

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2024



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electromécanique

Spécialité: Electromécanique

Par: Boulekhra zakaria et Bouneb bilal

Thème

Elaboration d'un système expert pour le choix rationnel des machines électriques

Soutenu publiquement, le 22/06/2024, devant le jury composé de:

M/ Moussaoui Abdelkrim	Professeur	Univ. Guelma	Président
M/ Moussaoui Abdelkrim	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
M/ Ould Lahoucine	Professeur	Univ. Guelma	Examinateur
M/ Mendaci Sofiane	Professeur	Univ. Guelma	Examinateur
M/ Touahri Abdelwahab	MCB	Univ. Guelma	Examinateur

Année Universitaire: 2023/2024

Table des Matières

	Page
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : CRITERS DE CHOIX D'UN MOTEUR ELECTRIQUE	3
1.1. GENERALITES	3
1.2. STRUCTURE D'ENTRAINEMENT ELECTRIQUE	4
1.3. ENTRAINEMENTS PAR MOTEURS A COURANT ALTERNATIF	6
1.4. SYSTEME DE COMMANDE	7
1.5. ELEMENTS A PRENDRE EN COMPTE POUR CHOIX RATIONNEL D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE ET SON MODE DE DEMARRAGE	8
1.6. INDICE DE PROTECTION	11
1.7. INDICE DE PROTECTION IP	14
1.8. TYPE DE SERVICE	17
1.9. DETERMINATION DU MODE DE FIXATION	18
1.10. EXECUTION CLIMATIQUE	19
1.11. DETERMINATION DE LA CLASSE DES ISOLANTS	20
1.12. LES DIFFERENTS MODES DE DEMARRAGES	21
CHAPITRE 2 : LES SYSTEMES EXPERTS	24
2.1. GENERALITE SUR LES SYSTEMES EXPERTS	24
2.2. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SE	24
2.3. APPORT D'UN SYSTEME EXPERT	26
2.4. PHASES DE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME EXPERT	27
2.5. METHODOLOGIE ET OUTILS DE CONSTRUCTION D'UN SE (LES DIFFERENTS ACTEURS)	27
2.6. OUTILS DE CONSTRUCTION DES SYSTEMES EXPERTS	28
2.7. DESCRIPTION DU LOGICIEL VP-EXPERT	28
2.8. L'AQUISITION DE LA CONNAISSANCE	30
2.9. L'INTERFACE UTILISATEUR	30
2.10. LE RAISONNEMENT EXPLIQUE	30
2.11. CARACTERISTIQUES DE VP-EXPERT	31
CHAPITRE 3 : EXEMPLE D'APPLICATION	32
3.1. DESCRIPTION DE LA MACHINE ENTRAINEE	32
3.2. CALCUL DU COUPLE RESISTANT	33
3.3. CHOIX PRELIMINAIRE DU MOTEUR	34
3.4. CALCUL DU MOMENT D'INERTIE TOTAL	35
3.5. CALCUL DU COUPLE MAXIMAL DEMANDE	35
3.6. ELABORATION DU SYSTEME D'AIDE A LA DECISION	36
CONCLUSION GENERALE	39
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXE	

INTRODUCTION GENERALE

Un choix non rationnel des installations électriques mène à des coûts d'investissements et d'exploitations, injustifiés et aussi les pertes dans le réseau électrique de transport provoquant une consommation [KWh/unité de production] supérieure aux normes.

Par conséquent l'optimisation du choix et du fonctionnement des installations de industrielles est plus que souhaité.

Il est à noter que dans de nombreuses installations industrielles, les moteurs asynchrones représentent 80% des moteurs électriques utilisés.

Ils représentent une part importante de la puissance installée et de l'énergie consommée. D'où l'importance qui doit être attribuée au choix judicieux de ces moteurs.

Les critères principaux de choix du moteur asynchrone doivent permettre que celui-ci soit capable grâce à ces caractéristiques propres et à son équipement de commande et de contrôle d'assurer la fonction qui lui est demandée dans les conditions de travail imposées. En d'autres termes, ce moteur électrique doit complètement satisfaire aux exigences du processus technologiques et correspondre aux conditions de son environnement.

Il s'agira donc de répondre aux besoins de l'installation : les données imposées propres ou extérieures à celle-ci.

En effet, avec le développement de la puissance de calculs, l'utilisateur se voit mettre à disposition un outil qui lui permet de traiter des problèmes sur lesquels il butait.

Ces problèmes sont ceux qui nécessitent pour leurs résolutions un nombre très élevé de combinaisons et pour lesquels, il n'existe pas d'algorithme de résolution.

La machine doit être munie de logiciels plus ou moins élaborés pour simuler notre manière de résoudre ces problèmes (traitement de connaissances). C'est de là qu'est né le concept "de systèmes experts".

Le choix des moteurs asynchrones triphasés est un problème non algorithmique et l'utilisation traditionnelle de l'ordinateur ne permet pas de le résoudre. La clé pour la solution de ce problème consiste dans l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle et surtout les systèmes experts.

Le système expert a pour but de modéliser le comportement d'un expert humain accomplissant une tâche intellectuelle dans un domaine précis.

Aujourd'hui les systèmes experts ont prouvé leur efficacité d'une part dans le domaine de résolution des problèmes se basant complètement ou partiellement sur l'expérience (connaissances heuristiques) et d'autre part dans le domaine d'aide à la décision.

L'expérience existante sur le choix des moteurs asynchrones sera rassemblée et formalisée d'une manière claire ce qui permettra d'atteindre les objectifs suivants :

- 1- Acquérir, systématiser, et formaliser les connaissances sur le choix.
- 2- Fournir une aide au choix avec l'efficacité d'un spécialiste du domaine.
- 3- Transférer le savoir-faire des experts du domaine a l'utilisateur (diffusion de la Connaissance).
- 4- Réaliser un système expert ouvert qui peut être enrichi par les spécialistes du Domaine.

Pour résoudre le problème non algorithmique qui concerne le choix rationnel des moteurs asynchrones, nous avons jugé nécessaire d'utiliser les techniques de l'intelligence artificielle et dans notre cas les systèmes experts.

CHAPITRE 1: CRITERES DE CHOIX D'UN MOTEUR ELECTRIQUE

1.1- GENERALITES:

Il existe une gamme assez étendue de moteurs électriques, qui diffèrent entre eux par leurs modes de fonctionnement et leurs constituants. Ceux-ci ont été conçus et mis au point pour faire face aux nombreux besoins industriels et domestiques inhérents aux développements de la civilisation moderne.

L'entraînement des machines électriques est un domaine crucial de l'ingénierie électrique qui concerne la conversion d'énergie électrique en mouvement mécanique. Ce processus est essentiel dans de nombreuses applications industrielles, allant des systèmes de propulsion dans les transports aux machines-outils dans les processus de fabrication.

Le champ d'application balayé par les entraînements électriques ne cesse de s'étendre de jour en jour. On les trouve actuellement dans tous les domaines de l'industrie, dans les centrales électriques ainsi que dans les systèmes de transport et de manutention. Dans les pays développés, plus de 60% de l'énergie électrique produite est consommé et transformé en énergie mécanique par des entraînements électriques.

En outre, la plupart des applications sont accompagnées de conditions impératives d'utilisation d'ordre techniques, économiques ou technologiques qui renseignent beaucoup sur les types de moteurs entre lesquels un choix reste à faire.

Pour servir d'exemples, on peut citer :

* Le cas où on a une charge qui doit être entraînée à une vitesse strictement constante, il semble logique d'employer un moteur synchrone. Ce moteur a un excellent facteur de puissance et peut même fournir de l'énergie réactive, il est d'autre part beaucoup plus cher qu'un moteur asynchrone.

* Lorsqu'une charge doit être entraînée à une vitesse pratiquement variable, ce qui est le cas pour les problèmes industriels (ventilation, broyage, etc...), on utilise des moteurs asynchrones.

Le moteur asynchrone à cage est plus robuste que le moteur à rotor bobiné et le prix en est inférieur aussi le préfère-t-on dans tous les cas où on n'a pas de contraintes particulières pour le démarrage.

Lorsqu'une charge doit être entraînée à une vitesse pratiquement constante, mais qu'on désire la modifier selon les besoins de l'exploitation, on peut utiliser un moteur à C.C à excitation séparée ou parallèle, mais ce moteur présente des inconvénients dont les plus importants sont :

1- La nécessité d'utilisation dans les conditions industrielles de dispositifs de conversion du courant alternatif en continu, contrairement aux moteurs asynchrones qui ont l'avantage d'être directement relié au réseau.

2- Vérification quotidienne des balais.

3- Problèmes de commutation, caractérisés par des étincelles qui influent sur l'état du collecteur

4- Le prix trop élevé.

5- Masse plus importante pour la même puissance, etc.

Le moteur synchrone aussi possède un certain nombre d'inconvénients.

- Dispositif à installer pour son démarrage et excitatrice pour son fonctionnement, il risque de décrocher et ne peut démarrer qu'à faible charge.

En revanche, le moteur asynchrone est peu coûteux, on le fabrique en grande série, il est robuste, son fonctionnement ne génère pas d'étincelles à la différence d'un moteur à courant continu. C'est pour cela qu'il est le plus utilisé dans l'industrie pour profiter au maximum de ces qualités fondamentales de prix, et de robustesse. Il est fait appel à l'électronique de puissance pour apporter ce qui lui manque lorsqu'il est utilisé seul sur un réseau triphasé : la variation de vitesse.

1.2-STRUCTURE D'ENTRAÎNEMENT ELECTRIQUE

Un entraînement électrique est un système électromécanique destiné à réaliser un processus technologique grâce au mouvement d'un organe de travail. Il est constitué d'un moteur électrique, alimenté par un convertisseur statique ou une génératrice, d'un système de commande et d'une charge (**Figure 1.1**).

1.2.1. Moteur électrique : C'est l'élément central de l'entraînement électrique. Il convertit l'énergie électrique en énergie mécanique pour effectuer un travail spécifique. Le moteur peut être de différents types en fonction des besoins de l'application.

1.2.2. Convertisseur statique: Ce composant est responsable de fournir l'alimentation électrique au moteur. Selon les besoins, il peut s'agir d'un convertisseur statique qui transforme l'électricité de la source d'alimentation en un format approprié pour le moteur.

