

# Optimisation d'un alternateur par la méthode des plans d'expériences

A. Gimeno

Université Technologique de Compiègne, Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne  
BP20529 60205 Compiègne

**Résumé**—Le dimensionnement d'une machine d'un point de vue analytique constitue souvent une première étape dans la conception d'un actionneur. De là, l'optimisation de ce dernier à l'aide d'un optimiseur du type SQP est appropriée dans le cas d'une machine « simple ». Cependant, la modélisation analytique d'une machine présente ses limites pour l'étude de structures plus complexes. La détermination de l'influence de certains facteurs nécessite alors une étude par plans d'expériences. Dans le cas de l'étude d'un alternateur automobile, nous avons été amenés à réaliser un plan dit de Screening, c'est à dire une étude de différentes variables d'entrée sur une grandeur caractéristique de sortie. Nous présentons dans cet article l'intérêt d'une telle étude dans le cadre de l'optimisation d'une machine synchrone à rotor bobiné. La démarche et l'interprétation des résultats obtenus sont détaillées. L'ensemble de ce travail nous a permis d'aboutir à une machine optimale dans le cadre de l'étude considérée.

## I. INTRODUCTION

L'évolution permanente du prix du pétrole (Fig.1) conduit les équipementiers automobiles à recourir à des machines électriques de meilleur rendement, c'est-à-dire (pratiquement) optimisées du point de vue énergétique. Cela est particulièrement le cas des alternateurs (automobiles).

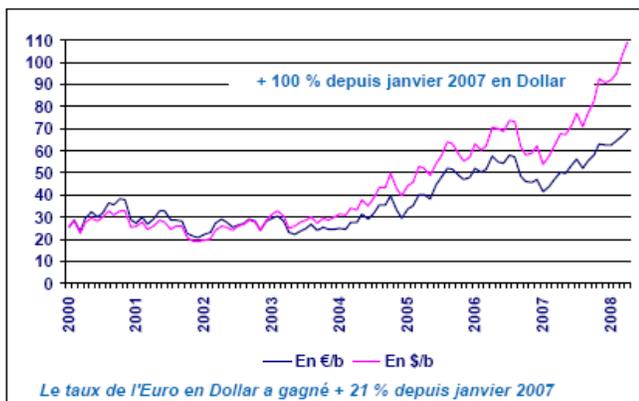


Fig. 1. Evolution du prix de baril de pétrole en dollars et en euros depuis 2000

En effet, cette machine doit présenter un rendement maximum pour une large plage de fonctionnement.

On s'intéressera donc dans notre cas au courant débité par l'alternateur en fonction de la vitesse, pour un courant d'excitation maximum (5A). Ce courant débité devra être le plus important possible en présentant une nette augmentation lors du passage d'une vitesse de rotation de 1800trs/min à 6000trs/min. Typiquement dans le cas d'un alternateur automobile, cette variation est de l'ordre de 80-100A, selon la classe considérée (Fig2).

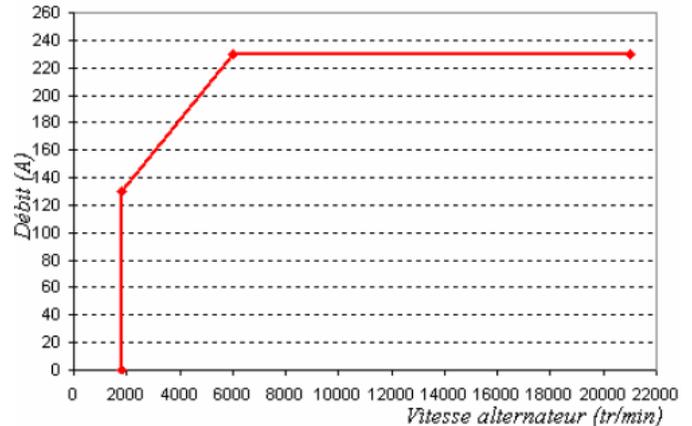


Fig. 2. Exemple de cahier des charges d'un alternateur automobile [1]

Lors d'une étude antérieure, nous avons modélisé une machine à rotor bobiné pour une puissance, une vitesse et un diamètre extérieur donnés. Cette étude nous sert de point de départ au travail présenté dans cet article.

