

Introduction

La conception et le dimensionnement des machines électriques sont des axes très important dans l'industrie électrique surtout pour la construction et la fabrication du matérielle dans une durée limitée et rapide. En effet, ils existent plusieurs méthodes pour le dimensionnement des machines électriques, c'est un domaine très large dont l'approche utilise beaucoup d'hypothèses.

Sachant que, la caractérisation des machines asynchrones nous entraîne à formuler une méthode de dimensionnement qui s'appuie sur les équations de la machine en tenant compte des divers phénomènes électromagnétiques et aboutit à une définition globale de la machine, et le dimensionnement définitif, tel qu'il est pratiqué en utilisant les logiciels de CAO les plus courants, est ensuite décrit en exploitant les spécificités destinées aux machines asynchrones.

Un outil de CAO est un moyen de simulation permettant la définition de la structure du dispositif à concevoir, son dimensionnement et la détermination de ses performances à partir de ces spécifications géométriques, de construction et des conditions d'utilisation. En partant d'un cahier de charges donné, il permet d'explorer automatiquement l'ensemble des solutions possibles, [13].

Dans cette deuxième partie, tout d'abord on présentera la procédure de calcul et le dimensionnement d'une machine asynchrone. A la suite de ces calculs, on apporte des corrections nécessaires s'il y a lieu dans les dimensions choisies primitivement. On choisit des matériaux présentant d'autres propriétés, puis on reprendra tous ces calculs jusqu'à ce qu'on obtient une variante qui répond entièrement aux exigences énoncées dans le cahier de charge. Ensuite, une application sur la machine de 5 kW a été faite, afin de vérifier l'approche de conception adoptée. Puis, les résultats du programme de conception développé sont utilisés pour déduire les performances de la machine étudiée, utilisant la méthode du schéma équivalent.

Finalement en va mettre en relief les différentes méthodes d'optimisation : nous introduirons les méthodes déterministes, les méthodes stochastiques et en insistant sur les algorithmes génétiques AGs. On appliquera la méthodologie de dimensionnement optimisée à l'amélioration du rendement d'une machine asynchrone dont l'outil principal est le programme de conception développé.

II.1. Méthodes de dimensionnement et calcul des machines électriques

II.1.1. Première méthode

Elle est proposée par Marcel JUFER et Jean-Claude SABONNADIÈRE, repose sur le calcul en utilisant les formules de dimensionnement du fer statorique, ensuite il entame le calcul rotorique et le dimensionnement du circuit magnétique selon les contraintes :

- * Imposer un niveau d'induction correspondant au coude de saturation de façon à limité les chutes de potentiel et les pertes fer, tout en diminuant le volume et la masse du fer ; puis définir ce niveau d'induction par la géométrie et le principe de conservation du flux magnétique;
- * Le diamètre d'alésage et la longueur active sont les dimensions caractéristiques du processus de dimensionnement. Mais le facteur clé associé est l'induction radiale dans l'entrefer, sa distribution sera admise sinusoïdale, [11].

II.1.2. Deuxième méthode

Cette deuxième méthode à caractère pédagogique utilisée à l'école polytechnique de MONREAL est une méthode à but didactique. La méthode suggérée offre une certaine marge de manœuvres. Des compromis doivent être faits pour le choix de certains paramètres comme le diamètre d'alésage du moteur par exemple. Le résultat obtenu doit quelquefois faire l'objet de changement afin de satisfaire les exigences visées. Cette méthode inclue aussi les dispersions due à la disposition en biais des encoches rotoriques, [11].

II.1.3. Troisième méthode

Cette procédure réuni le calcul et la conception assistée par ordinateur d'une machine à induction, et emprunte différentes phases de calcul suivant un ordre chronologique. Cette approche est basée sur le principe de conception de G.KOUSKOFF et LIWSCHITZ. Sauf qu'on impose les données géométriques d'une machine industrielle déjà existante, comme contraintes auxquelles nous devons nous soumettre, [14]. Les résultats numériques du calcul sont traités par une analyse dynamique simulée du comportement de la machine en vue de mettre au point la corrélation et la concordance de ces résultats de conception avec ceux délivrés par le constructeur du moteur à induction étudié.

II.1.4. Méthode classique « calcul de LIWSCHITZ »

Cette méthode est une approche analytique qui permet le dimensionnement des différentes parties de la machine stator, rotor, électrique, magnétique. Elle est basée sur des formules empiriques et des abaques. L'organigramme de la figure (II.1), résume les étapes importantes de cette méthode, [14].

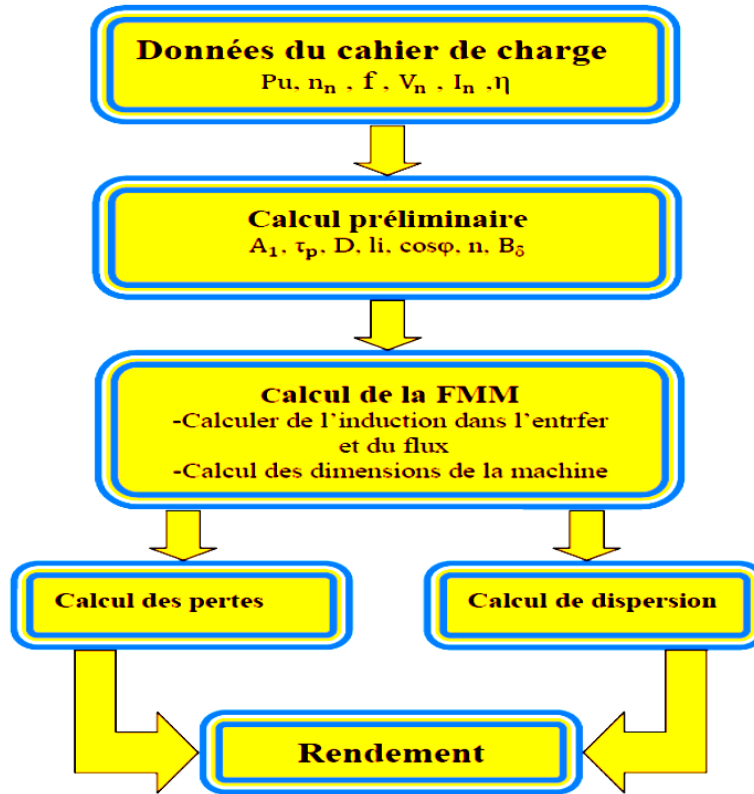


Figure II.1 : Organigramme de calcul de LIWSCHITZ, [14].

II.1.4.1. Cahier de charge

Les données du cahier de charge sont principalement les performances de la machine au point de fonctionnement nominale ($p_u ; n_n ; f ; V_n ; I_n ; \eta$), [15].

II.1.4.2. Calcul des dimensions principales

Dans la détermination des dimensions principales des machines à courant alternatif, il est indiqué de prendre comme base la puissance apparente (P_s). La liaison entre les dimensions principales et les contraintes, tant électriques que magnétiques, est donnée par l'équation (II.1) définissant le coefficient d'utilisation de la machine.

$$c = \frac{P_s \cdot 10^{-3}}{D^2 \cdot li \cdot 60 \cdot n} = \frac{Kw1 \cdot B_{\delta \max} \cdot A1}{8,6 \cdot 10^3} \quad (II.1)$$

A_1 : Densité linéaire de courant au périphérique de l'induit tel que :

$$A_1 = \frac{2m_1 \cdot N_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D} \quad (\text{II.2})$$

Sachant que la puissance apparente est :

$$P_s = \frac{P_u}{\eta \cdot \cos \phi} \quad (\text{II.3})$$

D'autre côté on a :

$$P_s = m_1 \cdot V_1 \cdot I_1 \quad (\text{II.4})$$

$$f_1 = p \cdot n \quad (\text{II.5})$$

Où, dans l'hypothèse d'un champ sinusoïdal :

$$V_1 \approx E_1 = 4.44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot K_{w1} \cdot \Phi \quad (\text{II.6})$$

Et le flux maximal :

$$\Phi_{\max} = \frac{2}{\pi} \cdot \tau_p \cdot l_i \cdot B_{\delta \max} \quad (\text{II.7})$$

Le pas polaire est :

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \quad (\text{II.8})$$

La relation (II.1) permet de déterminer le volume $D^2 l_i$, choisissant un champ d'induction B_δ dans l'entrefer, une densité linéaire du courant A_1 et le coefficient d'utilisation C . Les valeurs de C, B_δ, A_1 sont estimées à partir des abaques en fonction de τ_p, p , [15].

Pour pouvoir déterminer, au moyen du coefficient d'utilisation, les dimensions de la machine à partir de la puissance et de la vitesse de rotation, on doit fixer le rapport λ de la longueur virtuelle l_i de l'induit au pas polaire τ_p , [15].

$$\lambda = \frac{l_i}{\tau_p} = \sqrt[3]{p} \quad (\text{II.9})$$

Le rapport λ est fonction du nombre de paires de pôles et varie dans un intervalle.

II.1.4.3. Calcul des dimensions géométriques principales du rotor et stator

✓ Choix des nombres d'encoches

Le choix du nombre d'encoches statiques est lié au nombre de pôles et au nombre de phases ainsi qu'aux contraintes géométriques. Le choix du nombre d'encoches rotoriques est lié au nombre d'encoches statoriques et doit être tel que les effets réductants

(influence de la variation des perméances de dents) soient minimisés afin de réduire le bruit et les couples parasites et d'éliminer toute attraction unilatérale.

✓ Dimensionnement des encoches

a) Encoche statorique

$$Z_1 = 2 \cdot p \cdot q \cdot m_1 \quad (\text{II.10})$$

p : Nombre de pair de pôles;

q : Nombre d'encoches par pole et par phase;

m_1 : Nombre de phases.

Le nombre q est un paramètre fondamental pour la machine, car il intervient dans le coefficient de distribution K_d , doit être dans tous les cas supérieurdeux ($q > 2$) afin que la dispersion provenant des champs harmoniques supérieurs demeure faible, [15].

b) Encoche rotorique

Il n'existe aucune théorie pour le choix de nombre d'encoches rotoriques (Z_2), cependant il existe des tableaux établis à partir d'essais pratiques pour le choix de Z_2 en fonction du nombre de paires de pôles (p) et du nombre d'encoches statoriques (Z_1).

Ces tableaux sont établis pour atténuer les vibrations et assurer une bonne caractéristique mécanique de la machine. Pour le nombre de pair de pole $p = 2$, on a le tableau suivant.

| P | Z_1 | Z_2 | Z_1 | Z_2 |
|---|-------|--------|-------|---------------------|
| 2 | 24 | 18, 30 | 72 | 58, 62, 82, 86, 90 |
| | 36 | 30, 48 | 84 | 70, 90, 94, 98, 102 |
| | 48 | 38, 58 | 96 | 78, 110, 114, 118 |
| | 60 | 50, 74 | | |

Tableau II.1 : Tableau d'encoches rotoriques, [15].

✓ L'entrefer

Pour des raisons mécaniques, on choisit l'entrefer aussi grand que possible. Un entrefer assez grand est également avantageux pour ce qui est des pertes supplémentaires dans le fer, produites par les pulsations du champ, et de la dispersion provoquée par les champs harmoniques supérieurs. En revanche, eu égard au courant magnétisant (facteur de puissance), l'entrefer doit être maintenu aussi faible que possible.

On détermine l'épaisseur de l'entrefer en utilisant la courbe qui donne la variation de l'épaisseur en fonction du diamètre extérieur et le nombre de paires de pôles.

✓ Enroulement de la machine

L'enroulement dans toutes les machines électriques est la pièce maîtresse nécessaire pour la création de champ électromagnétique. La caractéristique essentielle d'un tel enroulement c'est le nombre d'encoches par pôle et par phase (q) qui détermine le nombre de bobine dans un groupe, il permet de placer les côtés des bobines ou des sections en précisant à quelle phase ils appartiennent et dans quel sens y passent les courants, [15].

a) Facteur de bobinage

$$K_{w1} = K_{p1} \cdot K_{d1} \cdot K_{inc1} \quad (\text{II.11})$$

K_{w1} : Facteur de bobinage;

K_{p1} : Facteur de raccourcissement;

K_{d1} : Coefficient de distribution;

K_{inc1} : Coefficient d'inclinaison.

b) Facteur de distribution

Il est défini par :

$$K_{d1} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2 \cdot m})}{q \cdot \sin(\frac{\pi}{2 \cdot \pi \cdot q})} \quad (\text{II.12})$$

c) Facteur de raccourcissement

Il est défini par :

$$K_{p1} = \sin(\beta \cdot v \cdot \frac{\pi}{2}) \sin(v \cdot \frac{\pi}{2}) \quad (\text{II.13})$$

v : Ordre d'harmonique

$$\beta = \frac{c'}{\tau_p} \quad (\text{II.14})$$

β : Désigne l'ouverture de la bobine. Ce facteur est aussi donné jusqu'au septième harmonique il est choisi en tenant compte des harmoniques qu'on désire éliminer. Généralement on choisit K_p de telle sorte que l'on puisse atténuer certains harmoniques.

En pratique, on adapte, [15].

$$\dot{c} = \tau_p - \frac{\tau_p}{6} \quad (\text{II.15})$$

II.1.4.4. Calcul de la F.M.M

L'entrefer constitue le premier pas de calcul de la F.M.M, puisque l'on prend pour base de calcul l'induction B_δ ou le flux Φ_δ dans celui-ci du fait que la chute de potentiel dans l'entrefer est la plus importante dans la machine.

Lorsque la saturation de la dent n'est pas forte ($< 1,8$ T), on peut admettre que le flux entier $\Phi_{\tau max}$ passe par la dent.

On a alors :

$$B_i = \frac{\Phi_{\tau max}}{S_i} = \frac{l_i \cdot \tau_p}{K_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot Z_y} \cdot B_{\delta max} \quad (\text{II.16})$$

Le passage à la valeur de H_i pour chaque tronçon se fait à travers de la courbe de première aimantation des tôles constituant le circuit magnétique de la machine, [15]. La valeur du champ H_i multipliée par la longueur du tronçon l_i , nous donne la valeur de la chute de tension magnétique F.M.M pour chaque tronçon.

On aura la F.M.M totale du circuit magnétique:

$$F_T = \sum_{i=1}^n H_i l_i = F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n = N \cdot I \quad (\text{II.17})$$

a) F.M.M dans l'entrefer

La F.M.M engendrée dans l'entrefer est la plus importante dans la machine. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$F_\delta = H_\delta \cdot \delta = \delta \cdot \frac{B_\delta}{\mu_0} \quad (\text{II.18})$$

Tel que :

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{\alpha_i \cdot \tau_p \cdot l_i} \quad (\text{II.19})$$

On note que S_δ la surface virtuelle traversée par le flux et que ce dernier est proportionnel à la longueur virtuelle l_i et à l'arc polaire virtuel b_i .

$$S_\delta = l_i \cdot b_i \quad (\text{II.20})$$

On note aussi que l'arc polaire b_i et dépend de la forme des pôles et de la saturation du fer, donc de la forme de la courbe d'induction.

$$b_i = \alpha_i \cdot \tau_p \quad (\text{II.21})$$

Soit :

$$\alpha_i = \frac{B_{\delta eff}}{B_{\delta max}} < 1 \quad (\text{II.22})$$

α_i : Coefficient d'aplatissement de la courbe; $\alpha_i = \frac{\pi}{2}$: pour un champ sinusoïdale.

b) Chute de potentielle magnétique dans les dents

Lorsque la saturation dans les dents n'est pas forte on peut admettre que, avec suffisamment d'exactitude, tout le flux correspondant à un pas dentaire passe par la dent, Dans ce cas B_{hz} l'induction dans la dent doit être inférieure à 1.8 T.

Lorsque l'induction est très grande $B_{1z} > 1.8$ T, le calcul précédent n'est plus valable. Dans ce cas on considère qu'une partie seulement du flux correspondant à un pas dentaire passe par l'encoche. Dans le cas général de calcul des machines électriques, on n'a pas intérêt d'avoir une saturation très forte qui augmenterait le courant à vide et provoquerait un échauffement exagéré de la machine, on a intérêt à avoir $B_{zy} < 1.8$ T. On supposerait dans ces conditions que tout le flux passe par la dent, pour calculer le champ magnétique dans cette dernière, on doit la diviser en plusieurs sections, déterminer le champ dans chaque section et faire la somme des chutes de potentiels magnétiques:

$$F_z = \int_0^{z=h} h_z \cdot H_z \quad (\text{II.23})$$

Cependant dans la pratique, on utilise la règle de **Simpson** qui donne des résultats meilleurs. Sachant qu'on subdivise la dent en trois parties. L'intensité moyenne du champ est calculée comme suit:[15] [16] [17]

$$H_{z.moy} = 16(H_{z.min} + 4H_{z.med} + H_{z.max}) \quad (\text{II.24})$$

$H_{z.min}$ La valeur du champ minimum dans la dent; $H_{z.med}$ La valeur du champ médian;
 $H_{z.max}$ La valeur du champ maximum.

La valeur de la chute de potentiel magnétique dans la dent est :

$$F_z = h_z \cdot H_{z.moy} \quad (\text{II.25})$$

Ce résultat est valable aussi bien pour le rotor que pour le stator. On refait les mêmes calculs pour les deux parties tout en considérant les caractéristiques de chacune d'elles.

