

Réalisation de bobinage et de rembobinage moteur.



Ouvrage débuté 1^{er} décembre 2022
Ouvrage vérifié, plusieurs fois,.....le 11 octobre 2023, puis Aout 2024
Terminé ? Jamais !

Table des matières

Préambule.....	7
Quelques notions sur le courant électrique.....	10
Le courant électrique qu'est-ce que c'est ?.....	10
Quels sont les courants les plus fréquemment utilisés.	11
Un constat majeur pour le triphasé.....	14
Les effets élémentaires du courant électrique.	15
En ce qui concerne la production de chaleur.	15
Effet direct de la production de chaleur :.....	15
Algorithme relatif à la chaleur.	16
Conclusion sur la chaleur.	17
Conclusion :	17
En ce qui concerne le magnétisme.	18
Des forces d'attraction directes, d'attraction ou de répulsion par la présentation au voisinage, d'une autre source magnétique.	18
Des forces indirectes :	18
De l'aimantation résiduelle ou rémanente. Apparition de la notion de cycle d'hystérésis.....	18
Magnétisme produisant des courants électriques induits.	25
Conclusion :	26
Les moteurs asynchrones.....	27
Comment se créer un champ magnétique tournant ?	31
Cas du moteur alimenté en monophasé.....	32
Le « truc » des électriciens bobiniers.....	36
Complément sur les champs magnétiques tournant.....	36
Moteur Pas à Pas.....	37
Il existe quatre types de moteur pas à pas.....	38
Moteur à courant continu.	42
Il existe principalement deux modèles.	43
Les moteurs axiaux.	43
Les moteurs radiaux.....	44
Principes de réalisation des schémas classiques de moteurs asynchrones.....	45
Présentation sommaire d'un moteur asynchrone :.....	45
Un moteur présente deux parties essentielles : le rotor et le stator.	45
Représentation panoramique :	46
Différents termes sont utilisés et donc, sont à connaître.	46
Représentation frontale :	47
Principes de bases :.....	48
Pas polaire	48
Remarques spécifiques sur le pas polaire :	49

Les entrées des différentes phases se font :	50
Nombres d'encoches occupées :	51
Représentation d'une bobine ou d'un groupe :	52
Types de bobinages rencontrés :	53
Dispositions des groupes de bobines.	55
Machines triphasées	55
Un constat, pour les bobinages jointifs :	56
Machines monophasées.	57
Remarques particulières.	57
Exemples de réalisation de schémas à bobinages non jointifs.	58
Moteur triphasé :	58
Par enroulement ondulé.....	59
Par enroulement imbriqué.	60
Par enroulement à pas diamétral.	61
Moteur monophasé :	62
Exemple : avec un moteur de 24 encoches et 4 pôles :	63
Par enroulement ondulé.....	63
Par enroulement imbriqué.	64
En enroulement à pas diamétral.....	64
L'exception pour les moteurs monophasés.....	66
Exemple : un stator de 24 encoches, avec 6 pôles.....	66
Exemple : un stator de 24 encoches, avec 6 pôles.....	67
Exemples de réalisation de schémas à bobinages jointifs.	68
Moteur triphasé bobiné en pas court :	68
Choix du type de bobinage :	68
Exemple : avec un moteur de 24 encoches et 4 pôles :	69
Exemple : avec un moteur de 24 encoches et 4 pôles :	71
Exemple : Un moteur 2 pôles, de type imbriqué, jointif et avec le « pas allongé » Exemple : avec un moteur de 24 encoches et 4 pôles, par enroulement imbriqué en mode jointif et à pas raccourci ou court.....	72
Exemple : avec un moteur de 24 encoches et 4 pôles, par enroulement imbriqué en mode jointif et avec pas allongé ou long.	74
Exemple : avec un moteur de 24 encoches et 4 pôles, par enroulement à pas diamétral, en mode jointif et à pas raccourci ou court.....	75
Schéma de moteurs triphasés à pas polaire fractionnaire.	76
Ce type de schémas se rencontre :	76
Remarque essentielle :	76
Règles de réalisation.	77
Exemple : Moteur 18 encoches, 4 pôles.	78
Schéma de moteurs triphasés à deux vitesses avec un seul enroulement commutable par phase. (Moteurs « Dalhander et Lingstrom »)	79
Principe de réalisation :	82

En imbriqué , nombre de groupes = nombre de pôles.	82
A pas diamétral , nombre de groupes / phase = nombre d'encoches/ 6	82
Exemple : moteur 2 / 4 pôles, 24 encoches, triphasé.	83
Schéma de moteurs à deux faisceaux par encoches.	85
Procédure :	86
Schéma de moteurs bitensions.	88
Principe de réalisation :	89
Procédure :	89
Quelques adresses de vidéos (après le passage des sempiternelles publicités.)	99
Définition :	100
Famille de moteurs.	100
Le moteur axial, avec charbons et collecteur.	100
Les moteurs radiaux sans charbons, mais avec l'équivalent d'un peigne d'alimentation. .	102
Constitution des moteurs, au niveau bobinage	104
Moteur axial	105
Les objectifs à atteindre seront les suivants :.....	105
Règles de base, à admettre et respecter.	106
Nombres d'encoches sur le rotor	112
Types de bobinages rencontrés.	115
Imbriqués.....	115
Ondulés, ou imbriqué réfléchi.	116
Réalisation d'un bobinage d'un induit à courant continu.	117
Deux études et deux calculs seront nécessaires.	117
On commence toujours par réaliser le schéma des chignons ou des bobines. La réalisation, du schéma des connexions côté collecteur s'effectuera à la fin.	117
Représentation développée linéaire :	121
Le moment de réaliser le schéma de câblage au collecteur est arrivé !	126
Imbriqué :	126
Ondulé ou imbriqué réfléchi :	126
Récapitulatif de la méthode de recherche de schéma d'une machine à courant continu de type axiale.	128
Comment concevoir le schéma, côté « chignons » ?	130
1. <i>Il faut raisonner comme s'il n'y avait qu'un seul enroulement.</i> Le nombre d'encoches à utiliser par enroulement, se calculera ainsi :	130
2. <i>Il faut de préférence utiliser toutes les encoches et avec deux faisceaux par encoches.</i>	130
Représentation développée en escalier :	134
Quelques exemples de schémas de machines, sans les liaisons au collecteur.	136
Moteur à 2 pôles, 22 encoches, imbriqué.	136
Moteur à 4 pôles, 22 encoches, imbriqué.	140
Le raccord des sections et la position des charbons, sur le collecteur.	143
Rappels importants :	143

Pour les enroulements	143
Comment faire ?.....	143
Principe :	145
Remarque :	146
Pour les charbons :	149
Un exemple non contractuel :	150
Un exemple : Moteur 22 encoches $X = 5$ et $e = 1$	153
Des applications pratiques :	158
Le moteur 12 encoches 2 pôles. (Déjà étudié)	158
Le moteur à 22 encoches deux pôles. (Déjà étudié)	163
Le moteur à 22 encoches quatre pôles. (Déjà étudié)	170
Le calcul des force électromotrices (ou contre- électromotrice)	176
Quelques rappels :	176
Pour calculer la $f(c)$ em d'un générateur, ou moteur.....	177
Quelques compléments pour les vicieux !.....	178
Étapes de réalisation de moteurs à courant continu.	181
Moteur universel à puissance fonction d'enroulements parallèles.	181
Avantage espéré :	182
Un exemple, fourni par un bricoleur réparateur autodidacte :	183
Moteur d'aspirateur.	183
Schéma partiel de câblage :	184
Plaques à bornes pour moteurs asynchrones.	186
Moteurs triphasés :	186
Moteurs classiques à une vitesse :	186
Moteurs classiques à une vitesse et à rotor bobiné :	187
Moteur à deux vitesses « Dhalander et Lindstrom ».....	188
Moteurs monophasés.	190
Moteur monophasé, une tension, à condensateur permanent :	190
Moteur monophasé, une tension, à coupleur centrifuge avec condensateur de démarrage et condensateur permanent :	191
Moteur monophasé, deux tensions, à condensateur permanent :	192
Moteur monophasé, deux tensions, à coupleur centrifuge avec condensateur de démarrage :	194
Calcul du nombres des spires pour un moteur asynchrone alternatif.	196
1. Données à connaître :	196
Nombre de spires par bobines.	196
1. Démonstration des formules.	196
.....	199
Fiche de travail	201
Comment connaître l'induction maximale pouvant circuler dans un circuit magnétique alternatif, ou comment éviter la saturation magnétique.	202

Comment faire ?	203
Un exemple complet.	206
Pour ceux qui aiment les mathématiques appliquées.	209
Pourquoi ne pas travailler en saturation ?.....	211
.....	213
Passage de tri à mono.	214
Section des brins actifs pour un moteur asynchrone.	215
Calcul des sections.	215
Calcul de I consommée.	216
Comment rembobiner un moteur avec une tension d'alimentation différente.	217
1. Règles essentielles	217
2. Principes.....	218
3. Changement de tension pour les moteurs asynchrones triphasés.....	219
• Modification pour un moteur monté en étoile	219
• Modification pour un moteur monté en triangle.....	219
4. Changement de bobinage pour les moteurs à courant continu ou universel.	220
En conclusion.	221

Préambule

Je tenais à faire ce préambule afin de préciser les raisons qui m'ont fait réaliser cet ouvrage.

Il se trouve que dans ma vie professionnelle qui fut diverse et variée, j'ai été amené à exercer le métier de formateur en centre de formation d'apprentis.

Étant moi-même formé en tant qu'électricien, et pratiqué le métier, je fus chargé de former des électriciens d'équipement et des électriciens industriels.

Après quelques années de pratique dans les métiers de la formation vinrent quelques apprentis dans la pratique professionnelle se rapportant au rembobinage de moteur et quelquefois le rembobinage des transformateurs.

Je n'avais au niveau du bobinage, que des notions scolaires pratiquement oubliées au fil du temps. En gros on me demandait de former des personnes à un métier dont j'ignorais tout.

Je fus amené en me formant à mon tour, auprès de patrons formant ces mêmes apprentis. Ce qui m'a permis d'affiner mes cours auprès de ces apprentis bobiniers.

J'ai pu visualiser pratiquement les notions de champ magnétique tournant, les notions de « grognard », les notions de « capote ».

D'une certaine façon je fus émerveillé de voir qu'avec des éléments statiques, on pouvait recréer des mouvements.

Je fus étonné, que cette formation, au fil des temps, ait perdu ses formateurs. Les ouvrages traitant de cette profession se sont faits de plus en plus rares au fur et à mesure que les années ont passé.

Les quelques ouvrages que j'ai pu rencontrer, étaient des ouvrages qui dataient de 1923. Je les ai trouvés au marché aux puces, de ma bonne ville de Toulouse.

Il se trouve que les grands groupes industriels construisant des moteurs sont plus que discrets sur le sujet.

Certains artisans, là aussi, conservaient jalousement leurs petits secrets sur de petits cahiers très fatigués, à grands carreaux
Il a fallu faire parfois, preuve de beaucoup de diplomatie.

Je fus enthousiasmé de voir que des éléments statiques pouvaient réaliser des effets dynamiques.