Dans une première partie nous détaillons les caractéristiques de cette machine que nous avons ensuite cherché à améliorer par plan d'expériences.

C'est à la suite de cette étape que nous avons dû procéder à une étude par plan de Screening, afin d'étudier l'influence de certains facteurs retenus sur le courant débité par la machine.

Nous détaillons donc dans un deuxième temps le choix des facteurs retenus et la méthodologie d'une étude par plans d'expériences.

L'étude de l'influence des facteurs sur la sortie nous conduit à la représentation de différents graphiques :

- Effet des principaux facteurs et de leur couplage sur la sortie.
- Représentation par une approche statistique de l'influence de ces différents facteurs sur le courant débité (graphique de Daniel).

- Graphique d'optimisation (appelé aussi graphique de Pareto) permettant d'aboutir à une machine optimum avec le modèle considéré.

Cet article présente ainsi la démarche et l'interprétation des résultats en vue de l'obtention d'une machine optimale (pour les facteurs considérés et la précision du modèle retenu). Ce travail s'inscrit dans l'ensemble d'autres études récentes qui ont montrées l'utilité des plans d'expériences dans le cadre de l'optimisation de machines électriques [2]-[4].

## II. MACHINE ETUDIEE

La machine étudiée dans le cadre de cet article est une machine synchrone à rotor bobiné (MRB). Les caractéristiques initiales de cette machine ont été déterminées par un dimensionnement et une optimisation analytique, de type SQP [5], réalisée lors de travaux antérieurs.

La géométrie de cette machine est illustrée figure 3.

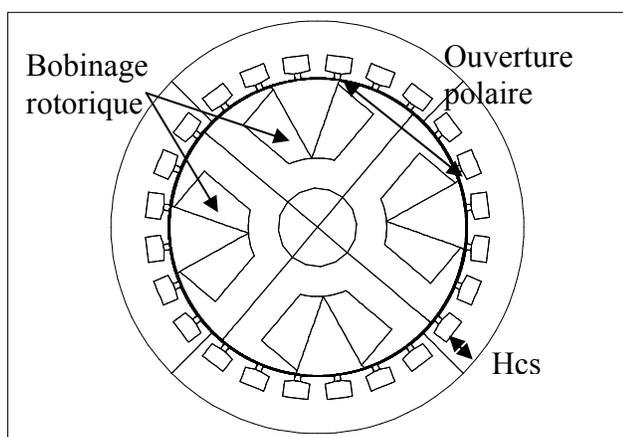


Fig. 3. MRB

L'ensemble des principales caractéristiques de cette machine est détaillé dans le tableau ci-dessous (ces valeurs restant constantes dans la suite de l'étude) :

Nom	Description	Valeur
Lfer	Longueur de fer utile	110mm
Dext	Diamètre extérieur stator	137mm
D	Diamètre d'alésage	99mm
NI	Ampère.tours rotor par pôle	720
Jr	Densité maximum de courant dans les conducteurs rotor	6A/mm <sup>2</sup>
Js	Densité de courant maximum dans les conducteurs stator	20A/mm <sup>2</sup>

Tableau 1. Principales caractéristiques de la machine étudiée

Nous avons choisi dans le cadre d'une étude par plans d'expériences de faire varier les facteurs suivants :

- Le coefficient d'ouverture polaire ( $\alpha$ )
- La hauteur de culasse stator (Hcs)
- La hauteur d'entrefer (Ent)
- Le nombre de spires stator (Nsp)

Chacun de ces facteurs varie entre un état haut et un état bas (construction d'un plan à deux niveaux par facteurs). La modification de la hauteur de culasse est réalisée en modifiant la forme des encoches dans la mesure où les diamètres

extérieur et d'alésage restent inchangés. Cette modification de la forme des encoches est réalisée de manière à garder constante la densité de courant statorique. La diminution de Hcs implique donc l'augmentation de la largeur des encoches.

Le tableau 2 résume le choix des facteurs retenus et donne leur plage de variation.

