la loi des mailles appliquée aux trois mailles suivantes : (ABMA), (BCMB) et (CDMC). Nous constatons de suite que les courants I_4 et I_5 s'écrivent :

$$I_4 = I_1 - I_2 \text{ et } I_5 = I_2 - I_3$$

Les équations des mailles deviennent :

$$\begin{cases} R_1 I_1 + R_4 (I_1 - I_2) - E_1 = 0 \\ -R_4 (I_1 - I_2) + R_2 I_2 + R_5 (I_2 - I_3) = 0 \\ -R_5 (I_2 - I_3) + R_3 I_3 + E_2 = 0 \end{cases}$$

Ce qui s'écrit encore :

$$\begin{cases} (R_1 + R_4) I_1 - R_4 I_2 = E_1 \\ -R_4 I_1 + (R_4 + R_2 + R_5) I_2 - R_5 I_3 = 0 \\ -R_5 I_2 + (R_3 + R_5) I_3 = -E_2 \end{cases}$$

En remplaçant par les valeurs numériques, nous obtenons le système d'équation

$$\begin{cases} (3 \times 10^3)I_1 - (2 \times 10^3)I_2 = 10 \\ -(3 \times 10^3)I_1 + (5 \times 10^3)I_2 - (2 \times 10^3)I_3 = 0 \\ -(2 \times 10^3)I_2 + (3 \times 10^3)I_3 = -20 \end{cases}$$

Il suffit de résoudre le système en utilisant le calcul matriciel :

$$\begin{bmatrix} 3 \times 10^3 & -2 \times 10^3 & 0 \\ -2 \times 10^3 & 5 \times 10^3 & -2 \times 10^3 \\ 0 & -2 \times 10^3 & 3 \times 10^3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 \\ 0 \\ -20 \end{bmatrix}$$

Pour cela, nous pouvons utiliser par exemple la méthode de Cramer :

$$I_1 = \frac{\begin{bmatrix} 10 & -2 \times 10^3 & 0 \\ 0 & 5 \times 10^3 & -2 \times 10^3 \\ -20 & -2 \times 10^3 & 3 \times 10^3 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 3 \times 10^3 & -2 \times 10^3 & 0 \\ -2 \times 10^3 & 5 \times 10^3 & -2 \times 10^3 \\ 0 & -2 \times 10^3 & 3 \times 10^3 \end{bmatrix}}$$

$$I_1 = \frac{30 \times 10^6}{45 \times 10^9} = 0.66 \text{ mA}$$

$$I_2 = \frac{\begin{bmatrix} 3 \times 10^3 & 10 & 0 \\ -2 \times 10^3 & 0 & -2 \times 10^3 \\ 0 & -20 & 3 \times 10^3 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 3 \times 10^3 & -2 \times 10^3 & 0 \\ -2 \times 10^3 & 5 \times 10^3 & -2 \times 10^3 \\ 0 & -2 \times 10^3 & 3 \times 10^3 \end{bmatrix}}$$

$$I_2 = 1.33 \text{ mA}$$

$$I_3 = \frac{\begin{bmatrix} 3 \times 10^3 & -2 \times 10^3 & 10 \\ -2 \times 10^3 & 5 \times 10^3 & 0 \\ 0 & -2 \times 10^3 & -20 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 3 \times 10^3 & -2 \times 10^3 & 0 \\ -2 \times 10^3 & 5 \times 10^3 & -2 \times 10^3 \\ 0 & -2 \times 10^3 & 3 \times 10^3 \end{bmatrix}}$$

$$I_3 = 1.33 \text{ mA}$$

$$I_1 = 0,66 \text{ mA}, I_2 = -1,33 \text{ mA}, I_3 = -7,55 \text{ mA}, I_4 = 2 \text{ mA}, I_5 = 6,22 \text{ mA}.$$

Ces résultats montrent que les sens choisis pour les courants ne sont pas tous corrects. En effet, le générateur E_2 impose son courant de droite à gauche et par conséquent le courant I_2 est lui aussi de droite à gauche.

Exercice 2**Critère du courant nominal :**

La puissance que notre liaison devra transiter vaut 10 MW sous une tension nominale de 36 kV. Le courant nominal circulant dans la ligne se calcule par la formule suivante où le $\cos(\varphi)$ vaut 0,9. Nous avons alors :

Puissance max. à transiter (après 20 ans) :

$$P_{20} = P_0 \cdot (1+a)^T;$$

$$P_{20} = 18,1 \text{ MW}$$

Intensité du courant en fin de vie : Nous avons :

$$P_T = \sqrt{3} \times U \times I_{N,T} \times \cos(\varphi)$$

$$I_{N,20} = \frac{P_{20}}{\sqrt{3} \times U \times \cos(\varphi)} = \frac{18,1 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 36 \cdot 10^3 \times 0,9}$$

$$I_{N,20} = 322 \text{ A}$$

La plus petite section normalisée que nos tables nous proposent et supportant un courant de 322 A au moins vaut 95 mm². Toutes les sections supérieures respectent ce critère du courant nominal.

Critère du courant de court-circuit :

Nous savons que la puissance de court-circuit reste inférieure à 700 MVA pendant un temps de 1,5 s. Calculons d'abord le courant de court-circuit correspondant :

$$I_{CC} = \frac{S_{CC}}{\sqrt{3}U_N} = \frac{700 \cdot 10^6}{\sqrt{3}U_N}$$

$$I_{CC} = 11200 \text{ A}$$

$$S = \frac{I_{CC} \times \sqrt{t_{CC}}}{a}; \text{ mm}^2$$

où 'a' vaut 61,98 pour l'AMS (température de service 70°C et maximale 250°C) ; Dans notre cas, le calcul nous donne une section minimale de 222 mm².

Critère de la chute de tension :

Un rapide calcul nous donne la formule de la chute de tension :

$$\frac{\Delta U}{U} = \sqrt{3} \frac{I_N \cdot l}{U_N} \cdot (R_{70 \cdot C} \cdot \cos(\varphi) + X \cdot \sin(\varphi))$$

ce qui, après calcul du courant nominal au départ, permet de déterminer la résistance maximale de la ligne :

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3}U \cdot \cos(\varphi)} = \frac{10 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 36 \cdot 0,9}$$

$$I_N = 178 \text{ A}$$

$$R_{\max,70^{\circ}\text{C}} = (0,09/\sqrt{3} \times 36000 / (178 \times 35) - 0,4 \times 0,436) / 0,9 = 0,140 \text{ } \Omega/\text{km} \text{ à } 70^{\circ}\text{C} ;$$

$$R_{\max,20^{\circ}\text{C}} = 0,140 / (1 + 0,004 \times 50) = 0,116 \text{ } \Omega/\text{km} \text{ à } 20^{\circ}\text{C}.$$

toutes les sections de résistance électrique supérieure à 0,116 Ω/km sont à rejeter car elles conduisent à une chute de tension supérieure à 9 %.

$$S_{\min} = 288 \text{ mm}^2$$

La section minimale supportant ce critère vaut de 288 mm^2 .

