

LP-Conversion Electromagnétique de puissance

- VMC et sèche cheveu 100W
- 300 W homme
- 65 kW renault zoé électrique
- 8 moteurs de 1 MW une rame (450 personnes) TGV atlantique
- 1 300 MW « tranche » nucléaire
- **Prérequis : action des forces de Laplace, loi de l'induction, système triphasé, Puissance apparente activé réactive.**
- Nous allons nous demander comment convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique. Les machines qui illustrent parfaitement ce phénomène sont les moteurs (ex : ventilateur) ou génératrice (ex : turbine centrale).
- La gamme de puissance des machines est très large. Les tailles sont aussi très variables.
- J'ai utilisé le terme moteur, génératrice (machine terme générique). Machine : deux parties distinctes : rotor et stator. But : convertir la puissance reçue (méca./élec.) en puissance fournie (élec./méca. resp.). La conversion se fait faire au moyen d'un ou plusieurs champs magnétiques (aimant ou électroaimant) ie. grâce aux lois de l'induction et aux Forces de Laplace.
- Bilan de puissance (cf slide) : On introduit l'idée de bilan de puissance pour avoir en tête que l'on parle de système industriel. Les pertes seront joules, foucault, hystérésis.
- Moteur vs Générateur : (cf 4 quadrants).
- **Annonce du plan : (i)** A partir d'un exemple théorique simple (permettant de dériver totalement les calculs, nous allons comprendre la conversion de puissance. **(ii)** Nous verrons le lien avec machine courant continue **(iii)** machine synchrone asynchrone.

I- Base de la conversion de puissance : exemple des rails de Laplace (7min)

- https://www.youtube.com/watch?v=QK_irRFTM-U
- **Intérêt :** Une expérience simple (car géométriquement simple) permet de mettre en évidence le principe des moteurs / générateurs. Expérience à visée pédagogique pour comprendre avec des équations simples. Retrouver les lois du moteurs A courant continu. Montrer que l'on est capable d'orienter un circuit correctement !
- **P502 Cap prepa PSI :**
- **Fonctionnement en générateur :** Un opérateur tire sur la barre. (moteur, turbine entraînée par un barrage). D'après les lois de l'induction, force électromotrice est créée. Loi de Lenz, l'induction, par ses effets, tant à s'opposer aux causes qui lui ont donnée naissance. Résistance à la traction donc force (heureusement car si pas de force, pas de puissance, et pas de conversion de puissance). La puissance exercée par l'opérateur, où va -t-elle se transmettre ? Eh bien sous une forme électrique $P_e = e i$ avec e la force électromotrice (comme s'il y avait une force dans le circuit) !
- **Fonctionnement en moteur :** On met un générateur. On se dit que c'est bête, la puissance du générateur va être convertie en effet joule. Non car présence d'un champ

magnétique et courant + champ magnétique = Force de Laplace. Une partie de la puissance électrique va être convertie en puissance mécanique. La puissance mécanique va engendrer un mouvement donc un champ électromoteur (induction de Lorentz) donc une force électromotrice. Loi de Lenz elle s'oppose à la source de courant.

On obtient les formules suivantes : $e = -vBl$ et $F = ilB$ ex. Qui seront similaires dans une certaine mesure à celles du moteur à courant continu.

II- Machine à Courant Continu

- **Objectif :** faire le lien avec la partie précédente. Faire comprendre la substantifique moelle du principe. Détailler les avantages et inconvénients et aspects pratiques.
- **Source :** [p509 et 905 du Renvoizé PSI A photocopier !!!!]

A- Principe de fonctionnement

- **Inducteur :** ce qui va créer le champ primaire (lien avec rail Laplace)
- **Induit :** Celui qui va subir les effets de l'induction (ie champ électromoteur, courant induit)
- Le principe est le même que celui des rails de Laplace.