1.2.3. Système de commande : Le système de commande contrôle le fonctionnement du moteur électrique en régulant la vitesse, le couple ou d'autres paramètres selon les besoins de l'application. Il peut inclure des dispositifs de commande électroniques, des capteurs de rétroaction et des algorithmes de contrôle.

1.2.4. Charge : La charge représente le processus technologique que l'entraînement électrique est destiné à réaliser. Cela peut être une machine-outil, un convoyeur, une pompe, etc., selon l'application spécifique.

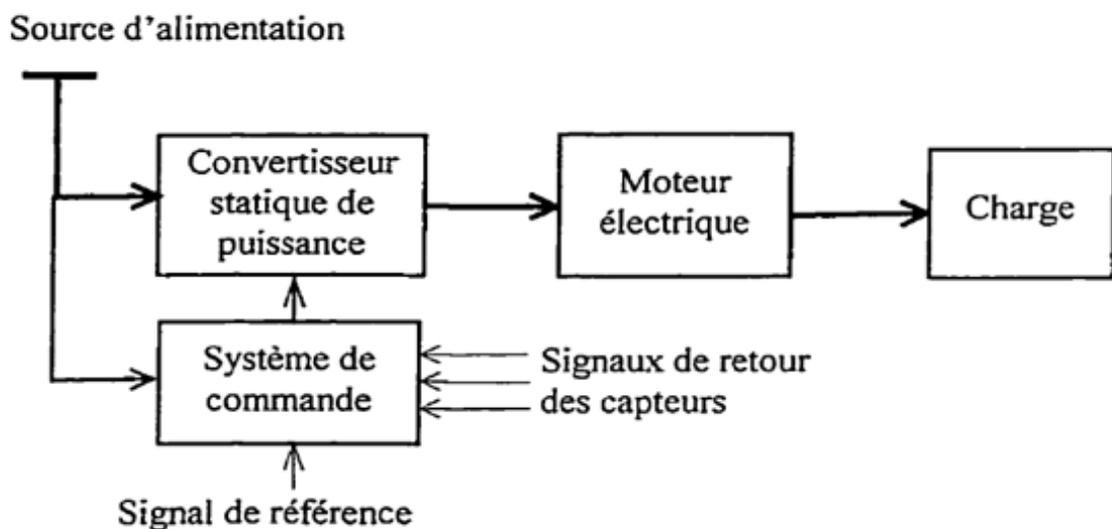


Figure 1.1. Structure d'un entraînement électrique

La puissance électrique fournie par la source d'alimentation (réseau électrique ou système autonome) au convertisseur de puissance, est transformée en puissance électrique réglable. Cette dernière est transformée en puissance électromagnétique et mécanique par le moteur. Le moteur est en fait un convertisseur électromécanique dont le rotor peut être associé à la partie mécanique de l'entraînement électrique. La puissance mécanique à l'arbre du moteur est transmise à la charge par l'intermédiaire d'un convertisseur mécanique. Le système de commande peut varier d'un simple bouton poussoir à un ordinateur de commande. En général, il élabore les signaux de commande des semi-conducteurs du convertisseur statique, à partir des consignes de pilotage du procédé et des mesures de tension, courant, vitesse, couple, accélération, ... fournies par les divers capteurs placés à l'entrée et à la sortie du convertisseur et sur l'arbre du moteur. Le convertisseur statique, alimenté par le réseau industriel, transforme la présentation de l'énergie électrique pour lui donner la forme désirée (tension, courant, fréquence). En d'autres mots, il régule le flux de puissance nécessaire au moteur de façon à obtenir les performances dynamiques désirées.

Bien que ne constituant pas la majorité, les entraînements à vitesse variable constituent la classe d'entraînements qui a le plus attiré l'attention des chercheurs au cours des dernières années. Ils présentent les avantages suivants liés à la variation de leur vitesse :

Les entraînements à vitesse variable ont en effet suscité un intérêt considérable ces dernières années en raison de leurs avantages significatifs. Voici quelques-uns de ces avantages :

Économies d'énergie : En ajustant la vitesse du moteur en fonction des besoins de la charge, les entraînements à vitesse variable peuvent réduire la consommation d'énergie en évitant le fonctionnement à pleine vitesse lorsque ce n'est pas nécessaire.

Contrôle précis du processus : La capacité à varier la vitesse du moteur permet un contrôle plus précis du processus, ce qui peut améliorer la qualité de la production et la performance globale du système.

Réduction de l'usure et de la fatigue des équipements : En optimisant la vitesse de fonctionnement, les entraînements à vitesse variable peuvent réduire l'usure et la fatigue des équipements, prolongeant ainsi leur durée de vie utile.

Adaptabilité aux changements de charge : Les entraînements à vitesse variable peuvent ajuster leur vitesse en temps réel pour s'adapter aux variations de charge, ce qui les rend particulièrement adaptés aux applications où la charge varie fréquemment.

Meilleure efficacité du système : En optimisant la vitesse de fonctionnement, les entraînements à vitesse variable peuvent améliorer l'efficacité globale du système, réduisant ainsi les coûts d'exploitation.

Réduction des pics de courant : En démarrant à basse vitesse et en accélérant progressivement, les entraînements à vitesse variable peuvent réduire les pics de courant au démarrage, ce qui peut être avantageux pour le réseau électrique et les autres équipements connectés.

En combinant ces avantages, les entraînements à vitesse variable offrent une solution flexible et efficace pour une large gamme d'applications industrielles et commerciales.

1.3. ENTRAINEMENTS PAR MOTEURS A COURANT ALTERNATIF

Les moteurs triphasés à vitesse variable sont alimentés pour la plupart par des convertisseurs indirects et parfois par des cyclo-convertisseurs ou des gradateurs triphasés; les grandeurs fixant la vitesse de rotation, telles que la fréquence et la tension, étant susceptibles d'un réglage progressif. Ce mode d'alimentation a aussi pour conséquence que les tensions et courants parvenant au moteur triphasé s'écartent de la forme d'onde sinusoïdale et occasionnent ainsi un supplément de sollicitations ainsi qu'une modification des caractéristiques de fonctionnement.

1.3.1- Moteurs asynchrones à cage

Le moteur asynchrone triphasé à cage est le plus connu. Il s'est imposé grâce à sa robustesse, sa simplicité de construction et sa facilité d'entretien. Il est destiné en premier lieu aux entraînements à vitesse unique. Ces moteurs possèdent une inductance de fuite relativement élevée pour la limitation du courant d'appel à l'enclenchement. Afin d'obtenir un couple de décollage suffisant, les rotors sont dimensionnés de manière à obtenir une grande inégalité de la distribution du courant dans la section des barres. Chacune de ces deux propriétés essentielles d'un moteur à cage normal se répercute d'une façon différente suivant le type de convertisseur statique utilisé pour l'alimentation.

1.3.2- Moteurs asynchrones à bagues

Dans ce cas, la variation de la vitesse est obtenue soit par une cascade hyposynchrone dans le circuit rotorique soit par un gradateur triphasé dans l'alimentation du moteur. Pour le montage avec cascade hyposynchrone, l'onduleur oppose une contre-tension qui impose une vitesse de rotation telle que la tension induite dans le rotor s'équilibre avec cette contre-tension. La variation de vitesse s'obtient donc en faisant varier la contre-tension et donc l'angle de conduction des thyristors de l'onduleur. La puissance de glissement est récupérée et restituée au réseau par la cascade.

Le grand avantage de ce type d'entraînement réside dans le dimensionnement du convertisseur, qui ne doit être prévu que pour la puissance de glissement, c'est à dire plus la plage de variation sera petite, plus la puissance et le coût du convertisseur seront faibles. La présence du convertisseur statique dans le circuit rotorique impose une forme d'onde du courant rotorique non sinusoïdale. Il en résulte des pertes supplémentaires dues aux harmoniques qui exigent l'utilisation à couple réduit par rapport à sa valeur nominale.

1.4. SYSTEME DE COMMANDE

La commande d'un entraînement doit assumer quatre tâches essentielles :

- piloter la grandeur réglée (vitesse, couple par exemple) conformément au problème technologique d'entraînement à résoudre
- supprimer les influences perturbatrices sur la grandeur réglée, dues aux variations de charge sur l'arbre d'entraînement ou aux fluctuations de la tension du réseau

- ▶ respecter certaines grandeurs d'exploitation (flux, courant par exemple) afin d'assurer une utilisation optimale du moteur et du variateur
- ▶ éviter les sollicitations inadmissibles de tous les constituants de l'entraînement par des interventions limitatrices (limitation du courant par exemple).

Les entraînements simples de pompes et de ventilateurs par exemple sont classés parmi ceux exigeant une moindre qualité de régulation. Ils ne fonctionnent généralement que dans un sens de rotation et sans freinage (fonctionnement dans un seul quadrant). Il revient à la régulation de maintenir constante la vitesse de rotation. La dynamique et la précision n'étant pas des paramètres de première importance.

1.5. ELEMENTS A PRENDRE EN COMPTE POUR CHOIX RATIONNEL D'UN MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE ET SON MODE DE DEMARRAGE :

Il est nécessaire que le moteur asynchrone soit fiable avec le minimum d'investissements et le minimum de frais d'exploitation, cela se réalise seulement, si le moteur choisi et son démarrage prennent en compte les éléments suivants qui seront détaillés dans ce chapitre :

- 1- Machine entraînée.
- 2- Alimentation électrique.
- 3- Elément de choix du moteur.
- 4- Choix du type rotor et les éléments du choix du démarreur.

1.5.1- Machine entraînée:

Le rôle d'un moteur étant de servir à l'entraînement d'un appareil donné qui peut être par exemple un ventilateur, une pompe, une fraiseuse, etc. On conçoit aisément que la connaissance approximative, des caractéristiques de ce dernier est nécessaire.

Les données fondamentales caractérisant la machine entraînée, nécessaires pour rendre optimal le bon choix du moteur asynchrone sont comme suit :

- Moment de giration MD^2 (Moment cinétique).
- Couple résistant C_r .
- Puissance nominale d'entraînement P_n .
- Fréquence de rotation "n".
- Position de l'axe "B" ou "V".

- Types de service "S".
- Conditions d'utilisation (température, altitude, local, ..).