Chapitre IV. Machines électriques

IV-1. Introduction

IV-2. Moteurs a courant continu

IV.3.4. Machines synchrones

IV.5. Machines asynchrones

IV.5.4. Exercice (machine synchrone)

IV.5.5. Exercice (machine asynchrone)

IV-1. Introduction

Le but essentiel des machines électriques est la transformation de l'énergie d'une forme à une autre, l'une au moins de ces formes étant électrique, elles transforment généralement l'énergie électrique en énergie mécanique ou réalisent l'opération inverse. Les machines destinées à la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique porte le nom de générateur et celle qui sont destinées à la transformation inverse s'appelle moteur. Elles diffèrent de tous les autres convertisseurs électromécaniques en ce qu'à de rares exceptions la transformation qu'elles réalisent est continue et unidirectionnelle.

Les deux éléments fondamentaux qui font intervenir dans la transformation électromécanique de l'énergie dans les machines électriques sont les courants électriques et les champs magnétiques. Donc le principe de fonctionnement de ces machines est basé sur le phénomène d'induction électromagnétique et liée aux forces électromotrices (f.é.m.) qui sont induites au cours de la variation périodique du champ magnétique lors du déplacement mécanique des enroulements ou des éléments du circuit magnétique.

La machine électrique représente un système électromagnétique qui se compose de circuits magnétique et électrique interdépendants. Le circuit magnétique comprend une partie fixe et une partie mobile réalisées en matériau magnétique et séparées par un entrefer alors que les circuits électriques représentés par deux ou plusieurs enroulements peuvent se déplacer l'un par rapport à l'autre avec les noyaux magnétiques sur lesquels ils sont placés.

Le fonctionnement des machines génératrices est basé sur l'induction d'un courant électrique dans un circuit conducteur par déplacement relatif de celui-ci et d'un champ magnétique, à l'aide d'un mécanisme d'entraînement mécanique. Selon que le courant électrique induit est continu ou alternatif, la machine génératrice sera appelée dynamo ou alternateur. Au contraire, si la machine reçoit de l'énergie électrique, sa partie mobile effectue du travail mécanique

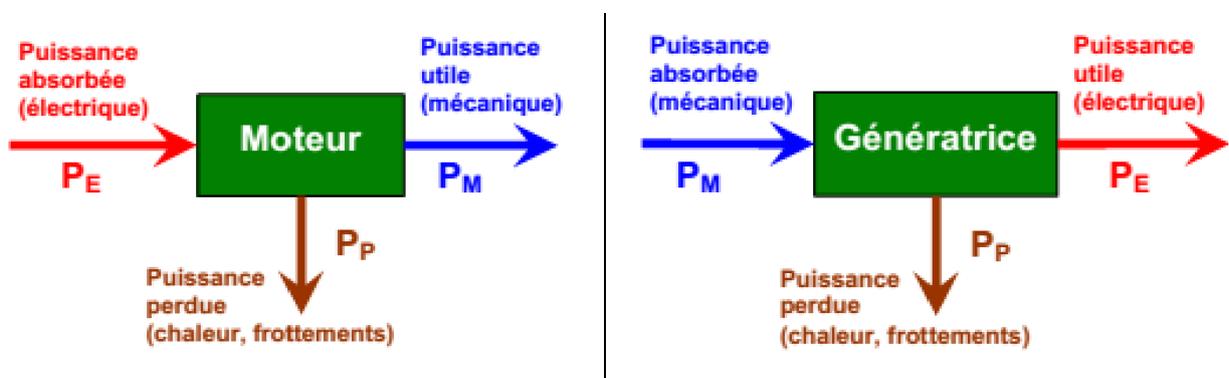


Figure IV-1. Schéma de fonctionnement des machines électrique

IV-2. Moteurs a courant continu

C'est une machine électromagnétique qui transforme l'énergie électrique qu'elle reçoit sous forme de courant continu en énergie mécanique. Les moteurs à courant continu restent très utilisés dans le domaine de l'automobile (ventilateurs, lève-vitre, etc.) ainsi que dans le domaine des puissances supérieure au mégawatt (les sous-marins).

La machine à courant continu se compose de deux parties principales. Une partie fixe appelée Stator (ou inducteur) et une partie mobile appelée Rotor (ou induit). Le stator qui est à l'origine de la création du flux magnétique principal, soit par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanents. Il est aussi appelé « inducteur » en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine. Le rotor bobiné relié à un collecteur rotatif inversant la polarité de chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique. Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits, ou communément « induit » en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine

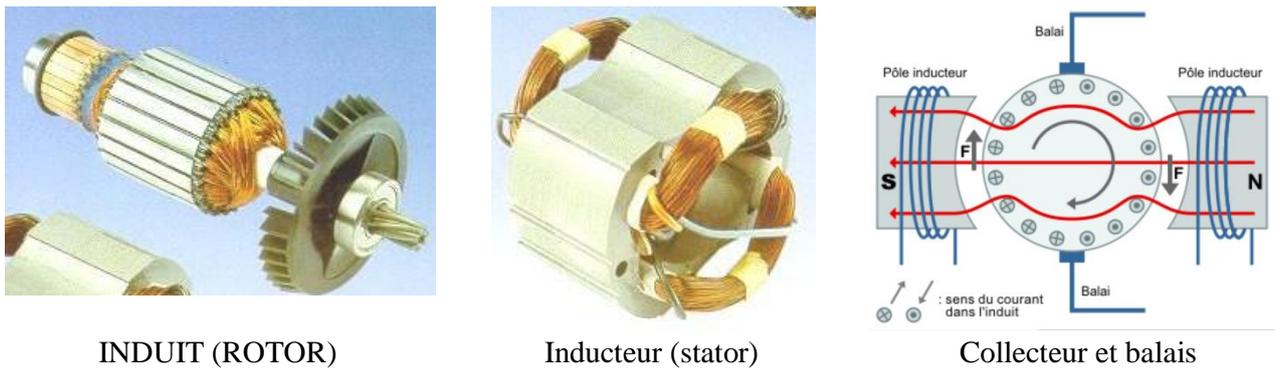


Figure IV-2. Différentes parties d'une machine électrique à courant continu

IV-2.1. Principe de fonctionnement

D'après la loi de Laplace (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces F égales mais de sens opposé en créant un couple moteur : l'induit se met à tourner