D'ailleurs, certains artisans furent demandeurs d'informations ne serait-ce que sur la notion de champ magnétique tournant.

Ils constataient la chose, avec un simple roulement à billes, mais ne pouvait l'expliquer. Ils réalisaient manuellement les rembobinages en réalisant les bobines présentes sur les schémas en leur possession.

Étant curieux de nature, je me suis pris au jeu, et me mis à la recherche des notions pratiques ainsi que théoriques permettant de réaliser ces événements dynamiques.

Avant chaque chapitre se trouveront quelques notions théoriques vulgarisées le plus possible, permettant de concevoir les principes de fonctionnement

Mon ouvrage tient surtout à préciser comment réalise-t-on les branchements de moteur.

- Comment peut-on retrouver les caractéristiques essentielles au bon fonctionnement d'un moteur de moteur.
- Comment faire si l'on doit réparer un moteur grillé refaire à l'identique le bobinage.

Au fil de votre lecture, ***certains puristes se verront offusqués des libertés que je prends parfois avec le magnétisme produit par les bobines.***

Celui-ci, ne se trouve pas maximal à l'endroit où je le positionne comme tel.

Ce n'est pas grave, j'utilise un peu le même principe que les premiers électriciens qui avaient indiqué le sens de circulation du courant électrique, sans en avoir les moyens scientifiques de le prouver.

En effet, ce qu'ils avaient nommé « plus », là où les électrons étaient censés sortir pour se diriger vers ce qu'ils avaient appelé « moins ». Ce principe est resté jusqu'à nos jours, alors que l'on sait maintenant que c'est l'inverse parfait.

Pour le magnétisme le flux magnétique maximal ne se trouve pas forcément à l'endroit où je le positionne.

En réalité, selon la taille des bobines, le flux magnétique maximal se trouve au voisinage le plus proche d'un faisceau dans le cas des grandes bobines, ou bien, au centre des deux faisceaux constituant une bobine de petits diamètres.

La production du magnétisme sera perçue selon les cas, comme la production d'un groupe de conducteurs rectilignes ou bien celle d'un solénoïde.

Je généralise en prenant toutes les bobines comme des solénoïdes.

(Je précise que si l'on étudie la théorie des moteurs au plus près, seuls les faisceaux sont concernés, mais en appliquant cette réalité, la recherche des schémas devient très complexe.)

De même, je parle souvent de pas polaire avec le courant qui lui sera associé dans les faisceaux. Il faut savoir, que je parle de sens de courant conventionnel.

- Pour les machines à courant continu, il s'agira : du plus vers le moins.
- Pour les machines à courant alternatif, je parle du sens du courant qui sera observé en un instant « t », sachant qu'avec l'alternatif, le sens du courant n'arrête pas de changer en fonction de la fréquence.

Le mérite de ma méthode est que celle-ci fonctionne, dans tous les cas.

Je n'ai pas la prétention d'espérer que mon ouvrage remplace tout ce qui m'a précédé.

Je continue à apprendre, ne serait-ce que par les demandes des différents artisans bobiniers, qui de par le monde, me contactent via mon site dédié, sur Internet.

Cela m'est arrivé de ne pas pouvoir répondre. (Sniff !!)

Il faut reconnaître ses faiblesses, ou son ignorance.

Il faut aussi accepter, que tous les prédécesseurs utilisaient parfois, des « ruses de sioux » pour arriver à leurs fins. Il ne faut pas les dénigrer.

Ils savaient laisser des encoches vides, mais pas toutes ; remplir une encoche avec deux faisceaux, mais pas toutes.

Toutes ces choses, que j'ai été pratiquement incapable de modéliser).

Des choses qui ont existées et qui fonctionnaient !

Je vais donc vous laisser regarder cet ouvrage en espérant que vous puissiez y trouver votre bonheur ; ou plus simplement quelques réponses à vos questions.

Un deuxième ouvrage viendra, je l'espère prochainement, sur la théorie des moteurs.

Ils demandent hélas, des notions mathématiques assez poussées.

Je vous remercie de m'avoir lu et vous souhaite une bonne étude de cet ouvrage.

Quelques notions sur le courant électrique.

Il n'est absolument pas question dans cette partie de l'ouvrage de faire un cours complet sur l'électrotechnique, mais de donner des notions extrêmement basiques et essentielles à la compréhension des phénomènes observés lors de la réalisation de n'importe quel appareillage électrique.

Le courant électrique qu'est-ce que c'est ?

Le courant électrique est caractérisé par la circulation des grains de matière extrêmement petits, totalement invisibles. Ces grains de matière nomment : **électrons**. ce qui amène à la notion de courant **électrique**.

Ils amènent avec eux de l'énergie qui peut se convertir en deux effets physiques essentiels :

- De la chaleur.
- Du magnétisme.

Le courant électrique ne peut circuler que si une force l'oblige à le faire.

Cette force se nomme « Tension ». Plus la force sera importante, plus le nombre d'électrons entraînés sera important. La tension sera exprimée avec des unités dont le nom est tiré de **Monsieur Volta**.

La tension s'exprimera donc en « Volt »

Le nombre d'électrons débités par seconde prend une appellation particulière nommée « Intensité ».

L'intensité sera exprimée avec des unités dont le nom est tiré de **Monsieur Ampère**.

L'intensité sera donc exprimée en « Ampère ».

Globalement :

Plus un appareillage sera alimenté **avec une forte tension**, plus sera capable d'effectuer **un travail important**.

Plus un appareillage absorbera de fortes intensités, plus il sera capable d'effectuer **un travail important**.

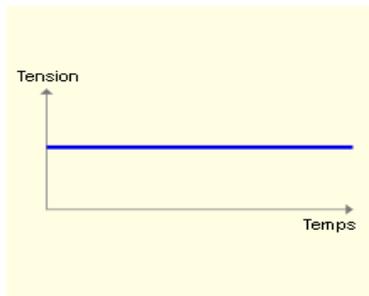
(Et inversement)

Quels sont les courants les plus fréquemment utilisés.

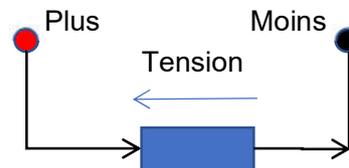
Les variations de tension ou d'intensité dans le temps peuvent être de formes et d'expressions mathématiques quelconques.

Par contre, dans le domaine industriel deux courants se rencontrent le plus souvent :

- **Le courant continu**, de moins en moins utilisé, dont la tension et l'intensité sont constantes dans le temps. Le courant continu présente deux pôles nommés «+» et «-».



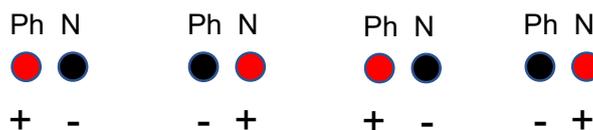
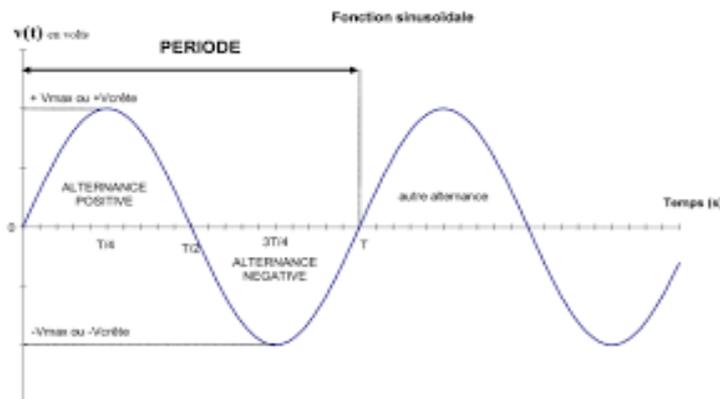
Le courant sort de côté «+» traverse la charge et revient **avec la même intensité** du côté «-». La tension ne varie pas dans le temps.



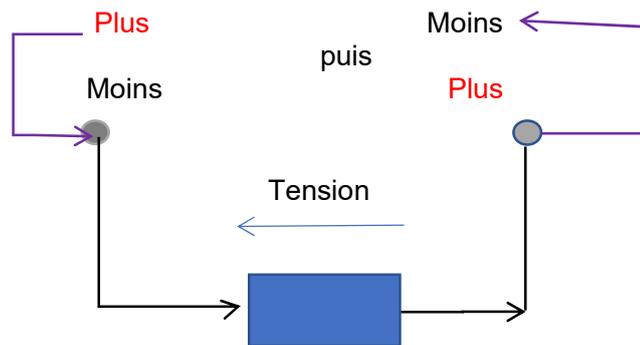
- **Le courant alternatif** avec une phase (monophasée) ou, trois phases (triphase), dont les variations de tension et d'intensité, sont périodiques. Le sens de courant n'arrête pas de changer selon une fréquence fixe. **La valeur moyenne des courants observés est nulle.**

Courant monophasé :

Le courant alternatif monophasé présente deux pôles nommé « Phase » et « Neutre ».



Le courant va dans un sens, s'annule, **puis**, va dans l'autre sens, s'annule. Le cycle se poursuit sans arrêt, périodiquement. Il sort d'un côté, puis entre dans l'autre. Il traverse la charge et revient **avec la même intensité**. La tension varie tout le temps selon une loi trigonométrique en « sinus ».



Pour s'y reconnaître, on utilise le sens conventionnel adapté à l'alternatif. À savoir :
Le courant va de la phase vers le neutre.

Remarque :

Ce sens conventionnel n'a aucun rapport avec ce qui se passe physiquement, mais cela permet de s'y retrouver.

Le courant électrique triphasé.

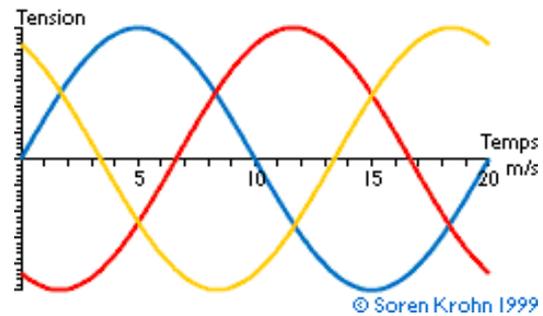
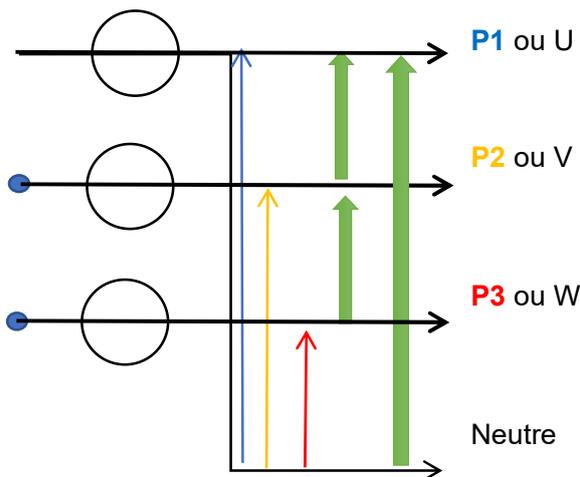
Il est constitué de trois générateurs alternatifs monophasés strictement identiques.

Chaque générateur présente une tension sinusoïdale décalée dans le temps.

