

# Chapitre I

## Les enroulements à une couche

### 1. RAPPEL SUR LES PARAMETRES DES ENROULEMENTS DES MACHINES A COURANT ALTERNATIF

L'enroulement de toute machine électrique est la pièce maîtresse nécessaire pour la création du champ magnétique. Il est constitué de bobines ou de sections, généralement en cuivre, connectées en série ou en série-parallèle.

Tout enroulement à courant alternatif est défini par les paramètres suivants :

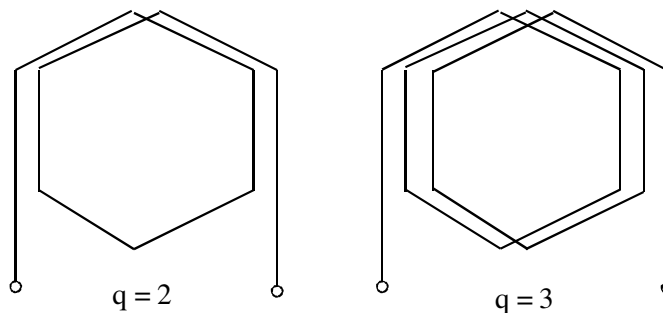
$Z$  – le nombre d'encoches ;

$2p$  – le nombre de pôles. En plus de la vitesse du champ tournant, le nombre  $2p$  indique le nombre de groupes de bobines dans une phase à l'exception de l'enroulement à une couche par pôle consécutif où celui-ci est égal à  $p$ .

$m$  – le nombre de phases ;

$q$  - le nombre d'encoches par pôle et par phase :  $q = \frac{Z}{2pm}$ .

Il indique le nombre de bobines dans un groupe.



**Fig.1.1 Groupes de bobines imbriqués ( $q = 2$  et  $q = 3$ )**

si  $q$  est entier l'enroulement est dit régulier ;

si  $q$  est fractionnaire l'enroulement est dit irrégulier (ou fractionnaire).

La caractéristique essentielle de tout enroulement à courant alternatif est le nombre d'encoches qu'occupe une phase sous chaque pôle. Celui-ci détermine le nombre de bobines dans un groupe.

Une autre caractéristique de l'enroulement est le pas polaire  $\tau$  défini comme étant la distance entre deux lignes neutres consécutives ; on l'appelle aussi le pas d'une section :

$$\tau = \frac{Z}{2p} = q m \text{ ( en unités d'encoches )}$$

Le périmètre de la circonférence statorique peut être déterminé à l'aide des paramètres de l'enroulement :

$$\pi D = 2p \tau$$

cela signifie que la circonférence statorique est composée de  $2p$  pas polaires.

L'expression du pas polaire est :

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \text{ (cm)}$$

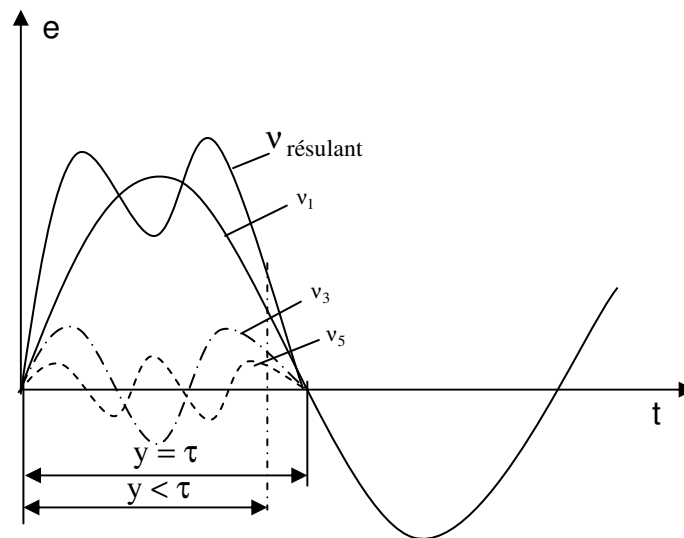
Le pas de l'enroulement  $y$  représente le nombre d'encoches par section. Il peut être :

$$\text{Raccourci} \quad y < m\tau = \frac{Z}{2p} ;$$

$$\text{Diamétral} \quad y = m\tau = \frac{Z}{2p} ;$$

$$\text{Allongé} \quad y > m\tau = \frac{Z}{2p} .$$

L'utilisation du pas raccourci  $y < \tau$  sert à éliminer les harmoniques ( $v_3, v_5, v_7, \dots$ ) pour obtenir une fem (flux) sinusoïdale et à réduire le poids du cuivre de l'enroulement.



