

MACHINE À COURANT CONTINU - EXCITATION SÉPARÉE - FLUX CONSTANT -

1 -Un peu d'Histoire.....	3
1.1 -Intérêts (pédagogiques) de la Mcc.....	3
1.2 -Principe de fonctionnement.....	4
Rappels du chapitre 7 appliqué s à la Mcc:.....	5
1.3 -Modes d'excitation.....	6
2 -Équations de fonctionnement -flux constant.....	7
3 -Quadrants de fonctionnement et mouvements.....	7
4 -Modèle électrique équivalent (excitation et induit).....	8
5 -Bilan de puissance – calcul du rendement.....	9
Inducteur.....	9
Induit.....	9
Rendements	9
6 -Essais.....	10
6.1 -Mesure des résistances et Pertes Joule.....	10
6.2 -Caractéristique à vide $E(I_e)$ - à n cte.....	10
6.3 -Caractéristique électrique $U(I)$ - à n et I_e cte.....	11
6.4 -Caractéristique électromécanique $C(I)$ - à I_e cte.....	12
6.5 -Caractéristique mécanique $C(n)$ - à U et I_e cte.....	12
6.6 -Pertes collectives et couple de pertes.....	13
6.7 -Séparation pertes fer et pertes mécaniques.....	14
Culture technologique.....	15
Collecteur / balais.....	15
Pôles auxiliaires.....	15
Mcc Série.....	15
Moteur universel.....	15

1 - UN PEU D'HISTOIRE.

La Mcc était historiquement le moteur utilisé pour faire :

- de la variation de vitesse car sa vitesse est proportionnelle à sa tension d'alimentation,
- du positionnement (s'approcher d'une position en ralentissant de plus en plus) car c'est la seule machine à ne pas câler.

1.1 - INTÉRÊTS (PÉDAGOGIQUES) DE LA Mcc.

La machine à courant continu n'est plus une solution industrielle.

Les machines à courant sinusoïdal Synchrones ou ASynchrones avec variateurs remplacent les Mcc dans les applications spécifiques de variation de vitesse ou de positionnement.

Ces mcs sont soit plus performants mécaniquement ou énergétiquement (MS brushless), soit plus robustes et moins chers à fabriquer (MAS) que la Mcc.

Néanmoins le moteur universel pour les appareils grand public (Mcc à excitation série alimentée directement par le réseau) et le petit moteur cc à aimant permanent (pour l'équipement automobile) sont encore très largement produits.

En BTS seuls les enseignants de physique appliquée persistent à faire un cours sur la Mcc, car c'est un moteur très pédagogique :

C'est le seul moteur qui permet de passer simplement des grandeurs mécaniques (Couple et vitesse) aux grandeurs électriques (courant et tension) :

- avec une Mcc, si on connaît C et n , on sait calculer U et I ,
- au contraire avec une Mcs, si on connaît C et n , on ne sait pas déterminer u et i !

1.2 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.

Au stator : pôles inducteurs : aimants permanents ou électroaimants.

Au rotor : conducteurs électriques qui doivent être alimentés à partir du stator par les balais (« charbons ») puis le collecteur.

