

ALPHA ISSAGA DIALLO

**SÉLECTION AUTOMATIQUE DES MOTEURS ASYNCHRONES DANS LES  
ENTRAÎNEMENTS INDUSTRIELS**

Mémoire  
présenté  
à la Faculté des études supérieures  
de l'Université Laval  
pour l'obtention  
du grade de maître ès sciences (M.Sc)

Département de génie électrique et de génie informatique  
FACULTÉ DES SCIENCES ET GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL

DÉCEMBRE 1998

© Alpha Issaga Diallo 1998



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file Votre référence*

*Our file Notre référence*

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-38066-1

# Résumé

## Sélection automatique des moteurs asynchrones dans les entraînements industriels

**Alpha Issaga Diallo, 2ème cycle**  
**Professeur Philippe Viarouge**

Le projet concerne la mise au point d'une méthode systématique utilisant une approche experte pour le choix et le dimensionnement des moteurs asynchrones pour des applications spécifiques incluant: les pompes, les ventilateurs, les compresseurs, les convoyeurs et les engins de levage. Ce projet implique la modélisation analytique des caractéristiques couple - vitesse des charges entraînées et des moteurs asynchrones. La méthode est implantée sous forme d'un outil informatique convivial et exportable. Une méthodologie experte est développée afin de pallier au manque éventuel d'informations sur le cahier des charges spécifique, fournies par l'utilisateur. Dans ce cas, la méthode fournit un estimé conservateur des caractéristiques du moteur le mieux adapté aux contraintes du cahier des charges. L'outil mis au point est complété par une base de données de moteurs normalisés (NEMA).

# Avant-propos

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Électrotechnique, d'Électronique de Puissance et de Commande Industrielle (LEEPCI) du département de génie électrique de l'Université Laval. Il a été rendu possible grâce à la contribution des personnes morales et physiques dont je tiens à remercier dans ces quelques lignes.

Mes remerciements vont particulièrement à Philippe Viarouge, mon directeur de recherche, pour son support, sa collaboration, sa disponibilité et ses pertinentes remarques lors de la conception et de la réalisation de ce logiciel. Ses efforts louables, ces dernières semaines, pour l'amélioration du contenu de ce mémoire méritent également d'être mentionnés. Merci également à tout le personnel du laboratoire LEEPCI.

Je remercie mon épouse Fatoumata Diouldé et ma fille Néné Mariama d'avoir accepté de faire le déplacement. Leur présence à Québec m'a été d'une très grande utilité durant tout ce travail. La contribution, bien que courte, de ma fille Hadja Oumou n'est pas négligeable. Je leur suis reconnaissant pour la compréhension, la tolérance et le soutien moral

Que ma mère Hadja Oumou Baldé, mes sœurs Adama Sira, Fatimatou, Kadiatou, Aïssata, Néné Hawa, Mama, Néné Safi, mes frères Abdoulaye Baïlo, Hamzata, Thierno Oury, Amadou Oury et Mamoudou Béla trouvent ici tous mes remerciements.

C'est enfin le moment d'exprimer à la Compagnie des Bauxites de Guinée (CBG), qui m'a offert l'opportunité de suivre cette formation, l'expression de ma profonde gratitude.

**Je dédie ce travail à mon père Elhadj Boubacar et à mon oncle Abdoulaye "Niornton" qui, malheureusement, ne pourront pas me dire "Dyaarama seele, kori a tampoyaali ko feyyhiti ?" à mon retour à Séfouré.**

Que leurs âmes reposent en paix !

# Table des matières

RÉSUMÉ .....	II
AVANT-PROPOS .....	III
TABLE DES MATIÈRES .....	IV
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	I
<b>CHAPITRE I : PROBLÉMATIQUE DU CHOIX DES MOTEURS ÉLECTRIQUES DANS L'INDUSTRIE..</b>	<b>3</b>
1.1 IMPORTANCE DU CHOIX DES MOTEURS ÉLECTRIQUES DANS UNE ENTREPRISE.....	3
1.2 PRINCIPALES DIFFICULTÉS DE CHOIX DES MOTEURS ÉLECTRIQUES .....	4
1.3 UN OUTIL VERSATILE POUR LE CHOIX DES MOTEURS À INDUCTION, BASÉ SUR LA NORME NEMA .....	4
1.4 CLASSIFICATION DES MOTEURS ÉLECTRIQUES:.....	5
1.4.1 Moteurs à courant continu .....	6
1.4.2 Moteurs à courant alternatif.....	6
1.5 UTILISATION D'UN RÉDUCTEUR: .....	8
<b>CHAPITRE II : CAHIER DES CHARGES DES APPLICATIONS DU MOTEUR ASYNCHRONE ALIMENTÉ À FRÉQUENCE ET TENSION FIXE.....</b>	<b>9</b>
2.1 INTRODUCTION .....	9
2.2 CARACTÉRISTIQUES DE LA CHARGE MÉCANIQUE ENTRAÎNÉE .....	9
2.2.1 Données de la charge .....	9
2.2.2 Transmission .....	9
2.3 CARACTÉRISTIQUES DU SYSTÈME D'ALIMENTATION ÉLECTRIQUE .....	10
2.3.1 Tensions d'alimentation normalisées.....	11
2.3.2 Influence de la variation de la tension d'alimentation sur les performances du moteur asynchrone .....	11
2.3.3 Influence du déséquilibre des phases du réseau d'alimentation sur les performances du moteur asynchrone .....	15
2.3.4 Influence de la variation de la fréquence d'alimentation sur les performances du moteur asynchrone .....	16
2.4 INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT.....	16
2.4.1 Moteurs abrités ("Drip-proof") .....	17
2.4.2 Moteurs étanches aux éclaboussures ("Splash - proof").....	17
2.4.3 Moteurs blindés ("Totally enclosed, non ventilated") .....	17
2.4.4 Moteurs blindés avec ventilateur extérieur ("Totally enclosed, fan cooled").....	17
2.4.5 Moteurs anti-explosifs ("Explosion-proof") .....	18
<b>CHAPITRE III : MODÉLISATION DES CHARGES MÉCANIQUES ENTRAÎNÉES.....</b>	<b>19</b>
3.1 INTRODUCTION .....	19
3.2 VENTILATEURS .....	20
3.3 POMPES .....	21
3.4 COMPRESSEURS.....	23
3.5 CONVOYEURS .....	23
3.6 ENGINS DE LEVAGE .....	25
3.7 CHARGES COMPLEXES .....	26

<b>CHAPITRE IV : MODÉLISATION ET PERFORMANCES DU MOTEUR ASYNCHRONE .....</b>	<b>27</b>
4.1 MOTEUR À DOUBLE CAGE : CARACTÉRISTIQUE UNIVERSELLE .....	27
4.2 SCHÉMA MONOPHASÉ ÉQUIVALENT EN RÉGIME PERMANENT .....	27
4.3 DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES DE RÉGIME PERMANENT .....	30
4.3.1 Calcul du courant au stator .....	30
4.3.2 Calcul des courants au rotor.....	30
4.3.3 Calcul du couple électromagnétique.....	32
4.3.4 Calcul du facteur de puissance du moteur .....	33
4.3.5 Calcul de la puissance absorbée par le moteur.....	34
4.3.6 Calcul des pertes Joule au stator.....	34
4.3.7 Calcul des pertes Joule au rotor.....	35
4.3.8 Calcul de la puissance de sortie .....	35
4.3.9 Calcul du rendement du moteur .....	37
4.4 IDENTIFICATIONS DES MOTEURS NEMA .....	38
 <b>CHAPITRE V : CONCEPTION ET IMPLANTATION D'UN OUTIL INTERACTIF DE SÉLECTION ET D'ANALYSE DES MOTEURS ASYNCHRONES .....</b>	 <b>44</b>
5.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA MÉTHODE DE SÉLECTION.....	44
5.2 CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES DE LA CHARGE ENTRAÎNÉE.....	44
5.2.1 Expression de la caractéristique mécanique de la charge .....	44
5.2.2 Couple moyen de la charge ramené à l'arbre du moteur.....	45
5.2.3 Puissance requise par la charge.....	46
5.2.4 Estimation de l'inertie de la charge.....	46
5.3 CALCUL DES CARACTÉRISTIQUES DU MOTEUR NÉCESSAIRE .....	47
5.3.1 Calcul du nombre de pôles et de la vitesse de synchronisme du moteur.....	47
5.3.2 Estimation de l'inertie du moteur.....	47
5.3.3 Calcul de l'inertie maximale de la charge .....	48
5.3.4 Détermination de la puissance du moteur.....	49
5.3.5 Choix d'un moteur de la base de données intégrée. ....	49
5.4 CALCUL DES PERFORMANCES AU COURS DU DÉMARRAGE.....	49
5.4.1 Durée de démarrage.....	50
5.4.2 Durée de démarrage maximale admissible .....	51
5.4.3 Énergie dissipée dans le moteur lors du démarrage.....	52
5.4.4 Énergie dissipée maximale admissible lors du démarrage .....	52
5.4.5 Variation de la vitesse de l'entraînement dans le temps .....	53
5.4.6 Variation du courant du moteur dans le temps.....	54
5.4.7 Critères de choix du moteur .....	54
5.5 CARACTÉRISTIQUES EN RÉGIME PERMANENT .....	55
5.5.1 Courants .....	55
5.5.2 Couples.....	55
5.5.3 Pertes Joule.....	56
5.5.4 Rendement.....	56
5.5.5 Facteur de puissance .....	57
5.6 RAPPORT COMPARATIF DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS .....	57
 <b>CHAPITRE VI : GUIDE DE L'UTILISATEUR .....</b>	 <b>59</b>
6.1 DESCRIPTION DE L'INTERFACE UTILISATEUR .....	59
6.1.1 La barre des menus.....	60
6.1.2 La barre d'outils.....	67
6.1.3 La barre de suivi des tâches.....	67
6.1.4 Les boîtes de dialogue.....	68
6.2 PROCÉDURE DE SÉLECTION D'UN MOTEUR AVEC "MOTORSizer" .....	73

<b>CHAPITRE VII : EXEMPLES D'APPLICATION .....</b>	<b>74</b>
7.1 EXEMPLE 1: ENTRAÎNEMENT D'UNE POMPE CENTRIFUGE .....	74
7.1.1 <i>Cahier des charges</i> .....	74
7.1.2 <i>Entrée des données dans le logiciel</i> .....	74
7.1.3 <i>Détermination du moteur requis</i> .....	75
7.1.4 <i>Rapport comparatif des différents scénarios</i> .....	81
7.2 EXEMPLE 2: ENTRAÎNEMENT D'UN COMPRESSEUR À PISTONS .....	83
7.2.1 <i>Cahier des charges</i> .....	83
7.2.2 <i>Entrées des données dans le logiciel</i> .....	83
7.2.3 <i>Détermination du moteur requis</i> .....	84
7.2.4 <i>Rapport comparatif des différents scénarios</i> .....	88
7.3 EXEMPLE 3 : ENTRAÎNEMENT D'UN VENTILATEUR .....	89
7.3.1 <i>Cahier des charges</i> .....	89
7.3.2 <i>Entrées des données dans le logiciel</i> .....	89
7.3.3 <i>Détermination du moteur requis</i> .....	90
7.3.4 <i>Rapport comparatif des différents scénarios</i> .....	99
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	101
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	103

## Liste des figures

Figure 2.1 Charge – Réducteur - Moteur.....	10
Figure 2.2 Circuit monophasé équivalent simplifié d'un moteur asynchrone.....	11
Figure 2.3 Variation des caractéristiques du moteur asynchrone en fonction de la tension d'alimentation.....	14
Figure 2.4 Facteur de réduction de la puissance demandée au moteur en fonction du déséquilibre de tension.....	15
Figure 3.1 Caractéristique Couple – Vitesse d'une charge quadratique.....	20
Figure 3.2 Données d'une charge de type Ventilateur.....	21
Figure 3.3 Caractéristique couple – vitesse d'une charge à couple constant.....	22
Figure 4. 1 Circuit monophasé équivalent d'un moteur asynchrone à double cage.....	27
Figure 4. 2 Circuit monophasé équivalent d'un moteur asynchrone à double cage regroupant les impédances complexes de chaque branche.....	28
Figure 4.3 Circuit équivalent d'un moteur asynchrone à double cage avec l'impédance totale des deux cages du rotor.....	29
Figure 4. 4 Circuit équivalent d'un moteur asynchrone à double cage avec l'impédance Thevenin $Z_e$ et la tension Thevenin $V_e$ aux bornes du rotor.....	29
Figure 4. 5 Facteur de puissance en fonction de la puissance et du nombre de pôles.....	40
Figure 5.1 Boîte de dialogue d'estimation de l'inertie de la charge.....	46
Figure 5.2 Calcul du temps de démarrage.....	51
Figure 5.3 Variation de la vitesse de l'entraînement dans le temps.....	53
Figure 5.4 Variation du courant du moteur lors du démarrage.....	54
Figure 5.5 Courants du moteur.....	55
Figure 5.6 Couples du moteur et de la charge.....	56
Figure 5.7 Puissance d'entrée, puissance de sortie et pertes d'énergie dans le moteur en fonction de la vitesse.....	56
Figure 5.8 Rendement du moteur en fonction de la vitesse.....	57
Figure 5.9 Variation du facteur de puissance en fonction de la vitesse.....	57
Figure 5.10 Tableau comparatif des différents scénarios.....	58
Figure 6. 1 Interface utilisateur de MotorSizer.....	60
Figure 6. 2 Menu "Fichier".....	61
Figure 6. 3 Menu "Projet".....	61
Figure 6. 4 Sous - menu "Projet /Charge".....	62
Figure 6. 5 Sous – menu "Projet/Transmission".....	62
Figure 6. 6 Sous – menu "Projet/Démarrage".....	63
Figure 6. 7 Menu "Affichage".....	63
Figure 6. 8 Menu "Choix des moteurs".....	64
Figure 6. 9 Menu "Analyse".....	64
Sous - menu "Analyse / Démarrage".....	65
Figure 6. 11 Sous - menu "Analyse / Régime permanent".....	65
Figure 6. 12 Menu "Outils".....	66
Figure 6. 13 Menu "Fenêtres.".....	66
Figure 6. 14 Menu ?.....	67
Barre d'outils.....	67
Figure 6. 16 Barre de suivi des tâches.....	68
Figure 6. 17 Boîte de dialogue pour une charge de type "Ventilateur".....	69
Figure 6. 18 Boîte de dialogue pour une charge de type "Pompe".....	69
Figure 6. 19 Boîte de dialogue pour une charge de type "Compresseur".....	70
Figure 6. 20 Boîte de dialogue pour une charge de type "Convoyeur à bande".....	70
Figure 6. 21 Boîte de dialogue pour une charge de type "Engin de levage".....	71
Boîte de dialogue "Bibliothèque des charges".....	71
Figure 6. 23 Boîte de dialogue "Bibliothèque des transmissions".....	71
Boîte de dialogue "Changement des paramètres des scénarios".....	72
Figure 6. 25 Boîte de dialogue "Paramètres moteur".....	72
Figure 6. 26 Boîte de dialogue "Choix du moteur dans la bibliothèque".....	73
Figure 7. 1 Exemple 1 - Données de la pompe centrifugeDétermination du moteur requis.....	74
Figure 7. 2 Exemple 1 – Paramètres du moteur calculé.....	75
Figure 7. 3 Exemple 1 – Paramètres du moteur du scénario 1.....	76



Figure 7. 4 Exemple 1, scénario 1 - Variations de la vitesse au cours du démarrage.....	76
Figure 7. 5 Exemple 1, scénario 1 - Caractéristiques couple – vitesse .....	77
Figure 7. 6 Exemple 1 – Paramètres du moteur du scénario 2.....	78
Figure 7. 7 Exemple 1, scénario 2 - Variations de la vitesse au cours du démarrage.....	78
Figure 7. 8 Exemple 1, scénario 2 caractéristiques couple – vitesse .....	79
Figure 7. 9 Exemple 1, scénario 3 – paramètres du moteur.....	80
Figure 7. 10 Exemple 1, scénario3 – variation de la vitesse au cours du démarrage.....	80
Figure 7. 11 Exemple 1, scénario 3 – caractéristiques couple – vitesse .....	81
Figure 7. 12 Exemple 1, tableau comparatif des différents scénarios .....	82
Figure 7. 13 Exemple 2 – saisie des paramètres du réseau électrique d'alimentation .....	83
Figure 7. 14 Exemple 2 – Saisie des données du compresseur .....	84
Figure 7. 15 Exemple 2 – Paramètres du moteur calculé .....	84
Figure 7. 16 Exemple 2 – Paramètres du moteur du scénario 1 .....	85
Figure 7. 17 Exemple 2, scénario 1 – Variation de la vitesse au cours du démarrage.....	85
Figure 7. 18 Exemple 2 – Paramètres du moteur du scénario 2.....	86
Figure 7. 19 Exemple 2, scénario 2 – Variations de la vitesse lors du démarrage .....	87
Figure 7. 20 Exemple 2, scénario 2 – Variations du courant du moteur lors du démarrage .....	87
Figure 7. 21 Exemple 2, scénario 2 – Caractéristiques de performance en régime permanent.....	88
Figure 7. 22 Exemple 2 – Tableau comparatif des différents scénarios .....	89
Figure 7. 23 Exemple 3 – Saisie des données du ventilateur .....	90
Figure 7. 24 Exemple 3 – Paramètres du moteur calculé .....	90
Figure 7. 25 Exemple 3 – Paramètres du moteur du scénario 1 .....	91
Figure 7. 26 Exemple 3, scénario 1 – Variation de la vitesse au cours du démarrage.....	91
Figure 7. 27 Exemple 3, scénario 3 – caractéristiques couple – vitesse .....	92
Figure 7. 28 Exemple 3 – Paramètres du moteur du scénario 2.....	93
Figure 7. 29 Exemple 3, scénario 2 – Variations de la vitesse lors du démarrage .....	93
Figure 7. 30 Exemple 3, scénario 3 – Saisie des données de la transmission .....	96
Figure 7. 31 Exemple 3, scénario 3 – Variations de la vitesse lors du démarrage .....	96
Figure 7. 32 Exemple 3, scénario 4 – Saisie des données de la transmission .....	97
Figure 7. 33 Exemple 3, scénario 4 – Variations de la vitesse lors du démarrage .....	98
Figure 7. 34 Exemple 3 – Tableau comparatif des différents scénarios .....	99

## Liste des tableaux

Tableau 3.1 Puissance N1 requise pour entraîner un tapis de longueur L et de largeur l à une vitesse de 100 m/min.....	25
Tableau 3.2 Puissance N2 requise pour entraîner une charge de 100 tonnes /heure horizontalement.....	25
Tableau 3.3 Puissance N3 requise pour élever une charge de 100 tonnes /heure à une altitude H.....	25
Tableau 4.1 Paramètres du circuit monophasé équivalent d'un moteur asynchrone.....	28
Tableau 4.2 Valeurs moyennes du facteur de puissance issues de l'étude statistique sur la base de données de moteurs manufacturés.....	41
Tableau 4.3 Valeurs moyennes du glissement nominal trouvées.....	42
Tableau 7.1. Caractéristiques des poulies pouvant être utilisées pour les puissances de 10 à 25 HP.....	95
Tableau 7.2. Inertie des poulies pouvant être utilisées pour les puissances de 10 à 25 HP.....	95
Tableau 7.3. Rendement et vitesse périphérique de la courroie.....	95

# Introduction générale

Dans les dernières années, un effort important a été entrepris dans le domaine des économies d'énergie électrique au niveau des processus industriels aussi bien qu'au niveau domestique. Mis à part l'emploi systématique de la vitesse variable pour l'optimisation du rendement et de l'efficacité des procédés, les organismes gouvernementaux ont incité les manufacturiers de moteurs à concevoir des dispositifs présentant un rendement amélioré. Mais la planification énergétique d'une usine passe par une connaissance détaillée du comportement, de l'efficacité et de la fiabilité des entraînements qui y sont implantés. Il ne suffit pas de remplacer un moteur classique par un moteur "haute efficacité" pour nécessairement améliorer le rendement du procédé. La connaissance précise du comportement et du cycle de fonctionnement des charges entraînées constitue de loin le problème de base le plus complexe à résoudre pour l'ingénieur en électromécanique.

Sur un autre plan, la fiabilité des procédés repose en grande partie sur celle des nombreux entraînements utilisés dans l'usine. Les problèmes de compatibilité électromagnétique dans les réseaux de distribution industriels se sont considérablement compliqués avec l'arrivée massive de l'électronique de puissance et la multiplication des entraînements utilisant ces technologies. Le moteur asynchrone alimenté à fréquence fixe demeure utilisé dans un très grand nombre d'applications. Les surintensités au démarrage de tels entraînements doivent être contrôlés avec précision lors de la conception ou de l'extension d'un réseau d'usine.

Certains entraînements occupent souvent une place stratégique dans un procédé industriel ou une usine. Leurs arrêts pour raison de défaut ou de maintenance peuvent provoquer des pertes catastrophiques sur le plan financier. On assiste donc aujourd'hui dans le domaine de la recherche et des applications industrielles à un effort sans précédent sur la mise au point de méthodes de dimensionnement précises des entraînements, et de dispositifs de maintenance préventive. Le Laboratoire d'Électrotechnique, d'Électronique de Puissance et de Commande Industrielle (LEEPCI) du département de Génie Électrique et de Génie Informatique de l'Université Laval participe à cet effort.

Dans le cadre du travail de thèse présenté dans ce mémoire, une recherche a été menée sur la mise au point d'une méthode systématique de sélection des moteurs asynchrones pour des applications à tension et fréquence fixe. L'optimisation du rendement, la minimisation des investissements au niveau du moteur, du réducteur, du réseau d'alimentation, de la fiabilité et de la maintenance

passent en premier lieu par une sélection judicieuse d'un moteur adapté à l'application. Ce problème complexe est souvent résolu par les connaissances expertes d'une personne ressource ayant raffiné son expérience au cours des années. Il est souvent résolu en première approximation par un surdimensionnement systématique, qui malheureusement peut faire apparaître à court, moyen ou long terme des surprises désagréables au niveau de la consommation, du facteur de puissance et de la fiabilité du réseau d'alimentation. Les fabricants de moteurs mettent à la disposition de leurs clients des notes d'application et même des logiciels de choix spécifiques à leurs produits. Dans la grande majorité des cas, ces données ne sont pas toujours suffisantes pour résoudre les problèmes posés dans la pratique à l'ingénieur, et des problèmes supplémentaires apparaissent lorsqu'on cherche à comparer des produits de fabricants différents, surtout si les données fournies par les uns et les autres ne sont pas les mêmes. La norme NEMA impose un certain nombre de caractéristiques minimales aux moteurs disponibles sur le marché. Mais une analyse détaillée de ces normes montre que des données importantes telles que le facteur de puissance et le courant nominal par exemple peuvent évoluer d'un fabricant à l'autre. Ces différences expliquent souvent les différences de prix relevées pour un moteur de même numéro de carcasse NEMA ("Frame").

Il nous a paru intéressant de mettre à la disposition de la communauté un outil convivial, muni d'une base minimale de données expertes qui permet d'effectuer une analyse réaliste de divers scénarios pour des applications industrielles typiques. Afin de s'affranchir des problèmes liés aux caractéristiques des moteurs de tel ou tel fabricant, nous avons décidé de mettre au point une base de données typique de moteurs vérifiant les contraintes de la norme NEMA et présentant des caractéristiques moyennes représentatives des moteurs actuellement sur le marché. Cette base de données est donc basée sur une analyse détaillée de la norme NEMA et sur l'analyse statistique d'une base de données de moteurs actuellement commercialisés par plus de 10 fabricants.

Ce mémoire présente successivement la problématique détaillée de la sélection des moteurs asynchrones pour les applications à fréquence et tension fixe, la modélisation utilisée pour les charges entraînées typiques et le moteur asynchrone, la conception de la méthode et enfin sa réalisation sous forme d'un logiciel interactif convivial. Le dernier chapitre présente quelques exemples qui illustrent les performances de l'outil qui a été réalisé.

## **Problématique du choix des moteurs électriques dans l'industrie**

### **1.1 Importance du choix des moteurs électriques dans une entreprise**

Dans le but d'obtenir une bonne performance du système, la première étape de tout projet d'entraînement électromécanique consiste à bien choisir le moteur électrique qui répond le mieux aux exigences de la charge entraînée [7]

Lors du choix du moteur, on considère, le plus souvent, seulement le prix d'achat et le temps d'amortissement. Il existe cependant d'autres facteurs assez complexes qui déterminent les coûts et bénéfices à long terme de l'installation électromécanique. Ces facteurs peuvent être par exemple le type de charge, les coûts du cycle de vie (coûts d'entretien, rendement, garantie...), les risques financiers, les bruits, l'analyse des bénéfices, la tarification etc.

Choisir le moteur électrique le moins coûteux à l'achat ne signifie pas toujours trouver le moteur le moins cher pouvant effectuer le travail à long terme. En effet, les coûts d'opération peuvent être 4 à 10 fois supérieurs au prix d'achat; lorsqu'ils ne sont pas pris en compte, l'industrie est souvent confrontée à des coûts de production supplémentaires qu'elle doit supporter pendant les 15 à 20 ans correspondant à la durée de vie du moteur.

Un moteur sous - dimensionné fonctionnera (s'il fonctionne d'ailleurs!) à un régime thermique élevé qui entraînera sa destruction précoce par suite du vieillissement accéléré de son isolation soumise à des températures supérieures à celles de sa classe.

## 1.2 Principales difficultés de choix des moteurs électriques

Le problème essentiel du choix optimal des moteurs électriques pour une application donnée concerne le manque d'informations sur la charge mécanique entraînée. Des paramètres importants tels que l'inertie, la caractéristique couple - vitesse, la caractéristique puissance – vitesse de la charge entraînée sont le plus souvent mal connus et de manière générale non disponibles dans les spécifications fournies par le client.

Une pratique assez répandue consécutive à ce manque de données précises sur la charge consiste à choisir un moteur électrique ayant une marge de réserve élevée. Malheureusement, un moteur à induction fonctionnant à faible charge présente un mauvais rendement et un facteur de puissance relativement bas. Il en résulte un gaspillage de l'énergie électrique : rappelons qu'environ 80% de l'électricité est consommée dans l'industrie par les moteurs électriques [13]

Pour pallier à ce manque de données, on utilise une approche experte et empirique par l'intermédiaire de personnes ressources qui utilisent leur expérience pour estimer les paramètres importants de la charge entraînée, requis pour la sélection du moteur.

Certains fabricants de moteurs électriques développent des logiciels qui assistent l'utilisateur lors du choix du moteur. Mais la plupart de ces logiciels, en plus d'être seulement adaptés aux moteurs du fabricant en question, supposent que l'utilisateur possède toutes les données pertinentes de la charge entraînée.

## 1.3 Un outil versatile pour le choix des moteurs à induction, basé sur la norme NEMA

NEMA (National Electrical Manufacturers Association), née en 1926 de la fusion de *Electric Power Club* et de *Associated Manufacturers of Electrical Supplies*, est actuellement une des plus grandes organisations de standardisation dans le monde. Elle regroupe environ 600 fabricants de matériel électrique et comprend presque soixante-dix sections spécialisées réparties en neuf grandes divisions [17]. La principale responsabilité de chaque section est le développement et la mise à jour des standards concernant son produit spécifique. Nous avons utilisé dans nos travaux, les standards MG 1 conçus par la section *Moteurs et Générateurs*.

Grâce à la standardisation, tous les moteurs NEMA de même grosseur de carcasse ("frame"), présentent, indépendamment du fabricant, des caractéristiques de performance supérieures ou égales

à un certain seuil fixé par la norme NEMA. C'est là une garantie intéressante que la norme offre aux utilisateurs des moteurs. Un moteur asynchrone de carcasse standard 256T commercialisé par un fabricant peut être remplacé par le moteur de même numéro de carcasse d'un autre fabricant sans craintes majeures. Il faut néanmoins se garder d'affirmer que les deux moteurs présenteront les mêmes performances notamment au niveau du facteur de puissance qui n'est pas une grandeur normalisée.

Afin de fournir une assistance à l'ingénieur confronté au choix d'un moteur, nous avons mis au point dans le cadre de ce travail un outil interactif basé sur les performances minimales des moteurs asynchrones portant l'accréditation de la norme NEMA et alimentés à fréquence fixe. Cette approche générale permet de concevoir un outil indépendamment des caractéristiques spécifiques des moteurs commercialisés par un manufacturier donné, puisqu'il est applicable à tous les moteurs asynchrones standardisés selon NEMA.

Une fois le moteur à performances minimales choisi, l'utilisateur peut cibler un fabricant suivant les avantages qu'il juge importants (performances, prix, garantie...) pour sa décision d'achat définitive.

L'objectif principal de ce travail consiste donc à développer un outil interactif simple permettant à une personne, pas nécessairement experte dans le domaine, de bien dimensionner un moteur asynchrone alimenté à fréquence et tension fixes, pour entraîner diverses charges conventionnelles telles que: un ventilateur, une pompe, un compresseur, un convoyeur ou un engin de levage.

Dans un environnement graphique convivial, à travers des menus déroulants et des boîtes de dialogues, l'utilisateur spécifie les données connues de son projet dans l'ordre qui lui convient. Le programme estime alors, à l'aide d'une approche experte simplifiée, les paramètres manquants suite à un dialogue convivial avec l'utilisateur.

En plus des considérations purement économiques, l'utilisation d'un moteur électrique non adapté aux exigences de la charge entraînée et aux conditions environnementales, peut avoir des conséquences néfastes sur la sécurité des personnes et des biens de l'entreprise.

Le processus de sélection du moteur électrique, pour une application donnée, commence toujours par le choix du type du moteur.

#### **1.4 Classification des moteurs électriques:**

Suivant les exigences de la commande (réglage de vitesse, capacité d'accélération...), le coût du

moteur, la puissance, le couple développé pour une taille donnée, la durée de vie et la fiabilité, plusieurs solutions sont envisageables au niveau du type de moteur à utiliser dans un application [13] .

#### 1.4.1 Moteurs à courant continu

L'usage de ces moteurs est restreint, car la distribution se fait à courant alternatif. Cependant, pour certaines applications il est parfois avantageux d'installer des convertisseurs transformant le courant alternatif en courant continu et d'utiliser des moteurs à courant continu. La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu de leur vitesse [5] .

Par rapport aux moteurs alternatifs, ils présentent une puissance massique inférieure, un coût plus élevé et une robustesse moindre à cause de la fragilité de leur collecteur [4] .

Les moteurs à courant continu sont limités en puissance par les performances de leurs collecteurs qui ont une limite de puissance commutable : ainsi la puissance ne dépasse pas 4 MW pour une vitesse faible et la vitesse ne dépasse pas 4 000 tours / minute pour une puissance faible [4] .

Suivant le mode d'excitation, les moteurs à courant continu se divisent en :

- Moteurs à excitation indépendante ;
- Moteurs à excitation shunt ;
- Moteurs à excitation série ;
- Moteurs à excitation composée ("compound").

Ces divers modes d'excitation permettent d'adapter les caractéristiques électromécaniques de ces moteurs à des charges spécifiques (moteur à excitation série pour la traction électrique par exemple.)

#### 1.4.2 Moteurs à courant alternatif

Les moteurs à courant alternatif sont les moteurs les plus utilisés dans l'industrie. On distingue les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones.

##### *a ) - Moteurs synchrones*

Pour les applications utilisant une alimentation à fréquence fixe, les moteurs synchrones sont surtout utilisés pour les grandes puissances et les vitesses lentes. Il s'agit effectivement du type de

moteur le plus avantageux économiquement au dessus de quelques mégawatts [4] .

Dans le domaine des puissances moyennes, le moteur synchrone est difficilement concurrentiel économiquement avec le moteur asynchrone à cage, pour les applications utilisant une alimentation à fréquence fixe, à moins que l'application exige une vitesse rigoureusement constante [4] .

Dans les faibles puissances, le moteur synchrone est très employé, dans les applications à fréquence fixe telles que celles des moteurs d'horloge ou de programmeurs mécaniques en électroménager [4] .

Dans le domaine de la vitesse variable, le moteur synchrone est utilisé dans le domaine des puissances fractionnaires, subfractionnaires et très élevées [4] .

Associé à des convertisseurs statiques d'électronique de puissance qui permettent de l'alimenter à fréquence variable, le moteur synchrone est présent dans de nombreux types d'entraînements à vitesse variable ("AC drives"). Dans la majorité de ces applications, il s'agit d'un moteur synchrone à aimants permanents qui présente l'avantage supplémentaire de permettre l'élimination totale des contacts mécaniques (bagues et balais pour le système d'excitation bobiné classique).

Les moteurs synchrones surexcités sont aussi utilisés dans l'industrie pour l'amélioration du facteur de puissance de l'installation (compensateurs synchrones).

### *b ) - Moteurs asynchrones*

Les moteurs asynchrones ou moteurs d'induction sont de très loin les moteurs électriques les plus employés dans l'industrie dans le domaine des faibles et des moyennes puissance. Ils possèdent en effet plusieurs avantages majeurs au niveau de la simplicité, de la robustesse, de la fiabilité, du coût et de l'entretien.

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil s'impose dans toutes les applications ne nécessitant pas de réglage précis de la vitesse.

Les récents progrès technologiques dans le domaine de l'électronique de puissance ont fait baisser de manière importante le prix des convertisseurs statiques. C'est ce qui explique l'utilisation de plus en plus importante des moteurs asynchrones alimentés par des convertisseurs statiques dans les entraînements industriels à vitesse variable.



## **1.5 Utilisation d'un réducteur:**

Une fois le type de moteur choisi, la seconde étape du processus de sélection consiste à déterminer sa taille. Celle-ci est déterminée par le couple moyen ou efficace et le couple maximum exigés par la charge entraînée vue de l'arbre du moteur. Pour une même charge, la présence ou non d'un réducteur modifie la valeur du couple requis par le moteur d'entraînement.

Quand on utilise un réducteur, il faut tenir en compte des remarques suivantes :

- la caractéristique couple - vitesse du moteur requis est altérée ;
- des contraintes radiales et axiales supplémentaires peuvent apparaître sur les roulements du moteur, réduisant ainsi leur durée de vie.

A la lumière de la brève analyse précédente, il ressort que :

Le meilleur moteur électrique, pour une application donnée n'est pas seulement celui qui est le moins cher et dont le coût s'amortit rapidement mais celui qui combine tous les facteurs cités plus haut de la manière la plus profitable.

## **Cahier des charges des applications du moteur asynchrone alimenté à fréquence et tension fixe**

### **2.1 Introduction**

Pour sélectionner un moteur asynchrone adapté à une application donnée, il faut tenir compte des exigences de la charge mécanique entraînée, des données de l'accouplement, des caractéristiques du réseau d'alimentation électrique dont on dispose sur le site et de l'environnement de travail du moteur.

Dans ce chapitre, nous allons examiner les différents paramètres à considérer dans le processus de sélection d'un moteur asynchrone.