**Fig.1.2 Fem en présence d'harmoniques de rangs 3 et 5**

Le pas relatif  $\beta$  :  $\beta = \frac{y}{\tau}$ .

En fonction de nombre de pôles  $2p$ , il est recommandé d'avoir les valeurs suivantes :

Pour  $2p = 2$  □  $\beta \approx 0.67$

Pour  $2p \geq 4$  □  $\beta \approx 0.83$

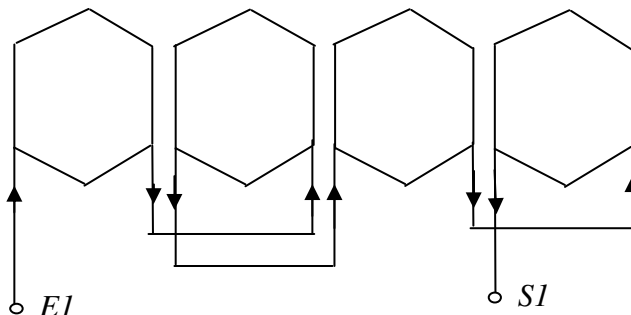
Dans le but de diminuer les chutes de tension dans les phases, on connecte les groupes de bobines constituant les phases de l'enroulement en parallèle.

Le nombre de branches parallèles « a » varie de 1 à  $2p$ .

**Exemple 1.** Soit un enroulement ayant  $2p=4$  et  $q=1$ .

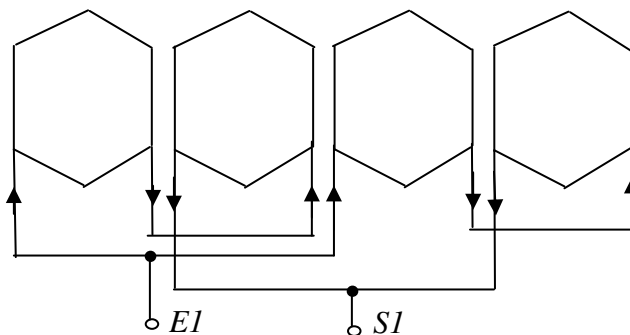
A l'aide de ces deux paramètres, on peut dire que la phase est constituée de quatre groupes de bobines ( $2p=4$ ) dont chacun est composé d'une seule bobine ( $q=1$ ). Les faisceaux des bobines voisines sont placés côte à côte. Par conséquent, on a la possibilité de les connecter ;

Soit en série  $a=1$ .



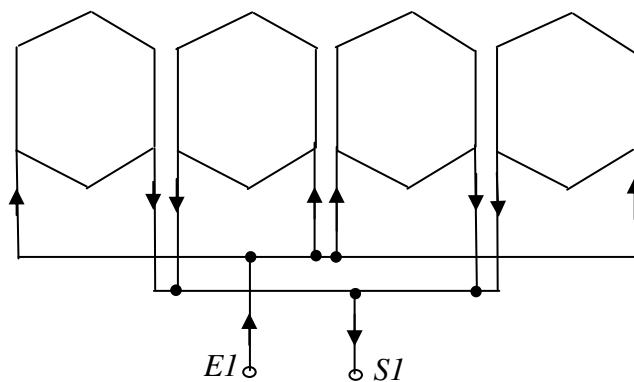
**Fig.1.3a Connexion série  $a = 1$**

Ou bien, on les divise en deux parties. Chacune d'elle est formée de deux bobines reliées en série. Les deux parties sont reliées en parallèle.  $a=2$ .



