

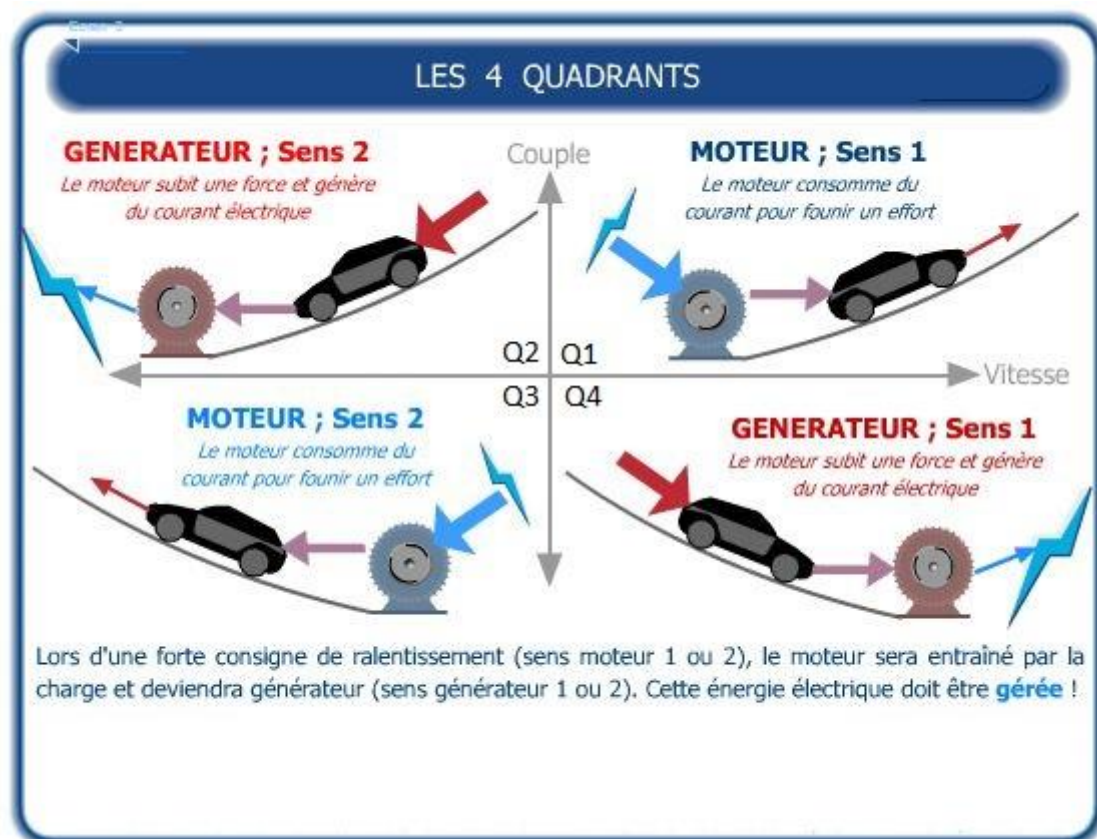
Le fonctionnement en 4 Quadrants d'un Entraînement à variation de vitesse

➡ Objectifs du cours

- Découverte du fonctionnement en 4 quadrants
- Analyse sur une application réelle
- Hacheur 4 quadrants - définitions de base