(i) *Fonctionnement moteur : En présence d'un champ magnétique, un conducteur traversé par un courant = Action de Laplace → mouvement donc conversion de puissance électrique en mécanique. Se traduit par une force électromotrice (noté e) (ou plutôt contre électromotrice) qui s'oppose au mouvement (heureusement sinon il n'y aurait pas de conversion sans résistance).*

(ii) *Fonctionnement Générateur (Ce n'est pas très utilisé dans ce mode de fonctionnement) : Le rotor est mis en mouvement (ex : dynamo) l'induction de Lorentz produit une force électromotrice*

- **Animation** (pour assimiler ce qu'on vient de dire et introduire la nécessité de balai collecteur) :
https://sitelec.org/applets/walter_fendt/electricmotor_f/electricmotor_fr.html
- **A quoi sert le système balai collecteur ?** : On s'aperçoit que la valeur moyenne du couple est nulle. On représente la « sinusoïde » du couple en fonction de l'angle pour un système bipolaire simple (attention pas quadrupolaire ! Chaque difficulté en son temps...). Il faut absolument inverser le sens du courant si on veut tourner dans un sens. On reste sur une explication monopolaire avec un bobinage simple tel que dans l'exercice du Renvoizé. Le collecteur sert à ce que le couple négatif devienne positif ! Sur une période angulaire, le couple varie beaucoup. On utilise des enroulements de spires légèrement décalées afin de lisser le couple. Le moment magnétique global est orthogonal au champ et donc le couple est maximal.

B- Modèle en régime permanent

- On se place dans le cadre d'un **fonctionnement moteur à excitation indépendante** (ie le bobinage de l'induit est séparé de celui de l'inducteur).
- **Slide 34 :** Important de mettre en valeur son intuition des sens d'orientation. Le champ contre-électromoteur, s'oppose aux causes qui lui ont donné naissance (ie courant de l'alimentation via les forces de Laplace). Donc on oriente E dans le sens opposé au

courant de l'alim. La résistance correspond à la résistance du bobinage (que l'on peut déterminer par un essai à vitesse nulle).

- **Lien entre e et ω .** Un calcul élémentaire où l'on intègre le champ électromoteur sur le circuit permet d'exprimer la force électromotrice comme $e = K_e \omega$ avec K_e , une variable constante à flux constant. Relire la démo du Renvoizé.
- **Si une partie de la puissance électrique est dissipée par effet joule, une autre $E I_a$ est convertie en puissance mécanique.** La puissance d'un système en rotation est le couple fois la vitesse de rotation. Mais attention, nous n'avons pas considéré les pertes dans machines. Comme le stator tourne dans un champ constant, il y a des pertes fer (hystérésis et courant de foucault) ainsi que des frottements côté stator ce qui fait que le couple disponible (ie utile) est $\Gamma_u = \Gamma_e - \Gamma_{fer} - \Gamma_m$.
- **Bilan de puissance : (cf slide)**

C- Aspects pratiques : Avantages-Inconvénients

- **Avantage : facile à piloter :** Couple est piloté par le courant. $\Gamma_{em} = KI$. La vitesse par la tension aux bornes de l'induit. $\Omega = \frac{U - RI}{K}$. Bien dire que $I = \Gamma_{em}/K$ donc le courant est fixé par un paramètre externe (le couple ie la charge).
- (On peut dire au passage que la formule de la vitesse précédente nous indique qu'il ne faut surtout pas couper l'inducteur en premier car $K=0$ [Flux nul] donc vitesse explose avec la machine...)
- **Inconvénient : Machine à courant continu** est chère et nécessite de l'entretien (nettoyage des balais, nettoyer le collecteur) donc c'est cher ! Il faut le remplacer par les autres machines (synchrone et asynchrone)
- **Est-ce que je peux démarrer une machine à courant continu sous tension nominale ?** 400V résistance de l'induit 0.4 ohm. $I = 1000A$. Il faut mettre une résistance. Mais c'est dissipatif. Il va falloir trouver autre chose.

Qu'est-ce qui consomme le plus ? 10kW absorbe 12kW électriquement. Puissance passe par le rotor. Au niveau refroidissement, c'est difficile à refroidir.

- Aujourd'hui, les moteurs à courant continu sont plutôt utilisés dans l'électroportatif (moteur universelle cf ci-dessous).

D- Moteur excitation série (ne pas faire)

- **Moteur excitation série :** L'inducteur est placé en série. L'inducteur va voir le même courant que l'induit. Le niveau de courant va être bcp plus important.

$$\begin{cases} E = K \cdot \Phi_e \cdot \Omega \\ C = K \cdot \Phi_e \cdot I_a \end{cases}$$

\Rightarrow Le courant d'induit est le même que le courant inducteur.

$$\Phi_e = \lambda \cdot I_a \quad \text{d'où} \quad E = K \cdot \lambda \cdot I_a \cdot \Omega$$

$$C_{em} = \frac{E \cdot I_a}{\Omega} = \frac{K \cdot \lambda \cdot I_a \cdot \Omega \cdot I_a}{\Omega} = K' \cdot I_a^2$$