✓ Coefficient de saturation

Le coefficient de saturation K_s à une grande influence sur les caractéristiques de la machine électrique est défini comme suit :

$$K_s = \frac{F_\delta + F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} > 1 \quad (\text{II.26})$$

L'augmentation K_s signifie une saturation dans les dents statorique et rotorique donc une augmentation de la F.M.M, qui engendre une augmentation du courant magnétisant.

c) Chute de potentiel magnétique dans la culasse

Pour calculer la chute de tension magnétique dans la culasse, on suppose que le flux est uniformément réparti dans la section droite de celle-ci. Si l'on considère ϕ le flux pénétrant dans la culasse. Le flux traversant la section droite est égale à $\frac{\phi}{2}$, on peut alors écrire:

$$B_{ji} = \frac{\phi}{2 \cdot K_{fe} \cdot L_{fe} \cdot h_{ji}} \quad (\text{II.27})$$

La ligne de parcours moyenne pour les lignes d'induction dans les culasses :

1) Rotorique

On prend pour la ligne de parcours moyenne:

$$l_{j2} = \frac{D + 2\delta + 2p - h_{j2}}{2p} \cdot \pi \quad (\text{II.28})$$

2) Statorique

$$l_{ji} = \frac{D + 2h_{z1} + h_{j1}}{2p} \cdot \pi \quad (\text{II.29})$$

La chute de potentiel magnétique dans la culasse rotorique ou statorique serait alors égal à :

$$F = H_{ji} \cdot l_{ji} \quad (\text{II.30})$$

La valeur de H_{ji} est tirée de la caractéristique magnétique du fer utilisé après avoir calculer B_{ji} .

✓ Coefficient de forme de la courbe d'induction

Par définition le coefficient de forme représente le rapport entre la valeur efficace à la valeur moyenne de l'induction dans l'entrefer.

$$K_f = \frac{B_{\delta,eff}}{B_{\delta}} \geq 1 \quad (II.31)$$

✓ Facteur de carter (correction de l'entrefer)

C'est le rapport d'épaisseur de l'entrefer fictif δ' à la valeur d'épaisseur de l'entrefer:

$$\frac{\delta'}{\delta} = K_c > 1 \quad (II.32)$$

d) Calcul de la FMM et du courant magnétisant

1) Calcul du nombre de spires N_1 par phase du primaire

La relation entre la F.E.M induite par phase E et le flux ϕ dans le cas d'une induction sinusoïdale est :

$$V_1 \approx E_1 = 4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot K_{w1} \cdot \Phi \quad (II.33)$$

On a aussi :

$$E_1 = V_1 - X_{\delta 1} \cdot I_0 \approx V_1 - X_{\delta 1} \cdot I_m \quad (II.34)$$

$$E_1 = V_1 \left(1 - \frac{X_{\sigma 1} \cdot I_m}{V_1} \right) = V_1 \cdot \frac{1}{1 + \sigma_{H1}} \quad (II.35)$$

D'où l'on peut écrire :

$$N_1 = \frac{V_1 \cdot \left(\frac{1}{1 + \sigma_{H1}} \right)}{4 \cdot K_f \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot K_{w1} \cdot \Phi} \quad (II.36)$$

$\frac{1}{1 + \sigma_{H1}}$: Désigne le coefficient de dispersion de **Heyland** du primaire, est obtenu à partir d'un diagramme. On remarque sur ce diagramme que l'augmentation du nombre de paire de pôles engendre une augmentation de dispersion, [15].

2) Correction de l'induction dans les dents et la culasse

Ayant déterminé un coefficient de dispersion σ_{H1} par diagramme, ce qui correspond à une réactance de fuite du primaire $X_{\sigma 1}$, le flux correspondant à cette réactance de fuite $\phi_{\sigma 1H}$ passe partiellement par la culasse et les dents du stator. Donc, les inductions magnétiques doivent être augmentées d'une quantité proportionnelle au flux de fuite dans le calcul de la chute de tension magnétique.

Dans le calcul, on prend avec une approximation suffisante:

$\emptyset(1 + \sigma_{H1})$ Flux dans la culasse et au pied de la dent ;

$\emptyset(1 + \frac{2}{3}\sigma_{H1})$ Flux à la mi-hauteur de la dent ;

$\emptyset(1 + \frac{1}{3}\sigma_{H1})$ Flux à la tête de la dent.

Les valeurs des inductions corrigées dans chaque partie de la machine avec l'induction dans l'entrefer ϕ_δ sont :

$$B_\delta = \frac{\phi_\delta}{\alpha_i \cdot \tau_p \cdot l_i} \quad (\text{II.37})$$

a) Pour le stator

$$B_{z1p} = \frac{l_i}{K_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z1}}{z_{1p}} \cdot B_\delta (1 + \delta_{H1}) \quad (\text{II.38})$$

$$B_{z1m} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z1}}{z_{1p}} \cdot B_\delta (1 + \frac{2}{3}\delta_{H1}) \quad (\text{II.39})$$

$$B_{z1t} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z1}}{z_{1p}} \cdot B_\delta (1 + \frac{1}{3}\delta_{H1}) \quad (\text{II.40})$$

$$B_{j1} = \frac{\phi_\delta}{K_{fe} \cdot L_{fe} \cdot h_{j1}} \cdot B_\delta (1 + \delta_{H1}) \quad (\text{II.41})$$

$$B_{z2p} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z2}}{z_{2p}} \cdot B_\delta \quad (\text{II.42})$$

b) Pour le rotor

$$B_{z2p} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z2}}{z_{2p}} \cdot B_\delta \quad (\text{II.43})$$

$$B_{z2m} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z2}}{z_{2p}} \cdot B_\delta \quad (\text{II.44})$$

$$B_{z2t} = \frac{l_i}{K_{fe} \cdot L_{fe}} \cdot \frac{\tau_{z2}}{z_{2p}} \cdot B_\delta \quad (\text{II.45})$$

$$B_{j2} = \frac{\phi}{2} \cdot K_{fe} \cdot L_{fe} \cdot h_{j2} \quad (\text{II.46})$$

Après calcul des inductions, on déduit les valeurs des champs magnétiques relatifs à chaque tronçon, ce qui nous permet de calculer les chutes de potentiel magnétique :

$$F_\delta = K_c \cdot \delta \cdot \frac{B_\delta}{\mu_0} \quad (\text{II.47})$$

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} \quad (\text{II.48})$$

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot h_{z2} \quad (\text{II.49})$$

$$F_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} \quad (\text{II.50})$$

$$F_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} \quad (\text{II.51})$$

La F.M.M totale est la somme des chutes de potentielles magnétiques:

$$F_{tot} = 2 \cdot F_{\delta} + 2 \cdot F_{z1} + 2 \cdot F_{z2} + F_{j1} + F_{j2} \quad (\text{II.52})$$

Avant de déterminer la chute de potentiel dans les culasses, il faut calculer la valeur de K_s , et la comparer avec la valeur de K_s celle choisi au préalable. Si ces valeurs sont différentes, on prend la valeur intermédiaire moyenne et on refait les calculs jusqu'à l'égalité des deux valeurs, ce qui permet d'avoir les trois coefficients K_s , K_f et α_i ; coefficients qui seront utilisés par la suite dans les calculs, [18].

3) Calcul des courants

✓ Evaluation du Courant Magnétisant

$$I_m = \frac{P \cdot F_{tot}}{0.9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot K_{w1}} \quad (\text{II.53})$$

✓ Courant de barre et anneau de court-circuit

La tension induite dans une barre rotorique est égale à la F.E.M du primaire rapportée au secondaire:

$$E_2 = (V_1 - I_m \cdot X_{\delta 1}) \cdot \frac{N_2 \cdot K_{w2}}{N_1 \cdot K_{w1}} \quad (\text{II.54})$$

$$= \frac{V_1}{1 + \delta_{H1}} \cdot \frac{N_2 \cdot K_{w2}}{N_1 \cdot K_{w1}} \quad (\text{II.55})$$

Le courant I_2 est calculé à partir de la puissance mécanique :

$$P_{mec} = P_U + P_{ft+vt} + P_{sup} \quad (\text{II.56})$$

Si l'on suppose ces pertes à vide et en charge égales, on peut écrire :

$$m_2 \cdot I_2 \cdot E_2 (1 - g) = P_{mec} = P_u + P_{(ft+vt)} + P_{sup} \quad (\text{II.57})$$

D'où on déduit I_2 :

$$I_2 = \frac{P_u + P_{(ft+vt)} + P_{sup}}{m_2 \cdot E_2 (1 - g)} \quad (\text{II.58})$$

g : Etant le glissement estimé;

m_2 : Nombre de phase du secondaire.

Ainsi le courant d'anneau est :

$$I_{an} = \frac{I_2}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot P}{z_2}} \quad (\text{II.59})$$

II.1.4.5. Dispersion

Il est très difficile de calculer la dispersion avec exactitude car pour cela il faut des formules qui établissent des relations exactes avec les différents paramètres. Cependant il existe des formules qui donnent des résultats avec une bonne approximation dans la pratique et qui s'approche assez de la réalité.

Pour obtenir les formules à employer dans le calcul des inductances et des réactances de fuite des machines électriques, on décompose le flux total de dispersion en trois flux partiels:

- Flux de dispersion d'encoche ;
- Flux de dispersion des têtes de bobines ;
- Flux de dispersion différentielle ;
- Flux de dispersion des têtes de dents, [15].

La quatrième partie est négligée, puisque cette partie de la dispersion est proportionnelle à l'entrefer, or celui-ci est très réduit dans les machines asynchrones.

a) Dispersion d'encoche

La dispersion d'encoche est due au flux de fuite qui se ferme autour de l'encoche en traversant l'encoche, qui ne participe pas au flux commun, soit :

$$\lambda_{\sigma z} = \frac{h_1}{3 \cdot b_z} + \frac{h_2}{b_z} + \frac{h_3}{b_3} + \frac{h_4}{b_4} \quad (\text{II.60})$$

Pour une encoche ronde avec remplissage uniforme, on obtient :

$$\lambda_{\sigma z} = 0.66 \cdot \frac{h_4}{b_4} \quad (\text{II.61})$$

Et la perméance d'encoche est donnée par :

$$A_{\sigma z} = \mu_0 \cdot L_z \cdot \lambda_{\sigma z} \quad (\text{II.62})$$

Dans le cas de l'encoche ronde fermée $\lambda_{\sigma z} = 0,66$

b) Réactance de fuite différentielle

Pour le stator :

$$\lambda_{\sigma d1} = \frac{m_1}{\delta \cdot \pi^2} \cdot \tau_p \cdot l_i \cdot \frac{\mu_0}{K_s \cdot K_c} \sum \left(\frac{K_{wv}}{v} \right)^2 \quad (\text{II.63})$$

Pour le rotor :

$$\Lambda_{\sigma d2} = \mu_0 \cdot \frac{z_2}{2 \cdot m_1 \cdot p} \cdot \frac{m_1}{\pi^2} \cdot \frac{\tau_p \cdot l_i}{K_c \cdot K_s \cdot \delta} \cdot \sum_v \left(\frac{1}{(2 \cdot z_2 \cdot \frac{v}{2p}) + 1} \right)^2 \quad (\text{II.64})$$

c) Réactance de fuite des têtes de bobines

Le calcul de la dispersion des têtes de bobines est fait d'une manière très approximative, puisque les lignes de parcours du flux sont très compliquées. Il y a une grande influence entre les têtes de bobines et la masse de fer voisine.

On a:

$$X_{\sigma b} = 12,25 \cdot f \cdot \frac{N_2}{p} \cdot \Lambda_{\sigma b} \quad (\text{II.65})$$

d) Calcul des coefficients de dispersion

$$\sigma_{H1} = \frac{X_{\sigma 1}}{X_m} = \frac{X_{\sigma 1} \cdot I_m}{V_1 - X_{\sigma 1} \cdot I_m} \quad (\text{II.66})$$

$$\sigma_{H2} = \frac{X_{\sigma 2}}{X_{\sigma 2}} \cdot \sigma_{H1} \quad (\text{II.67})$$

II.1.4.6. Evaluation des Pertes

Les pertes dans une machine électrique peuvent être divisées en trois parties:

- Les pertes par effet Joule ou pertes dans le cuivre;
- Les pertes dans le fer (Hystérésis, courants de Foucault et pulsation du flux);
- Les pertes par frottement et ventilation, qui sont très petites par rapport aux autres pertes.

Les pertes les plus fondamentales et les plus dominantes dans une machine électrique, sont les pertes Joule et les pertes fer.

Sachant que, l'étude des pertes et du rendement sont fortement liées. En d'autres termes, un rendement élevé correspond à une densité de puissance élevée.

À une vitesse réduite, le rendement est critique, ceci est dû au fait que la plupart des entraînements électriques fonctionnent la plupart du temps avec 40% à 80% de la vitesse nominale, [15].

II.1.4.6.1. Pertes joules

a) Dans le stator :

$$p_{jr1} = m_1 \cdot R_1 \cdot I_1^2 \quad (\text{II.68})$$

La résistance statorique par phase est :

$$R_1 = \rho \cdot \frac{L_{tot}}{s} \quad (\text{II.69})$$

b) Dans le rotor

Les pertes dans le cuivre pour le secondaire sont :

$$p_{jr2} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (\text{II.70})$$

$$R_2 = R_{bar} + \frac{2 \cdot R_{an}}{4 \cdot \sin^2 \frac{\pi \cdot p}{z_2}} \quad (\text{II.71})$$

$$R_{bar} = \rho \cdot \frac{L_{bar}}{s_{bar}} \quad (\text{II.72})$$

$$R_{an} = \rho \cdot \frac{L_{an}}{s_{an}} \quad (\text{II.73})$$

R_{bar} : Résistance d'une barre ;

R_{an} : Résistance de l'anneau.

II.1.4.6.2. Pertes dans le fer

Les pertes dans le fer se composent principalement des pertes par Hystérésis et des pertes par courants de Foucault.

a) Pertes par Hystérésis

Les pertes par Hystérésis représentent l'énergie nécessaire à l'aimantation cyclique alternative du fer, [13].

Les pertes par Hystérésis sont proportionnelles à :

- L'aire du cycle d'Hystérésis ;
- Aux nombres de cycles d'aimantation.

L'équation de **RICHTER** nous permet de calculer ces pertes,

$$P_h = a \cdot b \cdot B_{max} + b \cdot f \cdot B_{max}^2 \quad (\text{II.74})$$

B_{\max} : Désigne l'induction maximale dans le fer. En pratique on néglige souvent le premier terme en puissance devant le terme en puissance deuxième. On peut ainsi écrire avec suffisamment d'exactitude:

$$P_h = k_H \cdot f \cdot B_{\max}^2 \cdot 10^{-2} \quad (\text{II.75})$$

K_H : Représente une constante du matériau utilisé. Pour améliorer les caractéristiques d'une machine électrique, il est important de choisir un matériau ferromagnétique qui possède un coefficient de pertes faible, ce qui réduit considérablement les pertes par Hystérésis.

b) Pertes par courants de Foucault

L'aimantation cyclique alternative engendre des courants induits dans le fer, ces courants sont appelés courants de Foucault. Pour réduire les pertes engendrées par ces courants, on utilise des tôles feuilletées isolées les unes des autres, disposées parallèlement aux lignes d'induction.

Les pertes par courants de Foucault peuvent être calculées par l'équation :

$$P_w = K_w \cdot (s_t \cdot f \cdot B_{\max}^2)^2 \cdot 10^2 \quad (\text{II.76})$$

c) Pertes dans la culasse

Les formules générales, pour le calcul des pertes par Hystérésis, ne tiennent pas compte de l'influence de la répartition du champ dans la culasse. Pour tenir compte de ce phénomène, on multiplie la formule des pertes par Hystérésis par un coefficient K_j .

$$P_{hj} = K_h \cdot f \cdot B_j^2 \cdot m_j \cdot K_j \cdot 10^{-2} \quad (\text{II.77})$$

Pour les mêmes considérations de calcul des pertes par courants de Foucault, la formule générale est multipliée par un coefficient K_{wj} pour tenir compte de la répartition du champ dans la culasse.

$$P_{wj} = K_w \cdot (S_t \cdot f \cdot B_{\max}^2)^2 \cdot m_j \cdot K_{wj} \cdot 10^2 \quad (\text{II.78})$$

On remarque ainsi, que pour minimiser les pertes par courants de Foucault, il faut non seulement réduire l'épaisseur des tôles, mais tenir compte aussi du travail des tôles et des contraintes mécaniques. Il faut réduire aussi l'épaisseur de la culasse statorique sans atteindre une grande saturation.

d) Pertes dans les dents

Les pertes par Hystérésis dans la zone dentaire statorique des machines électriques sont égales à:

$$P_{hz} = K_H \cdot f \cdot B^2 \cdot m_z \cdot 10^{-2} \quad (\text{II.79})$$

Les pertes par courants de Foucault dans les dents s'écrivent:

$$P_{wz} = K_w \cdot (s_t \cdot f \cdot B)^2 \cdot m_z \cdot 10^2 \quad (\text{II.80})$$

II.1.4.6.3. Pertes superficielles par pulsation du flux dans les dents

Les pertes superficielles par pulsation du flux dans les dents sont faibles dans les petites machines à faible puissance. Elles dépendent de l'ouverture d'encoche des deux parties de la machine et sont estimées à 0,5% de P_u .