Nom	Description	Borne inf (0)	Borne sup (1)
$\alpha$	Coefficient d'ouverture polaire	0,7	0,85
Hcs	Hauteur de culasse stator	9mm	11,4mm
Ent	Entrefer	0,325mm	0,650mm
Nsp	Nombre de spires stator	3	5

Tableau 2. Valeurs des différents facteurs

Le choix des valeurs entre l'état haut et l'état bas s'est basé sur les valeurs obtenues lors du dimensionnement analytique précédent.

Nous présentons cette étude pour une vitesse de 1800trs/min, sachant que lors du dimensionnement d'un alternateur automobile, l'optimisation doit être réalisée pour deux vitesses de fonctionnement (voir figure2) :

- 1800trs/min
- 6000trs/min

Ce qui nous conduit à la réalisation de 2<sup>4</sup> simulations éléments finis sous FLUX 2D, représentant l'ensemble des combinaisons de variation des 4 facteurs à 1800trs/min.

Ces simulations sont réalisées pour un courant d'excitation de 5A.

## III. PLAN REALISE

Le plan réalisé a pour objectif de connaître la réponse (courant débité, Ideb en Ampères) observée en fonction de la variation des différents facteurs. Chaque facteur varie comme illustré sur le tableau ci-dessous.

$\alpha$	Hcs	Ent	Nsp	$\alpha$	Hcs	Ent	Nsp	Ideb
0	0	0	0	0,7	9	0,325	3	145
0	0	0	1	0,7	9	0,325	5	152
0	0	1	0	0,7	9	0,650	3	95
0	0	1	1	0,7	9	0,650	5	145
0	1	0	0	0,7	11,4	0,325	3	170
0	1	0	1	0,7	11,4	0,325	5	150
0	1	1	0	0,7	11,4	0,650	3	115
0	1	1	1	0,7	11,4	0,650	5	144
1	0	0	0	0,85	9	0,325	3	40
1	0	0	1	0,85	9	0,325	5	155
1	0	1	0	0,85	9	0,650	3	30
1	0	1	1	0,85	9	0,650	5	150
1	1	0	0	0,85	11,4	0,325	3	105
1	1	0	1	0,85	11,4	0,325	5	155
1	1	1	0	0,85	11,4	0,650	3	55
1	1	1	1	0,85	11,4	0,650	5	150

Matrice d'expériences

Plan d'expériences

Vecteur des réponses

Tableau 3. Plan d'expériences

Une fois le vecteur de réponses connu, nous pouvons alors interpréter les résultats obtenus, afin de visualiser l'influence de chacun des facteurs sur la sortie.

L'ensemble de ces représentations ainsi que leur interprétation sont détaillés dans la suite de cet article.

#### IV. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Les résultats ainsi que l'interprétation de ce plan d'expériences doivent nous conduire à connaître les facteurs prépondérants qui influent sur le courant débité par la machine et connaître leurs interactions. C'est la connaissance de ces influences qui nous permettra d'optimiser la machine en fonction des facteurs considérés.

Dans la suite de l'article nous présentons les différentes formes d'interprétation des résultats obtenus.

Sous Matlab, à l'aide d'un logiciel développé au laboratoire, nous avons procédé à la définition du plan étudié. Pour cela nous avons défini les facteurs retenus, les valeurs de leurs états (bas et hauts) ainsi qu'un vecteur de sortie. Nous avons ensuite choisi la nature du plan : Plan de Screening

Cette étude nous a conduit à la visualisation des résultats sous la forme de plusieurs types de représentations graphiques.

##### A. Effet des principaux facteurs et de leur couplage

###### a. Effet de chacun des facteurs sur la sortie

Ce graphique (fig.4), illustre sous forme d'histogramme l'influence de la variation de chacun des facteurs sur le courant débité par la machine.

Cette visualisation nous permet d'observer simplement les effets du passage d'un facteur d'un état milieu à un état haut. Sur ce graphe, la valeur indiquée sur l'axe des ordonnées correspond à un gain en courant débité lorsque tous les facteurs sont à leur position moyenne et que le facteur considéré passe d'un état milieu à un état haut. Ce gain est calculé de la manière suivante.