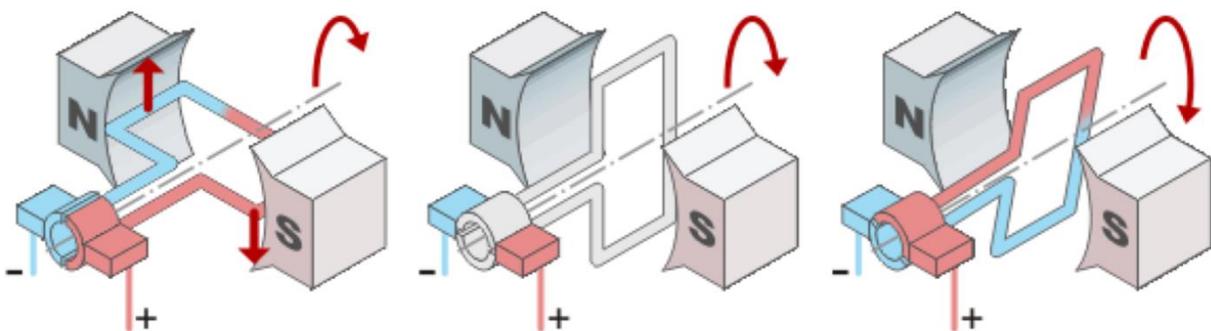


Figure IV-3. Principe de fonctionnement d'une machine électrique à courant continu

IV-2.2. Force électromotrice

Nous pouvons obtenir une f.é.m. continue en mettant en série les conducteurs de l'induit et en recueillant cette f.é.m. par deux balais fixes par rapport à l'inducteur et placés sur la ligne neutre. La « ligne neutre » est l'axe de symétrie d'une machine bipolaire, perpendiculaire à une ligne joignant les pôles. Entre les balais, D'où la formule générale :

$$E = \frac{P}{a} \times n \times \Phi \times \Omega = K \times \Phi \times \Omega; \quad V \dots \dots \dots (1)$$

Où

E: Force contre-électromotrice en Volts ;

P : nombre de pair de pôles ;

a: le nombre de pair de voies ;

n : nombre de spires ;

Φ: Flux utile par pôle (Weber) ;

Ω: Vitesse de rotation (rd/s) ;

Couple électromagnétique :

Le couple moteur est correspond à la puissance passée de la forme électrique à la forme mécanique, il est lié au flux inducteur et au courant de l'induit par la relation suivante qui.

$$C = K \times \Phi \times I; \quad [N.m] \dots \dots \dots (2)$$

Où

k = constante propre au moteur (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit).

Φ= le flux de l'inducteur [weber].

I = le courant dans l'induit [ampère]

IV .2.3. Classification des machines à courant continu :

Les machines à courant continu peuvent être classées selon leurs modes d'excitation. Les machines à courant continu sont généralement subdivisées en deux groupes selon la nature de création du champ magnétique. On distingue alors les machines à aimant permanent et les machines à excitation électromagnétique où le champ est créé par une bobine enroulant un noyau ferromagnétique. On peut réaliser l'excitation électromagnétique de plusieurs façons (excitation indépendante ou auto-excitation tels que l'excitation en série, en parallèle (ou shunt) et composée.

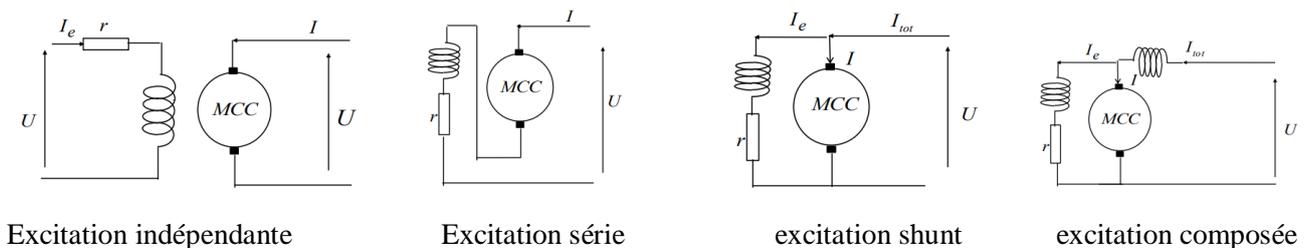


Figure IV .4. Modes d'excitation des la machines à courant continu.

IV.2.4. Bilan des puissances et rendement :

Il est important d'identifier les divers éléments du schéma équivalent en terme de puissance. Il est également important de porter une attention particulière à l'expression du rendement de la machine en fonction de son régime de fonctionnement (moteur ou générateur). On représente sur la figure IV.5 l'écoulement des puissances au sein de la machine dans les deux types de fonctionnement, ainsi que l'expression des rendements correspondants.

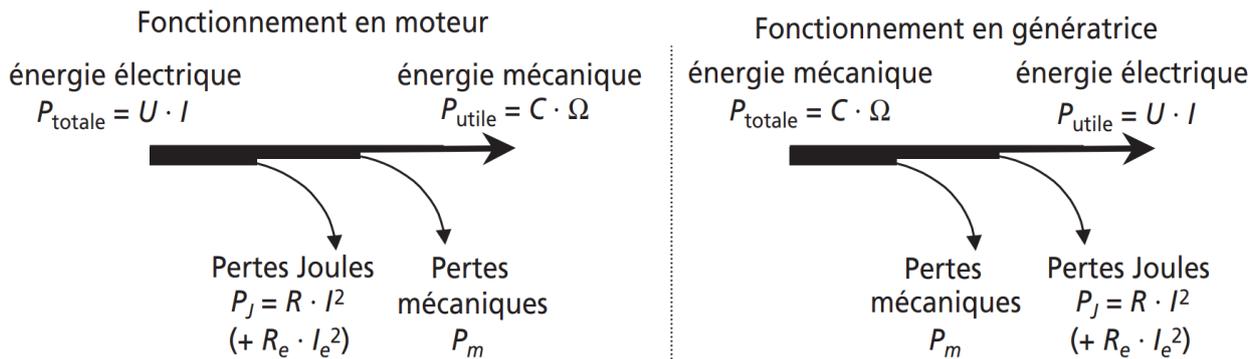


Figure IV.5. Diagramme des puissances d'une machine à courant continu à excitation séparée.

Dans tous les cas, le rendement s'écrit :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{totale}}} \dots \dots \dots (3)$$

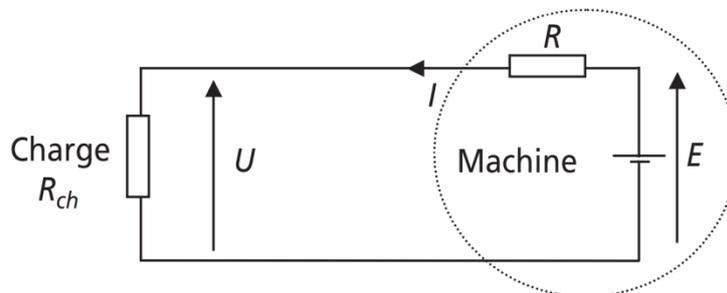
IV.2.5. Exercice (Machine a courant continu)

Une machine à courant continu à aimants permanents est utilisée en génératrice, entraînée par un ensemble mécanique à la vitesse $N_n = 3000 \text{tr/min}$. La tension nominale de la génératrice est $U_n = 220 \text{V}$, la puissance nominale $P_n = 20 \text{kW}$ et le rendement nominal $\eta = 0.8$

- 1) Représenter un schéma équivalent de la génératrice et de sa charge (utiliser une convention adaptée).
- 2) Calculer la valeur du courant nominal fourni par la génératrice.
- 3) En négligeant les pertes mécaniques, calculer la valeur de la résistance d'induit.
- 4) Calculer alors la valeur de la tension à vide dans ces conditions.
- 5) Lorsqu'on fait fonctionner la machine à demi-charge, c'est-à-dire pour une puissance fournie $P = P_n/2$, la vitesse augmente car le rotor est moins « freiné » par la charge. On relève $N_{n/2} = 3100 \text{tr/min}$. Calculer la nouvelle valeur de la tension à vide.
- 6) Calculer la nouvelle valeur de la tension d'induit et du courant fourni.
- 7) Calculer alors le rendement de la machine à demi-charge obtenu en négligeant les pertes mécaniques. Commenter ce résultat.