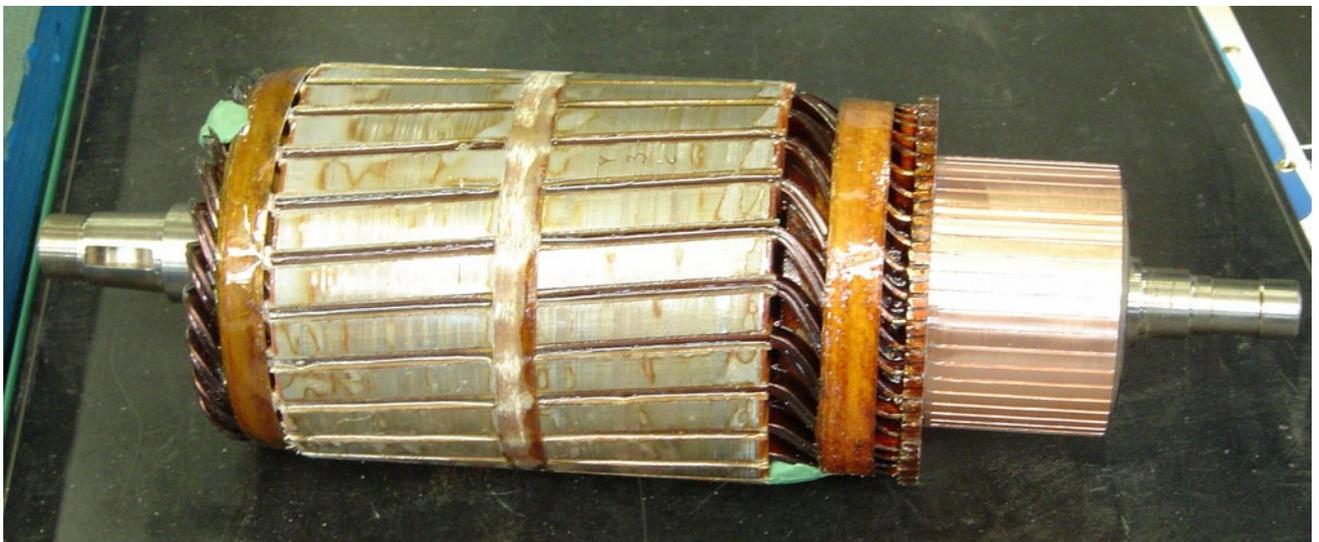
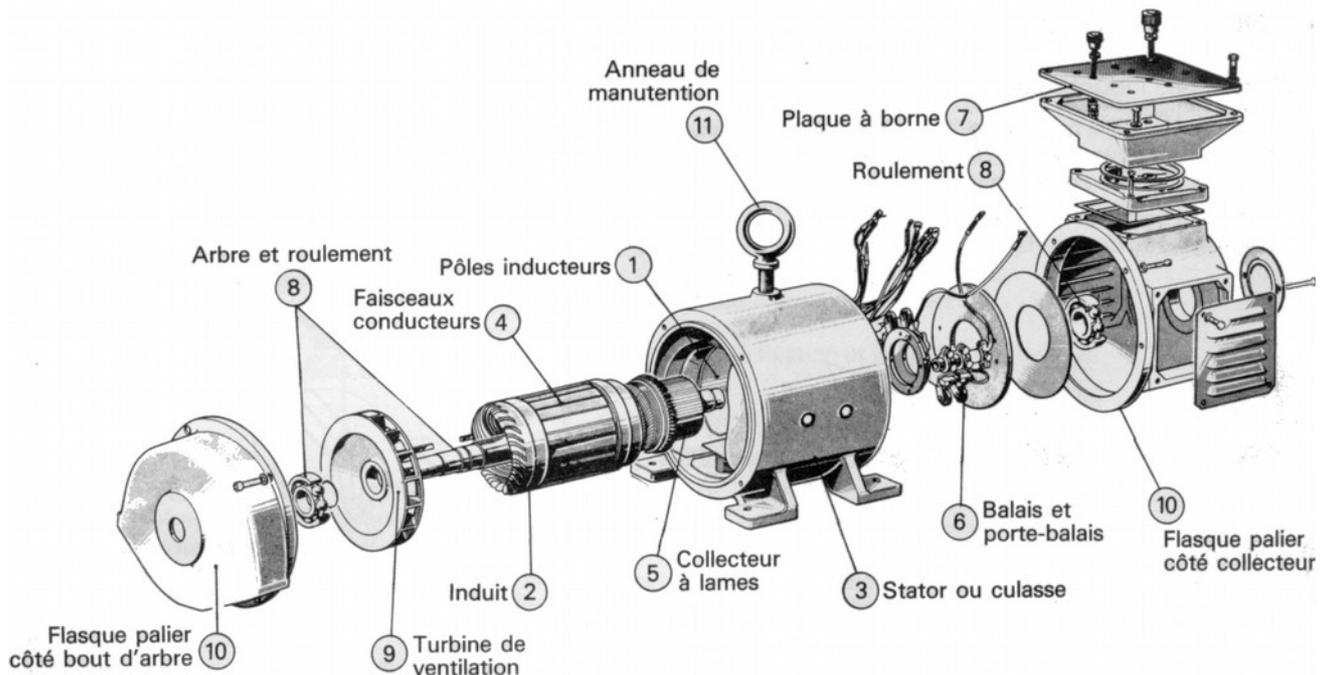


photo 1: Rotor d'une Mcc avec son collecteur à droite

Le stator a pour seule fonction de créer un champ magnétique : c'est l'excitation (ou inducteur) de la machine.