On calcule la valeur moyenne du courant débité par la machine puis on calcule une deuxième valeur moyenne lorsque le facteur considéré est à l'état haut. La différence entre ces 2 valeurs nous donne le gain obtenu.

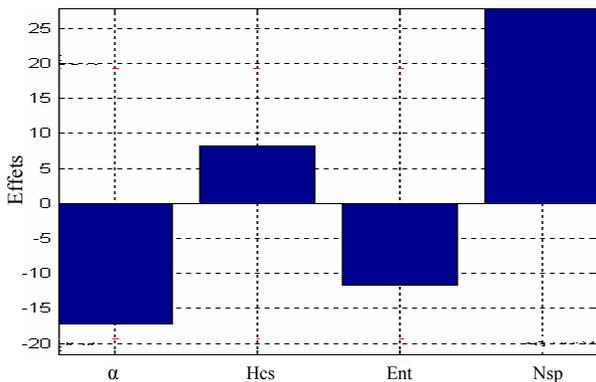


Fig. 4. Histogramme des effets principaux des facteurs à 1800tr/min

On constate qu'à 1800tr/min l'augmentation du nombre de spires ainsi que celle de la culasse stator provoquent une augmentation du courant débité. Le passage d'un entrefer de 0,325mm à 0,650mm provoque un effet inverse à savoir la diminution du courant débité. On peut aussi remarquer que la

variation du facteur angle d'ouverture polaire ( $\alpha$ ) a une influence négative sur la réponse.

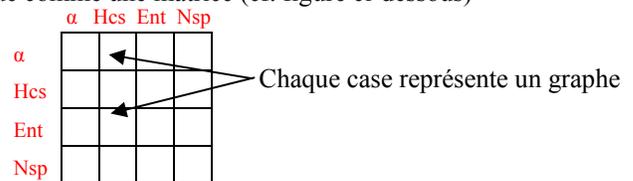
Cette visualisation nous permet aussi de pouvoir comparer l'influence de ces variations. On note ainsi, par exemple, que l'amplitude de la variation de la sortie observée lors du changement d'état de la hauteur de la culasse stator est moins importante que celle observée lors de la variation du nombre de spires ( $E_{Hcs} < E_{Nsp}$ ).

###### b. Représentation matricielle de l'interaction de 2 facteurs sur la sortie

Ce type de représentation permet de voir l'influence de la variation simultanée de 2 facteurs sur la sortie (interaction d'ordre 2). Son interprétation n'est pas évidente et nécessite donc une explication précise.

Les premiers résultats observés nous ont montré l'influence de la variation d'un seul facteur sur la sortie lorsque les autres facteurs sont à leur état moyen. Cependant, la variation simultanée de 2 facteurs peut aussi provoquer une variation non négligeable de la sortie. Une vision sous forme matricielle de cette réponse permet d'observer les couplages entre 2 facteurs.

La figure 5 représente l'évolution de la sortie en fonction de l'interaction des différents facteurs pris 2 à 2. Elle doit être vue comme une matrice (cf. figure ci-dessous)



Sur l'axe des ordonnées de chaque graphe, on lit la valeur du courant débité par la machine. Les variations s'effectuent autour d'une valeur de sortie correspondant à la valeur moyenne des courants débités, dans le cas correspondant aux variations des facteurs considérés.

Par exemple, dans le cas encerclé en rouge, les niveaux bas et hauts, respectivement en bleu et en rouge sur les différents graphiques, correspondent au facteur que l'on peut lire en haut de chaque colonne (Ent). Les variations de l'autre facteur, en l'occurrence Hcs, se lisent sur l'axe des abscisses.

Lorsque l'on analyse le graphe encerclé en rouge, on peut lire sur le segment rouge les variations de la sortie lorsque l'entrefer est à l'état haut et que le facteur Hcs passe de l'état bas à l'état haut (passage du point 3 au point 4).

Les graphes situés sur la diagonale de cette matrice représentent l'évolution de la sortie lorsqu'un seul facteur varie. On retrouve alors les variations de courant débité observées sur le graphique figure 4.