Correction d'exercice

1) Schéma équivalent de la génératrice et de sa charge



2) La puissance nominale de la machine s'écrit :

$$P_n = 20 \text{ kW} = U_n \cdot I_n$$

C'est-à-dire : $I_n = P_n / U_n = 90.9 \text{A}$

3) Les pertes totales nominales de la machine sont représentées par la valeur du rendement nominal $\eta = 0.8$. On écrit donc $P_R = (1 - \eta) \cdot P_n = 4 \text{kW}$. Les seules pertes étant de nature électrique (effet Joule) dans la résistance d'induit, il vient : $P_R = R \cdot I_n^2 = 4 \text{kW}$

Soit donc : $R = P_R / I_n^2 = 0,484 \Omega$

- 4) Pour calculer la tension interne (ou « tension à vide »), qui est également la force électromotrice E on écrit l'équation de maille au point nominal : $U_n = E - R \cdot I_n$
 $E_n = U_n + R \cdot I_n = 264 \text{ V}$
- 5) La vitesse et la force électromotrice à vide étant proportionnelles, on peut calculer la nouvelle valeur de cette dernière par une règle de trois : $E_{n/2} = 264 / 3000 \times 3100 = 272,8 \text{ V}$
- 6) Pour calculer la tension correspondante à la demi-charge, on écrit : $P_{n/2} = 10 \text{ kW}$
 $U_{n/2} \cdot I_{n/2}$ ou $U_{n/2}$ et $I_{n/2}$ sont inconnues. La résolution de ce polynôme du second degré donne :
 $U_{n/2} = 253,7 \text{ V}$
- 7) Avant de calculer le rendement, on calcule le courant à mi-charge : $I_{n/2} = P_{n/2} / U_{n/2} = 39,41 \text{ A}$
 Le rendement de la machine à mi-charge s'écrit alors : $\eta = \frac{P_{n/2}}{\frac{P_n}{2} + R \cdot I_{n/2}^2} = 0,93$

IV.3. Machines à courant alternatif

Les machines à courant alternatif sont les machines le plus fréquemment utilisé dans l'industrie. Elles possèdent en effet plusieurs avantages par rapport aux machines à courant continu tel que la simplicité, la robustesse, le prix réduit d'entretien et réparation et l'entretien facile.

Le principe de fonctionnement d'un moteur à courant alternatif repose sur l'induction d'un courant dans les conducteurs lorsqu'ils coupent les lignes de force du champ magnétique tournant, d'où le nom de «moteur à induction». L'action combinée de ce courant induit et du champ magnétique crée un couple électromagnétique sur le rotor. Le champ magnétique statorique dans les machines à courant alternatif est tournant. Selon que la vitesse rotorique égale ou non la vitesse du champ tournant, les machines sont dites respectivement synchrones ou asynchrones.

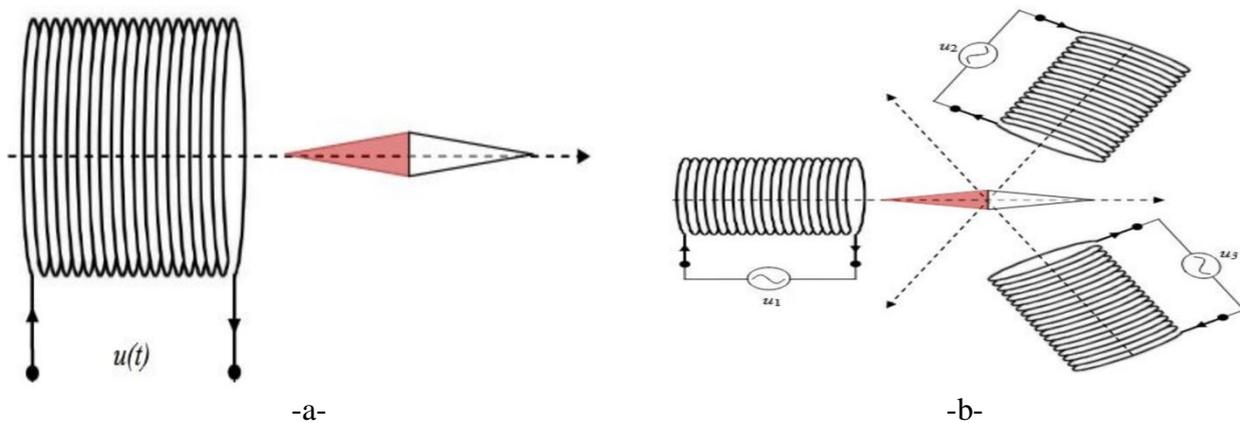


Figure IV.6. Action d'un champ magnétique sur une aiguille aimantée a-monophasé b-triphasé

IV.3.1. Machine électrique triphasée

La machine électrique triphasée est constituée d'un stator et d'un rotor mobile. Le stator possède trois enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tensions, il en résulte la création d'un champ magnétique dans l'entrefer de la machine. La machine électrique généralisée triphasée est une machine bipolaire triphasée idéale. La figure (IV.7) illustre la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique.

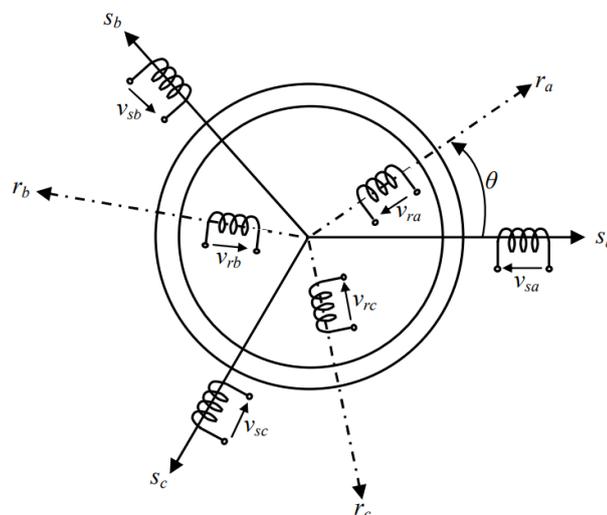


Figure IV.7. Représentation d'une machine à courant alternatif triphasée

IV.3.1.1. Equations des tensions :

Pour ce modèle, on peut écrire les équations des tensions représentant pour chaque enroulement la somme de la chute ohmique et la chute inductive liée au flux.

- Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_r I_{rb} + \frac{d\psi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s I_{rc} + \frac{d\psi_{sc}}{dt} \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

- Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r I_{ra} + \frac{d\psi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r I_{rb} + \frac{d\psi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r I_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt} \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

Où

- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} et V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : Les tensions simples triphasées, respectivement, au stator et au rotor de la machine ;
- I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} et I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Les courants au stator et au rotor de la machine ;
- $\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}$ et $\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}$: Les flux circulants, respectivement, au stator et au rotor de la machine
- R_s et R_r : Les résistances des enroulements statorique et rotorique.

IV.3.2. Glissement

Le glissement (g en %).représente la différence entre la vitesse du champ magnétique tournant appelée communément vitesse de synchronisme (n_s) et celle du rotor (n_n) est appelée de vitesse de rotation entre l'arbre du moteur et le champ tournant du stator; et puisque Le couple électromagnétique ne peut subsister que si et seulement si un courant induit circule dans les spires avec la présence de flux magnétique, il s'exprime par la relation suivante :

$$g = \frac{(n_s - n_n)}{n_n} ; \% \dots\dots\dots(6)$$

IV.3.3. Vitesse de synchronisme

La vitesse de synchronisme, quant à elle, est fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$n_s = \frac{60 \times f}{p} ; \text{ tr/min} \dots\dots\dots(7)$$

Où

n_s : vitesse de synchronisme en tr/min

f : fréquence en Hz,

p : nombre de paires de pôles,

IV.3.4. Machines synchrones

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique inducteur est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation.

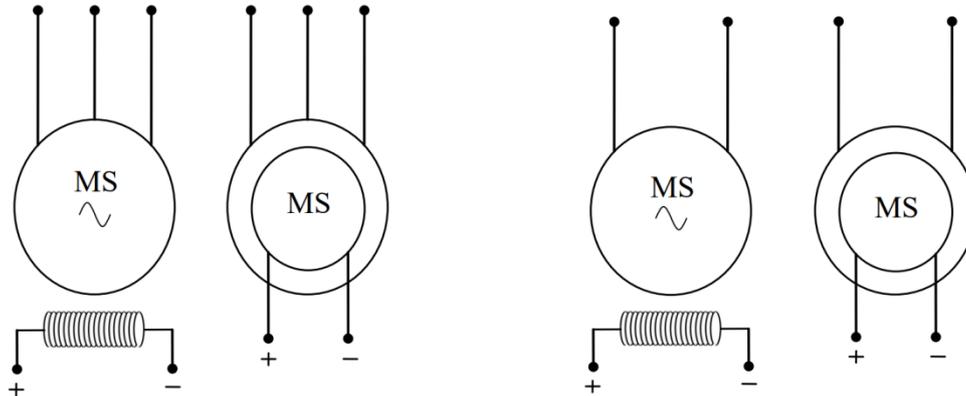


Figure IV.8. Symboles électriques de la machine synchrone

Les machines synchrones sont plus souvent utilisées en générateur, elle est constituée de deux circuits indépendants

- Le bobinage d'excitation :** il est constitué d'un bobinage enroulé sur le rotor et traversé par le courant continu « d'excitation » I_e , qui permet la création des pôles magnétiques dits « rotoriques » et l'établissement d'un flux donné dans le circuit magnétique. Ce bobinage est parfois remplacé par des aimants permanents surtout dans le domaine des petites et moyennes puissances.
- Le circuit d'induit:** il est constitué des trois bobinages triphasés, de constitution symétrique, pratiqués sur le stator de façon répartie, et par lesquels transite la puissance électrique de la machine.

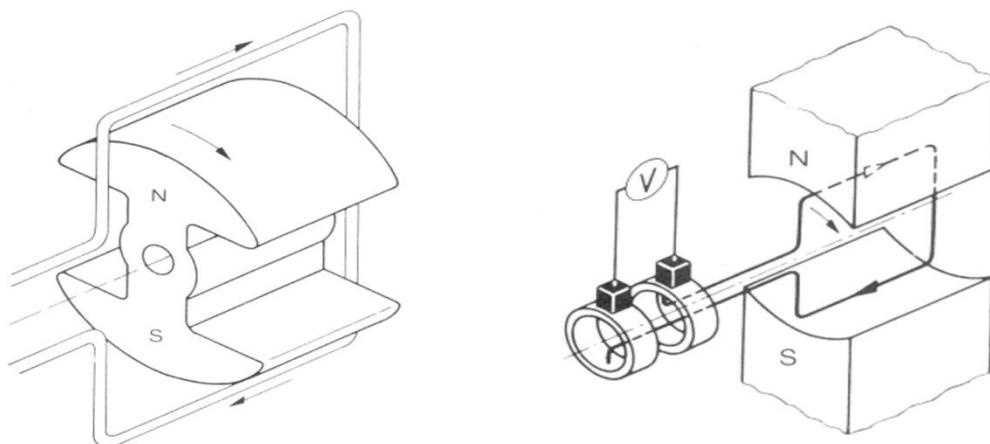


Figure IV.9. Principe de machine à induit fixe et de machine à inducteur fixe

IV.3.4.1. Fonctionnement en générateur

Pour produire l'énergie électrique, une force extérieure fait tourner le rotor. Les enroulements du rotor alimentés en courant continu créent une succession de pôles alternativement nord et sud. Son champ magnétique en tournant, induit une f.é.m. alternative dans les bobines du stator. La vitesse de ce champ tournant donc du rotor est appelée « vitesse de synchronisme »

IV.3.4.2. Bilan des puissances et rendement

Si la machine synchrone fonctionne alternateur elle reçoit une puissance mécanique de la turbine ou du moteur qui l’entraîne. Si elle est à excitation indépendante, le circuit inducteur reçoit une puissance de son alimentation continue .

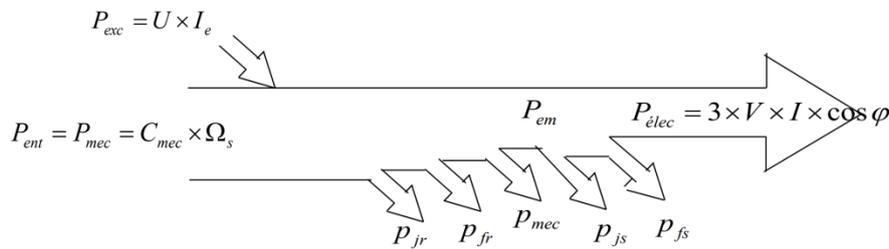


Figure IV.10. Diagramme de puissances d’un alternateur à excitation indépendante

Si elle fonctionne (moteur) elle reçoit une puissance électrique du réseau. S’il est à excitation indépendante, le circuit inducteur reçoit une puissance de son alimentation continue.