### **2.2 Caractéristiques de la charge mécanique entraînée**

#### **2.2.1 Données de la charge**

Pour choisir le moteur asynchrone d'entraînement, il est essentiel de bien connaître les caractéristiques mécaniques pertinentes de la charge comme:

- la vitesse nominale de la charge ;
- les variations du couple résistant en fonction de la vitesse (le couple de démarrage en particulier);
- le moment d'inertie de la charge ;
- le facteur d'utilisation.

#### **2.2.2 Transmission**

Les paramètres de la transmission à considérer sont le rapport de réduction, le rendement et l'inertie du réducteur.

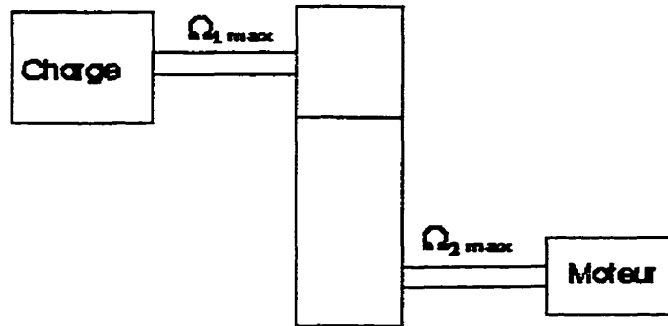


Figure 2.1 Charge – Réducteur - Moteur

Le rapport de transmission  $R$  du réducteur est défini par le quotient de la vitesse maximale  $\Omega_{1\max}$  de l'arbre du réducteur côté charge sur la vitesse maximale du moteur  $\Omega_{2\max}$  :

$$R = \frac{\Omega_{1\max}}{\Omega_{2\max}} \quad (2.1)$$

Le rendement de la transmission  $\eta_r$  est le rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée du réducteur; il indique les pertes d'énergie dans le réducteur.

L'inertie de la transmission représente le moment d'inertie des parties tournantes du réducteur ramené sur l'arbre du moteur.

Pour ramener le couple résistant de la charge  $T_r$  sur l'arbre du moteur, on utilise l'équation suivante :

$$T_{r\_ramené} = \frac{T_r * R}{\eta_r} \quad (2.2)$$

L'inertie de la charge  $J_{ch}$  est ramenée à l'arbre du moteur à l'aide de l'équation :

$$J_{ch\_ramené} = J_{ch} * R^2 \quad (2.3)$$

### 2.3 Caractéristiques du système d'alimentation électrique

Un moteur asynchrone est un dispositif électromagnétique qui est conçu pour avoir un rendement maximum au point nominal de fonctionnement. La tension et la fréquence du réseau fixent, en

première approximation, le niveau du flux magnétique dans le moteur. Ceci explique la forte sensibilité des caractéristiques de performances du moteur vis à vis de la qualité du réseau d'alimentation (variation de la tension, variation de la fréquence, déséquilibre de tension, influence des harmoniques, etc.).

### 2.3.1 Tensions d'alimentation normalisées

Les tensions d'alimentation ligne - ligne triphasées sont standardisées par la norme NEMA MG 1-10.30. Elles sont fixées à 115, 200, 230, 460, 575, 2 300, 4 000, 4600 et 6 600 V pour la fréquence de 60 Hz, à 220 et 380 V pour la fréquence 50 Hz. La norme MG 1-12.44 tolère une variation de plus ou moins 10% à partir de ces valeurs standardisées.

### 2.3.2 Influence de la variation de la tension d'alimentation sur les performances du moteur asynchrone

Pour illustrer l'influence de la tension et de la fréquence du réseau électrique d'alimentation sur les performances du moteur asynchrone, déterminons l'équation de la caractéristique couple - vitesse à l'aide du schéma simplifié de Figure 2.2 Dans ce schéma nous avons supposé que toute la puissance absorbée par le moteur est transmise au rotor en négligeant les pertes magnétiques et les pertes Joule statoriques.

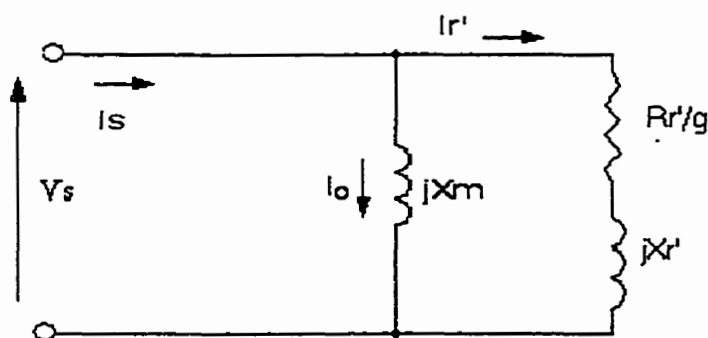


Figure 2.2 Circuit monphasé équivalent simplifié d'un moteur asynchrone

La puissance absorbée par le moteur asynchrone  $P_{absorbée}$  est égale alors à la somme de la puissance électromagnétique  $P_{em}$  et des pertes Joule au rotor  $P_{jrotor}$  :

$$P_{absorbée} = P_{jrotor} + P_{em} \quad (2.4)$$

Du schéma équivalent de la Figure 2.2 on a:

$$P_{\text{absorbée}} = 3 * \frac{R'_r}{g} * I_r'^2 \quad (2.5)$$

En remplaçant dans l'équation (2.4)  $P_{\text{Jou}}'$  et  $P_{\text{ém}}$  par leur valeurs on obtient:

$$P_{\text{absorbée}} = 3 * R'_r * I_r'^2 + T_{\text{ém}} * \Omega \quad (2.6)$$

Par identification de (2.5) et (2.6) on déduit le couple électromagnétique:

$$T_{\text{ém}} = \frac{3 * P}{\omega_s} * \frac{R'_r}{g} * I_r'^2 \quad (2.7)$$

Le courant du rotor peut être obtenue à partir de la Figure 2.2 :

$$I_r' = \frac{V_s}{\sqrt{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + X_r'^2}} \quad (2.8)$$

L'expression totale du couple électromagnétique simplifiée est:

$$T_{\text{ém}} = \frac{3 * P}{\omega_s} * V_s^2 * \frac{R'_r / g}{\left(\frac{R'_r}{g}\right)^2 + X_r'^2} \quad (2.9)$$

Le courant de démarrage  $I_{sd}$  est :

$$I_{sd} = \frac{V_s}{|Z_{sd}|} \quad (2.10)$$

avec

$$Z_{sd} = jX_m \parallel (R_r' + jX_r')$$

Le courant absorbé par le moteur est de la forme :

$$I_s = \sqrt{(I_r' \cdot \cos \varphi')^2 + (I_0 + I_r' \cdot \sin \varphi')^2} \quad (2.11)$$

avec

$$\tan \varphi' = \frac{g \cdot X_r'}{R_r'}$$

Le courant à vide est :

$$I_0 = \frac{V_s}{X_m} \quad (2.12)$$

Pour une alimentation équilibrée à fréquence fixe, les moteurs sont conçus pour bien fonctionner, lorsque la variation de la tension d'alimentation reste dans les limites de la norme MG 1-12.44 (cas des moteurs NEMA). Toute excursion de tension en dehors de ces limites entraîne une chute des caractéristiques de performance du moteur (voir Figure 2.3 ) et une augmentation de son élévation de température (« temperature rise »).

La variation de la tension d'alimentation a pour effet, le changement de la puissance propre (« proper rating ») du moteur par le carré de la variation de la tension d'alimentation (cf. équation (2.9)). Un moteur de 10 HP, par exemple, est équivalent à un moteur de 12 HP lorsqu'il est alimenté à +10% de sa tension nominale et à 8 HP, lorsqu'il est alimenté à -10% [16] .

Le courant de démarrage et le courant à vide augmentent proportionnellement à la tension d'alimentation d'après (2.10) et (2.11).

Dans le cas d'une charge à couple constant, une augmentation de la tension d'alimentation se traduit par une diminution du glissement. Une diminution de la tension se traduit quant à elle par une augmentation du glissement.

Dans un premier temps, la diminution du glissement compense l'augmentation de la tension au niveau de la valeur efficace du courant du rotor (cf. (2.8) ). Le courant total absorbé peut ainsi, suivant les caractéristiques du moteur, diminuer légèrement (cf. Figure 2.3 ). Lorsque la tension continue d'augmenter, l'augmentation du courant à vide due à la saturation devient prépondérante et le courant total absorbé augmente rapidement (cf. Figure 2.3 ). Dans le cas d'une diminution de tension, l'augmentation du glissement provoque une augmentation du courant au rotor qui ne peut pas être compensée par la diminution du courant à vide.

Le même type de raisonnement s'applique aux variations du facteur de puissance et du rendement également présentés sur la même figure.

Notons que tous les types de moteurs qui ont été et qui sont actuellement construits ne réagissent pas de la même manière aux variations de la tension d'alimentation. En effet les premiers moteurs NEMA et les «U frame motor» étaient conçus pour fonctionner avec un niveau d'induction relativement peu élevé de telle sorte qu'ils tolèrent une plus grande variation de la tension sans échauffement excessif. Les «Standard efficiency T frame», conçus pour une meilleure utilisation du fer, ont des densités de flux magnétique plus élevées et sont beaucoup plus susceptibles aux variations de la tension d'alimentation. Les «High efficiency motors» sont conçus avec des niveaux d'induction moins élevés que les «Standard efficiency T frame motors»; ils sont ainsi moins susceptibles aux variations de la tension d'alimentation [16].

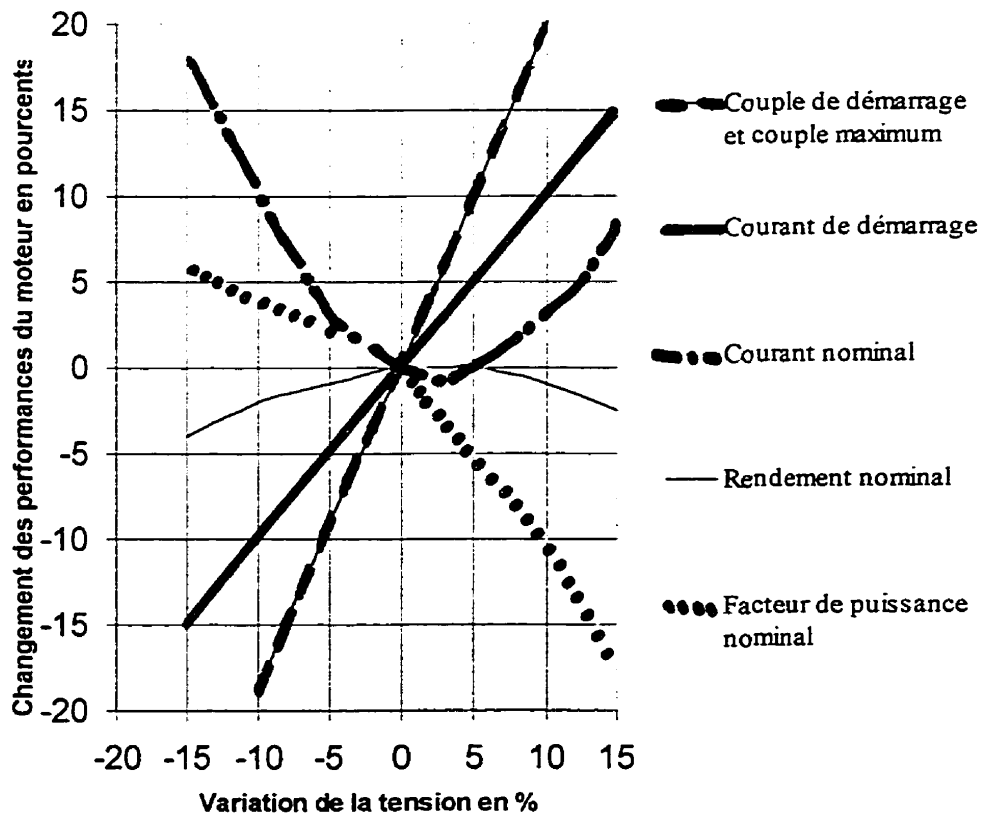


Figure 2.3 Variation des caractéristiques du moteur asynchrone en fonction de la tension d'alimentation

### 2.3.3 Influence du déséquilibre des phases du réseau d'alimentation sur les performances du moteur asynchrone

Le réseau d'alimentation comporte toujours un déséquilibre de 1,0 à 2,5 %. Ce déséquilibre sur le réseau se traduit par la présence d'une tension de séquence inverse. L'impédance du moteur en séquence inverse est donc faible ( $g > 1$ ) et même inférieure à l'impédance du moteur au démarrage ( $g = 1$ ). Le courant inverse est donc important. En réalité, l'effet de peau augmente l'impédance du rotor pour cette fréquence proche de 120 Hz, de sorte que l'impédance du moteur en séquence inverse est presque identique à son impédance au démarrage. Le déséquilibre de courant du moteur est généralement de 5 à 6 fois plus élevé que le déséquilibre de tension sur l'alimentation dans le cas d'un moteur conventionnel, mais il peut être exceptionnellement plus élevé pour un moteur à courant de démarrage élevé.

La norme NEMA MG1-12.45 recommande que le déséquilibre des phases ne dépasse pas 1%. Pour réduire les dommages causés aux moteurs fonctionnant dans des systèmes d'alimentation déséquilibrés, NEMA a développé un facteur de réduction de la puissance demandée au moteur ("derating factor"). (Voir Figure 3.2).

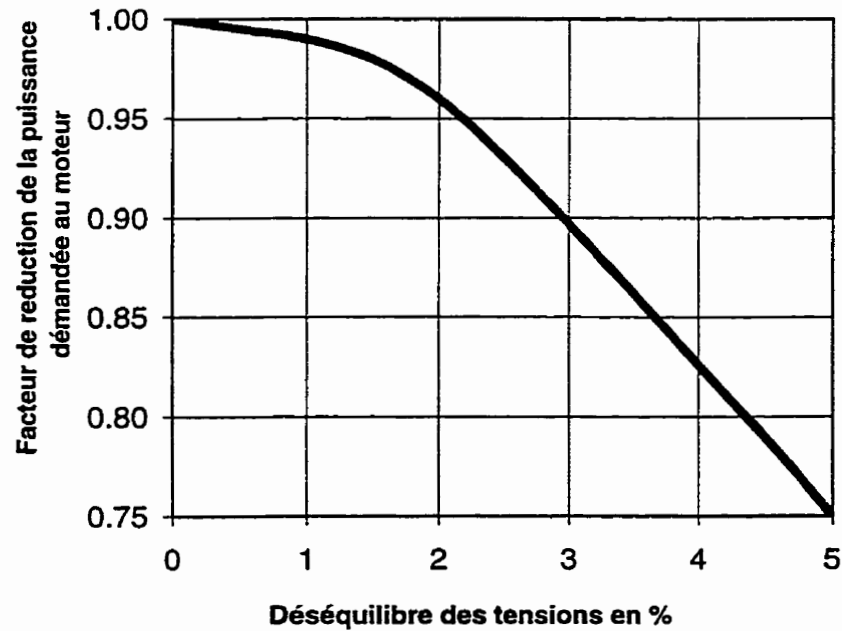


Figure 2.4 Facteur de réduction de la puissance demandée au moteur en fonction du déséquilibre de tension



### 2.3.4 Influence de la variation de la fréquence d'alimentation sur les performances du moteur asynchrone

A moins d'une panne majeure, il ne se produit jamais de changement de fréquence important sur les grands réseaux. De toute façon, une telle panne provoquerait l'arrêt immédiat du système. Cependant, la fréquence peut varier sur les réseaux isolés de faible capacité qui génèrent l'énergie électrique à partir de moteurs diesels ou de turbines à gaz [5]

Si la tension et la fréquence varient proportionnellement, le flux reste constant et les performances du moteur au niveau du couple et des courants absorbés restent les mêmes. Les couples de décrochage et de démarrage demeurent presque les mêmes qu'auparavant. Le rendement, le facteur de puissance et l'échauffement demeurent acceptables bien que les pertes fer augmentent.

Une diminution de fréquence à tension constante peut saturer le moteur et augmenter rapidement son courant à vide. Une augmentation de fréquence à tension constante diminue le flux et provoque, à couple imposé, une augmentation du glissement qui augmente également l'échauffement.

Les appels de courant admissibles par le réseau de l'usine où est implanté le moteur doivent être pris en compte lors du choix du moteur asynchrone et de son mode de démarrage.

## 2.4 Influence de l'environnement

La température, l'altitude et l'atmosphère d'utilisation sont des facteurs qui conditionnent le choix des isolants et de l'enveloppe de protection lors de la conception du moteur par le fabricant. Aussi, est-il important que l'utilisateur choisisse bien le moteur adapté à son environnement.

L'élévation de température du bobinage indiquée sur la plaque signalétique du moteur correspond à une altitude de 1000 mètres au-dessus de la mer. Pour des altitudes supérieures, il faut déterminer l'élévation de température correspondante à partir de la relation suivante [16] :

$$T_{alt} = \frac{T_{st}}{1.1 - \frac{H}{10000}} \quad (2.13)$$

où:

- $T_{alt}$ , élévation de température à l'altitude d'opération en degrés Celsius;
- $T_{st}$ , élévation de température au niveau de la mer en degrés Celsius;

- H, altitude d'opération en mètres.

Selon l'environnement auquel ils sont destinés et la méthode de refroidissement les moteurs asynchrones les plus utilisés peuvent être classés en cinq types principaux [5] :

#### 2.4.1 Moteurs abrités ("Drip-proof").

Ils ont une carcasse qui protège les bobinages contre les chutes des particules solides et liquides tombant verticalement à un angle compris entre 0 et 15 degrés. Ils sont ventilés par l'intérieur, grâce à un ventilateur solidaire du rotor. Leur échauffement mesuré par la méthode de la résistance peut être de 60, 80, 105 ou 125 degrés Celsius selon la classe d'isolation utilisée.

Ces moteurs sont utilisables dans la plupart des applications.

#### 2.4.2 Moteurs étanches aux éclaboussures ("Splash - proof")

La carcasse de ces moteurs les protège contre la chute des particules solides et liquides dans une direction de 0 à 100 degrés avec la verticale. Ils sont aussi ventilés à l'intérieur par un ventilateur solidaire du rotor. Leur limite d'échauffement admissible est la même que celle des moteurs abrités.

Ces moteurs sont surtout employés dans les endroits humides.

#### 2.4.3 Moteurs blindés ("Totally enclosed, non ventilated")

Ils comportent une enveloppe empêchant toute communication directe entre l'intérieur du moteur et le milieu ambiant. Ces moteurs sont habituellement de faible puissance compte-tenu de la difficulté d'évacuation de la chaleur car ils ne comportent ni ventilation intérieure, ni ventilation extérieure. On leur permet un échauffement mesuré par la méthode de la résistance de 65, 85, 110 ou 130 degrés Celsius selon leur mode d'isolement.

Ils sont destinés aux milieux très humides ou très poussiéreux.

#### 2.4.4 Moteurs blindés avec ventilateur extérieur ("Totally enclosed, fan cooled")

Le refroidissement des moteurs fermés de moyenne et grande puissance, utilisés dans des conditions défavorables, est assurée par une ventilation extérieure forcée; il suffit de souffler de l'air entre la carcasse du moteur et une seconde enveloppe concentrique. On leur permet le même échauffement que pour les moteurs abrités.

#### 2.4.5 Moteurs anti-explosifs (“Explosion-proof”)

Ces moteurs sont utilisés quand le milieu environnant présente des dangers d’explosion (mines de charbon, raffinerie de pétrole, moulin à grain...). Ils sont toujours fermés hermétiquement; de plus leur carcasse peut résister à l’énorme pression qui résulterait d’une explosion interne. On leur permet le même échauffement que pour les moteurs robustes.

Dans le chapitre suivant, nous allons établir les expressions des paramètres pertinents des charges mécaniques entraînées.

## Modélisation des charges mécaniques entraînées

### 3.1 Introduction

Le problème essentiel du choix des moteurs électriques concerne le manque de données sur la charge mécanique entraînée. La connaissance précise et détaillée des paramètres de la charge facilite grandement le processus de sélection du moteur et réduit les risques d'un choix non adapté aux exigences de l'entraînement.

Les paramètres de la charge entraînée les plus importants à connaître sont:

- la vitesse nominale de la charge;
- le couple nominal de la charge;
- le couple moyen de la charge;
- le couple efficace de la charge;
- le moment d'inertie de la charge;
- le facteur de marche;
- le rendement du réducteur;
- le rapport de transmission du réducteur;
- le moment d'inertie du réducteur.

Pour déterminer le couple moyen et le couple efficace de la charge entraînée, il est nécessaire de connaître comment varie le couple résistant en fonction de la vitesse. Cette variation est donnée par la caractéristique mécanique  $T_r(\Omega)$  de régime permanent.

Dans la section suivante, nous allons donner quelques expressions permettant de déterminer les paramètres de certains types de charge très utilisés dans l'industrie.

### 3.2 Ventilateurs

Les ventilateurs sont des charges quadratiques. Ils ont, généralement, un régime de fonctionnement continu .

L'équation de leur caractéristique couple - vitesse (Figure 3.1 ) est de la forme:

$$T_r ( N ) = T_{r0} + k_c * N^2 \quad (3.1)$$

Où:

$T_{r0}$  est le couple résistant de la charge au début du démarrage;

$T_r$ , le couple résistant à la vitesse  $N$ ;

$k_c$ , un coefficient caractéristique de la charge, spécifique aux unités employées.

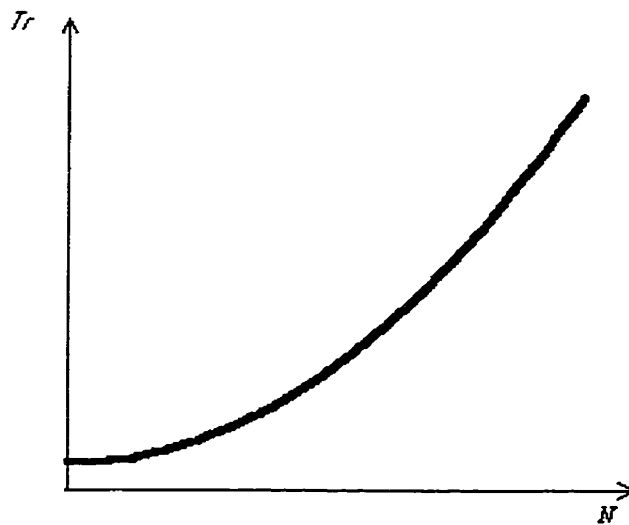


Figure 3.1 Caractéristique Couple – Vitesse d'une charge quadratique

#### Données:

- vitesse nominale  $N_n$  du ventilateur [tours / minute] ou  $\Omega_n$  [rad/s]
- débit d'air  $Q$  du ventilateur [ $m^3/s$ ];
- pression totale  $P$  du ventilateur [kPa];

- rendement  $\eta_c$  du ventilateur;
- moment d'inertie  $J_c$  du ventilateur [kg.m<sup>2</sup>];
- rendement  $\eta_r$  du réducteur;
- rapport de transmission  $R$  du réducteur;
- moment d'inertie  $J_r$  du réducteur [kg.m<sup>2</sup>].

La boîte de dialogue de saisie des paramètres d'une charge de type ventilateur est illustrée à la Figure 3.2

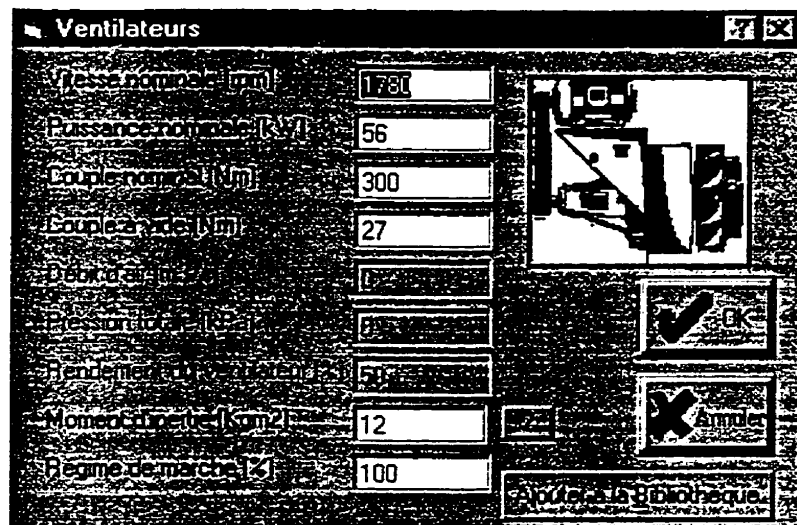


Figure 3.2 Données d'une charge de type Ventilateur

La puissance nominale  $P_{cn}$  du ventilateur est déterminée par:

$$P_{cn} = \frac{P * Q}{\eta_c} \quad (3.2)$$

Et le couple nominal par:

$$T_m = \frac{P_{cn}}{\Omega_{cn}} \quad (3.3)$$

### 3.3 Pompes

La forme de la caractéristique couple – vitesse est quadratique pour les pompes centrifuges (Figure 3.1 ) et constante pour les pompes à pistons (Figure 3.3 ).

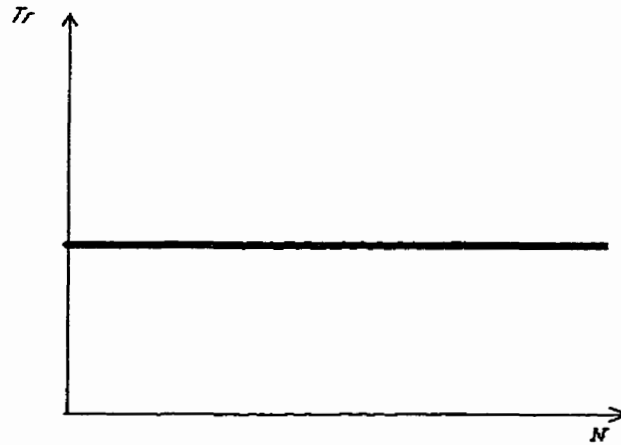


Figure 3.3 Caractéristique couple – vitesse d'une charge à couple constant

Données:

- vitesse nominale  $N_n$  de la pompe [tours / minutes] ou  $\Omega_n$  [rad/s]
- débit  $Q$  de la pompe [ $m^3/s$ ];
- pression  $P$  de la pompe [kPa];
- rendement  $\eta_c$  de la pompe;
- masse spécifique  $\rho$  du fluide pompé [ $kg/m^3$ ];
- hauteur de pompage  $H$  [m];
- moment d'inertie  $J_c$  de la pompe [ $kg.m^2$ ];
- rendement  $\eta_r$  du réducteur;
- rapport de transmission  $R$  du réducteur;
- moment d'inertie  $J_r$  du réducteur [ $kg.m^2$ ].

Suivant les données disponibles, la puissance nominale  $P_{cn}$  de la pompe est déterminée par:

- Débit, pression et rendement de la pompe connus:

$$P_{cn} = \frac{P * Q}{\eta_c} \quad (3.4)$$

- Débit, rendement de la pompe, hauteur de pompage et masse spécifique du fluide connus:

$$P_{cn} = \frac{\rho * g * H * Q}{\eta_c} \quad (3.5)$$

$g$  étant l'accélération de la pesanteur.

Connaissant la vitesse nominale  $\Omega_{cn}$  de la pompe, on en déduit le couple nominal :

$$T_m = \frac{P_{cn}}{\Omega_{cn}} \quad (3.6)$$

### 3.4 Compresseurs

La caractéristique couple – vitesse des compresseurs à pistons et à membranes est constante (Figure 3.3 ); celle des compresseurs centrifuges et axiaux est quadratique (Figure 3.1 ).

Données:

- vitesse nominale  $N_n$  du compresseur [tours / minutes] ;
- couple de démarrage  $T_{nd}$  du compresseur [N.m] ;
- couple nominal  $T_m$  du compresseur [N.m];
- moment d'inertie  $J_c$  du compresseur [kg.m<sup>2</sup>];
- rendement  $\eta_r$  du réducteur ;
- rapport de transmission  $R$  du réducteur ;
- moment d'inertie  $J_r$  du réducteur [kg.m<sup>2</sup>];
- régime de marche.

La puissance nominale du compresseur est déterminée par :

$$P_{cn} = T_{cn} * \Omega_{cn}$$

### 3.5 Convoyeurs

La caractéristique couple – vitesse des convoyeurs à bande est constante (Figure 3.3 ).

Données :

- Vitesse  $V_c$  de la bande [m/min];
- Longueur  $L$  de la bande [m] ;
- Largeur  $l$  de la bande [m];
- Altitude  $H$  [m];
- Débit  $Q$  [m<sup>3</sup>/s];



- Inertie  $J_c$  [kg.m<sup>2</sup>];
- Couple nominal de la charge  $T_m$  [N.m];
- Diamètre du tambour  $D_c$  [m];
- Rendement  $\eta_r$  du réducteur;
- Rapport de transmission  $R$  du réducteur ;
- Moment d'inertie  $J_r$  du réducteur [kg.m<sup>2</sup>].

D'après les données expérimentales dans la littérature [14], la puissance totale requise pour entraîner le convoyeur est déterminée par :

$$P = P1 + P2 + P3 \quad (3.7)$$

Où :

$P1$  [kW] est la puissance nécessaire pour actionner le tapis à vide à la vitesse  $V_c$ ;

$P2$  [kW], la puissance nécessaire pour entraîner la charge  $Q$  [tonnes /heure] horizontalement ;

$P3$  [kW], la puissance nécessaire pour élever la charge  $Q$  [tonnes /heure] à une altitude  $H$ .

$$P1 = \frac{V_c}{100} * N1 \quad (3.8)$$

$$P2 = \frac{Q}{100} * N2 \quad (3.9)$$

$$P3 = \frac{Q}{100} * N3 \quad (3.10)$$

$N1$ , puissance nécessaire pour actionner un tapis de longueur et de largeur données à une vitesse de 100 mètres par minute.

$N2$ , puissance requise pour transporter une charge de 100 tonnes /heure horizontalement ;

$N3$ , puissance requise pour élever une charge de 100 tonnes /heure à une altitude  $H$ .

Les valeurs de  $N1$ ,  $N2$  et  $N3$  sont données respectivement dans Tableau 3.1 , Tableau 3.2 et Tableau 3.3

Largeur $l$ de la bande en centimètres	N1 en kW											
	Longueur $L$ de la bande en mètres											
	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
40	0.61	0.66	0.71	0.76	0.82	0.93	1.04	1.15	1.26	1.38	1.48	1.59
50	0.79	0.86	0.94	1.02	1.08	1.23	1.38	1.51	1.66	1.80	1.96	2.10
60	0.96	1.05	1.13	1.22	1.31	1.38	1.66	1.83	2.02	2.19	2.36	2.53
75	1.35	1.46	1.61	1.71	1.80	2.08	2.32	2.57	2.81	3.06	3.30	3.55
90	1.58	1.72	1.88	2.03	2.17	2.38	2.75	3.04	3.32	3.62	3.92	4.20
100	1.92	2.09	2.27	2.44	2.61	2.97	3.30	3.66	4.02	4.36	4.72	5.06

Tableau 3.1 Puissance N1 requise pour entraîner un tapis de longueur  $L$  et de largeur  $l$  à une vitesse de 100 m/min

Longueur $L$ en mètres	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
N2 en kW	0.40	0.50	0.54	0.58	0.63	0.71	0.79	0.88	0.95	1.04	1.12	1.20

Tableau 3.2 Puissance N2 requise pour entraîner une charge de 100 tonnes /heure horizontalement

Altitude $H$ en mètres	2	2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5	30
N3 en kW	0.66	0.90	1.42	2.09	2.76	3.51	4.18	4.85	5.52	6.27	6.94	7.61	8.29

Tableau 3.3 Puissance N3 requise pour élever une charge de 100 tonnes /heure à une altitude  $H$

### 3.6 Engins de levage

Les engins de levage ont une caractéristique couple – vitesse constante.

Données:

- Masse de la charge à lever  $m$  [kg];
- Vitesse de levage  $V_c$  [m/s];
- Hauteur de levage  $H$  [m];
- Diamètre  $D_c$  du tambour ou de la poulie [m];
- Facteur de marche ;
- Rendement total du système de levage  $\eta_t$  ;
- Rendement  $\eta_r$  du réducteur;
- Rapport de transmission  $R$  du réducteur ;
- Moment d'inertie  $J_r$  du réducteur [kg.m<sup>2</sup>].

La puissance totale,  $P_t$  [kW], nécessaire pour soulever la charge est donnée par :

$$P_t = \frac{m * g * V_c}{\eta t} \quad (3.11)$$

Les engins de levage ont généralement un service de fonctionnement intermittent. Leur facteur de marche  $FM$  (en %) est déterminé par la relation suivante :

$$FM = \frac{(TM + TD)}{TC} * 100 \quad (3.12)$$

$TM$ , le temps de montée de la charge [s];

$TD$ , le temps de descente de la charge [s];

$TC$ , la durée totale du cycle [s].

### 3.7 Charges complexes

Ce sont les charges ayant une caractéristique couple – vitesse qui diffèrent des charges typiques précédents. Cette caractéristique sera définie à partir d'un ensemble de points introduits par l'utilisateur.

Le couple moyen et le couple efficace (cf. § 5.2.2) pour tous les types de charge seront déterminés par une intégration numérique de la caractéristique couple – vitesse en régime permanent de la charge entraînée.

Dans le chapitre suivant nous allons déterminer le modèle mathématique qui nous permettra d'évaluer les caractéristiques de performance des moteurs asynchrones lors du démarrage et au point d'opération en régime permanent.

## Modélisation et performances du moteur asynchrone

### 4.1 Moteur à double cage : caractéristique universelle

Le schéma équivalent à double cage permet de modéliser avec une bonne approximation les caractéristiques des moteurs asynchrones de classes A, B, C, D et E. En variant les paramètres d'une cage par rapport à l'autre, on peut obtenir la forme des caractéristiques de tous les moteurs asynchrones.

### 4.2 Schéma monophasé équivalent en régime permanent

Nous utilisons un schéma équivalent à double cage pour modéliser la machine asynchrone. Nous avons négligé la réactance de couplage entre les deux cages du rotor.

La Figure 4. 1 montre le schéma du circuit équivalent du moteur asynchrone retenu.

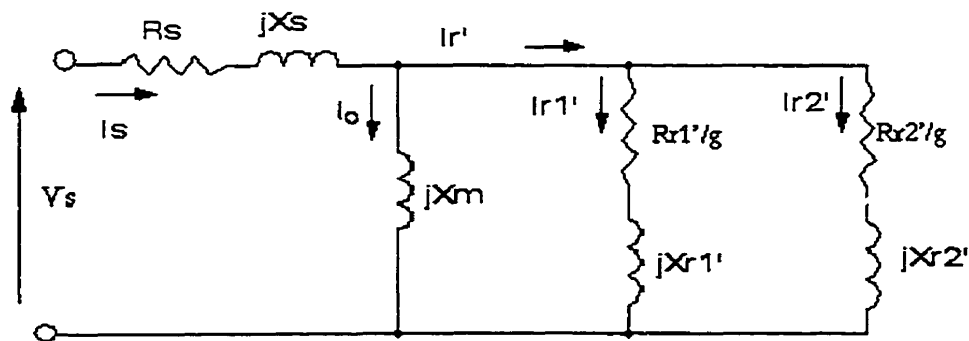


Figure 4. 1 Circuit monophasé équivalent d'un moteur asynchrone à double cage.