L'excitation doit être alimentée en premier et doit être coupée en dernier.

C'est au niveau du rotor que se produit la conversion de puissance électrique en puissance



mécanique. Cette conversion est parfaitement réversible (fonctionnement moteur ou génératrice).

En fonctionnement moteur, on alimente l'induit et on récupère de la puissance mécanique sur l'arbre.

En fonctionnement génératrice, on apporte de la puissance mécanique sur l'arbre et on récupère de la puissance électrique sur l'induit.

RAPPELS DU CHAPITRE 7 APPLIQUÉS À LA MCC:

Les champs magnétiques sont de direction fixe puisque c'est une machine à courant continu. Et donc sa vitesse dépend de la tension d'alimentation de l'induit.

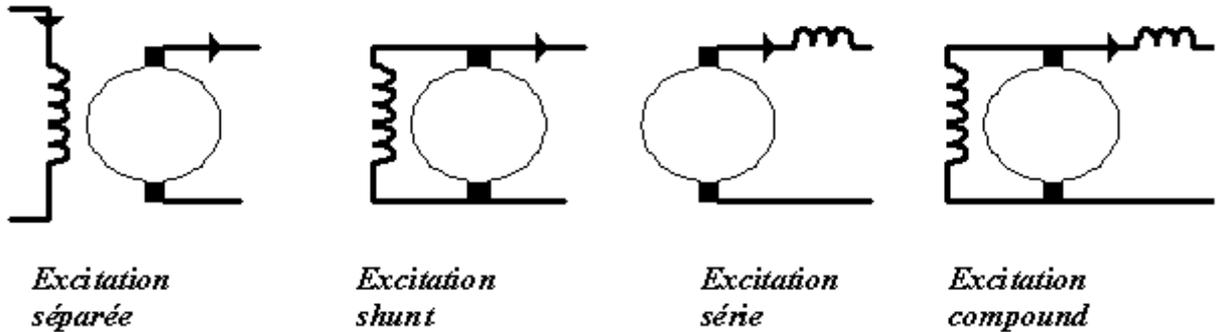
De plus les champs magnétiques rotor et stator sont perpendiculaires : la machine à courant continu développe en permanence un couple optimal – et ne peut pas câler.

Le collecteur distribue le courant dans les conducteurs rotoriques comme un « onduleur de courant ».

Pour améliorer le fonctionnement de cette machine (en particulier limiter les arcs électriques au niveau des balais), des « pôles auxiliaires » sont bobinés entre les pôles inducteurs et doivent être branchés en série avec l'induit de la machine.

1.3 - MODES D'EXCITATION.

Il y a plusieurs types d'excitation possibles, permettant d'obtenir des performances utilisés dans des domaines spécifiques suivants :



Moteur à	Caractéristiques	Domaines d'emploi
Excitation séparée	L'inducteur est alimenté par une source indépendante. Grande souplesse de commande Large gamme de vitesse. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement	machines outils : moteur de broche, d'axe. Machines spéciales.
Excitation shunt	Vitesse constante quelque soit la charge	machines outils, appareil de levage (ascenseur).
Excitation série	Démarrage fréquent avec couple élevé; couple diminuant avec la vitesse.	engins de levage (grues, palans, ponts roulants) ventilateurs, pompes, centrifuges; traction.
Excitation compound	Entraînements de grande inertie, couple très variable avec la vitesse.	petit moteur à démarrage direct, ventilateur, pompes, machines de laminoirs, volants d'inertie.

Ce chapitre ne traite que des propriétés des Mcc à *excitation séparée constante* : l'inducteur de la machine est alimenté par une source différente de l'induit (« excitation séparée »), et l'excitation n'est pas modifiée au cours de l'étude. C'est le cas par exemple des machines à aimants permanents. On parle aussi de « Mcc à flux constant ».

2 - ÉQUATIONS DE FONCTIONNEMENT - FLUX CONSTANT.

➤ $E = k \Omega$

La fem d'une Mcc à excitation séparée constante est proportionnelle à la vitesse de rotation.