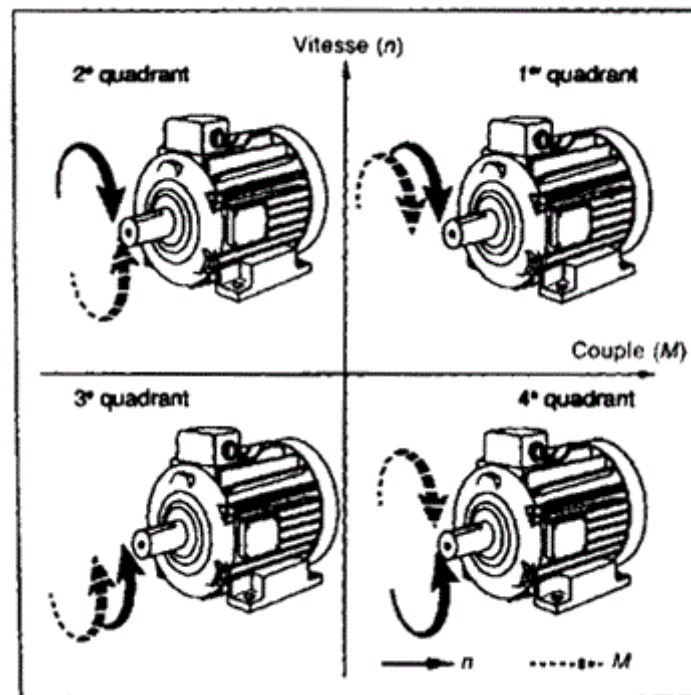
➡ Les 4 quadrants

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



Le graphique 4 quadrants permet de distinguer les phases de fonctionnement du point de vue mécanique de la machine (ceci est aussi valable pour le moteur à courant continu et alternatif).

Il correspond à l'évolution dans le temps et en correspondance, du couple et de la vitesse, comme le représente le graphique des 4 quadrants du moteur.



Produit du couple par la vitesse : *positif*

Produit du couple par la vitesse: *négatif*



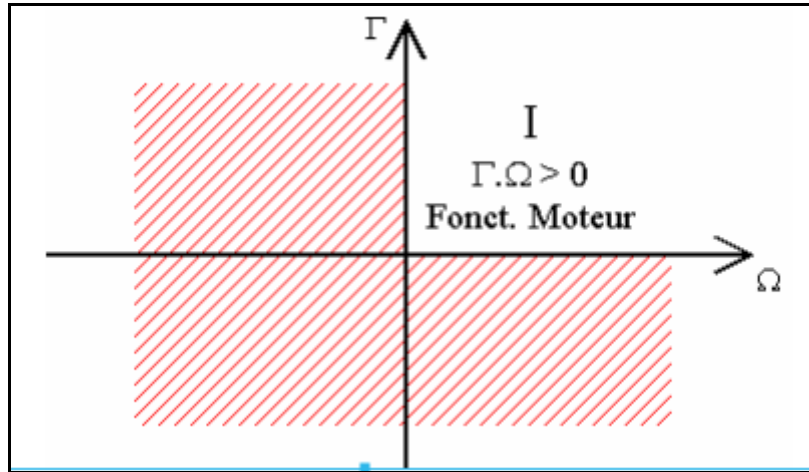
Fonctionnement en : *Moteur*

Fonctionnement en : *Génératrice*

Ce sont les convertisseurs d'alimentation qui limitent le nombre de quadrants utilisables par la machine qui, elle, est quasiment toujours quatre quadrants. Suivant la nature de l'entraînement, on peut désirer ou non que la machine puisse freiner la charge et/ou inverse le sens de marche. C'est le fonctionnement 1, 2 ou 4 quadrants.

► Fonctionnement 1 quadrant moteur

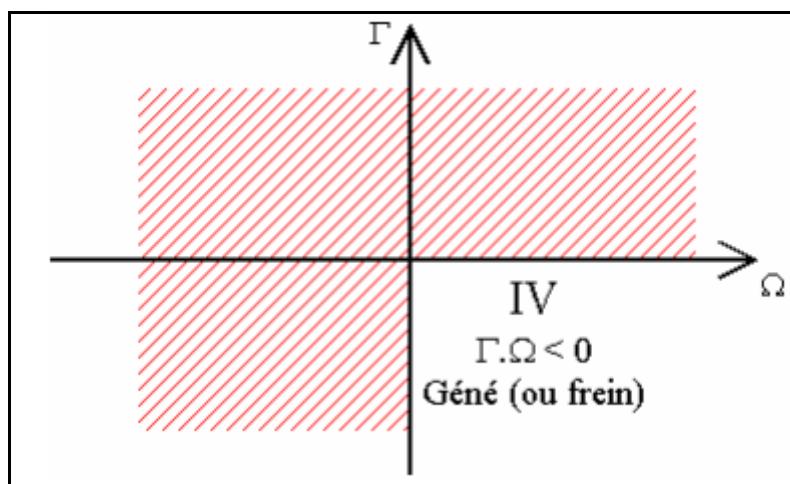
Seul le fonctionnement moteur est ici possible. Le ralentissement ne peut avoir lieu que par dissipation de l'énergie cinétique de rotation dans la charge. Dans ce mode de fonctionnement, on peut contrôler l'accélération mais non le ralentissement. On adjoint parfois un frein au moteur. Ce type de variateur utilise un convertisseur non-réversible.