II.2. Application à la machine

Après avoir exposé la méthode de conception et d'identification géométrique d'une machine asynchrone à cage. Cette méthodologie est appliquée sur une machine expérimentale dont les caractéristiques sont données sur le Tableau (II.2):

| Cahier de charge | Symbole | Unité | Grandeurs |
|----------------------------|---------|--------|-----------|
| Puissance utile | p_u | KW | 5 |
| Tension nominale | V_n | V | 380 |
| Fréquence | f | Hz | 50 |
| Vitesse de rotation | n_n | tr/min | 1440 |
| Poids | m | kg | 50 |
| Courant absorbé | I_l | A | 5.795 |

Tableau II.2 : Plaque signalétique de la machine étudiée.

II.2.1. Programme de conception développé

Selon la structure de la **figure (II.1)**, un programme sous Matlab a été développé. La première étape du programme de conception consiste à définir le cahier des charges en déterminant les différents points de fonctionnements.

Le choix de la structure de la machine dépend du cahier des charges et de l'application à laquelle est destinée cette machine. On calcul les dimensions géométriques de la machine

à l'aide des lois de conservation du flux dans différentes parties en utilisant des équations analytiques.

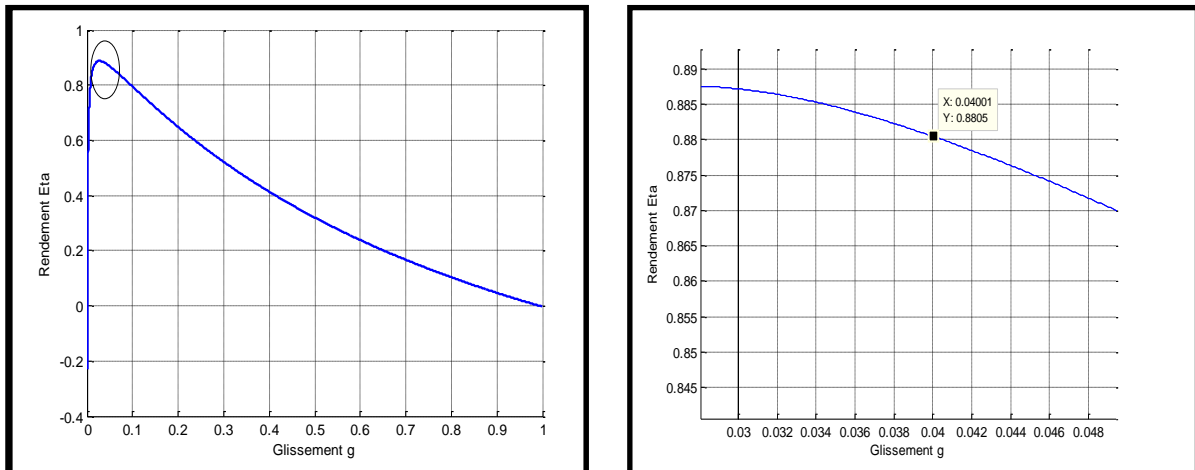
Généralement, la méthode de conception est un processus itératif qui sert à comparer les différentes solutions possibles. Dans la deuxième étape on estime le niveau de saturation des circuits magnétiques du moteur et les inductions dans les différentes parties pour calculer les pertes fer et les pertes par effet Joule.

Ensuite les paramètres du schéma équivalent sont calculés. Ceci permet d'obtenir le couple que le moteur peut fournir et le courant qu'il peut absorber. Enfin on peut ainsi évaluer le rendement dans toutes les conditions de fonctionnement. L'exécution du programme développé permet d'obtenir le fichier de résultats (**Annexe A**)

II.3. Étude des performances de la machine étudiée

II.3.1. Analyse statique (AS)

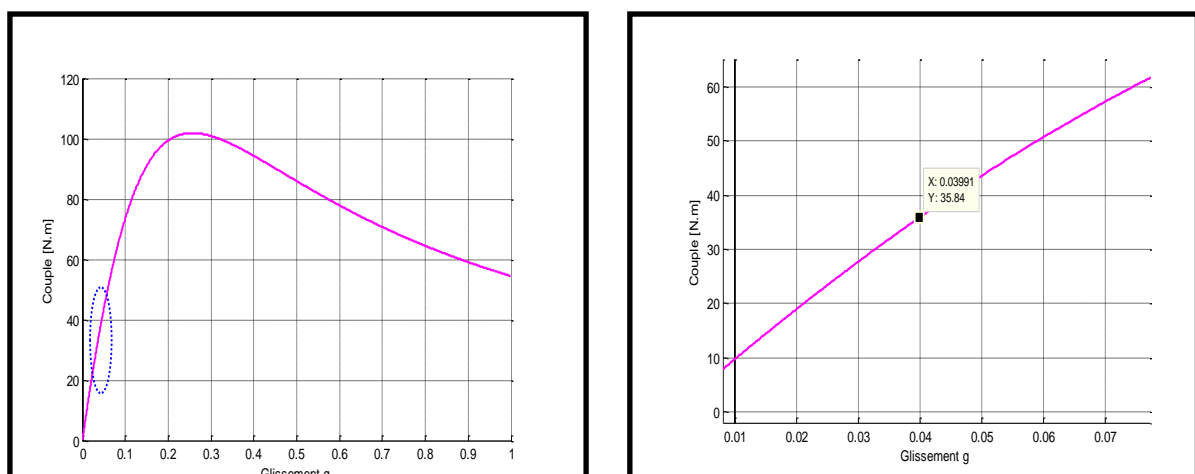
Après l'affichage des résultats du programme précédemment on utilise ces derniers ainsi que le schéma équivalent du MAS à fuites ramenée au stator, on peut dresser les différentes caractéristiques de notre machine qui sont illustrées par les courbes ci-dessous.



a. Rendement en fonction du glissement.

b. Zoom au voisinage du point nominal.

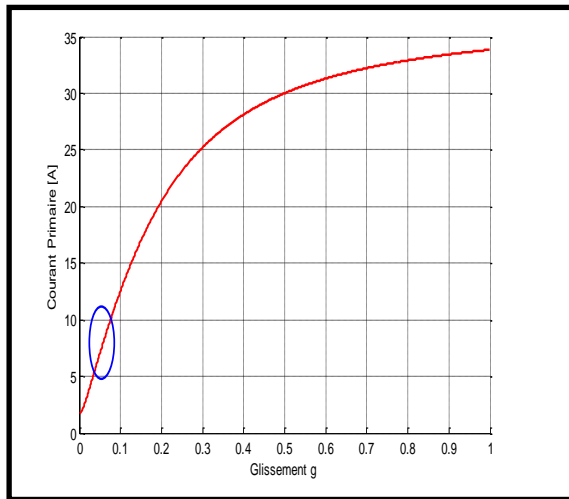
Figure II.2: Caractéristique du rendement en fonction du glissement.



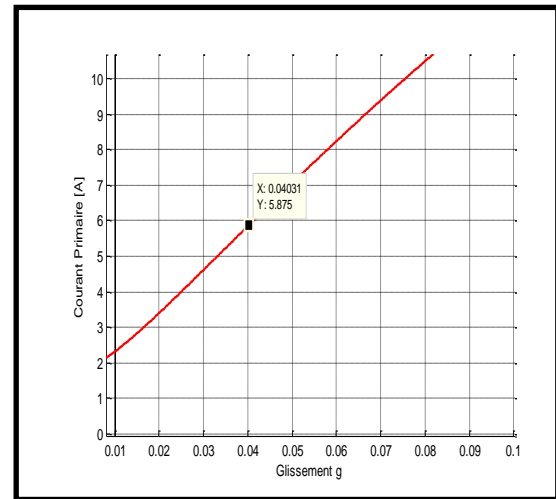
a. Couple en fonction du glissement.

b. Zoom au voisinage du point nominal.

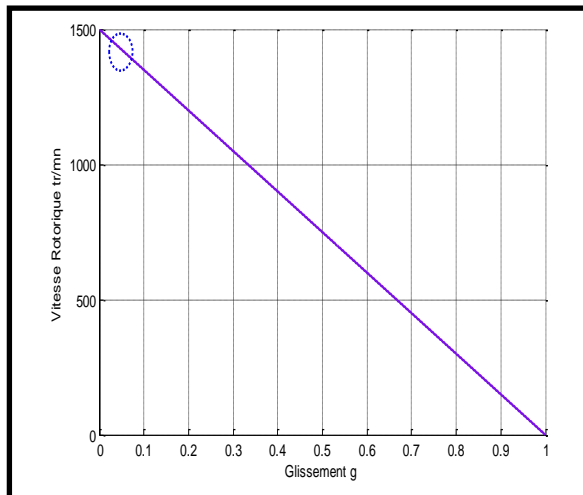
Figure II.3: Caractéristique du couple en fonction du glissement.



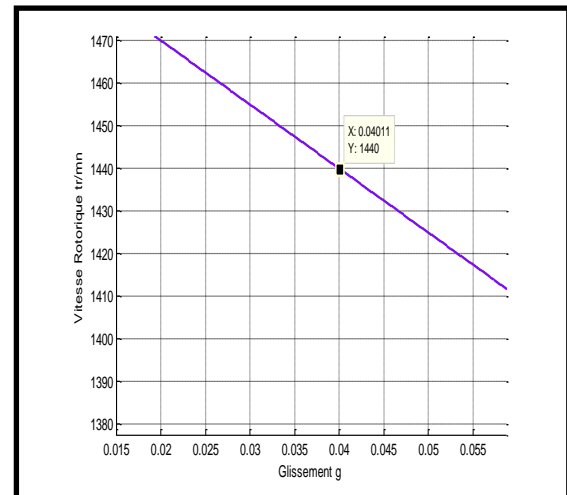
a. Courant primaire en fonction du glissement.



b. Zoom au voisinage du point nominal.

Figure II.4: Caractéristique du courant primaire en fonction du glissement.

a. Vitesse rotorique en fonction du glissement.



b. Zoom au voisinage du point nominal.

Figure II.5: Caractéristique de la vitesse rotorique en fonction du glissement.

II.3.2. Analyse dynamique (AD)

L'étude de l'évolution des courants et de la vitesse en régime dynamique de la machine asynchrone par simulation est un autre moyen pour la validation des résultats de la conception.

Utilisant les résultats du programme de conception, ainsi que le modèle analytique de la machine asynchrone et les blocs Simulink du logiciel MATLAB de la **figure II.6**: On va vérifier le couple nominal (charge nominale), le couple de démarrage et le couple maximal.

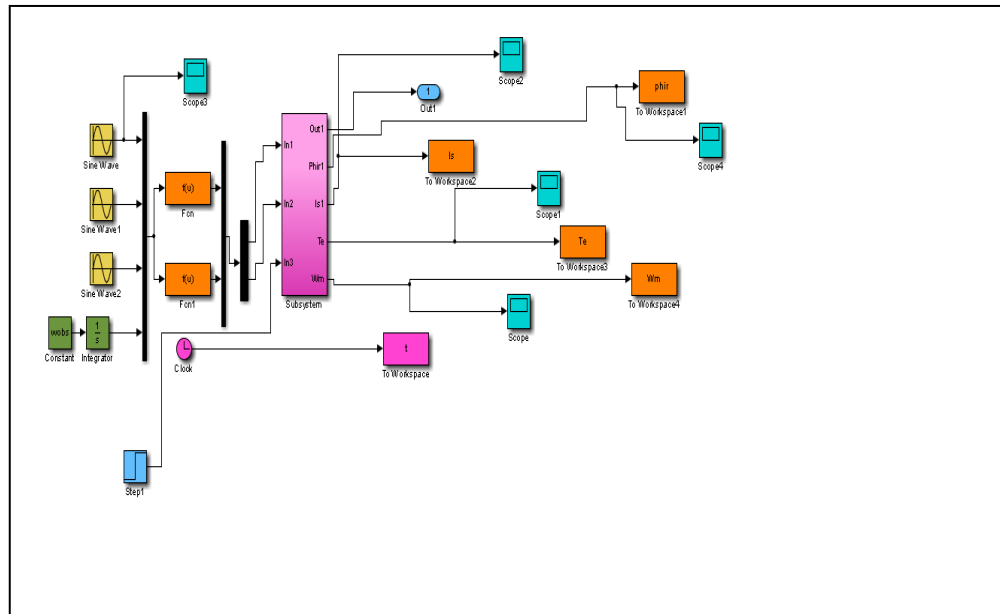


Figure II.6 : Schéma fonctionnel du banc d'essai par simulation.

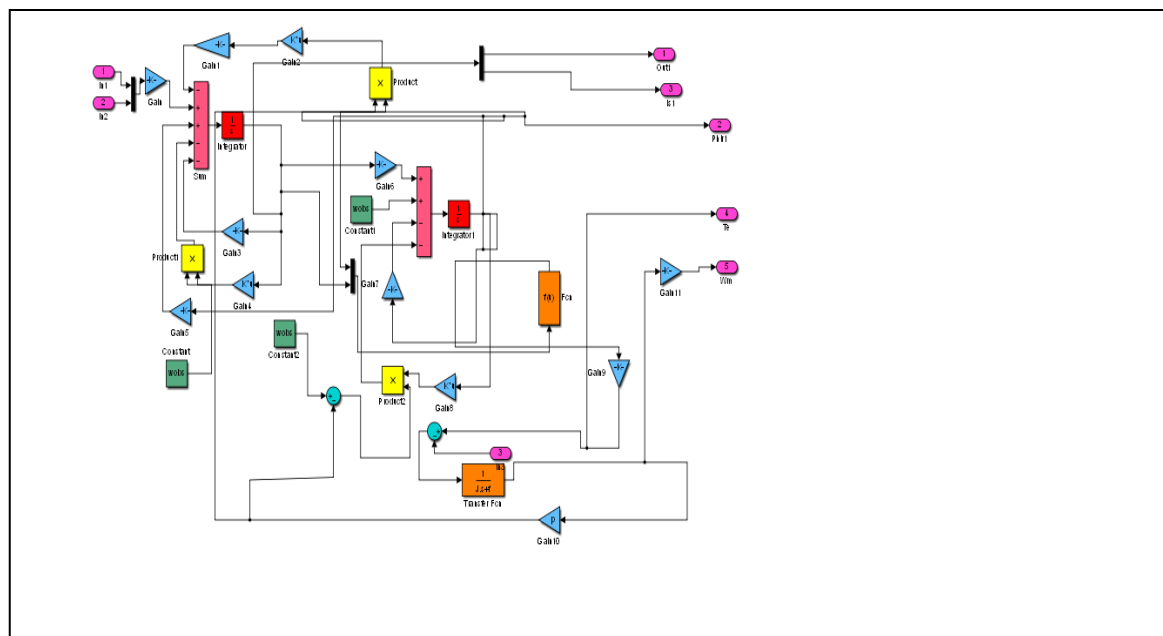
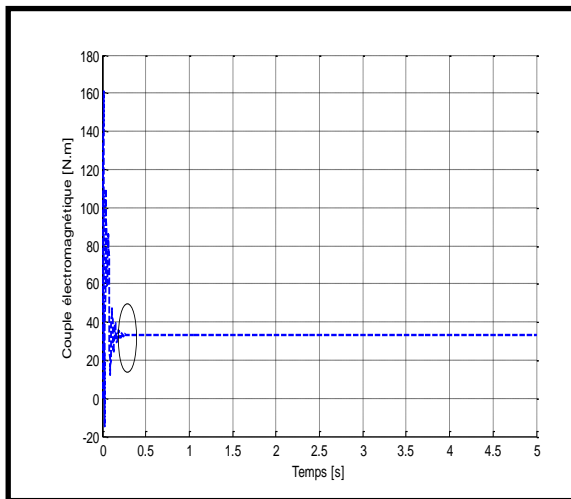
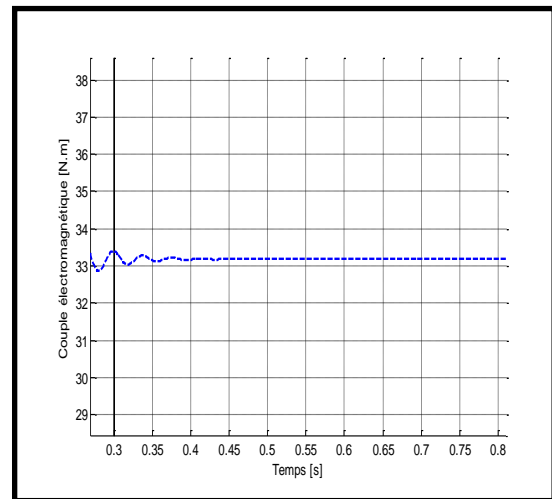
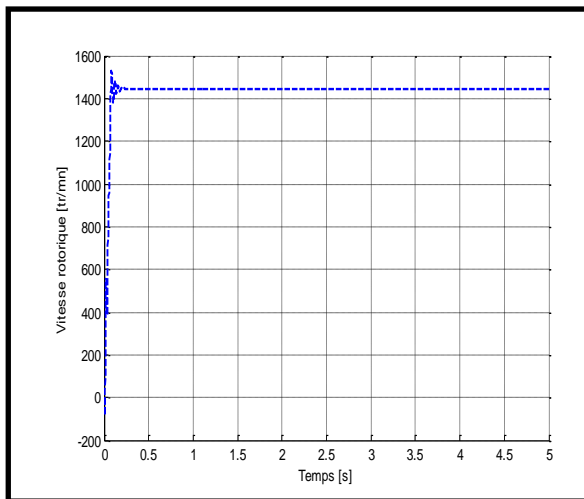