Cette relation permet de passer de la vitesse à la tension.

La constante de proportionnalité notée k ou $k \phi$ est appelée la « constante de fem ».

➤ $C_{EM} = k I$

Le couple EM développé par une Mcc à excitation séparée constante est proportionnel au courant d'induit.

Cette relation permet de passer du couple au courant.

La constante de proportionnalité est la même que celle de la fem.

La constante de fem s'exprime s'exprime en $V.s/rad$ ou $V.s$ mais aussi en $N.m/A$ - elle dépend du flux inducteur (donc de I_e).

➤ $U = E + RI$

il y a une chute sur la tension d'induit U due à la résistance des bobinages induit.

Avec les grandeurs nominales : $U_n = E_n + R I_n$ avec $E_n = k \Omega_n$

À l'aide des grandeurs nominales et de la mesure de la résistance, on peut calculer la constante de fem dans les conditions nominales.

3 - QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT ET MOUVEMENTS.

Les quadrants électriques (U et I) et mécaniques (n et C) sont quasiment confondus.

Les quadrants moteur sont le 1 (marche AV) et 3 (marche AR).

Dans les quadrants 2 et 4 la machine fonctionne en génératrice, et peut être utilisée comme frein.

	<p>Lors d'un mouvement horizontal, le quadrant 4 est utilisé pour un freinage avec renvoi en marche AV - le quadrant 2 pour le freinage en marche AR.</p> <p>Lors d'un mouvement vertical, le quadrant 2 est utilisé pour la descente (freinage marche AR).</p>
--	---

4 - MODÈLE ÉLECTRIQUE ÉQUIVALENT (EXCITATION ET INDUIT).

<p>L'inducteur d'une Mcc est un circuit inductif ($R_e + L_e$).</p>	<p>L'induit d'une Mcc se comporte comme l'association d'un circuit inductif ($R+L$) et d'une fem E constante.</p>
	$u_e(t) = R_e \times i_e + L_e \times \frac{di_e}{dt}$ <p>en valeur moyenne :</p> $U_{e-DC} = R_e \times I_{e-DC}$
	$u(t) = R \times i + L \times \frac{di}{dt} + E$ <p>en valeur moyenne :</p> $U_{DC} = R \times I_{DC} + E$

En fonctionnement moteur $U \times I > 0$ et $E \times I > 0$: (U, E) et I ont le « même signe ».

En fonctionnement génératrice : $U \times I < 0$ et $E \times I < 0$: (U, E) et I sont de signes opposés.

5 - BILAN DE PUISSANCE – CALCUL DU RENDEMENT.

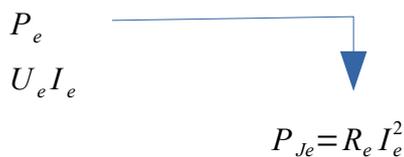
Comme toutes les machines tournantes, la Mcc a des pertes Joule (dues aux résistances des bobinages), des pertes fer (dues aux variations du flux magnétiques à travers le rotor et/ou le stator) et des pertes mécaniques.

Les pertes fer et mécaniques sont regroupées sous le terme « pertes collectives » P_C auxquelles on associe un « couple de pertes » C_p : $P_C = C_p \times \Omega$.

INDUCTEUR.

L'inducteur ne sert qu'à créer le champ magnétique : la seule puissance qu'il consomme est due à la résistance R_e de ses bobinages (pertes Joule) : $P_e = P_{Je}$.

Il n'y a pas de pertes fer car le flux stator est constant : le stator est immobile et les champs magnétiques sont de direction fixe.



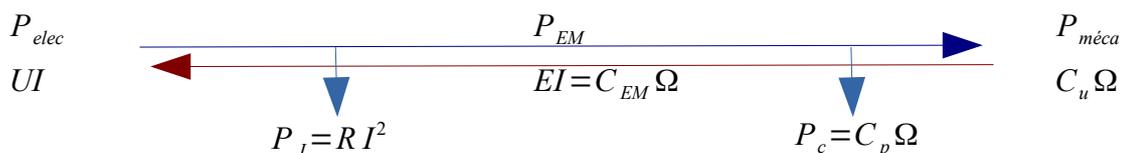
INDUIT.