\Rightarrow C_{em} est proportionnel à I_a^2

Super intéressant pour les machines mécaniques qui demandent un fort couple au démarrage. Train électrique vieux corail. Grande inertie car masse très importante. A faible vitesse, on a un couple très important. Par contre, il ne faut pas que le moteur

démarre à vide (ie sans charge) car vitesse très grande. On l'utilisait dans la traction électrique (il disparaît), levage, grue. On l'utilise encore dans les outils électroportatifs, on parle de moteurs universels (ie à excitation série alimenté en monophasé où on change le sens du champ inducteur). Fenêtre où l'on voit des étincelles des charbons. **C'est un système pratique où il n'y a pas besoin de système balai collecteur car le courant et le champ B sont alternés en même temps.**

III- Machine à courant alternatif synchrone

A- Principe

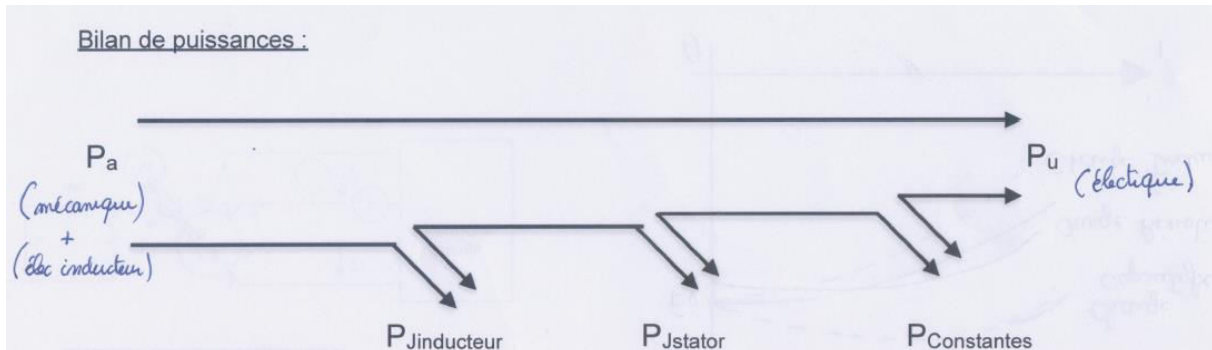
- **Production d'un champ magnétique tournant (stator)** : Théorème de Ferraris. Animation. Dire que l'on peut généraliser avec un bobinage intelligent. $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$, $p=1 \rightarrow 3000 \text{ tr/min}$, $p=2 \rightarrow 1500 \text{ tr/min}$
(3000 tours par minutes. La vitesse peut être élevée pour centrale thermique nucléaire. (Vanne Vapeur + turbine) on parle de turbo-Alternateur. On a besoin que d'une paire ou 2 paires de pôles.
Au fil de l'eau, ça tourne doucement. Le seul moyen de me raccrocher au réseau c'est augmenter le nombre de paires de pole.
Les machines qui tournent vite, sont longues et diamètre faible (turbo alternateur) 1500-3000 tour/min. En revanche production hydraulique, machine tournent lentement (diamètre grand et longueur assez courte)
- **Rotor (?)** : On modélisera le rotor par un moment magnétique (une seule bobine) alimentée en continu. [Il faut savoir que le rotor est bobiné de telle manière à avoir le même nombre de pôles que le stator]
- **Intuitivement** : De part, le produit vectoriel $\vec{\Gamma} = \vec{M} \times \vec{B}$, on sait que le couple dépend du sinus de l'angle. Le seul moyen de tourner en régime permanent c'est d'avoir $\Omega_r = \Omega_s$. Le déphasage est déterminé par le couple imposé par la charge (fonctionnement moteur). Il y a un couple maximal $\Gamma_M = M_0 B_0$. Donc du courant du rotor.
- **Fonctionnement moteur ou alternateur** : (i) Si le moment magnétique est en retard, le couple est positif donc il s'agit d'un fonctionnement moteur. (ii) Si le moment magnétique est en avance, le couple est négatif donc générateur. Comme d'habitude, l'effort mécanique qu'il faut fournir est converti en force électromotrice.
- **La question est où est la force électromotrice induite** : Elle ne peut pas être au rotor car dans le référentiel du rotor le champ est fixe. Par contre, le stator voit le champ du rotor en mouvement. Donc, c'est dans le stator qu'il y aura un courant induit. Contrairement au moteur à courant continu, l'inducteur est le rotor et l'induit est le stator !!