Chaque générateur présente une phase et un neutre donnerait six pôles. Les neutres de chacun des générateurs sont réunis, pour ne plus faire qu'un seul neutre. Ainsi, il n'y aura que quatre pôles.

Chaque générateur aura une appellation :

Phase 1, Phase 2, Phase 3. Ou, U, V, W.

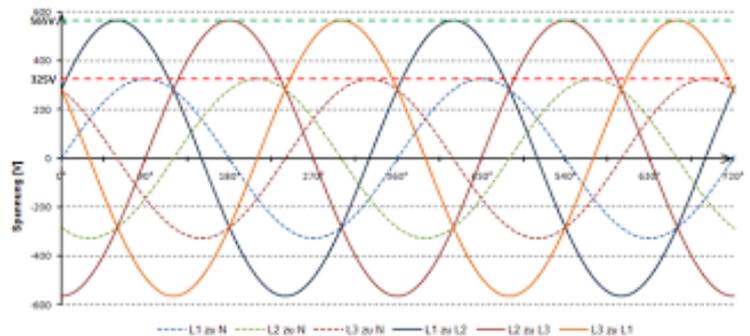


Les tensions entre Phase et Neutre se nomment aussi :

Tensions simples : U_{1N} , U_{2N} , U_{3N}

Les tensions entre Phases se nomment :

Tensions composées : V_{12} , V_{23} , V_{31}



Les Tensions Composées sont égales à :

Tension Simple fois 1,732, arrondi !

$$V_{PP} = U_{PN} \cdot \sqrt{3}$$

Des exemples :

Si $U_{PN} = 230 \text{ V}$, alors $U_{PP} \approx 400 \text{ V}$

Si $U_{PN} = 400 \text{ V}$, alors $U_{PP} \approx 700 \text{ V}$

Un constat majeur pour le triphasé.

Par simple constat graphes de variations des courants, si nous les observons de plus près

À un moment où l'intensité dans une phase n'est pas nulle et quel que soit le moment

Les courants de deux phases vont dans un sens et celui de la troisième dans un autre !

Il en est toujours ainsi !

Il n'est pas possible que les trois intensités se télescopent !!!



Cette notion est très importante à saisir, lors de la réalisation des connections et du choix des entrées et sorties de moteurs asynchrones triphasés.

Les effets élémentaires du courant électrique.

Tout courant électrique, traversant un conducteur va produire deux effets élémentaires pourront par la suite être exploités, convertis. Dans le cadre de la réalisation de bobinage moteur, il est nécessaire de prendre ces éléments en compte et de les exploiter au mieux.

Les deux effets élémentaires constatés sont :

- La production de chaleur (c'est ce que l'on appelle l'effet Joules).
- La production de magnétisme.

En ce qui concerne la production de chaleur.

Définition de l'effet joules : tout élément conducteur traversé par une intensité électrique va produire de l'énergie calorifique.

L'énergie calorifique produite est directement proportionnelle à la résistance du conducteur traversé et au carré de l'intensité traversant le conducteur.

Pour être clair, si l'intensité électrique est doublée, l'énergie calorifique conduite se verra augmentée dans un rapport de quatre.

Toute autre forme d'énergie qui ne peut être convertie et exploitée va se transformer en énergie calorifique.

Effet direct de la production de chaleur :

S'il y a un courant électrique qui traverse un conducteur.

Alors production de chaleur.

Tant qu'il y a production de chaleur.

Alors risque de dilatation des matériaux.

Alors, risque de frottement mécanique accru.

Alors augmentation de la résistance électrique des matériaux traversés par le courant. (Si **R augmente, de fait $R \times I^2$ va augmenter, d'où $t^\circ C$ va augmenter**)

Alors diminution du magnétisme environnant.

Alors risque de diminution de force électromagnétique produite par des électro moteurs voisins de la source de chaleur.

Si température spécifique, nommé « Point de Curie » atteinte.

Alors, suppression du magnétisme.

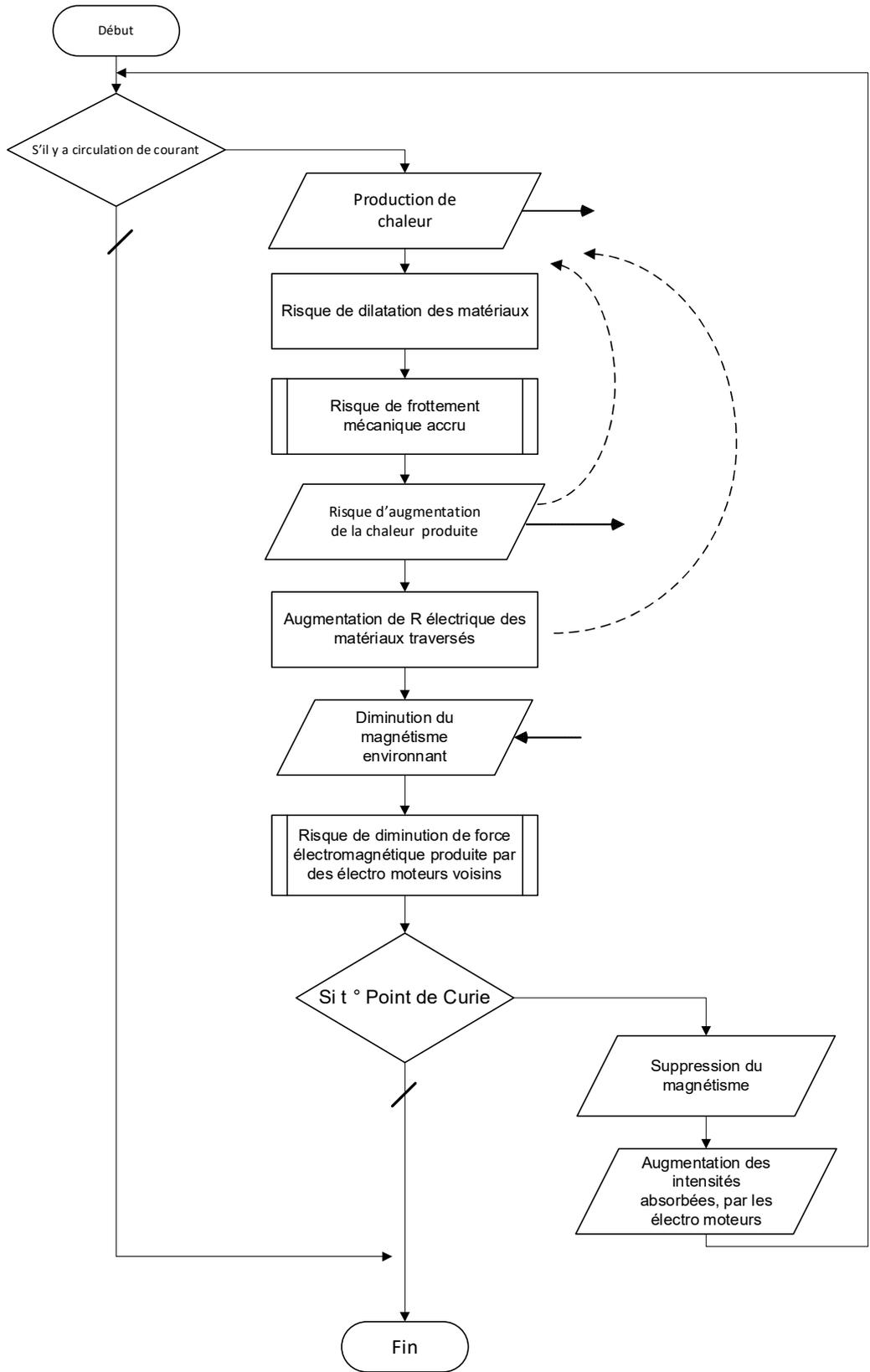
Alors augmentation des intensités absorbées, par les électro moteurs. 😞💣

Fin de Si.

Fin de tant qu'il.

Fin de si.

Algorithme relatif à la chaleur.



Conclusion sur la chaleur.

Si de la chaleur est produite en trop grande quantité dans une machine, **cela peut devenir catastrophique.**

Plus la machine chauffe, plus le magnétisme nécessaire à son fonctionnement va diminuer.

Ce qui va entraîner une augmentation des consommations électriques.

Il va y avoir aussi une augmentation de la résistance des conducteurs utilisés, ce qui va augmenter l'effet joules, donc la chaleur produite.

Il va y avoir une dilatation excessive des matériaux, ce qui va entraîner un frottement plus important.

Les isolants vont fondre. Ce qui générera en court-circuit.

Tout ceci va générer un effet « boule de neige » qui peut à terme, **entraîner la destruction de la machine.**

Remarque : la très grande majorité des conducteurs voit leur résistance électrique augmentée si la température augmente. Seul le carbone, et les matériaux semi-conducteurs réagissent de manière opposée.

Conclusion :

- **Il est absolument obligatoire de limiter au maximum la production de chaleur.**
- Il faudra pour cela utiliser des conducteurs de sections suffisantes ; mais pas trop, pour éviter des coûts excessifs et un encombrement inutile.
- (On rappelle que la résistance des fils diminue si la section de ces derniers augmente.)
- **Il faudra favoriser un refroidissement des machines**, par circulation d'air ou de fluide réfrigéré.

En ce qui concerne le magnétisme.

C'est l'élément roi des effets du courant électrique.

Un courant électrique dans un conducteur va générer autour de celui-ci, un champ magnétique directement proportionnel au courant traversant le conducteur. Ce magnétisme sera caractérisé par un pôle Nord et un pôle sud.

Les polarités magnétiques dépendront exclusivement du sens de passage du courant électrique.

Ce magnétisme peut générer à son tour :

Des forces d'attraction directes, d'attraction ou de répulsion par la présentation au voisinage, d'une autre source magnétique.

Le principe est utilisé :

- Pour les moteurs électriques synchrones.
- Pour les moteurs de type « pas à pas ».

Des forces indirectes :

Par l'application du principe de Laplace qui précise qu'un champ magnétique produit à la perpendiculaire d'une circulation électrique dans un conducteur, va générer une force électromagnétique sur ce même conducteur.

Le sens de la force dépendra du sens du courant, de la polarité magnétique. L'intensité de la force dépendra directement de l'intensité électrique et de l'importance du champ magnétique présent.

La direction de la force sera perpendiculaire aux deux autres phénomènes et se connaîtra par la règle dite des « trois doigts » de la main droite.

Le principe est utilisé :

- Plus particulièrement pour les moteurs à courant continu : moteur continu, machines universelles en série, machines « compound » ou, composée.
- Pour les génératrices à courant continu, qui utilise le principe inverse de Laplace, qui se vérifie en imposant une force sur un conducteur placé perpendiculairement à un champ magnétique fixe. Là aussi, le sens du courant produit par les génératrices dépendra de la règle dite « des trois doigts » de la main gauche.

De l'aimantation résiduelle ou rémanente. Apparition de la notion de cycle d'hystérésis.

Un matériau pouvant être magnétisé peut réagir différentes manières.