1.5.1.1 - Moment de giration MD^2 :

Conditions de mise en route s'expriment surtout en fonction de l'inertie de la machine donnée par MD^2 .

$$C_m - C_r = J_\varepsilon \cdot \frac{dw}{dt} \qquad J_\varepsilon = J_{mot} + J_{mecanisme}$$

La partie droite de cette équation $J_\varepsilon \cdot \frac{dw}{dt}$ est appelée le couple dynamique on admet

que le moment d'inertie « J_ε » reste constant.

$$J_{mec} = M \rho^2 = \frac{MD^2}{4}$$

D'après cette équation, il est à noter que si le fabricant de la machine a entraînée ne donne pas le moment de giration, ce dernier peut être obtenu en multipliant 4 fois le moment d'inertie (J_{mec})

MD^2 : moment de giration [Kg.m²].

J_{mec} : moment d'inertie du mécanisme.

Notons que : MD^2 faible -----> masse faible à mettre en mouvement.

MD^2 élevée -----> volant d'inertie.

1.5.1.2. Couple résistant:

Nous appelons "charge mécanique" l'ensemble des organes entraînés par l'arbre du moteur. La charge est caractérisée principalement par le couple résistant qu'elle oppose à son entraînement. Ce couple que nous désignerons par "Cr" est fonction d'un certain nombre de paramètres dont les principaux sont la vitesse et le temps.

Nous pouvons distinguer 3 grandes catégories de couples **résistants** :

- * Parabolique
- * Hyperbolique
- * Constant

a/- Couple résistant constant: Le couple résistant constant ne dépend pas de la vitesse (exp: les engins de levage, certaines machines d'imprimeries).

b/- couple résistant parabolique: On appelle ces caractéristiques, les caractéristiques ventilateurs, se sont toutes les machines hydrauliques centrifuges c.-à-d. le couple résistant varie comme le carrée de la vitesse.

c/- couple résistant hyperbolique : Le couple résistant est inversement proportionnel à la vitesse. Exp: machines-outils sans réglage mécanique de la vitesse.

Il est nécessaire de connaître que pour un couple résistant donné, le démarrage du moteur ne peut s'effectuer que si, à chaque instant de la montée en vitesse, la courbe du couple moteur et au-dessus de celle du couple résistant.

1.5.1.3. - Puissance nominal d'entrainement:

$$P = M \omega$$

P: puissance [Watt]

M: couple Moteur [Newton - mètres]

ω : vitesse angulaire en [rad/sec]

Ordre de grandeur de la puissance :

Petite : 7,5 ch environ.

Moyenne : 7,5 à 100 ch

Grande : 100 ch environ

Cette puissance est donnée généralement sur la plaque signalétique du mécanisme à entraîner. Mais dans le cas où il faut choisir et l'équipement et son moteur, il faudra la calculer.

1.5.1.4. Position de l'axe:

Il est important de préciser la position de l'axe de la machine entraînée pour pouvoir choisir celle du moteur asynchrone tout en désignant la position horizontale par "B", la position verticale par "V".

1.5.1.5. Fréquence de rotation :

La fréquence de rotation d'entraînement doit être proche de la fréquence de rotation nominale du moteur. Elle dépend de " f " et du nombre de paires de pôles "p"

$$N = (60 f / p)$$

TABEAU 1.1. Fréquence de rotation en fonction de f et du nombre de paires de pôles "p"

F= 50 HZ W = 314 rd/sec.				F=60 HZ W= 376,8 rd/sec			
p	Ws(rd/s)	Ms(Tr/s)	Ms(Tr/min)	p	Ws(rd/s)	ns(tr/s)	ms(tr/min)
2	314	50	3000	2	376,8	60	3600
4	157	26	1500	4	188,4	30	1800
6	104,67	16,66	1000	6	125,6	20	1200
8	78,5	12,5	750	8	94,2	15	900

1.5.2- PUISSANCE REELLE :

Le choix de la puissance d'un moteur électrique est une condition importante pour son fonctionnement économique et fiable.

* $P > P$ nécessaire : provoque des pertes d'énergie inutile et des dépenses supplémentaires.

* $P < P$ nécessaire: réduit la productivité de la machine et rend son fonctionnement peu fiable, dans ces conditions le moteur peut être facilement endommagé.

Par conséquent, il faut choisir le moteur de façon que sa puissance soit utilisée au max. En effet, la puissance est choisie en tenant compte des conditions d'échauffement et de la capacité de surcharge du moteur.

1.6. INDICE DE PROTECTION :

Il existe une relation très étroite entre les conditions d'installation (ambiance de travail ou milieu ambiant) et le degré de protection mécanique du moteur qui est l'objet du choix.

A priori, le choix le plus simple est évidemment celui d'un moteur dont les parties actives seraient directement accessible de l'extérieur sans aucun dispositif de protection et les moteurs fabriqués au début ont été de cette façon. Les connaissances acquises depuis nous obligent à procéder différemment. Pour faire le bon choix de la protection, il faut tout d'abord considérer la notion d'ambiance de travail.

1.6.1 Différents types des milieux ambiants :

a * Ambiance normale des locaux habités : ou toutes les formes de risques sont absentes.

b * Ambiance industrielle diverse : ou les moteurs tout en étant à l'abri, sont soumis, soit à l'humidité et la poussière, soit à des projections d'eau et / ou de corps solides.

c * Ambiance extérieure : lorsque les moteurs sont soumis à l'action des intempéries, ce cas se rattache soit à une pollution particulière, soit à une ambiance industrielle comportant des projections obliques d'eau.

d * Ambiance comportant des risques d'explosion : (zones à risque d'explosion). Dans ce cas, il est exigé que si une explosion se produisait à l'intérieur du moteur, elle ne devrait en aucun cas se propager à l'extérieur.

e* Les milieu immergés : Dans ce cas, le moteur doit être complètement étanche. L'industrie électrotechnique actuelle propose plusieurs variétés de moteurs qui s'adaptent au milieu de travail dans lequel ils se trouvent.

1.6.2. Classification des zones à risques d'explosion :

Les zones qui peuvent présenter les dangers d'explosion sont appelées: zones à risques d'explosion et qui peuvent être classées selon le tableau suivant :

Tableau 1.2. Zones à risques d'explosions

Classes de zones	Conditions qui déterminent la classe des zones
B-I	Les zones dans les conditions des quels il y a des gaz ou des vapeurs inflammables en quantité suffisante et avec des propriétés qui peuvent avec l'air former un mélange explosif dans les régimes normaux de travail
B-Ia	Les zones dont les conditions où les situations dangereuses se rapportant à la zone B-I peuvent arriver en cas d'avarie
B-Ib	Idem pour B-Ia, mais avec les particularités suivantes : 1- Les gaz ont un degré de concentration minimale pour être inflammable (1% et plus) et une odeur aigue. 2- Les laboratoires et autres constructions dans lesquels les produits inflammables sont en petite quantité
B-Ic	Espace avec des installations contenant des produits inflammable.
B-II	Zones dans les constructions où il y a d'autres types de produits inflammable qui différent de B-I qui peuvent créer un mélange explosif avec l'air dans les conditions normales de travail
B-II a	Les zones dans les constructions où les situations dangereuses se rapportant à la zone B-II ont lieu en cas d'avarier

Les moyens de protection qu'il faut mettre en œuvre vont dépendre alors essentiellement du milieu ambiant de travail. Cela entraîne par la suite de nombreuses variétés de dispositifs technologiques qui protègent les moteurs contre les agents externes.

1.6.3. Classification des protections des machines :

- **machine ouverte** : Construite sans protection spéciale et sans aucune protection des parties sous tension ou en mouvement et qui sont alors directement accessible au toucher. La ventilation est assurée le plus souvent par le brassage de l'air dû au rotor. L'eau et les corps étrangers peuvent alors pénétrer dans le moteur.
- **Machine semi-protégé** : Les enroulements sont partiellement protégés, l'eau et les corps peuvent pénétrer.
- **Machine abritée** : Des dispositifs empêchant l'eau et les corps solides tombant verticalement de pénétrer pour locaux et emplacements humides. Comme dans le cas précédent les dispositifs de protection mis en œuvre rendent possible l'accessibilité aux parties tournantes et sous tension.
- **Machine protégée** : machine protégée contre les projections obliques de corps solides et d'eau.
- **Machine grillagées** : les orifices de ventilation sont obturées par un dispositif à claire voie. Cette dénomination est souvent employée en complément de l'une des trois dénominations précédentes, on dira de ce fait " un moteur semi-protégé grillagé", "un moteur abrité grillagé" et "un moteur protégé grillagé".
- **Les Machines fermées** : Elles sont de plusieurs types, selon que la protection est prévue contre l'eau, les poussières, les gaz. Il en résulte que les pièces sous tension ou en mouvement sont à l'abri de tout contact accidentel ou volontaire.
- **Les machines étanche à l'immersion** : Elles peuvent fonctionner immergée dans l'eau à une profondeur spécifiée.
- **Machine hermétique** : étanche aux gaz ou vapeurs.
- **Machine à sécurité augmentée** : Machine a fonctionnement sans étincelle à réduction d'échauffement et augmentation de l'entrefer destinée à être utilisée dans une atmosphère inflammable.

- **Machines sous pression interne** : Enfermée dans une enveloppe dont l'atmosphère intérieure est constituée par un gaz maintenu à une pression supérieure à celle existante à l'extérieur dans une atmosphère inflammable.

1.7. INDICE DE PROTECTION IP :

Le degré ou indice de protection caractérise l'aptitude d'un matériel à supporter les trois influences externes caractéristiques.

- Présence de corps solides.
- Présence d'eau.
- Risque de chocs mécaniques.

L'indice de protection (ou degré de protection) est défini par le symbole (IP) suivi de trois chiffres.

- 1^{er} chiffre : protection contre les corps solides.
- 2^{ème} chiffre : protection contre les corps liquides.
- 3^{ème} chiffre : protection contre les chocs mécaniques.

L'indice de protection du moteur doit répondre aux exigences d'utilisation du local, c.à.d. à l'indice de protection requis par le local.

Notons que le constructeur ne donne que deux premiers chiffres suivant le symbole IP. A titre d'exemple :

- * IP 23 : moteur protégé.
- * IP 44 : moteur fermée (protégé contre les projections d'eau).
- * IP 55 : moteur fermée (protégé contre projections d'eau à la lance (moteur étanche).