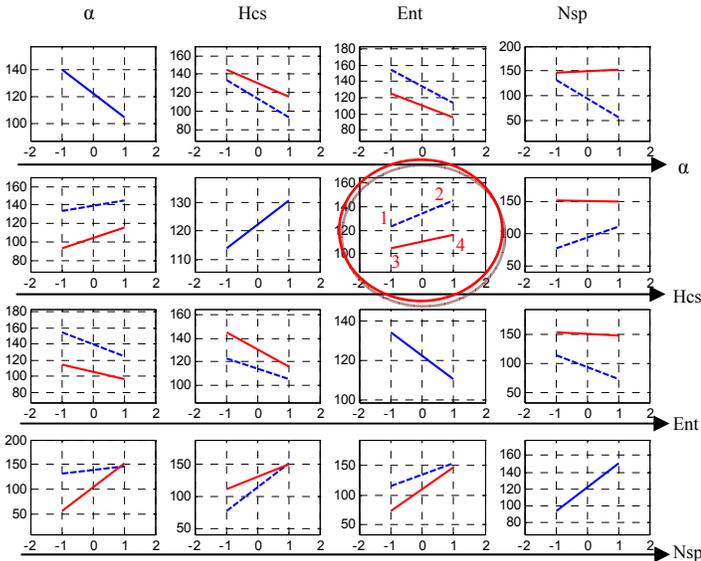


Fig. 5. Représentation matricielle de l'interaction de 2 facteurs sur la sortie pour une vitesse de 1800trs/min

La valeur du courant aux points 1, 2, 3 et 4 sur la figure 5 correspond à la moyenne du courant dans différents cas de figure :

$\alpha$	Hcs	Ent	Nsp	$\alpha$	Hcs	Ent	Nsp	Ideb
0	0	0	0	0,7	9	0,325	3	145
0	0	0	1	0,7	9	0,325	5	152
0	0	1	0	0,7	9	0,650	3	95
0	0	1	1	0,7	9	0,650	5	145
0	1	0	0	0,7	11,4	0,325	3	170
0	1	0	1	0,7	11,4	0,325	5	150
0	1	1	0	0,7	11,4	0,650	3	115
0	1	1	1	0,7	11,4	0,650	5	144
1	0	0	0	0,85	9	0,325	3	40
1	0	0	1	0,85	9	0,325	5	155
1	0	1	0	0,85	9	0,650	3	30
1	0	1	1	0,85	9	0,650	5	150
1	1	0	0	0,85	11,4	0,325	3	105
1	1	0	1	0,85	11,4	0,325	5	155
1	1	1	0	0,85	11,4	0,650	3	55
1	1	1	1	0,85	11,4	0,650	5	150

Tableau 4. Détermination des valeurs moyennes dans les différents cas à 1800trs/min

Le courant au point 1 vaut (Ent à l'état bas, Hcs à l'état bas, correspondant aux valeurs surlignées dans le tableau 4) :

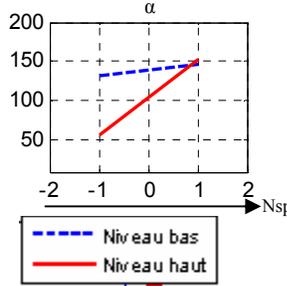
$$I_{deb1} = (145 + 152 + 40 + 155) / 4 = 123 \text{ A}$$

Le calcul du courant et l'interprétation de chaque graphe doivent être menés de la même manière.

Dans ce cas à 1800 trs/min, on peut ainsi constater grâce aux graphes situés sur la diagonale que :

- le passage d'un angle d'ouverture polaire de 0,7 à 0,85 nous fait perdre 35 A
- le passage d'une hauteur de culasse de 9mm à 11,4mm, nous permet un gain de 17A
- le passage d'un entrefer de 0,325mm à 0,650mm nous fait perdre 24A
- le passage d'un nombre de spire de 3 à 5, permet un gain d'environ 55A

Au niveau des couplages entre les différents facteurs, ceux-ci peuvent s'avérer relativement importants. L'échelle n'est pas la même dans le cas des différents couplages, il faut donc faire attention aux variations relevées. Cela dit, les couplages les plus importants ont lieu entre le facteur Nsp et les autres facteurs.