En fonctionnement moteur, l'induit transforme la puissance électrique en puissance mécanique :

$$P_{elec} = P_J + P_{EM} = P_J + P_C + P_{méca} \Leftrightarrow C_{em} = C_p + C_u$$

En fonctionnement générateur, l'induit transforme la puissance mécanique en puissance électrique :

$$P_{méca} = P_C + P_{EM} = P_C + P_J + P_{Elec} \Leftrightarrow C_u = C_p + C_{EM}$$



RENDEMENTS .

On distingue

➤ le rendement de l'induit, qui ne tient compte que de la transformation de puissance de

$$\text{l'induit : } \eta_{ind} = \frac{P_{méca}}{P_{elec}}$$

➤ et le rendement de la mcc qui tient compte en plus de la puissance apportée à l'inducteur : "

$$\eta_{Mcc} = \frac{P_{méca}}{P_{elec} + P_e}$$

6 - ESSAIS.

6.1 - MESURE DES RÉISTANCES ET PERTES JOULE.

La résistance d'un conducteur dépend de la température : La mesure des résistances se fait à chaud (moteur ayant fonctionné en charge suffisamment longtemps).

Pour mesurer une résistance, un ohmmètre envoie un courant de 1mA et mesure la tension obtenue.

L'inducteur étant un circuit en cuivre, la résistance ne dépend pas du courant, on peut utiliser un ohmmètre.

Par contre pour alimenter l'induit, il faut passer par les balais en carbone dont la résistance dépend du courant qui les traverse.

La mesure de la résistance d'induit doit donc se faire à chaud et au courant nominal : il faut utiliser la méthode volt-ampèremétrique lors d'un essai « à rotor bloqué » (\Leftrightarrow « essai en court circuit ») :

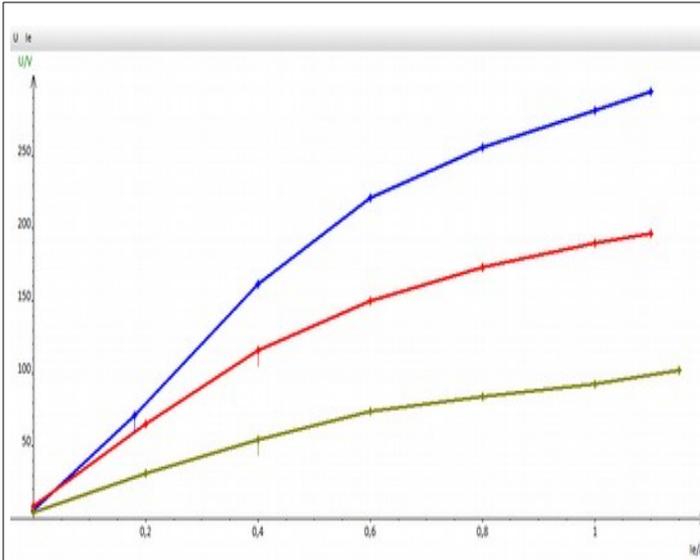
- Ne pas alimenter l'excitation : $I_{Exc}=0 \Rightarrow \Phi \sim 0$
- Bloquer le rotor : $\Omega=0$
- Alimenter sous tension réduite l'induit : $U_{cc} \ll U_n$
- Régler U_{cc} pour avoir $I_{cc}=I_n$ $R = U_{cc} / I_{cc}$

6.2 - CARACTÉRISTIQUE À VIDE $E(I_E)$ - À N CTE.

Si on fonctionne à $n=cte$, alors la fem est proportionnelle au flux inducteur Φ .

Donc cette caractéristique $E(I_{Exc})$ est une image de la courbe $\Phi(I_{Exc})$, qui est la courbe d'aimantation de la machine (circuit magnétique constitué du stator, de l'entrefer et du rotor).

Le stator et le rotor étant en matériau ferromagnétique, la caractéristique à vide aura une hystérésis et une saturation.