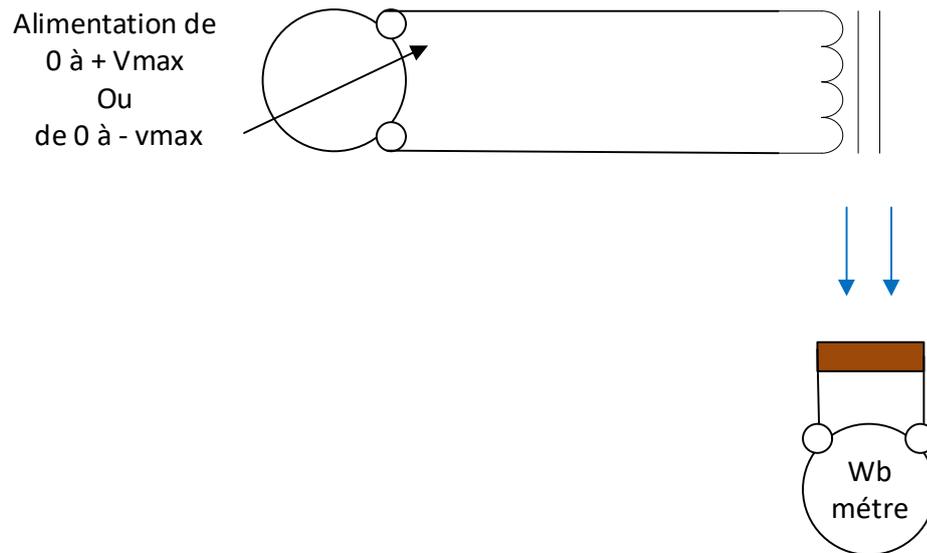
Certains conserveront une certaine aimantation, certains n'en conserveront aucune ; d'autres encore pourront servir isolants magnétiques (très intéressant dans certains cas) ; d'autres encore, ne pourront jamais être magnétisés.

Ces derniers sont qualifiés « amagnétique »

Qu'est-ce que cela signifie « être magnétisé » ?

Pour cela, une petite expérience avec différents matériaux. Certains matériaux sont aimantés **grâce à solénoïde alimenté** par une tension variable pouvant aller d'un maximum positif à un minimum négatif.

Si, pour ces matériaux, on positionne une source alternative et un mesureur de magnétisme là où le flux sera le plus fort ; que constate-t-on ?

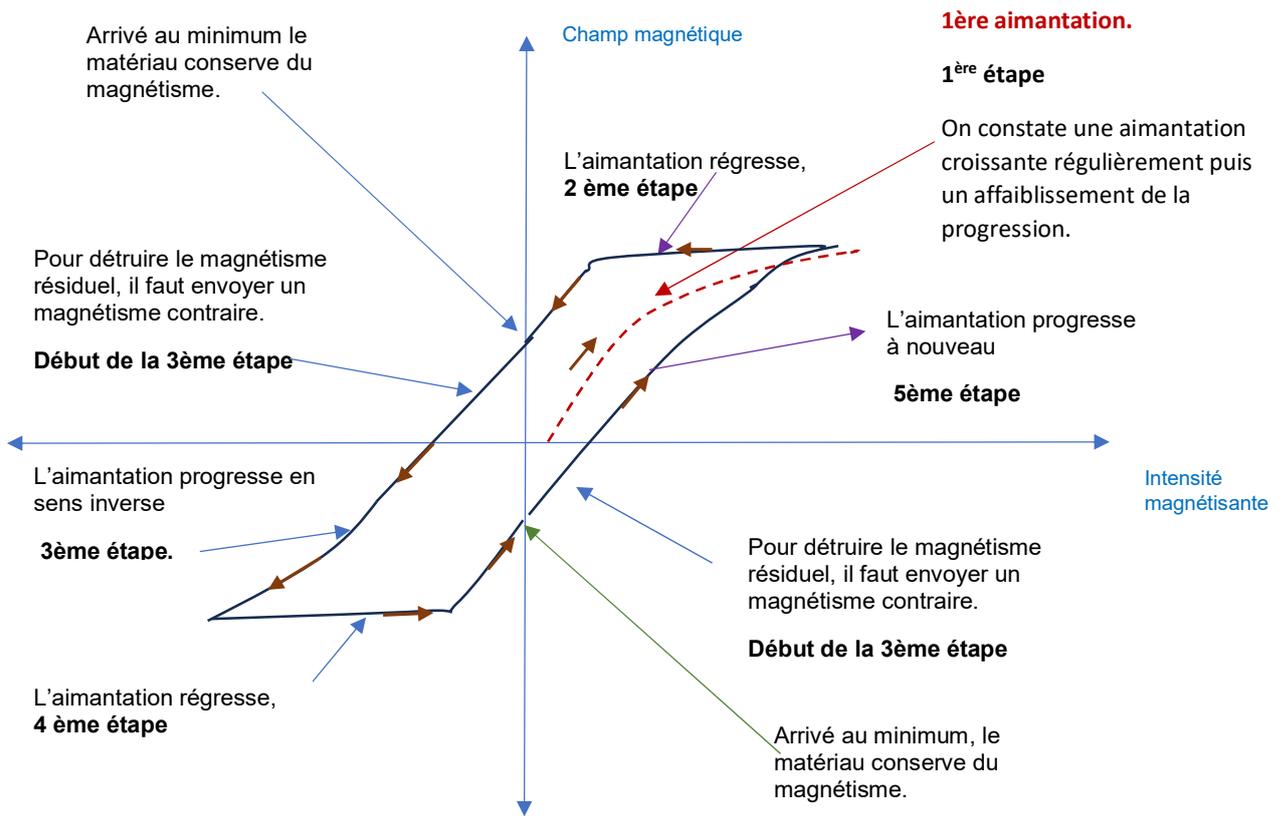


Il y a plusieurs étapes dans la manipulation :

1. Le matériau n'a jamais été magnétisé. Ce matériau va subir une augmentation progressive du magnétisme.
2. Arrivé à un maximum remarquable, on décide de rebrousser chemin et de diminuer le magnétisme imposé pour revenir à une valeur minimale. On constate les effets.
3. On alimente le solénoïde de telle manière que le magnétisme soit inversé par rapport à la première progression. On augmente progressivement le magnétisme inverse.
4. Arrivé à un magnétisme maximum, on diminue l'imposition du magnétisme pour revenir à un minimum.
5. On inverse encore le sens du magnétisme, et l'on refait la même manipulation qu'au début.
6. On constate les effets.

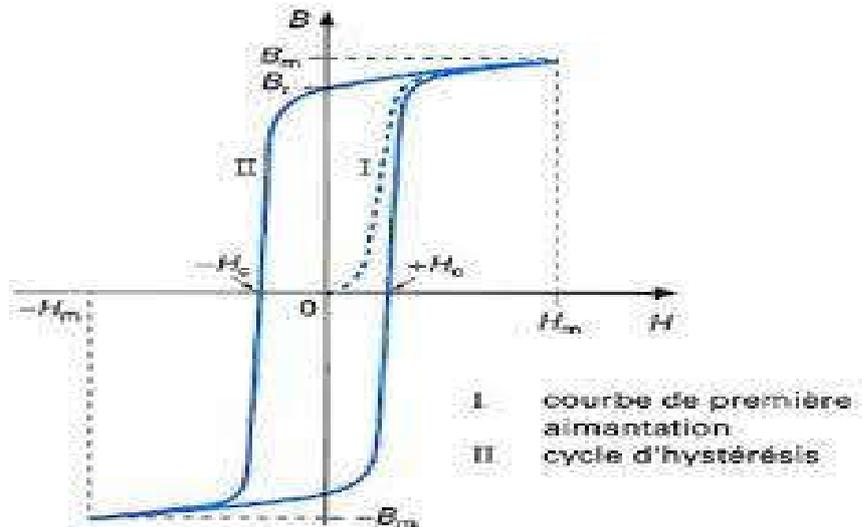
On réalise **la même manipulation avec différents matériaux** et l'on en tire des conclusions.

Pour une expérience avec un matériau magnétisable :



Ce matériau conserve du magnétisme après magnétisation (50%)

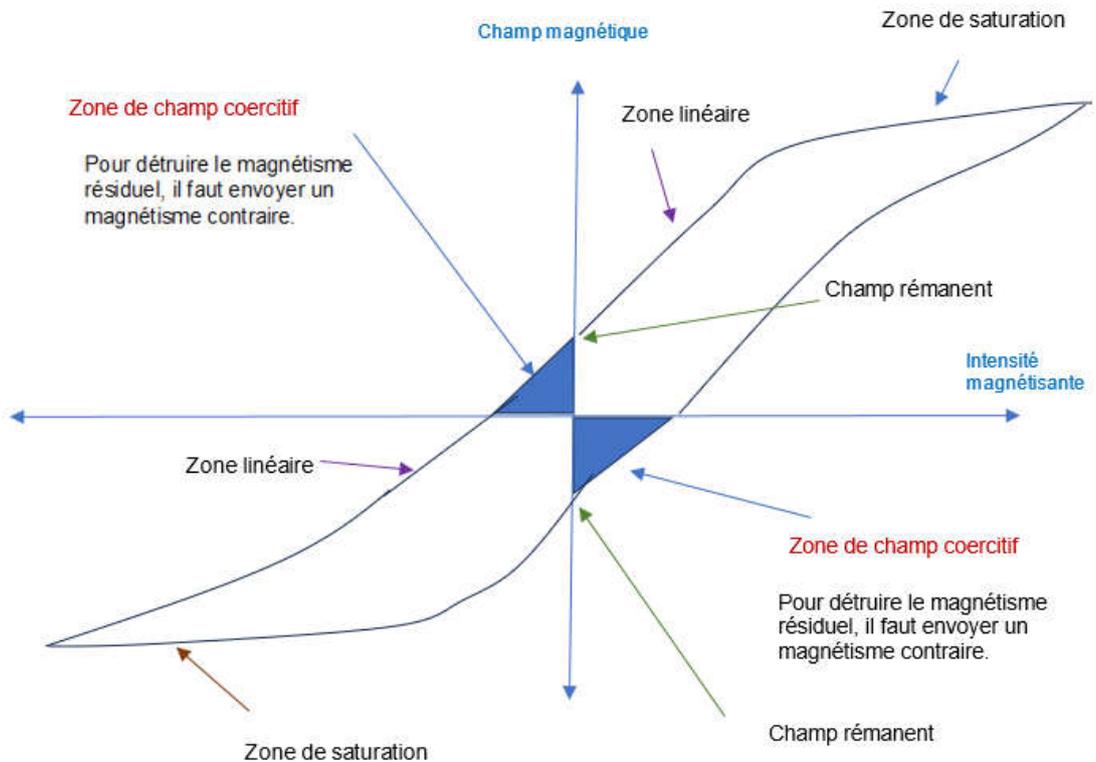
Pour une expérience avec un deuxième matériau magnétisable (de l'acier)



Ce matériau conserve plus de magnétisme que le 1^{er} matériau après magnétisation (85%)

Ces cycles s'appellent : cycle d'hystérésis magnétique.

Il y a plusieurs zones identiques deux à deux, nommées différemment.



La zone linéaire où le magnétisme est proportionnel à l'intensité magnétisante.

La zone de saturation (dangereuse, si l'on s'y trouve. Pour obtenir un magnétisme plus important, il faudra **beaucoup de courant**).