**Fig.1.4a Connexion série-parallèle  $a = 2$**

Ou encore, on connecte toutes les bobines en parallèle.  $a=2p=4$ .



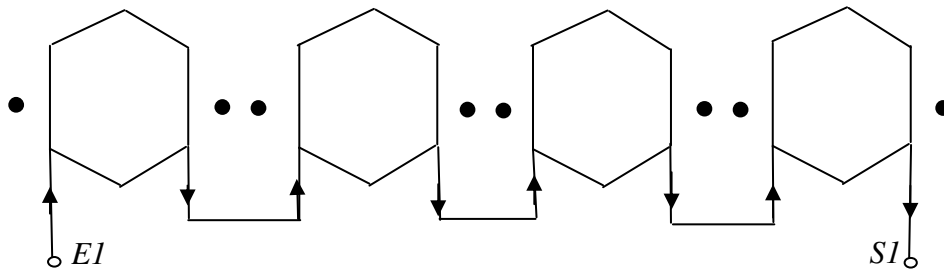
**Fig.1.5a Connexion parallèle  $a = 4$**

On remarque à travers les trois exemples, que les sens des courants dans les bobines restent inchangés quelque soit le nombre de branches parallèles. Ils définissent le nombre de pôles fictifs instantanés.

**Exemple 2.** Soit un enroulement ayant  $2p=8$  et  $q=1$  avec les faisceaux des bobines voisines décalés par des encoches pouvant contenir des faisceaux appartenant à d'autres phases,

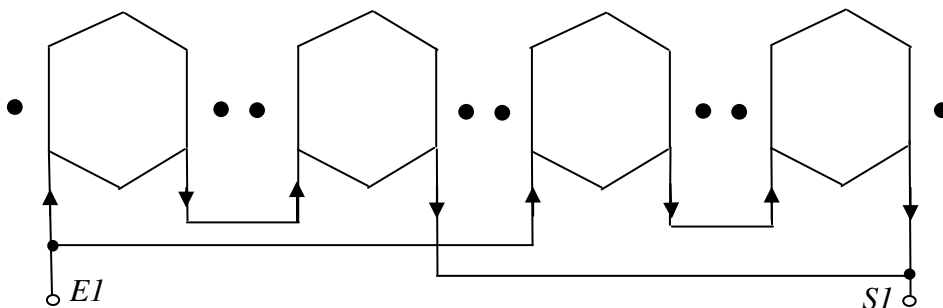
Dans ce cas, la connexion est réalisée comme représentée ci-dessous.

Dans cette configuration, chaque faisceau parcouru par un courant représente un pôle fictif instantané. Dans ces conditions, toutes les bobines peuvent être reliées en série :  $a=1$



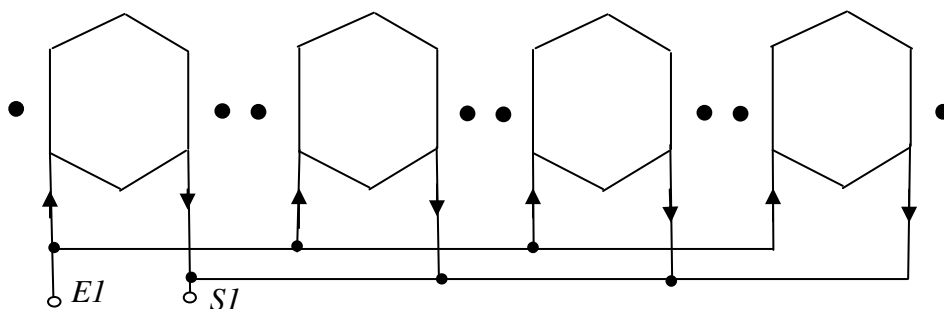
**Fig.1.3b Connexion série  $a = 1$**

Ou bien, on les divise en deux parties. Chacune d'elle est formée de deux bobines reliées en série. Les deux parties sont reliées en parallèle.  $a=2$ .



**Fig.1.4b Connexion série-parallèle  $a = 2$**

Ou encore, on connecte toutes les bobines en parallèle :  $a=p=4$ .