Applications : perceuse électrique à variateur, aspirateur, pompage, ventilation, essorage de machine à laver (c'est plutôt du Q I + III),...

► Fonctionnement 1 Quadrant générateur

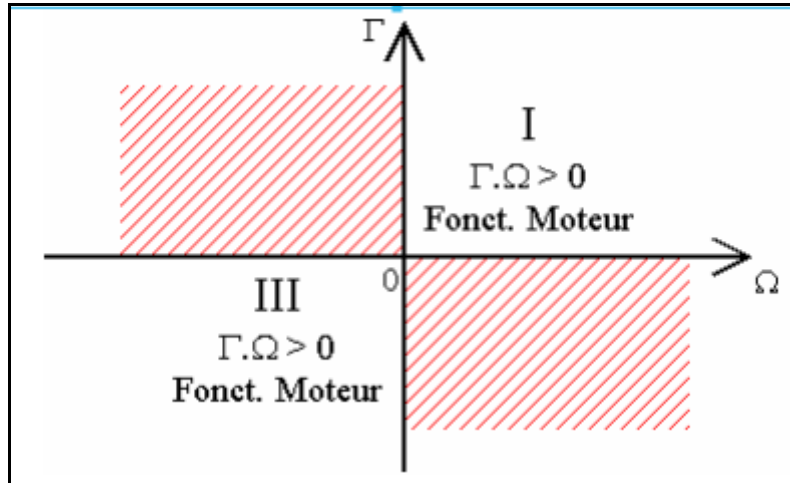
Seul le fonctionnement en génératrice de la machine est ici possible. La machine ne peut démarrer de manière électrique. Elle doit être entraînée par le côté mécanique depuis la vitesse nulle (problème avec certaines éoliennes).



Applications : éolienne (si génératrice utilisée en vitesse variable : machine asynchrone à double alimentation ou alternateur), génération d'énergie sur mobiles (alternateurs de vélo, de voiture, d'avion, de bateau, de train à traction diesel,...) mais pas l'alternateur de centrale de production électrique car il tourne à vitesse constante),...

► Fonctionnement 2 Quadrants I + III (non réversible)

Avec convertisseur non-réversible, il est possible, en passant par l'arrêt, d'obtenir une inversion du couple et de la vitesse de rotation. On obtient alors un fonctionnement deux quadrants moteur (ex : inversion de flux ou de connections d'induit sur MCC ; inverseur mécanique).

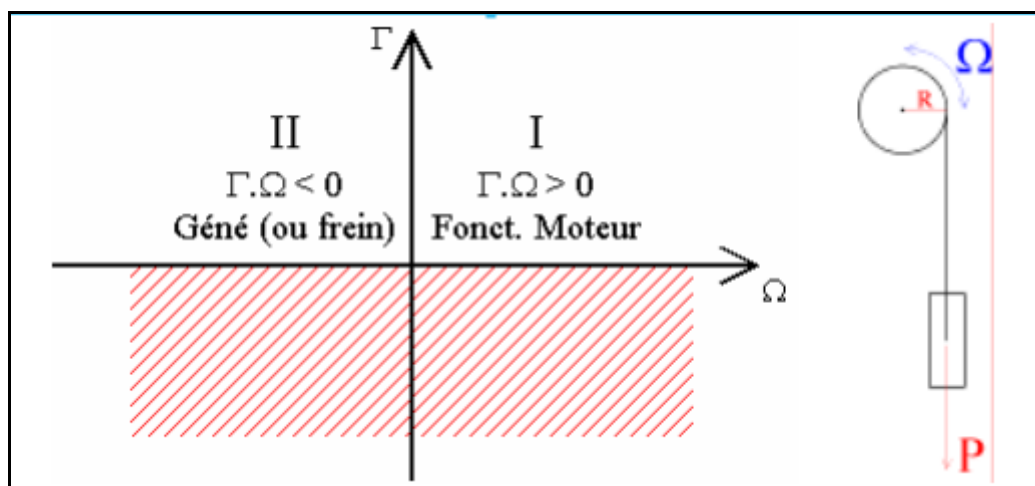


Applications : visseuse-dévisseuse électrique, lève-vitre électrique et réglage de rétroviseur d'automobile, volets roulants, enrouleur-dérouleur de store, portail électrique.