La rémanence, ou la persistance de la dernière aimantation et la zone de champ coercitif qui la suit. Ce qui est ennuyeux pour des structures d'inducteurs qui doivent réagir en fonction de l'aimantation désirée.

Pour éliminer cette aimantation, il faudra dépenser de la puissance.

Ce qui risque d'entraîner une création de chaleur !

Constat et interprétation : alternative ou continue

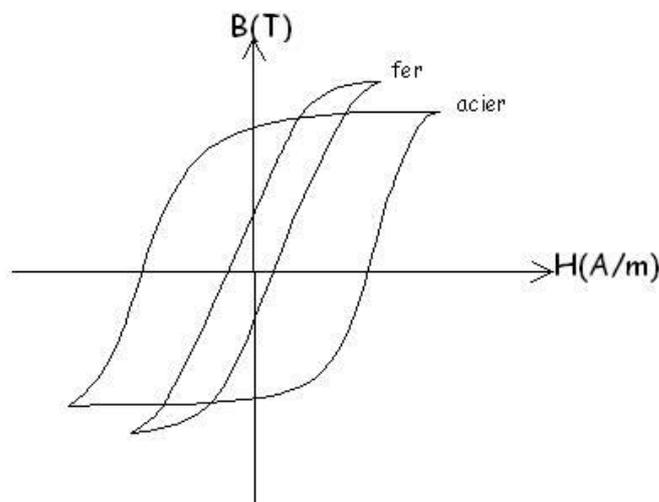
Tout matériau magnétisable qui subit une aimantation alternative ou continue peut éventuellement conserver une aimantation lorsque l'aimantation **qu'on lui a imposée disparaît**.

Certains matériaux en conserve beaucoup ;

Exemple : les matériaux hétérodynes et l'acier.

D'autres beaucoup moins :

Par exemple : le fer doux.



Les problèmes qui se posent :

Pour éliminer le magnétisme résiduel il faut ce qu'on appelle **un magnétisme coercitif**.

Ce magnétisme coercitif, ne peut provenir que d'électroaimant, par le changement d'état magnétique.

La consommation des électroaimants va occasionner une forte consommation d'énergie et donc, **une perte de rendement** il conviendra donc, selon les cas d'utilisation d'avoir des matériaux qui ne **conservent que très très peu de magnétisme résiduel**, et d'autres, (surtout pour ce qu'on appellera plus tard les inducteurs, le magnétisme le plus constant possible.

Il n'empêche, que le magnétisme résiduel va au fil du temps le perdre de sa force et de son intensité. (C'est un Avis toutes les personnes qui font des recherches sur les mouvements perpétuels)

les pertes :

les pertes liées au champ magnétique coercitif exprimé généralement en fonction **du matériau**, de la **fréquence** des changements magnétiques et du **carré de l'induction résiduelle**.

C'est une formule du style : $P_{fer} = B^2_{résiduel} \cdot f \cdot k$

Pour avoir une bonne approximation du phénomène, une « résistance thermique » est parfois citée et utilisée.



$$\text{Pertes par Hystérésis} = R_H \cdot I^2$$

Telle que

$$R_H \cdot I^2 = B^2 \text{ résiduel} \cdot f \cdot K$$

Il conviendra donc d'avoir les matériaux les plus perméable possible au magnétisme, lorsque ce principe d'utilisation s'applique.

Il conviendra aussi que la « résistance » par Hystérésis soit la plus grande possible

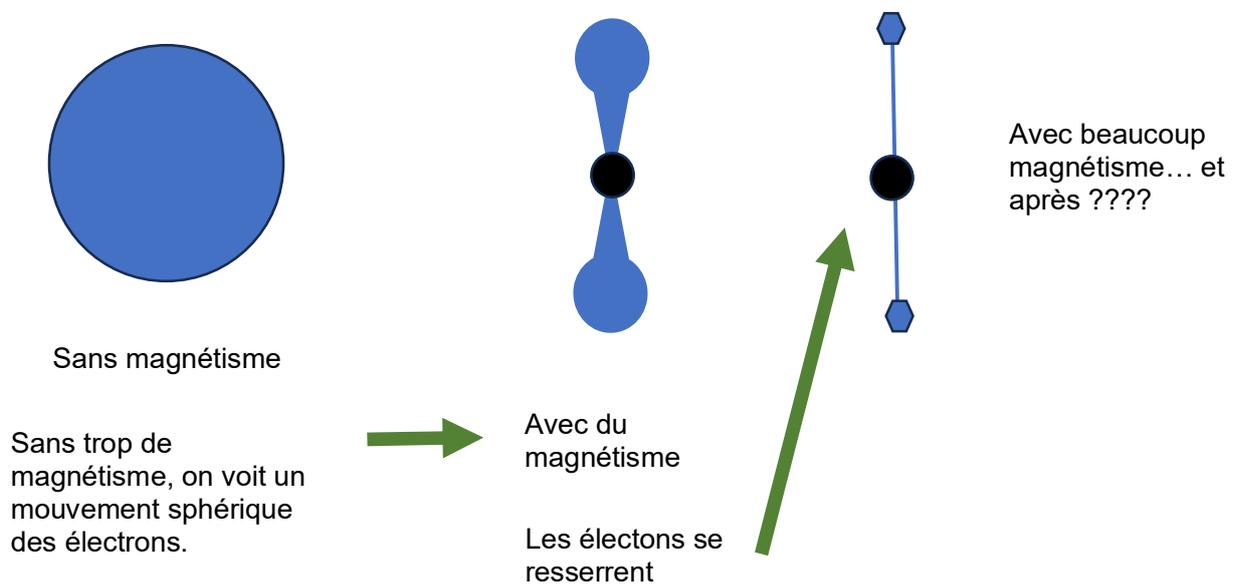
Les problèmes de saturation.

Il est possible de constater que si l'on augmente indéfiniment l'aimantation d'un barreau celui-ci **ne peut suivre**. Cela s'appelle la saturation.

Sans rentrer dans le domaine atomique, l'on pourrait dire que lorsqu'il y a une aimantation dans un barreau pouvant se magnétiser, **on constate que les électrons se positionnent tous dans la même direction** et perdent donc leur caractère de mobilité sphérique.

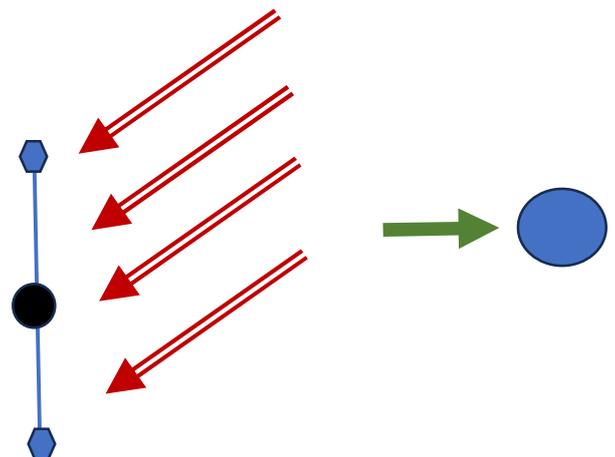
Ils se regroupent tous. Par contre, il n'est pas possible qu'ils se regroupent à l'infini ce qui **explique la notion de saturation**.

Il faut aussi savoir, que la saturation, c'est-à-dire la progression difficile du magnétisme en fonction d'une aimantation est quand même possible que les courbes sont asymptotiques. **C'est-à-dire que si l'on insiste**, on peut arriver à des intensités magnétiques énormes, mais nécessitant une **très grande consommation** énergétique.



SiApparition de chaleur = énergie calorifique... = rayonnements = ...

Les électrons reprennent une orbite propre à leurs énergies emmagasinées, **Mais aussi**, reprennent leur **mouvements sphériques** et ainsi perdent leurs caractéristiques magnétiques



Il faut noter une chose essentielle : L'apparition de chaleur à proximité du matériau utilisé a tendance à détruire cet ordonnancement c'est la raison pour laquelle le magnétisme et la chaleur ne sont pas des amis.

À savoir :

La perte d'énergie par destruction des champs coercitifs **s'ajoute** aux autres pertes calorifiques comme celle par l'effet Joules ou les courants de Foucault cités par la suite.

Il convient donc d'avoir des circuits magnétiques les moins magnétisables. Les industriels y travaillent.

Magnétisme produisant des courants électriques induits.

Il faut pour cela des champs magnétiques variables dans le temps.

Selon le principe de LENZ :

Tout matériau conducteur subissant une variation dans le temps de flux magnétique, va induire un courant électrique, dont les effets vont avoir tendance à s'opposer à la cause qui leur a donné naissance.

En gros, si les courants induits sont provoqués par la rotation d'une source magnétique ; alors, le courant électrique va produire à son tour un champ magnétique qui va essayer de freiner, de diminuer la rotation. (Mais, sans la bloquer, sinon, il n'y aurait plus de flux variables)

Le principe est utilisé :

- Pour les machines asynchrones monophasées et triphasées.
- Pour tout ce qui est freinage électrique, de camions, ascenseur...
- Pour tous les moteurs, pouvant être forcé à travailler en mode générateur. (Dans ce cas, des courants induits sont récupérés au titre des économies d'énergie, par la recharge du générateur qui permettait le fonctionnement en mode moteur.)

Le magnétisme peut lui aussi générer un effet pervers, si le magnétisme est variable.

Une variante « maléfique » de la loi de Lenz : les courants de Foucault.

Si un magnétisme variable dans le temps, est produit au voisinage d'une masse conductrice (et non plus auprès d'un fil conducteur bien structuré) ; ce magnétisme variable **va induire** à l'intérieur de la masse des courants électriques qui vont se reboucler sur eux même, en court-circuit.

Ces courants électriques sont généralement produits perpendiculairement au champ magnétique.

L'apparition de ces courants électriques appelés « courants de Foucault » vont provoquer un fort échauffement, si les matériaux magnétiques utilisés ne sont pas adaptés.

L'échauffement produit va s'ajouter à l'effet joules produit par la circulation du courant dans les conducteurs.

Pour limiter ces courants de Foucault :

- L'on utilise des matériaux **conducteurs magnétiques finement feuilletés**, perpendiculairement à la circulation du magnétisme et isolés sur deux faces. Ainsi, le magnétisme peut circuler, mais les courants de Foucault sont fortement réduits.
- Une deuxième variante utilisant le même principe que ci-dessus est utilisée avec ce qui s'appelle « **des circuits magnétiques à cristaux orientés** ».

Dans ce cas, l'effet feuilleté est réalisé par des limailles de fer extrêmement fines.

L'orientation des grains est obtenue par l'imposition d'un champ magnétique constant et puissant qui oriente les cristaux.

L'ensemble est noyé dans un ciment adapté.

Les circuits magnétiques sont généralement moulés et, lorsque l'ensemble est solide, le circuit est directement utilisable.

Les seules utilisations possibles des courants de Foucault :

- Les structures à souder.
- Certains fours à émaux.
- Des plaques à induction.

Conclusion :

Pour toutes les machines utilisant le magnétisme, ***il faut plus que tout :***

- Favoriser celui-ci.
- Il faut limiter l'échauffement, puisque l'échauffement diminue le magnétisme.
- Il faut éviter les fuites magnétiques en favorisant des matériaux performants.