Tableau 1.3 - Degré de protection contre les corps solides

Nombre	Degré de protection contre les corps solides	
	<i>Courte Description</i>	<i>Définition</i>
0	Pas de protection	Il n'y a pas de protection spéciale
1	Protection contre les corps solides avec diamètres ≥ 50 mm	Protection contre l'introduction à l'intérieur de la carcasse des parties extérieures du corps humain (par exemple les mains) l'introduction des corps solides de diamètres 50 mm

2	Protection contre les corps avec diamètres ≥ 12 mm	Protection contre l'introduction à l'intérieur de la carcasse des doigts ou des éléments de longueur 80 mm et des corps solides de diamètre 12 mm
3	Protection contre les corps solides de diamètre $\geq 2,5$ mm	Protection contre l'introduction à l'intérieur des carcasses des instruments d'épaisseur de plus de 2,5 mm et de corps solides de diamètre de plus de 2,5 mm.
4	Protection contre les corps solides de plus de 1 mm	Protection contre l'introduction à l'intérieur des carcasses des corps solides de diamètre de plus de 1mm
5	Protection contre la poussière	l'introduction de la poussière à l'intérieur n'est pas complètement évitée, mais la poussière ne peut entrer en quantité suffisante pour perturber le travail de la machine.
6	Protection hermétique à la poussière	L'introduction de la poussière est éliminée.

Tableau 1.4 Degré de protection contre l'eau

N°	Degré de protection contre les chutes d'eau	
	<i>Courte Description</i>	<i>Définition</i>
0	La protection contre les gouttes est absente	Pas de protection spéciale
1	Protection contre les gouttes d'eau	Les gouttes d'eau qui tombent verticalement sur la carcasse ne doivent pas agir d'une manière sur les parties du moteur.
2	Protection contre les gouttes d'eau avec une pente de 15°	Idem pour 1, mais avec inclinaison à n'importe quel angle de 15° par rapport à la position normale.
3	Protection contre la pluie	La pluie qui tombe sur la carcasse avec un angle de 60° de la verticale ne doit avoir aucune influence néfaste sur l'élément.
4	Protection contre les chutes d'eau	L'eau qui chute sur la carcasse de n'importe qu'elle direction ne doit avoir aucune influence néfaste sur l'élément.

5	Protection contre les jets d'eau	Le jet d'eau envoyé de n'importe qu'elle direction, ne doit avoir aucune influence néfaste sur l'élément.
6	Protection contre les vagues	L'eau sous forme de vagues ne doit pas entrer à l'intérieur de la carcasse en quantité suffisante pour endommager l'élément.
7	Protection contre l'immersion dans l'eau	L'eau ne doit pas s'introduire dans la carcasse qui est immergée dans l'eau d'après certaines conditions de temps et de pression en quantité suffisante pour endommager la machine.
8	Protection contre l'immersion dans l'eau pour une longue durée	L'eau ne doit pas s'introduire dans la carcasse d'après les conditions déterminées par le constructeur

- Il est à noter que les moteurs de fabrication courante ont les indices de protection donnés dans le Tableau 1.5.

- Tableau 1.5. Exécution des moteurs électriques d'après le degré de protection

DEGRE DE PROTECTION									
Protection contre les corps solides	Contre l'eau								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IPOO	IPO1	-	-	-	-	-	-	-
1	IP10	IP11	IP12	IP13	-	-	-	-	-
2	IP20	IP21	IP22	IP23	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	-	-	IP43	IP44	-	-	-	-
5	-	-	-	-	IP54	IP55	IP56	IP57	IP58

Néanmoins, et en tenant compte des zones à risque d'explosion, le degré de protection doit être consolidé par le degré de protection contre les explosions et ce selon le Tableau 1.6.

Tableau 1.6 degré de protection des moteurs opérant dans des zones à risque d'explosion

Classes de la zone	Degré de Protection
B-I	Antidéflagrant
B-I a B-Ic	Fiabilité élevée contre les explosions
B-Ib	Sans moyens antidéflagrant. Carcasse avec un degré de protection moins de IP44
B-II B- IIa	Sans moyen de protection contre les explosions la carcasse avec degré de protection IP54

1.8- LE TYPE DE SERVICE :

On appelle régime d'un moteur à un instant donné, l'ensemble des valeurs, des grandeurs électriques et mécaniques nécessaires pour caractériser son fonctionnement à l'instant considéré dans les conditions réelles d'utilisation, le régime étant le plus souvent variable au cours du temps, on définit le service d'un moteur comme étant l'énoncé de valeurs de son régime en fonction du temps.

Dans cet esprit, le service nominal est un service conventionnel pour lequel des prescriptions spécifiées lors de la commande et en particulier les limites d'échauffements sont respectées.

Le service nominal définit donc les possibilités d'utilisations d'un moteur. Le service réel défini à partir des courbes représentant les variations des grandeurs électriques et mécaniques en fonction du temps peut dans la plupart des cas, être ramenée par équivalence à l'un des services types énumérées ci-après.

En effet, Selon la norme, on admet trois services nominaux de base. Ils sont classés en fonction de la nature du travail et de la durée :

- a - Service continu.
- b - Service temporaire.
- c - Service intermittent.

a- Service Continu (S1) :

Désigné par la mention (S1), est le cas où la période de travail est tellement grande que les températures de toutes les parties de la machine atteignent des valeurs pratiquement permanentes.

La température de l'air de refroidissement étant constante, la machine peut fonctionner alors indéfiniment à condition que la surchauffe de ses éléments ne dépasse pas les limites fixées par la norme.

b- Service Temporaire (S2) :

Est un service pendant lequel la machine travaille un certain temps déterminé, indiqué sur sa plaque signalétique et la surélévation de température de ses différentes parties n'atteint pas une valeur permanente de la période de repos ou de marche sans charges est tellement grande que pratiquement la machine se refroidit jusqu'à la température ambiante. Selon la norme, la durée du service temporaire est de l'ordre de 15, 30, 60, 90 min.

c- Service Intermittent (S3, S4, S5):

Le service intermittent est un service où les courtes périodes de travail alternent avec des pauses, on distingue trois types de services intermittents.

*** Service intermittent périodique (S3) :**

Forme de service composé d'une suite de cycles identiques comprenant chacun un temps de fonctionnement à un régime constant et un temps de repos. Ces temps sont insuffisants pour que l'équilibre thermique soit atteint aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissements.

*** Service intermittent a démarrage (S4) :**

Formé de service composé de cycles identiques comprenant chacun un temps de démarrage, un temps de fonctionnement et de repos qui sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle. Dans ces services l'arrêt du moteur, soit par ralentissement naturel après, coupure de courant soit par un moyen de freinage tel qu'un frein mécanique ne provoquant pas d'échauffement supplémentaire des enroulements.

*** Service intermittent a démarrage et freinage (S5) :**

Formés de services composés d'une suite de cycle identique comprenant chacun un temps de démarrage, un temps de fonctionnement à régime constant, un temps de freinage et un temps de repos. Les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle. Dans ces services, le freinage est rapide et réalisé par un procédé électrique.

1.9 DETERMINATION DU MODE DE FIXATION:

Le mode de fixation s'effectue suivant la position de l'axe de la machine entraînée et le plan de fixation du moteur. Les machines électriques (moteurs électriques en particulier les plus répandues selon le mode de fixation sont représentées sur le tableau 1.7.

Tableau 1.7. Formes constructives des machines selon le mode de fixation

Symbole du Groupe	Formes constructives des machines
IM1	Ce sont les machines à patte et palier flasque
IM2	Machines à pattes, à palier flasque et bride sur un flasque
IM3	Machines sans pattes, à palier flasque et bride sur un flasque
IM4	Machines sans pattes, à palier flasque et bride sur la carcasse
IM5	Machines à palier lisse
IM6	Machines à palier flasque et palier de battis
IM7	Machines sans palier flasque et palier de battis
IM8	Machines à axe verticale non comprise dans le groupe (IM1- IM4)
IM9	Machines à organes de fixation spéciaux

Notons que dans chacun des neuf groupes les machines sont placées suivant leur procédé de montage.

1.10- EXECUTION CLIMATIQUE

Afin d'adapter le moteur électrique à son environnement, il est très judicieux de le choisir en tenant compte du climat de la région là où il doit être installé et ce en tenant compte de la norme présentée dans le tableau 1.8

Tableau 1.8 Exécution climatique

Exécution Climatique	Type de Climat de La région
N	Doux
Nf	Doux et Froid
T	sec ou tropical humide
M	doux et froid maritime
MU	Doux, froid et tropical humide

1.11. DETERMINATION DE LA CLASSE DES ISOLANTS :

Dans les machines électriques, les pertes d'énergie électrique et mécanique se produisent par la transformation de ces formes d'énergie en énergie thermique. Ce qui chauffe certaines parties de la machine. Pour assurer la fiabilité des machines électriques, l'échauffement des différentes parties de la machine doit être limité.

La tâche la plus difficile et la plus importante est d'assurer la bonne tenue de l'isolation des enroulements, qui se dégrade pour des températures relativement peu élevées. Pour cette raison la charge admissible d'une machine est déterminée tout d'abord par la température admissible des isolants utilisés.

En plus de leur tenue à la chaleur, les isolants doivent satisfaire à plusieurs autres exigences dont les plus importants sont :

- a- une résistance mécanique élevée et une élasticité que le matériau doit conserver lors de l'action prolongée de l'échauffement de service.
- b- une rigidité diélectrique élevée à la température ambiante normale, ainsi qu'à la température de service de la machine.
- c- des pertes diélectriques aussi petites que possibles à froid et à chaud.
- d- une résistivité élevée du matériau à chaud.
- e- un matériau qui doit être aussi bas que possible.

Ces exigences sont d'une importance capitale. Selon la commission électrotechnique internationale [1], les différents types d'isolants sont donnés dans le Tableau 1.9.

