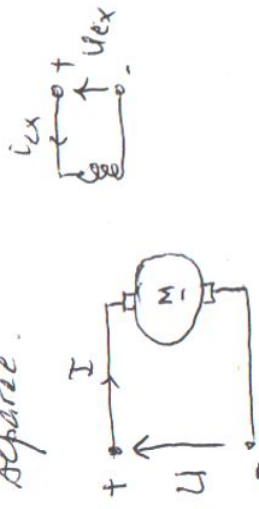


Rappels sur la machine à courant continu.

- Modèle électrique du moteur à excitation séparée.



$$U = E + R_a I$$

R_a : résistance d'induit.

- Caractéristique électromécanique $\Omega = f(I)$

$$\bar{u} = U = e_{ste}, \quad i_{ex} = e_{ste} \Rightarrow \phi = \underline{e_{ste}}$$

$$\begin{cases} U = E + R_a I \\ E = k \phi \Omega \end{cases}$$

où k est une cte qui dépend des paramètres de la machine.

$$E = \frac{p}{a} n \frac{N}{60} \phi = k \phi \Omega \quad \left\{ \begin{array}{l} \Omega = \frac{2\pi N}{60} \quad \text{en } N(\text{tr/min}) \\ \Omega = 2\pi n \quad \text{en } N(\text{tr/s}) \end{array} \right.$$

$$E = \frac{p}{a} n \frac{\Omega}{2\pi} \phi = k \phi \Omega \quad \Rightarrow k = \frac{p n}{a \cdot 2\pi}$$

Ω : vitesse de rotation en (rad/s)

à partir des équations suivantes:

$$\begin{cases} U = E + R_a I \Rightarrow U = k \phi \Omega + R_a I \\ E = k \phi \Omega \end{cases} \Rightarrow \Omega = \frac{U - R_a I}{k \phi}$$

Ω_0 : vitesse du moteur à vide.

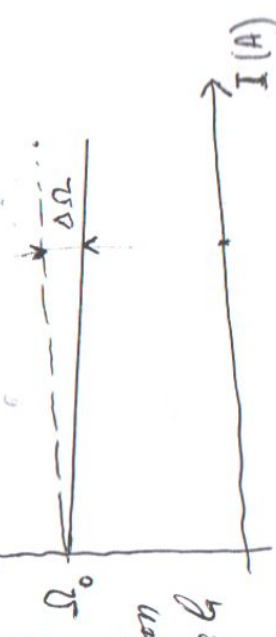
Pour la machine à courant continu à excitation séparée ou shunt, la vitesse diminue peu avec charge. On dit que le moteur à c.c. est auto-régulateur de vitesse.

- Caractéristique électromécanique $e_c = f(I)$ à $U = e_{ste} \quad i_{ex} = e_{ste} \Rightarrow \phi = \underline{e_{ste}}$

$$e_c = k \phi I = k' I;$$

$$e_{cu} = e_c - c_p \text{ où}$$

e_c : couple électromagnétique du moteur
 e_{cu} : couple utile du moteur



Caractéristique mécanique?

$$C_e = f(\Omega) \quad \text{à } U = \text{cte} \quad i_{ex} = \text{cte}$$

$$C_e = k\phi I \quad ; \quad U = E + R_A I \quad \Rightarrow I = \frac{U}{R_A} - \frac{k\phi \Omega}{R_A}$$

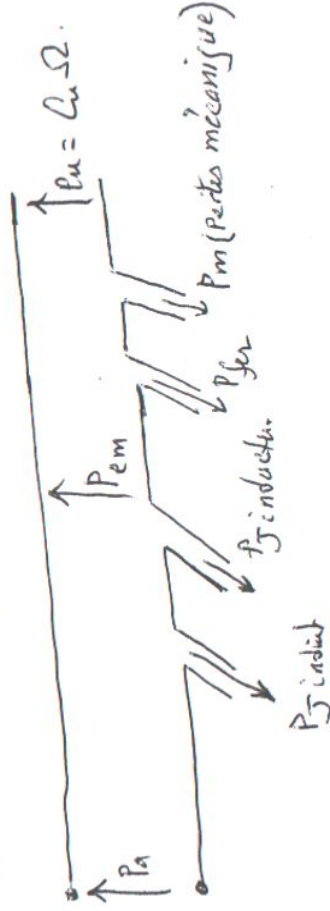
$$\Rightarrow C_e = k\phi \left(\frac{U}{R_A} - \frac{k\phi \Omega}{R_A} \right) = \frac{k\phi U}{R_A} - \frac{k^2 \phi^2 \Omega}{R_A}$$

$$C_{e1} = C_e - C_p$$

Bilan des puissances et rendement.