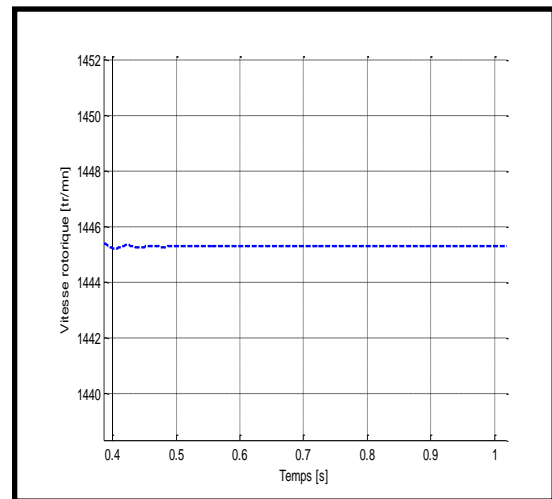
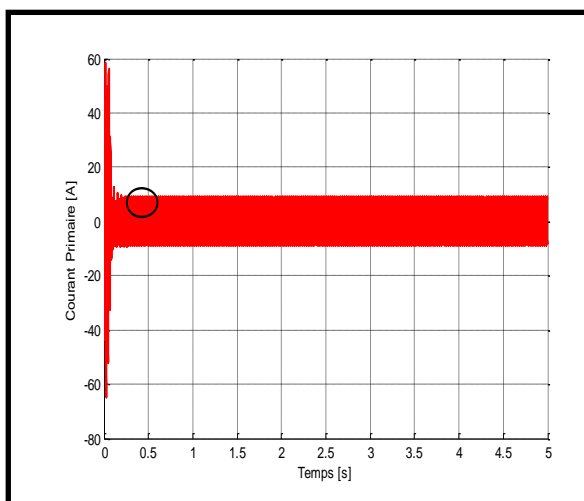
Figure II.7 : Détail du bloc subsystem

A. Test sur le couple nominal

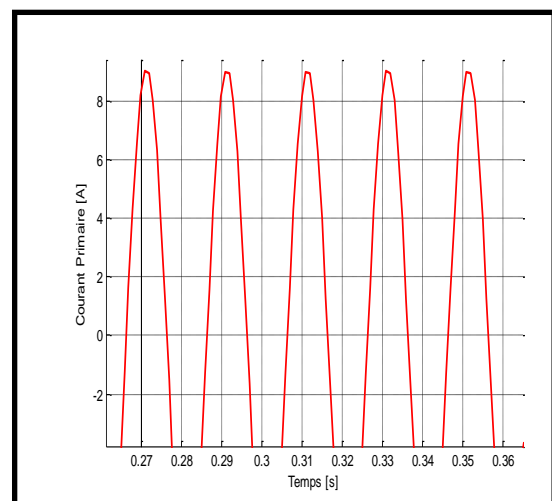
a) Couple électromagnétique en fonction du temps.

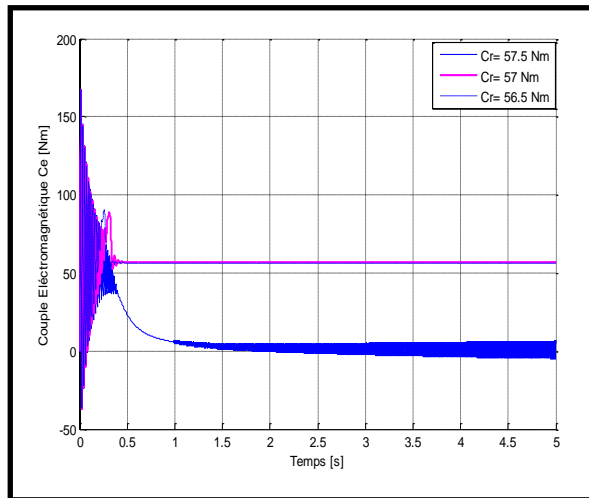
b) Zoom $C_e = f(t)$.

c) Vitesse rotorique en fonction du temps.

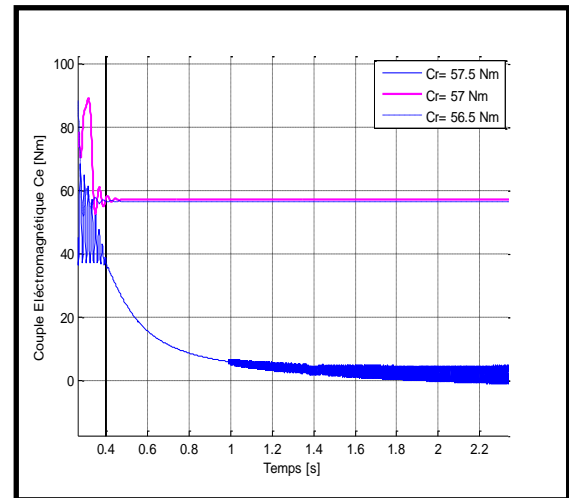
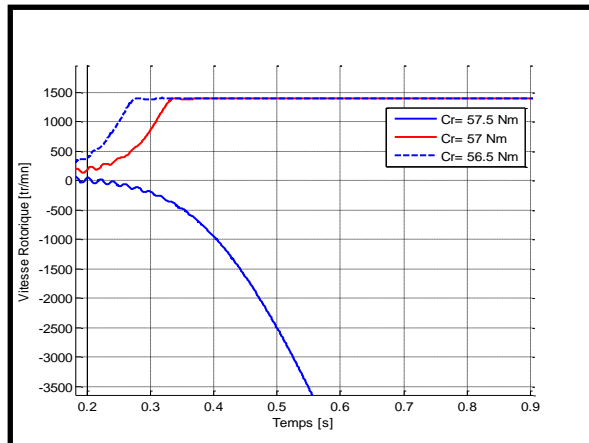
d) Zoom $N_r = f(t)$.

e) Courant primaire en fonction du temps

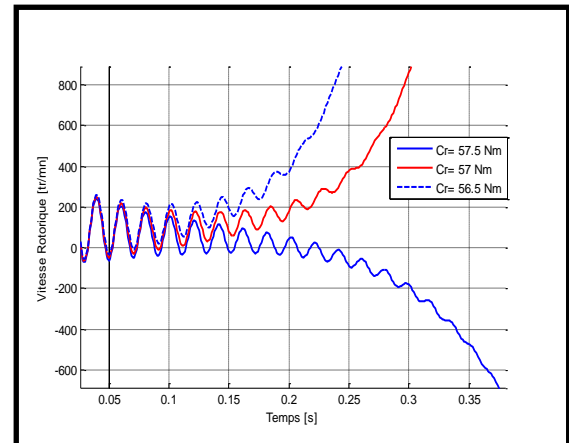
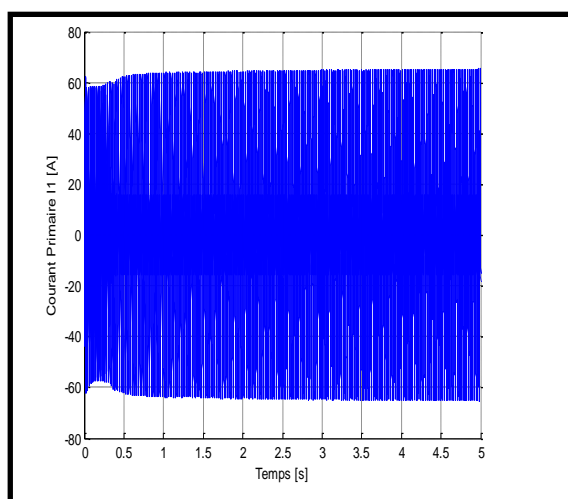
f) Zoom $I_1 = f(t)$.**Figure II.8:** Résultats de la simulation de la machine pour le test sur le couple nominal.

B. Test sur le couple de démarrage

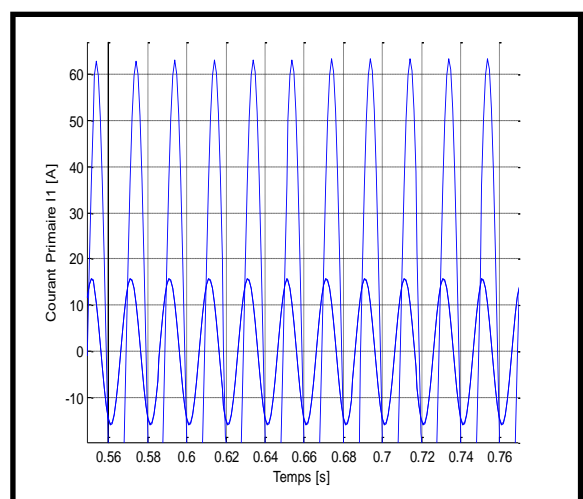
a) Couple électromagnétique en fonction du temps.

b) Zoom $C_e = f(t)$.

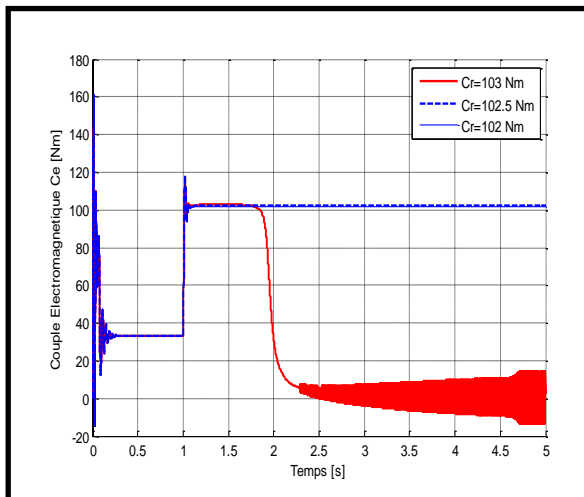
c) Vitesse rotorique en fonction du temps.

d) Zoom $N_r = f(t)$.

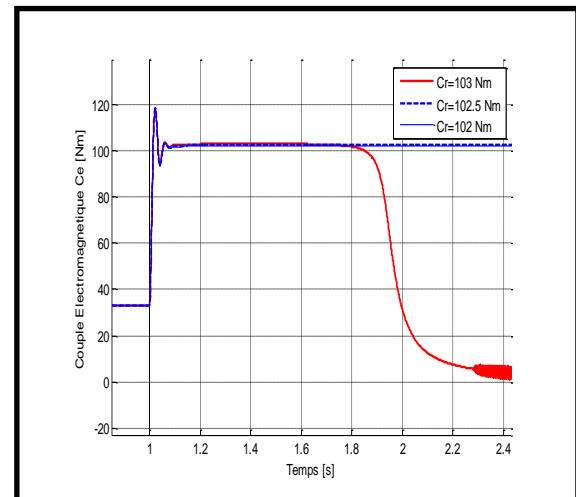
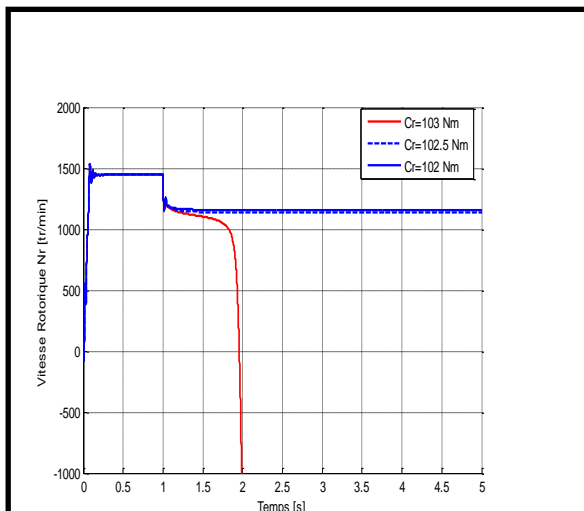
e) Courant primaire en fonction du temps

f) Zoom $I_1 = f(t)$.**Figure II.9:** Résultats de la simulation de la machine pour le test sur le couple de démarrage

C. Test sur le couple maximale



a) Couple électromagnétique en fonction du temps.

b) Zoom $C_e = f(t)$.

c) Vitesse rotorique en fonction du temps.

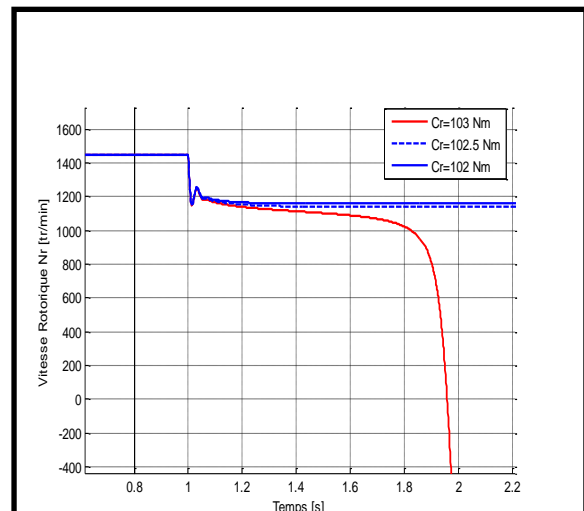
d) Zoom $N_r = f(t)$.

Figure II.10: Résultats de la simulation de la machine pour le test sur le couple maximal.

II.3.3. Comparaison des résultats

| Paramètre | A.S | A.D | Program |
|--|--------|-------|---------|
| Couple électromagnétique nominal (Nm) | 35.84 | 33.01 | 33.2 |
| Vitesse rotorique nominal (tr/min) | 1440 | 1446 | 1440 |
| Courant nominal (A) | 5.875 | 8.96 | 8.18 |
| Couple électromagnétique de démarrage (Nm) | 54,5 | 57,5 | 53.7482 |
| Couple électromagnétique maximal (Nm) | 101.84 | 103 | ----- |

Tableau II.3 : Tableau comparatif.

II.4 Conception optimisée

La combinaison d'une conception assistée par ordinateur, des techniques d'optimisation constitue un outil important, en particulier dans l'ingénierie des processus de conception des performances élevées et des systèmes coûteux. Dans le domaine des machines électriques, en raison de la complexité des fonctions décrivant leurs performances, le problème d'optimisation de ces machines est un système non linéaire multi variables limitées, souvent réduite aux techniques de résolution mathématiques auxquelles sont attribués par la suite les échecs rencontrés. Or, comme pour la plupart des problèmes quel 'ingénieur est amené à résoudre, l'optimisation doit faire l'objet d'une démarche systématique qui comporte les phases récapitulées dans la **Figure II.1**, [19].

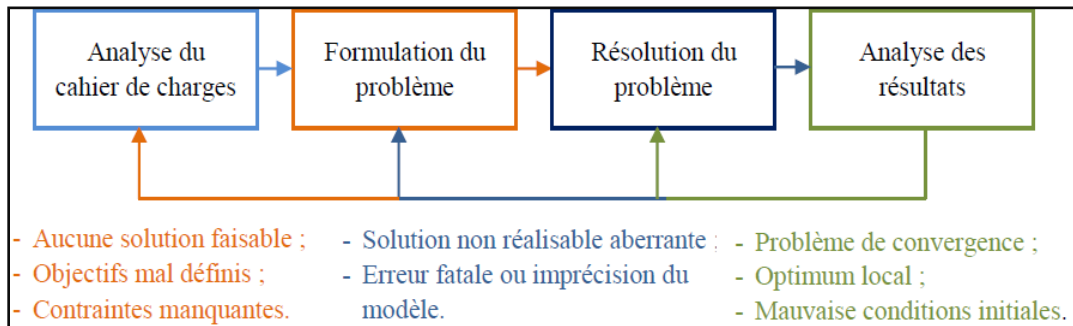


Figure II.11: Démarche de résolution d'un problème de conception, [19].

Le cahier de charges, définit en amont, exprime les besoins des utilisateurs en termes de fonctions de service et contraintes à satisfaire.

La phase de formulation consiste à traduire le problème de conception, décrit par le cahier des charges, en un problème mathématique équivalent. C'est l'étape la plus délicate du processus de conception car, là aussi, la formulation d'un problème n'est jamais unique, en particulier la définition des fonctions caractérisant les performances du système. Elle consiste à définir de façon précise ; La fonction objective, les paramètres de conception, les éventuelles contraintes liées à la fabrication ou à l'utilisation du dispositif et donc exprimées dans le cahier des charges. La recherche de l'optimum d'un problème (Ex. maximisation du rendement d'un moteur à induction) est réalisée à l'aide de méthodes d'optimisation. Une fois le problème résolu, il est impératif d'évaluer la qualité de la solution et en cas d'échec de s'interroger sur les choix adoptés lors des phases précédentes. On attribue souvent l'échec de l'optimisation à la méthode de recherche employée pour la localisation de l'optimum ou à la sensibilité des paramètres de cette méthode alors que le problème est peut-être mal formulé.