L'ennemi, reste et restera la chaleur !

Les moteurs asynchrones.

Les moteurs asynchrones furent inventés par Monsieur Nikola Tesla qui s'est surtout intéressé à l'usage de l'exploitation du courant électrique alternatif.

Il a aussi imaginé l'usage des transformateurs permettant la modification des caractéristiques électriques des générateurs alternatifs, ainsi que le transport sur de grandes distances du courant alternatif.

Principes de base :

La loi de Lenz, fut exploitée efficacement !

Un courant électrique alternatif, (donc variable dans le temps), va produire un champ magnétique alternatif (variable lui aussi), dans une bobine excitatrice.

Ce champ magnétique alternatif, généré au voisinage de conducteurs rebouclés sur eux même, va induire des courants alternatifs dans les conducteurs.

Les courants alternatifs induits vont générer à leur tour avec un léger décalage du magnétisme. Ce magnétisme est lui-même alternatif.

Si les conducteurs sont correctement positionnés, le magnétisme induit va générer une force d'attraction du fait de l'existence du magnétisme produit par la bobine excitatrice.

Qui fait que le magnétisme induit va essayer de « rattraper » le magnétisme produit par la partie excitatrice, par attraction « Nord-Sud »

Remarque :

Le magnétisme induit ne va pas rattraper le magnétisme produit ; et c'est tant mieux !

En effet, si cela était le cas, **il n'y aurait pas de variations magnétiques** imposées aux conducteurs rebouclés sur eux même.

Selon la loi de Lenz, il ne pourrait pas de ce fait, y avoir induction de courant. Il n'y aurait pas non plus, de magnétisme résultant de cette variation.

Une analogie qui nous provient du Moyen Âge :

C'est celle qui était alors en pratique dans les familles aisées, pour avoir de la viande de grillé avec un tournebroche.

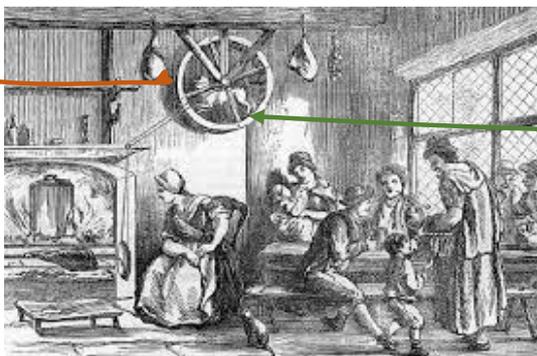
1. Il fallait mettre dans un cylindre suffisamment grand, un chien, avec comme compagnons des braises ardentes.
2. Le cylindre était relié par des engrenages adaptés à la broche.
3. Si le cylindre tournait, la broche était entraînée à son tour.
4. Le principe était le suivant :

Lorsque le cylindre était en position de repos les braises ardentes rejoignaient les pattes du chien.

Le chien avait mal (**on le comprend**) et essayait de fuir

En fuyant, les braises retenues par le cylindre, remontait et elles épargnaient le chien. (Cela correspond à la différence de flux qui existerait entre champ magnétique tournant et un report légèrement en retard)

Si le chien ralentissait sa course, les braises retombaient sur ses pattes (cela correspond encore une fois, à cette notion de variations de champ magnétique qui induit des phénomènes spécifiques.)



En bref, si le chien s'arrêtait de courir, il se brûlait les pattes.

5. S'il continue à courir, il échappait à la brûlure, et le tournebroche continuait à fonctionner.
6. S'il ralentissait, il recommençait à se brûler pattes et donc, il recommençait à courir

L'histoire ne dit pas, à quel moment on changeait le chien, était-il encore vivant ?

Était-il suffisamment grillé pour être consommé par les hôtes de la maison ?

Fallait-il changer de chien pour recommencer l'aventure ?

Il faut reconnaître que **Tesla et tous ceux** qui l'auront suivi, n'étaient pas aussi cruels, ou **alors n'aimait pas la viande tournée ainsi** aux tournebroches

Principe des champs tournants

Il s'agit d'un autre physicien, Monsieur Leblanc, qui a travaillé sur le principe. Il a édicté plusieurs principes qui sont de nos jours, toujours utilisés.

Pour créer un champ magnétique tournant, il faudra autant de bobines qu'il y aura de phases permettant d'alimenter toutes les bobines.

Les bobines devront être disposées sur la surface d'un cylindre conducteur du magnétisme.

Les bobines devront être disposées avec un angle identique à l'angle de déphasage de chacune des phases. Si le nombre de bobines par phase, est exprimé par paires (pour avoir la parité Nord-Sud ; alors il conviendra de viser l'angle par le nombre de paires de pôles.

L'angle sera égal à $\frac{2\pi}{\text{Nombre de phases} \times \text{Nombre de paires de pôles}}$

Ce qui signifie :

Nombre de phases	Nombre de paires de pôles				
	0	1	2	3	
1	<i>Impossible, il y aura automatiquement génération d'un deuxième pôle.</i>				
	Angle de positionnement des paires de bobines				
	$\pi = 360^\circ$		$= 180^\circ$	$= 90^\circ$	
	Remarques				
<p>Cas particulier du moteur à lancer à la main.</p> <p>ou</p> <p>Cas particulier nécessitant l'emploi d'un condensateur ; appelé « condensateur de démarrage » permettant de produire un déphasage adéquat</p> <p>(Explication spécifique donnée par la suite)</p>					
2	<i>Possible, mais possibilité non exploitée.</i>			
	Angle de positionnement des paires de bobines				
	$2\pi/2 = 180^\circ$		$= 45^\circ$	$^\circ$	
Cas particulier nécessitant un positionnement particulier et un alimentation spécifique					
3	<i>Possible, mais possibilité non exploitée.</i>			
	Angle de positionnement des paires de bobines				
	$2\pi/2 = 180^\circ$	$2\pi/3 = 120^\circ$	$2\pi/4 = 60^\circ$

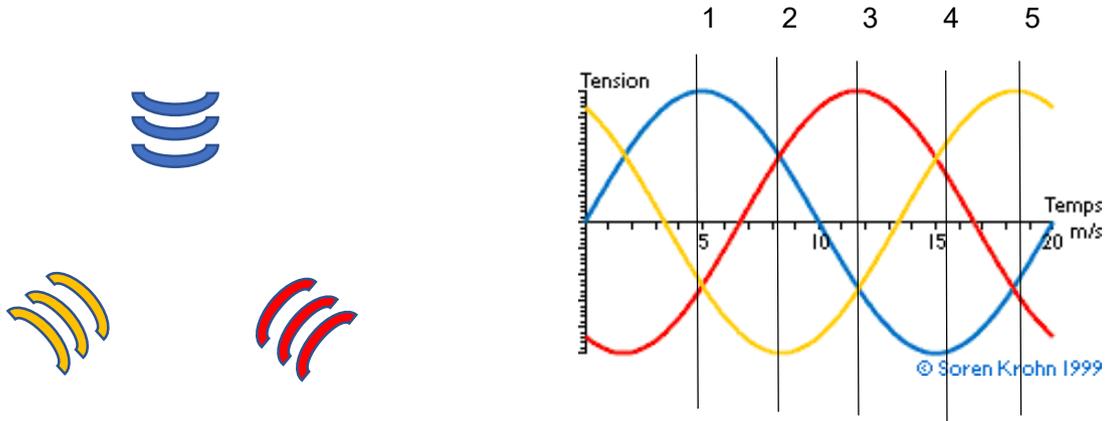
Le nombre de phase peut être supérieur à 3. (6 = alimentation exphasée). Cela se trouve dans es alternateurs automobiles. Ce qui permet après redressement à obtenir un courant très proche du courant continu, permettant la recharge des batteries.

Cela se trouve aussi dans les alternateurs utilisés dans l'aviation, produisant du 600 Hz, pour éviter les perturbations parasites avec le 50 HZ et le 60 HZ (produit par certains pays anglosaxons).

Comment se créer un champ magnétique tournant ?

Deux cas se présentent :

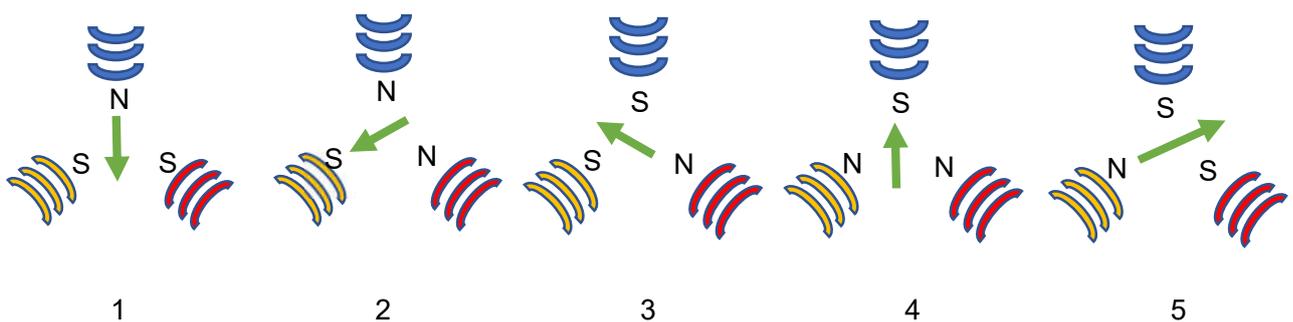
Le moteur est alimenté en triphasé. Dans ce cas selon les principes de Monsieur Leblanc, chaque bobine alimentée par une phase devra être disposée à l'intérieur d'un retour avec un angle identique à l'angle de déphasage constaté pour chacune des phases.



- Si l'on admet que la bobine bleue est alimentée par la phase « bleue »
- la bobine jaune est alimentée par la phase « jaune » .
- La bobine rouge par la phase « rouge » .

- Si l'on admet que chaque fois que les bobines sont alimentées par une **alternance positive**, elles **produisent un pôle Nord** dont l'intensité magnétique est fonction de l'intensité du courant traversant la bobine.

Il suffira alors de se positionner par exemple sur chacun des extrêmes pour s'apercevoir que le champ magnétique produit « tourne »



Remarque : si l'on permet alimentation d'une phase, le magnétisme « tournera » dans l'autre sens. Ceci explique le changement de sens de rotation pour les moteurs asynchrones.

Cas du moteur alimenté en monophasé.