B- Modèle en régime permanent Comment piloter la machine ?

- **Il s'agit d'un modèle électrique équivalent par phase du point de vu de stator (slide50)** : V est la tension d'alimentation (réseau EDF), résistance + auto inductance + force électromotrice. Attention aux conventions (si alternateur le courant est dans le même sens que la force électromotrice).
- **Diagramme de Behn Eschenbourg : Diagramme vectoriel (réel imaginaire)** : Avec V à l'origine des phases. Le déphasage entre V et I dépend de la charge (réseau). Rotation de $\pi/2$ par multiplication par $jL_s\omega$. E_v
- **Intérêt du diagramme** : Il permet de connaître **quelle force électromotrice E_v il faut produire** (norme + phase) pour une charge donnée. La norme est imposée par le courant exciteur (relation de proportionnalité, essai à vide avant la saturation... On comprend intuitivement que plus le champ est intense, plus la variation de champ le sera étant donné que le rotor tourne à vitesse constante). La phase est contrôlée par le couple. En effet, on peut démontrer que la puissance active fournie par le moteur correspond à la projection du vecteur E sur l'axe des abscisse. Cette composante est elle-même reliée au couple fourni par les turbines par la relation $P = \Gamma\Omega$. On ne peut pas ajuster la vitesse

(car moteur synchrone couplé à EDF 50Hz) par contre, on peut ajuster le couple mécanique fourni par les turbines du barrage. On ajuste l'ouverture des vannes.

- **Le diagramme PQ permet de voir les 4 quadrants (puissance active, puissance réactive).**
- **Bilan de puissance :**



- Les pertes constantes regroupent les pertes fer (ie courant de foucault et hystérésis) et les pertes mécaniques (frottement sec et visqueux)
- Les alternateurs de centrales nucléaires 98%.

C- Aspects Pratiques

- **Démarrage du moteur synchrone : On ne peut pas démarrer le moteur à la fréquence de 50Hz car il ne suivrait pas (inertie) :** (i) On utilise un moteur auxiliaire pour atteindre la bonne vitesse. (ii) **Démarrage en Machine asynchrone** (???). On met des barres court-circuitées dans le rotor qui vont être le siège de courant induit qui vont s'opposer à la rotation (loi de lenz) (1'26) ??????????????????
- **Couplage Machine Synchrone au réseau :** (i) Fréquence de tension de l'alternateur identique à celle du réseau, (ii) Ordre des phases identiques (iii) Valeur efficace délivrée par l'alternateur identique à celle du réseau (iv) tension alternateur en phase avec celle du réseau. Solution : Montage à lampe : Il faut que les 3 lampes soient éteintes. Synchrocoupleur : Si on n'est pas à la bonne fréquence, il modifie la vitesse de la machine synchrone, pour régler la tension efficace, il va régler le courant I_e .
- **Pour faire varier la vitesse du moteur synchrone, on peut faire varier la fréquence électrique.** Pour cela on conçoit un système redresseur-onduleur et on asservit le déphasage tension courant pour maintenir un couple constant. ???

IV- Machine asynchrone ou à induction

A- Principe

- **Principe 1'37 :** C'est la plus utilisée, pompage ventilation. Machine robuste, simple de fabrication mais complexe au niveau de la commande. En particulier si on veut maintenir un couple à vitesse nulle. On retrouve le stator d'une machine synchrone. Champ produit par 3 bobines disposées à 120 degrés. Création d'un champ tournant. $\Omega = \frac{\omega_s}{p}$. Rotor bobines court-circuitées ou barreaux = cage d'écureuil. Création de courant induit dans les barreaux. Le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure au champ tournant. Les bobines sont court-circuitées → Courant induit. Création d'un champ magnétique. Le

rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse du champ statorique ex : stator 2 paires de pôle 1500 tours par minutes => 1450 tours par minutes pour le rotor. 5'44.

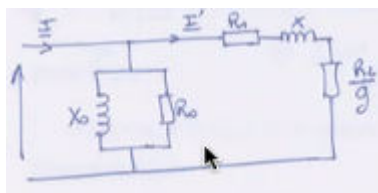
- **Résumé du principe :** Champ magnétique tournant (*par rapport au rotor*) + bobinage court-circuité → courant induit. Courant induit + champ magnétique → moment de Laplace → rotation.