**Fig.1.5b Connexion parallèle  $a = p = 4$**

La vitesse du champ (vitesse synchrone) est liée directement au nombre de pôles de l'enroulement et à la fréquence du réseau, c'est-à-dire :

$$n = 60 \cdot \frac{f}{p}$$

où :

n : la vitesse, (tr/mn) ; f : la fréquence, (Hz), " 50 Hz " ou 60 Hz ; p : le nombre de paires de pôles.

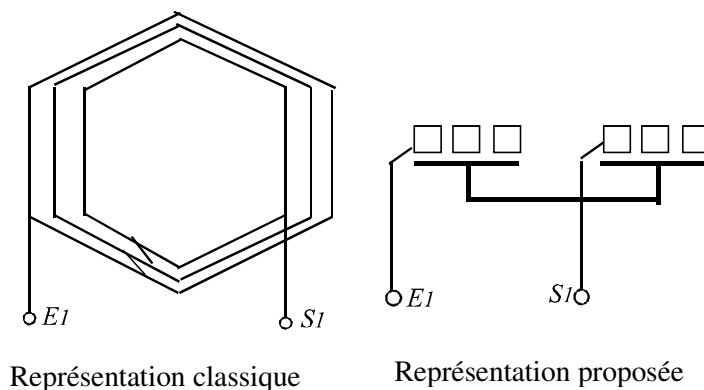
A partir de l'expression de la vitesse, on distingue la machine ;

- Bipolaire 2p=2 à n=3000 tr/mn.
- Tétrapolaire 2p=4 à n=1500 tr/mn.
- Héxapolaire 2p=6 à n= 1000 tr/mn. etc...

L'enroulement est exécuté dans des encoches présentées sur la surface intérieure du stator. Tous les enroulements électriques sont constitués de groupes de bobines.

Le groupe peut être composé de :

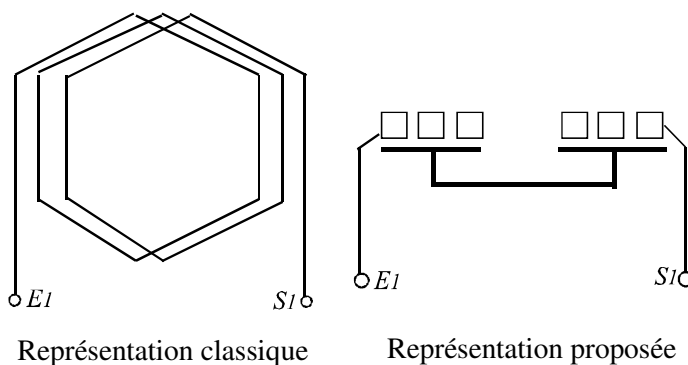
a) bobines concentriques reliées en série :



**Fig.1.6 Bobines concentriques reliées en série**

Les fils de E<sub>1</sub> et S<sub>1</sub> sont situés l'un à l'extérieur, l'autre à l'intérieur.

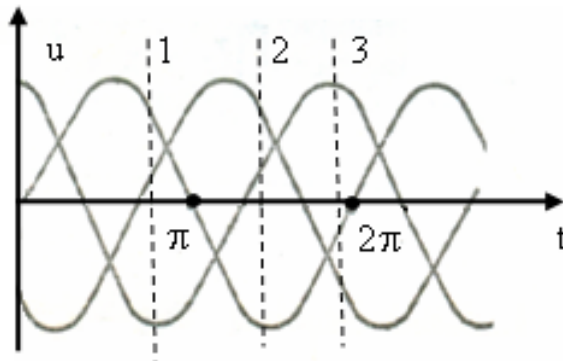
b) bobines identiques (imbriquées) ou " sections " reliées en série :



**Fig.1.7 Bobines identiques ou " sections " reliées en série**

Les fils de  $E_1$  et  $S_1$  sont situés tous les deux à l'extérieur.