Le moteur absorbe une puissance

$$P_a = UI + U_{ex} i_{ex}$$



$$P_{Jinduct} = r_{ex} i_{ex}^2 = U_{ex} i_{ex}$$

Puissance électromagnétique $P_e = EI = C_e \Omega$;

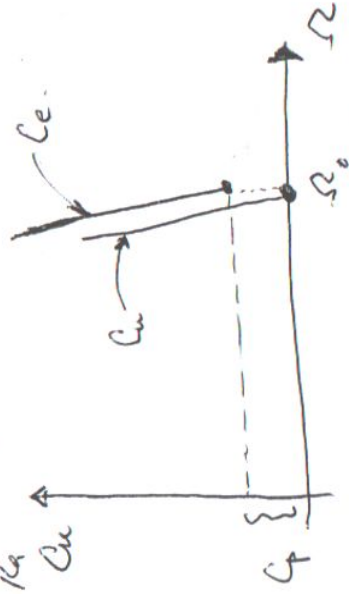
La puissance disponible sur l'arbre du moteur

$$P_u = P_a - P_{Jinduct} - P_c \quad ; \quad P_c = P_{fer} + P_m$$

$$C_e = C_u + C_p \quad ; \quad C_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad ; \quad C_e = \frac{EI}{\Omega} \quad ; \quad C_p = \frac{P_c}{\Omega}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_{Jinduct} + P_a + P_c}$$

* les pertes constantes P_c sont déterminées par l'essai à vide.



Ω_0 : vitesse à vide.

P_{em} = Puissance électromagnétique

$$P_{em} = EI = C_e \Omega$$

Méthodes de variation de la vitesse de la vitesse du M.C.C à excitation séparée

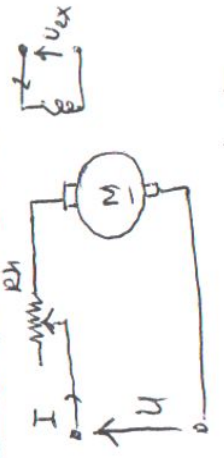
selon la relation $\Omega = \frac{U - R_h I}{k\phi}$ avec $k = \frac{p n}{2\pi a}$.

on peut faire varier la vitesse du M.C.C par trois méthodes.

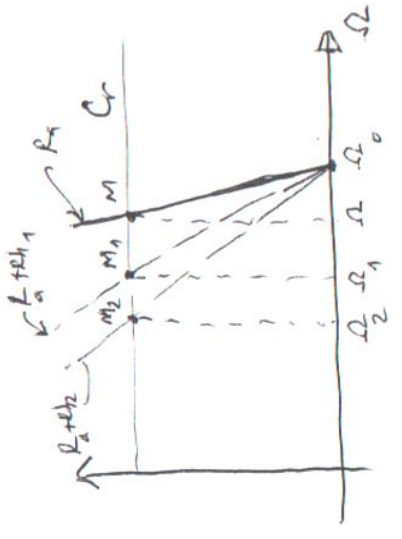
a) variation de la résistance de l'induit (augmentation de cette résistance)

$U = U_n; \phi = \phi_n$

On peut réduire la vitesse en augmentant la résistance de l'induit avec un rhéostat R_h branché en série avec l'induit