B- Le champ rotorique

- Création d'un champ tournant au rotor H_r . La fréquence f_r va varier $0 < f_r < f_s$. f_r : fréquence du champ rotorique par rapport à la vitesse de rotation du rotor cad dans le référentiel du rotor.
- Notion de glissement : Plus on charge mécaniquement, plus le glissement va être important. Glissement : 3-6% maximum.
- **Constitution technologique (2 possibilités):** (i) Bobinage rotorique amené sur les bagues est court-circuitée. Mais on peut aussi ajouter des résistances. (ii) La majorité des machines ont des barres en alu court-circuitée par une couronne en alu. Sur ce type de machine, on n'a pas accès au rotor. On a juste accès au stator. On parle de rotor en cage d'écureuil. 9'30
- **Différence avec machine synchrone :** Pour un moteur synchrone, une bobine alimentée en continu. On crée un champ fixe au rotor qui va tourner. Moteur asynchrone est identique au moteur asynchrone coté stator. Par contre, le rotor ce n'est pas une bobine. Il y a autant de bobine qu'au stator et elles sont court-circuitées entre elles. Elles vont être le siège de courant induit car balayées par un champ tournant. 12'20 **Il y a pas d'aimant/electroaimant au rotor.**

C- Glissement

- **Notion de glissement :** Champ tournant au stator Ω_s . Rotor tourne à la vitesse Ω . Le champ magnétique rotorique tourne à Ω_r dans le référentiel du rotor (!).
- **Les deux champs tournent à la même vitesse :** $\Omega_r + \Omega = \Omega_s$



- Glissement $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$. Vaut qq % en fonctionnement nominal.

D- Modèle électrique par phase : EN REGIME PERMANENT on ramène tout au niveau du stator.

- Description des éléments du modèle

X_0 réactance magnétisante. R_0 perte fer. 19'50.

R_1 : perte joule enroulement statorique

R_2 : perte joule de l'enroulement rotorique. R_2/g : ramené au stator.

X inductance de fuite ramené au stator. g glissement.

- Détermination des éléments du modèles.

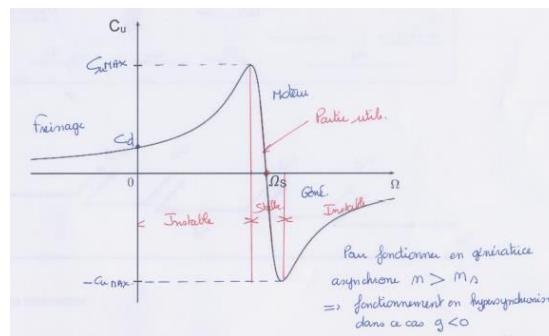
→ Essai continu : détermination de la résistance statorique R_1 à courant nominal

→ **Essai à vide (sans charge mécanique mais à tension nominale)** : Pas de charge ==> Faible glissement. Résistance R_2/g tend vers l'infini. On enlève une branche dans le modèle. On mesure V_{10} et I_{10} et la puissance active. On en déduit la puissance apparente, réactive, puis R_0 et X_0 . 22'44

→ **Essai à rotor bloqué** : sous tension réduite. $g=1$. $R_2/g=R_2$ On mesure I_{1cc} réglé à partir de V_{1cc} de manière à ce que le moteur absorbe un courant nominal (ie. $I_{cc}=I_{nominal}$). On mesure V_{1cc} , I_{cc} , P_{1cc} . On en déduit S_1 , Q_1 puis R_2 et X . Sachant que la puissance active de R_0 sera très faible car la tension d'alimentation est très faible.

E- Caractéristique mécanique $C_u = f(\Omega)$, hypo vs hypersynchronisme

- Couple en fonction de la vitesse : Au démarrage $\Omega = 0$ Couple de démarrage va augmenter en passant par le couple utile maximum puis arriver au couple nécessaire dans la zone de pente négative (fonctionnement stable).



- **Cette machine est réversible (!)**. En effet, si on tourne plus vite que vitesse de synchronisme, le couple devient négatif alors que la vitesse est positive donc la puissance mécanique devient négative (le moteur fournit de l'énergie à l'extérieur). 27'42. La machine fonctionne en génératrice.
- Lorsque on fonctionne entre 0 et Ω_s hyposynchronisme (resp. hypersynchronisme = génératrice) Cette machine est essentiellement utilisée en moteur. Donc raccordé au réseau. En génératrice, cette machine produit de la puissance active mais consomme de la puissance réactive à cause de l'inductance magnétisante.