La définition des différents paramètres du circuit monophasé équivalent de la Figure 4. 1 est donnée au Tableau 4.1 ci-dessous

Paramètre	Description
$R_s$	Résistance du stator
$X_s$	Réactance du stator
$X_m$	Réactance magnétisante
$R_{r1}'$	Résistance de la première cage du rotor ramenée au stator
$X_{r1}'$	Réactance de fuites de la première cage du rotor ramenée au stator
$R_{r2}'$	Résistance de la seconde cage du rotor ramenée au stator
$X_{r2}'$	Réactance de fuites de la seconde cage du rotor ramenée au stator

Tableau 4.1 Paramètres du circuit monophasé équivalent d'un moteur asynchrone

Ce circuit peut être mis sous la forme de la Figure 4.2 qui regroupe les impédances complexes de chaque branche.

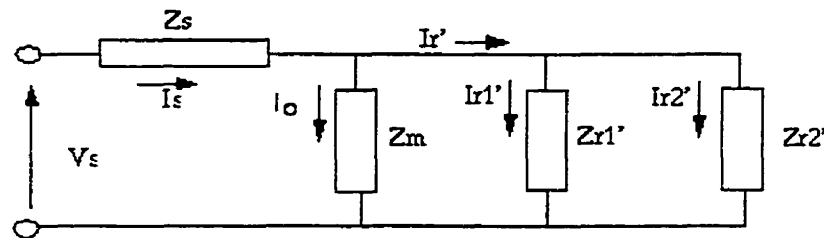


Figure 4.2 Circuit monophasé équivalent d'un moteur asynchrone à double cage regroupant les impédances complexes de chaque branche.

avec

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (4.1)$$

$$Z_{r1}' = \frac{R_{r1}'}{g} + jX_{r1}' \quad (4.2)$$

$$Z_{r2}' = \frac{R_{r2}'}{g} + jX_{r2}' \quad (4.3)$$

$$Z_m = jX_m \quad (4.4)$$

L'impédance totale équivalente du moteur asynchrone est  $Z_t$  telle que :

$$Z_t = Z_s + Z_m \parallel Z_r' \quad (4.5)$$

$Z_r'$  étant l'impédance équivalente totale des deux cages du rotor (voir Figure 4.3)

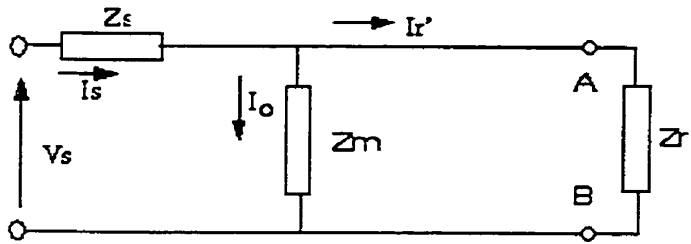


Figure 4.3 Circuit équivalent d'un moteur asynchrone à double cage avec l'impédance totale des deux cages du rotor

$$Z_t = Z_s + Z_m * \frac{Z_{r'}}{Z_m + Z_{r'}} \quad (4.6)$$

où:

$$Z_{r'} = Z_{r1'} \parallel Z_{r2'} = \frac{Z_{r1'} * Z_{r2'}}{Z_{r1'} + Z_{r2'}} \quad (4.7)$$

$$Z_m = j * X_m \quad (4.8)$$

L'expression du courant rotorique  $I_{r'}$  est nécessaire pour le calcul des caractéristiques de performance du moteur asynchrone. Pour l'établir, on réalise un schéma équivalent Thévenin entre les points A et B de la Figure 4.3, aux bornes de l'impédance  $Z_{r'}$ . On obtient ainsi le schéma de la Figure 4.4

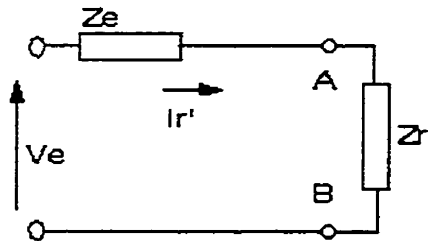


Figure 4.4 Circuit équivalent d'un moteur asynchrone à double cage avec l'impédance Thevenin  $Z_e$  et la tension Thevenin  $V_e$  aux bornes du rotor

L'impédance  $Z_e$  vaut:

$$Z_e = \frac{Z_s * Z_m}{Z_s + Z_m} \quad (4.9)$$

Et la tension  $V_e$ :

$$V_e = \frac{Z_m}{Z_m + Z_s} * V_s \quad (4.10)$$

En module on peut écrire

$$V_e = K_e * V_s \quad (4.11)$$

avec:

$$K_e = \left| \frac{Z_m}{Z_s + Z_m} \right| \quad (4.12)$$

### 4.3 Détermination des caractéristiques de régime permanent

Les variations des grandeurs caractéristiques du moteur en régime permanent s'obtiennent à partir du schéma équivalent précédent.

#### 4.3.1 Calcul du courant au stator

La valeur efficace du courant statorique  $I_s$  est :

$$I_s = \frac{V_s}{|Z_t|} \quad (4.13)$$

L'expression du courant a été développée à l'aide des procédures de calcul symbolique du logiciel Mathématique [18] . Nous avons obtenu l'expression suivante :

$$I_s = ( V_s * \text{Sqrt} [(-Rr1*Rr2) + g^2*Xm*Xr1 + g^2*Xm*Xr2 + g^2*Xr1*Xr2]^2 + g^2*(Rr2*(Xm + Xr1) + Rr1*(Xm + Xr2))^2] / \text{Sqrt} [(-Rr1*Rr2*Rs) + g*Rr2*Xm*Xr1 + g^2*Rs*Xm*Xr1 + g*Rr1*Xm*Xr2 + g^2*Rs*Xm*Xr2 + g^2*Rs*Xr1*Xr2 + g*Rr1*Xm*Xs + g*Rr2*Xm*Xs + g*Rr2*Xr1*Xs + g*Rr1*Xr2*Xs]^2 + (-(Rr1*(g*Rs*(Xm + Xr2) + Rr2*(Xm + Xs))) + g*(-(Rr2*Rs*(Xm + Xr1)) + g*(Xm*Xr1*Xr2 + Xm*Xr1*Xs + Xm*Xr2*Xs + Xr1*Xr2*Xs))]^2] \quad (4.14)$$

#### 4.3.2 Calcul des courants au rotor

Les valeurs efficaces des courants rotoriques sont :

$$I_r' = \frac{V_e}{|(Z_e + Z_r')|} \quad (4.15)$$

$$Ir1' = Ir' * \left| \frac{Zr2'}{Zr1' + Zr2'} \right| \quad (4.16)$$

$$Ir2' = Ir' * \left| \frac{Zr1'}{Zr1' + Zr2'} \right| \quad (4.17)$$

Les expressions complètes des courants rotoriques développées à l'aide des procédures de calcul symboliques du logiciel Mathématique sont :

$$Ir' = ( Vs * \text{Sqrt}[Xm^2] * \text{Sqrt}[(-(g * Rr1' * Rs) - g * Rr2' * Rs + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xs + g^2 * Xr2' * Xs)^2 + g^2 * (g * Rs * (Xr1' + Xr2') + Rr1' * (Xm + Xs) + Rr2' * (Xm + Xs))^2] / (\text{Sqrt}[Rs^2 + (Xm + Xs)^2] * \text{Sqrt}[(-(Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (-(Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (-(Rr2' * Rs * (Xm + Xr1'))) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))^2] ) \quad (4.18)$$

$$Ir1' = ( Vs * \text{Sqrt}[Xm^2] * \text{Sqrt}[Rr2'^2/g^2 + Xr2'^2] * \text{Sqrt}[(-(g * Rr1' * Rs) - g * Rr2' * Rs + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xs + g^2 * Xr2' * Xs)^2 + g^2 * (g * Rs * (Xr1' + Xr2') + Rr1' * (Xm + Xs) + Rr2' * (Xm + Xs))^2] / (\text{Sqrt}[(Rr1'/g + Rr2'/g)^2 + (Xr1' + Xr2')^2] * \text{Sqrt}[Rs^2 + (Xm + Xs)^2] * \text{Sqrt}[(-(Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (-(Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (-(Rr2' * Rs * (Xm + Xr1'))) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))^2] ) \quad (4.19)$$

$$Ir2' = ( Vs * \text{Sqrt}[Xm^2] * \text{Sqrt}[Rr1'^2/g^2 + Xr1'^2] * \text{Sqrt}[(-(g * Rr1' * Rs) - g * Rr2' * Rs + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xs + g^2 * Xr2' * Xs)^2 + g^2 * (g * Rs * (Xr1' + Xr2') + Rr1' * (Xm + Xs) + Rr2' * (Xm + Xs))^2] / (\text{Sqrt}[(Rr1'/g + Rr2'/g)^2 + (Xr1' + Xr2')^2] * \text{Sqrt}[Rs^2 + (Xm + Xs)^2] * \text{Sqrt}[(-(Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (-(Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (-(Rr2' * Rs * (Xm + Xr1'))) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))^2] ) \quad (4.20)$$



### 4.3.3 Calcul du couple électromagnétique

Les couples électromagnétiques de la première et de la seconde cage  $T_{em1}$  et  $T_{em2}$  sont définis respectivement par :

$$T_{em1} = \frac{3 * p}{\omega_s} * \frac{Rr1'}{g} * Ir1'^2 \quad (4.21)$$

$$T_{em2} = \frac{3 * p}{\omega_s} * \frac{Rr2'}{g} * Ir2'^2 \quad (4.22)$$

Les expressions complètes obtenues, après développement sont :

$$\begin{aligned} T_{em1} = & (3 * p * Rr1' * Vs^2 * Xm^2 * (Rr2'^2 / g^2 + Xr2'^2) * ((- (g * Rr1' * Rs) - g * Rr2' * Rs + g^2 * Xm * Xr1' \\ & + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xs + g^2 * Xr2' * Xs)^2 + g^2 * (g * Rs * (Xr1' + Xr2') + Rr1' * (Xm + Xs) \\ & + Rr2' * (Xm + Xs))^2) / (g * \omega_s * ((Rr1' / g + Rr2' / g)^2 + (Xr1' + Xr2')^2) * (Rs^2 + (Xm + Xs)^2) * \\ & ((- (Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + \\ & g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + \\ & g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (- (Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + \\ & Xr1')) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs)))^2) \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} T_{em2} = & (3 * p * Rr2' * Vs^2 * Xm^2 * (Rr1'^2 / g^2 + Xr1'^2) * ((- (g * Rr1' * Rs) - g * Rr2' * Rs + g^2 * Xm * Xr1' \\ & + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xs + g^2 * Xr2' * Xs)^2 + g^2 * (g * Rs * (Xr1' + Xr2') + Rr1' * (Xm + Xs) \\ & + Rr2' * (Xm + Xs))^2) / (g * \omega_s * ((Rr1' / g + Rr2' / g)^2 + (Xr1' + Xr2')^2) * (Rs^2 + (Xm + Xs)^2) * \\ & ((- (Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + \\ & g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + \\ & g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (- (Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + \\ & Xr1')) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs)))^2) \end{aligned} \quad (4.24)$$

Le couple électromagnétique total est défini par la somme :

$$T_{em} = T_{em1} + T_{em2} \quad (4.25)$$

Son expression complète est :

$$\begin{aligned}
T_{cm} = & (3 * p * Rr2' * Vs^2 * Xm^2 * (Rr1'^2 / g^2 + Xr1'^2) * ((- (g * Rr1' * Rs) - g * Rr2' * Rs + g^2 * Xm * Xr1' \\
& + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xs + g^2 * Xr2' * Xs)^2 + g^2 * (g * Rs * (Xr1' + Xr2') + Rr1' * (Xm + \\
& Xs) + Rr2' * (Xm + Xs))^2) / (g * \omega_s * ((Rr1' / g + Rr2' / g)^2 + (Xr1' + Xr2')^2) * (Rs^2 + (Xm + \\
& Xs)^2) * ((- (Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + \\
& g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + \\
& g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (- (Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + \\
& Xr1'))) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))^2) + \\
& (3 * p * Rr1' * Vs^2 * Xm^2 * (Rr2'^2 / g^2 + Xr2'^2) * ((- (g * Rr1' * Rs) - g * Rr2' * Rs + g^2 * Xm * Xr1' + \\
& g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xs + g^2 * Xr2' * Xs)^2 + g^2 * (g * Rs * (Xr1' + Xr2') + Rr1' * (Xm + Xs) \\
& + Rr2' * (Xm + Xs))^2) / (g * \omega_s * ((Rr1' / g + Rr2' / g)^2 + (Xr1' + Xr2')^2) * (Rs^2 + (Xm + Xs)^2) * \\
& ((- (Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + \\
& g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + \\
& g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (- (Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + \\
& Xr1'))) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))^2)
\end{aligned}
\tag{4.26}$$

#### 4.3.4 Calcul du facteur de puissance du moteur

Le facteur de puissance  $\cos(\varphi)$  sera déterminé par le rapport de la partie réelle de l'impédance totale  $Z_t$  sur le module  $|Z_t|$  :

$$\cos(\varphi) = \frac{\text{Reel}[Z_t]}{|Z_t|} \tag{4.27}$$

$$\begin{aligned}
\cos(\varphi) = & ((- (Rr1' * Rr2') + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xr2') * (- (Rr1' * Rr2' * Rs) + \\
& g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + \\
& g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs) - \\
& g * (Rr2' * (Xm + Xr1') + Rr1' * (Xm + Xr2')) * (- (Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + \\
& g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + Xr1'))) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + \\
& Xr1' * Xr2' * Xs))) / \text{Sqrt}((( - (Rr1' * Rr2') + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xr2')^2 + \\
& g^2 * (Rr2' * (Xm + Xr1') + Rr1' * (Xm + Xr2'))^2) * ((- (Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + \\
& g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs \\
& + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (- (Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + \\
& Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + Xr1'))) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + \\
& Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))^2)
\end{aligned}$$

(4.28)

#### 4.3.5 Calcul de la puissance absorbée par le moteur

$$P_{Absorbée} = 3 * V_s * I_s * \text{Cos}(\varphi) \quad (4.29)$$

$$P_{Absorbée} = (3 * V_s^2 * \text{Sqrt}[(-(Rr1' * Rr2') + g^2 * X_m * X_{r1}' + g^2 * X_m * X_{r2}' + g^2 * X_{r1}' * X_{r2}')^2 + g^2 * (Rr2' * (X_m + X_{r1}') + Rr1' * (X_m + X_{r2}'))^2] * ((-Rr1' * Rr2') + g^2 * X_m * X_{r1}' + g^2 * X_m * X_{r2}' + g^2 * X_{r1}' * X_{r2}') * (-Rr1' * Rr2' * R_s) + g * Rr2' * X_m * X_{r1}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r1}' + g * Rr1' * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_{r1}' * X_{r2}' + g * Rr1' * X_m * X_s + g * Rr2' * X_m * X_s + g * Rr2' * X_{r1}' * X_s + g * Rr1' * X_{r2}' * X_s) - g * (Rr2' * (X_m + X_{r1}') + Rr1' * (X_m + X_{r2}')) * (-Rr1' * (g * R_s * (X_m + X_{r2}') + Rr2' * (X_m + X_s))) + g * (-Rr2' * R_s * (X_m + X_{r1}')) + g * (X_m * X_{r1}' * X_{r2}' + X_m * X_{r1}' * X_s + X_m * X_{r2}' * X_s + X_{r1}' * X_{r2}' * X_s)))] / (\text{Sqrt}[(-(Rr1' * Rr2' * R_s) + g * Rr2' * X_m * X_{r1}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r1}' + g * Rr1' * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_{r1}' * X_{r2}' + g * Rr1' * X_m * X_s + g * Rr2' * X_m * X_s + g * Rr2' * X_{r1}' * X_s + g * Rr1' * X_{r2}' * X_s)^2 + (-Rr1' * (g * R_s * (X_m + X_{r2}') + Rr2' * (X_m + X_s))) + g * (-Rr2' * R_s * (X_m + X_{r1}')) + g * (X_m * X_{r1}' * X_{r2}' + X_m * X_{r1}' * X_s + X_m * X_{r2}' * X_s + X_{r1}' * X_{r2}' * X_s))]^2] * \text{Sqrt}[(-(Rr1' * Rr2') + g^2 * X_m * X_{r1}' + g^2 * X_m * X_{r2}' + g^2 * X_{r1}' * X_{r2}')^2 + g^2 * (Rr2' * (X_m + X_{r1}') + Rr1' * (X_m + X_{r2}'))^2] * ((-Rr1' * Rr2' * R_s) + g * Rr2' * X_m * X_{r1}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r1}' + g * Rr1' * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_{r1}' * X_{r2}' + g * Rr1' * X_m * X_s + g * Rr2' * X_m * X_s + g * Rr2' * X_{r1}' * X_s + g * Rr1' * X_{r2}' * X_s)^2 + (-Rr1' * (g * R_s * (X_m + X_{r2}') + Rr2' * (X_m + X_s))) + g * (-Rr2' * R_s * (X_m + X_{r1}')) + g * (X_m * X_{r1}' * X_{r2}' + X_m * X_{r1}' * X_s + X_m * X_{r2}' * X_s + X_{r1}' * X_{r2}' * X_s))]^2)] \quad (4.30)$$

#### 4.3.6 Calcul des pertes Joule au stator

$$P_{Jstator} = 3 * R_s * I_s^2 \quad (4.31)$$

$$P_{Jstator} = (3 * R_s * V_s^2 * ((-Rr1' * Rr2') + g^2 * X_m * X_{r1}' + g^2 * X_m * X_{r2}' + g^2 * X_{r1}' * X_{r2}')^2 + g^2 * (Rr2' * (X_m + X_{r1}') + Rr1' * (X_m + X_{r2}'))^2) / ((-Rr1' * Rr2' * R_s) + g * Rr2' * X_m * X_{r1}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r1}' + g * Rr1' * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_{r1}' * X_{r2}' + g * Rr1' * X_m * X_s + g * Rr2' * X_m * X_s + g * Rr2' * X_{r1}' * X_s + g * Rr1' * X_{r2}' * X_s)^2 + (-Rr1' * (g * R_s * (X_m + X_{r2}') + Rr2' * (X_m + X_s))) + g * (-Rr2' * R_s * (X_m + X_{r1}')) + g * (X_m * X_{r1}' * X_{r2}' + X_m * X_{r1}' * X_s + X_m * X_{r2}' * X_s + X_{r1}' * X_{r2}' * X_s))]^2) \quad (4.32)$$

#### 4.3.7 Calcul des pertes Joule au rotor

$$P_{Jrotor} = 3 * Rr' * Ir'^2 \quad (4.33)$$

$$P_{Jmmr} = 3 * ((Rr2' * Vs^2 * Xm^2 * (Rr1'^2 / g^2 + Xr1'^2) * ((-g * Rr1' * Rs) - g * Rr2' * Rs + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xs + g^2 * Xr2' * Xs)^2 + g^2 * (g * Rs * (Xr1' + Xr2') + Rr1' * (Xm + Xs) + Rr2' * (Xm + Xs))^2)) / (((Rr1' / g + Rr2' / g)^2 + (Xr1' + Xr2')^2) * (Rs^2 + (Xm + Xs)^2) * ((-Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (-Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (-Rr2' * Rs * (Xm + Xr1')) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))^2)) + (Rr1' * Vs^2 * Xm^2 * (Rr2'^2 / g^2 + Xr2'^2) * ((-g * Rr1' * Rs) - g * Rr2' * Rs + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xs + g^2 * Xr2' * Xs)^2 + g^2 * (g * Rs * (Xr1' + Xr2') + Rr1' * (Xm + Xs) + Rr2' * (Xm + Xs))^2)) / (((Rr1' / g + Rr2' / g)^2 + (Xr1' + Xr2')^2) * (Rs^2 + (Xm + Xs)^2) * ((-Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (-Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (-Rr2' * Rs * (Xm + Xr1')) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))^2))) \quad (4.34)$$

#### 4.3.8 Calcul de la puissance de sortie

Pour le calcul de la puissance de sortie, les hypothèses simplificatrices suivantes ont été adoptées :

- Les pertes mécaniques sont négligées;
- Les pertes magnétiques sont négligées.

Le bilan de puissance se traduit alors par l'équation :

$$P_{Sortie} = P_{Absorbée} - P_{Jstator} - P_{Jrotor} \quad (4.35)$$

$$P_{Sortie} = (-3 * Rs * Vs^2 * ((-Rr1' * Rr2') + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xr2')^2 + g^2 * (Rr2' * (Xm + Xr1') + Rr1' * (Xm + Xr2'))^2)) / (((-Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (-Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (-Rr2' * Rs * (Xm + Xr1')) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))^2) + (3 * Vs^2 * Sqrt[(-Rr1' * Rr2') + g^2 * Xm * Xr1' +$$

$$\begin{aligned}
& g^2 X_m X_{r2}' + g^2 X_{r1}' X_{r2}')^2 + g^2 (R_{r2}' (X_m + X_{r1}') + R_{r1}' (X_m + X_{r2}'))^2] \cdot ((- \\
& (R_{r1}' R_{r2}') + g^2 X_m X_{r1}' + g^2 X_m X_{r2}' + g^2 X_{r1}' X_{r2}') \cdot (- (R_{r1}' R_{r2}' R_s) + \\
& g R_{r2}' X_m X_{r1}' + g^2 R_s X_m X_{r1}' + g R_{r1}' X_m X_{r2}' + g^2 R_s X_m X_{r2}' + \\
& g^2 R_s X_{r1}' X_{r2}' + g R_{r1}' X_m X_s + g R_{r2}' X_m X_s + g R_{r2}' X_{r1}' X_s + g R_{r1}' X_{r2}' X_s) - \\
& g (R_{r2}' (X_m + X_{r1}') + R_{r1}' (X_m + X_{r2}')) \cdot (- (R_{r1}' (g R_s (X_m + X_{r2}') + R_{r2}' (X_m + X_s))) + \\
& g \cdot (- (R_{r2}' R_s (X_m + X_{r1}')) + g (X_m X_{r1}' X_{r2}' + X_m X_{r1}' X_s + X_m X_{r2}' X_s + \\
& X_{r1}' X_{r2}' X_s)))) / (\text{Sqrt}((- (R_{r1}' R_{r2}' R_s) + g R_{r2}' X_m X_{r1}' + g^2 R_s X_m X_{r1}' + \\
& g R_{r1}' X_m X_{r2}' + g^2 R_s X_m X_{r2}' + g^2 R_s X_{r1}' X_{r2}' + g R_{r1}' X_m X_s + g R_{r2}' X_m X_s + \\
& g R_{r2}' X_{r1}' X_s + g R_{r1}' X_{r2}' X_s)^2 + (- (R_{r1}' (g R_s (X_m + X_{r2}') + R_{r2}' (X_m + X_s))) + g \cdot (- \\
& (R_{r2}' R_s (X_m + X_{r1}')) + g (X_m X_{r1}' X_{r2}' + X_m X_{r1}' X_s + X_m X_{r2}' X_s + \\
& X_{r1}' X_{r2}' X_s)))^2] \cdot \text{Sqrt}((( - (R_{r1}' R_{r2}') + g^2 X_m X_{r1}' + g^2 X_m X_{r2}' + g^2 X_{r1}' X_{r2}')^2 + \\
& g^2 (R_{r2}' (X_m + X_{r1}') + R_{r1}' (X_m + X_{r2}'))^2) \cdot (( - (R_{r1}' R_{r2}' R_s) + g R_{r2}' X_m X_{r1}' + \\
& g^2 R_s X_m X_{r1}' + g R_{r1}' X_m X_{r2}' + g^2 R_s X_m X_{r2}' + g^2 R_s X_{r1}' X_{r2}' + g R_{r1}' X_m X_s \\
& + g R_{r2}' X_m X_s + g R_{r2}' X_{r1}' X_s + g R_{r1}' X_{r2}' X_s)^2 + (- (R_{r1}' (g R_s (X_m + X_{r2}') + \\
& R_{r2}' (X_m + X_s))) + g \cdot (- (R_{r2}' R_s (X_m + X_{r1}')) + g (X_m X_{r1}' X_{r2}' + X_m X_{r1}' X_s + \\
& X_m X_{r2}' X_s + X_{r1}' X_{r2}' X_s)))^2)) - 3 \cdot ((R_{r2}' V_s^2 X_m^2 (R_{r1}'^2/g^2 + X_{r1}'^2) \cdot ((- \\
& (g R_{r1}' R_s) - g R_{r2}' R_s + g^2 X_m X_{r1}' + g^2 X_m X_{r2}' + g^2 X_{r1}' X_s + g^2 X_{r2}' X_s)^2 + \\
& g^2 (g R_s (X_{r1}' + X_{r2}') + R_{r1}' (X_m + X_s) + R_{r2}' (X_m + X_s))^2) / (((R_{r1}'/g + R_{r2}'/g)^2 + \\
& (X_{r1}' + X_{r2}')^2) \cdot (R_s^2 + (X_m + X_s)^2) \cdot (( - (R_{r1}' R_{r2}' R_s) + g R_{r2}' X_m X_{r1}' + \\
& g^2 R_s X_m X_{r1}' + g R_{r1}' X_m X_{r2}' + g^2 R_s X_m X_{r2}' + g^2 R_s X_{r1}' X_{r2}' + g R_{r1}' X_m X_s \\
& + g R_{r2}' X_m X_s + g R_{r2}' X_{r1}' X_s + g R_{r1}' X_{r2}' X_s)^2 + (- (R_{r1}' (g R_s (X_m + X_{r2}') + \\
& R_{r2}' (X_m + X_s))) + g \cdot (- (R_{r2}' R_s (X_m + X_{r1}')) + g (X_m X_{r1}' X_{r2}' + X_m X_{r1}' X_s + \\
& X_m X_{r2}' X_s + X_{r1}' X_{r2}' X_s)))^2)) + (R_{r1}' V_s^2 X_m^2 (R_{r2}'^2/g^2 + X_{r2}'^2) \cdot (( - (g R_{r1}' R_s) - \\
& g R_{r2}' R_s + g^2 X_m X_{r1}' + g^2 X_m X_{r2}' + g^2 X_{r1}' X_s + g^2 X_{r2}' X_s)^2 + g^2 (g R_s \\
& (X_{r1}' + X_{r2}') + R_{r1}' (X_m + X_s) + R_{r2}' (X_m + X_s))^2) / (((R_{r1}'/g + R_{r2}'/g)^2 + (X_{r1}' + \\
& X_{r2}')^2) \cdot (R_s^2 + (X_m + X_s)^2) \cdot (( - (R_{r1}' R_{r2}' R_s) + g R_{r2}' X_m X_{r1}' + g^2 R_s X_m X_{r1}' + \\
& g R_{r1}' X_m X_{r2}' + g^2 R_s X_m X_{r2}' + g^2 R_s X_{r1}' X_{r2}' + g R_{r1}' X_m X_s + g R_{r2}' X_m X_s + \\
& g R_{r2}' X_{r1}' X_s + g R_{r1}' X_{r2}' X_s)^2 + (- (R_{r1}' (g R_s (X_m + X_{r2}') + R_{r2}' (X_m + X_s))) + g \cdot (- \\
& (R_{r2}' R_s (X_m + X_{r1}')) + g (X_m X_{r1}' X_{r2}' + X_m X_{r1}' X_s + X_m X_{r2}' X_s + \\
& X_{r1}' X_{r2}' X_s)))^2))
\end{aligned}$$

(4.36)

### 4.3.9 Calcul du rendement du moteur

Le rendement du moteur est défini par le rapport de la puissance mécanique de sortie sur la puissance électrique absorbée par le moteur.

$$\text{Rendement} = \frac{P_{\text{Sortie}}}{P_{\text{Absorbée}}} * 100 \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} \text{Rendement} = & (100 * \text{Sqrt}[(-(Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + \\ & g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + \\ & g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (-(Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (- \\ & (Rr2' * Rs * (Xm + Xr1')) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + \\ & Xr1' * Xr2' * Xs))]^2 * \text{Sqrt}[((-(Rr1' * Rr2') + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xr2')^2 + \\ & g^2 * (Rr2' * (Xm + Xr1') + Rr1' * (Xm + Xr2'))^2) * ((-(Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + \\ & g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs \\ & + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (-(Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + \\ & Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + Xr1')) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + \\ & Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))]^2) * ((-3 * Rs * Vs^2 * ((-(Rr1' * Rr2') + g^2 * Xm * Xr1' + \\ & g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xr2')^2 + g^2 * (Rr2' * (Xm + Xr1') + Rr1' * (Xm + Xr2'))^2)) / ((- \\ & (Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + \\ & g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + \\ & (-(Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + Xr1')) + \\ & g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + Xr1' * Xr2' * Xs))]^2) + (3 * Vs^2 * \text{Sqrt}[(- \\ & (Rr1' * Rr2') + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xr2')^2 + g^2 * (Rr2' * (Xm + Xr1') + \\ & Rr1' * (Xm + Xr2'))^2] * ((-(Rr1' * Rr2') + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xr2') * (- \\ & (Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + \\ & g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs) - \\ & g * (Rr2' * (Xm + Xr1') + Rr1' * (Xm + Xr2')) * (-(Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + \\ & g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + Xr1')) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + \\ & Xr1' * Xr2' * Xs)))) / (\text{Sqrt}[(-(Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + g^2 * Rs * Xm * Xr1' + \\ & g * Rr1' * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xm * Xr2' + g^2 * Rs * Xr1' * Xr2' + g * Rr1' * Xm * Xs + g * Rr2' * Xm * Xs + \\ & g * Rr2' * Xr1' * Xs + g * Rr1' * Xr2' * Xs)^2 + (-(Rr1' * (g * Rs * (Xm + Xr2') + Rr2' * (Xm + Xs))) + \\ & g * (- (Rr2' * Rs * (Xm + Xr1')) + g * (Xm * Xr1' * Xr2' + Xm * Xr1' * Xs + Xm * Xr2' * Xs + \\ & Xr1' * Xr2' * Xs))]^2 * \text{Sqrt}[((-(Rr1' * Rr2') + g^2 * Xm * Xr1' + g^2 * Xm * Xr2' + g^2 * Xr1' * Xr2')^2 + \\ & g^2 * (Rr2' * (Xm + Xr1') + Rr1' * (Xm + Xr2'))^2) * ((-(Rr1' * Rr2' * Rs) + g * Rr2' * Xm * Xr1' + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& g^2 * R_s * X_m * X_{r1}' + g * R_{r1}' * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_{r1}' * X_{r2}' + g * R_{r1}' * X_m * X_s \\
& + g * R_{r2}' * X_m * X_s + g * R_{r2}' * X_{r1}' * X_s + g * R_{r1}' * X_{r2}' * X_s)^2 \setminus + (-(R_{r1}' * (g * R_s * (X_m + X_{r2}') + \\
& R_{r2}' * (X_m + X_s))) + g * (-(R_{r2}' * R_s * (X_m + X_{r1}')) + g * (X_m * X_{r1}' * X_{r2}' + X_m * X_{r1}' * X_s + \\
& X_m * X_{r2}' * X_s + X_{r1}' * X_{r2}' * X_s)))^2 ) - 3 * ((R_{r2}' * V_s^2 * X_m^2 * (R_{r1}'^2 / g^2 + X_{r1}'^2) * ((- \\
& (g * R_{r1}' * R_s) - g * R_{r2}' * R_s + g^2 * X_m * X_{r1}' + g^2 * X_m * X_{r2}' + g^2 * X_{r1}' * X_s + g^2 * X_{r2}' * X_s)^2 + \\
& g^2 * (g * R_s * (X_{r1}' + X_{r2}') + R_{r1}' * (X_m + X_s) + R_{r2}' * (X_m + X_s))^2) / (((R_{r1}' / g + R_{r2}' / g)^2 + \\
& (X_{r1}' + X_{r2}')^2) * (R_s^2 + (X_m + X_s)^2) * ((-(R_{r1}' * R_{r2}' * R_s) + g * R_{r2}' * X_m * X_{r1}' + \\
& g^2 * R_s * X_m * X_{r1}' + g * R_{r1}' * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_{r1}' * X_{r2}' + g * R_{r1}' * X_m * X_s \\
& + g * R_{r2}' * X_m * X_s + g * R_{r2}' * X_{r1}' * X_s + g * R_{r1}' * X_{r2}' * X_s)^2 + (-(R_{r1}' * (g * R_s * (X_m + X_{r2}') + \\
& R_{r2}' * (X_m + X_s))) + g * (-(R_{r2}' * R_s * (X_m + X_{r1}')) + g * (X_m * X_{r1}' * X_{r2}' + X_m * X_{r1}' * X_s + \\
& X_m * X_{r2}' * X_s + X_{r1}' * X_{r2}' * X_s)))^2 )) + (R_{r1}' * V_s^2 * X_m^2 * (R_{r2}'^2 / g^2 + X_{r2}'^2) * ((-(g * R_{r1}' * R_s) \\
& - g * R_{r2}' * R_s + g^2 * X_m * X_{r1}' + g^2 * X_m * X_{r2}' + g^2 * X_{r1}' * X_s + g^2 * X_{r2}' * X_s)^2 + g^2 * (g * \\
& R_s * (X_{r1}' + X_{r2}') + R_{r1}' * (X_m + X_s) + R_{r2}' * (X_m + X_s))^2) / (((R_{r1}' / g + R_{r2}' / g)^2 + (X_{r1}' + \\
& X_{r2}')^2) * (R_s^2 + (X_m + X_s)^2) * ((-(R_{r1}' * R_{r2}' * R_s) + g * R_{r2}' * X_m * X_{r1}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r1}' + \\
& g * R_{r1}' * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_{r1}' * X_{r2}' + g * R_{r1}' * X_m * X_s + g * R_{r2}' * X_m * X_s + \\
& g * R_{r2}' * X_{r1}' * X_s + g * R_{r1}' * X_{r2}' * X_s)^2 \setminus + (-(R_{r1}' * (g * R_s * (X_m + X_{r2}') + R_{r2}' * (X_m + X_s))) + \\
& g * (-(R_{r2}' * R_s * (X_m + X_{r1}')) + g * (X_m * X_{r1}' * X_{r2}' + X_m * X_{r1}' * X_s + X_m * X_{r2}' * X_s + \\
& X_{r1}' * X_{r2}' * X_s)))^2 )))) / (3 * V_s^2 * \text{Sqrt} [(-(R_{r1}' * R_{r2}') + g^2 * X_m * X_{r1}' + g^2 * X_m * X_{r2}' + \\
& g^2 * X_{r1}' * X_{r2}')^2 + g^2 * (R_{r2}' * (X_m + X_{r1}') + R_{r1}' * (X_m + X_{r2}'))^2] * ((-(R_{r1}' * R_{r2}') + \\
& g^2 * X_m * X_{r1}' + g^2 * X_m * X_{r2}' + g^2 * X_{r1}' * X_{r2}') * (-(R_{r1}' * R_{r2}' * R_s) + g * R_{r2}' * X_m * X_{r1}' + \\
& g^2 * R_s * X_m * X_{r1}' + g * R_{r1}' * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_m * X_{r2}' + g^2 * R_s * X_{r1}' * X_{r2}' + g * R_{r1}' * X_m * X_s \\
& + g * R_{r2}' * X_m * X_s + g * R_{r2}' * X_{r1}' * X_s + g * R_{r1}' * X_{r2}' * X_s) - g * (R_{r2}' * (X_m + X_{r1}') + R_{r1}' * (X_m + \\
& X_{r2}')) * (-(R_{r1}' * (g * R_s * (X_m + X_{r2}') + R_{r2}' * (X_m + X_s))) + g * (-(R_{r2}' * R_s * (X_m + X_{r1}')) + \\
& g * (X_m * X_{r1}' * X_{r2}' + X_m * X_{r1}' * X_s + X_m * X_{r2}' * X_s + X_{r1}' * X_{r2}' * X_s))))))
\end{aligned}$$

(4.38)

Pour pouvoir utiliser les expressions précédentes, l'identification des paramètres du schéma équivalent du moteur asynchrone est indispensable.