Par exemple, on constate bien que les variations de la sortie lorsque  $\alpha$  est à l'état haut et que le nombre de spires Nsp passe de l'état bas à l'état haut est différente de celle obtenue lorsque  $\alpha$  est à l'état bas et que Nsp passe de l'état bas à l'état haut (les deux droites ne sont pas parallèles).

L'angle d'ouverture polaire et le nombre de spires sont donc des facteurs couplés (significativement).

De la même manière, les facteurs Nsp et les autres facteurs sont eux aussi couplés.

### c. Visualisation des interactions sous forme d'histogramme

L'effet des interactions des différents facteurs sur la sortie peut aussi être visualisé sous forme d'histogramme. L'interprétation de l'influence des différentes interactions sur la sortie est alors immédiate.

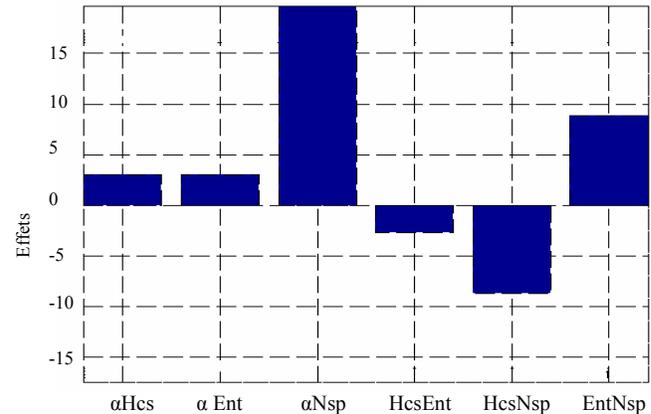


Fig. 6. Histogramme des effets d'interactions d'ordre deux à 1800trs/min

On constate ainsi mais de manière moins complète que lors de la variation simultanée du coefficient d'ouverture polaire et successivement des 3 autres facteurs, le courant débité augmente.

## B. Graphique de Daniel

Cette visualisation peut être réalisée à l'aide d'un graphique appelé graphique de Daniel ou half normality plot (Fig.7). Sur ce graphe, pour des raisons de lisibilité, les noms des variables ont été remplacés par des lettres, on a ainsi la correspondance suivante :

Nom de la variable	$\alpha$	Hcs	Ent	Nsp
Lettre correspondante sur le graphe	a	b	c	d

Tableau 5. Lien entre les variables et les lettres utilisées par la suite

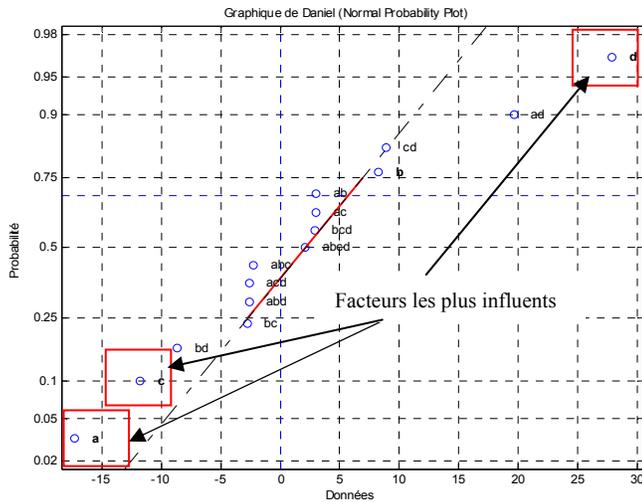


Fig. 7. Graphique de Daniel à 1800trs/min

Cette représentation est basée sur une approche statistique des variations des différents facteurs.

L'échelle de l'axe des ordonnées de ce graphe est une échelle gaussienne (de la forme  $e^{-x^2}$ ). Par conséquent tous les facteurs évoluant selon une loi de variation de type gaussien, se situeront sur une droite (en rouge sur le graphe).