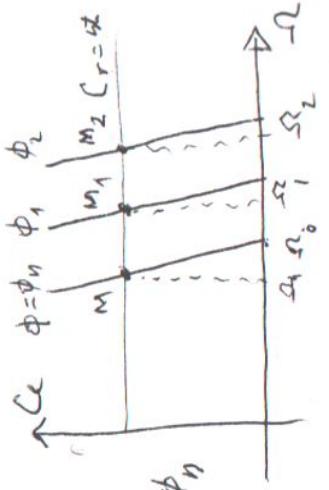
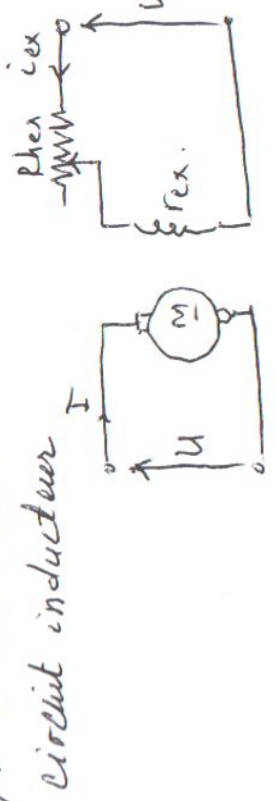
on obtient ainsi un faisceau de droites concourants.



Le type de réglage est mauvais à la fois sur le plan technique et sur le plan économique.

b) variation du flux d'excitation:

Le démarrage du moteur (shunt ou séparé) doit toujours être assuré avec le flux maximal. La vitesse nominale étant atteinte quand la tension nominale est appliquée. Dans ces conditions, on se pas la possibilité d'augmenter le flux, on peut seulement le réduire en diminuant le courant d'excitation par l'intermédiaire d'un rhéostat de champ que l'on insère dans le



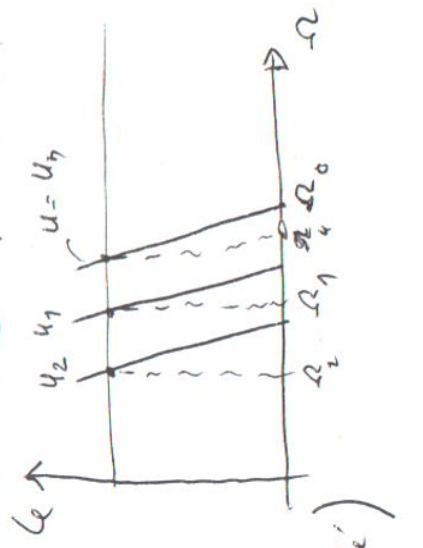
$\Omega = \frac{U - R_h I}{k\phi}$

. Le réglage est bon de point de vue technique (les caractéristiques se déplacent parallèlement à celle de l'origine). Le réglage est aussi bon de point de vue économique. Avec ce procédé, on ne peut qu'augmenter la vitesse de moteur par rapport à sa vitesse nominale.

c) variation de la tension d'alimentation.

On règle le flux à sa valeur maximale. Si l'on applique à l'induit

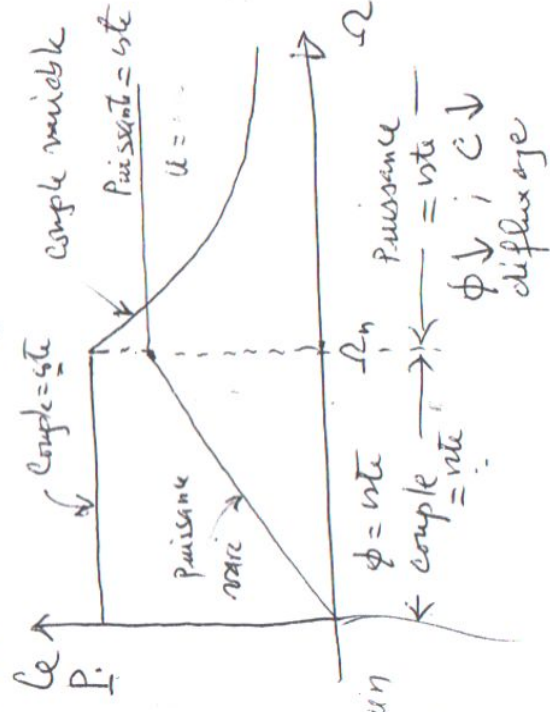
des tensions de plus en plus faibles, on obtient des caractéristiques parallèles.



Le mode de réglage de vitesse est excellent de point de vue technique et économique. Ce mode de réglage nécessite un variateur de tension (ex Redresseur Commandé monophasé ou triphasé; Redresseur Semi-Commandé mono ou triphasé).