► Fonctionnement 2 Quadrants I + II (réversible type treuil ou levage)

Ce type de variateur utilise un convertisseur réversible 2 quadrants.

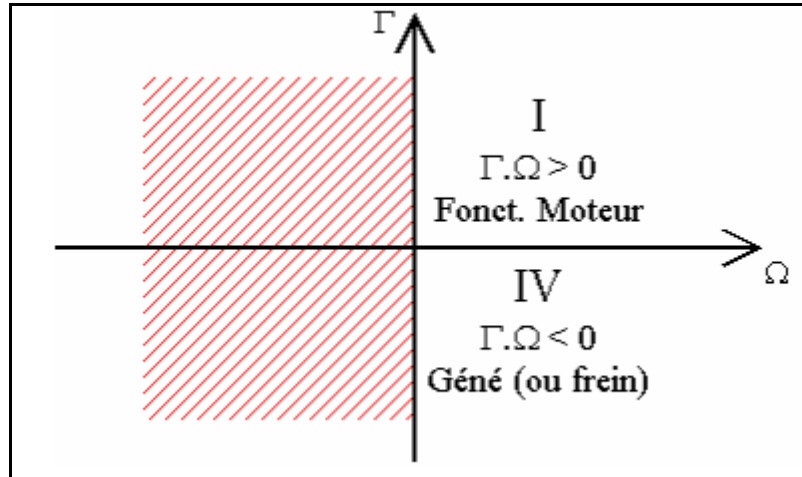
À l'arrêt, le couple résistant peut ne pas être nul (ex : MCC alimentée à flux et courant d'induit unidirectionnel mais avec inversion de tension d'induit).



Applications : treuil, levage,... On peut aussi parler du pompage-turbinage de l'eau pour le stockage (le plus souvent inter-saisonnier) de l'électricité.

➡ Fonctionnement 2 Quadrants I + III (réversible type laminoir)

Ce type de fonctionnement correspond par exemple à l'entraînement d'un véhicule (transport unidirectionnel : scooter électrique,) par moteur électrique. Il faut pouvoir accélérer le véhicule puis le freiner électriquement. (ex : MCC alimentée à flux à tension unidirectionnel, le courant d'induit s'inversant comme le couple).



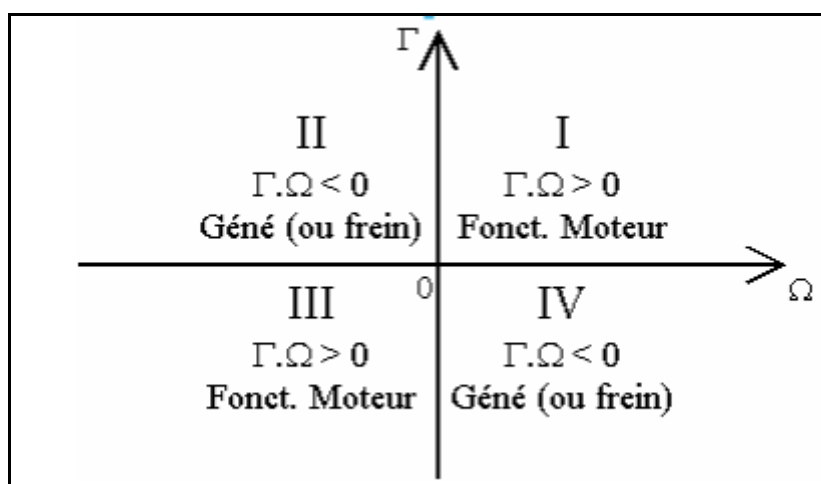
Applications : scooter électrique, laminoir, dérouleuse,...