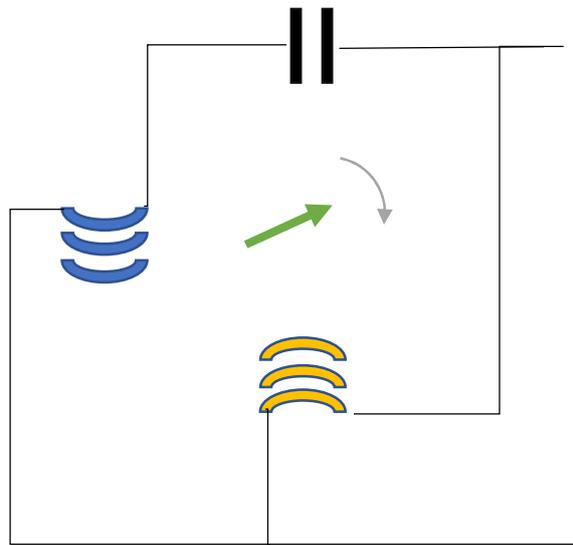
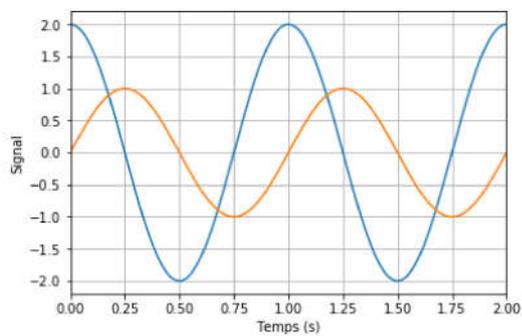
1. Dans ce cas il existe deux possibilités :

On crée une phase artificielle dont l'angle de déphasage sera de 90° dans ce cas, il suffit comme le préconisait Monsieur Leblanc de positionner de bobinages distincts décalés dans l'espace de 90° .

Les deux bobinages sont alimentés par la même chose alternatif.

Le déphasage de 90° de la phase est obtenu par l'adjonction d'un condensateur qui apporte ce déphasage.

L'existence de ces deux phases génère de la même manière que précédemment, un champ magnétique tournant.

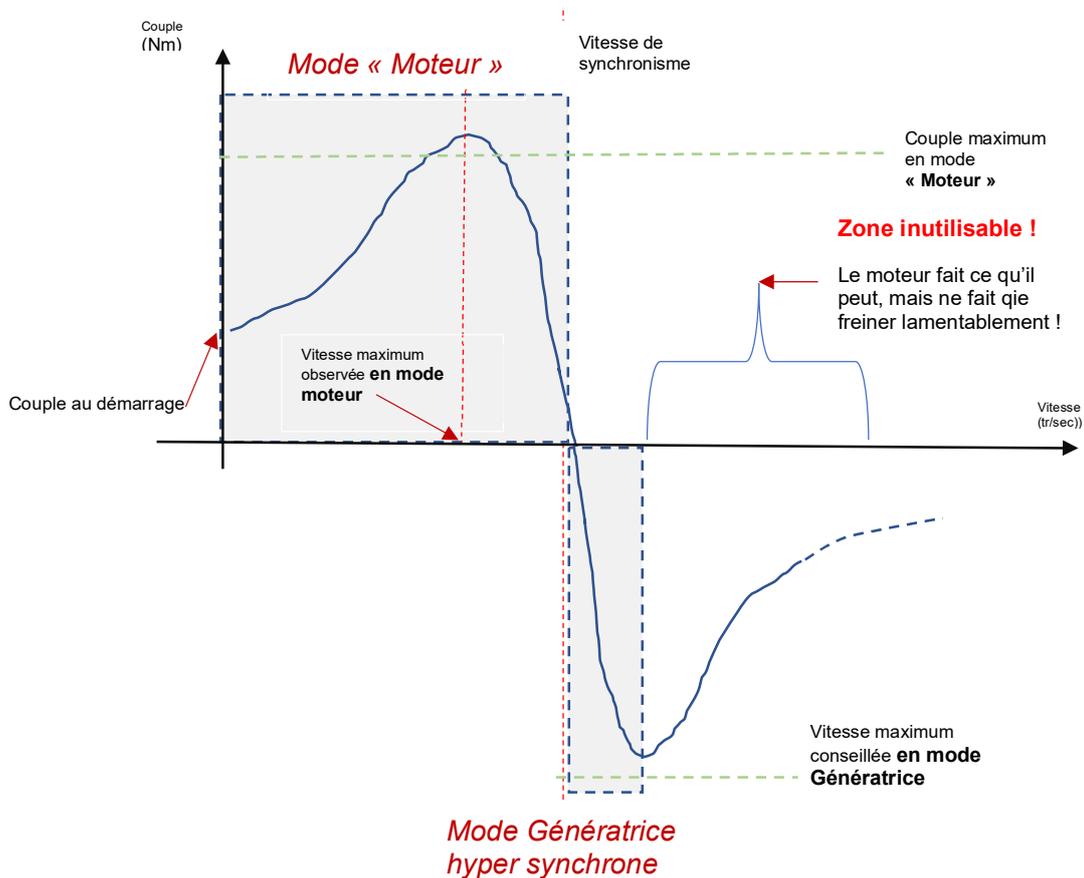


2. Couple fourni par un seul magnétique tournant.

Après de savants calculs totalement absents de cet ouvrage, il fut mis en évidence une courbe identique aux moteurs asynchrones triphasés et ceux monophasés, avec enroulement de démarrage.

Cette courbe une caractéristique des moteurs asynchrones qui est resté longtemps inconnu des apprentis électriciens.

Ce type de moteur est capable de fonctionner en génératrice !



Le principe décrit ci-dessous, est utilisé en France (pas en Allemagne avec un système plus compliqué.... Il y a des problèmes de frais et de composants électroniques de puissance, qui font que.....).

Le moteur est couplé avec des éoliennes. (Généralement les éoliennes peuvent avoir des pales qui rentrent en rotation pour bénéficier du maximum du vent.)

Le moteur que l'on veut utiliser **en génératrice hyper synchrone** est d'abord alimenté comme moteur asynchrone classique.

Le moteur se met à tourner.

(Ce qui permet aux détracteurs, que ces génératrices ne servent à rien à rien ! Et qu'elles ne sont créées pour faire croire que l'on lutte inutilement contre les déperditions d'énergie.)

Le moteur va se mettre à tourner et l'on va envoyer suffisamment d'énergie pour qu'on atteigne la vitesse maximale en mode synchrone.

Si le vent est suffisant, il va entraîner les pales, connectés au moteur. Dans ce cas, **en jouant sur l'inclinaison des pales**, on va faire tourner le moteur à une vitesse légèrement supérieure à la vitesse de synchronisme.

À ce moment-là, **le déphasage du courant électrique envoyé au moteur va s'inverser**.
Le moteur ne va **plus absorber**, mais au contraire **en fournir et alimenter** un réseau.

Le principe français, est tributaire de la vitesse et de la puissance du vent. En effet, il faut régler la vitesse de rotation des pales pour obtenir du 50 Hz.

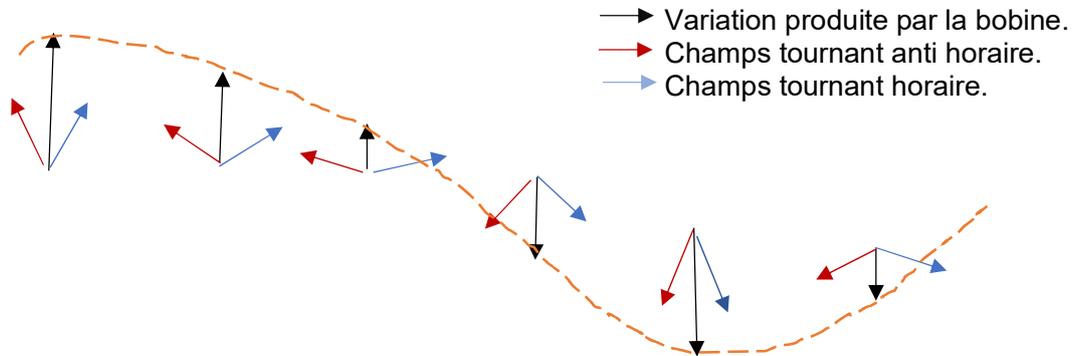
Sans rentrer dans les détails du principe allemand, il se désolidarise de la vitesse du vent mais nécessite des convertisseurs d'énergie capable de produire du 50 Hz avec des tensions produites de fréquences inférieures.

En gros, cela fonctionne qu'il y ait beaucoup ou peu de vent.

3. Il est aussi possible de faire fonctionner un moteur monophasé sans condensateur et sans enroulement auxiliaire.

Dans ce cas, Monsieur Leblanc a démontré qu'une seule bobine produisant un champ magnétique alternatif produisait en réalité deux champ magnétique tournant en sens inverse.

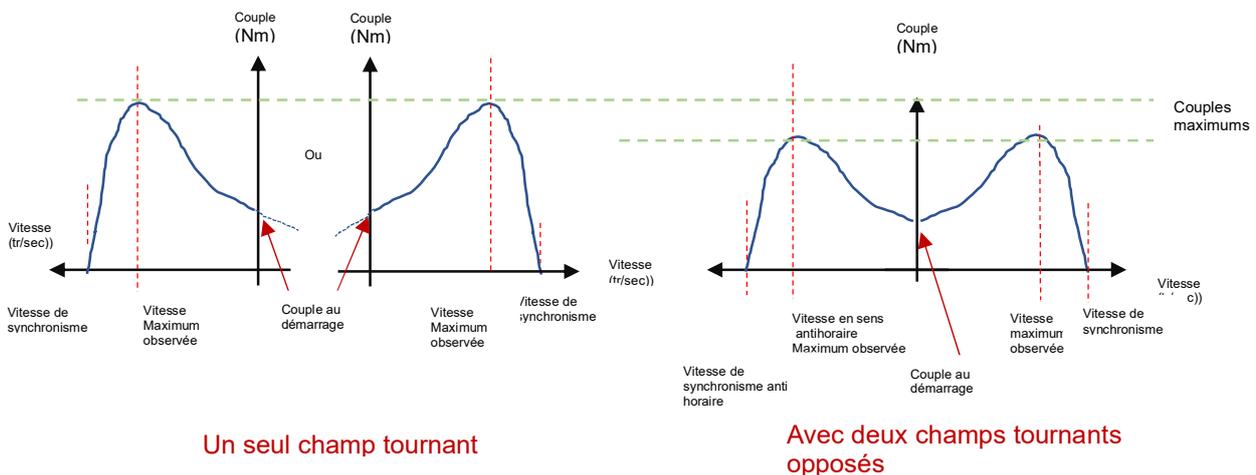
Compte tenu des caractéristiques mécaniques des moteurs alternatifs, on s'aperçoit que les courbes de couple en fonction de la vitesse (non étudiée dans le détail dans cette présentation) présentent un minimum de couple au démarrage et un maximum au fur et à mesure que l'on se rapproche de la vitesse maximale ; **quel que soit le sens.**



Ce qui signifie qu'il serait possible de forcer le moteur à tourner dans un sens, compte tenu que le couple moteur est très faible vitesse faible et dans ce cas, au fur et à mesure que le moteur accélère c'est l'effet d'un des deux champs tournants qui va l'emporter.

Ce type de moteur est surtout réservé pour des petites utilisations comme du petit électroménager. En effet ce type de moteur peut être lancé à la main.

Remarque importante : si les moteurs monophasés précédemment cités voient leur enroulement auxiliaire détruit, il va se trouver dans la même configuration que moteur à lancer. **Cela peut être extrêmement dangereux.** Si le moteur est à l'arrêt, puis redémarré, il ne tournera pas, ou bien, il risque de tourner **dans un mauvais sens.**



Un constat : Lorsqu'il y a deux champs tournants opposés, le couple maximum est réduit. Ceci est dû au fait que la courbe est la résultante d'une somme de deux courbes qui présentent chacune, un couple résistant si l'on observe leurs parties en sens opposé de leur sens de rotation dominant.