Action Conjuguée :

Comme on l'a vu, le réglage de la tension permet seulement de diminuer la vitesse, le réglage du flux permet seulement de l'augmenter. Dans ces conditions, on procède de la manière suivante. Pour des vitesses inférieures à la vitesse nominale, on fait varier la tension, on travaille à couple constant; $C_e = k\phi I_n = k'I_n$. \Rightarrow le flux est constant, le couple est aussi constant pour éviter l'échauffement.



Pour des vitesses supérieures à la vitesse nominale, c'est la tension qui est constante. le couple et le flux diminuent avec l'augmentation de la vitesse. c'est un fonctionnement à puissance constante.

Démarrage du M.C.C. :

selon la relation $U = E + R_e I \rightarrow I = \frac{U - E}{R_e}$ est le courant absorbé par le moteur. A la mise sous tension et du R_e de collage, la vitesse du moteur est nulle, donc la f.c.e.m l'est aussi. donc, le courant sera égale à $I = \frac{U}{R_e}$ m'est limité que par R_e . Le courant est important et risque de détériorer la machine, On utilise un rhéostat à plots pour le limiter. Le rhéostat sera éliminé progressivement au fur et à mesure que la vitesse augmente.

Inversion du sens de rotation et freinage.

Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser le courant soit dans l'induit ou dans l'inducteur.

$$C_e = k \phi I$$

- On inverse le courant dans l'induit en inversant les polarités de la tension aux bornes de l'induit, le couple s'inverse et la rotation s'inverse.
- On inverse le courant dans l'inducteur en inversant les polarités de la tension aux bornes de l'inducteur \Rightarrow le i_{ex} s'inverse, le flux s'inverse et le couple s'inverse puis la rotation.

Freinage du moteur à C.C.

a) Freinage Rhéostatique :

Dans la position (1) la machine est alimentée par l'induit et fonctionne comme moteur. Pour

réaliser le freinage de la machine, on débranche l'induit de la position (1)

et on le connecte aux bornes du

Rhéostat (position 2). L'inducteur reste branché sur la ligne d'alimentation.

Dans les conditions, le courant I s'inverse, le couple s'inverse et devient résistant et la machine devient génératrice.

$$I = \frac{E}{R_a + R_h} ; C_e = k I \phi ; \text{ le couple de freinage est proportionnel au courant puisque le flux est constant.}$$

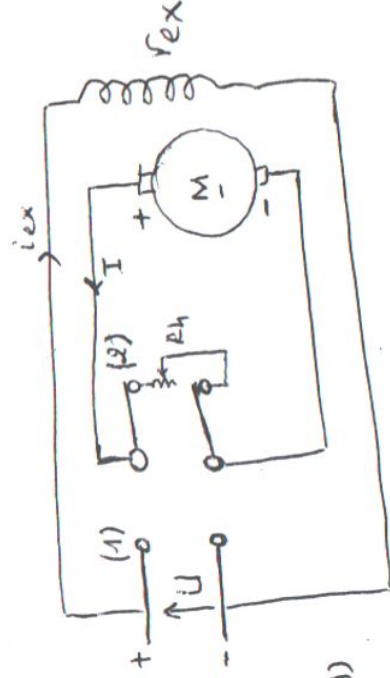
La f.e.m diminue quand la vitesse décroît, pour maintenir un couple de freinage suffisant, on doit diminuer la résistance du Rhéostat R_h

Dans ce type de freinage, l'énergie cinétique du moteur et de la charge sera transformée en énergie électrique qui sera dissipée dans le rhéostat R_h .

Position 1	Position 2
$I > 0$	$I < 0$
$\Omega > 0$	$\Omega < 0$
$P > 0$	$P < 0$

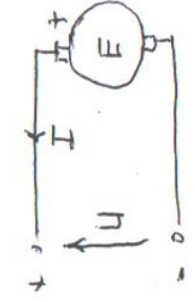
b) Freinage par récupération : $P = UI$ est la puissance échangée entre la source et la machine.