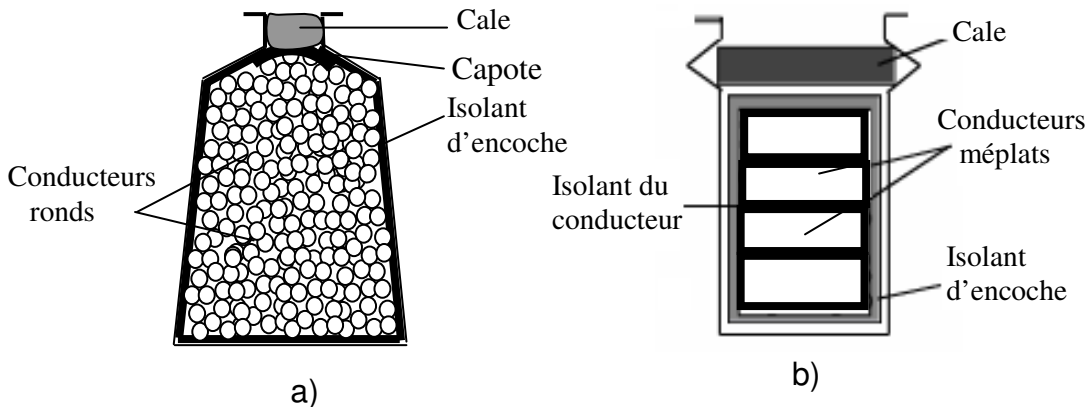
Dans les systèmes triphasés, à tout instant (1, 2 ou 3), on a toujours deux signaux de même signe, et un troisième de signe opposé. C'est pourquoi dans tous les enroulements représentés, l'entrée de la troisième phase a un signal sortant.



**Fig.1.8 Système de tensions triphasées**

## 2. ENROULEMENTS A UNE COUCHE

L'enroulement à une couche (à un faisceau par encoche) est un enroulement dont les côtés actifs des bobines occupent toute l'encoche.



**Fig.1.9 Encoche à un faisceau**  
**a) encoche trapézoïdale à un faisceau à conducteurs ronds ;**  
**b) encoche rectangulaire à un faisceau en méplat.**

L'utilisation de ces enroulements est destinée particulièrement aux machines de faibles puissances (à petits diamètres intérieurs statoriques), et aux machines de grandes puissances quand le nombre de pôles est élevé.

Dans les systèmes triphasés, on distingue six types d'enroulements à une couche [4], [5] :

- enroulement à une couche par pôle conséquent ;
- enroulement à une couche biplan ;
- enroulement à une couche à  $q$  fractionnaire ;
- enroulement à une couche par pôle ;
- enroulement à une couche triplan ;
- enroulement en chaîne.

Pour concevoir tout enroulement, il faut tout simplement faire appel au nombre d'encoches par pôle et par phase  $q$  et à l'étoile des phases, (fig.1.10).

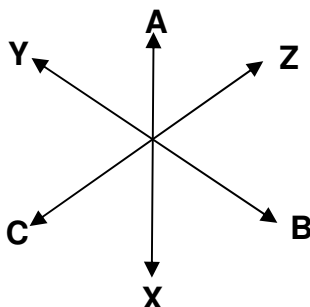


Fig.1.10. Etoile des phases

**2.1 Enroulements à une couche par pôle consécutif**

L'enroulement à une couche par pôle consécutif est caractérisé par un pas diamétral, ( $y = \tau$ ).

Dans un enroulement à une couche par pôle consécutif, le nombre de groupes de bobines dans une phase est égal à  $p$ .

Chaque groupe de bobines crée une paire de pôles. Pour former des branches parallèles, il faut s'assurer de l'égalité des résistances dans toutes les branches parallèles des trois phases. Dans le cas contraire, tous les groupes de bobines de chaque phase sont reliés en série ( $a=1$ ).

Dans le but de s'accommoder avec la méthode de représentation de l'enroulement, et pour une première fois, on représente les encoches.