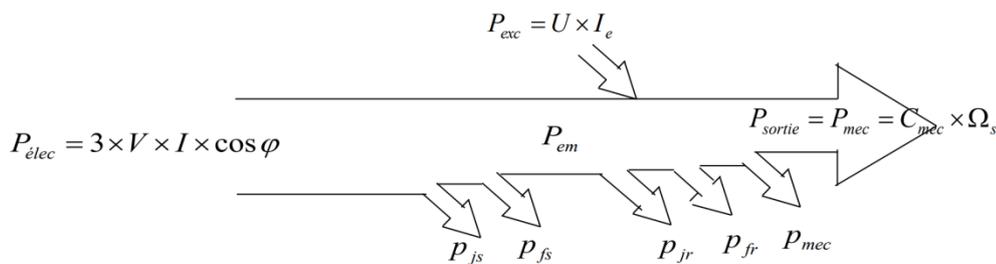
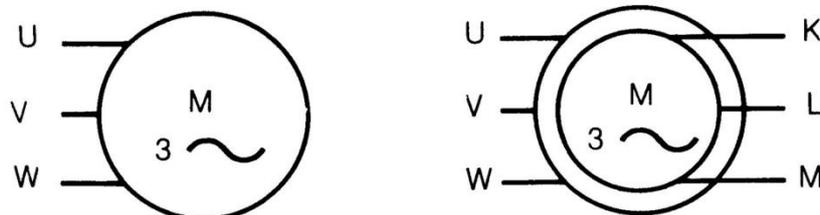


Figure IV.11. Diagramme de puissances d’un moteur à excitation indépendante

IV.5. Machines asynchrones

On appelle machine asynchrone une machine électrique à courant alternatif à deux enroulements dont un seul (primaire) est alimenté par un réseau électrique de pulsation constante ω_1 alors que le deuxième (secondaire) est fermé sur lui-même ou sur des résistances électriques. Les courants circulant dans l’enroulement secondaire résultent de l’induction électromagnétique. Leur pulsation ω_2 est fonction de la vitesse angulaire mécanique Ω du rotor, qui dépend à son tour du couple moteur appliqué à l’arbre de la machine.

Ces moteurs sont utilisés dans une large gamme d'application vu de leur efficacité et fiabilité. En plus ils ont une conception simple et disponible sur le marché, ce qui en fait l’un des premiers choix. On trouve leurs applications aussi biens abondantes que diversifiés, telles que les pompes, les compresseurs et les ventilateurs, et les presses en raison de leur rendement élevé.



(a) moteur asynchrone à cage d’écureuil.

(b) Symbole du moteur à rotor bobiné.

Figure IV.12. Symboles du moteur asynchrone.

IV.5.1. Constitution

La construction d'une machine asynchrone à rotor en court-circuit est représentée par la figure suivante dans ses plus grandes lignes elle coïncide avec la construction type d'une machine électrique tournante.

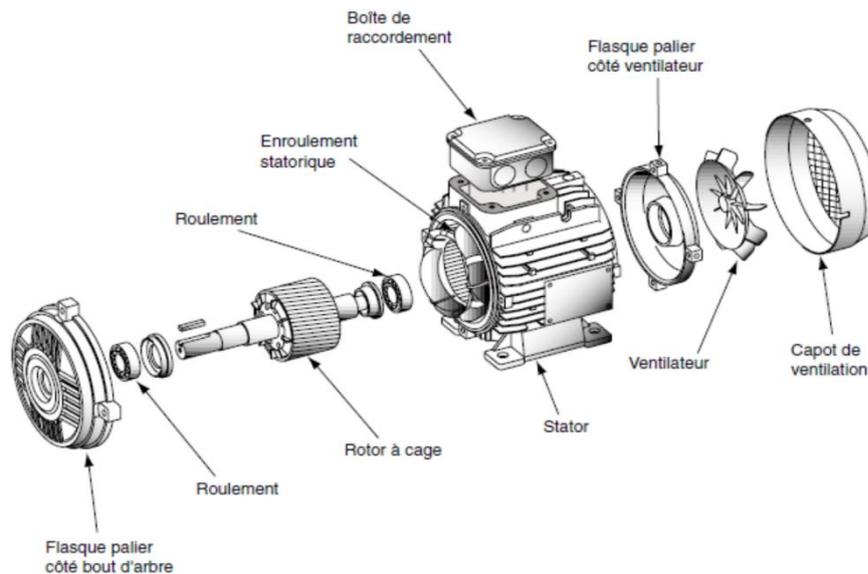


Figure IV.13. Machine asynchrone à rotor à cage

Une machine asynchrone comprend généralement :

- a. un stator triphasé comportant p paires de pôles par phase, identique à celui d'une machine synchrone. Deux couplages sont possibles : Etoile (Y) qui impose une tension simple à chaque enroulement ou triangle (D) qui impose une tension composée à chaque enroulement

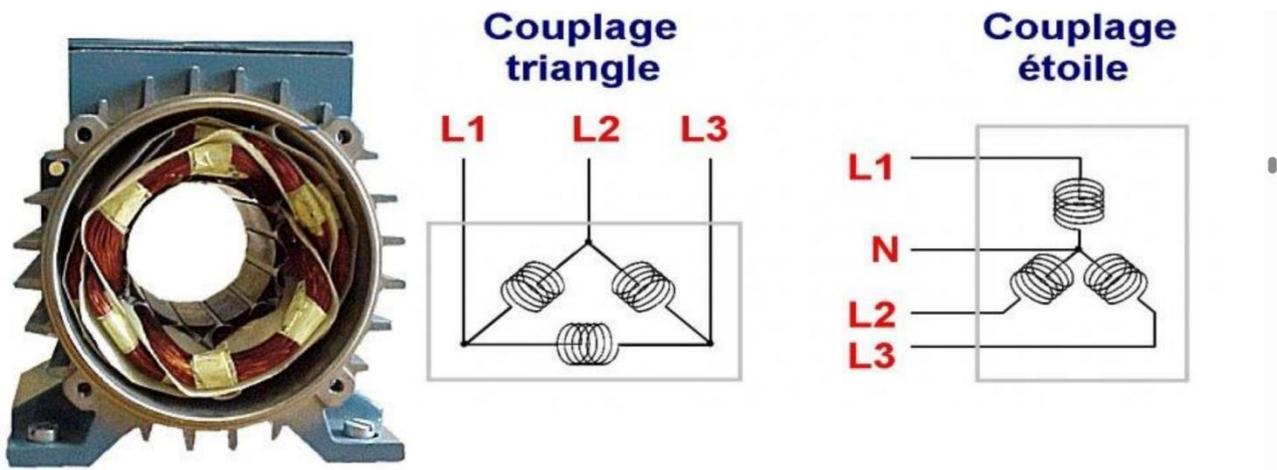


Figure IV.14. Stator d'un moteur asynchrone

- b. Un rotor est constitué de conducteurs mis en circuit fermé. On distingue deux types de rotor ; le rotor bobiné le Rotor à cage, l'enroulement du premier type semblable à celui du stator, comporte p paires de pôles par phase ; les trois paires sont reliées à trois bagues qui permettent d'insérer un rhéostat dans le circuit du rotor, tandis que le deuxième type constitué de barreaux de cuivre ou d'aluminium reliés aux deux extrémités par deux couronnes conductrices (en forme de cage d'écureuil)