Courbe 1: Carac vide 3 vitesses

Pour relever la caractéristique à vide, il faut que :

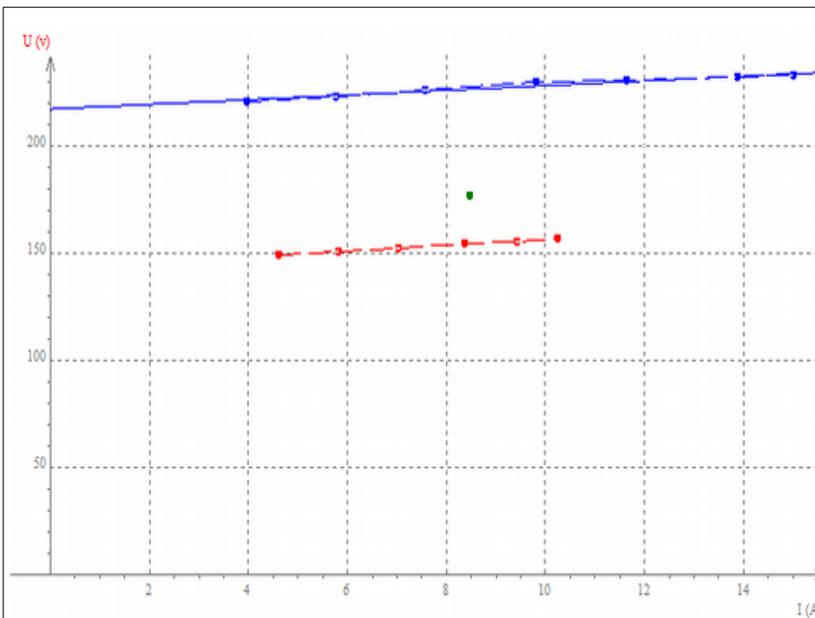
- la machine soit entraînée à vitesse constante
- $I=0 \Leftrightarrow$ fonctionnement en génératrice donc $U_0=E$

On modifie I_{exc} on mesure E.

La caractéristique à vide (vitesse Ω_0) permet de lire, pour un courant d'excitation donné I_{Exc} ,

la constante de fem k :
$$k = \frac{E(I_{Exc})}{\Omega_0}$$

6.3 - CARACTÉRISTIQUE ÉLECTRIQUE $U(I)$ - À N ET I_e CTE.



Courbe 2: Carac $U(I)$ pour 2 valeurs de $n - I_e=cte$

Essais en moteur ou en génératrice.

$$U = E + RI$$

$$I_e = cte \Rightarrow k = cte$$

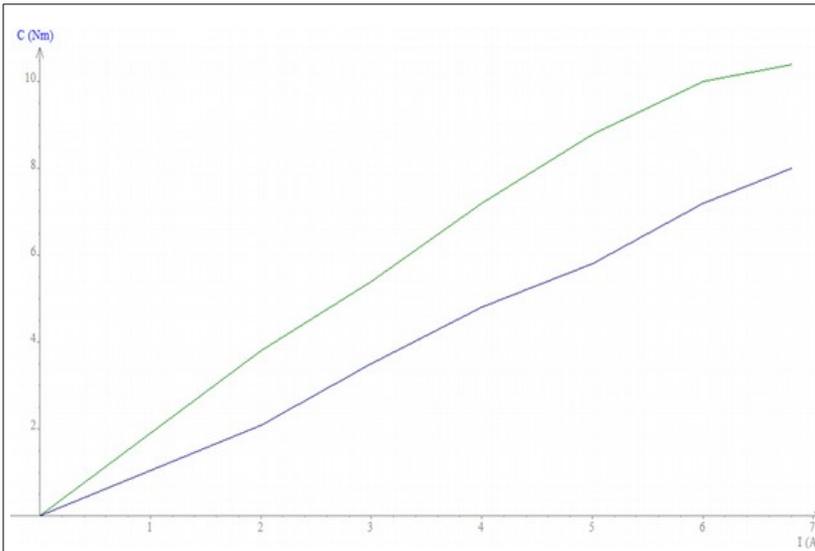
$$+ n = cte \Rightarrow E = cte$$

$\Rightarrow U(I)$ est une droite affine :

pende R

ordonnée à l'origine E

6.4 - CARACTÉRISTIQUE ÉLECTROMÉCANIQUE $C(I)$ - À I_e CTE.