Tableau 1.9. Différents types d'isolants et leur tenue à la chaleur

Désignations de la classe de tenue à la chaleur	température admissible °c	Caractéristique sommaire des principaux types de matériaux correspondant à la classe de tenue à la chaleur donnée
Y	90	Matériaux fibreux en cellulose et en soie non imprégnés
A	105	matériaux fibreux en cellulose et en soie imprégnés
B	130	Matériaux à base de mica (y compris ceux à supports organiques), d'ambiante et de fibres de verre utilisées avec des liants et imprégnant organiques
F	155	Matériaux à base d'amiante et de fibres de verre utilisé avec des liants et des imprégnant synthétiques
H	180	Matériaux à base de mica, d'amiante et de fibres de verre utilisés avec des liants et imprégnant silicones élastomère silicones
C	> 180	Mica céramique, verre, quartz utilisés sans liants, avec liants inorganiques ou autres

Par température ambiante, nous entendons température du fluide de refroidissement à son arrivée au moteur, avant qu'il ne soit influencé par les propres de celui-ci.

La connaissance de la température du milieu ambiant est déterminante dans le choix de l'isolant et donc du moteur adapté. En effet les moteurs normalisés sont calculés pour fonctionner à une altitude inférieure à 1000 mètres.

Classes de l'isolant (NFC 51 11)	Echauffements limite $\Delta t(T_a \leq 40^\circ\text{c})$	Température limité $T_a + \Delta t(T_a \leq 40^\circ\text{c})$
Classe A	60°c	100°c
Classe E	475°c	115°c
Classe B	80°c	120°c
Classe F	100°c	140°c
Classe H	125°c	165°c

1.12- LES DIFFERENTS MODES DE DEMARRAGES :

Avant de donner les principaux éléments de choix d'un démarreur, qui est l'objet de ce paragraphe, il est nécessaire de citer les modes de démarrage, les plus fréquents :

- démarrage direct.
- démarrage étoile-triangle.
- démarrage à résistances statoriques.
- démarrage rotorique.
- démarrage par auto-transformateur.

1.12.1. Démarrage direct:

- Avantages:

- simplicité de l'appareillage.
- couple important.
- temps de démarrage minimal pour un moteur à cage.

b- Inconvénients:

* au niveau du réseau d'alimentation : en provoquant, une chute de tension non négligeable ($\Delta U > 5\%$ de U) et en sollicitant la fourniture d'une puissance apparente élevée.

* Appel de courant très important : $I_d = (4 \text{ a } 8) I_n$.

* Au niveau de la machine entraînée : en appliquant un couple d'accélération trop important dû à l'énergie couple de décollage.

* Démarrage brutal.

- Emplois : Moteur de petite puissance ($p=7,5$ ch) ou de puissance ce faible par rapport à la puissance du réseau, c.à.d. que le moteur soit alimenté à partir:

- soit du réseau de distribution (BT).
- soit du réseau HT par l'intermédiaire d'un poste de transformation privé.
- Machines ne nécessitant pas une mise en vitesse progressive.
- Machines nécessitant un bon couple de démarrage.

1.12.2 - Démarrage étoile-triangle :

Le démarrage s'effectue en deux temps :

1^{er} temps : mise sous tension et couplage étoile des enroulements, le moteur démarre à tension réduite

2^{ème} temps : suppression du couplage étoile et mise en couplage triangle le moteur est alimenté à pleine tension.

1.12.3. - démarrage à résistances statoriques:

a/- Avantages :

- la tension d'alimentation est très fortement réduite au moment du démarrage car l'appel de courant reste important.

- lorsque le moteur s'accélère, l'intensité dans les résistances statoriques diminue ceci entraîne une réduction de la chute de tension aux bornes de ces résistances donc un meilleur couple qu'avec une tension constante comme c'est le cas dans un montage étoile triangle.

b/- Inconvénients :

L'intensité de démarrage reste élevée car elle est proportionnelle au carrée de la tension appliqué. On a de 4 à 5 fois l'intensité. Le couple de démarrage est diminué par rapport à un démarrage direct, il est de l'ordre de 0,75 fois le couple nominal.

c/- Emplois :

Il convient aux machines dont le couple de démarrage est plus faible que le couple normale de fonctionnement. C'est le cas des machines à bois, machines-outils, ventilateurs.

1.12.4 - Démarrage rotorique:

Pour ce procédé, on utilise obligatoirement un moteur asynchrone triphasé à rotor bobinée en étoile avec sortie sur trois bagues.

a- Avantages :

- L'appel de courant est, pour un couple de démarrage donné, le plus faible par rapport à tous les autres modes de démarrage.

- possibilité de choisir, par construction le couple et le temps de démarrage.

.b/- Inconvénients:

- Nécessité d'un moteur à rotor bobiné plus onéreux et moins robuste qu'un moteur à cage.

c/- Emplois :

Ce démarrage extrêmement souple (possibilité d'ajuster la valeur et le nombre des résistances) convient pour les machines démarrant à pleine charge et dans le cas où les pointes de courants doivent être de faible amplitude. De même, ce mode de démarrage peut être appliqué dans tous les cas difficiles nécessitant des démarrages longs et fréquents et aux machines demandant une mise en vitesse progressive.

1.12.5 - démarrage par auto-transformateur :

a- Avantages :

- possibilité de choisir le couple de décollage.
- réduction, dans le même rapport, du couple et de l'appel de courant.
- démarrage en trois temps sans coupure.
- les phénomènes transitoires sont supprimés.

b- Inconvénients :

- prix élevé, il faut un transformateur spécial et trois contacteurs.

c- Emplois :

Ce système présente le plus d'avantage technique. Il est utilisé, en général, pour les machines de puissance supérieur à 100 KW et convient bien pour les compresseurs rotatifs à piston, les pompes: les ventilateurs.

Une fois que les caractéristiques de la machine entraînée sont précisées, les éléments du réseau d'alimentation sont spécifiées l'ambiance de travail et les éléments du moteur sont définis.

Chapitre 2: LES SYSTEMES EXPERTS

2.1. GENERALITE SUR LES SYSTEMES EXPERTS:

2.1.1. Définition :

Un système expert (SE) est un logiciel qui reproduit le comportement d'un Expert humain dans un domaine spécifique.

□ Un SE collecte un ensemble de connaissances, les formalise, puis les Restituer comme un expert lorsqu'il interrogé par un utilisateur.

2.2. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UN SE :

Un SE est fondé sur le principe de séparation des connaissances (la base des connaissances) et les programmes qui les traitent (le moteur d'inférence).

2.2.1. Avantages:

- Modification de la Base de connaissance BC sans besoin de toucher aux programmes,
- Possibilité de réutilisation du même moteur d'inférence avec d'autres BC (Réduire le temps de développement).

Une Base de Connaissance est constituée de:

1. Une base de faits
2. Une base de règles
3. Une base de métarègles

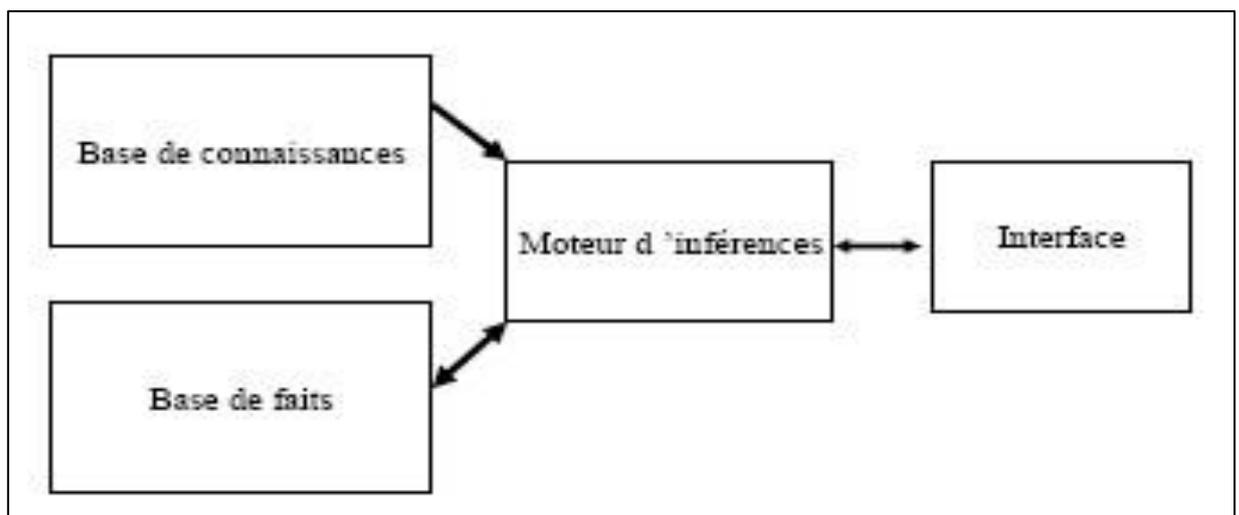


Figure 2.1. Structure d'un système expert

2.2.2. La base des faits:

- Contient des faits prouvés (connus comme vrais)
- Evolue au cours du temps suivant l'exécution du SE.
- ▣ De nouveaux faits peuvent être ajoutés par l'utilisateur ou par le moteur d'inférence (par déduction).

2.2.3. La base des règles

Permet de déduire de nouveaux faits (et rarement de nouvelles règles)

2.2.4. Les métas règles : Ce sont des règles qui déterminent comment utiliser les règles elles même (conditions d'utilisation d'une règle, sélection de certaines règles, priorités d'application, etc.).

2.2.5. Moteur d'inférence

- Indépendant de la Base de connaissance (BC)
- Parcourir les faits et les règles de la BC.
- Sélectionner une règle et l'appliquer

Le moteur d'inférence travaille selon 03 façons:

- Chainage avant
- Chainage arrière
- Chainage mixte

2.2.6. Les interfaces:

Les interfaces d'un système expert comportent :

- Un module d'interaction avec l'utilisateur : composé d'un ensemble de menus.
- Un module d'explication et de trace d'exécution
- Un SE est capable de justifier la conclusion à laquelle il a abouti
- Expliquer les raisons pour lesquelles il a activé certaines règles
- Proposer une trace graphique restituant le chemin suivi lors de raisonnement ainsi que les connaissances mobilisées.
- Un module d'aide à l'acquisition de connaissances
- Aide à la génération automatique de la BC
- Vérification de la cohérence.
- Une interface avec des applications externes est envisageable pour permettre au SE d'interagir avec des BD et des programmes externes

2.3. APPORT D'UN SYSTEME EXPERT

- L'enrichissement de l'expertise au sein de l'entreprise: En collectant les connaissances de plusieurs experts du même domaine ou de domaines différents (SE pluridisciplinaire).