Cette méthode graphique repose sur l'hypothèse d'une variation normale des variables de bruits. Par conséquent, tous les facteurs situés sur la droite en rouge sur le graphe peuvent être considérés comme non influents sur la réponse car pouvant être assimilables à du bruit. Cette interprétation repose donc sur de multiples hypothèses (bruit représenté par une loi normale, aucun facteur prépondérant ne peut évoluer selon une loi normale...)

Même si dans la plus part des cas ces hypothèses sont valides, cette interprétation doit quand même être prise avec précaution (cependant, plus des facteurs sont situés loin de cette droite plus les chances qu'ils soient réellement prépondérants augmentent).

Sur la figure 7, les facteurs prépondérants sont encadrés en rouge et correspondent bien aux facteurs déterminés comme prépondérant dans l'analyse du graphique figure 4.

## C. Graphique d'optimisation

Cette dernière représentation illustre les différentes étapes conduisant à l'obtention d'une machine optimale en fonction des bornes de variation des différents facteurs considérés ainsi que du modèle retenu (plan à deux niveaux).

Ce type de représentation est parfois appelé « graphique de Pareto ». Ce genre de graphique donne souvent lieu à la règle du 80-20, c'est-à-dire que 80% des améliorations peuvent être atteintes en considérant 20% des causes. C'est effectivement le cas pour notre problème. La variation du facteur (Nsp) (représentant  $\frac{1}{4}=25\%$  des facteurs) permet d'améliorer la réponse de 85,11%.

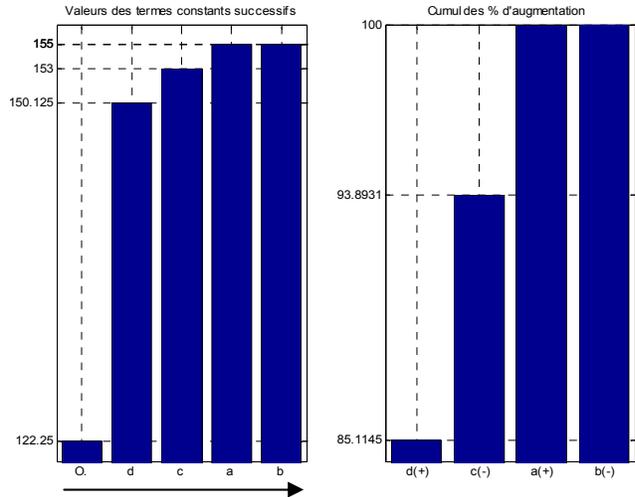


Fig. 8. Graphique d'optimisation pour une vitesse de 1800trs/min

Ce graphe doit être interprété de la gauche vers la droite : L'ordre des étapes d'optimisation est donné par l'importance du gain observé sur la sortie lors du changement d'état des différents facteurs (on retrouve les résultats observés sur la figure 7).

La valeur de 122.25A est la valeur moyenne du courant débité en prenant en compte les 16 expériences à 1800trs/min. Elle était déjà utilisée pour la représentation matricielle des interactions d'ordre 2 (elle est obtenue lorsque tous les facteurs sont à leur niveau moyen).

1. La valeur de 150.125A est obtenue dans le cas où le facteur d (Nsp) est augmenté de sa valeur moyenne à sa valeur max, les autres facteurs restant à leur valeur moyenne (cf tableau 6, valeurs surlignées).
2. La valeur de 153A est obtenue dans le cas où d (Nsp) est à son niveau haut (cf étape précédente) et c (Ent) est abaissé de son niveau moyen à son niveau bas (c(-)) (valeurs encadrées).
3. Les 155A correspondent au cas où d (Nsp) est à son niveau haut (cf étape (1)), c (Ent) est à son niveau bas (étape (2)) et a ( $\alpha$ ) élevé de son niveau moyen à son niveau haut (a(+)) (valeurs encadrées).
4. Enfin, la dernière étape n'apporte aucun gain sur le courant débité par la machine puisque l'on constate qu'indifféremment des deux hauteurs de culasse le courant débité reste le même.