Courbe 3: Carac $C(I)$ pour 2 valeurs de I_e

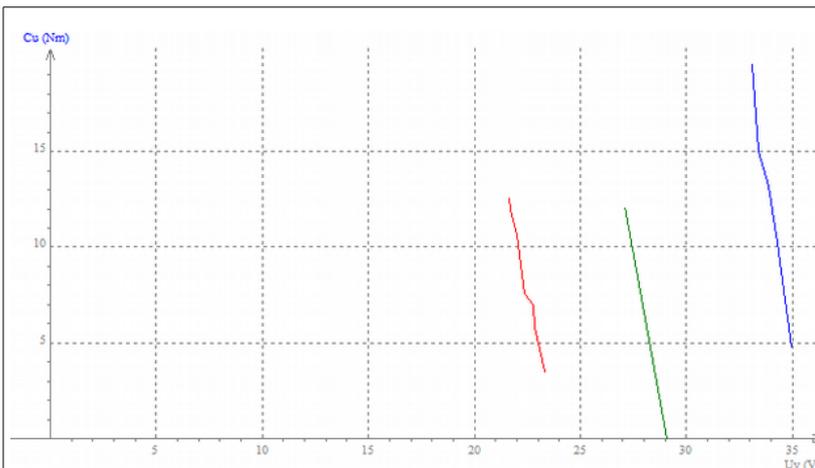
Essai en moteur ou génératrice

$$C = k I$$

$$I_e = \text{cte} \Rightarrow k = \text{cte}$$

$\Rightarrow C(I)$ est une droite linéaire
pente k

6.5 - CARACTÉRISTIQUE MÉCANIQUE $C(N)$ - À U ET I_e CTE.



Courbe 4: Carac Méca $I_e = \text{cte}$ - 3 valeurs de tension U

À partir des relations de la mcc :

$$E = k \Omega$$

$$C = k I$$

$$U = E + R I$$

on montre que :

$$C = \frac{k}{R} U - \frac{k^2}{R} \Omega \quad \text{fonction affine}$$

pente k^2/R

ordonnée à l'origine kU/R

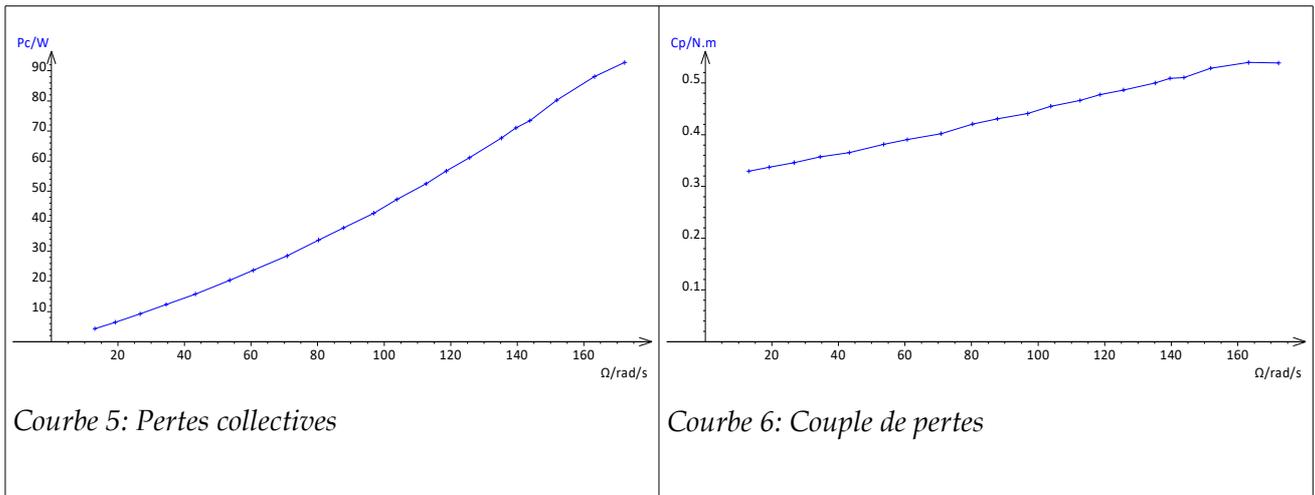
$$C = \frac{k}{R} U - \frac{k^2}{R} \frac{2\pi n}{60}$$

6.6 - PERTES COLLECTIVES ET COUPLE DE PERTES.