- La transmission du savoir

L'expérience humaine est indispensable dans les décisions stratégiques. Mais elle est Volatile (départ, maladie, décès, voyage,...). De même, elle est couteuse (coût d'intervention en temps et en argent, coût de Formation).

La mise en place d'un SE comme solution alternative permet:

- Un moyen efficace pour conserver et transmettre le savoir
- Ayant un coût négligeable
- Augmenter la productivité
- Immédiatement opérationnel (pas de formation préalable)

- Amélioration des compétences et d'efficacité du personnel

- Une très grande disponibilité de l'expertise à des niveaux bas
- Amélioration des conditions de travail, son efficacité, sa productivité
- Amélioration des compétences des acteurs

- Cohérence de décision

□ L'expert humain est sensible aux conditions de l'environnement (la fatigue, la nervosité,...). D'où les décisions incohérentes. Un SE donnera les mêmes décisions sous les mêmes conditions (cohérence des décisions avec moins d'erreurs).

- Augmentation de volume d'affaires

Accroissement du volume d'affaires

Augmentation de rentabilité de l'entreprise.

- Ouverture à de nouveaux types de problèmes

Un SE ne s'intéresse pas aux problèmes classiques, mais des problèmes ouverts qui demandent de l'expertise humaine.

- L'image d'une entreprise innovatrice

L'utilisation de technologies de pointe renforce l'image de l'entreprise devant ses clients ainsi que ses concurrents

2.4. PHASES DE DEVELOPPEMENT D'UN SE:

1. Spécification du cahier des charges
2. Choix d'une architecture du système, de son interface utilisateur, et d'un langage de traitement.
3. Prévision des mécanismes de modification ultérieure du système
4. Sélection d'un sous-ensemble représentatif du problème pour l'élaboration d'un démonstrateur
5. Acquisition des informations et élaboration du mécanisme d'ajout et de modification de la base de connaissances
6. Implantation du "moteur d'inférences" (règles d'inférence)
7. Test, ajustement et documentation du système.

2.5. METHODOLOGIE ET OUTILS DE CONSTRUCTION D'UN SE (LES DIFFERENTS ACTEURS)

1. L'ingénieur de connaissances (le cognicien)

- L'extraction des connaissances auprès des experts (conduire des interviews avec eux).
- Représente les connaissances acquises selon l'un des formalismes
- Travaille en collaboration avec les experts

2. Les développeurs (les informaticiens)

Choisir un outil de développement (un langage de programmation) et développer le programme du SE en faisant la programmation proprement dite.

3. Les experts du domaine concerné

Constituent le point d'articulation du développement d'un SE. Ils doivent être disponibles lors de la phase de d'extraction de la connaissance et lors de suivi de l'application. Ils ne devront pas percevoir le nouvel outil développé comme un rival qui leur prendra une partie de leur pouvoir. Ils devront percevoir l'application comme un outil les déchargeant des tâches routinières au profit de problèmes qui requièrent leur savoir-faire.

4. Les utilisateurs

Participent efficacement dans le développement du SE surtout l'interface avec le système (simple, performant, ergonomique). Devront être convaincus des avantages de l'outil développé sur leur travail quotidien. Ils peuvent donner leurs critiques relatifs au SE.

2.6. OUTILS DE CONSTRUCTION DES « SE »

1. Les langages classiques : Fortran, Pascal et C

2. Les langages spécifiques à l'IA

a. Les langages fonctionnels : Lisp

b. Les langages logiques : Prolog

3. Les langages orientés objets : C++, C#, Delphi

4. Les générateurs des SE (Shell) : Ce sont des outils conçus spécialement pour la génération des SE. Ils disposent de: moteurs d'inférence, interfaces utilisateurs, formalismes de représentation des connaissances, gestion de connaissances incertaines, aide au développement.

2.7. DESCRIPTION DU LOGICIEL VP-EXPERT :

Pour résoudre le problème de choix, on a préféré utiliser le logiciel VP-EXPERT, parce qu'il est très simple à utiliser. VP-EXPERT est un générateur du système expert, ceci signifie qu'il fournit tous ce qui définit un S.E sauf la base de connaissances.

2.7.1. Architecture de VP-EXPERT : Il comprend :

A - la base de connaissances

B - un moteur d'inférence.

C - un module d'acquisition des connaissances.

D - une interface utilisateur.

E - un module de justification des résultats.

Une base de connaissances VP-EXPERT possède trois constituants de base :

* le bloc des actions.

* les règles.

* les déclarations.

Un quatrième type d'élément, les clauses sont contenues dans le bloc "ACTION" et les règles de la base de connaissance.

2.7.2. Le bloc des Actions:

Le bloc des actions constitué du mot "ACTIONS" et d'une ou de plusieurs clauses définit les problèmes ("BUT") à résoudre durant une consultation ainsi que la manière d'y parvenir. En d'autres termes, le bloc des actions indique au moteur d'inférence ce qu'il faut faire pour aboutir à une solution, et dans quel ordre ceci est réalisé au moyen des clauses "Find" qui ordonnent à VP-EXPERT de trouver la ou les valeurs d'une ou plusieurs "variable But". En plus des clauses "Find", le bloc des actions peut contenir d'autres clauses spécifiant des manipulations de base de données, de tableurs et d'autres tâches.

2.7.3. Les Règles (RULES) :

Les règles déclarées comme des propositions IF/THEN contiennent "L'expertise" ou la connaissance emmagasinée dans la base de connaissances.

Une règle VPX est composée de deux parties: partie conditions (IF) qui contient une ou plusieurs conditions, et la partie conclusion (THEN°, qui contient une ou plusieurs conditions. Les règles peuvent aussi contenir des clauses - clauses bloc des actions, excepté que ces clauses, ajoutées à la fin des règles, ne s'exécuteront que si la règle est déclenchée.

SYNTAXE :

RULE < étiquette de règles >

IF < conditions 1 > [AND / OR]

< conditions 2 > [AND / OR]

[etc]

THEN < conclusion 1 > [CNF]

< conclusion 2 > [CNF]

[etc]

Exemple :

RULE K4D

IF groupe - machine = compresseurs - à - piston **AND**

puissance 2 = Grande **AND**

condition - de - mise - en - route 4 = Vanne **AND**

puiss- reseau = faible

OR

puiss-reseau = importante

THEN

mode - demarrage = R - statorique

type - rotor = A - cage;

NB : CNF est un coefficient de certitude.

- Sachant que les Déclarations de VP-EXPERT assignent des caractéristiques particulières à des variables de la base de connaissance.

2.7.4. Le Moteur d'inférence:

Le mode d'inférence utilisé est "Le Chainage mixte". Le moteur commence par identifier la variable but, puis parcourt la base des règles jusqu'à ce qu'il trouve la valeur d'une variable qui peut lui indiquer une valeur à assigner à cette variable **But**. Si le moteur d'inférence ne parvient pas à trouver une variable en partie conclusion d'une règle. Il recherche une déclaration **ASK** pouvant donner une valeur à la variable.

2.8. L'AQUISITION DE LA CONNAISSANCE :

Bien que VP-EXPERT n'ait pas un module d'acquisition de la connaissance, ceci est composé par le fait que la syntaxe des règles et d'une simplicité remarquable, leur énoncé s'approche du langage naturel, de plus l'expert peut les entrer dans n'importe quel ordre.

2.9. L'INTERFACE UTILISATEUR :

VP-EXPERT fournit une bibliothèque considérable de clauses (surtout celles relatives aux graphismes et à l'utilisation de la souris) qui permettent de créer une interface utilisateur très conviviale.

2.10. LE RAISONNEMENT EXPLIQUE :

* Soit en affichant la règle concernée elle-même, s'il n'y a pas de texte explicatif.

* ou bien en affichant le texte explicatif se trouvant après le "BECAUSE" de la règle concernée.

2.11. CARACTERISTIQUES DE VP-EXPERT:

Les principales caractéristiques techniques de VP-EXPERT sont les suivants :

1- son moteur d'inférence travaille en logique d'ordre 0+, c'est à dire en logique de propositions avec variables globales.

2- il peut travailler :

- en chaînage arrière;
- en chaînage avant;
- en chaînage mixte;

3- la capacité d'échanger des données avec des fichiers de bases de données (FOXBASE, DBASE...), des fichiers feuilles de calcul (VP-PLANNER, LOTUS 1-2-3, ETC...) et de fichiers texte (ASCII).

4- une commande d'induction (INDUCE) qui génère automatiquement une base de connaissance à partir d'une table contenue dans un fichier texte, feuille de calcul ou base de données.

5- Les coefficients de certitude qui permettent de manipuler les informations incertaines de la base de connaissances.

6- la possibilité d'expliquer ses choix pendant les consultations.

7- un mécanisme de construction de règles en langage courant.

8- la possibilité de chaîner des bases de connaissances. Ce qui permet de créer des bases de connaissances qui seraient autrement trop larges pour tenir en mémoire.

9- possibilité d'avoir une trace du fonctionnement du moteur d'inférence durant une consultation.

10- les fonctions mathématiques en virgule flottante.

11 - la possibilité de faire des appels externes.

Ce logiciel va être utilisé dans le chapitre 3 pour la détermination du choix rationnel d'un moteur asynchrone entraînant une fraiseuse.

CHAPITRE 3 : EXEMPLE D'APPLICATION

3.1 Description de la machine entraînée :

Dans notre exemple d'application, nous nous intéressons au choix rationnel d'un moteur asynchrone relié à une fraiseuse système entraîné (Figure 3.1).