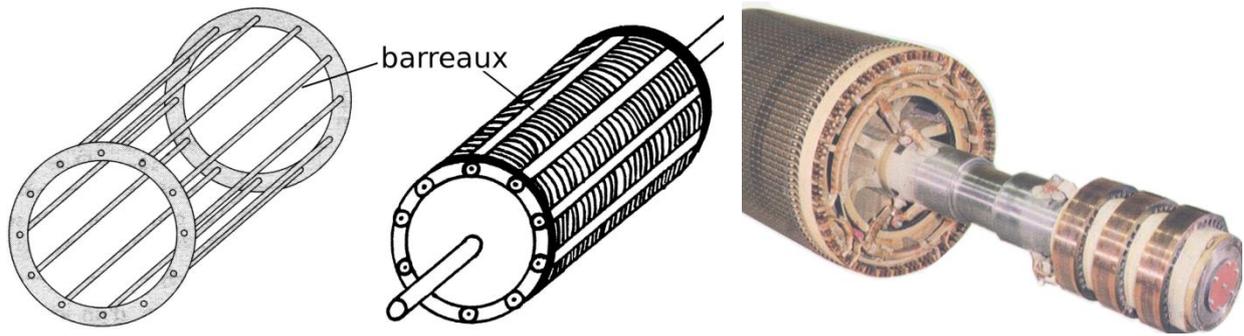


Figure IV.15. Machine asynchrone à rotor à cage et à rotor bobiné.

IV.5.2. Principes de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des MAS est basé sur l'alimentation du stator par un réseau de fréquence f , et par conséquent crée un champ tournant B_s de vitesse n_s . L'enroulement rotorique est balayé par le champ tournant créé par l'enroulement triphasé du stator, comme les circuits rotoriques sont fermés, des courants rotoriques prennent naissance. D'après la loi de Lenz, ces courants s'opposent à la cause qui les a donnée naissance. En effet, plus le rotor accélère, plus sa vitesse relative par rapport au champ tournant devient réduite.

IV.5.3. Bilan de puissance

On peut regrouper sur un diagramme les diverses pertes de puissance active du moteur :

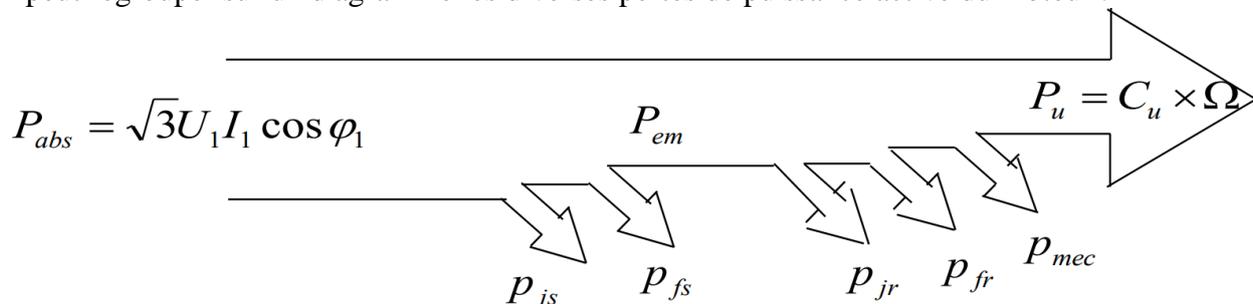


Figure IV.15. Diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone.

IV.5.4. Exercice (machine synchrone)

On considère un alternateur triphasé, à excitation constante, entraîné par une turbine. Cet alternateur tourne à vide à la vitesse $N = 1\,500$ tr/min et délivre alors un système de tensions triphasées de tension simple $V_0 = 230$ V et de fréquence 50 Hz. La résistance d'un bobinage du stator est connue : $R = 1 \, \Omega$

- 1) Calculer le nombre de pôles de l'alternateur.
- 2) On connecte sur cet alternateur une charge équilibrée résistive consommant une puissance $P = 2$ kW. La tension aux bornes des charges chute alors à la valeur $V = 220$ V. Calculer la valeur du courant de ligne circulant sur chaque phase.
- 3) Calculer la valeur de la puissance fournie par la turbine et le rendement de l'alternateur.
- 4) La turbine fournit, pour cette puissance un couple moteur : $C_m = 13,3$ Nm. Calculer alors la vitesse de rotation du moteur. En déduire la pulsation et la fréquence des tensions et des courants produits. Ces résultats sont-ils normaux ?

Correction d'exercice

En utilisant la formule $N=60f/p$, on trouve : $p = 2$, c'est-à-dire que l'alternateur possède quatre pôles

- 2) Une charge résistive présente un facteur de puissance unitaire. On écrit donc : $P = 3 \cdot V \cdot I$

$$\text{Soit donc : } I = \frac{P}{3 \cdot V} = \frac{2000}{3 \times 220} = 3 \text{ A}$$

3) La puissance fournie par la turbine se déduit facilement d'un bilan de puissances, sachant que la puissance perdue dans les trois résistances de phase s'écrit $3 \cdot R \cdot I^2$

$$P_{\text{turbine}} = P + 3 \times R \times I^2 = 2027 \text{ W}$$

Le rendement de l'alternateur se calcule alors directement: $\eta = \frac{P}{P_{\text{turbine}}} = \frac{2000}{2027} = 98\%$

4) On écrit $P_{\text{turbine}} = C_m \times \Omega$ c'est-à-dire : $\Omega = \frac{P_{\text{turbine}}}{C_m} = 152,4 \text{ rad/s}$

IV.5.5. Exercice (machine asynchrone)

Dans ce problème, on envisage l'utilisation d'une machine asynchrone triphasée pour l'entraînement d'un tapis roulant de type « escalator ». Après avoir déterminé la gamme de puissance nécessaire et le type de la machine, on souhaite déterminer ses performances dans plusieurs conditions de charge. Dans tout le problème, la machine sera considérée comme alimentée sous tension et fréquence constantes.