F- Bilan de Puissance :

- **Puissance électromagnétique transmise** : Puissance absorbée moins les pertes stator. Perte joule rotorique, perte méca. On peut négliger les pertes fers du rotor car il voit un champ tourner très lentement Ω_r .
Au delà de 4kW, on est en triphasé. Pour avoir un bon rendement, on passe en triphasé.
La puissance transmise entre stator et rotor : $P_{em} = C_{em} \Omega_s$. 43'00

G- Démarrage du moteur asynchrone :

- Au démarrage : $g=1$. Courant de démarrage entre 4 et 8 fois le courant nominal. C'est un courant qui dure quelques 100 ms. Cela entraîne des chutes de tension dans la ligne : il faut pas quand on allume le moteur on éteint la lumière des voisins 47' Solution pour limiter le courant de démarrage :
- **Démarrage rotorique** : Un modèle simple permet d'exprimer le couple au démarrage en fonction de R (cf.p968 Cap prepa PSI : $\Gamma_0 = \frac{\phi_0^2 R \omega_0}{2(R^2 + L^2 \omega_0^2)}$). On démarre avec quelques résistances pour augmenter le couple au démarrage : On peut aller chercher le couple maximum au moment du démarrage. Cette technique est utilisée pour les systèmes à

fortes inertie (broyeur, scie à ruban). Ces résistances limitent le courant de démarrage !!!
On gagne sur 2 tableaux : limitation du courant de démarrage et augmentation du couple !!!

- **Cage d'écureuil** : Au démarrage, la vitesse du rotor est nulle. Donc la différence de fréquence est importante. Donc les courants circulent dans la cage extérieure à cause de l'effet de peau. Or, le barreau extérieur a une résistance plus importante que le barreau intérieur. Donc les courants sont limités. Ensuite, la vitesse du moteur augmente et donc la différence de fréquence diminue et donc l'effet de peau diminue. Le gros conducteur est favorisé pour la circulation des courants car sa section est plus importante. Par conséquent, la résistance diminue. 50'00. Par effet de peau.
- **Démarrage étoile triangle** : On commence par courant en étoile. Pour alimenter sous tension réduite le couple étant proportionnel au carré de l'alim, il est divisé par 3. Cela implique une division du courant de démarrage par 3. On passe en triangle. Il faut 2 contacteurs avec temporisation. Pb, il y a un accoup. Il faut un couple résistant assez faible
= Couple quadratique.

- **Démarrage statorique 1'03** : On démarre sous tension réduite en venant mettre en série des résistances cette fois ci au stator ce qui fait que le moteur voit une tension inférieure à celle du réseau. On a moins d'accoup.
- **Démarrage électronique 1'04** : On utilise de l'électronique de puissance. Gradateur triac pour faire varier la valeur efficace de la tension. Comme le couple est proportionnel au carré de la tension, cela diminue le couple. Démarrage en douceur. La encore, couple démarrage faible (pompe et ventilateur) 1'06. Gradateur (on appelle cela un triac...) : dispositif permettant de faire varier la tension efficace du réseau en jouant sur le rapport cyclique. Utilisé sur les lampes halogènes des salons.

H- 1'08

- Comment faire pour varier la vitesse d'une machine asynchrone : Il faut modifier la fréquence. Il faut un variateur de vitesse alimenté par le réseau → continu redresseur On filtre pour avoir du continu et on découpe avec un onduleur pour fabriquer un réseau de tension à fréquence variable.
- Moteur alimenté par un réseau 400V. Ces moteurs pour des pb de démarrage est alimenté par un démarreur étoile triangle. <https://sitelec.org/animations2.htm>
- Vélo classique : 14'44. ~~Dynamo~~. Alternateur : machine synchrone fonctionnant en alternateur.

- **Force de Lorentz vs Force de Laplace** : Les charges dans un champ magnétique sont soumises aux forces de Lorentz. Elles sont déviées. Cette déviation crée un champ de Hall qui compense cette déviation. En revanche, ce champ s'applique sur les charges fixes. Donc c'est cette réaction macroscopique qui donne la force de **Laplace**.

-

- **Sens de rotation du moteur à courant continu** : On inverse le champ de l'inducteur. Ou l'alimentation de l'induit.
- **Porteuse électroportative ()** : On la branche sur le réseau sans redresseur car excitation série. Si je change le sens de B et de i (induit), le moteur continu de tourner dans le même sens.
- 53'19 : Triphasé question de rendement au dessus de 4 kW. Le triphasé ont un meilleur rendement.