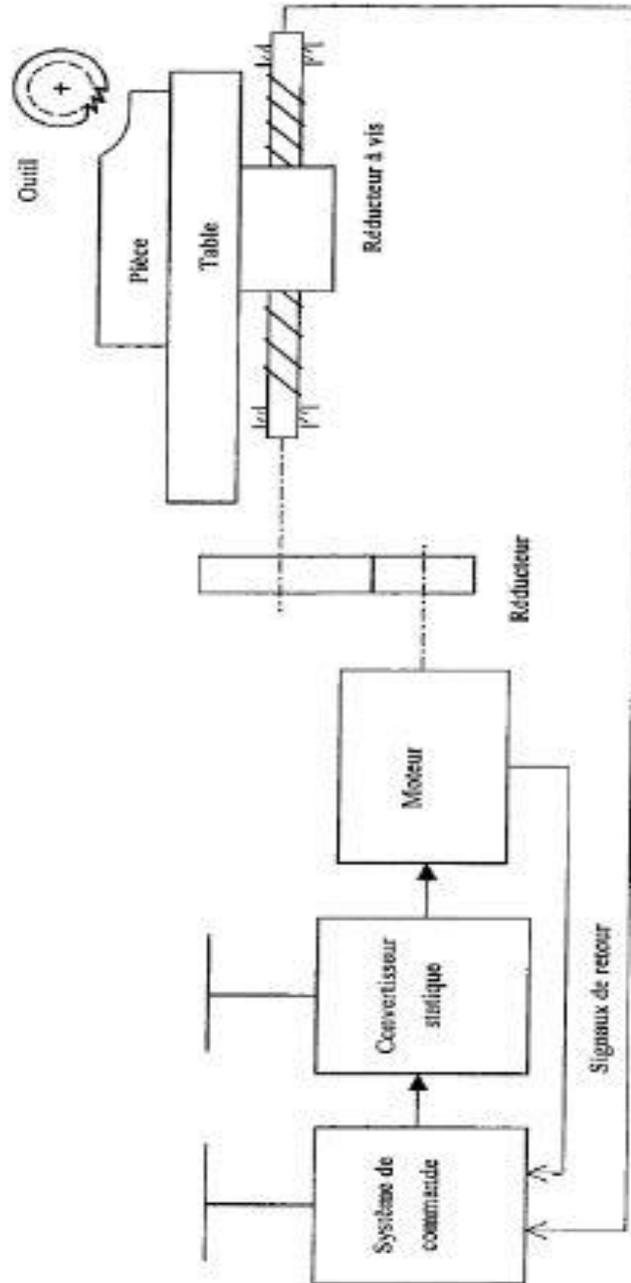


Figure 3.1 schéma synoptique d'une fraiseuse

Les éléments de la fraiseuse sont donnés dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Cahier des charges pour la conception d'une fraiseuse

Paramètres de calcul	Symbole	Unité
Masse de la pièce	m_p	kg
Masse de la table	m_T	kg
Coefficient de frottement de la table	μ_f (0.08 par défaut)	—
Force de coupe	F_c	N
Vitesse d'usinage	v_u	m/min
Vitesse de retour de la table	v_r	m/min
Réducteur à vis		
Longueur du réducteur à vis	l_r	m
Diamètre du réducteur à vis	d_r	m
Moment d'inertie du réducteur à vis	J_{rv}	Kgm ²
Rendement du réducteur à vis	η_{rv}	
Réducteur engrenage		
Rapport de réduction	i	
Rendement du réducteur	η_r	
Moment d'inertie l'élément 1 (roue 1)	J_{r1}	Kgm ²
Moment d'inertie l'élément 2 (roue 2)	J_{r2}	Kgm ²

3.2. Calcul du couple résistant total

L'expression simplifiée du couple résistant total à l'arbre du moteur $C_{r\Sigma}$ est constituée par le couple de pertes dû aux frottements C_{rf} et le couple nécessaire pour usiner la pièce C_{ru} [Coupe]

$$C_{rf} = \frac{\mu_f \frac{h_{rv}}{2\pi} [(m_p + m_T)g + F_v]}{\eta_{rv} \eta_r i}$$

μ_f est le coefficient de frottement de la table

h_{rv} est le pas du réducteur vis

m_p est la masse de la pièce

m_T est la masse de la table

F_v est la composante verticale de la force de coupe

η_{rv} est le rendement du réducteur vis

η_r est le rendement du réducteur engrenage

i est le rapport de réduction

g est la force de gravité

Le couple d'usinage est déterminé à partir de la force de coupe. Cette dernière dépend des paramètres tels que la profondeur de coupe, la vitesse d'usinage, le type de lubrifiant, etc. La force de coupe comprend deux composantes: une longitudinale et une verticale. La composante verticale est associée aux frottements (friction) et représente 10 à 15% de la force d'usinage.

$$C_{ru} = \frac{F_c h_{rv}}{2\pi i \eta_{rv} \eta_r}$$

ou F_c est la force d'usinage

Le couple résistant total est alors exprimé par:

$$C_{r\Omega} = C_{rf} + C_{ru} = \frac{\mu_f \frac{h_{rv}}{2\pi} [(m_p + m_T)g + F_v]}{\eta_{rv} \eta_r i} + \frac{F_c h_{rv}}{2\pi i \eta_{rv} \eta_r}$$

Les pertes dans le système de transmission (réducteur à vis et engrenages) sont représentées à travers les rendements η_{rv} et η_r .

3.3. Choix préliminaire du moteur :

La vitesse à laquelle le moteur doit fonctionner est obtenue à partir de la vitesse du mécanisme et du rapport de réduction du système d'engrenage.

$$\Omega_m = i \Omega_2$$

Où : $\Omega_2 = \frac{v_u}{h_{rv}}$ est la vitesse du mécanisme.

La puissance du moteur est calculée telle que :

$$P = C_{r\Sigma} \Omega_m$$

Cette puissance permet de faire un choix préliminaire du moteur dans le catalogue du fabricant []

3.4. Calcul du moment d'inertie total

Le moment d'inertie des masses (table, pièce à usiner) effectuant un mouvement de translation est exprimé par:

$$J_{T+P} = (m_T + m_P) \left(\frac{h_{rv}}{2\pi} \right)^2$$

Le moment d'inertie de la transmission mécanique (engrenages et réducteur à vis) :

$$J_r = J_{r1} + J_{r2} + J_{rv}$$

Le moment d'inertie total (moteur et mécanisme entraîné) :

$$J_\Sigma = J_m + J_{r1} + \frac{J_{r2} + J_{rv} + J_{T+P}}{i^2}$$

J_m est le moment d'inertie du moteur préalablement choisi

J_{r1} est le moment d'inertie de l'élément 1 du réducteur

J_{r2} est le moment d'inertie de l'élément 2 du réducteur

J_{rv} est le moment d'inertie du réducteur vis

3.5. Calcul du couple maximal demandé

Le moteur est choisi tel qu'il puisse répondre à la demande de couple d'accélération :

$$C_{\max} = C_{r\Sigma} + J_\Sigma \frac{\Delta\Omega}{t_d}$$

Où :

J_Σ est le moment d'inertie total du moteur

t_d est le temps de démarrage exigé

$\Delta\Omega$ est la variation de la vitesse durant le temps t_d

3.6. Elaboration du système d'aide à la décision (Système Expert)

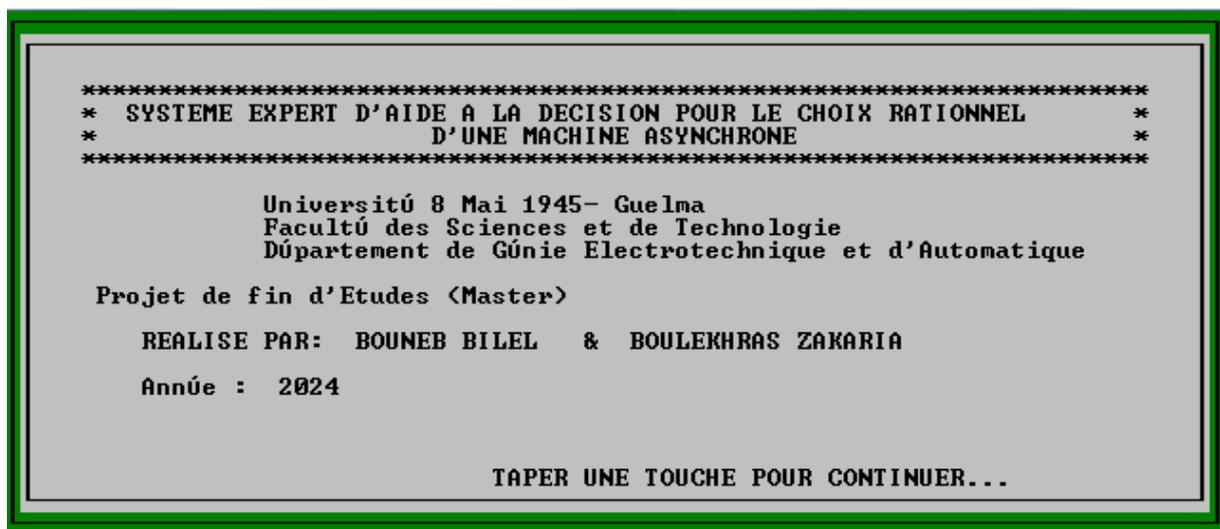
Le système d'aide à la décision pour le choix rationnel du moteur asynchrone triphasé pour l'entraînement de la fraiseuse est développé en utilisant le logiciel **VPexpert** dont la description a été donnée dans le Chapitre 2.

Dans ce système, on a tenu compte des critères de choix introduits dans le chapitre 2. Il s'agit de :

- Type de la machine entraînée,
- Conditions de la mise en route de la machine entraînée,
- L'ordre de puissance de la machine entraînée,
- La puissance du réseau électrique,
- L'indice de protection contre les corps solides et liquides,
- Le type de climat,
- Le lieu où le moteur est placé
- Le régime de fonctionnement du moteur,
- La catégorie d'emplacement (horizontale ou verticale),
- Le mode de fixation du moteur,
- La zone à risque d'explosion,

Le système arrive à une recommandation après que toutes les conditions « Prémises » spécifiées dans la partie « IF » soient vérifiées.

- La prise de décision de notre système expert passe par les étapes données dans les copies d'écrans suivantes :



QUEL EST LE TYPE DE LA MACHINE ENTRAINEE....?