Le « truc » des électriciens bobiniers.

Lorsque nous nous trouvons face à un champ magnétique tournant, il est possible de le visualiser par le truc des rembobineurs. Ils mettent une bille d'acier, ou un roulement à billes sur le stator dépouillé de son rotor. Ils alimentent sous faible tension et : miracle ! L'objet cylindrique va se mettre à tourner !

Je n'ai pas trouvé d'images correspondant à cette affirmation. Je le regrette.

Complément sur les champs magnétiques tournant.

1. ***Si l'on positionne à l'intérieur de stator fournissant un champ magnétique tournant, un rotor constitué de matériaux non polarisés magnétiquement,*** ce sont les effets de la loi de Lenz qui vont s'appliquer.

Le moteur donnera une vitesse maximum très légèrement inférieure à la vitesse qu'il serait en droit de tourner compte tenu de la fréquence d'alimentation du moteur.

Cette différence se nomme : **le glissement.**

Ce type de moteur prendra le nom de moteurs asynchrones.

2. ***Si l'on positionne à l'intérieur de stator fournissant un champ magnétique tournant, un rotor constitué de matériaux polarisés magnétiquement,*** par des aimants par exemple.

Le moteur donnera une vitesse maximum égale à la vitesse qu'il est en droit de tourner compte tenu de la fréquence d'alimentation du moteur.

Il n'y a pas de glissement

Alors, ce type de moteur prendra le nom de moteurs synchrones.

Moteur Pas à Pas.

Ce type de moteur s'apparente aux moteurs synchrones. Ce type moteur existe grâce aux avancées fulgurantes de l'électronique de puissance et par la création d'aimants permanents de très fortes intensités magnétiques.

- **Par l'électronique tout d'abord**, grâce à l'existence de circuits intégrés capables de fournir autant de « phase » que l'on ne veut, avec une seule contrainte : le nombre de phases correspond à une puissance de 2. (2,4, 8, 16, ...).

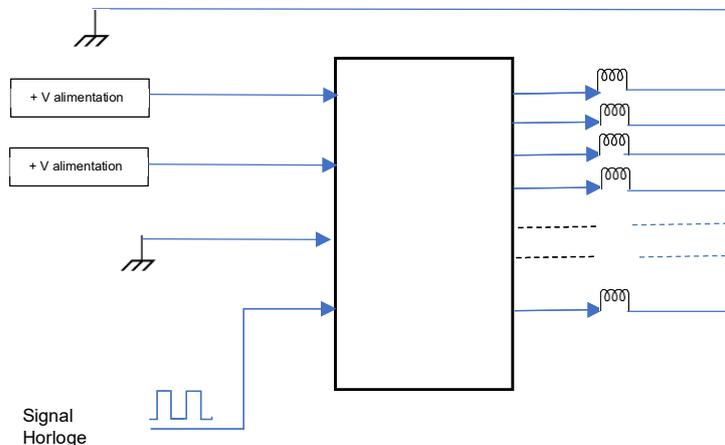
Chaque phase va alimenter autant de bobines il y a de phases. Le montage sera de type **étoile**.

L'alimentation s'effectue en courant continu et avec deux potentiels opposés.

L'alimentation des bobines s'effectue de manière hachée. Chaque bobine reçoit séquentiellement, un échelon de tension, de telle manière de façon à créer une alternance Nord Sud, permettant à la fois d'attirer un des aimants une bobine, et de créer une force de répulsion simultanément, par une bobine précédente. (Selon le sens de rotation).

Les circuits intégrés **agissent de manière séquentielle** et doivent être alimenté par un signal d'horloge, de fréquence donnée.

En fonction de la fréquence du signal d'horloge, la rotation de ce type de moteur sera plus ou moins importante.



Ce type de moteur fut nommé « **moteur pas à pas** » car il était possible de faire tourner le rotor par petit échelon de rotation accompagnée par un arrêt. C'est un peu ce qui se passe lorsque l'on marche ou que l'on monte un escalier.

Il existe quatre types de moteur pas à pas.

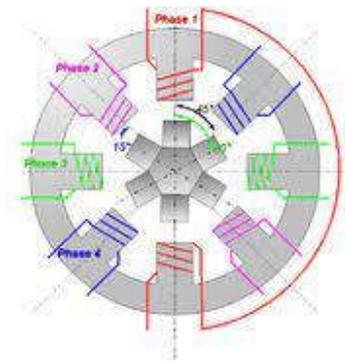
(Images prélevées sur :www.omc-stepperonline.com)

1) Dans l'ordre de la création, le premier type de moteur fut un moteur nommé « moteur à réluctance variable ».

Les bobines sont sur la partie statique. Sur la partie tournante (rotor) se trouve un assemblage de métal être magnétisé. Dans ce cas en fonction de l'évolution de la magnétisation, les lignes magnétiques vont trouver un chemin favoriser par la rotation du rotor.

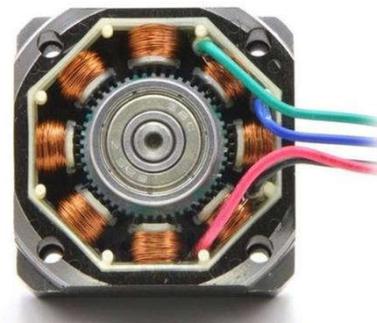
Le principe consiste à l'utilisation de la règle du flux maximum qui indique que des forces vont se créer sur une pièce métallique afin de favoriser la circulation du champ magnétique.

Le stator entoure le rotor. Le moteur présent un aspect classique. La carcasse protège l'environnement du rotor.



2) Par la suite sont arrivés les moteurs à aimants permanents.

Avec les bobines sur la partie statique (stator) et les aimants permanents sur la partie tournante (rotor). Le stator entoure le rotor. Le moteur présent un aspect classique. La carcasse protège l'environnement du rotor.



Les premiers modèles étaient constitués de pôles magnétiques permanents identiques au nombre de bobines.

Ils présentaient un inconvénient majeur : les échelons de rotation dépendaient des dimensions du stator.

Plus le stator avait un **faible volume** plus les « sauts » étaient importants, car il était difficile de positionner dans un stator de petite dimension, beaucoup de bobines.

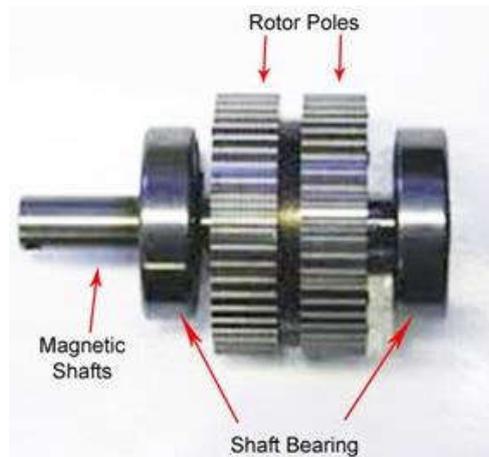
Inversement, plus le **volume du stator était important** plus le nombre de bobines pouvait être élevé et les « sauts » étaient petits.

Une solution fut trouvée pour réaliser des moteurs pas à pas de faible volume. Celle-ci consistait à positionner deux, ou quatre, ou....., blocs magnétiques et de les découper un peu comme un peigne.

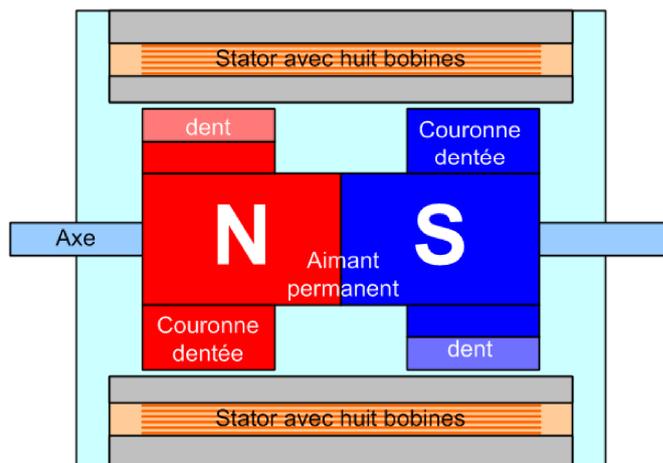
Le nombre de pôles cirés est réalisé par la découpe **de deux barreaux** magnétiques identiques, qui vont être entrelacé

Les polarités vont se trouver obligatoirement alternées. Ce type de rotor ne peut être assemblé « à la main », ou bien démonter. Le risque est de court-circuiter les pôles magnétiques.

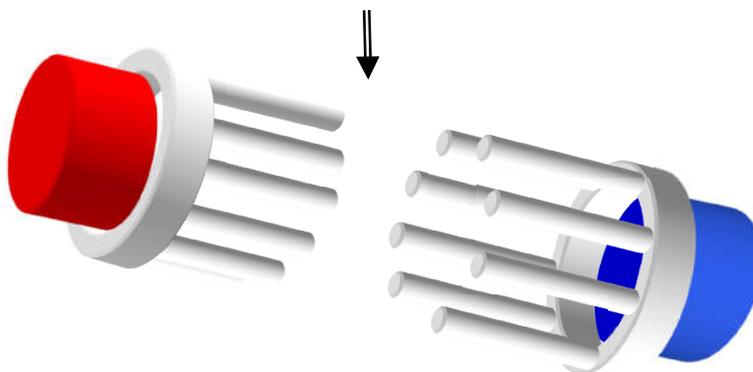
Chaque barreau est creusé de telle manière que l'on obtienne un nombre de pôles, le plus souvent égal au **nombre de phases fois un et demi.**



Un exemple plus compréhensible :



Si un pôle Nord est au centre de ce peigne, **il va générer** plein de « Nord » aux extrémités des « dents »

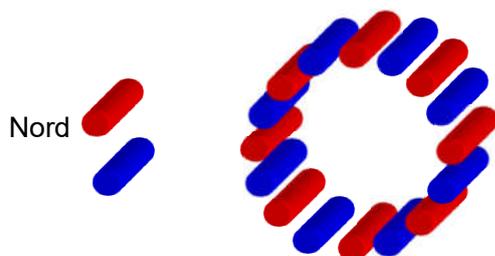


Si un pôle Sud est au centre de ce peigne, **il va générer** plein de « Sud » aux extrémités des « dents »

Les peignes vont se magnétiser, par influence.

Une fois assemblé, les deux peignes vont transmettre du fait de leur réluctance, le magnétisme issu du pôle sur lequel ils étaient.

Il s'ensuivra un fractionnement du magnétisme et une création d'une alternance de paires de **Les bobines du stator vont aussi produire une polarité.**



Celle-ci va produire une force d'attraction ou de répulsion, au niveau du rotor.

Comme le « peigne » est fixé sur une bague, **il va aussi y** avoir, une conduction magnétique, permettant l'application du principe de flux maximum.

Le nombre de positions obtenues, ou de « pas » sera égale **au produit** du nombre de bobines stator **par** nombre de « dents » sur le « peigne » Ici ce serait $8 \times 16 = 128$ pas

3) Un troisième type de moteur pas à pas fut créé.

Ce type de moteur combine les principes combinés des moteurs à aimants permanents découpés et ceux utilisant la réluctance.