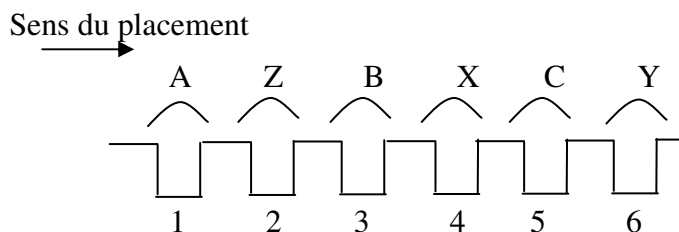
Considérons un exemple très simple d'enroulement ayant comme paramètres :  $Z = 6$ ;  $2p = 2$  et  $m = 3$ .

On détermine les paramètres principaux de l'enroulement :

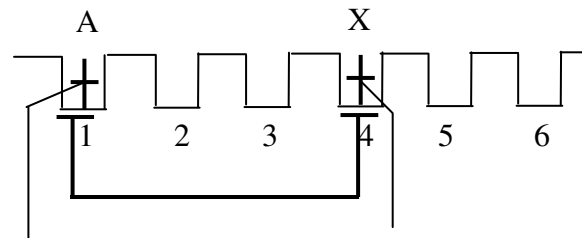
$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{6}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 1; \quad \tau = qm = 3.$$

Pour concevoir l'enroulement, on fait appel à  $q$  et à l'étoile des phases.

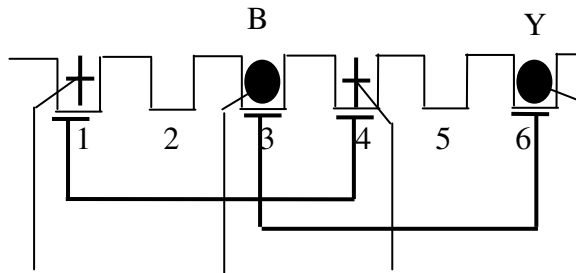
a) On répartit les  $q$  faisceaux ( $q = 1$ ) suivant l'étoile :



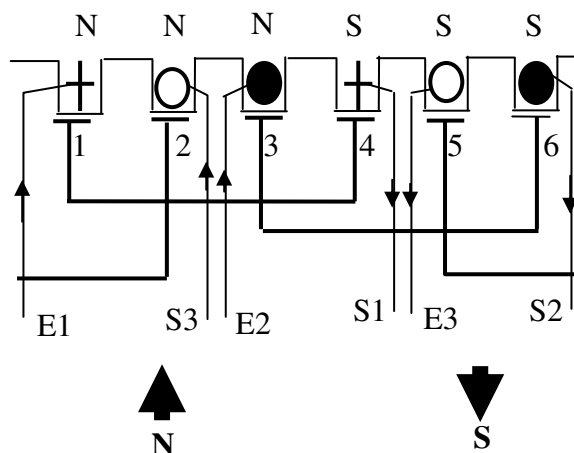
b) On place la première phase constituée de  $p=1$  groupe de bobines. L'emplacement des faisceaux est défini par A et X, (encoches 1 et 4).



c) On place la deuxième phase. Les faisceaux occupent les encoches 3 et 6 définies par l'étoile, ( B et Y).



d) On place la troisième phase. L'emplacement des faisceaux est défini par les éléments C et Y de l'étoile.



**Fig.1.11 Placement d'un enroulement à une couche par pôle conséquent**

L'enroulement est composé de trois groupes de bobines ( $N=p$ ) dont chacun comporte une seule bobine ( $q=1$ ). Celle-ci constitue une phase.

Chaque phase crée  $2p$  pôles. En s'associant, les trois phases créent aussi  $2p$  pôles. Cela est possible grâce à la propriété des circuits triphasés où, à tout instant, on a toujours deux signaux de même signe et un troisième de signe opposé.

C'est pourquoi, on observe sur le schéma de l'enroulement que les entrées E1 et E2 de l'enroulement sont parcourues par des courants entrants, alors que l'entrée E3 est parcourue par un courant sortant.

**Exemple 1.** On demande de concevoir un enroulement à une couche par pôle conséquent ayant les paramètres suivants :  $z=12$  ;  $2p=2$  ;  $q=2$ .

On détermine en premier lieu le nombre d'encoches par pôle et par phase :  $q = \frac{Z}{2pm} = 2$