<u>ventilateurs</u>	aspirateurs	turbines
tours	fraiseuse	rectifieuse
compresseurs rotatif	compresseurs a pisto	materiel de levage
alt pour con de freq	broyeurs	concasseurs
essoreuses centrifug	machines a bois	transporteurs
transmissions	pompes centrifuges	pompes a helice
telepheriques	telecabines	telebennes
teleskis	telesieges	

↑ ↓ → ← Enter to select END to complete /Q to Quit ? for Unknown

QUEL EST LE TYPE DE LA MACHINE ENTRAINEE....?

ventilateurs	aspirateurs	turbines
tours	fraiseuse ◀	rectifieuse
compresseurs rotatif	compresseurs a pisto	materiel de levage
alt pour con de freq	broyeurs	concasseurs
essoreuses centrifug	machines a bois	transporteurs
transmissions	pompes centrifuges	pompes a helice
telepheriques	telecabines	telebennes
teleskis	telesieges	

QUELLES SONT LES CONDITIONS DE MISE EN ROUTE DE LA MACHINE ENTRAINEE...

- FORTE OU FAIBLE INERTIE ---> MD^2 -
faible importante ◀

QUEL EST L'ORDRE DE PUISSANCE DE LA MACHINE ENTRAINEE ...?

petite moyenne ◀

LA PUISSANCE DU RESEAU EST ELLE...?

faible importante

↑ ↓ → ← Enter to select END to complete /Q to Quit ? for Unknown

VOUS VOULEZ PROTEGER VOTRE MOTEUR CONTRE LES CORSPS SOLIDES...:

negligeable	avec diametre 50 mm	avec diametre 12 mm
diametre plus 1 mm	poussiere ◀	

LA PRESENCE DE L'EAU EST ELLE :

negligeable	gouttes verticales	gouttes pente 15 deg
la pluie	projection eau	jets eau
vagues	immersion totale	immersion longue ◀

QUELLE EST LE TYPE DU CLIMAT DE VOTRE REGION...?

doux	doux froid	sec
tropical humide	doux froid maritime	doux froid tropical
	doux froid maritime ◀	

VOTRE MOTEUR EST IL PLACE DANS...?

air libre construction ◀

MOTEUR EST IL AVEC CONSTRUCTION...?

semi ouverte fermee avec humidite elevee

↑ ↓ → ← Enter to select END to complete /Q to Quit ? for Unknown

```

air libre                construction ◀
MOTEUR EST IL AVEC CONSTRUCTION...?
semi ouverte            fermee ◀          avec humidite elevee
LA CONSTRUCTION EST ELLE A...?
vent naturelle ◀       vent artificielle
LE REGIME DE FONCTIONNEMENT DE VOTRE MOTEUR EST IL...?
continu ◀              intermittent
Le SERVICE CONTINU EST -IL...?
no particularity ◀    a charge intermit          a dem et frein elec
VOUS VOULER POSER VOTRE MOTEUR...?
horizontalement ◀    verticalement          autrement
VOUS VOULER UN MOTEUR...?
a pattes              sans pattes
↑ ↓ → ← Enter to select  END to complete  /Q to Quit  ? for Unknown

```

Le résultat de la consultation de notre système expert est donné dans la copie d'écran suivante :

```

                RESULTATS DE CONSULTATION
[1].TYPE ROTOR DU MOTEUR:..... A CAGE
[2].MODE DE DEMARRAGE:..... DIRECT
[3].LA ZONE A RISQUE D'EXPLOSION:..... B-Ic
[4].DEGRE DE PROTECTION:..... IP58
[5].GROUPE CONSTRUCTION MOTEUR:..... HERMETIQUE
[6].CATEGORIE D'EMPLACEMENT:..... 3
[7].EXECUTION CLIMATIQUE:..... M
[8].MODE DE FIXATION:..... IM2
[9].TYPE DE SERVICE:..... S1

```

- Le choix donné par le système expert doit être respecté lors de l'achat d'un moteur asynchrone pour l'entraînement de la fraiseuse.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire consiste en la conception et la réalisation d'un système expert pour le choix rationnel des machines asynchrones.

L'objectif recherché est la mise au point d'un outil logiciel qui, à partir d'un ensemble de faits (informations sur les critères de choix des machines électriques asynchrones) décrivant un cas réel déduit de nouveaux faits à la manière d'un expert humain et ce, en exploitant une base contenant les connaissances nécessaires, à savoir :

- La machine entraînée
- L'alimentation électrique
- La puissance réelle
- L'indice de protection
- Le type de service
- Le facteur de marche
- Le mode de fixation
- L'exécution climatique
- La classe des isolants
- Le type de rotor
- Le mode de démarrage

Tout au long de la réalisation de notre travail, nous avons grandement apprécié l'intérêt de réaliser un système expert. Ce travail nous a en outre permis de :

- Nous introduire un peu dans le domaine des machines électriques asynchrone.
- Nous initier au domaine de l'IA et surtout les systèmes experts.

Bien que nos objectifs initiaux soient atteints, notre système peut cependant être amélioré en y apportant les caractéristiques suivantes :

- L'extension du système pour le choix rationnel des machines à courant continu et les machines synchrones.
- L'ajout d'un module économique pour le calcul du coût de ce choix rationnel.

Enfin, nous souhaitons que ce modeste travail servira d'outil logiciel d'assistance pour les futurs projets de fin d'étude Master en électromécanique et de support de documentation pour tous ceux qui s'intéresseront aux systèmes experts et leurs applications.

Bibliographie

- [1] LIBBY CHARLES C. (1960). Motor Selection and Application. McGraw-Hill Book Company, Inc.
- [2] LIEBOWITZ JAY (1998). The Handbook of Applied Expert Systems. CRC Press.
- [3] LINCOLN ELECTRIC COMPANY (1999). 3-Phase AC Industrial Motor Catalog. Cleveland, Ohio 44117-2525 U.S.A.
- [4] SIEMENS (1996). Low-Voltage Three-Phase Motors. General Catalogue 1996
- [5] BONAL J. (1997). Entraînements électriques à vitesse variable. Technique & Documentation Lavoisier, Paris.
- [6] CHEN D., BOSE B. K. (1992). Expert System Based Automated Selection of Industrial AC Drive. IEEE/IAS Annual Meeting Conference Record, 387-392.
- [7] CHAYA S. M., BOSE B. K. (1992). Expert System Based Automated Design Technique of a Voltage-Fed Inverter for Induction Motor Drive. IEEE/IAS Annual Meeting Conference Record, 770-778.
- [8] CHAYA S., M. BOSE B. K. (1993). Expert System Based Automated Simulation and Design Optimization of a Voltage-Fed Inverter for Induction Motor Drive. IEEE/IECON Conference Record, 1065-1070.
- [9] LIEBOWITZ JAY (1998). The Handbook of Applied Expert Systems. CRC Press.

Annexe

LES COMMANDES DE VP-EXPERT

* Actions :

--- instructions

--- Description : identifie le début d'un bloc d'action peut être assimilée au programme qui dirige la consultation.

* AUTOQUERY

--- instructions

--- Format : Autoquery;

Description : utilisé une fois dans un programme, cette instruction sert à interroger automatiquement l'utilisateur si le moteur d'inférence demande une valeur pour une variable; variable pour laquelle il n'y a pas de règles déclenchées ou pas d'instruction ASK.

* ASK

--- instructions

--- Format : Ask(variable): "texte";

Description : utilisé chaque fois que VP-EXPERT ne peut trouver des règles pour affecter une valeur à une variable.

Permet à l'utilisateur de fournir une réponse, éventuellement choisie dans une liste d'aide des instructions "CHOICES" ou "MENU". Cette réponse est alors affectée à la variable citée derrière le mot clé - ASK.

* BKCOLOR

--- instructions

--- Format : Bkcolor = (nombre-entier);

Description : fixe la couleur de fond de l'écran pendant l'exécution d'un programme. Les valeurs autorisées sont:

0 - NOIR 5 - MAGNETA

1 - BLEU 6 - BRUN

2 - VERT 7 - BLANC

3 - BLEU

4 - ROUGE

REMARQUE : sur un écran monochrome, les valeur 0 à 6 équivalent à un fond noir

* BECAUSE

--- mot-clé de règle

--- Format : BECAUSE : "TEXTE" ;

Description : placé à la fin d'une règle, il fournit des explications détaillés jusqu'a 1000 caractères, en réponse aux commandes WHY ? et HOW ?.

* CHOICES

--- instructions

--- Format : Choices (variable1, variable2, variable3,.....:valeur1, valeur2, valeur3,.....)

Description : fonctionnement en relation avec l'instruction ASK pour présenter à l'utilisateur un choix de valeurs affecté à la variable citée dans l'instruction

* CLS

- clause

Description : efface le texte contenu dans la fenêtre de consultation

* COLOR

- clause

--- Format : COLOR = (nombre entier)

nombre entier est compris entre 0 et 31

Description : fixe la couleur du texte affiché par les clauses.

* DISPLAY

--- clause

--- format : display "texte"

Description : cette clause peut être utilisée autant de fois qu'on le souhaite pendant consultation, sa fonction est d'afficher.

* EXECUTE

--- instruction

--- format : Execute;

Description : déclenche la consultation immédiate après l'exécution de la commande consult: commande que l'on trouve dans le menu de VP-EXPERT. Ceci se fait aussi par l'exécution de commande GO qui ne figure que dans le sous menu de consult.

* ENDOFF

--- instruction

--- format : Endoff;

Description : quand l'utilisateur doit effectuer un choix dans un menu amené par les clauses CHOICES ou MENU , il doit en général appuyer sur (RC) pour effectuer le choix, puis sur la touche "END" pour confirmer le choix.

L'utilisation de ENDOFF évite cette manipulation supplémentaire il suffit donc d'appuyer sur (RC) pour sélectionner une valeur.

* FIND

--- instruction

--- format : Find(variable);

Description : quand VP-EXPERT rencontre cette clause, il essaie de trouver une valeur pour la variable citée dans la clause ou même plusieurs valeurs si la variable est déclarée plural

* OR

--- operateur logique

--- format : (condition) or (condition)

* RULE

--- instruction

--- format : Rule (nom-de-règle)

IF (condition1) AND/OR

(condition2)

(etc) ;

THEN

(conclusion 1) (CNF n1)

(conclusion 2) (CNF n2)

(etc)

* PLURAL

--- instruction

--- format : Plurale (variable)....;

Description : quand VP-EXPERT rencontre une variable de ce type, il essaie de lui assigner autant de valeur que possible avant d'arrêter la recherche pour les autres variables, il s'arrête dès la première valeur trouvée.