II.4.1. Synthèse des méthodes d'optimisation

L'optimisation est une branche des mathématiques et ensemble de techniques permettant de trouver les valeurs des variables qui rendent optimale une fonction de réponse, appelée aussi fonction objectif. Sur le plan mathématique, cela correspond à la recherche des extrémums de fonctions à plusieurs variables (ou seul variable), selon certains critères prédéfinis. Dans le domaine des sciences appliquées, il s'agit en général de trouver l'optimum de la réponse d'opérations industrielles ou d'expériences de laboratoire, [20].

Une fonction objective peut être :

- ✓ Le rendement d'une opération (maximum) ;
- ✓ La pureté d'un produit (maximum) ;
- ✓ La concentration en un produit (maximum ou minimum suivant qu'il s'agit du produit attendu ou d'une impureté indésirable) ;
- ✓ Le coût d'une opération (minimum) ;
- ✓ L'efficacité d'une séparation (maximum), en chromatographie par exemple.

Il existe de très nombreuses méthodes d'optimisation. La plupart d'entre elles ont été créées pour traiter le problème mathématique consistant à trouver l'extrémum de fonctions multi variables, non linéaires et soumises, ou non, à des contraintes. Certaines techniques ont été étudiées dans le but de donner aux expérimentateurs une possibilité rationnelle de déterminer les optimums de fonctionnement de leurs systèmes physiques

Les méthodes d'optimisation sont classées, selon le mode de recherche de l'optimum, en deux grands groupes : les méthodes déterministes et les méthodes stochastiques.

II.4.2. Algorithmes d'optimisation déterministes

Ces algorithmes n'utilisent aucun concept stochastique, requièrent des hypothèses sur la fonction f à optimiser, telles que : f est continue et dérivable en tout point du domaine S des solutions, ou f possède une constante de Lipchitz L . Les méthodes déterministes se divisent en Deux classes principales : les méthodes d'exploration directe et les méthodes d'exploration indirecte. Les méthodes indirectes cherchent à atteindre les extrema locaux en résolvant les systèmes d'équations, souvent non linéaires, obtenus en annulant le vecteur gradient de la fonction étudiée. La recherche d'un extremum hypothétique commence par la restriction de l'espace de recherche aux points de pente nulle dans toutes les directions. Les méthodes d'exploration directes recherchent les optima

locaux en se déplaçant dans une direction qui dépend du gradient de la fonction. Pour trouver un minimum local, on peut emprunter la direction de la plus forte pente, [21].

Il existe plusieurs algorithmes d'optimisation déterministes, plus ou moins élaborées, convergeant plus ou moins rapidement et tenant compte ou non des contraintes. On présentera dans ce qui suit ceux les plus utilisés, [22].

II.4.2.1. Méthode du gradient

La méthode du gradient fait partie d'une grande classe de méthodes numériques appelées méthodes de descente. Le principe de base de ces méthodes consiste à minimiser une fonction à plusieurs variables, en se donnant un point de départ arbitraire dit solution initiale. Ensuite, on calcule l'itéré suivant de telle sorte à se rapprocher du minimum de la fonction. On cherche une direction de descente suivant laquelle si on incrémente (ou on décrément) la solution initiale (avec un pas de descente), la fonction objectif décroît. Le pas de descente peut être fixe ou variable, donnant naissance à une multitude de variantes de la méthode de descente. Une idée naturelle pour trouver une direction de descente est d'incrémenter la solution courante dans le sens inverse du gradient de la fonction. Cette méthode du gradient a pour avantage d'être très facile à mettre en œuvre, mais malheureusement, les conditions de convergence sont assez lourdes et cette méthode est en général assez lente.

On utilise le plus souvent la méthode du gradient à pas constant. Toutefois, on peut faire varier le pas à chaque itération : on obtient alors la méthode du gradient à pas variable ou adaptatif. La méthode du gradient à pas optimal propose un choix de pas qui rend la fonction objectif minimale le long de la direction de descente choisie. Plusieurs techniques ont été proposées pour accélérer la descente, on cite la méthode de la plus grande pente (steepest descente) et la méthode de recherche de la ligne de descente (search line strategy) associée à la condition d'Armijo. D'autres méthodes ont été proposées pour rendre la descente plus sûre en limitant le pas de descente dans une région de confiance (trust région méthode). Cela garantit la robustesse du processus itératif par rapport à la solution de départ.

II.4.2.2. Méthode de gradient conjugué

La méthode du gradient conjugué appartient aux méthodes de résolution des problèmes de programmation non linéaires de type SQP (cas d'une fonction objectif quadratique). Dans ce cas particulier, cela revient à résoudre un système d'équations

linéaires de la forme: $AX = B$. Elle est inspirée de la méthode du gradient. En effet, les directions de descente ne sont plus celles du gradient, mais elles sont orthogonales (ou conjuguées) pour que la convergence soit rapide. Théoriquement, la méthode du gradient conjugué trouve le minimum d'une fonction objectif quadratique, en (n) itérations au plus où (n) est l'ordre de la matrice A qui est symétrique et semi définie positive. Cette méthode est très stable même pour des matrices mal conditionnées (dans ce cas des méthodes de pré conditionnement de la matrice ont été proposées). Cet algorithme peut être généralisé pour les fonctions objectives, non linéaires et non quadratiques. La justification est simple : Au voisinage d'un optimum local, une grande variété de fonctions non linéaires peuvent être approximées par une forme quadratique. Mais dans ces conditions, on aura à calculer ou approximer la matrice Hessienne (H) à chaque itération, [23].

II.4.2.3. Méthodes énumératives

Elles sont de principe simple ; dans un espace de recherche fini, ou infini mais discrétisé, un algorithme énumératif évalue la valeur de la fonction à optimiser en chaque point de l'espace solution. L'utilisation d'un tel algorithme est intéressante lorsque le nombre de points n'est pas très important. Mais en pratique beaucoup d'espaces de recherche sont trop vastes pour que l'on puisse explorer toutes les solutions une par une et tirer une information utilisable.

Ces méthodes présentent deux inconvénients majeurs :

- a) Elles sont inadaptées aux problèmes de grande dimension ;
- b) Elles ne sont pas guidées par un raisonnement ou un processus intelligent, qui conduit la recherche vers des sous-espaces, susceptible de contenir une bonne solution, sans balayer tout l'espace des solutions, [24].

II.4.2.4. Méthode de simplexe ou de Nelder-Mead

C'est une méthode d'optimisation locale qui est fréquemment utilisée. Cette méthode déterministe est dite "directe" : Elle tente de résoudre le problème en utilisant directement la valeur de la fonction objectif, sans faire appel à ses dérivées. Cette méthode est surtout appréciée pour sa robustesse, sa simplicité de programmation, sa faible consommation de mémoire (peu de variables) et son faible temps de calcul. Cet algorithme est robuste car il est très tolérant aux bruits dans les valeurs de la fonction objective. En

conséquence, la fonction n'a pas besoin d'être calculée exactement et il est possible d'avoir recours à une approximation de la valeur de la fonction, [23].

II.4.2.5. Méthode de relaxation de Rosenbrock

La méthode de relaxation de Rosenbrock permet de ramener un problème de minimisation plusieurs variables à une résolution successive de (n) problèmes de minimisation à une seule variable chacun, à chaque itération. Si on cherche à minimiser une fonction objectif à (n) variables à l'itération $k+1$, on fixe toutes les composantes de l'itéré X_K sauf la première et on minimise la fonction objectif par rapport à cette première composante, en utilisant la méthode de Newton par exemple. On recommence ensuite la même procédure pour minimiser la fonction objective, par rapport à la deuxième composante et ainsi de suite. On exécute ainsi plusieurs itérations jusqu'à ce qu'un critère de convergence soit vérifié. L'utilisation de cette méthode n'aboutit pas forcément à l'optimum local, [24].

II.4.2.6. Méthode complexe

Cette technique d'optimisation est une variante de la méthode simplex exposée précédemment. Elle consiste à manipuler un ensemble de solutions du problème à optimiser, chacune représente un point dans l'espace d'exploration. Typiquement, on choisit au début de façon aléatoire, un nombre de solutions égal au double du nombre des paramètres à optimiser, [25]. L'idée principale de cette méthode est de remplacer le point le plus mauvais par un nouveau point. Celui-ci est la réflexion du point le plus mauvais par rapport au barycentre du reste des points. La solution optimale est établie lorsque tous les points sont pratiquement confondus à une précision près.

II.4.2.7. Méthodes de Newton et quasi-Newton

Pour optimiser sur R^n une fonction $f : R^n \rightarrow R$ suffisamment régulière (disons de classe C^2), et sous les bonnes hypothèses, il suffit de trouver un zéro de sa dérivée f' : La méthode de Newton est alors indiquée. Il peut être intéressant d'utiliser aussi les spécificités du problème. La méthode de Newton adaptée à l'optimisation est alors légèrement différente de la méthode de Newton connue.

Les méthodes de Quasi-Newton sont élaborées pour l'optimisation, et pour pallier aux inconvénients de la méthode de Newton : la fonction f'' n'est pas nécessairement connue, peut être très chère à calculer, et $f''(x_K)$ peut être très difficile à inverser. On remplace

alors $f'(x_K)$ par une matrice H_K , éventuellement constante, qui est censée approcher f'' ou bien son inverse $f''(X_K)^{-1}$, [26, 27].

II.4.3. Algorithmes d'optimisation stochastiques

Les méthodes stochastiques sont basées sur une approche en partie ou entièrement guidée par un processus stochastique. Contrairement aux méthodes déterministes, leur convergence n'est pas garantie, ou, dans le meilleur des cas, elle est garantie de manière asymptotique (c'est-à-dire pour un nombre infini d'itérations). La méthode stochastique la plus simple est l'échantillonnage aléatoire (ou méthode de Monte-Carlo) qui consiste à évaluer des points engendrés de façon aléatoire et à conserver le meilleur. Son avantage est d'être simple et très facile à implémenter, mais elle présente un sérieux inconvénient : elle n'est pas efficace, et exige souvent un nombre élevé d'itérations pour donner une solution acceptable. Parmi les différentes méthodes stochastiques d'optimisation globale, nous allons nous intéresser aux méthodes heuristiques (ou méthodes approchées). Contrairement aux méthodes dites exactes, ces heuristiques ne procurent pas forcément une solution optimale, mais seulement une bonne solution en fonction du temps disponible. Une méthode heuristique peut être conçue pour résoudre un type de problème donné, ou bien comme une méthode générale applicable à divers problèmes d'optimisation. Dans le second cas, elle est désignée sous le terme de métaheuristique. Cette définition d'une métaheuristique est celle adoptée par le « métaheuristique Network » « A métaheuristique is a set of concepts that can be used to define heuristic methods that can be applied to a wide set of different problems ». Cependant, étant donnée la grande diversité de techniques et concepts utilisés par les métaheuristique, il n'existe jusqu'ici aucune définition communément acceptée, [23].

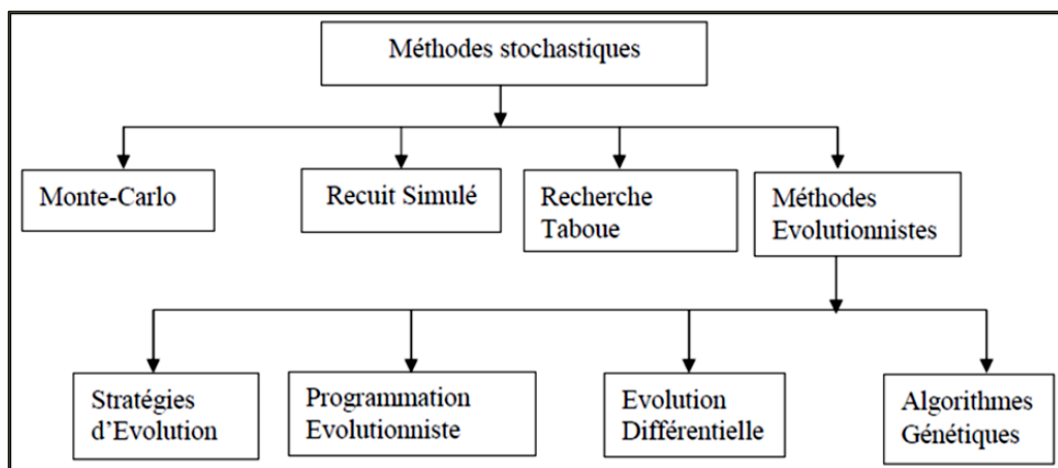


Figure II.12 : Méthodes d'optimisation stochastiques, [23].

II.4.3.1. Méthode de Monte-Carlo

On appelle méthode de Monte-Carlo toute méthode visant à calculer une valeur numérique, et utilisant des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes. Le nom de ces méthodes, qui fait allusion aux jeux de hasard pratiqués à Monte-Carlo, a été inventé en 1947 par Nicholas Metropolis, et publié pour la première fois en 1949 dans un article co-écrit avec Stanislas U_{1am} . Les méthodes de Monte-Carlo sont particulièrement utilisées pour calculer des intégrales en dimensions plus grandes que 1 (en particulier pour calculer des surfaces des volumes, etc.).

C'est la plus simple des méthodes stochastiques. Elle consiste à tirer à chaque itération une solution au hasard. La fonction objective f est évaluée en ce point. La nouvelle valeur est comparée à la précédente. Si elle est meilleure que la précédente, cette valeur est enregistrée, ainsi que la solution correspondante, et le processus continu. Si non on repart du point précédent et on recommence le procédé, jusqu'à ce que les conditions d'arrêt soient atteintes, [28,29].

II.4.3.2. Méthode de recherche Tabou

La recherche avec tabou a été proposée par Fred Glover en 1986. Depuis cette date, la méthode est devenue très populaire, grâce aux succès qu'elle a remportés pour résoudre de nombreux problèmes. Le but de cette méthode est d'inculquer aux méthodes de recherche locale un surcroît d'intelligence. L'idée ici est d'ajouter au processus de recherche une mémoire qui permette de mener une recherche plus « intelligente » dans l'espace des solutions. Comme l'algorithme de recuit simulé, la méthode de recherche Tabou fonctionne avec une seule configuration courante, qui est actualisée au cours des itérations successives. La nouveauté ici est que, pour éviter le risque de retour à une configuration déjà visitée, on tient à jour une liste de mouvements interdits, appelée « liste Tabou ». Cette liste contient (m) mouvements $(t \rightarrow s)$ qui sont les inverses des (m) derniers mouvements $(s \rightarrow t)$ effectués. L'algorithme modélise ainsi une forme primaire de mémoire à court terme. Dans sa forme de base, l'algorithme de recherche tabou présente l'avantage de comporter moins de paramètres que l'algorithme de recuit simulé. Cependant, l'algorithme n'étant pas toujours performant, il est souvent approprié de lui ajouter des processus d'intensification et/ou de diversification, qui introduisent de nouveaux paramètres de contrôle.

II.4.3.3.Méthode du recuit simulé

Le recuit simulé est une procédure de recherche selon laquelle la topologie courante, retenue momentanément comme meilleure solution, est continuellement comparée à d'autres topologies qui lui sont très proches. Ces topologies voisines sont obtenues à la suite de petites perturbations sur la topologie courante. Lorsqu'une perturbation aboutit à une topologie meilleure que la solution courante, elle est sauvegardée comme solution courante. Cependant, il peut arriver que, suite à une perturbation, la topologie voisine obtenue soit conservée comme solution courante, même si elle n'est pas meilleure que la solution courante, à condition qu'elle respecte une certaine probabilité d'acceptation. Le fait d'accepter de temps à autre une solution dégradée permet d'éviter de s'enfermer trop tôt dans un minimum local. D'autre part, la probabilité d'acceptation doit être suffisamment faible, de telle sorte que l'algorithme puisse s'approcher le plus possible de l'optimum global.

En fin de compte, l'algorithme se termine lorsque le critère d'arrêt est satisfait à cette étape, la recherche locale devrait avoir abouti à un minimum local ou à un optimum global. Il s'ensuit que la solution idéale trouvée est, soit localement optimale vu le nombre élevé de minima locaux, soit globalement optimale dans le meilleur des cas, [21].

II.4.3.4. Stratégies d'évolution

Évolution des stratégies ont été développées dans les années 60 par Rechenberg (1965), Schwefel (1965) et Bienert (1967), pour résoudre des problèmes d'optimisation de la forme d'ingénierie. Leur principale différence par rapport aux précédentes approches évolutionnaires a été l'absence d'un opérateur de croisement (seule mutation et la sélection ont été utilisés). Aujourd'hui, la recherche dans les stratégies de l'évolution a été avancée principalement grâce à l'action de plusieurs groupes en Allemagne.