Il faut respecter l'ordre de ces étapes (1, puis 2, puis 3, (puis 4)) pour bénéficier de l'amélioration la plus efficace de la réponse (ici l'augmentation du courant débité par la machine). Ainsi, augmenter le facteur d (Nsp) permet de gagner (150.125-122.25=27.8A), soit environ 85% du maximum d'augmentation possible du courant débité par la machine, dans le domaine d'étude (cf. bornes des facteurs).

$\alpha$	Hcs	Ent	Nsp	Ideb
0,7	9	0,325	3	145
0,7	9	0,325	5	152   152
0,7	9	0,650	3	95
0,7	9	0,650	5	145
0,7	11.4	0,325	3	170
0,7	11.4	0,325	5	150   150
0,7	11.4	0,650	3	115
0,7	11.4	0,650	5	144
0,85	9	0,325	3	40
0,85	9	0,325	5	155   155   155
0,85	9	0,650	3	30
0,85	9	0,650	5	150
0,85	11.4	0,325	3	105
0,85	11.4	0,325	5	155   155   155
0,85	11.4	0,650	3	55
0,85	11.4	0,650	5	150

Tableau 6. Tableau d'optimisation

Ce dernier graphique nous donne une vision globale des étapes d'optimisation et les différents gains obtenus en fonction de la variation des facteurs conduisant à une optimisation rapide de la machine.

## V. CONCLUSION

Nous avons proposé dans cet article une méthode d'étude de l'influence de différents facteurs utilisant la méthode des plans d'expériences et plus particulièrement les plans de Screening. Cette méthode est complémentaire aux méthodes d'optimisations de type SQP qui sont nécessaires à l'établissement du modèle initial.

Nous avons présenté l'intérêt d'une telle approche dans le cas d'une optimisation « rapide » d'une machine électrique. Les différents outils permettant de visualiser l'influence des différents facteurs et de leurs interactions ont été présentés.

Cette étude a été effectuée dans le cas d'une optimisation d'une machine synchrone à rotor bobiné. L'intérêt de ce type d'étude est de permettre, dans un deuxième temps, une optimisation plus fine et plus fiable de la machine. On pourra alors ne conserver que les facteurs jugés les plus influents et affiner l'étude dans la zone où semble se situer la réponse optimum. Le choix des facteurs entrant dans le plan d'expérience et leurs bornes respectives nécessitent néanmoins une bonne connaissance des règles de l'art et une interprétation fine des phénomènes physiques.

Lors de cette deuxième étape, nous pourrions par exemple réaliser un plan d'expériences à trois niveaux, déterminer des surfaces de réponses correspondantes et utiliser les différentes techniques de recherche d'optimum [6], [7].

## VI. REFERENCES

- [1] A. TAKORABET. Thèse de Doctorat « Dimensionnement d'une machine à double excitation de structure innovante pour une application alternateur automobile. Comparaison à des structures classiques ». Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008.
- [2] ICEM 2006. Chania (île de Crète, GRECE) - 2 au 5 Septembre 2006. "Torque ripple improvement with IPMSM rotor shape modification". S. VIVIER, V. LANFRANCHI, G. FRIEDRICH.
- [3] OIPE 2004. Grenoble (FRANCE) - 6 au 8 Septembre 2004 "Experimental Design Method applied to a multi-physical model: "Trellis" designs for a multi-dimensional Screening study". S. VIVIER, A. AIT-HAMMOUDA, P. BROCHET.
- [4] ICEM 2004. Cracovie (POLOGNE) - 5 au 8 Septembre 2004 "Vibro-acoustic optimization of a synchronous permanent magnet machine using the experimental design method", S. VIVIER, A. AIT-HAMMOUDA, M. HECQUET, F. GILLON, P. BROCHET
- [5] L. CHEDOT, G. FRIEDRICH, J. BIEDINGER, and P. MACRET, "Integrated startor generator the need of an optimal design and control approach, application to permanent magnet machine", IEEE Trans. Ind. Appl., vol 43, no.2, pp 551-559, Mar./ Apr. 2007.
- [6] S. VIVIER. Thèse de Doctorat. « Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis ». Laboratoire L2EP, Ecole centrale de Lille, 2002.
- [7] M. PILLET. 'Introduction aux plans d'expériences par la méthode de Taguchi' aux éditions d'Organisation Université.