#### 4.4 Identifications des moteurs NEMA

Les moteurs portant un label normalisé NEMA ont en commun, indépendamment de leur fabricant, un ensemble de caractéristiques de performances minimales à respecter.

Nous avons cherché à déterminer une base de données de moteurs respectant les exigences minimales de la norme NEMA. Celle-ci impose directement des contraintes de valeurs minimales ou maximales sur les variables suivantes:

- nombre de pôles
- tension nominale
- rendement nominal
- courant de démarrage
- rapport du couple de démarrage et du couple nominal

Le courant nominal et le facteur de puissance nominal sont laissés à la disposition du concepteur et du fabricant. (Ce sont ces variables qui différencient les moteurs des divers fabricants portant le même numéro NEMA, et par conséquent leur prix !).

En analysant une base de données de 17 765 moteurs fabriqués par 15 manufacturiers<sup>1</sup>, nous avons cherché à déterminer comment varient le facteur de puissance et le glissement nominal en fonction de la puissance et du nombre de pôles. Nous nous sommes intéressés aux moteurs alimentés à 230V.

Les données de 1252 moteurs à deux pôles, 1679 moteurs à quatre pôles, 1098 moteurs à six pôles et 239 moteurs à huit pôles fonctionnant sous 230 Volts ont été examinées. Les valeurs moyennes du facteur de puissance nominal et du glissement nominal ont été déterminées pour chaque puissance (Tableau 4.2 et Tableau 4.3 ).

La Figure 4.5 montre les résultats trouvés pour le facteur de puissance nominal.

---

<sup>1</sup> Baldor, Dayton, General Electric, Leeson, Lincoln, MagneTek, Marathon, Reliance, Siemens, Sterling, Teco, Toshiba, US Motors, WEG Electric Motors



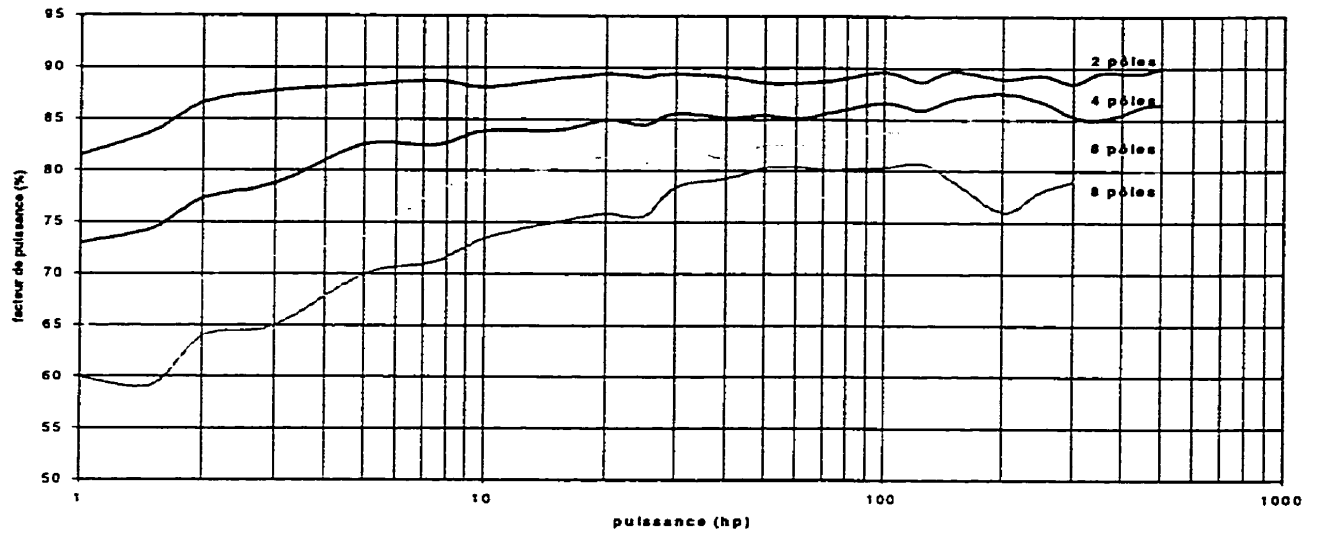


Figure 4.5 Facteur de puissance  $\times 100$  en fonction de la puissance [HP] et du nombre de pôles

HP	2 pôles	4 pôles	6 pôles	8 pôles
1	81.45	72.93	64.72	59.87
1.5	83.74	74.4	67.47	59.21
2	86.55	77.29	69.48	63.94
3	87.67	78.75	71.66	64.99
5	88.25	82.48	73.57	69.92
7.5	88.72	82.44	77.92	71.16
10	88.07	83.81	79.32	73.42
15	88.86	83.87	80.22	74.95
20	89.38	84.89	81.34	75.76
25	89.1	84.44	80.68	75.56
30	89.38	85.52	82.2	78.38
40	89.12	85.11	81.12	79.24
50	88.54	85.37	82.47	80.25
60	88.5	85.01	82.41	80.35
75	88.79	85.72	82.89	80.09
100	89.56	86.61	83.67	80.34
125	88.65	85.85	83.85	80.67
150	89.63	86.9	84.44	79
200	88.92	87.52	85.5	76
250	89.27	86.67	82	78
300	88.5	85.25	81	79
350	89.5	85	82.5	
400	89.5	85.5	81.75	
450	89.5	86.25	80	
500	90	86.5	80	

*Tableau 4.2 Valeurs moyennes du facteur de puissance x100 issues de l'étude statistique sur la base de données de moteurs manufacturés.*

HP	2 pôles	4 pôles	6 pôles	8 pôles
1	3.95	3.48	4.5	4.13
1.5	3.79	3.5	3.55	4.24
2	3.86	3.7	3.43	3.9
3	3.62	3.2	3.03	3.94
5	3.14	3.31	3.17	3.19
7.5	3.11	2.78	2.57	3.36
10	2.95	2.84	2.55	2.69
15	2.54	2.24	2.36	2.69
20	2.21	2.26	2.44	2.54
25	2	2.03	2.03	2.43
30	1.91	2	2.03	2.44
40	1.74	1.69	2.03	2.45
50	1.6	1.72	1.74	2.22
60	1.49	1.4	1.82	2.17
75	1.38	1.44	1.64	1.71
100	1.29	1.37	1.75	1.8
125	1.32	1.28	1.68	1.67
150	1.24	1.27	1.6	1.67
200	0.97	1.23	1.37	1.67
250	0.87	1	1.3	1.67
300	0.9	0.85	1.05	0.6
350	0.9	0.7	1.05	
400	0.95	0.7	1.05	
450	0.9	0.85	0.8	
500	1	0.8	0.8	

Tableau 4.3 Valeurs moyennes du glissement [%] nominal en fonction de la puissance et du nombre de pôles

En combinant ces données expertes aux données fournies par NEMA, nous avons pu déterminer les paramètres du circuit équivalent des moteurs typiques respectant la norme NEMA et présentant des performances moyennes au niveau du courant et du facteur de puissance.

Le logiciel INSPEC [19] a été utilisé pour l'identification des paramètres des moteurs. Si on lui fournit la tension nominale, le courant nominal, le rendement nominal, le facteur de puissance nominal, le glissement nominal et le courant de démarrage, ce logiciel détermine les paramètres du circuit équivalent correspondant. Pour le modèle à double cage et à encoches profondes, le rapport du couple de démarrage sur le couple nominal est également requis. Nous avons ainsi réussi à déterminer les paramètres du circuit équivalent permettant de reproduire les caractéristiques de performances minimales des moteurs asynchrones NEMA de moyenne puissance alimentés à 230V.

Les valeurs obtenues sont conservées dans une base de données au format Jet (Microsoft Access). Notre outil de dimensionnement des moteurs asynchrones, "MotorSizer" se sert de cette base de

données et des expressions développées à la section 4.2 pour visualiser les caractéristiques de performance des moteurs asynchrones lors du démarrage et au régime permanent.

Après avoir décrit les données importantes à prendre en compte lors du choix des moteurs électriques, établi les équations des paramètres des différents types de charge et des caractéristiques de performance des moteurs asynchrones, nous allons maintenant décrire la conception de notre outil interactif de sélection des moteurs.

## **Conception et Implantation d'un outil interactif de sélection et d'analyse des moteurs asynchrones**

### **5.1 Présentation générale de la méthode de sélection**

Connaissant les caractéristiques dynamiques et les caractéristiques de régime permanent de la charge entraînée, on en déduit les caractéristiques principales du moteur de puissance minimale nécessaire pour l'application considérée.

La sélection d'un moteur effectuée sur la seule base des caractéristiques au point nominal de régime permanent n'est pas suffisante dans le cas d'un démarrage direct sur le réseau d'alimentation considéré. L'échauffement important au cours du démarrage et la rapidité de celui-ci sont des contraintes de choix essentielles.

La méthode de sélection comporte donc quatre procédures principales :

- 1) l'estimation des caractéristiques dynamiques et de régime permanent de la charge,
- 2) la détermination des caractéristiques du moteur,
- 3) le choix d'un échantillon de moteurs dans une base de données normalisée et
- 4) le calcul des performances lors d'un démarrage direct, une éventuelle procédure itérative permettant de déterminer le moteur de puissance minimale répondant au cahier des charges suivant divers scénarios concernant les caractéristiques du réseau d'alimentation et la précision des données initiales de l'application.

### **5.2 Calcul des caractéristiques de la charge entraînée**

#### **5.2.1 Expression de la caractéristique mécanique de la charge**

Dans notre outil, nous avons considéré principalement les charges de type ventilateur, pompe,

compresseur, convoyeur et engin de levage.

Les ventilateurs, les pompes centrifuges et les compresseurs centrifuges ou à membrane ont une caractéristique mécanique quadratique. L'expression de leur couple résistant  $T_r$  en fonction de la vitesse  $\Omega$  est de la forme :

$$T_r(\Omega) = T_{r0} + k_c * \Omega^2 \quad (5.1)$$

$T_{r0}$  étant le couple à vide et  $k_c$ , une constante caractéristique de la charge.

Le couple des pompes à piston, des compresseurs à piston, des convoyeurs et des engins de levage ne varie pas en fonction de la vitesse en première approximation; leur caractéristique mécanique est une constante. Elle est donnée par :

$$T_r(\Omega) = T_m \quad (5.2)$$

### 5.2.2 Couple moyen de la charge ramené à l'arbre du moteur

Dans le cas où il existe de grandes variations de la charge mécanique entraînée, la connaissance de la valeur nominale de son couple résistant n'est pas suffisante pour déterminer les caractéristiques du moteur électrique d'entraînement. Il faut alors considérer le couple résistant exercé par la charge au cours du démarrage (de zéro à la vitesse nominale  $\Omega_n$ )

Il est défini par l'intégrale :

$$T_{rm} = \frac{1}{\Omega_{cn}} \int_0^{\Omega_n} T_r(\Omega) * d\Omega \quad (5.3)$$

Pour ramener le couple de la charge à l'arbre du moteur, il faut prendre en compte le rapport de transmission  $R$  et le rendement  $\eta_r$  du réducteur suivant l'équation (2.2). On obtient ainsi pour le couple instantané et le couple moyen respectivement, les équations (5.4) et (5.5).

$$T_{r\_ramené} = \frac{T_r * R}{\eta_r} \quad (5.4)$$

$$T_{rm\_ramené} = \frac{T_{rm} * R}{\eta_r} \quad (5.5)$$

### 5.2.3 Puissance requise par la charge

La puissance nominale de la charge est déterminée par le produit de son couple nominal et de sa vitesse nominale :

$$P_n = T_m * \Omega_{cn} \quad (5.6)$$

### 5.2.4 Estimation de l'inertie de la charge

L'inertie de la charge entraînée est une donnée essentielle qui influence considérablement la durée du démarrage et par conséquent l'échauffement du moteur. La connaissance précise de l'inertie de la charge est d'une très grande importance dans le processus de sélection du moteur.

Pour pallier à un manque éventuel d'information sur l'inertie de la charge, nous avons ajouté un module qui permet d'estimer approximativement l'inertie de la charge en fonction des dimensions géométriques et de la masse de la charge ou de la nature du matériau qui la compose. La Figure 5.1 montre la fenêtre de saisie des paramètres permettant d'effectuer cet estimé.

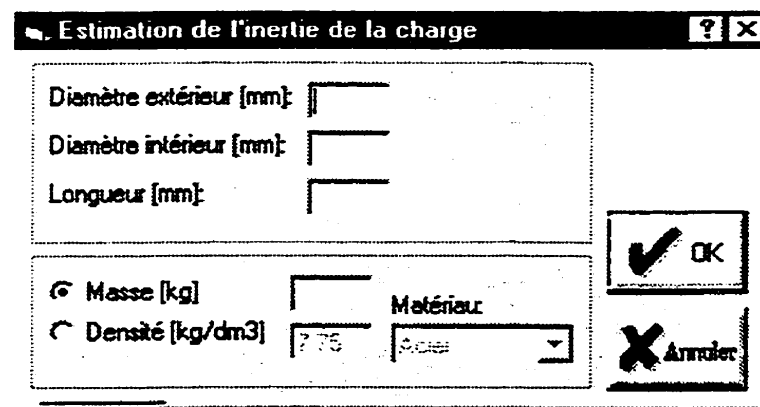


Figure 5.1 Boîte de dialogue d'estimation de l'inertie de la charge

Si la masse  $M$  de la charge n'est pas connue, elle est déterminée à partir de ses dimensions géométriques (diamètre extérieur  $D$ , diamètre intérieur  $d$ , longueur  $l$ ) et de la densité  $\rho$  du matériaux :

$$M = \pi * \frac{D^2 - d^2}{4} * l * \rho \quad (5.7)$$

Le moment d'inertie de la charge vaut alors :

$$J_{ch} = M * \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2}{2} \quad (5.8)$$

### 5.3 Calcul des caractéristiques du moteur nécessaire

#### 5.3.1 Calcul du nombre de pôles et de la vitesse de synchronisme du moteur

La vitesse de rotation nominale de la charge entraînée, le rapport de transmission du réducteur et la fréquence du réseau électrique d'alimentation déterminent le nombre de pôles du moteur asynchrone.

La vitesse nominale du moteur d'entraînement  $\Omega_n$  [rad/s] est liée à la vitesse nominale de la charge  $\Omega_{cn}$  [rad/s] par la relation :

$$\Omega_n = \frac{\Omega_{cn}}{R} \quad (5.9)$$

La vitesse de synchronisme  $\Omega_o$  [rad/s] du moteur asynchrone est définie, quant à elle, par :

$$\Omega_o = \frac{60 * f}{p} \quad (5.10)$$

Le nombre de paire de pôles à choisir est la valeur maximale de l'entier naturel  $p$  satisfaisant à la relation  $\Omega_o > \Omega_n$

#### 5.3.2 Estimation de l'inertie du moteur

La norme NEMA MG 14.45 donne une formule empirique permettant d'estimer l'inertie du rotor avec les dispositifs de freinage dynamique en fonction du nombre de pôles et de la puissance du moteur. C'est cette formule que nous utilisons pour donner une indication sur l'inertie du moteur asynchrone. Toutefois, l'utilisateur a la possibilité de remplacer la valeur proposée par défaut par une valeur plus précise, choisie dans les catalogues.

L'expression de l'inertie du rotor, suivant la norme NEMA 14.45, est donnée par

$$Wk^2 = \left[ 0.02 \times 2^{\left[\frac{Pôles}{2}\right]} \times HP \left[ 1.35 - 0.05 \times \frac{Pôles}{2} \right] \right] \quad (5.11)$$



où :

- $Wk^2$  est l'inertie du rotor exprimée en  $lb-ft^2$  ;
- $HP$ , la puissance du moteur exprimée en hp ;
- $Pôles$ , le nombre de pôles.

Pour trouver l'inertie du rotor en  $kg.m^2$ , on utilise la formule de conversion suivante :

$$J_M = 0.04213 * Wk^2 \quad (5.12)$$

### 5.3.3 Calcul de l'inertie maximale de la charge

Nous avons utilisé la norme NEMA 12.54.1 pour déterminer la valeur maximale de l'inertie de la charge que le moteur asynchrone doit être capable de supporter. Suivant cette norme, un moteur asynchrone à cage d'écureuil ayant une puissance de régime telle qu'indiquée par la norme 10.32.4 et des caractéristiques de performance conformes à la partie 12 des standards MG 1 de NEMA<sup>2</sup> doit être capable d'accélérer sans échauffement nuisible, une charge ayant une inertie ramenée à l'arbre du moteur inférieure ou égale aux valeurs listées dans la table NEMA 12-5 sous les conditions suivantes [1] :

- a. La tension appliquée et la fréquence sont conformes à la norme 12.44
- b. Durant la phase d'accélération, le couple de la charge entraînée est égal ou inférieur à un couple variant suivant le carré de la vitesse et égal à 100 % du couple nominal de la charge à la vitesse nominale.
- c. Deux démarrages successifs (arrêt complet entre les deux démarrages), le moteur étant initialement à la température ambiante ou un démarrage, le moteur étant à une température n'excédant pas la température correspondant à la charge de régime.

Les données de la table 12-5 des standards MG 1 de NEMA peuvent être représentées par l'une des deux expressions suivantes :

Si la vitesse de synchronisme  $N_s$  est inférieure à 3600 tours / minutes, nous avons :

---

<sup>2</sup> Courant de démarrage conforme à 12.38.1, couple de décrochage conforme à 12.39.1, isolants de classe A ou B avec une élévation de température conforme à 12.43 et un facteur de service conforme à 12.51.2.

$$Wk^2 = 24 * \left[ \frac{HP^{0.95}}{\left[ \frac{N_s}{1000} \right]^{2.4}} \right] - 0.0685 * \left[ \frac{HP^{1.5}}{\left[ \frac{N_s}{1000} \right]^{1.8}} \right] \quad (5.13)$$

Si la vitesse de synchronisme  $N_s$  est égale à 3600 tours / minutes, alors :

$$Wk^2 = 27 * \left[ \frac{HP^{0.95}}{\left[ \frac{N_s}{1000} \right]^{2.4}} \right] - 0.0685 * \left[ \frac{HP^{1.5}}{\left[ \frac{N_s}{1000} \right]^{1.8}} \right] \quad (5.14)$$

On utilise l'expression (5.12) pour convertir l'inertie maximale de  $lb-ft^2$  en  $kg.m^2$ .

### 5.3.4 Détermination de la puissance du moteur

La puissance nominale du moteur d'entraînement  $P_n$  est calculée à partir de la puissance nominale de la charge  $P_{chn}$ , et du rendement  $\eta_r$  du réducteur.

$$P_n = \frac{P_{chn}}{\eta_r} \quad (5.15)$$

### 5.3.5 Choix d'un moteur de la base de données intégrée.

Après avoir déterminé la puissance et le nombre de pôles du moteur asynchrone, on peut sélectionner, dans la base de données intégrée au logiciel, un moteur électrique et vérifier la validité du choix par l'analyse des performances de l'entraînement électromécanique au cours du démarrage et en régime permanent.

## 5.4 Calcul des performances au cours du démarrage

La rotation des parties tournantes du moteur et de la charge entraînée est régie par l'équation :

$$T_{em} - T_{r\_ramené} = J_t * \frac{d\Omega}{dt} \quad (5.16)$$

$T_{em}$ , étant le couple électromagnétique développé par le moteur asynchrone (4.26);

$T_{r\_ramené}$ , le couple résistant de la charge entraînée ramené sur l'arbre du moteur (5.5);

$J_t$ , le moment d'inertie total des parties tournantes défini par la somme de l'inertie du moteur  $J_M$  de l'inertie du réducteur  $J_R$  et de l'inertie de la charge ramenée sur l'arbre du moteur (5.17)

$$J_t = J_M + J_R + J_{ch} * R^2 \quad (5.17)$$

$\frac{d\Omega}{dt}$ , l'accélération instantanée.

En intégrant numériquement l'équation précédente, on peut déterminer la durée du processus de démarrage et tracer les variations, en fonction du temps, de la vitesse de l'entraînement et des courants du moteur asynchrone lors du démarrage.

#### 5.4.1 Durée de démarrage

La durée du démarrage s'obtient par intégration de l'équation (5.16) de zéro à la vitesse nominale  $\Omega_n$  du moteur, le couple résistant de la charge étant ramené sur l'arbre du moteur.

$$t_d = J_t * \int_0^{\Omega_n} \frac{d\Omega}{T_{em}(\Omega) - T_{r\_ramené}(\Omega)} \quad (5.18)$$

Pour calculer numériquement l'intégrale (5.18) nous allons procéder de la façon suivante :

1)- On divise la vitesse nominale du moteur  $\Omega_n$  en  $N$  intervalles identiques  $\Delta\Omega$  (voir Figure 5.2 ci-dessous)

$$\Delta\Omega = \Omega_{i+1} - \Omega_i = \frac{\Omega_n}{N} \quad (5.19)$$

2)- Pour chacun des intervalles  $\Delta\Omega$ , on détermine le temps requis  $\Delta t_i$  pour passer la vitesse de l'entraînement de  $\Omega_i$  à  $\Omega_{i+1}$ .

3)- On fait la somme de tous les  $\Delta t_i$  pour trouver la durée de démarrage.

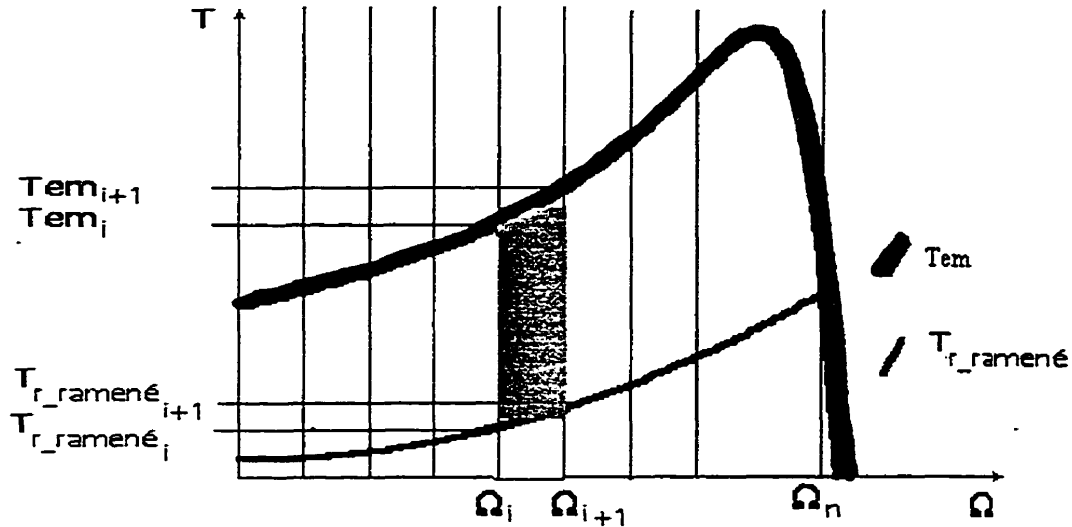


Figure 5.2 Calcul du temps de démarrage

Pour simplifier le calcul, nous allons considérer que le couple électromagnétique développé par le moteur est constant dans le petit intervalle  $\Delta\Omega_i$  et égal à la moyenne arithmétique des valeurs du couple électromagnétique en régime permanent correspondant aux vitesses  $\Omega_i$  et  $\Omega_{i+1}$ . Le couple résistant de la charge ramené sur l'arbre du moteur sera également supposé constant dans l'intervalle  $\Delta\Omega_i$ .

Avec ces hypothèses, le couple d'accélération de l'entraînement, dans l'intervalle  $\Delta\Omega_i$ , sera égal à la différence entre les valeurs moyennes du couple électromagnétique en régime permanent et du couple résistant de la charge ramené sur l'arbre du moteur. Le temps d'accélération correspondant est alors défini par :

$$\Delta t_i = J_t * \frac{\Delta\Omega}{[T_{em}(\Omega_i) + T_{em}(\Omega_{i+1}) - T_{r\_ramené}(\Omega_i) - T_{r\_ramené}(\Omega_{i+1})] / 2} \quad (5.20)$$

La durée du processus de démarrage peut être déterminée approximativement par la somme de tous les intervalles de temps  $\Delta t_i$

$$(5.21)$$

#### 5.4.2 Durée de démarrage maximale admissible

La durée de démarrage maximale admissible est déterminée à partir de l'inertie maximale de la

charge qu'un moteur asynchrone NEMA est capable d'entraîner suivant les conditions de la norme MG1 12.54.1 (§ 5.3.3). Il suffit donc d'appliquer la méthode précédente à l'essai défini par cette norme pour en déduire le temps de démarrage maximal permis pour un moteur normalisé donné.

$$t_{d \max} = \sum_{i=1}^N J_{r \max} * \frac{\Delta\Omega}{[T_{em}(\Omega_i) + T_{em}(\Omega_{i+1}) - T_{r\_ramené}(\Omega_i) - T_{r\_ramené}(\Omega_{i+1})] / 2} \quad (5.22)$$

$T_{r2}(\Omega)$  étant la caractéristique mécanique d'une charge quadratique telle que l'impose la norme MG1 12.54.1

### 5.4.3 Énergie dissipée dans le moteur lors du démarrage

Pour calculer l'énergie dissipée lors du démarrage  $\Delta E$ , on détermine les pertes Joule dans le rotor et dans le stator pour chacun des intervalles de temps  $\Delta t_i$  et on fait leur somme. Pour simplifier, nous utiliserons la caractéristique de régime permanent des courants :

$$\Delta E_d = 3 * \sum_{i=1}^N R_s * \left[ \frac{[I_s(g_i) + I_s(g_{i+1})]}{2} \right]^2 * \Delta t_i + 3 * \sum_{i=1}^N R_r * \left[ \frac{[I_r(g_i) + I_r(g_{i+1})]}{2} \right]^2 * \Delta t_i \quad (5.23)$$

Où :

- $R_s$  est la résistance du stator ;
- $R_r$ , la résistance du rotor ;
- $I_s$ , le courant du stator ;
- $I_r$ , le courant du rotor ;
- $g_i = \frac{\Omega_s - \Omega_i}{\Omega_s}$  , le glissement au point  $i$  ;
- $g_{i+1} = \frac{\Omega_s - \Omega_{i+1}}{\Omega_s}$  , le glissement au point  $i+1$  ;
- $\Delta t_i$ , le temps requis pour faire passer la vitesse de  $N_i$  à  $N_{i+1}$

### 5.4.4 Énergie dissipée maximale admissible lors du démarrage

Elle correspond aux pertes d'énergie par effet Joule lors du processus de démarrage dans un moteur entraînant une charge quadratique dont l'inertie est égale à l'inertie maximale admissible (§ 5.3.2).

L'énergie dissipée maximale admissible lors du démarrage est donnée par l'expression suivante :

(5.24)

Si on considère que l'échauffement des enroulements au rotor et au stator est adiabatique pour les durées de démarrage usuelles,  $\Delta E_{dmax}$  correspond à la valeur limite des pertes d'énergie admissible dans les enroulements quelque soit le type de charge entraînée. Les exigences de la norme MG1 12.54.1 et la connaissance du schéma équivalent du moteur permettent donc d'établir **une condition limite de démarrage indépendante de l'inertie et du type de charge entraînée**. Ceci est une contribution originale qui va être mise à profit pour le choix des moteurs.

#### 5.4.5 Variation de la vitesse de l'entraînement dans le temps

Après avoir calculé tous les intervalles de temps  $\Delta t_i$  pour les  $N$  intervalles de vitesses  $\Delta \Omega$ , on peut déterminer les coordonnées  $(t_i, \Omega_i)$  de  $N+1$  points du plan *Temps – Vitesse* :

$$\begin{aligned} t_1 &= 0 \\ t_i &= t_{i-1} + \Delta t_i \quad (1 \leq i \leq N + 1) \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= 0 \\ \Omega_i &= t_{i-1} + \Delta \Omega_i \quad (1 \leq i \leq N + 1) \end{aligned} \quad (5.26)$$

En reliant ces différents points on obtient la caractéristique montrant la variation de la vitesse de l'entraînement dans le temps. La figure ci dessous illustre une telle caractéristique.

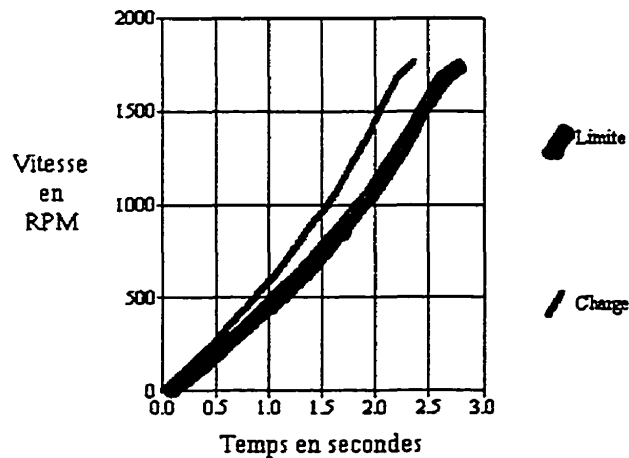


Figure 5.3 Variation de la vitesse de l'entraînement dans le temps

#### 5.4.6 Variation du courant du moteur dans le temps

En procédant de la même manière qu'au § 5.4.5, on peut déterminer les courants correspondant à chacun des temps  $t_i$  (vitesse  $\Omega_i$ ). On obtient ainsi la caractéristique visualisant les variations du courant du moteur lors du démarrage (la composante transitoire du courant n'est pas prise en compte.)

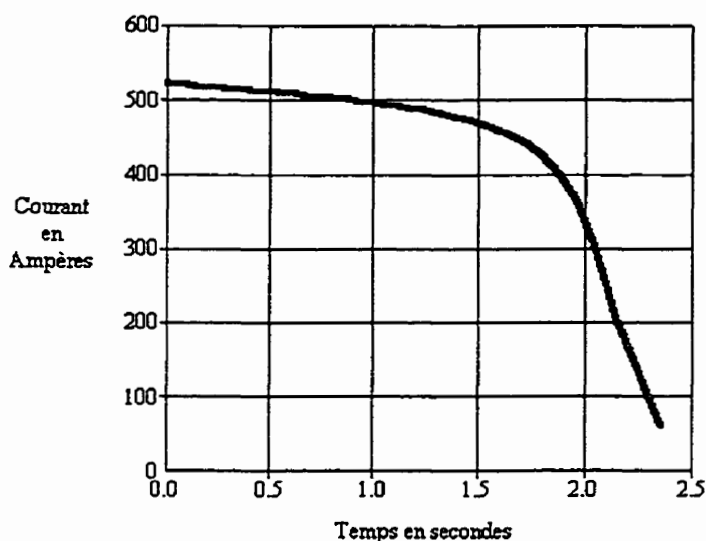


Figure 5.4 Variation du courant efficace du moteur lors du démarrage

#### 5.4.7 Critères de choix du moteur

Comme nous l'avons déjà mentionné au § 5.1, la sélection d'un moteur effectuée sur la seule base des caractéristiques au point nominal de régime permanent n'est pas suffisante dans le cas d'un démarrage direct sur le réseau d'alimentation considéré. L'échauffement important au cours du démarrage et la rapidité de celui-ci sont des contraintes de choix essentielles.

Ainsi, pour vérifier la conformité du moteur asynchrone choisi aux exigences de la charge mécanique entraînée, nous utilisons l'énergie dissipée dans le moteur lors du démarrage comme critère de validité du choix du moteur.

Les pertes d'énergie accumulées dans le moteur asynchrone choisi doivent être inférieures ou égales aux pertes d'énergie maximales admissibles, lors du démarrage.

L'énergie dissipée dans le moteur lors du démarrage  $\Delta E_d$  est calculée par l'équation (5.24) et les pertes d'énergie maximales admissibles  $\Delta E_{dmax}$  par l'équation (5.25)

Le moteur asynchrone choisi doit satisfaire la contrainte exprimée par l'inégalité (5.27) ci-dessous : Elle traduit la contrainte de choix du moteur suivant les pertes d'énergie admissibles dans le moteur lors du démarrage.

$$\Delta E_d \leq \Delta E_{d_{\max}} \quad (5.27)$$

## 5.5 Caractéristiques en régime permanent

Nous nous sommes servis des expressions établies au § 4.3 pour tracer, à l'aide de notre outil, les caractéristiques du moteur asynchrone en régime permanent.

### 5.5.1 Courants

La représentation du courant au stator (4.14) et des courants au rotor (4.18), (4.19) et (4.20)) est donnée à la Figure 5.5 .

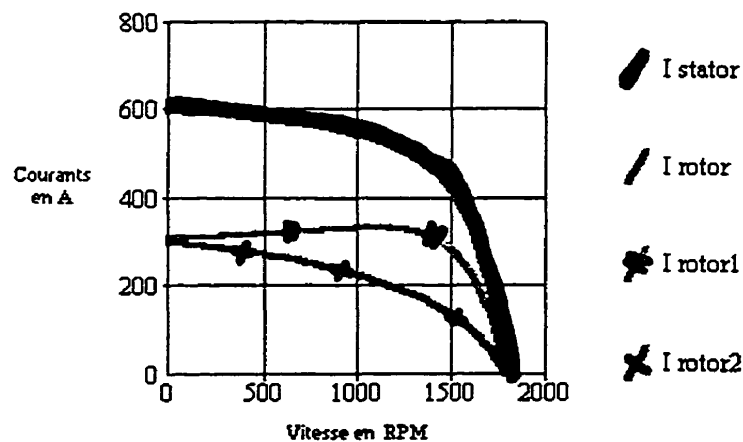


Figure 5.5 Courants du moteur

### 5.5.2 Couples

La Figure 5.6 présente les variations des couples électromagnétiques de la première (4.23) et de la seconde (4.24) cage du rotor, du couple électromagnétique total (4.26) ainsi que la caractéristique mécanique de la charge entraînée (§ 5.2.1).