II.4.3.5. Méthode d'optimisation par essaim particulaires OEP

Les algorithmes d'optimisation par essaim de particules ont été introduits en 1995 par Kennedy et Eberhart comme une alternative aux algorithmes génétiques standards. Ces algorithmes sont inspirés des essaims d'insectes (ou des bancs de poissons ou des nuées d'oiseaux) et de leurs mouvements coordonnés. En effet, tout comme ces animaux se déplaçant en groupe pour trouver de la nourriture ou éviter les prédateurs, les algorithmes à essaim de particules recherchent des solutions pour un problème

d'optimisation. Les individus de l'algorithme sont appelés particules et la population est appelée essaim. Dans cet algorithme, une particule décide de son prochain mouvement en fonction de sa propre expérience, qui est dans ce cas la mémoire de la meilleure position qu'elle a rencontrée et en fonction de son meilleur voisin. Ce voisinage peut être défini spatialement en prenant par exemple la distance euclidienne entre les positions de deux particules ou socio métriquement (position dans l'essaim de l'individu). Les nouvelles vitesses et direction de la particule seront définies en fonction de trois tendances : La propension à suivre son propre chemin, sa tendance à revenir vers sa meilleure position atteinte et sa tendance à aller vers son meilleur voisin, [30].

II.4.3.6. Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) sont des techniques de recherche et d'optimisation stochastique dérivées de la génétique et des mécanismes de la sélection naturelle et de l'évolution. Leurs champs d'application sont très vastes : économie, finance, optimisation de fonctions, planification, et bien d'autres domaines.

Les premiers travaux sur les algorithmes génétiques ont été initialement développés par John Holland (1975) [31] qui, sur la base de travaux précédents, a développé les principes fondamentaux des algorithmes génétiques dans le cadre de l'optimisation mathématique.

A cette époque, l'informatique n'avait pas encore connu de développement et ses travaux n'ont pas pu être appliqués sur des problèmes réels de grande taille. La parution en 1989 de l'ouvrage de référence écrit par D.E Goldberg , qui décrit l'utilisation de ces algorithmes dans le cadre de résolution de problème concrets, a permis de mieux faire connaître ces derniers dans la communauté scientifique et a marqué le début d'un nouvel intérêt pour cette technique d'optimisation.

Les algorithmes génétiques, comme les réseaux de neurones, font partie des « Réseaux Adaptatifs Non-linéaires » (RAN) [31]. Ils sont composés d'un grand nombre d'unités élémentaires ou agents, qui sont dans notre cas des chromosomes. Ces agents traitent l'information le plus souvent de façon parallèle et distribuée. Ils interagissent entre eux d'une manière non linéaire et sans contrôle central. Si l'environnement extérieur dans lequel ils baignent est capable de leur fournir une rétroaction, alors les agents et leurs interactions sont modifiés par des « opérateurs » de telle sorte que le système global s'adapte progressivement à son environnement et améliore sa réponse. Développés pour des fins d'optimisation, les algorithmes génétiques permettent la recherche d'un extremum global [32].

L'Application des AG à la conception des contrôleurs pour l'amélioration de la stabilité des systèmes de puissance a été l'objet de plusieurs travaux [33] [34].

Les terrains d'application de ces algorithmes sont diversifiés à savoir en particulier l'identification des processus, la surveillance d'installation, la détection d'erreurs et le diagnostic, [30].

II.4.3.6.1. Description des Algorithmes Génétiques

L'algorithme génétique est organisé en plusieurs étapes et fonctionne de manière itérative. La fig. II.13 représente l'algorithme génétique le plus simple introduit par Holland [31].

Un algorithme génétique recherche le ou les extrêmes (minimum ou maximum) d'une fonction définie sur un espace de données.

L'algorithme génétique est organisé en plusieurs étapes et fonctionne de manière itérative. Celui-ci met en œuvre différents opérateurs. Mais avant, il est nécessaire de définir quelque termes de base rencontrés dans la littérature :

- Individu : solution potentielle du problème ;
- Chromosome : solution potentielle du problème sous une forme codée (forme de chaîne de caractères) ;
- Population : ensemble fini d'individus (de solution) ;
- Gène : partie élémentaire (caractère) non divisible d'un chromosome ;
- Fitness : terme anglo-saxon qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette fonction est liée à la fonction à optimiser et permet de définir le degré de performance d'un individu (donc d'une solution).

Un algorithme génétique recherche le ou les extrêmes (minimum ou maximum) d'une fonction définie sur un espace de données .pour l'utiliser, on doit disposer des six éléments suivants [11],[24] :

1. Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe a chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traite. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques. Le codage binaire a été très utilisé à l'origine. Les codages réels sont, désormais, largement utilisés, notamment dans les domaines applicatifs pour l'optimisation des problèmes à variables réelles.

2- Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individu non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.

3- Une fonction à optimiser. Celle-ci retourne une valeur appelée fitness ou fonction d'évaluation de l'individu.

4- Un mécanisme de sélection des individus candidats à l'évolution.

5- Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace d'états.

6- Des paramètres de dimensionnement : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation.

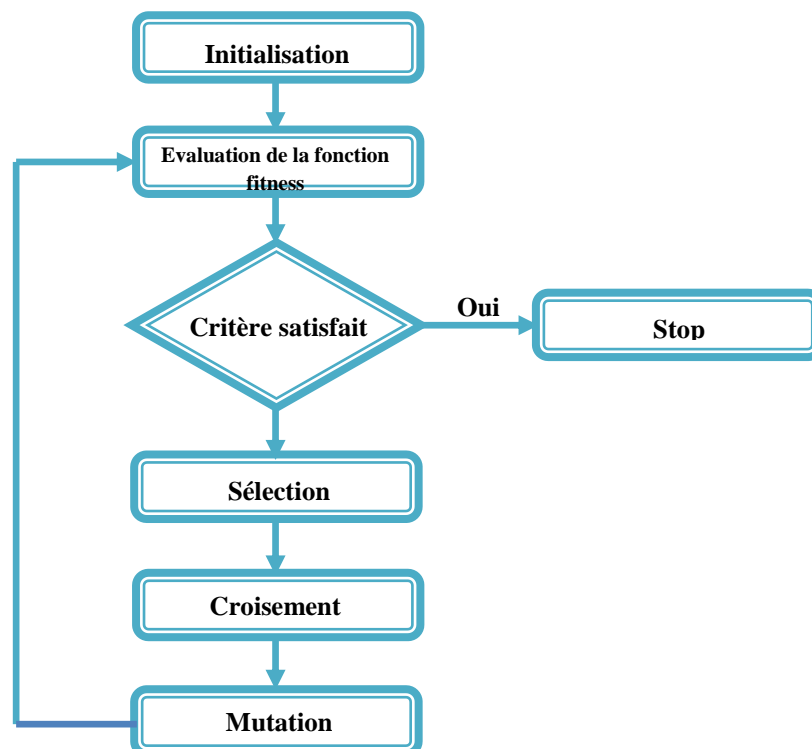


Figure II.13 : Organigramme d'un algorithme génétique simple, [24].

II.5. Conception optimisée appliquée au MHR

En utilisant la boîte à outil “ Genetic algorithm and Direct Search “ du logiciel MATLAB on peut résoudre le problème d’optimisation tel que la procédure est représentée dans la figure II.14 en mentionnant les variables de conception et les fonctions objectives.

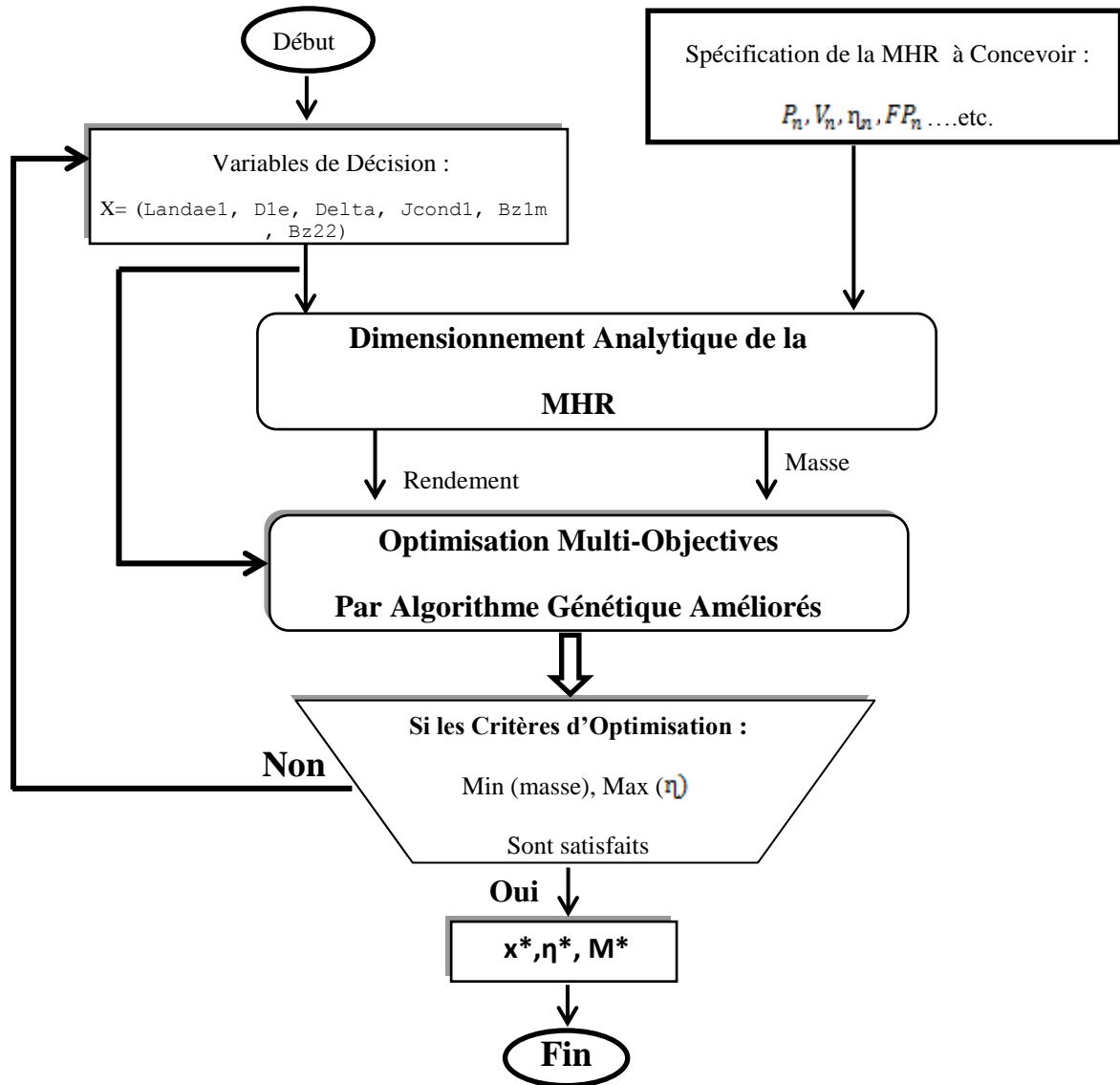


Figure. II.14 Organigramme de la méthode d’optimisation proposée

II.5.1. Variable de décision

Les variables de conception peuvent être classifiées en deux catégories :

- Variables qui représentent les spécifications de la machine à concevoir (de la plaque signalétique) dont ils sont fixes comme la puissance, la vitesse de rotation, la tension d’alimentation ... etc.

- Variables de décision ou d'optimisation x qui sont des paramètres flexibles, dont ils permettent a nous de trouver la variante optimisée avec les performances désirées sachant que :

$$X = (Landae1, D1e, Delta, Jcond1, Bz1m, Bz22)$$

Il s'agit des paramètres géométriques, magnétiques et généraux (poids) avec des limitations définies dans le tableau suivant :

| Variable de décision | Désignation | Unités | Intervalle de variation |
|--|-------------|-------------------|-------------------------|
| Rapport Géométrique | Landae1 | -- | [0.75 ÷ 1.75] |
| Diamètre d'Alésage | D1e | m | [0.14 ÷ 0.17] |
| Epaisseur d'Entrefer | Delta | mm | [0.34 ÷ 0.36] |
| Densité du Courant Statorique | Jcond1 | A/mm ² | [3e+6 ÷ 4e+6] |
| Induction dans la zone Dentaire Statorique | Bz1m | T | [1.3 ÷ 1.7] |
| Induction dans la zone Dentaire rotorique | Bz22 | T | [1.7 ÷ 1.8] |

Tableau II.4 : Paramètres d'optimisation et leurs limites.

II.5.2. Résultats

Les résultats d'application de l'algorithme génétique à l'optimisation de la conception d'un moteur de 5 kW sont présentés dans les tableaux suivants et cela pour deux exécutions.

- Première exécution**

| Variable de décision | Désignation | Unités | Première exécution |
|--|--------------------------|-------------------|--------------------|
| Facteur de Géométrie Estime Machine | Landae1 | | 1.749 |
| Détermination du Diamètre | D1e | m | 0.164 |
| Entrefer Estime | Delta | m | 0.000342 |
| Densité du Courant Statorique | Jcond1 | A/mm ² | 3 |
| Induction dans la Zone Dentaire Statorique | Bz1m | T | 1.370 |
| Induction dans la Zone Dentaire rotorique | Bz22 | T | 1.714 |
| Rendement de la Machine Optimisée | η | -- | 0.8848 |
| Poids de la Machine Optimisée | M | Kg | 50.2624 |

Tableau II.5: Résultats d'optimisation de la première exécution.

Les **figures (II.15) et (II.16)**, illustre la variation de la meilleure valeur pour la fonction objectif pour 100 itérations avec deux essais d'exécution, dont la comparaison et les valeurs obtenues pour chaque paramètre d'optimisation sont reportées dans le **tableau (II.5) et tableau (II.6)**.

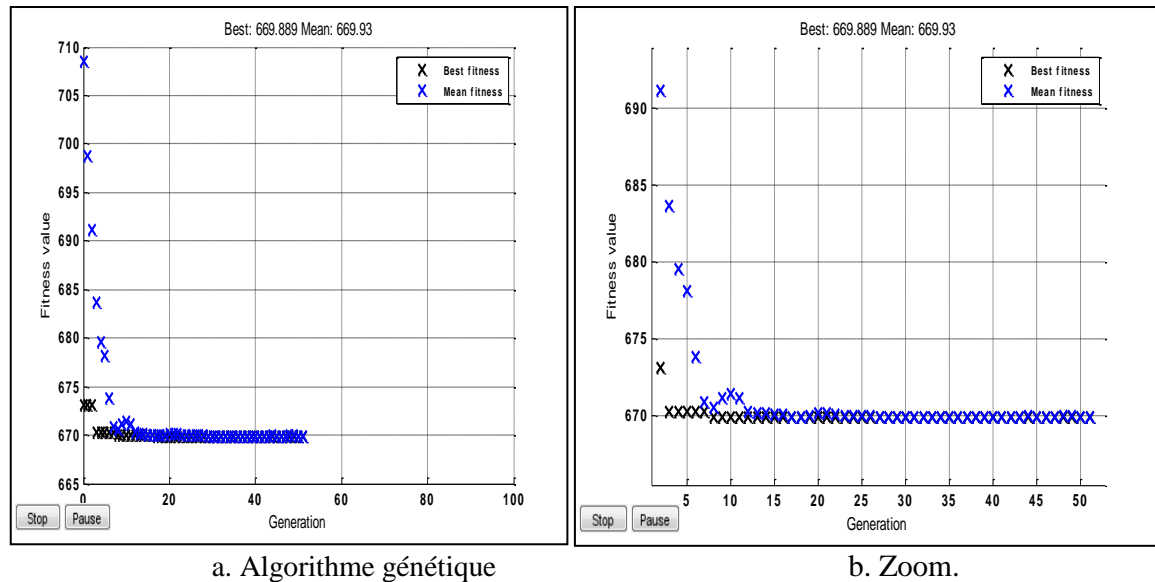
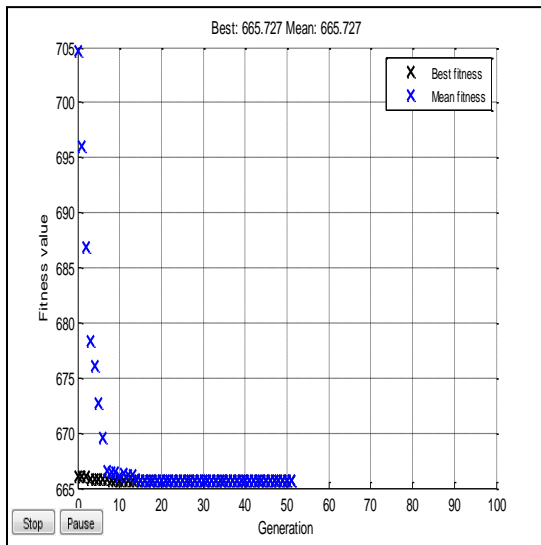


Figure II.15: Résultats d'optimisation pour la première exécution.