Pour ce type de freinage, on dispose d'une source de tension réglable. Pour qu'on puisse freiner la machine, il faut que celle-ci fonctionne en génératrice, c'est à dire que $E > U$



Dans ces conditions, le courant d'induit change de signe, ce qui a pour effet de changer le sens du couple électromagnétique. Comme le sens de rotation n'a pas changé, le couple ainsi exercé a pour effet de freiner la machine.

On fait diminuer la tension U chaque fois que la vitesse diminue. Dans les conditions, on réalise le freinage de la machine avec retour de l'énergie



vers la source d'alimentation, c'est un freinage par récupération.

L'énergie cinétique de l'ensemble (rotor + charge) se transforme en énergie électrique qui retourne vers la source. La puissance récupérée est $UI < 0$

Différents type de charges

Une charge mécanique est caractérisée par sa caractéristique mécanique qui est le moment du couple résistant C_r en fonction de la vitesse $C_r = f(\Omega)$.

Les charges les plus répandues sont :

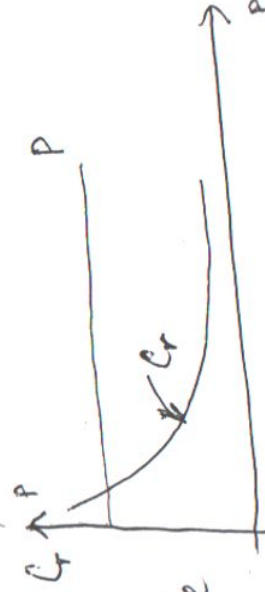
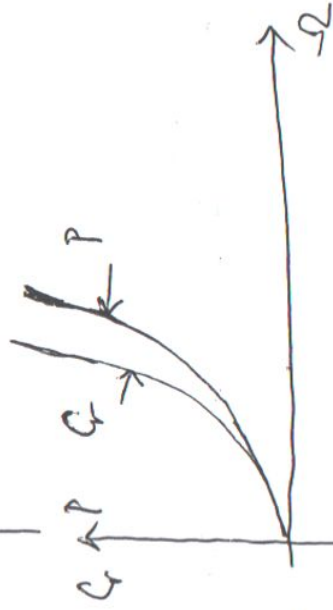
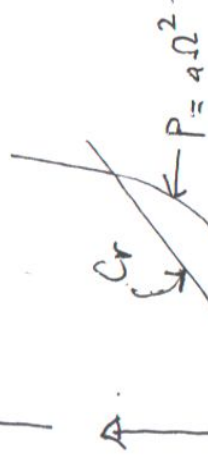
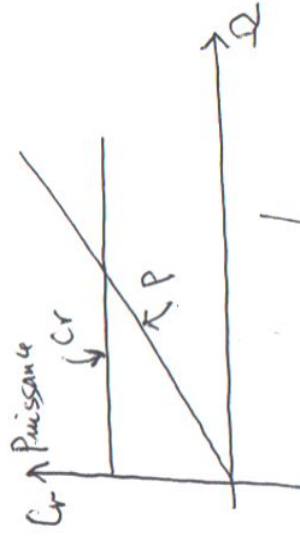
a) Les charges à couple constant $C_r = \text{cte}$ c'est le cas pour de nombreuses machines outils (tours - fraiseuse, perceuse ... etc) et pour le levage.

b) Les charges à couple proportionnel à la vitesse $C_r = a\Omega$ donnant une droite qui passe par l'origine c'est le cas des pompes hydrauliques

c) Les charges à couple proportionnel au carré de la vitesse $C_r = a\Omega^2$ ce qui donne une parabole \Rightarrow la puissance $P \propto \Omega^3$. c'est le cas des ventilateurs, des pompes centrifuges, des turbines centrifuges ... etc