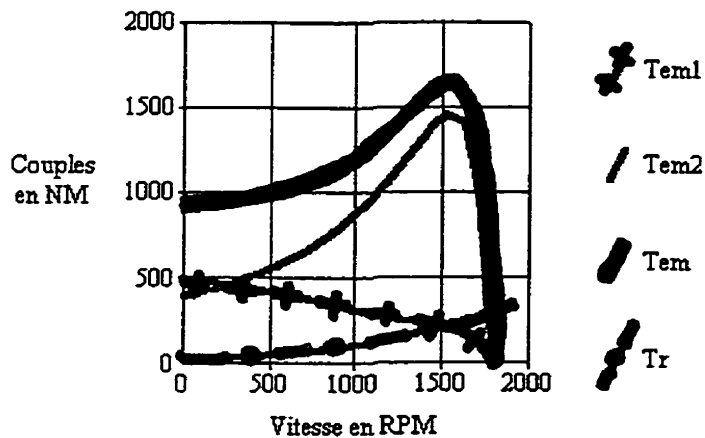


Figure 5.6 Couples du moteur et de la charge

### 5.5.3 Pertes Joule

Les pertes Joule dans le stator (4.32) et dans le rotor (4.34) ainsi que la puissance électrique absorbée par le moteur (4.30) et la puissance mécanique de sortie (4.36) sont représentées par la Figure 5.7

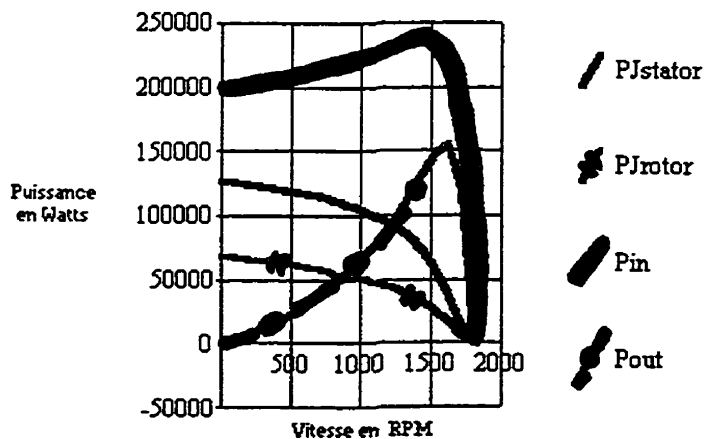


Figure 5.7 Puissance d'entrée, puissance de sortie et pertes d'énergie dans le moteur en fonction de la vitesse.

### 5.5.4 Rendement

Le rendement déterminé au § 4.3.9 est représenté sur la Figure 5.8

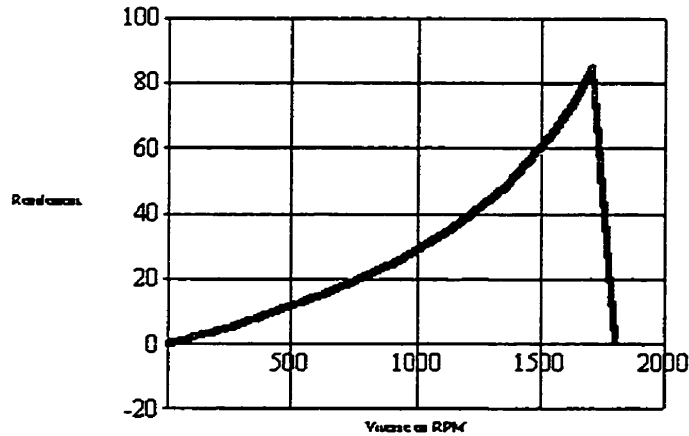


Figure 5.8 Rendement du moteur en fonction de la vitesse

### 5.5.5 Facteur de puissance

La Figure 5.9 montre la variation du facteur de puissance en fonction de la vitesse. L'équation de la courbe avait déjà été déterminée au § 4.3.4.

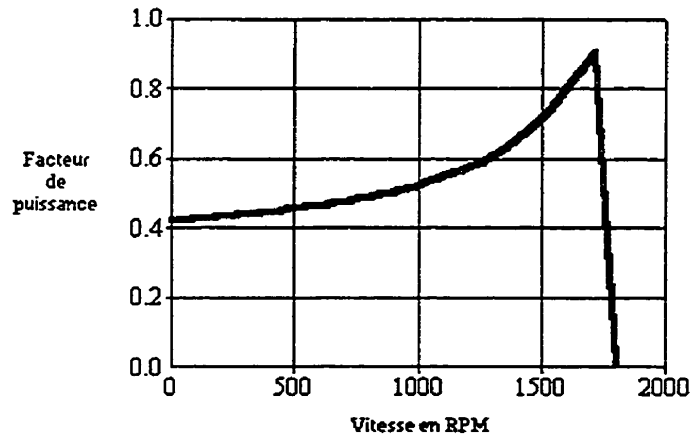


Figure 5.9 Variation du facteur de puissance en fonction de la vitesse

Remarque : Le facteur de puissance au synchronisme est très faible mais non nul puisque la partie résistive de l'impédance du moteur est égale à  $R_s$  avec les hypothèses adoptées (pertes fer négligées).

## 5.6 Rapport comparatif des différents scénarios

La puissance, la tension et la vitesse nominales de chacun des moteurs, la durée de démarrage, le

rendement nominal, le facteur de puissance nominal, le courant de démarrage et le courant nominal des différents scénarios sont comparés dans un tableau récapitulatif tel que celui de la Figure 5.10

**Rapport comparatif des différents scénarios**

Paramètres	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Puissance [Hp/kW]					
Nombre de pôles					
U [Volts]					
Nn [RPM]					
td [s] /tdmax [s]					
Rend. nominal [%]					
FP nominal					
I <sub>n</sub> nominal [A]					
I <sub>n</sub> démarrage [A]					
P absorbée [kW]					

Figure 5.10 Tableau comparatif des différents scénarios

## Guide de l'utilisateur

Le programme "**MotorSizer**" entièrement réalisé dans à l'occasion de ce travail est un logiciel interactif permettant de choisir automatiquement un moteur asynchrone adapté à une application industrielle donnée. L'utilisateur fournit au logiciel les données sur la charge entraînée, la transmission, le mode de démarrage, le réseau électrique et les conditions environnementales. Le logiciel détermine le moteur requis pour entraîner la charge. Les caractéristiques en régime permanent du moteur choisi peuvent alors être visualisées par l'utilisateur.

Dans ce chapitre, nous allons décrire l'interface utilisateur de l'application et indiquer la procédure à suivre pour choisir un moteur électrique à partir de "**MotorSizer**".

### 6.1 Description de l'interface utilisateur

L'interface de l'application MotorSizer est essentiellement constituée d'une feuille multi – document MDI<sup>3</sup>. Cette feuille comprend la barre des menus déroulants, la barre d'outils, la barre de suivi des tâches et une zone de travail à l'intérieur de laquelle s'affichent les boîtes de dialogues et les autres feuilles de l'application.

L'interface utilisateur de l'application MotorSizer est illustrée à la Figure 6. 1. Le nom du fichier de projet (Calcination.prj dans l'exemple montré) est affiché sur la barre de titre de la fenêtre principale de l'application.

---

<sup>3</sup> MDI (Multi – Document Interface): Une feuille MDI est feuille pouvant contenir plusieurs autres feuilles, appelées feuilles MDI filles. Celles-ci sont affichées dans la feuille MDI sous formes de fenêtres.

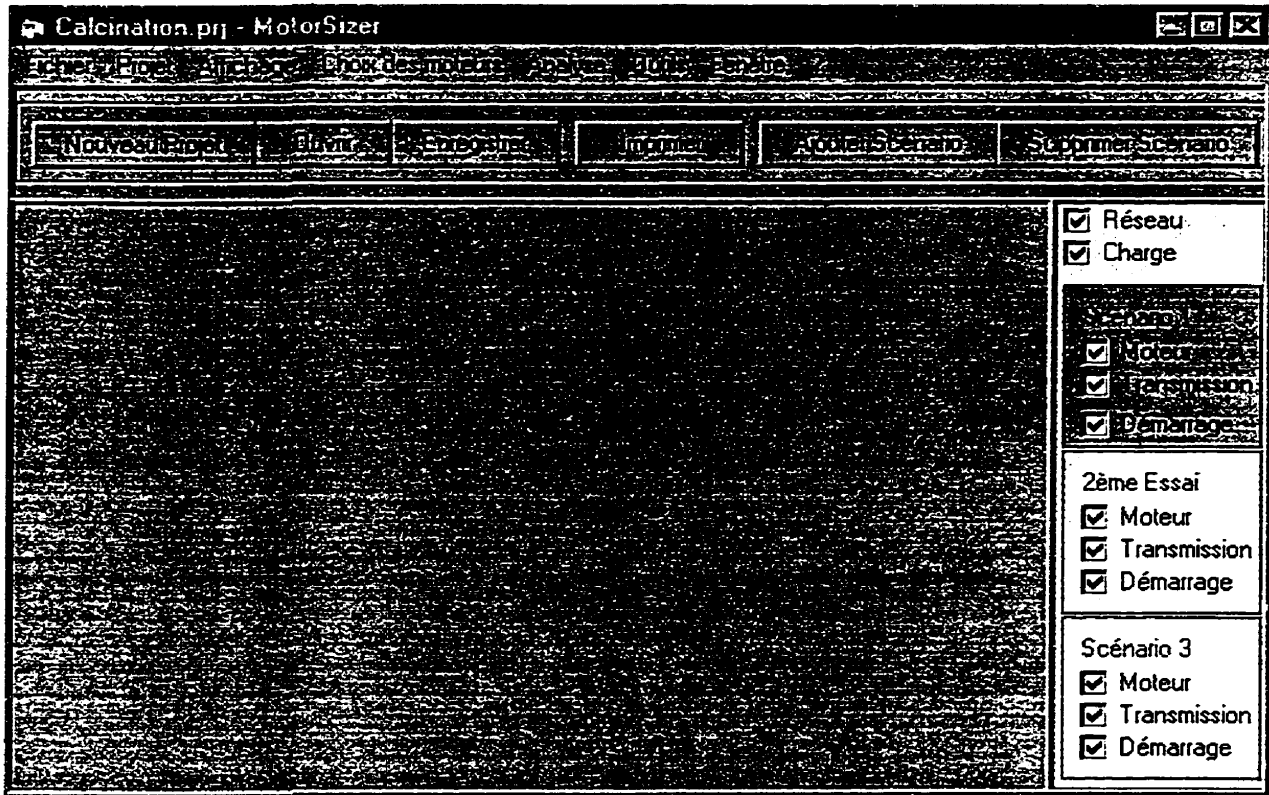


Figure 6. 1 Interface utilisateur de MotorSizer

### 6.1.1 La barre des menus

Les différentes commandes de l'application MotorSizer sont regroupées dans neuf menus principaux:

#### a ) - Menu "Fichier":

Ce menu comprend les commandes habituelles de manipulation des fichiers:

- **Nouveau:** crée un nouveau projet;
- **Ouvrir:** ouvre un projet existant;
- **Fermer:** ferme le projet en cours;
- **Enregistrer:** enregistre le projet en cours avec le même nom;
- **Enregistrer sous:** enregistrer le projet en cours sous un nom différent;
- **Mise en page:** permet de modifier les paramètres d'impression du projet;
- **Imprimer:** imprime le projet;
- **Quitter:** met fin à "MotorSizer" .

Le menu "Fichier" est illustré à la Figure 6. 2

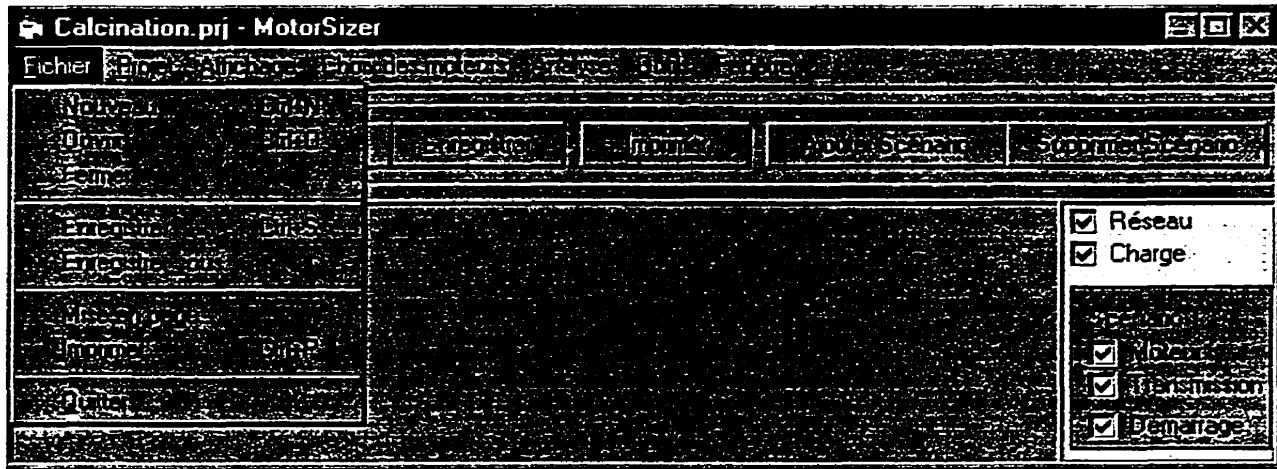


Figure 6. 2 Menu "Fichier"

b) - Menu "Projet":

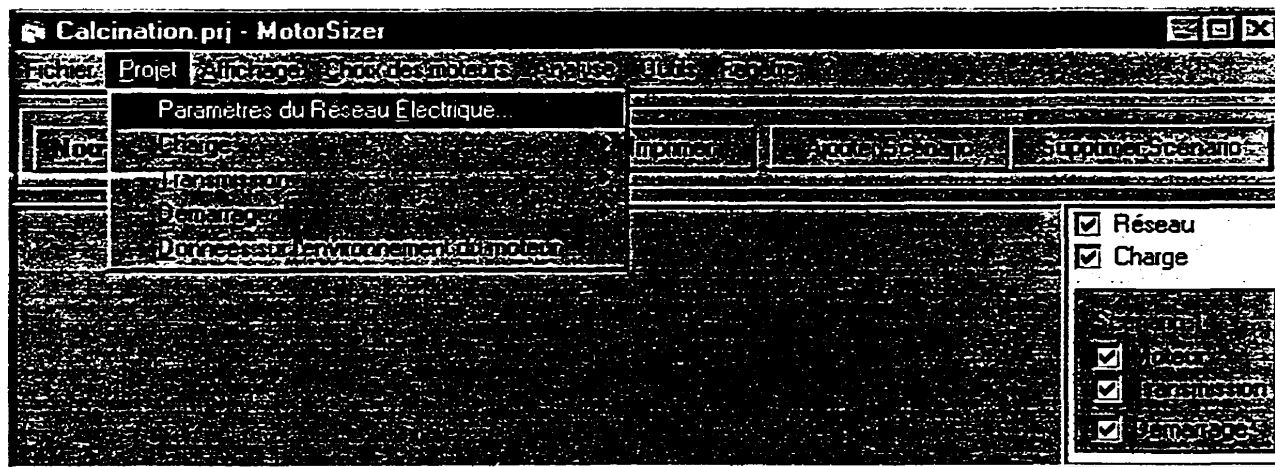


Figure 6. 3 Menu "Projet"

C'est avec ce menu que l'utilisateur doit fournir au programme les données pertinentes de l'application visée. Il comprend les sous - menus suivants:

- **Paramètres du Réseau Électrique:** ouvre une boîte de dialogue permettant à l'utilisateur d'introduire les données relatives au réseau électrique d'alimentation spécifique à son alimentation.
- **Charge:** ouvre un autre sous - menu permettant de spécifier les caractéristiques de la charge à entraîner. L'utilisateur peut sélectionner la charge à partir d'une bibliothèque ou créer une nouvelle charge. En plus des charges de type ventilateur, pompe, compresseur, convoyeur à bande et engins de levage, le programme offre la possibilité de sélectionner

une charge de type personnalisée; l'utilisateur fournira alors lui même, point par point, la caractéristique couple - vitesse de la charge. Notons que cette possibilité élargit grandement les limites de "MotorSizer" quant aux types de charges qu'il est capable d'analyser. La présente le sous - menu "Charge".

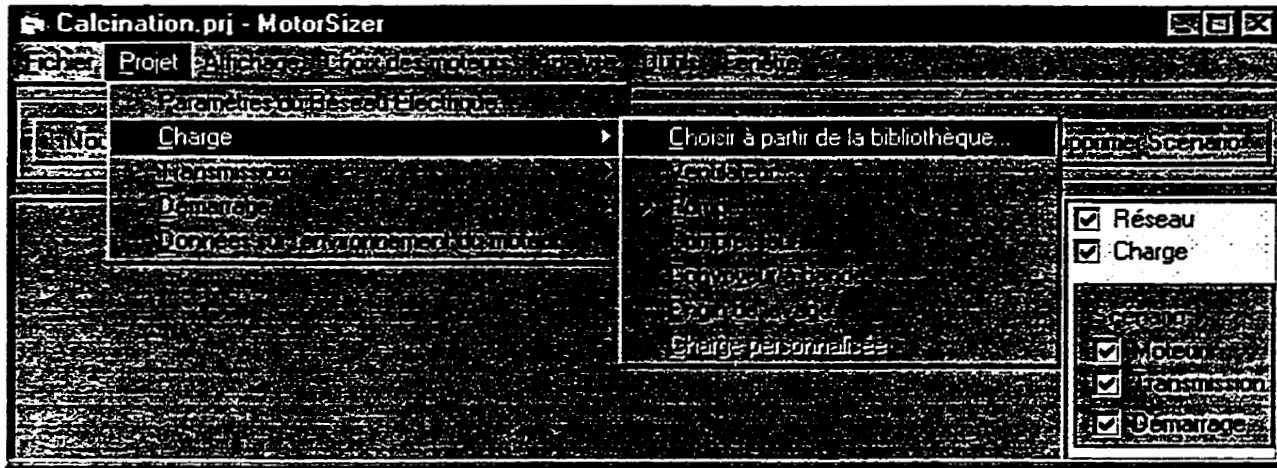


Figure 6. 4 Sous - menu "Projet /Charge"

- **Transmission:** ouvre un sous - menu permettant de spécifier le mode de couplage de la charge entraînée au moteur. Si un mode de couplage autre que le couplage direct est sélectionné, le programme ouvre la boîte de dialogue correspondante. L'utilisateur introduit alors les données permettant de déterminer le rapport de transmission, le rendement et le moment d'inertie de l'accouplement. Le sous-menu "Transmission" est donné à la Figure 6. 5.

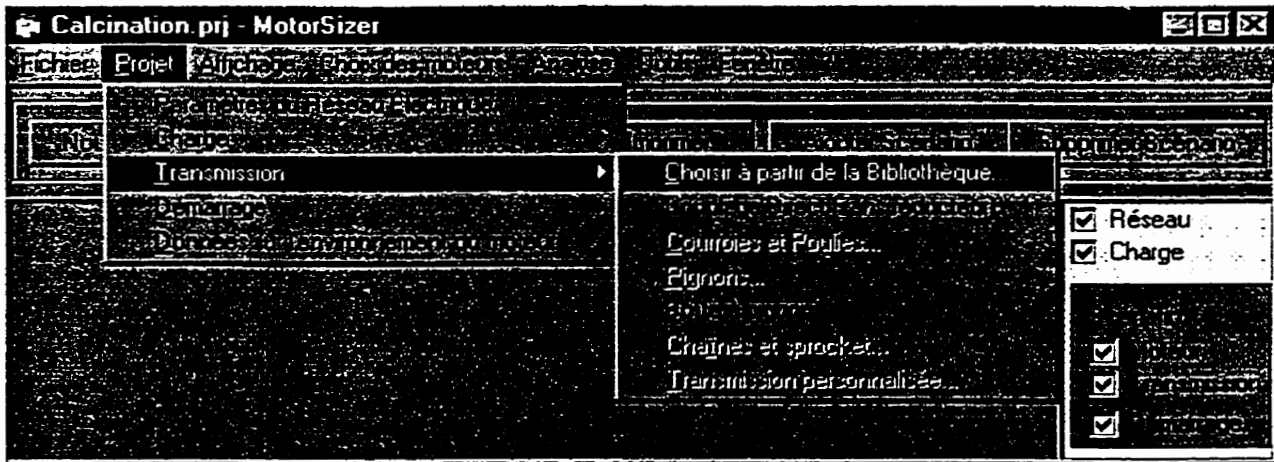


Figure 6. 5 Sous – menu "Projet /Transmission"

- **Démarrage:** ouvre un sous - menu pour choisir le mode de démarrage du moteur asynchrone. La Figure 6. 6 montre le sous - menu "*Démarrage*".

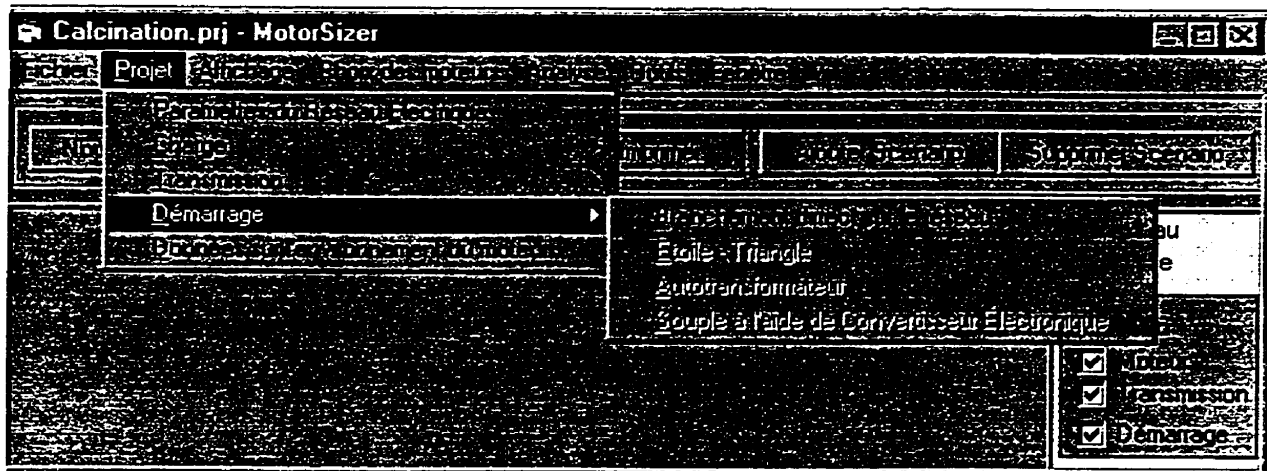


Figure 6. 6 Sous – menu "*Projet /Démarrage*"

- **Données sur l'environnement du moteur:** ouvre une boîte de dialogue permettant l'introduction des paramètres concernant l'ambiance de travail du moteur asynchrone.

*c) - Menu "Affichage":*

Ce menu permet d'afficher ou de masquer la barre des menus et la barre de suivi des tâches. Il est donné à la Figure 6. 7

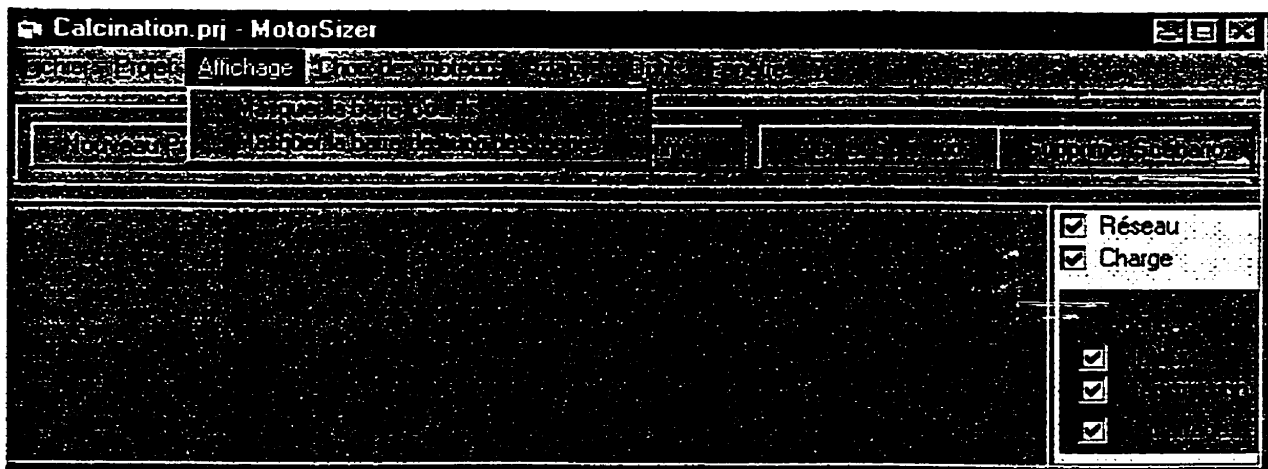


Figure 6. 7 Menu "*Affichage*".



d) - Menu "Choix des moteurs":

Ce menu permet de déterminer, pour le scénario en cours, les caractéristiques du moteur asynchrone adapté aux exigences de la charge et de la transmission. Il permet également de choisir un moteur dans la base de données NEMA du logiciel. La Figure 6.8 illustre ce menu.

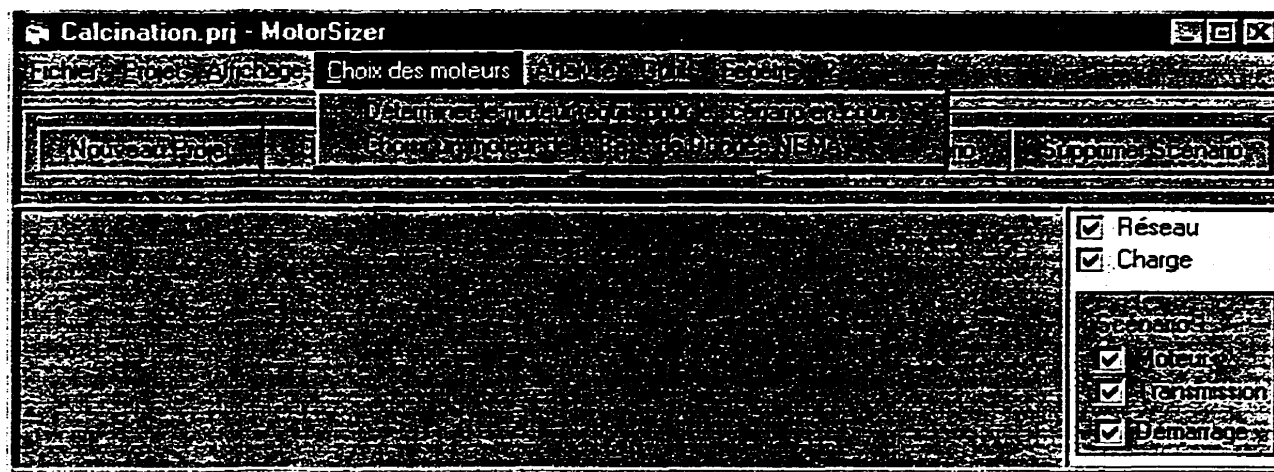


Figure 6.8 Menu "Choix des moteurs".

e) - Menu "Analyse"

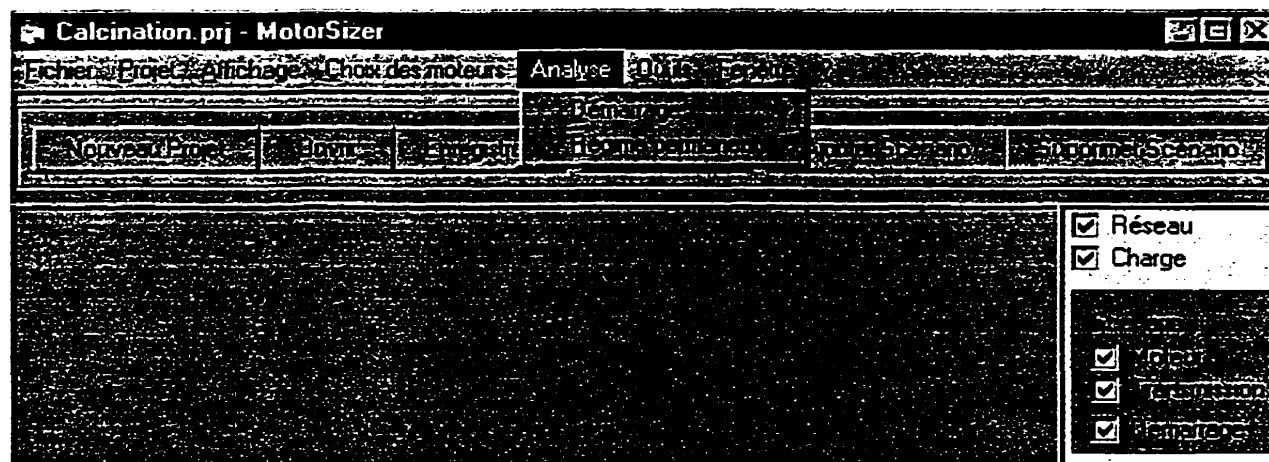


Figure 6.9 Menu "Analyse"

Il permet d'analyser les caractéristiques de démarrage et de régime permanent de l'entraînement pour le scénario en cours. Comme le montre la Figure 6.9, ce menu comprend deux sous-menus: le sous-menu "Démarrage" et le sous-menu "Régime permanent".

- **Démarrage:** visualise les variations de la vitesse et du courant dans le temps lors du processus de démarrage de l'entraînement.

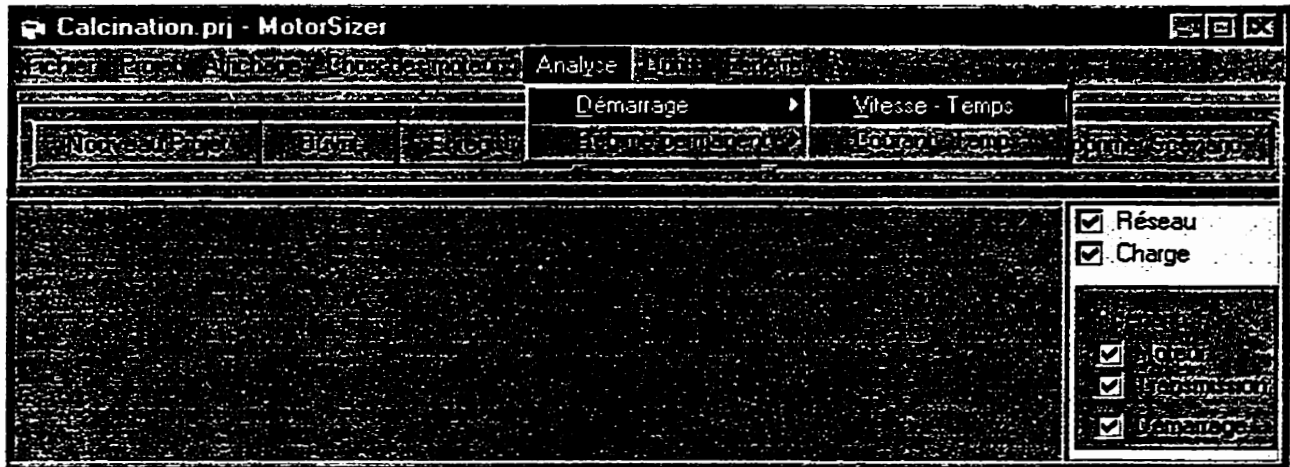


Figure 6. 10 Sous - menu "Analyse / Démarrage".

- **Régime permanent:** visualise les variations des courants, des couples, des pertes Joule, du rendement et du facteur de puissance en régime permanent.

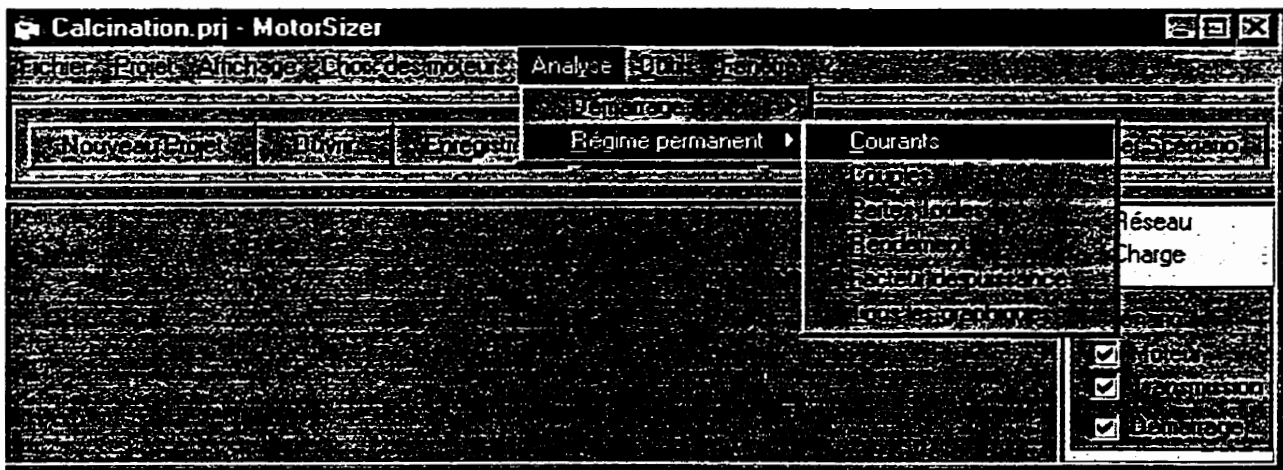


Figure 6. 11 Sous - menu "Analyse / Régime permanent"

f) - Menu "Outils":

Ce menu permet de choisir certaines options du programme. Il est montré à la Figure 6. 12

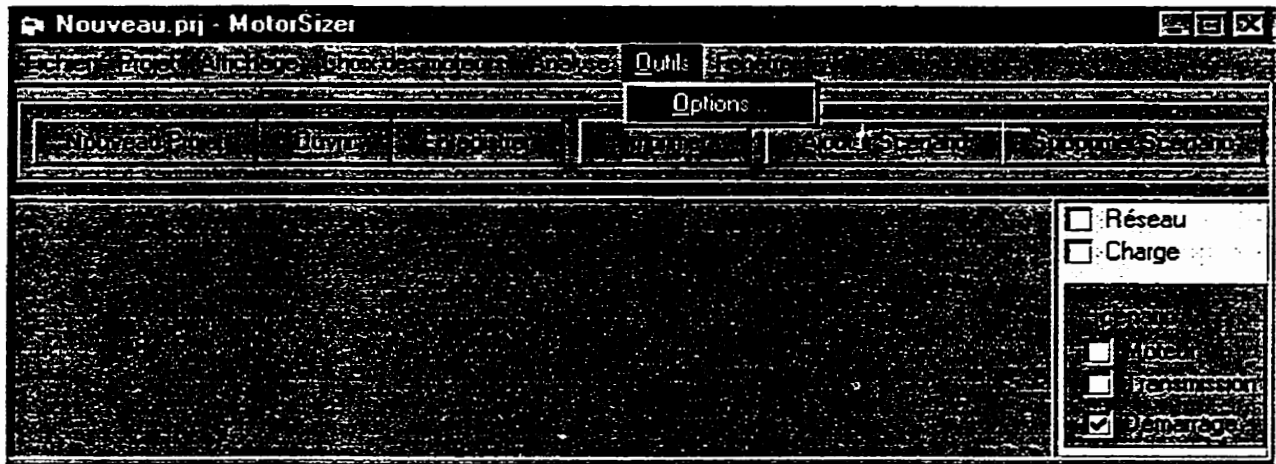


Figure 6. 12 Menu "Outils"

g) - Menu "Fenêtres":

Ce menu permet de réorganiser les différentes feuilles ouvertes de l'application. Il est montré à la Figure 6.13

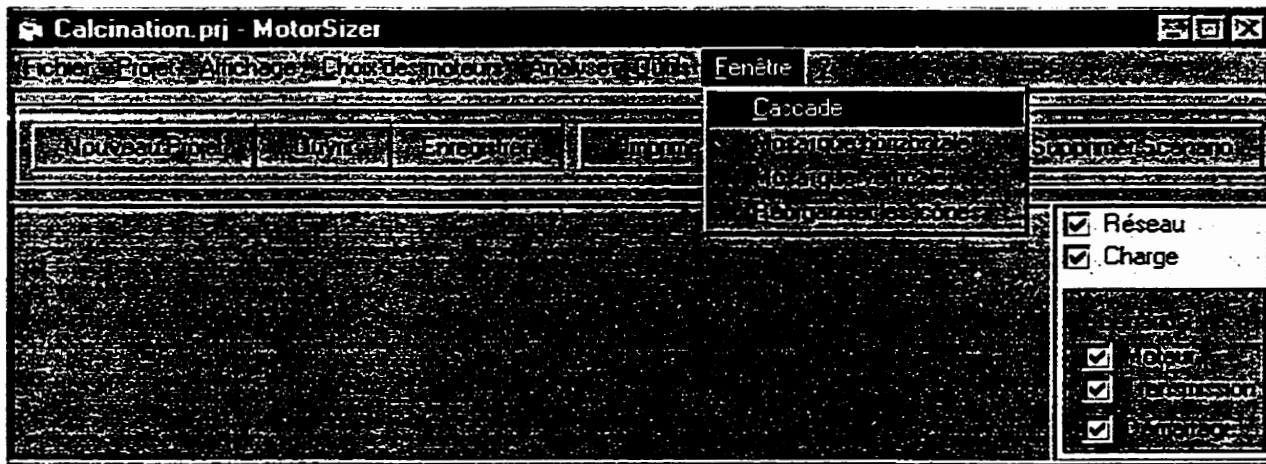


Figure 6. 13 Menu "Fenêtres."

h) - Menu "?"