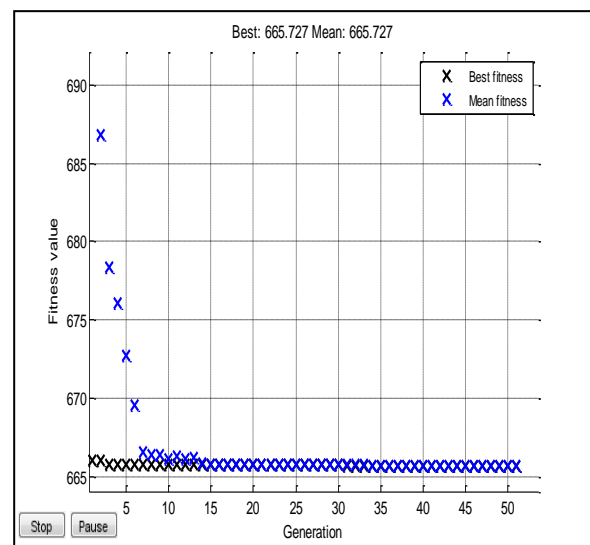
- **Deuxième exécution**

| Variable de décision | Désignation | Unités | Deuxième exécution |
|--|--------------------------|-------------------|--------------------|
| Facteur de Géométrie Estime Machine | Landae1 | -- | 0.8525 |
| Détermination du Diamètre | D1e | m | 1.4000 |
| Entrefer Estime | Delta | m | 0.000348 |
| Densité du Courant Statorique | Jcond1 | A/mm ² | 3 |
| Induction dans la Zone Dentaire Statorique | Bz1m | T | 1.30027 |
| Induction dans la Zone Dentaire rotorique | Bz22 | T | 1.715260 |
| Rendement de la Machine Optimisée | η | -- | 0.8848 |
| Poids de la Machine Optimisée | M | Kg | 50.2624 |

Tableau II.6: Résultats d'optimisation de la deuxième exécution.



a. Algorithme génétique



b. Zoom.

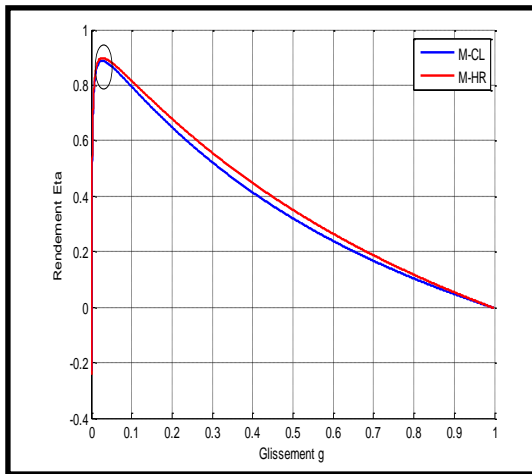
Figure II.16: Résultats d'optimisation pour la Deuxième exécution.

II.5.3. Résultats du programme de conception optimisée

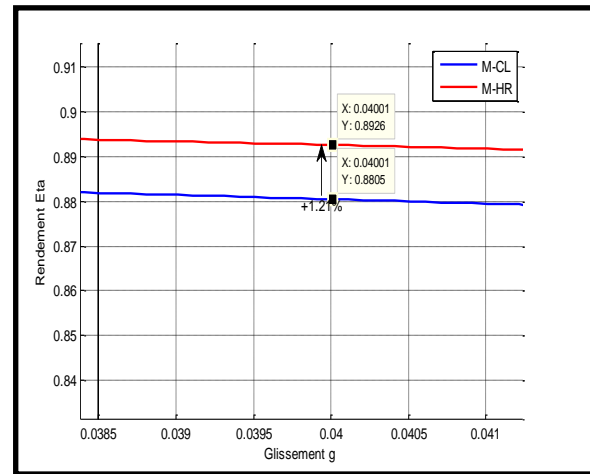
L'exécution du programme de conception optimisée développé permet d'obtenir le fichier de résultats (**Annexe A**)

II.5.4. Étude des performances de la machine optimisée

II.5.4.1. Analyse statique

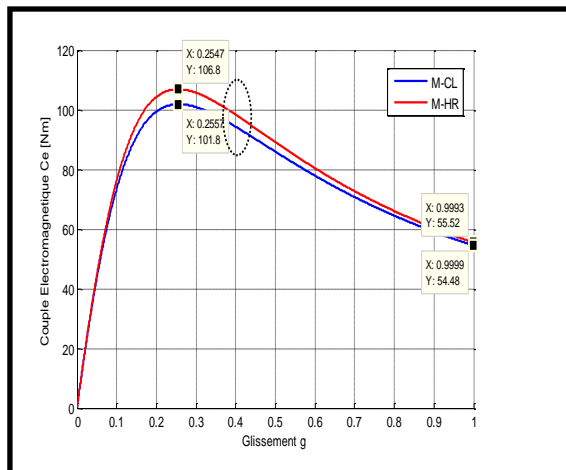


a. Rendement en fonction du glissement.

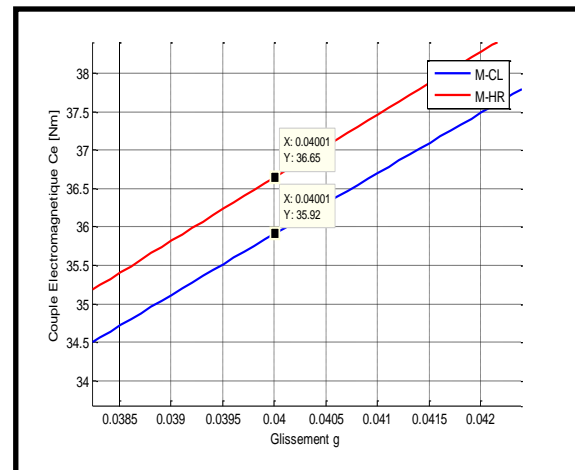


b. Zoom au voisinage du point nominal.

Figure II.17: Caractéristique du rendement en fonction du glissement.

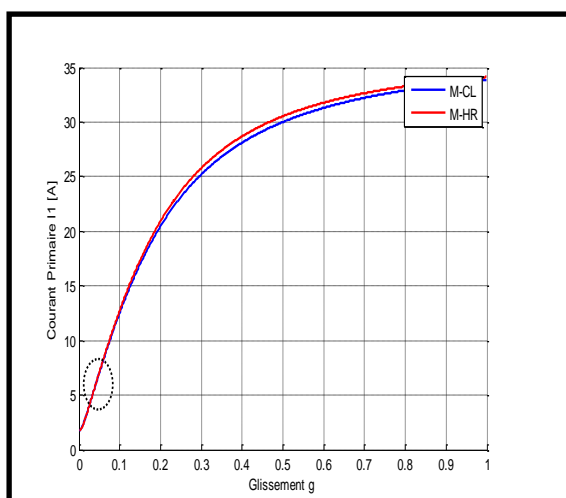


a. Couple en fonction du glissement.

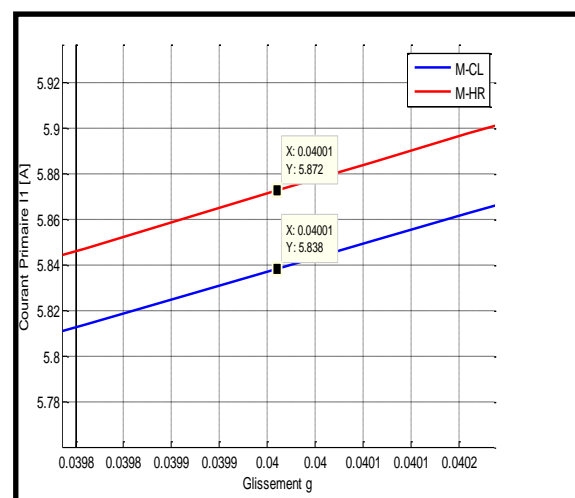


b. Zoom au voisinage du point nominal.

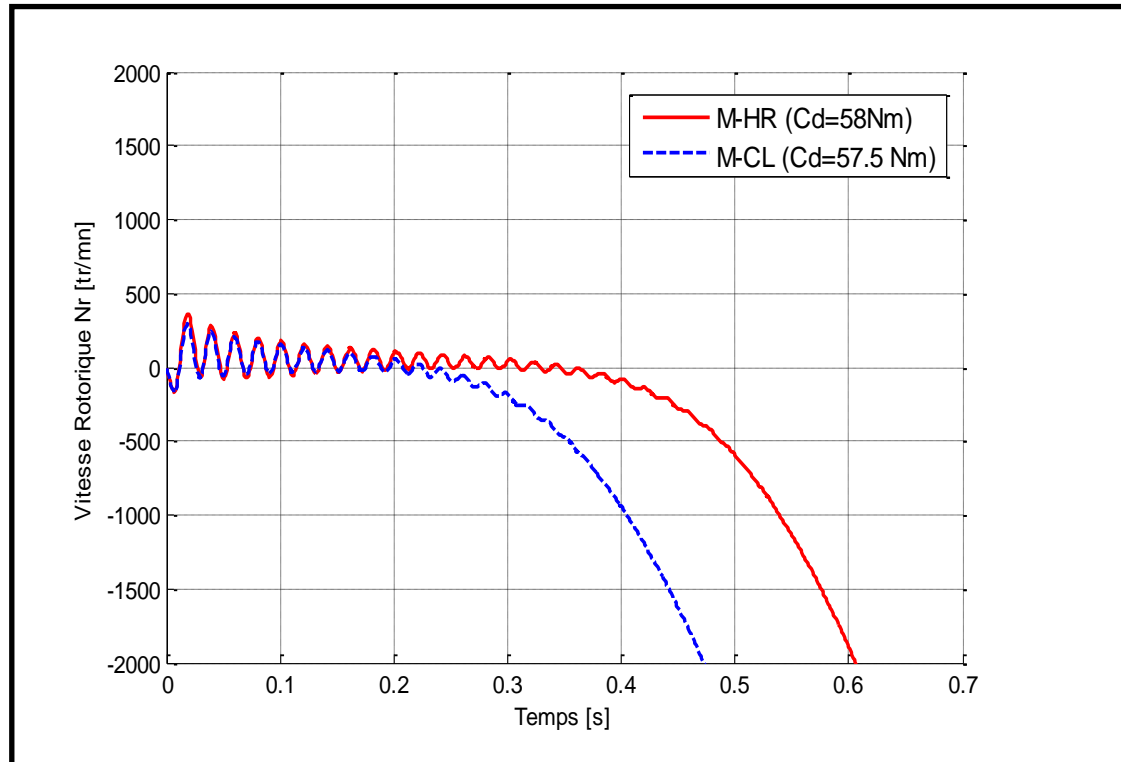
Figure II.18: Caractéristique de couple en fonction du glissement.



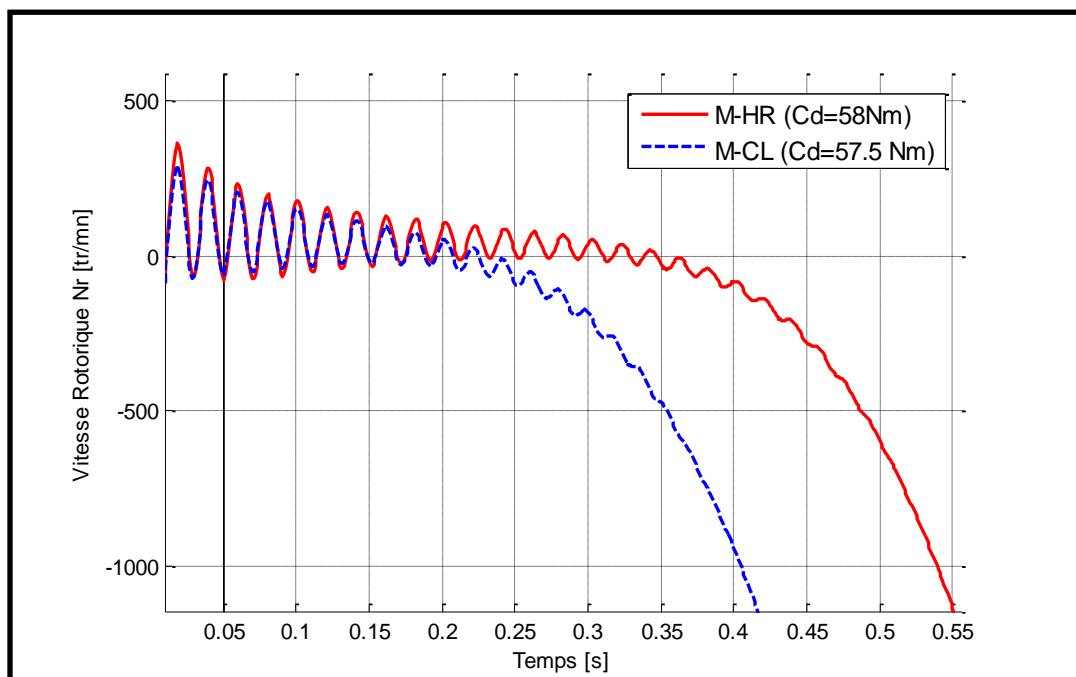
a. Courant primaire en fonction du glissement.

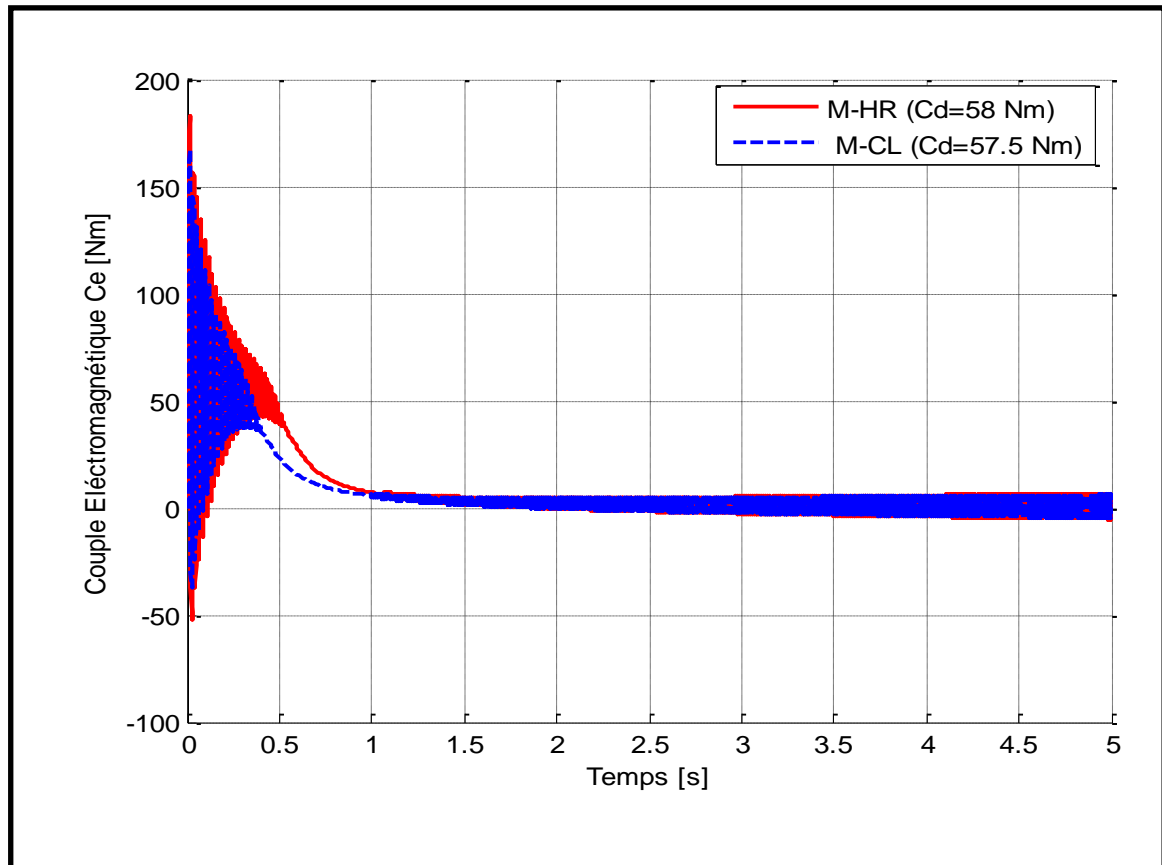


b. Zoom au voisinage du point nominal.

Figure II.19: Caractéristique du courant primaire en fonction du glissement.**II.5.4.2. Analyse dynamique des résultats de la machine optimisée****II.5.4.2. 1. Test sur le couple de démarrage**

a) Vitesse rotorique en fonction du temps.

b) Zoom $N_r=f(t)$.



c) Couple électromagnétique en fonction du temps.