➡ Fonctionnement 4 Quadrants (réversible)

Mis à part l'inversion de signe des deux grandeurs couple et vitesse (en général à l'arrêt) des fonctionnements deux quadrants, on doit parfois choisir une véritable solution quatre quadrants où le passage d'un quadrant à l'autre peut avoir lieu n'importe où.

⇒ 1 quadrant + inversion mécanique ou électrique + frein mécanique ou 2 quadrants réversible + inversion mécanique ou électrique ou 4 quadrants pur.

C'est la solution la plus performante mais souvent la plus onéreuse.



Applications : traction, robotique, machines-outils,...

➡ Modes de freinage

✚ Freinage mécanique

Utilisation

- avec un convertisseur (ou une chaîne de convertisseurs) non-réversible(s) 1 quadrant ou 2 quadrants type I+III et un frein mécanique.
- pour des raisons de sécurité (freinage en l'absence d'alimentation)

☹ : usure (il faut changer les garnitures de freins, poussière)

☹ : pertes

☹ : échauffement (pertes à évacuer)

☹ : bruit acoustique.

😐 : dispositif peu onéreux mais il faut rajouter ce dispositif,

😊 : permet d'obtenir l'arrêt complet,

😊 : peut fonctionner même en l'absence d'alimentation.

✚ Freinage électrique dissipatif ou freinage rhéostatique

La machine fonctionne en génératrice sur résistance avec convertisseur de réglage (sur le côté puissance et/ou sur l'excitation s'il y a lieu). Demande un convertisseur (ou une chaîne de convertisseurs) réversible(s). Fonctionnellement identique au frein à courants de Foucault (mais c'est un autre dispositif).

Si on utilise une cascade redresseur à diodes (non-réversible) - convertisseur réversible, la récupération sur l'alimentation est impossible. On utilise une résistance commutée quand U dépasse un seuil. Cette tension de seuil est choisie au-delà de la tension maximale fournie par le pont de diodes afin qu'il se déconnecte automatiquement. Le condensateur évite une montée trop brutale de la tension.

Le convertisseur permet de doser finement la puissance de freinage.

☹ : pertes

☹ : échauffement (pertes à évacuer),

☹ : freinage à l'arrêt impossible.

😐 : dispositif peu onéreux (la machine existe, il y a une résistance à ajouter + son contrôle

😊 : pas d'usure,

😊 : pas de bruit acoustique,

😊 : réglage fin possible du freinage grâce à la commande électronique.

🚦 Freinage électrique par récupération

La machine fonctionne en génératrice. Le convertisseur (réversible) renvoie l'énergie à la source d'alimentation.

Demande un convertisseur (ou une chaîne de convertisseurs) totalement réversible(s).

😞 : dispositif plus onéreux (globalement, c'est de passer de 1 ou 2 quadrants à 4 quadrants qui coûte, réversible existe déjà) mais fonctionnalités accrues,

😞 : freinage à l'arrêt possible si alimentation électrique présente.

😊 : pas de pertes

😊 : pas d'usure,

😊 : pas de bruit acoustique,

😊 : réglage fin possible du freinage grâce à la commande électronique.

Exemple : chaîne "batterie d'accumulateurs - convertisseur statique réversible - machine (par exemple véhicule électrique autonome. Si redresseur à diodes (suivi d'un convertisseur réversible) et une seule machine, voir cas précédent (freinage dissipatif).

Si redresseur à diodes et plusieurs machines : une seule source non-réversible et un seul bus de puissance pour l'ensemble (faire schéma). Application en robotique, en traction électrique (métro, tramway,...).

On utilise conjointement le dispositif dissipatif au cas où la production d'énergie serait plus forte que la demande ou qu'elle risque d'être défailante.

Remarque : la commande doit être secourue. La batterie correspondante ne peut pas emmagasiner l'énergie de la partie puissance.

Remarque :

En cas de coupure de l'alimentation générale sur une ligne de process utilisant des moteurs synchronisés (train de papeterie ou trains de laminoir, par exemple), on peut utiliser l'énergie de l'ensemble des inerties de rotation ($\Sigma \frac{1}{2} J . \Omega^2$) pour obtenir un ralentissement synchrone de l'ensemble des machines de la ligne et ainsi éviter les dégâts et le nettoyage correspondant, générateur d'arrêt de production et de coût d'immobilisation.