Ce menu contient le sommaire de l'aide, l'aide par mots-clefs, des informations sur le produit "MotorSizer" et un sous-menu permettant d'accéder à certaines références du Web contenant des informations sur les moteurs électriques. Il est montré à Figure 6. 14 .

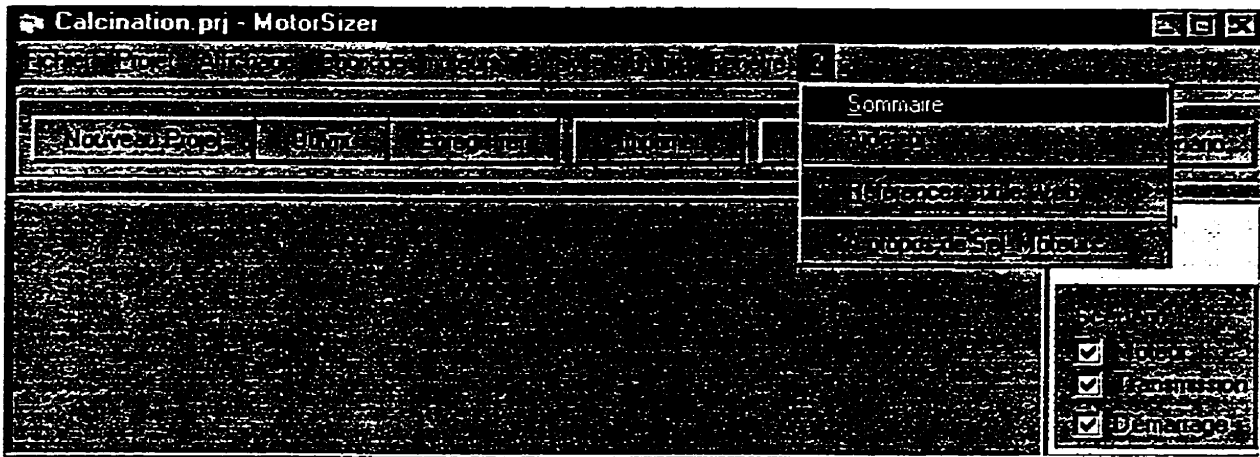


Figure 6. 14 Menu ?

### 6.1.2 La barre d'outils

Elle comprend six boutons de commande permettant la manipulation des fichiers et des scénarios. Les boutons **Nouveau Projet**, **Ouvrir**, **Enregistrer** et **Imprimer** sont équivalents aux commandes correspondantes du menu **Fichier**.

Le bouton **Ajouter Scénario**<sup>4</sup> permet d'ajouter un nouveau scénario dans le projet. Cette version du programme est limitée à cinq scénarios. Le bouton **Supprimer Scénario** permet la suppression du scénario courant.

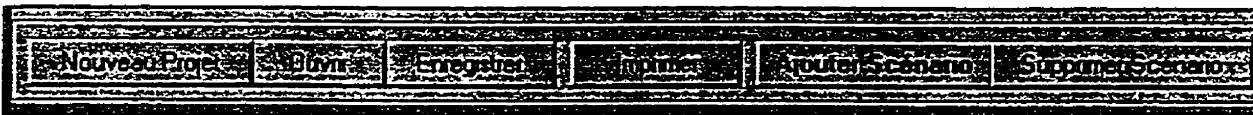


Figure 6. 15 Barre d'outils

La commande **Affichage/Masquer la barre d'outils** permet de masquer la barre d'outils lorsqu'elle est visible. La commande **Affichage/Afficher la barre d'outils** permet de l'afficher si elle est invisible.

### 6.1.3 La barre de suivi des tâches

Très pratique, cette barre donne un aperçu des tâches déjà accomplies par l'utilisateur. Lorsque les données sur le réseau d'alimentation par exemple sont introduites, une coche s'affiche dans la case à cocher Réseau pour indiquer que cette opération est déjà exécutée. Tous les scénarios du projet sont également affichés. Le scénario en cours se distingue des autres scénarios par un fond gris. A l'aide

<sup>4</sup> Scénario : Ensemble constitué d'une transmission, d'un mode de démarrage et d'un moteur pour une charge donnée.

de la souris ou des touches de direction, on peut changer le scénario courant. Le "double-click" ou la frappe de la touche "Entrée" ouvre une boîte de dialogue permettant la modification des données du scénario courant.

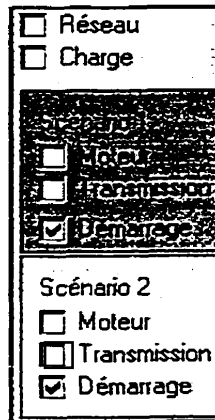


Figure 6.16 Barre de suivi des tâches

#### 6.1.4 Les boîtes de dialogue

C'est à travers les boîtes de dialogues que l'utilisateur introduit les différentes données dont a besoin "MotorSizer" pour bien choisir le moteur adapté à l'application visée. Chaque boîte de dialogue contient une icône ? permettant d'afficher l'aide sur ses différents objets. Lors de l'exécution, la plupart des zones de saisie affichent en plus, lorsque la souris est positionnée dessus, des petits messages explicatifs facilitant la saisie (conversion d'unités par exemples).

Nous allons donner ci-dessous les différentes boîtes de dialogues de "MotorSizer"

A chaque type de charge correspond une feuille "boîte de dialogue" servant d'interface et contenant tout le code nécessaire pour la gestion des différents évènements liés à la saisie.

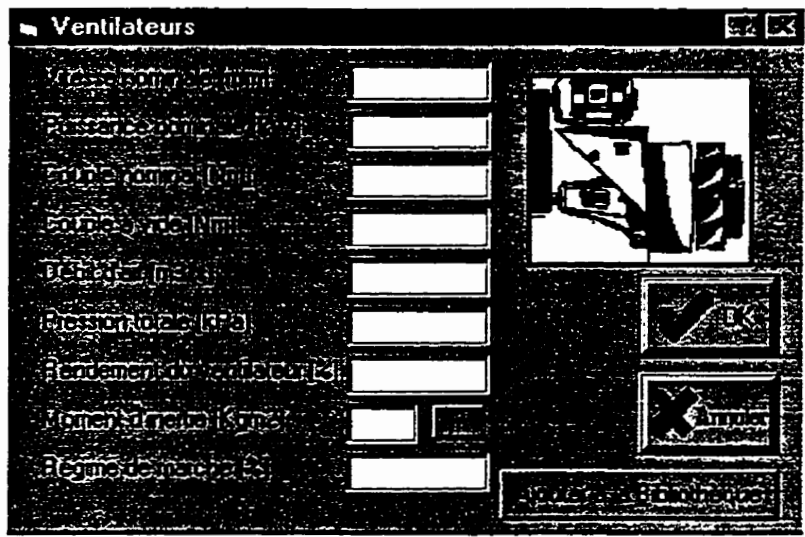


Figure 6. 17 Boîte de dialogue pour une charge de type "Ventilateur"

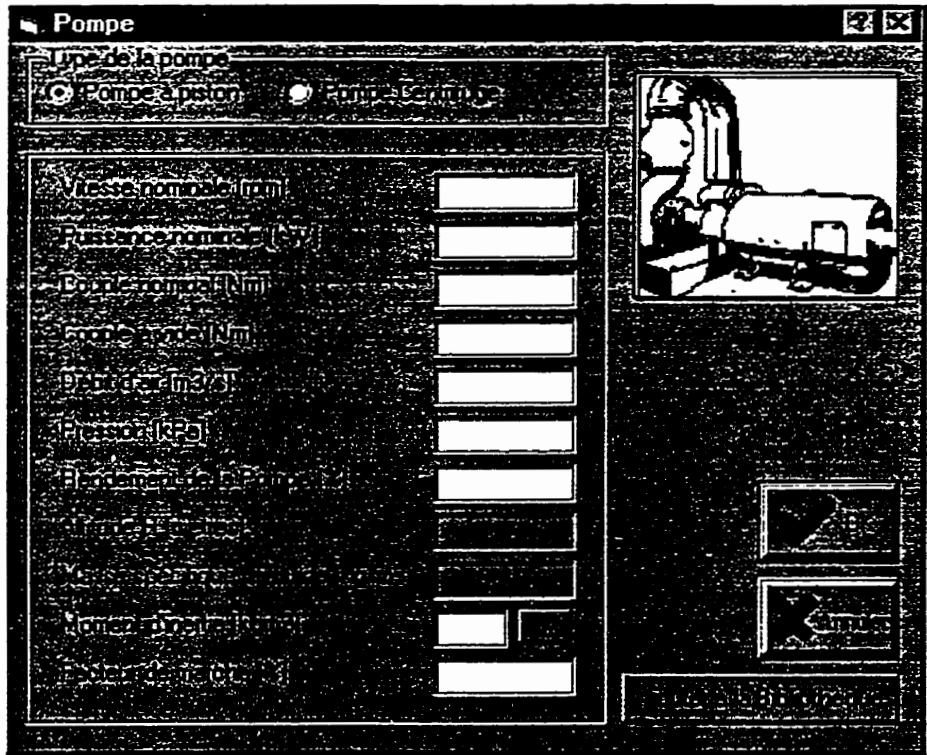


Figure 6. 18 Boîte de dialogue pour une charge de type "Pompe"

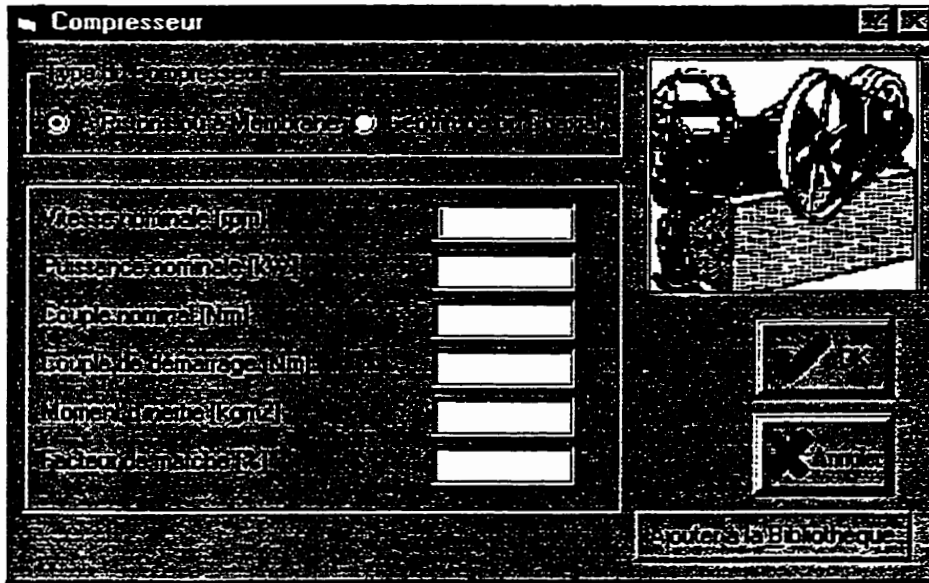


Figure 6. 19 Boîte de dialogue pour une charge de type "Compresseur"

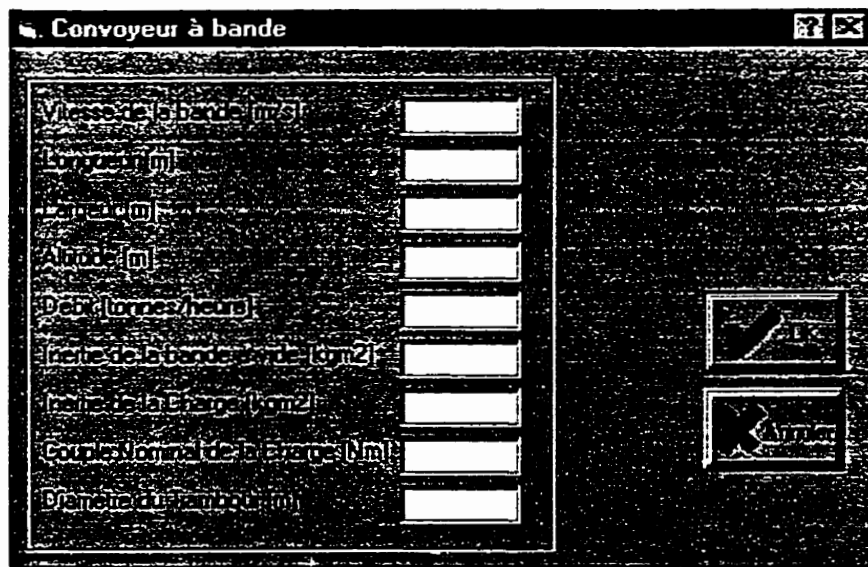


Figure 6. 20 Boîte de dialogue pour une charge de type "Convoyeur à bande"

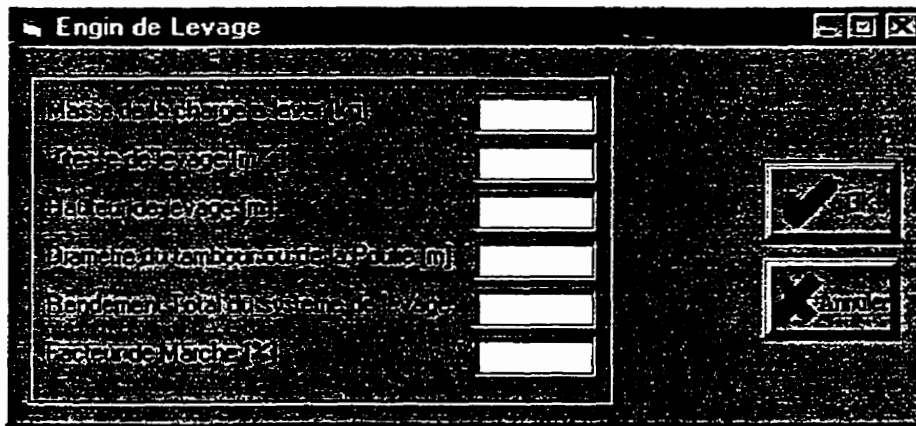


Figure 6. 21 Boîte de dialogue pour une charge de type "Engin de levage"

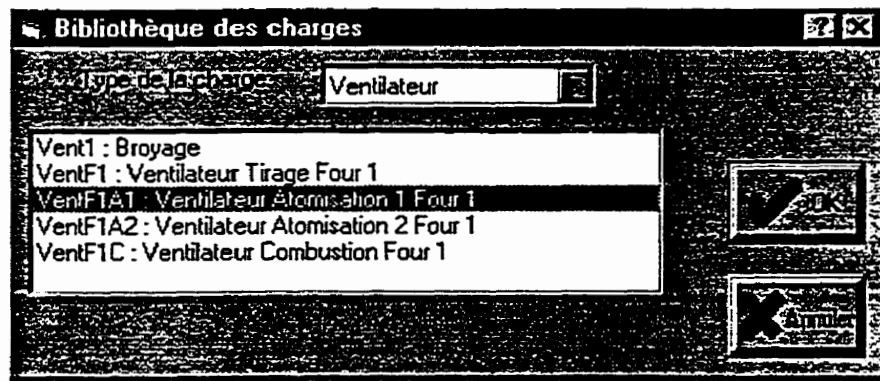


Figure 6. 22 Boîte de dialogue "Bibliothèque des charges"



Figure 6. 23 Boîte de dialogue "Bibliothèque des transmissions"



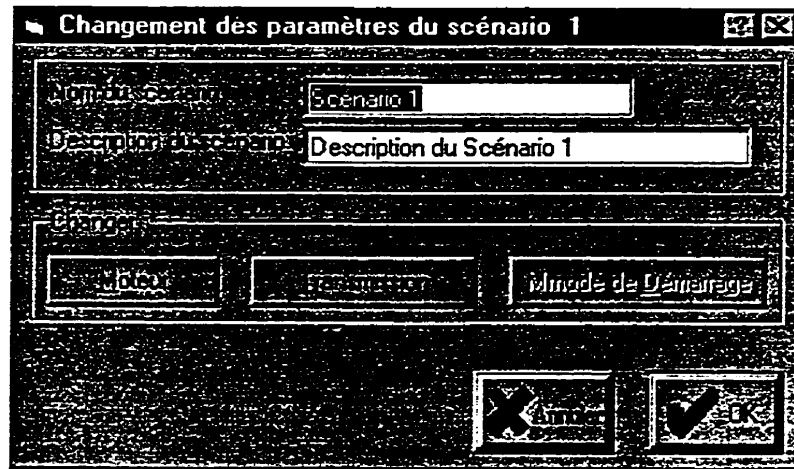


Figure 6. 24 Boîte de dialogue "Changement des paramètres des scénarios"

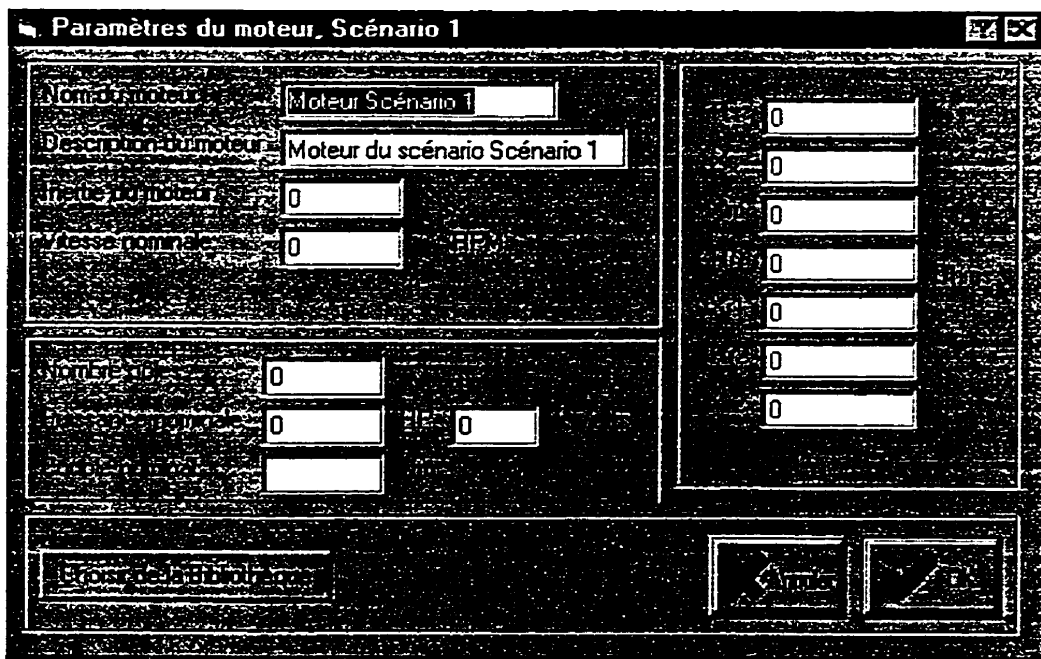
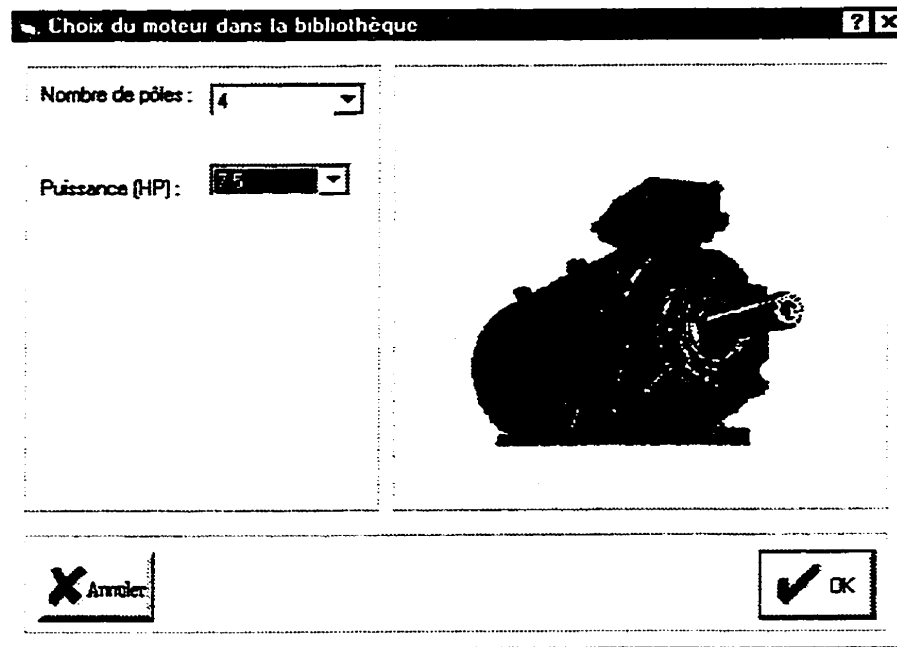


Figure 6. 25 Boîte de dialogue "Paramètres moteur"



*Figure 6. 26 Boîte de dialogue "Choix du moteur dans la bibliothèque"*

## 6.2 Procédure de sélection d'un moteur avec "MotorSizer"

La sélection d'un moteur asynchrone à l'aide de MotorSizer s'effectue en sept étapes:

1. A l'aide du menu **Projet/Tension du Réseau Électrique**, introduire les paramètres du réseau électrique d'alimentation;
2. Introduire les données de la charge entraînée (menu **Projet/Charge**);
3. Introduire les données de la transmission (menu **Projet/Transmission**);
4. Indiquer le mode de démarrage (menu **Projet/Démarrage**);
5. Choisir le moteur pour le scénario en cours à l'aide du menu **Choix des moteurs**
6. Visualiser les caractéristiques de démarrage et de régime permanent à l'aide du menu **Analyse**.
7. Répéter les étapes 3 à 6 pour chaque scénario.

Le chapitre suivant présente un certain nombre d'exemples d'application détaillés qui illustrent l'utilisation du logiciel qui a été conçu et qui le valident par comparaison avec des applications réelles relevées chez des manufacturiers.

## Exemples d'application

### 7.1 Exemple 1: Entraînement d'une pompe centrifuge

#### 7.1.1 Cahier des charges

Soit à entraîner une pompe centrifuge de 46.6 kW ayant une vitesse de rotation nominale de 1780 r/min et une inertie de 12 kg.m<sup>2</sup>. Le moteur asynchrone à choisir doit être alimenté à 440 V, 60 Hz.

#### 7.1.2 Entrée des données dans le logiciel

On introduit les paramètres du réseau électrique d'alimentation, les données de la charge entraînée, de la transmission et du mode de démarrage à l'aide du menu **Projet**.

La boîte de dialogue de saisie des données de la pompe est montrée à la Figure 7. 1

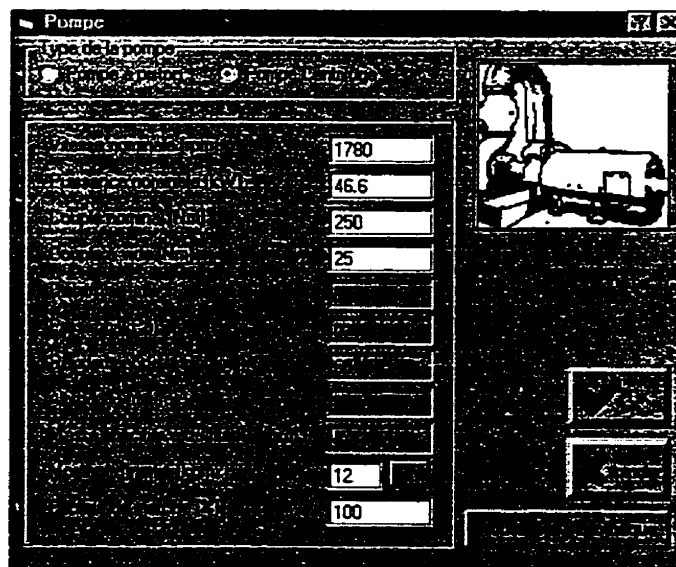
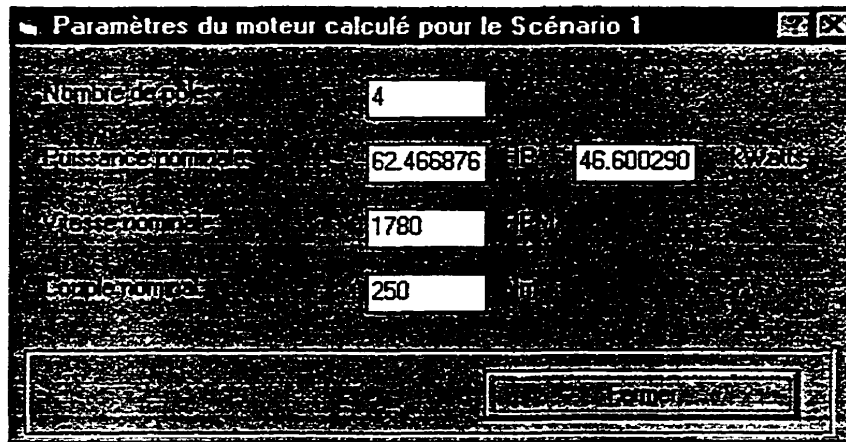


Figure 7. 1 Exemple 1 - Données de la pompe centrifuge

### 7.1.3 Détermination du moteur requis

À l'aide du menu **Choix des moteurs**, on détermine le moteur requis; le logiciel préconise un moteur de quatre pôles 62.2 Hp (voir Figure 7.2 )



*Figure 7.2 Exemple 1 – Paramètres du moteur calculé*

L'utilisateur choisit alors, à l'aide du menu **Choix des moteurs**, un moteur dans la base de données NEMA intégrée. Il a la possibilité d'analyser jusqu'à cinq scénarios.

*a ) - Scénario 1 : Moteur de 75 Hp, 4 pôles*

#### 7.1.3.a.1 Choix du moteur du scénario 1

En cliquant deux fois sur *Scénario 1* de la barre de suivi des tâches, les paramètres du moteur choisi peuvent être affichés. (Figure 7.3)

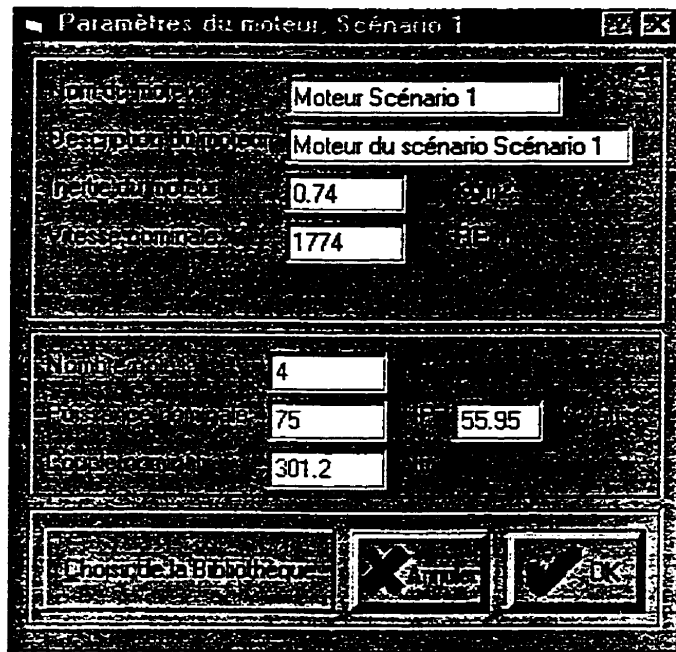


Figure 7.3 Exemple 1 – Paramètres du moteur du scénario 1

### 7.1.3.a.2 Analyse du scénario 1

#### 7.1.3.a.2.1 Démarrage

Le menu **Analyse / Démarrage / Vitesse – Temps** permet de visualiser les variations de la vitesse de l'entraînement au cours du démarrage.

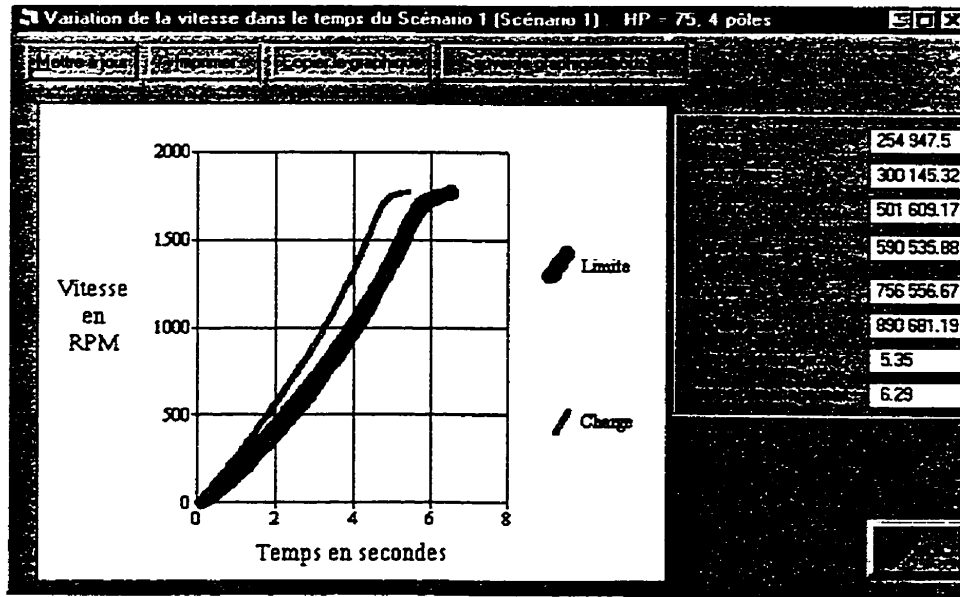


Figure 7.4 Exemple 1, scénario 1 - Variations de la vitesse au cours du démarrage

### 7.1.3.a.2.2 Régime permanent

À l'aide du menu **Analyse / Régime permanent**, on peut visualiser les différentes caractéristiques de l'entraînement en régime permanent. Le sous – menu **Couple**, par exemple, affiche les caractéristiques couple – vitesse du moteur et de la charge. (Figure 7. 5)

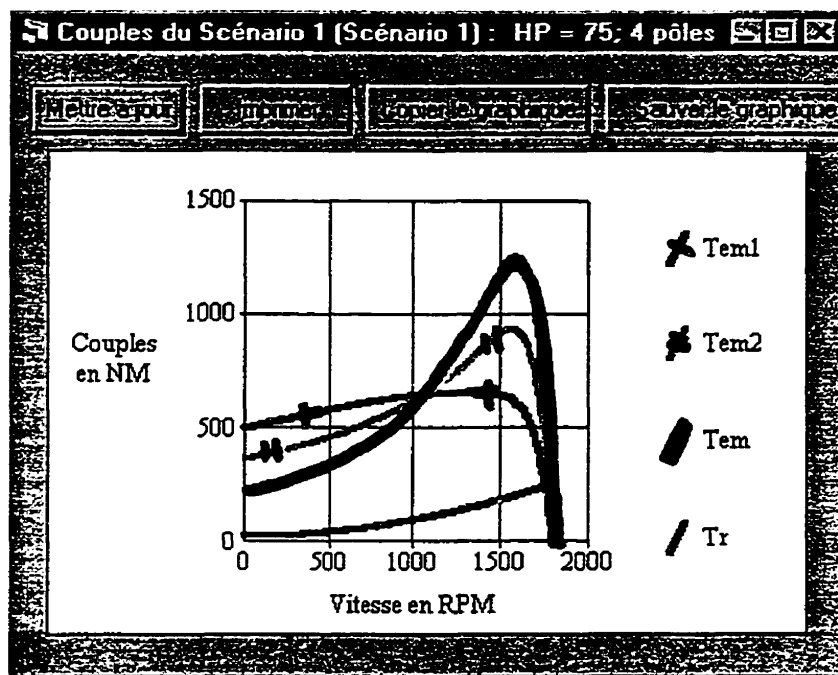


Figure 7. 5 Exemple 1, scénario 1 - Caractéristiques couple – vitesse

### 7.1.3.a.2.3 Conclusion

On voit sur la courbe gauche de la Figure 7. 4 que ce scénario est acceptable. Le démarrage s'effectue dans des conditions conformes aux limites de fonctionnement du moteur choisi.

En effet, les pertes Joule totales lors du démarrage (756 557 J) sont inférieures aux pertes d'énergie maximales admissible dans le moteur (890 681 J) et la durée du démarrage (5.35 s) inférieure à la durée de démarrage maximale admissible (6.29 s).