Le choix de la machine s'est porté sur un modèle dont on présente les données du constructeur dans le tableau 6.2 :

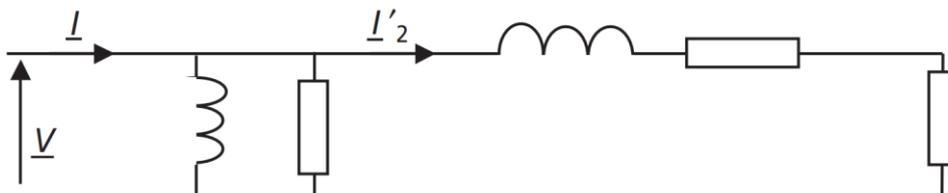
Puissance mécanique nominale : $P_n = 22 \text{ kW}$	Vitesse nominale : $N_n = 1445 \text{ tr/min}$	Tensions : 230 V Δ / 400 V Y
Intensité nominale : $I_n = 43,5 \text{ A}$	Facteur de puissance 4/4 : $\cos \phi_n = 0,83$	Rendement 4/4 : $\eta = 88 \%$
Puissance électrique à vide : $P_0 = 1,2 \text{ kW}$	Courant à vide : $I_0 = 4,34 \text{ A}$	Courant de démarrage : $I_D = 6,5 \cdot I_n$

Dans toute la suite du problème, on s'intéresse au fonctionnement de la machine en régime permanent et sous tension nominale.

1) Quelle est la valeur de la vitesse de synchronisme Ω_s (rad/s) de cette machine ? Préciser alors le nombre de pôles qu'elle présente.

2) Quel est l'expression du glissement g de la machine en fonction de la vitesse Ω_r du rotor ? Calculer alors la valeur du glissement nominal : g_n .

3) On représente sur la figure ci dessous le schéma monophasé équivalent de la machine.



Identifier sur ce schéma les éléments suivants : R_f la résistance équivalente aux pertes fer et mécaniques, L_m l'inductance magnétisante, L l'inductance de fuites ramenées au primaire, R_1 la résistance des enroulements du primaire et la résistance équivalente des enroulements secondaires ramenée au primaire.

Correction d'exercice

1) La vitesse de rotation du champ créé par des bobinages triphasés parcourus par des courants à 50 Hz s'exprime sous la forme suivante : $N = 60f/P$

P est le nombre de paires de pôles de la machine. Les valeurs de cette vitesse, dite de synchronisme,

sont donc de 3 000 tr/min ou 1 500 tr/min ou 750 tr/min, etc.

La vitesse nominale du rotor d'une machine asynchrone, elle, est toujours légèrement inférieure à sa vitesse de synchronisme. Ici, la vitesse nominale vaut 1 445 tr/min, la vitesse de synchronisme est donc de 1 500 tr/min.

La vitesse angulaire associée s'écrit donc : $Q_s = \frac{2\pi \times 1500}{60} = 157 \text{ rad/s}$

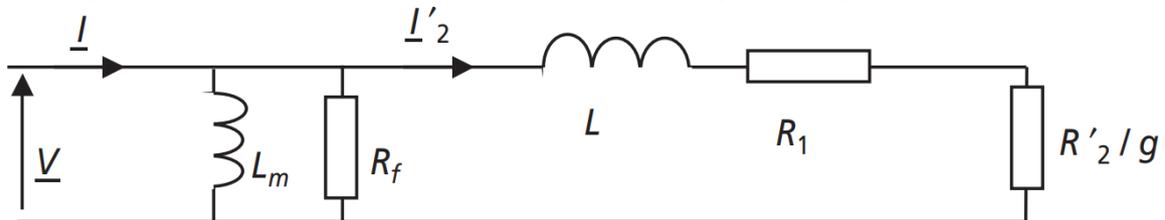
2) Le glissement de la machine à la vitesse rotorique Ω_r est défini comme :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Le glissement nominal vaut donc :

$$g = \frac{1500 - 1445}{1500} = 0.036$$

3) On représente sur la ci-dessous le schéma équivalent monophasé complété.



La résistance équivalente des pertes fer ainsi que l'inductance magnétisante sont les éléments classiques dus au fait que le stator de la machine est équivalent à un primaire de transformateur. La résistance représente la résistance équivalente des conducteurs du rotor ramenée au primaire. La présence du glissement dans cette expression provient du fait que la fréquence des courants secondaires est $g f$. L'écriture de l'équation de maille au secondaire permet facilement d'établir cette écriture.

BIBLIOGRAPHIE

1. Dr Mehdi Metaiche , Forage techniques et procedes ; polycopie de cours, Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées, Université de Bouira, Octobre 2013 ;
2. Khochemane L, optimisation des parametres des machine de forage a molettes – dans les conditions de la carriere de ouenza- Thèse de Doctorat d'Etat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2006.
3. John Finger and Doug Blankenship , Handbook of Best Practices for Geothermal Drilling, SANDIA REPORT, 2010.
4. ASSENOV. I, OUADI. M (03/1993). Machines minières « partie I, machines de forage) ». Office des publications universitaires.
5. SME Mining Engineering Handbook, 2011, 3rd edition, Society for Mining Metallurgy and Exploration, USA, pp 1846. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)90412-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)90412-4).
6. K N Mudianga. , Cours d'exploitation des mines à ciel ouvert ; Universite DE Lubumbashi Faculte Polytechnique Departement Des Mines.
7. Mario Robillard ; Équipements et méthodes de construction ; polycopie de cours travaux de génie civil ; École de technologie supérieure ; canada ; 2015.
8. A BOUKADOUM, Support de Cours Réseaux Electriques, UNIVERSITE ECHAHID CHEIKH LARBI TEBESSI – TÉBESSA, 2021.
9. G Mienville. J Grellety ; l'electrification au fond des mines. principe et exemples concrets, Compagnie Générale des Matières Nucléaires I4COGEMA), 1985 - Mortagne-sur-Sevre (FR). Div. Minière de Vendé.
10. A. IVANOV-SMOLENSKI Machines électriques Volume I ÉDITIONS MIR • MOSCOU Traduction française Editions Mir 1983.
11. J. Châtelain, ''Machines Electriques'', Traité d'Electricité, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Éditions Georgi, 1983.
12. A. Fouillé, ''Électrotechnique à l'usage des ingénieurs : Machines électriques'', Tome II, Édition Dunod, 1957.
13. Richard T. Smith, Analysis of Electrical Machines, Book • 1982, <https://doi.org/10.1016/C2013-0-06003-3>.
14. J. Hindmarsh, Electrical Machines and their Applications, Volume 1 in Applied Electricity and Electronics ; Book Fourth Edition 1984.
15. Pierre MAYÈ : Moteurs électriques industriels. Dunod, 2005.
16. Jean-Pierre CARON et Jean-Paul HAUTIER : Modélisation et commande de la machine asynchrone. Éditions Technip, 1995.
17. L. BAGHLI, Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone, Notes de cours, 2020 Université de Tlemcen – FT.
18. Luc Lasne, Exercices et problèmes d'électrotechnique Notions de base, réseaux et machines électriques, Dunod, Paris, 2005.
19. J Hindmarsh, Electrical Machines & Drives, Worked Examples Book ; Fourth Edition 1985.

20. C Chevassu. Machines électriques ; Cours et Problèmes, 2012