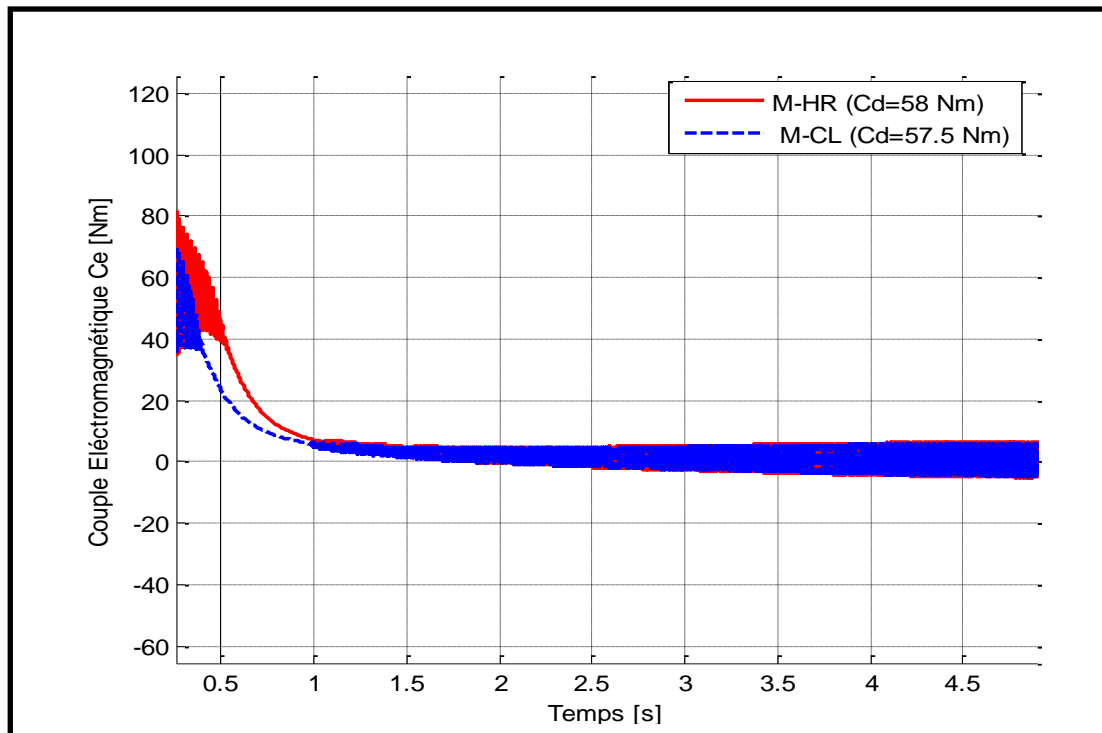
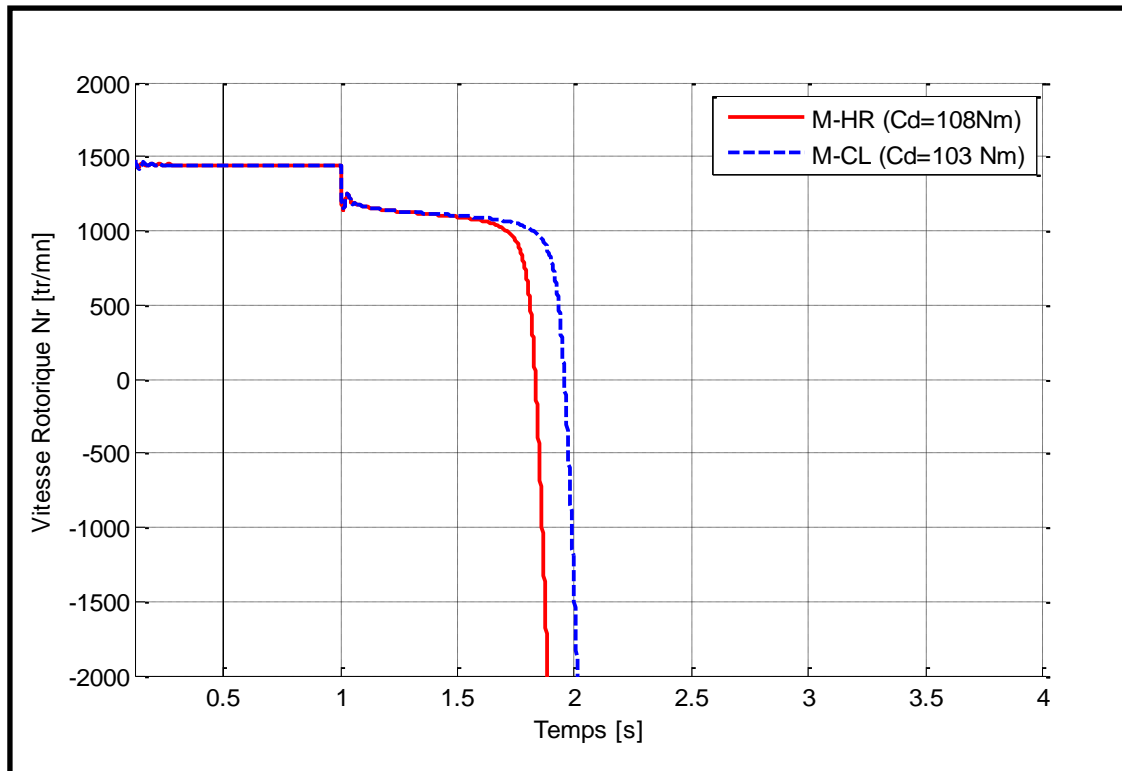
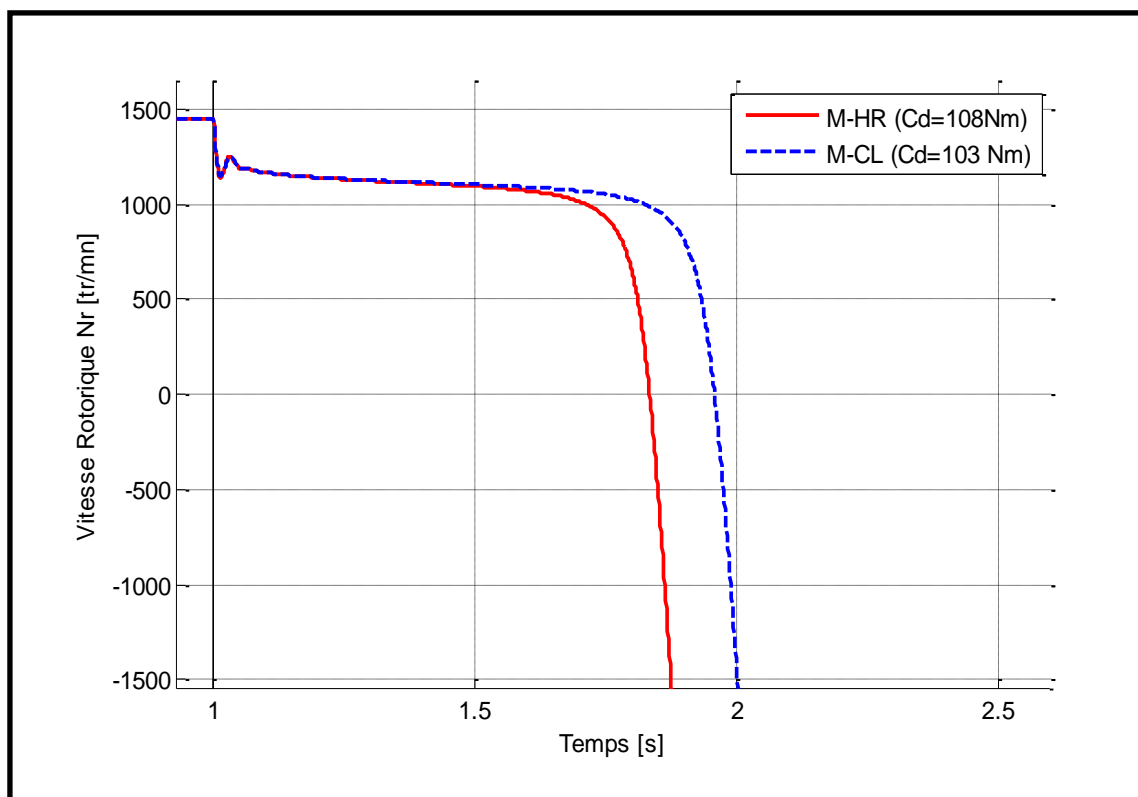
d) Zoom $C_e = f(t)$.

Figure II.20: Résultats de la simulation de la machine pour le test sur le couple de démarrage.

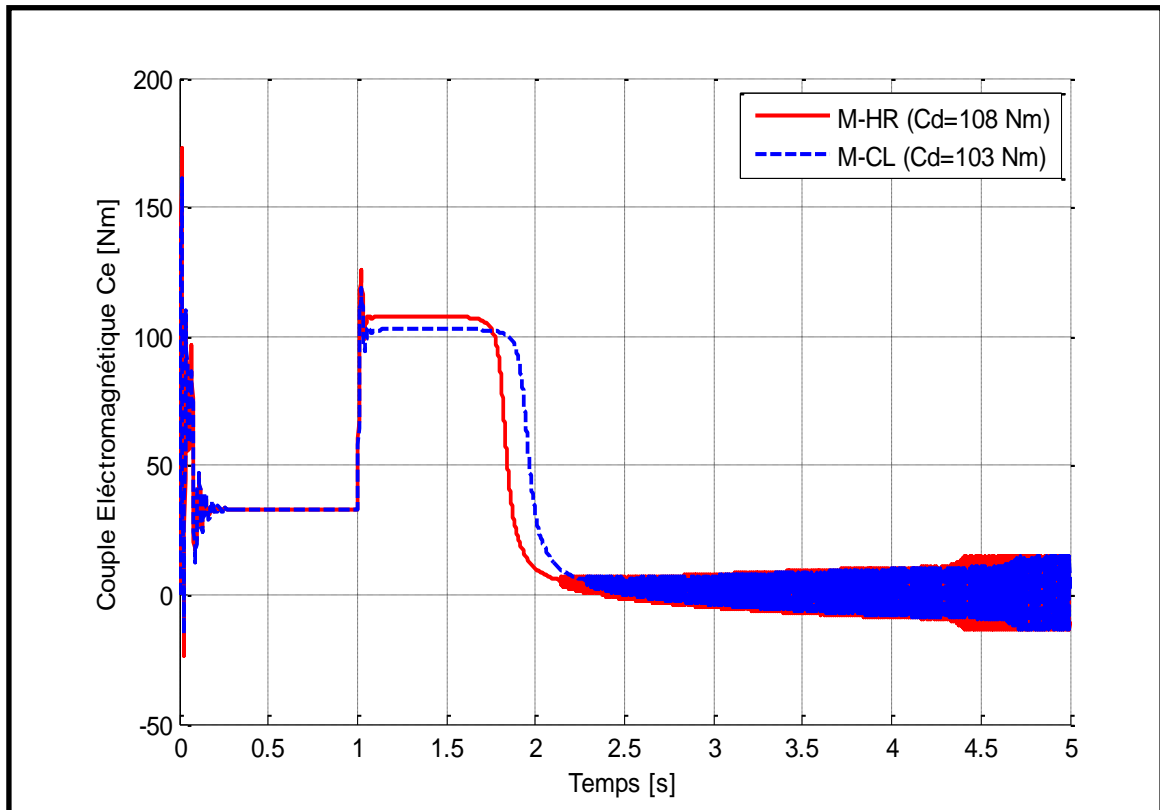
II.5.3.2.1. Test sur le couple maximale



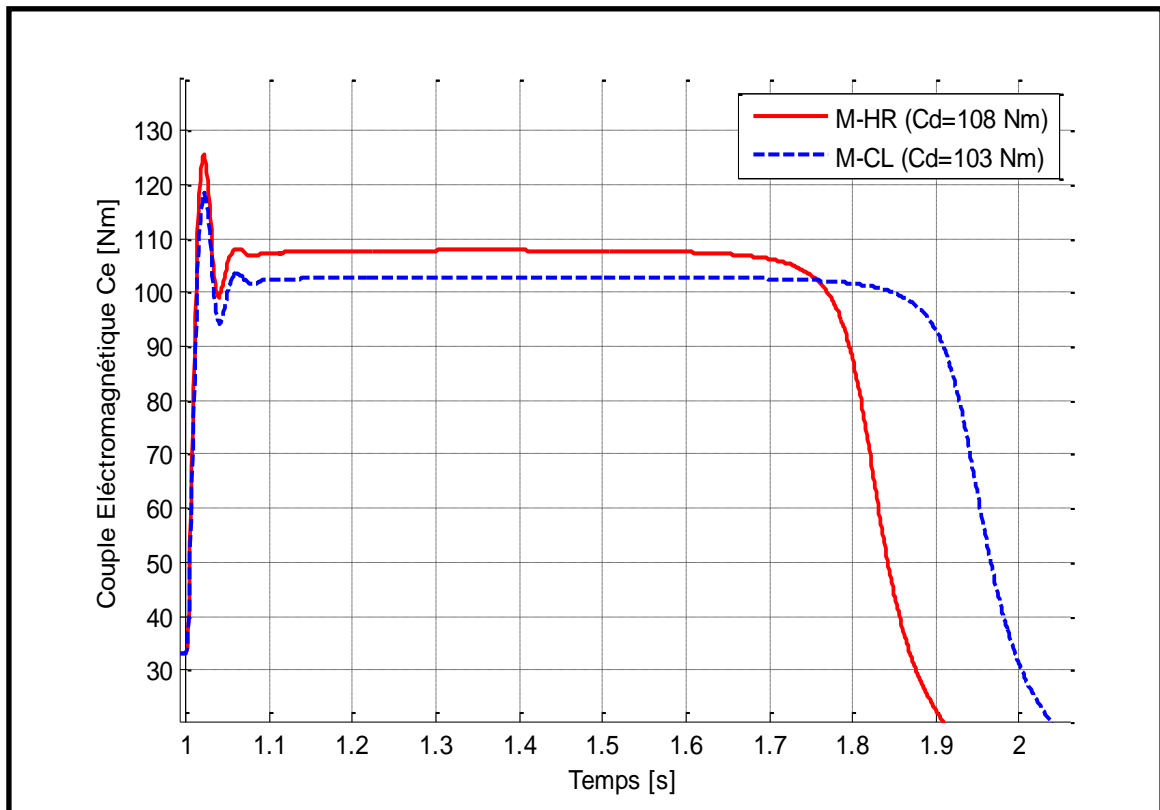
a) Vitesse rotorique en fonction du temps.



b) Zoom $N_r=f(t)$.



c) Couple électromagnétique en fonction du temps.

d) Zoom $C_e = f(t)$.**Figure II.21:** Résultats de la simulation de la machine pour le test sur le couple maximal.

On regroupe dans le tableau (II.7), les résultats obtenus par la méthode statique (AS), ceux de la méthode d'analyse dynamique (AD) et le programme de calcul(P.P2) pour la machine optimisée.

| Paramètre | A.S | A.D | Programme |
|--|-------|--------|-----------|
| Couple électromagnétique nominal (Nm) | 36.65 | 33.17 | 33.2 |
| Vitesse rotorique nominal (tr/min) | 1444 | 1446.3 | 1440 |
| Courant nominal (A) | 5.87 | 8.9 | 5.79 |
| Couple électromagnétique de démarrage (Nm) | 55.2 | 58 | 54.9 |
| Couple électromagnétique maximal (Nm) | 106.8 | 108 | ---- |

Tableau II.7: Tableau comparatif.

Pour tirer une conclusion sur l'ensemble de résultats trouvés, une comparaison entre les caractéristiques de prototype calculé (M-CL) et la machine à haut rendement (M-HR) et entre le programme de calcul (P.P1) de la (M-CL) et (P.P2) de la (M-HR) sont regroupées dans le tableau (II.8).

| Paramètres | | MCL | MHR | Ecart | P.P1 | P.P2 | Ecart |
|---|-----|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| Rendement Eta | | 0.8905 | 0.8926 | 1.2% | 0.873 | 0.885 | 1.2% |
| Couple électromagnétique Cem (N.m) | | 35.92 | 36.65 | 0.73 | 33.2 | 33.2 | 0 |
| Couple de démarrage Cdem (N.m) | A.S | 54.48 | 55.2 | 0.8 | 53.7 | 54.9 | 1.2 |
| | A.D | 57.5 | 58 | 1.5 | | | |
| Couple électromagnétique maximal Cemax (N.m) | A.S | 101.8 | 106.8 | 5 | ---- | ---- | ---- |
| | A.D | 103 | 108 | 5 | | | |
| Courant nominale (A) | | 5.838 | 5.872 | 0.034 | 5.79 | 5.79 | 0 |
| Poids de la machine (Kg) | | 48.61 | 50.24 | 1.63 | 48.61 | 50.26 | 1.65 |

Tableau II.8: Tableau comparatif.

➤ Discussion

D'après les résultats obtenus pour les deux machines à haut rendement (M-HR) et calculée par le programme de conception (M-CL), on remarque :

- Une amélioration du rendement de la machine de (+1.2%); le programme de la machine développé M-CL (P.P1) à l'état non optimisé de (87.30 %) par contre à l'état optimisé M-HR (88.50%) ;
- Une augmentation du couple de démarrage de (+1.5N.m) le programme de la machine développé M-CL (P.P1) à l'état non optimisé de (57.5N.m) par contre à l'état optimisé M-HR (58 N.m) ;
- Une augmentation du couple maximal (+5N.m) ;
- Le poids de la machine a été augmenté de (+1.63 kg) ;

Conclusion

L'objectif principal de cette partie est l'optimisation et l'amélioration du rendement d'une machine asynchrone en utilisant les algorithmes génétiques améliorés.

En effet, les paramètres de la conception optimisée choisis pour cette démarche, ça concerne : Rapport géométrique, Epaisseur d'entrefer, Diamètre d'alésage, Densité du courant statorique, Induction dans la zone dentaire rotorique et l'induction dans la zone dentaire statorique.

A partir des résultats de la simulation obtenus, nous permettent de constater une amélioration des grandeurs de la machine optimisée à savoir le rendement, couple de démarrage, couple maximal, et courant de démarrage de la machine optimisée. Cette amélioration accompagnée avec une faible modification au niveau du poids de la machine.