On peut remarquer qu'il existe dans la base de données un moteur de 60 Hp d'une puissance très légèrement inférieure à la puissance exigée. Il paraît donc intéressant, sur le plan économique, d'étudier la possibilité d'utiliser ce moteur dans un autre scénario.

### b) - Scénario 2 : Moteur 60 Hp, 4 pôles

#### 7.1.3.b.1 Choix du moteur du scénario 2

En procédant de la même manière qu'au scénario 1 on obtient :



Figure 7.6 Exemple 1 – Paramètres du moteur du scénario 2

### 7.1.3.b.2 Analyse du scénario 2

#### 7.1.3.b.2.1 Démarrage

La variation de la vitesse lors du démarrage est donnée à la Figure 7.7 ci-dessous.

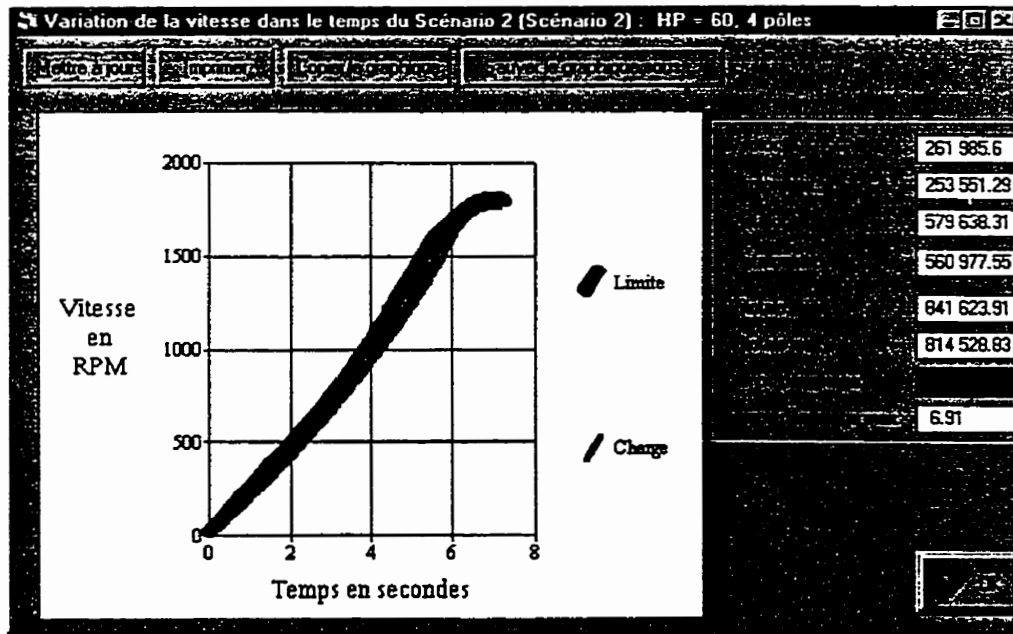


Figure 7.7 Exemple 1, scénario 2 - Variations de la vitesse au cours du démarrage

### 7.1.3.b.2.2 Régime permanent

Les caractéristiques couple – vitesse du moteur et de la charge pour le scénario 2 sont données à la Figure 7. 8

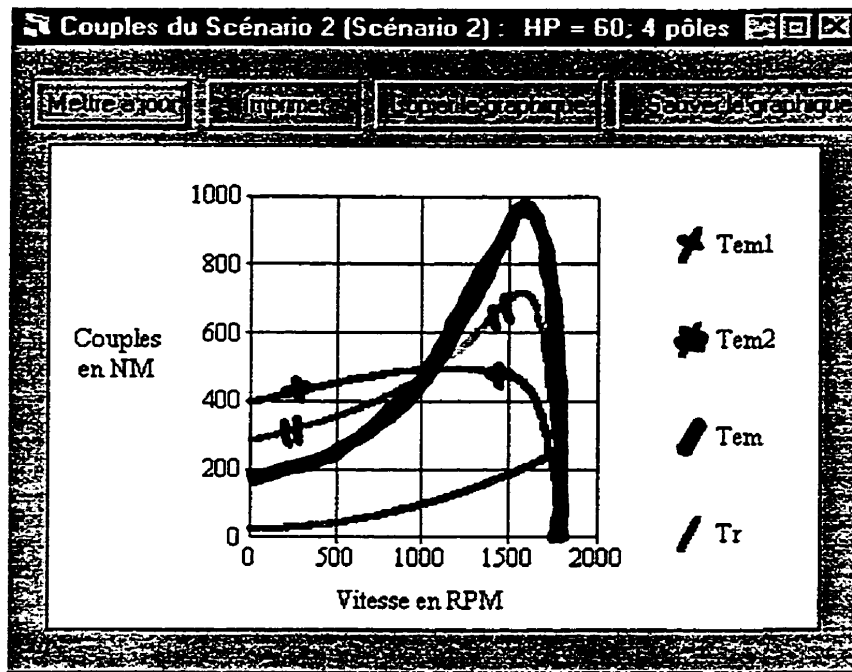


Figure 7. 8 Exemple 1, scénario 2 caractéristiques couple – vitesse

### 7.1.3.b.2.3 Conclusion

À partir de la Figure 7. 7, on voit que ce scénario n'est pas acceptable puisque les pertes d'énergie dans le moteur au cours du démarrage sont supérieures aux pertes admissibles et le temps de démarrage (7.14 s) dépasse le temps de démarrage admissible (6.91 s).

Étudions le cas d'un troisième scénario où on choisit un moteur surdimensionné

### c) - Scénario 3 : Moteur de 100 Hp, 4 pôles

#### 7.1.3.c.1 Choix du moteur du scénario 3

Les paramètres du moteur sont :



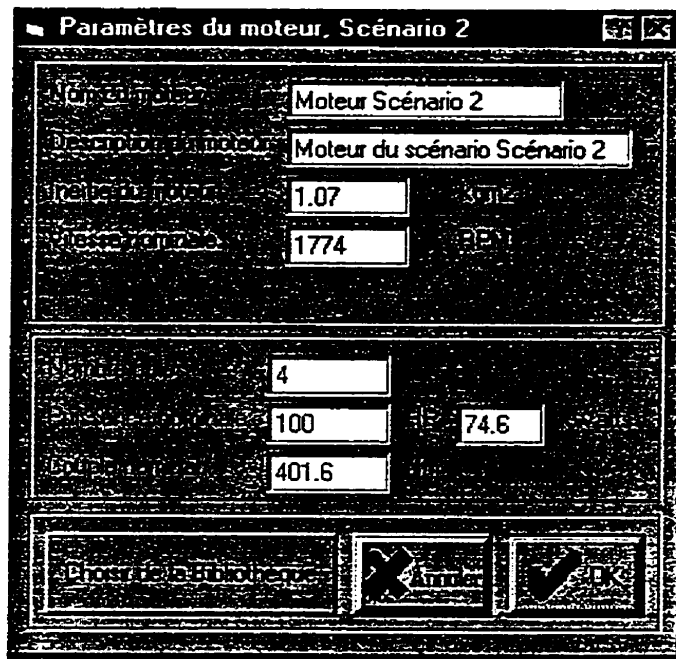


Figure 7.9 Exemple 1, scénario 3 – paramètres du moteur

### 7.1.3.c.2 Analyse du scénario 3

#### 7.1.3.c.2.1 Démarrage

La Figure 7.10 montre la variation de la vitesse de l'entraînement pour ce scénario.

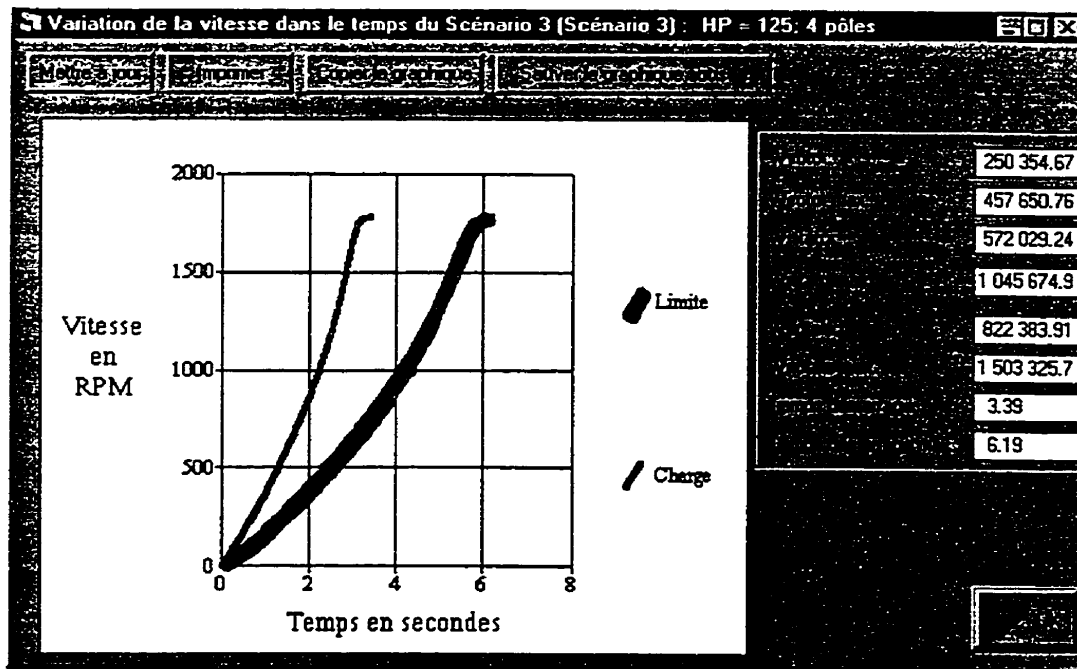


Figure 7.10 Exemple 1, scénario 3 – variation de la vitesse au cours du démarrage

### 7.1.3.c.2.2 Régime permanent

Les caractéristiques couple – vitesse du moteur et de la charge sont données à la figure ci-dessous

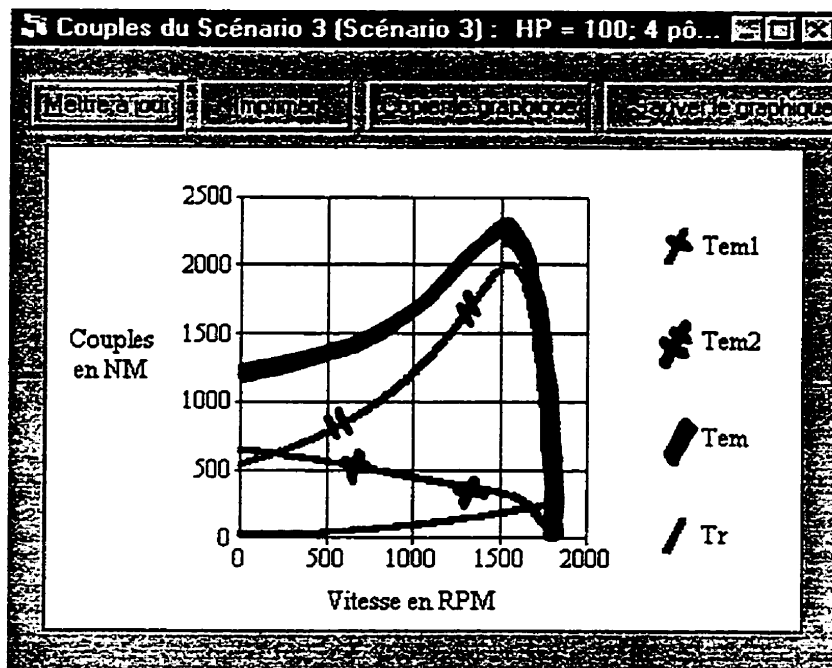


Figure 7.11 Exemple 1, scénario 3 – caractéristiques couple – vitesse

### 7.1.3.c.2.3 Conclusion

On voit que ce scénario est aussi acceptable du point de vue de l'échauffement du moteur.

### 7.1.4 Rapport comparatif des différents scénarios

Afin de choisir un moteur parmi les trois moteurs des scénarios étudiés, nous allons comparer les paramètres de démarrage et de régime nominal. La Figure 7.12 montre les résultats obtenus.

Rapport comparatif des différents scénarios					
Paramètres	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Puissance [Hp/kW]	75/55.95	60/44.76	100/74.6		
Nombre de pôles	4	4	4		
U [Volts]	440	440	440		
Nn [RPM]	1774.2	1767.66	1776.37		
td [s] /tdmax [s]	5.35/6.29	7.14/6.91	3.89/5.85		
Rend. nominal [%]	94.88	93.26	95.53		
FP nominal	0.88	0.9	0.83		
Is nominal [A]	72.74	71.6	76.4		
Is démarrage [A]	608.86	478.79	732.45		
P absorbée [kW]	48.67	49	48.5		

Figure 7. 12 Exemple 1, tableau comparatif des différents scénarios

Le moteur du scénario 2 (60 Hp) n'étant pas en mesure de démarrer la charge avec un échauffement admissible, notre choix doit se faire entre les moteurs des scénarios 1 (75 Hp) et 3 (100Hp). Ainsi la question est la suivante : Faut-il surdimensionner le moteur et accepter en conséquence un investissement plus important ? La réponse est : non puisqu'on remarque que le facteur de puissance se détériore, le courant de démarrage et le courant nominal sont plus élevés alors que le gain sur le rendement n'est que de 1.7 %. Il n'est pas nécessairement intéressant de surdimensionner le moteur surtout si on veut minimiser l'investissement dans le reste du réseau d'alimentation électrique. Nous allons retenir le moteur du scénario 1.

## 7.2 Exemple 2: Entraînement d'un compresseur à pistons

### 7.2.1 Cahier des charges

On veut déterminer le moteur asynchrone nécessaire pour entraîner un compresseur à piston à 3550 r/min. L'inertie et le couple résistant nominal du compresseur valent respectivement  $0.5 \text{ kg.m}^2$  et 28 N.m . La tension d'alimentation du moteur est 230 V entre phases et la fréquence, 60 Hz.

### 7.2.2 Entrées des données dans le logiciel

Les données du réseau électrique d'alimentation sont introduites à travers la boîte de dialogue suivante.

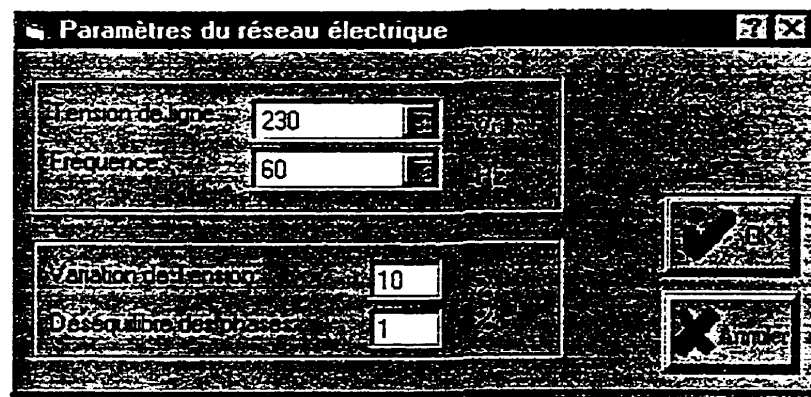


Figure 7. 13 Exemple 2 – saisie des paramètres du réseau électrique d'alimentation

La Figure 7. 14 montre la boîte de dialogue de saisie des données du compresseur

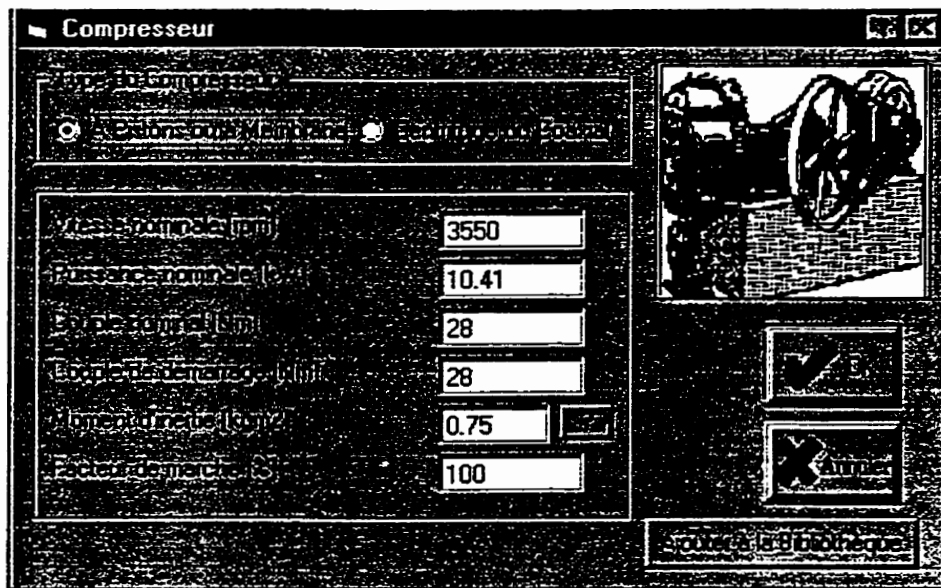


Figure 7. 14 Exemple 2 – Saisie des données du compresseur

### 7.2.3 Détermination du moteur requis

Le logiciel nous donne une indication sur la puissance et le nombre de pôles du moteur à choisir.

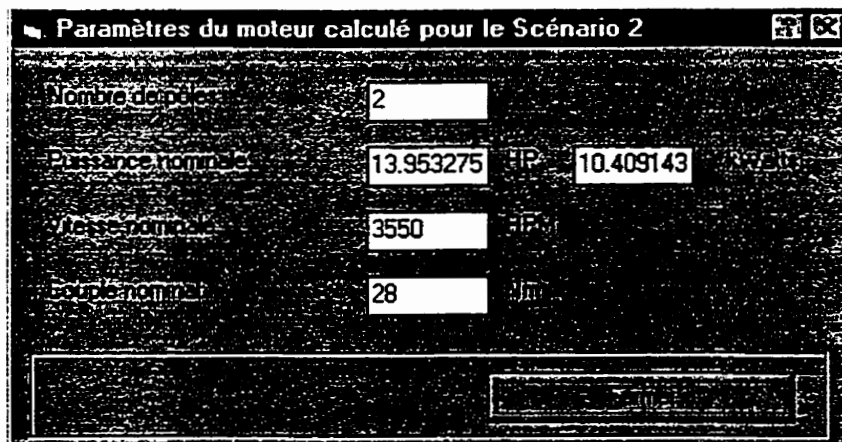


Figure 7. 15 Exemple 2 – Paramètres du moteur calculé

Comme au § 7.1, on analyse quelques scénarios afin de choisir un moteur adapté au compresseur.

a ) - Scénario1 : Moteur de 15 Hp, 2 pôles

7.2.3.a.1 Choix du moteur du scénario 1

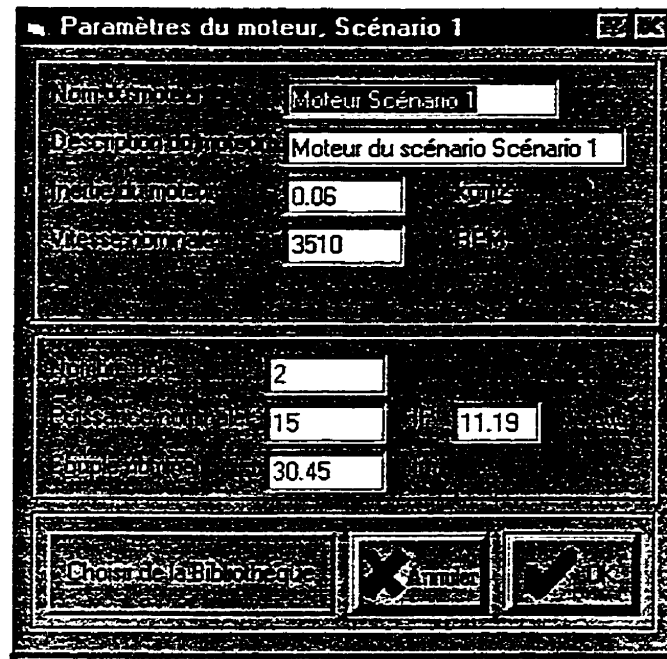


Figure 7.16 Exemple 2 – Paramètres du moteur du scénario 1

### 7.2.3.a.2 Analyse du scénario 1

#### 7.2.3.a.2.1 Démarrage

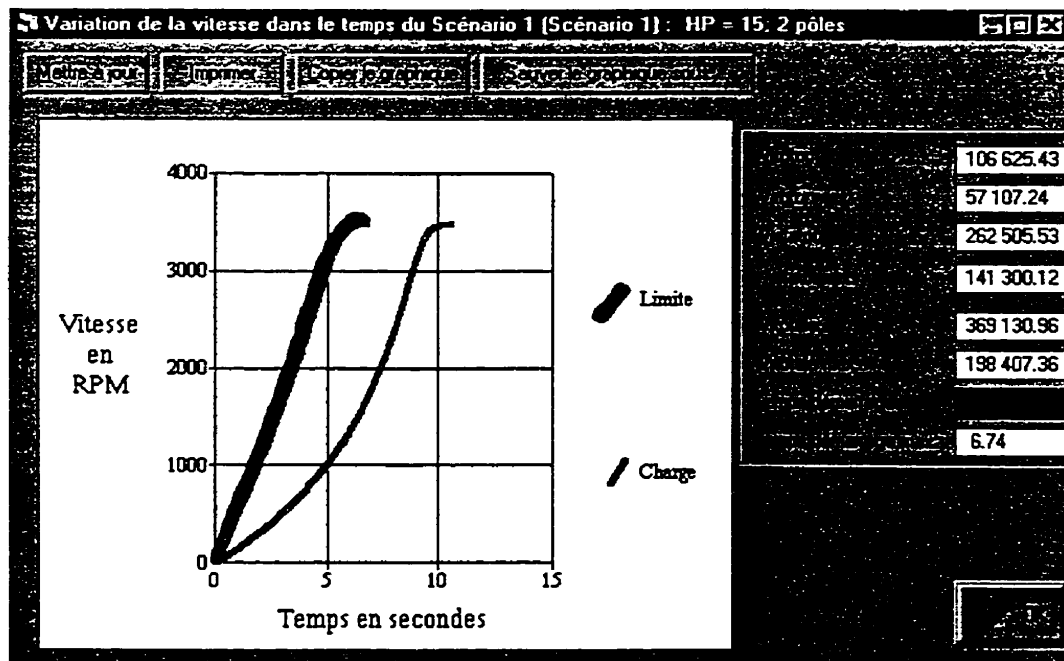


Figure 7.17 Exemple 2, scénario 1 – Variation de la vitesse au cours du démarrage

### 7.2.3.a.2.2 Conclusion

Ce scénario n'est pas acceptable. Essayons un autre moteur.

### b) - Scénario 2 : Moteur de 20 Hp, 2 pôles

#### 7.2.3.b.1 Choix du moteur

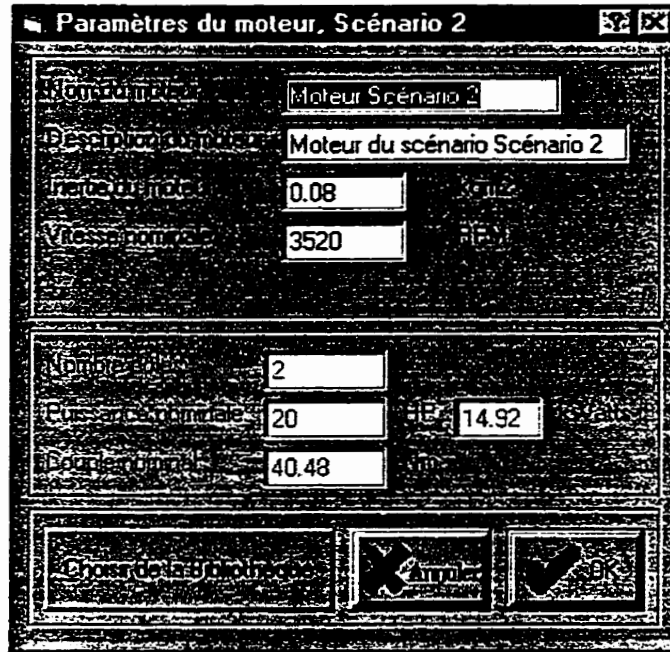


Figure 7. 18 Exemple 2 – Paramètres du moteur du scénario 2

#### 7.2.3.b.2 Analyse

##### 7.2.3.b.2.1 Démarrage

Les variations de la vitesse de l'entraînement et du courant statorique du moteur lors du démarrage sont données respectivement sur la Figure 7. 19 et la Figure 7. 20

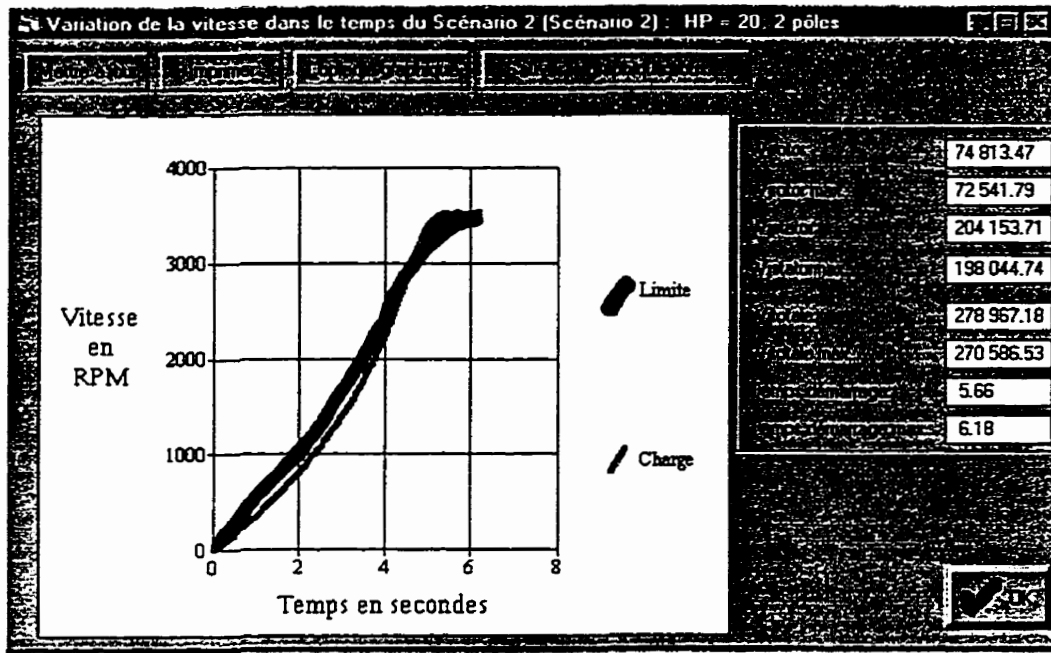


Figure 7. 19 Exemple 2, scénario 2 – Variations de la vitesse lors du démarrage

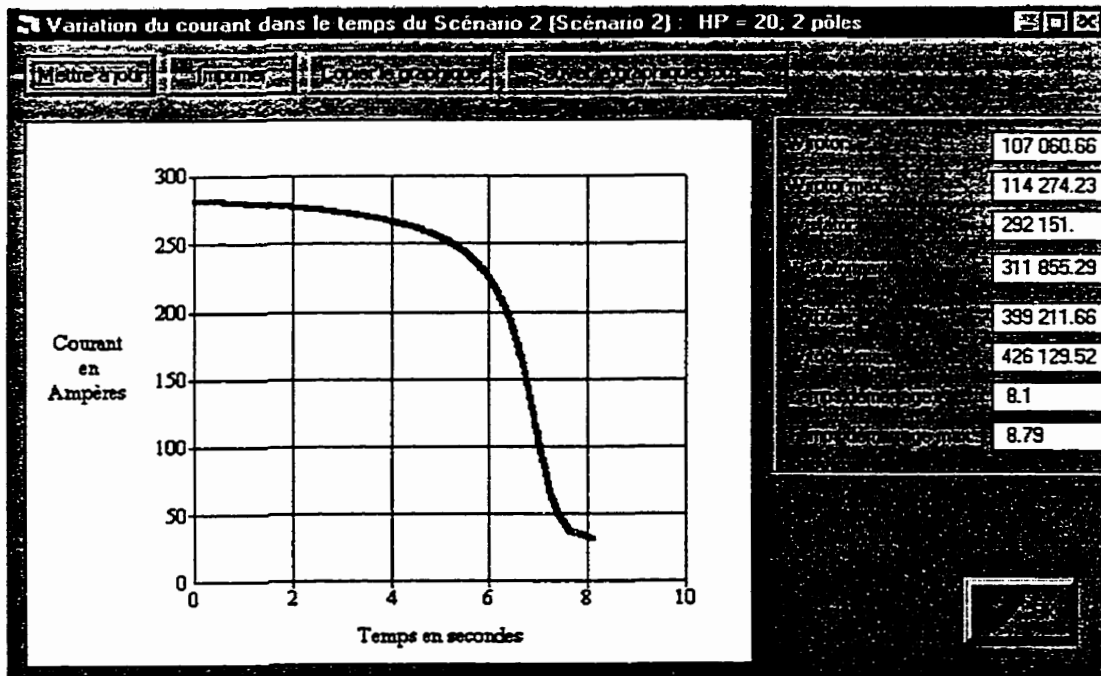


Figure 7. 20 Exemple 2, scénario 2 – Variations du courant du moteur lors du démarrage

7.2.3.b.2.2 Régime permanent



Les courbes des couples, des courants, du facteur de puissance, des pertes Joules et du rendement du moteur en régime permanent sont données à la Figure 7. 21.

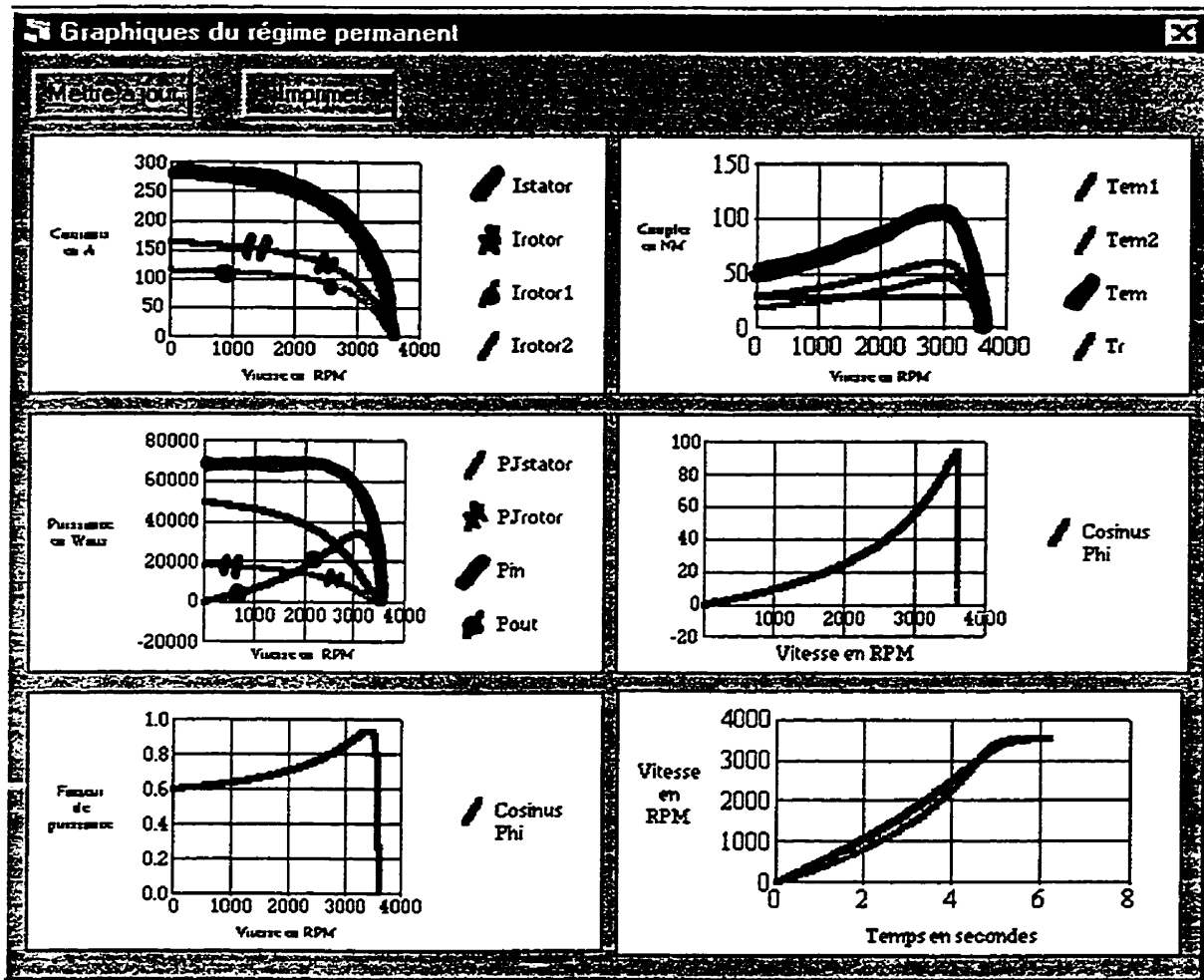


Figure 7. 21 Exemple 2, scénario 2 – Caractéristiques de performance en régime permanent

### 7.2.3.b.2.3 Conclusion

Ce moteur peut bien entraîner le compresseur, les pertes d'énergie dans le moteur et la durée du démarrage étant dans des limites admissibles.

### 7.2.4 Rapport comparatif des différents scénarios

Le logiciel nous a permis de voir que le moteur de 15 Hp du scénario 1, bien qu'ayant une puissance supérieure à la puissance nominale du compresseur (14 Hp), n'est pas capable d'entraîner la charge. Le moteur de 20 Hp du scénario sera alors retenu. La Figure 7. 22 ci-dessous donne un tableau comparatif des deux scénarios.

Rapport comparatif des différents scénarios					
Paramètres	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Puissance [Hp/kW]	15/11.19	20/14.52			
Nombre de pôles	2	2			
U [Volts]	230	230			
Nn [RPM]	3493.64	3534.89			
td [s] /tdmax [s]	15.27/12.04	8.17/8.79			
Rend. nominal [%]	89.55	92.68			
FP nominal	0.91	0.89			
I <sub>n</sub> nominal [A]	31.62	31.71			
I <sub>s</sub> démarrage [A]	193.83	262.31			
P absorbée [kW]	11.44	11.18			

Figure 7. 22 Exemple 2 – Tableau comparatif des différents scénarios

### 7.3 Exemple 3 : Entraînement d'un ventilateur

#### 7.3.1 Cahier des charges

Le ventilateur de type 77472 MN 40500 de la compagnie PILLER Industrial Fan System GmbH a les caractéristiques suivantes :

- Débit d'air 2.770 m<sup>3</sup>/s
- Pression totale 1.82 kPa
- Rendement 80 %
- Vitesse 1740 r/min
- Moment d'inertie 1.82 kg.m<sup>2</sup>
- Durée de démarrage approximative 5.1 s

Soit à déterminer le moteur requis pour entraîner ce ventilateur. La tension d'alimentation doit être 230 V, 60 Hz.