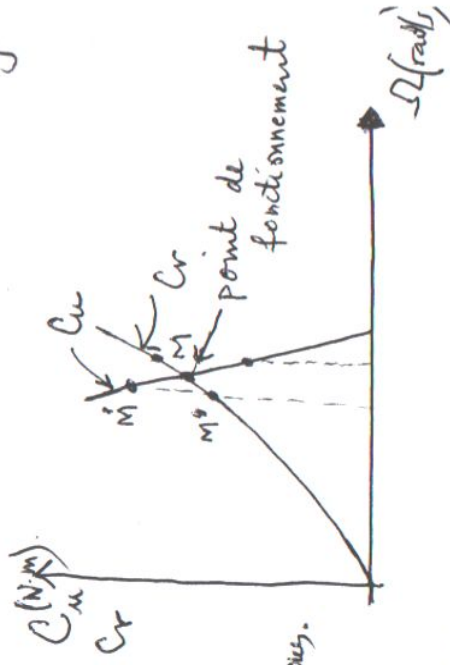
d) Les charges à puissance constante $P = \text{cte}$ $C_r = \frac{A}{\Omega}$ C_r est une courbe hyperbolique.

c'est le cas typique d'une machine qui enroule ou déroule un matériau. Le diamètre de la



• bobine variant au fur et à mesure de l'enroulage/dérroulage, la puissance constante et le couple est inversement proportionnel à la vitesse.

* Point de fonctionnement en régime permanent d'une machine entraînant une charge.



une fois le régime transitoire terminé, (exemple démarrage), la machine et la charge connectée tourneront à la vitesse indiquée par l'intersection des deux caractéristiques.

• En régime permanent (vitesse constante),

le couple moteur C_u développé par la machine

est égale au couple résistant C_r imposé par la charge. $C_u = C_r$

• En régime transitoire, la vitesse est régie par la loi fondamentale de

la dynamique $J \frac{d\Omega}{dt} = C_u - C_r$

J : moment d'inertie sur l'arbre du moteur de la partie tournante.

① si $C_u > C_r$, alors $\frac{d\Omega}{dt} > 0$, le moteur accélère et la vitesse augmente

② si $C_u < C_r$, alors $\frac{d\Omega}{dt} < 0$, le moteur décélère et la vitesse diminue.

si $C_u = C_r$, alors $\frac{d\Omega}{dt} = 0$, le moteur tourne à vitesse constante.

Pour ① si la vitesse augmente, on se retrouve au point de fonctionnement M c'est un fonctionnement stable.

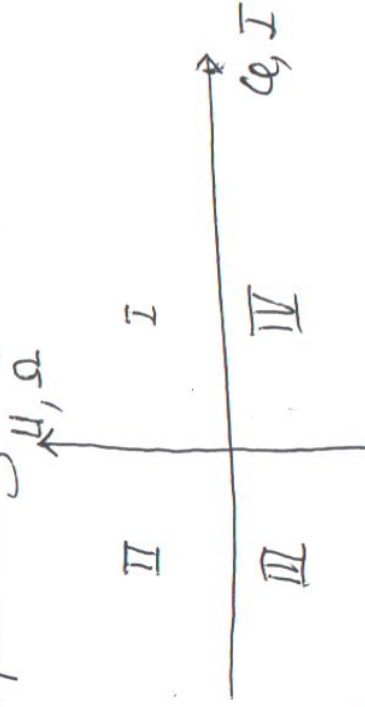
pour ② si la vitesse diminue, on se retrouve au point de fonctionnement M c'est un fonctionnement stable.

avec cette disposition de C_u et de C_r , le fonctionnement est stable. si la vitesse diminue ou augmente, on converge vers le point stable M.

Fonctionnement dans les quatre quadrants :

Un système d'entraînement est composé principalement d'un moteur à courant continu ou alternatif) entraînant une charge mécanique par le biais d'une transmission. Le moteur reçoit de l'énergie du variateur de vitesse ou directement du réseau et la transforme en travail mécanique. Lorsque l'application le permet la charge peut restituer de l'énergie mécanique. Cette énergie récupérée, correspond souvent à l'inertie des masses en mouvement. Lors de la phase de récupération d'énergie imposée par la charge, la machine devient génératrice. Si le variateur ou le raccordement du moteur le permet, cette énergie est renvoyée au réseau électrique ou dissipée en chaleur dans un système de freinage rhéostatique.

Dans le repère (ω, Ω) ou (U, I) , on peut distinguer quatre quadrants



Ce sont les convertisseurs d'alimentation

qui limitent le nombre de quadrants utilisables par la machine.