Les pertes collectives se mesurent lors d'un essai en moteur à vide :

- Si possible Désaccoupler la machine : $C_u=0$
- Alimenter la machine
- pour chaque vitesse n , mesurer U_0 et I_0 calculer $P_0 = U_0 \times I_0 \approx P_C$ (on néglige les pertes Joule)

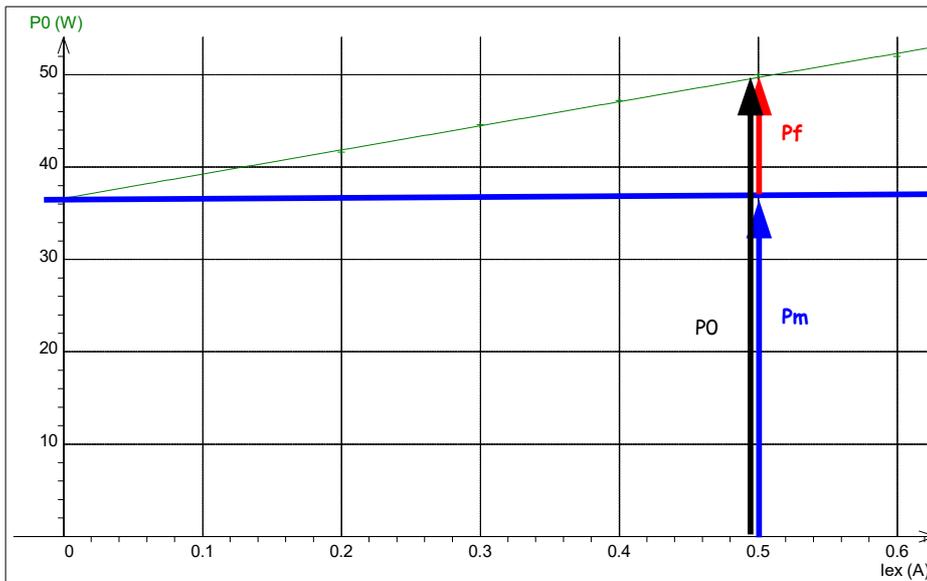
Tracer $P_C(\Omega)$ et $C_P(\Omega)$ puis modéliser



6.7 - SÉPARATION PERTES FER ET PERTES MÉCANIQUES.

Pour séparer les pertes mécaniques P_m des pertes fer P_f , il faut réussir à maintenir la vitesse constante (pour maintenir les pertes mécaniques constantes) tout en modifiant l'excitation (pour modifier les pertes fer).

On réalise un essai en moteur à vide, à vitesse constante, où on mesure la puissance électrique à vide P_0 pour différents courant d'excitation I_{exc} .



On trace $P_0(I_{exc})$:

- à $I_{exc}=0$, on lit la valeur de P_m (par extrapolation).
- Pour un I_{exc} donné, on a $P_0 = P_m + P_f$, on peut donc déterminer P_f .

Courbe 7: $P_0(I_{exc})$ à n cte



CULTURE TECHNOLOGIQUE.

COLLECTEUR / BALAIS.

Cet ensemble permet d'alimenter alternativement les différents conducteurs du rotor à partir du stator. C'est comme un onduleur de courant « mécanique ».

Les balais sont sur le stator et sont en carbone (« charbons »). à force de frotter sur le collecteur, ils s'usent et doivent être remplacés.

Le collecteur s'abîme aussi à cause des frottements. Il doit être re-usiné.

La poussière de carbone peut créer des courts circuits dans la machine. Elle doit aussi être nettoyée ?

....

PÔLES AUXILIAIRES.

Ces pôles sont placés sur le stator et sont alimentés en série avec l'induit.

Ils améliorent le fonctionnement de la machine : ils empêchent les étincelles au niveau des balais/collecteur.

...

MCC SÉRIE.

L'excitation est mise en série avec l'induit.

Un moteur série a un couple de démarrage plus fort que les autres.

Plus la vitesse augmente, plus le couple diminue : un moteur série travaille à puissance constante.

Le moteur série est le premier moteur électrique utilisé en traction ferroviaire.

Il est très difficile de faire fonctionner une génératrice en excitation série

...

MOTEUR UNIVERSEL.

C'est un moteur série alimenté par le réseau.

C'est le moteur le plus fabriqué, car il équipe quasiment tous les appareils électriques grand public.

...