#### 7.3.2 Entrées des données dans le logiciel

En introduisant la vitesse, le débit d'air, la pression totale et le rendement du ventilateur, le logiciel détermine directement la puissance de la charge qui vaut 6.3 kW.

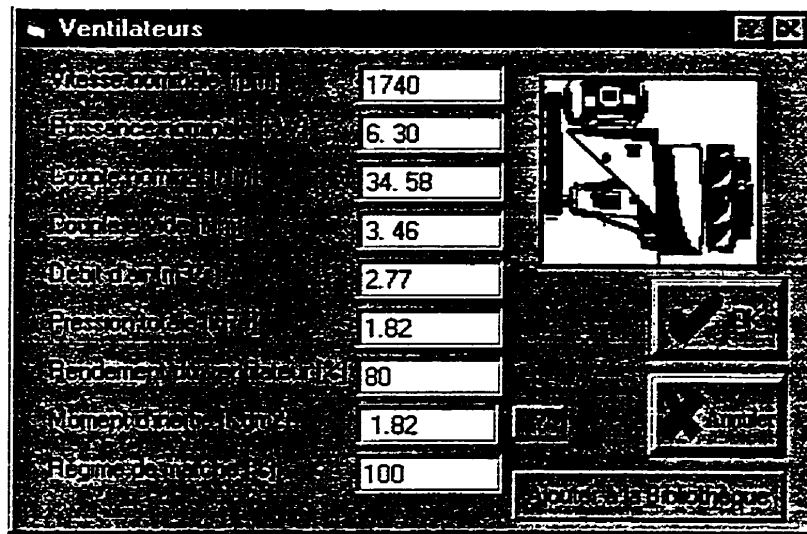


Figure 7.23 Exemple 3 – Saisie des données du ventilateur

### 7.3.3 Détermination du moteur requis

Le logiciel nous donne une indication sur la puissance et le nombre de pôles du moteur à choisir.

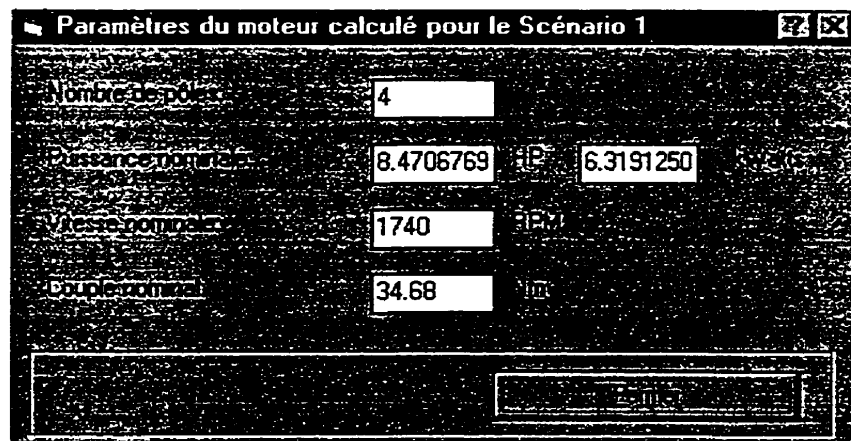


Figure 7.24 Exemple 3 – Paramètres du moteur calculé

Analysons quelques scénarios :

a) - Scénario1 : Moteur de 10 Hp, 4 pôles

7.3.3.a.1 Choix du moteur du scénario 1

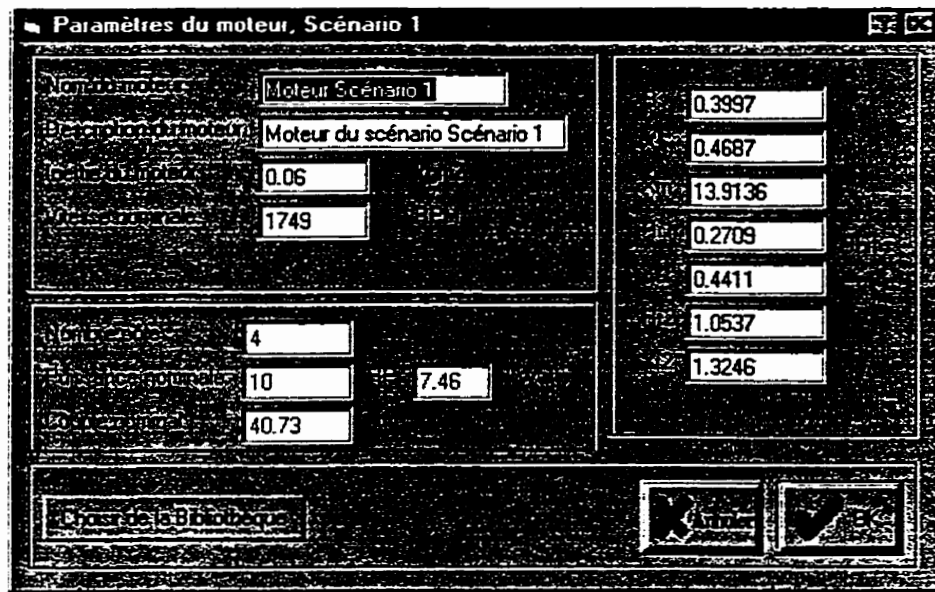


Figure 7.25 Exemple 3 – Paramètres du moteur du scénario 1

### 7.3.3.a.2 Analyse du scénario 1

#### 7.3.3.a.2.1 Démarrage

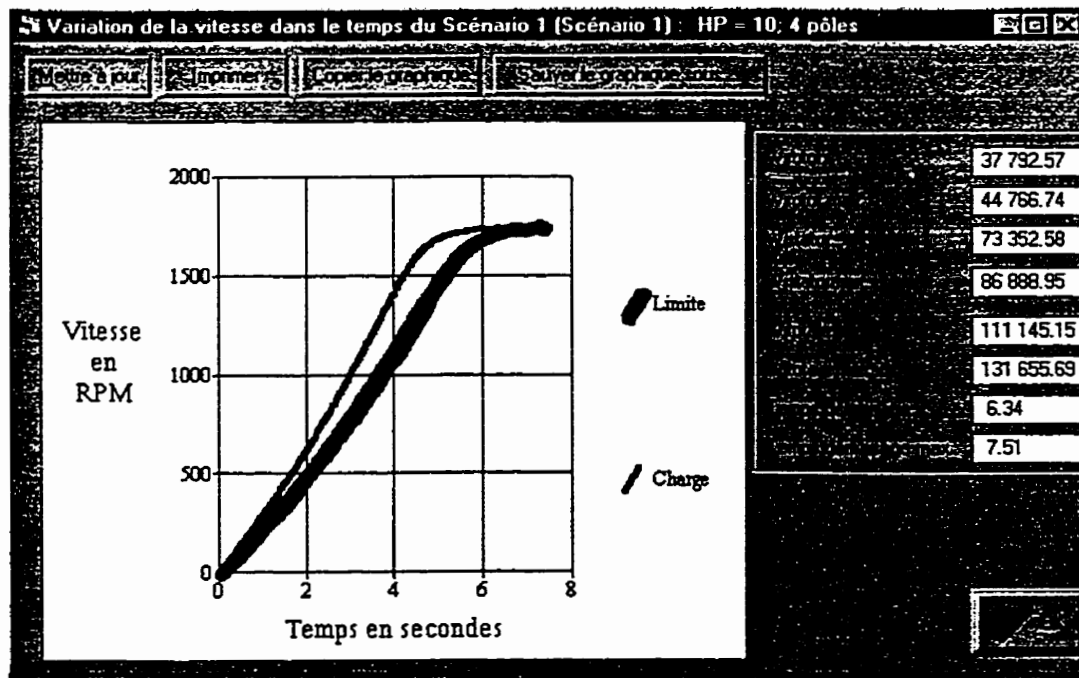


Figure 7.26 Exemple 3, scénario 1 – Variation de la vitesse au cours du démarrage

### 7.3.3.a.2.2 Régime permanent

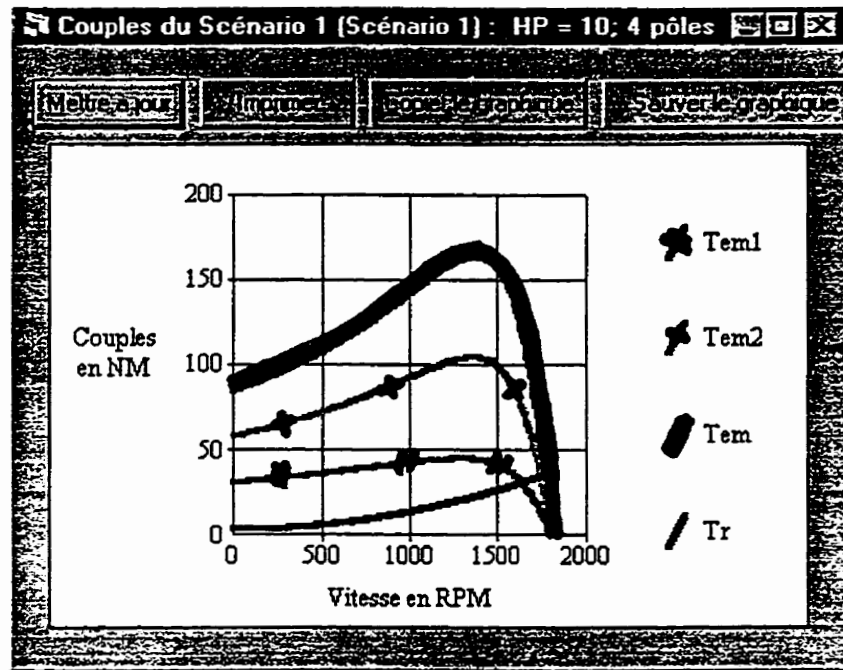


Figure 7. 27 Exemple 3, scénario 3 – caractéristiques couple – vitesse

### 7.3.3.a.2.3 Conclusion

Ce scénario est acceptable. On remarque que le moteur choisi de 10 Hp (7.46 kW) démarre le ventilateur en 6.34 s. Pour réduire la durée de démarrage, envisageons dans le scénario suivant un moteur de 15 Hp.

### b) - Scénario 2 : Moteur de 15 Hp, 4 pôles

#### 7.3.3.b.1 Choix du moteur

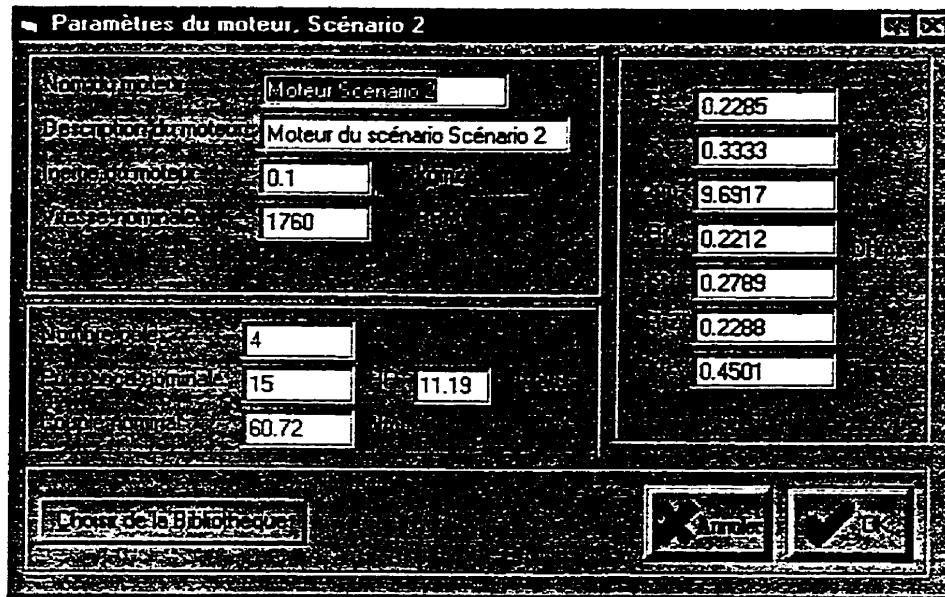


Figure 7. 28 Exemple 3 – Paramètres du moteur du scénario 2

### 7.3.3.b.2 Analyse

#### 7.3.3.b.2.1 Démarrage

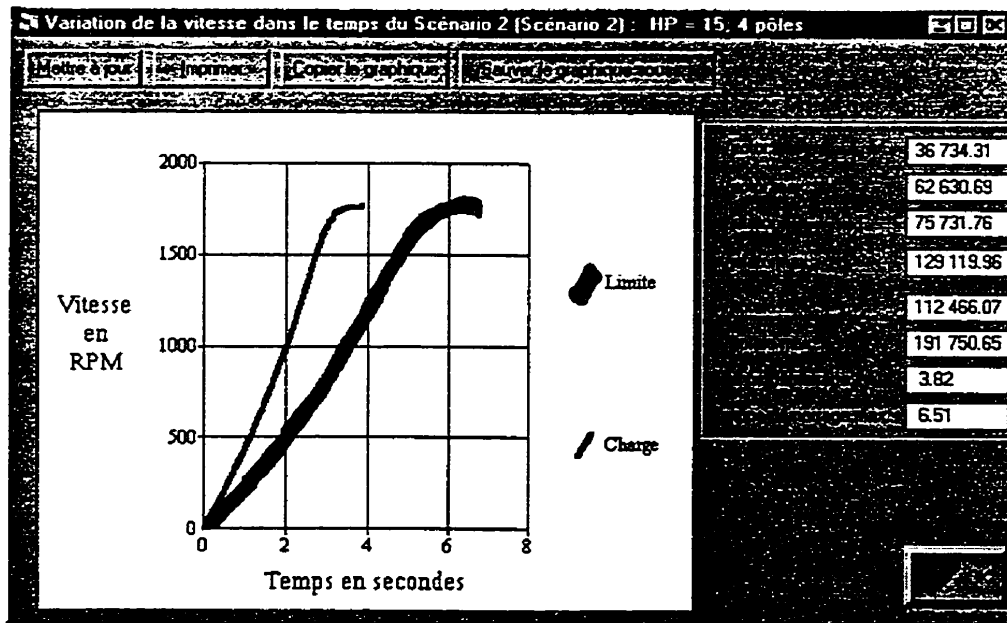


Figure 7. 29 Exemple 3, scénario 2 – Variations de la vitesse lors du démarrage

#### 7.3.3.b.2.2 Conclusion

On remarque que ce moteur de 11.19 kW démarre le ventilateur en 3.82 secondes.

Le moteur électrique choisi par PILLER Industrial Fan System GmbH pour entraîner le ventilateur type 77472 MN 40500 est de 8.6 kW. Le constructeur indique que ce moteur démarre approximativement le ventilateur en 5.1 secondes. Notre outil de sélection a montré qu'un moteur de 7.46 kW démarre le ventilateur en 6.34 s alors qu'un moteur de 11.19 kW le démarre en 3.82 s. En supposant qu'une interpolation linéaire entre ces deux scénarios est possible, notre outil prédit un temps de démarrage d'environ 5.56 s pour un moteur de 8.6 kW. On peut considérer ce résultat comme une validation de notre outil de sélection automatique de moteurs.

Les scénarios 3 et 4 suivant montrent les résultats de l'analyse par notre logiciel de l'entraînement du même ventilateur à travers un réducteur dont le rapport de transmission  $R$  est de 50 %.

Pour réduire la taille du moteur, il peut être intéressant d'étudier un scénario utilisant un moteur à deux pôles associé à un réducteur dont le rapport de transmission est  $R=50\%$ . Avant d'étudier ce nouveau scénario, il faut d'abord estimer les caractéristiques d'un étage réducteur formé de poulies et de courroies.

#### **Étude d'un étage réducteur à poulies et courroies:**

L'étage réducteur à courroies est formé de deux poulies de diamètre différent reliées par des courroies. Le choix des poulies est soumis aux contraintes suivantes:

- le rapport des diamètres est imposé par le rapport de réduction  $R$  à utiliser,
- le diamètre minimal de la poulie moteur et sa largeur sont imposées par les dimensions de la carcasse du moteur employé (donc de la puissance), suivant les contraintes axiales et radiales sur les roulements (cette donnée est disponible dans les catalogues des manufacturiers en fonction du numéro de carcasse ("Frame") [20] ),
- la vitesse périphérique maximale des poulies doit être limitée à 30m/s [21] .

Le tableau suivant résume les caractéristiques des poulies qui peuvent être utilisées en fonction de ces contraintes pour des moteurs 3600 r/min de 10 à 25HP:

HP	Diamètre poulie moteur (m)	Largeur poulies (m)	Vitesse moteur (r/min)	Rapport R	Diamètre poulie charge (m)
10	0.14	0.04	3600	0.5	0.28
15	0.16	0.06	3600	0.5	0.32
20	0.16	0.06	3600	0.5	0.32
25	0.16	0.06	3600	0.5	0.32

*Tableau 7.1. Caractéristiques des poulies pouvant être utilisées pour les puissances de 10 à 25 HP*

On peut alors calculer l'inertie de chaque poulie et l'inertie totale ramenée sur l'arbre du moteur qui doit être fournie à la boîte de dialogue de la Figure 7. 30. Le tableau suivant illustre les résultats obtenus:

HP	Inertie Poulie moteur (kg.m <sup>2</sup> )	Inertie poulie charge (kg.m <sup>2</sup> )	Inertie totale des poulies ramenée au moteur
10	0.024	0.381	0.119
15	0.061	0.976	0.305
20	0.061	0.976	0.305
25	0.061	0.976	0.305

*Tableau 7.2. Inertie des poulies pouvant être utilisées pour les puissances de 10 à 25 HP.*

On admet en première approximation un glissement des courroies de l'ordre de 3%, ce qui permet de quantifier le rendement du réducteur. On vérifie que les diamètres des poulies ont été choisis de manière à limiter la vitesse périphérique à 30m/s:

HP	Rendement réducteur	vitesse périphérique courroie (m/s)
10	0.97	26
15	0.97	30
20	0.97	30
25	0.97	30

*Tableau 7.3. Rendement et vitesse périphérique de la courroie*



c) - *Scénario 3 : Moteur de 10 Hp, 2 pôles à travers un réducteur de R = 50 %*  
 Les données du réducteur sont introduites à partir de la boîte de dialogue de la Figure 7. 30 ci-dessous. Cette boîte de dialogue est appelé par le menu **Projet / Transmission**.

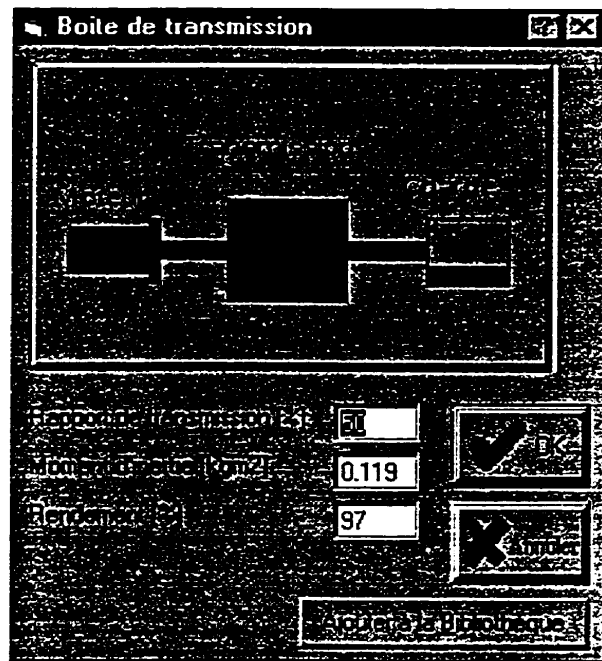


Figure 7. 30 Exemple 3, scénario 3 – Saisie des données de la transmission

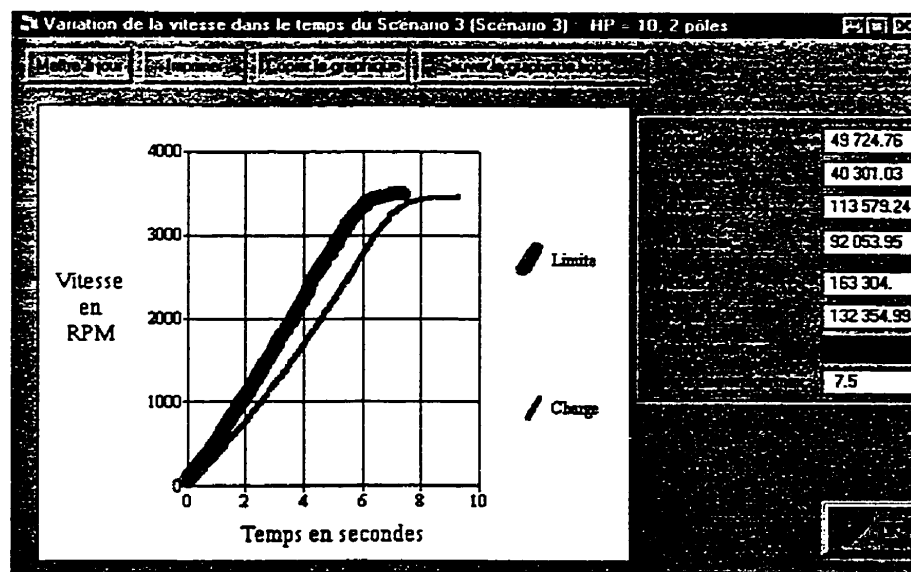


Figure 7. 31 Exemple 3, scénario 3 – Variations de la vitesse lors du démarrage

On remarque que ce moteur n'est pas capable de démarrer le ventilateur.

En essayant plusieurs moteurs de notre base de données et en adoptant les caractéristiques du

réducteur suivant les valeurs présentées dans les tableaux précédents, nous avons trouvé qu'il faut choisir un moteur d'une puissance supérieure ou égale à 15 kW.

Le scénario 4 montre les données du réducteur et les graphiques obtenus, dans le cas de ce dernier scénario.

d) - Scénario 4 : Moteur de 20 Hp, 2 pôles à travers un réducteur de  $R = 50 \%$

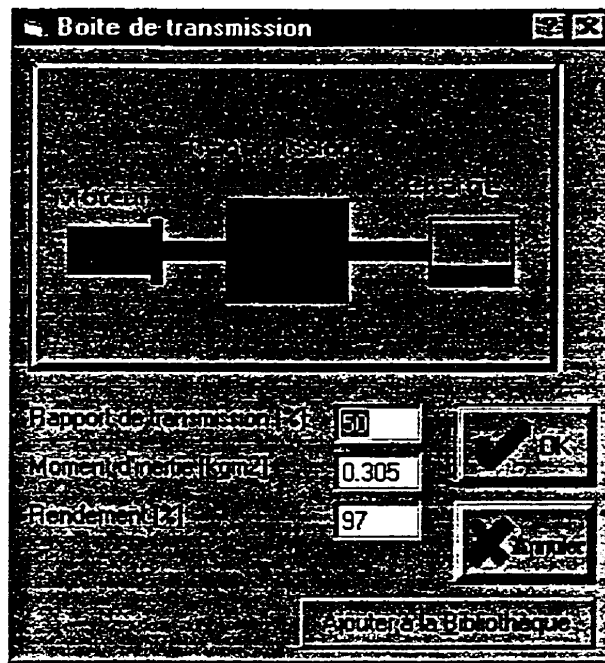


Figure 7. 32 Exemple 3, scénario 4 – Saisie des données de la transmission

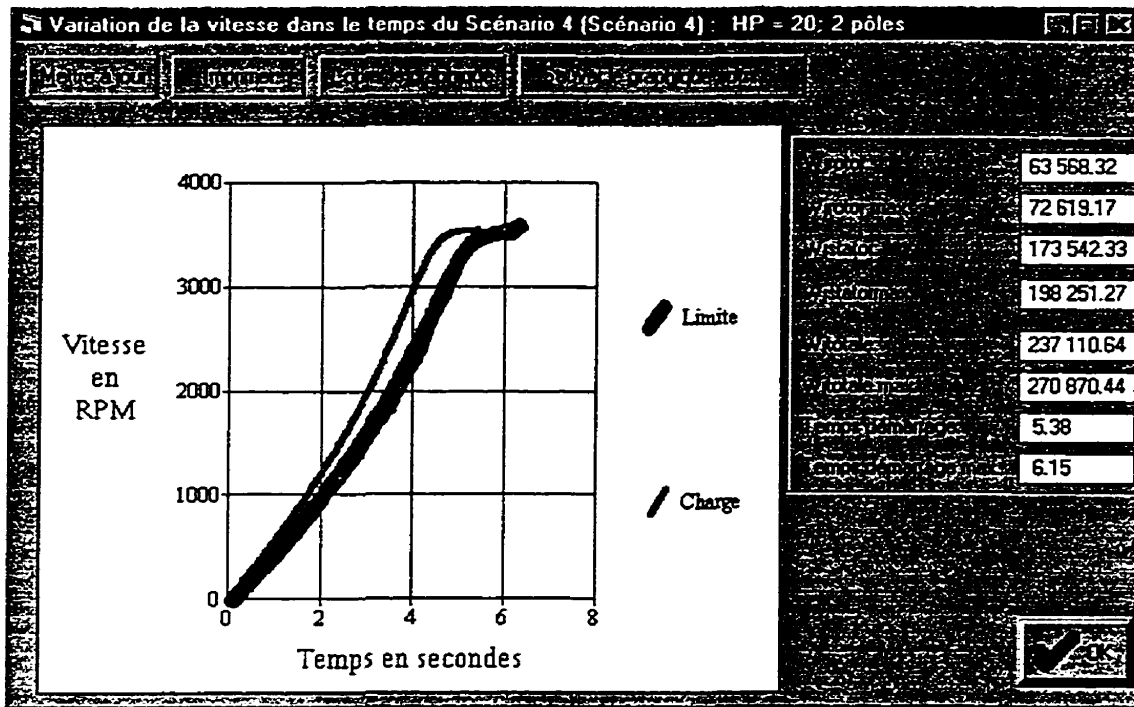


Figure 7. 33 Exemple 3, scénario 4 – Variations de la vitesse lors du démarrage

Les résultats de la Figure 7. 33 montrent que ce moteur associé au réducteur précédent est acceptable.

### 7.3.4 Rapport comparatif des différents scénarios

Rapport comparatif des différents scénarios					
Paramètres	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Puissance [Hp/kW]	10/7.46	15/11.19	10/7.46	20/14.92	
Nombre de pôles	4	4	2	2	
U [Volts]	230	230	230	230	
Nn [RPM]	1742	1770.47	3480.44	3558.24	
td [s] / tdnax [s]	6.34/7.51	3.82/6.51	5.26/7.5	5.30/6.15	
Rend. nominal [%]	89.9	93.56	88.95	94.38	
FP nominal	0.87	0.79	0.89	0.8	
I <sub>n</sub> nominal [A]	20.44	22.46	20.57	29.06	
I <sub>s</sub> démarrage [A]	132.63	217.64	123.5	262.39	
P absorbée [kW]	7.05	7.09	7.33	7.35	

Figure 7.34 Exemple 3 – Tableau comparatif des différents scénarios

Il est intéressant de comparer le scénario 1 et le scénario 4. Le gain espéré sur la taille du moteur en ajoutant un étage de réduction de 560 % n'a pas pu être obtenu.

On est passé d'un moteur 10 Hp, 1800 r/min à un moteur 20 Hp, 3600 r/min. Comme le couple nominal de ces deux moteurs est pratiquement identique, on peut en déduire en première approximation que le volume des parties actives est pratiquement le même dans les deux cas. Il en est de même en première approximation pour le coût.

Au niveau du rendement, il faut comparer le rendement du moteur du scénario 1 qui est de 89.9 % au produit des rendements du moteur par celui du réducteur dans le cas du moteur du scénario 4, soit 94.38 % x 97% = 94.15 %. Le rendement du scénario 4 est donc légèrement plus intéressant que celui du scénario 1.

Au niveau de l'alimentation, le courant absorbé par le moteur du scénario 4 est plus élevé que celui du scénario 1 et le facteur de puissance est nettement plus faible dans le cas du scénario 4.

Au niveau des perturbations sur le réseau, le moteur du scénario 4 absorbe un courant de démarrage

supérieur au double de celui du scénario 1.

Cette analyse fait apparaître que l'emploi d'un réducteur est à rejeter à cause du coût plus élevé (investissement pour l'achat du moteur et du réducteur), de la maintenance à prévoir au niveau des courroies et d'un plus mauvais comportement vis à vis du réseau d'alimentation.

Dans le cas où le réseau de distribution industriel présente une puissance de court-circuit relativement faible au niveau de la barre où le moteur est alimenté, le scénario 2 pourrait être à considérer puisque le moteur plus puissant présente une sensibilité inférieure aux creux de tension. Ceci pourrait être étudié plus précisément en comparant les moteurs des scénarios 1 et 2 après avoir modifié les données de la boîte de dialogue "Paramètres du réseau électrique" de manière à étudier le régime permanent de cet entraînement soumis à une tension d'alimentation égale à 70 % de la tension nominale (un creux de tension de 30 % correspond au pire cas admissible dans le cas d'un réseau de distribution industriel: au delà de cette valeur, les relais de protection déclenchent [22] ).

## Conclusion générale

Nous avons présenté dans ce mémoire la conception et la réalisation d'un outil interactif et convivial pour la sélection des moteurs asynchrones dans les entraînements industriels, dans le cas d'une alimentation à fréquence fixe.

Ce logiciel peut faciliter grandement l'analyse des solutions optimales à adopter suivant diverses contraintes concernant aussi bien l'efficacité énergétique que la rentabilité, la fiabilité ou l'efficacité du réseau de distribution de l'usine considérée.

L'ingénieur ou le technicien peut y trouver une assistance utile pour résoudre des problèmes concrets, en essayant et en comparant divers scénarios pour une même application.

La base de données de moteurs implantée dans le logiciel concerne des moteurs normalisés (NEMA) de performances moyennes et réalistes. Il est aisé d'utiliser les caractéristiques normalisées des moteurs fournies par le logiciel pour un choix ultérieur parmi les catalogues de divers manufacturiers.

Une approche experte très simple permet de compléter les spécifications souvent incomplètes de l'entraînement. Le logiciel est conçu de manière à s'enrichir au fur et à mesure, à partir de projets concrets déjà étudiés et validés, puisqu'il permet à l'utilisateur de construire sa propre bibliothèque de charges entraînées et de réducteurs.

L'expérience d'utilisation du logiciel qui a été conçu a montré également qu'il pouvait s'avérer un outil de formation très efficace à tous les niveaux d'éducation. Sans aucune manipulation d'équations, l'élève peut à l'occasion des divers scénarios qu'il essaie, assimiler rapidement les limites et les contraintes de choix des moteurs dans le cas d'applications réalistes et concrètes.

Sur le plan informatique, la programmation structurée en langage orienté objet a été conçue de manière modulaire de façon à faciliter l'évolution et la maintenance du produit. La disponibilité de cross compilateurs en langage JAVA devrait permettre à court terme une implantation du logiciel sur Internet.

Sur le plan électrotechnique, la contribution la plus originale concerne la mise au point d'une base de données de moteurs typiques de performances moyennes répondants aux exigences de la norme NEMA et de leurs caractéristiques détaillées (schémas équivalents, etc.). Cette mise au point a

nécessité une analyse en profondeur de la norme NEMA et une étude statistique de plus de 19 000 moteurs commerciaux.

Les performances du logiciel "**MotorSizer**" qui a été conçu et réalisé dans le cadre de ce projet, ont été illustrées par des exemples et indirectement validées par comparaison avec des données de manufacturiers d'applications.

Il serait intéressant de compléter cet outil par un module plus évolué au niveau de la modélisation du réseau de distribution. La modélisation du réseau par sa puissance de court-circuit à la barre d'alimentation du moteur pourrait permettre de prendre en compte la chute de tension au cours du démarrage ou en cas de surcharge. Cette implantation devrait être facilitée par la structure adoptée lors de la conception modulaire du programme.

Cette expérience est un premier pas vers la mise au point au LEEPCI d'outils analogues concernant la sélection d'autres types de moteurs ou d'entraînements alternatifs à fréquences variables.

## Références bibliographiques

- [1] NEMA Standards Publication NO. MG 1-1993 Motors and Generators
- [2] NEMA Standards Publication NO. MG 2- 1989 (R 1994) *Safety Standards for Construction and Guide for Selection, Installation, and Use of Electric Motors and Generators.*
- [3] NEMA Standards Publication NO. MG 10-1994 *Energy management Guide for Selection and Use of Fixed Frequency Medium AC Squirrel-Cage Induction Motors.*
- [4] P. Viarouge *Notes de cours GEL-15217: Machines Électriques*, Université Laval 1995
- [5] Théodore Wildi, *Électrotechnique, 2ème édition*, Les Presses de l'Université Laval, Édition ESKA 1991
- [6] John C. Andreas, *Energy - Efficient Electric Motors, Selection and Application, 2ème édition*, 1992
- [7] R. N. H. Michod, *Selection of AC induction motors and starters*, Electrical Engineer, Feb-1973 p 11-15, 22-25
- [8] N. Binks, *Selection of induction motors for pumps drives*, Pumps – Pompes - Pumpen No. 146 Nov-1978 p 535-538
- [9] K. S. Panesar, *Induction - motor selection guidelines*, Oil & Gaz Journal Jan. 5, 1981 p 88-92
- [10] B. G. Desai *Selection and Application Of Induction Motors to Save Energy*, Electricity Conservation Quaterly Jul-1984 p 523
- [11] David L. Deavours, James R. Jone, *An engineer's computer program for the economic evaluation and technical selection for application of induction motors*, Proceedings of the Nineteenth Annual North American Power Symposium, 1987 Edmonton, Alberta, Canada, Sponsored by: IEEE, Power Engineering Soc, New York, NY, USA IEEE New York, NY, USA p 297-306
- [12] Rockwell Automation - Reliance, AC Motors efficiency - A guide to energy savings B-7087-5 1997, ([http://www.reliance.com/prodserv/motorgen/b7087\\_5/b7087\\_5\\_1.htm](http://www.reliance.com/prodserv/motorgen/b7087_5/b7087_5_1.htm))
- [13] B. K. Fussel et C. K. Taft, *Brushless DC motor selection*, 1975
- [14] WEG DT - 01, *Especificações de motores elétricos*
- [15] E. H. Wernick, *Electric Motor Handbook*, 1978
- [16] EASA Electrical motor manuels
- [17] Site Web de NEMA <http://www.nema.org>
- [18] Mathématica for Students 3.0, *Wolfram Research.*



- [19] INSPEC, *logiciel fait par Cherry Tree Scientific software.*
- [20] Manual de Motores Electricos 010.01/0594, *WEG Motores LTDA*
- [21] Moteurs Electriques E.Bonnafous Technique et Vulgarisation ISBN- 2-7109-0123-4 1970
- [22] Cours de compatibilité électromagnétique dans les réseaux de distribution industriel, *Breton Banville & Associés.* Hydro-Québec 1997.