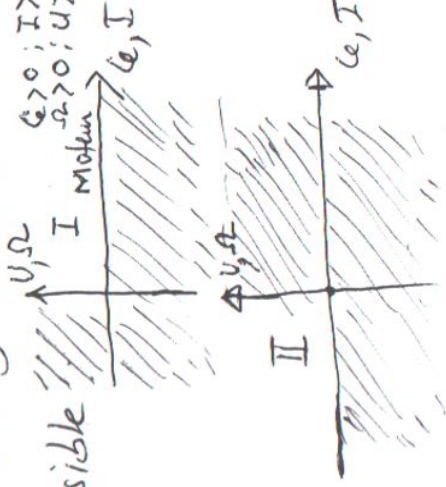
Dans le quadrant (I) seul le fonctionnement

moteur est ici possible. Le ralentissement

peut avoir lieu que par dissipation de l'énergie cinétique de rotation

dans la charge. Dans le quadrant (II), on peut contrôler l'accélération mais non le ralentissement. On adjoint parfois un frein au moteur. Ce type de

variateur utilise un convertisseur non-reversible $P = \omega \Omega > 0$, fonctionnement moteur.



Dans le quadrant (II) seul le fonctionnement

générateur est possible. La machine doit être entraînée par le côté mécanique.

La génération d'énergie sur mobiles

alternateurs de vélo, de voiture, d'avion ... etc)

on peut définir le fonctionnement dans les quatre quadrants par l'exemple du déplacement horizontal d'un train.

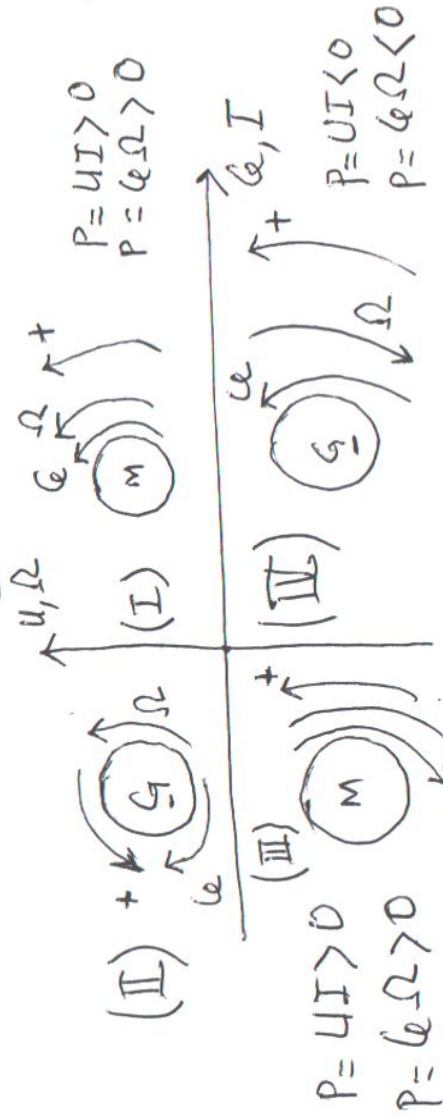
- à l'aller, la machine fonctionne en moteur dans le quadrant (I)

- au retour, la machine fonctionne en moteur dans le quadrant (IV)

Lors du ralentissement forcé jusqu'à l'arrêt.

- Pour l'aller, la machine fonctionne en génératrice dans le quadrant (II)

- Pour le retour, la machine fonctionne en génératrice dans le quadrant (IV)



Exemples de fonctionnement dans 02 quadrants (I) et (IV)

ascenseurs, treuil de levage

- dans le quadrant (I), la machine fonctionne comme moteur. (Il fait monter la cage de l'ascenseur)

- dans le quadrant (IV), la machine fonctionne comme génératrice et réalise

le freinage de la cage de l'ascenseur lors de la descente avec inversion

du sens de rotation.

Ce fonctionnement exige un convertisseur réversible en tension

Exemple de fonctionnement dans 02 quadrants (I) et (II)

voir le déplacement unidirectionnel du train.

- Dans le quadrant (I), la machine fonctionne comme moteur pour accélérer le train

- Dans le quadrant (II), la machine fonctionne comme génératrice pour le ralentissement du train; Ω ne change pas de signe, mais c'est le couple

qui change de signe. Ce fonctionnement exige un convertisseur réversible en tension