

Contrôle des machines électriques





Introduction

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : contrôle des machines électriques



Exemples de contrôle de machines électriques

- Contrôle de force/couple
 - Enroulement à force de traction constante
- Contrôle de vitesse
 - Usinage : fraisage, tournage
 - Convoyeurs
- Positionnement
 - Perçage
 - Soudure par points
 - Placement de composants
- Contrôle de trajectoire dans l'espace
 - Robotique
 - Machine outil
 - Soudure à l'arc



Problème de régulation

- Maintenir une grandeur à une valeur constante fixée (= consigne), malgré l'influence de perturbations
 - Ex : vent, pente, frottements variables (convoyeur de pierres)...

Problème d'asservissement

- Contrôle dynamique d'une grandeur ayant une consigne variable
- Les processus physiques ont une tendance à l'inertie (masse, effet inductif, capacité thermique...)
- Mouvements rapides = dépense d'énergie élevée

Souvent : régulation + asservissement

- Suivi d'une consigne variable en présence de perturbations



Éléments principaux du cahier des charges

- Précision : écart entre la valeur obtenue et la consigne
 - Régulation : précision statique
 - Asservissement : précision dynamique
- Rapidité de réponse, dynamique
 - Régulation : vitesse de rejet des perturbations
 - Asservissement : temps de réponse (à un échelon), bande passante (entrée sinus)
- Robustesse : tolérance aux variations des caractéristiques du système
 - Tolérances de fabrication
 - Echauffement
 - Vieillissement
 - ...



Principes généraux

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

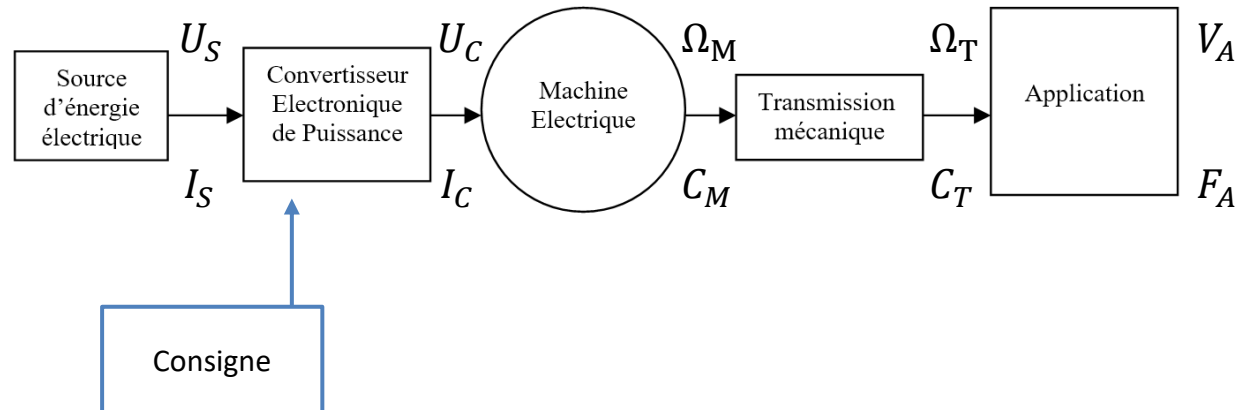
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : contrôle des machines électriques



Applications à vitesse constante sans régulation

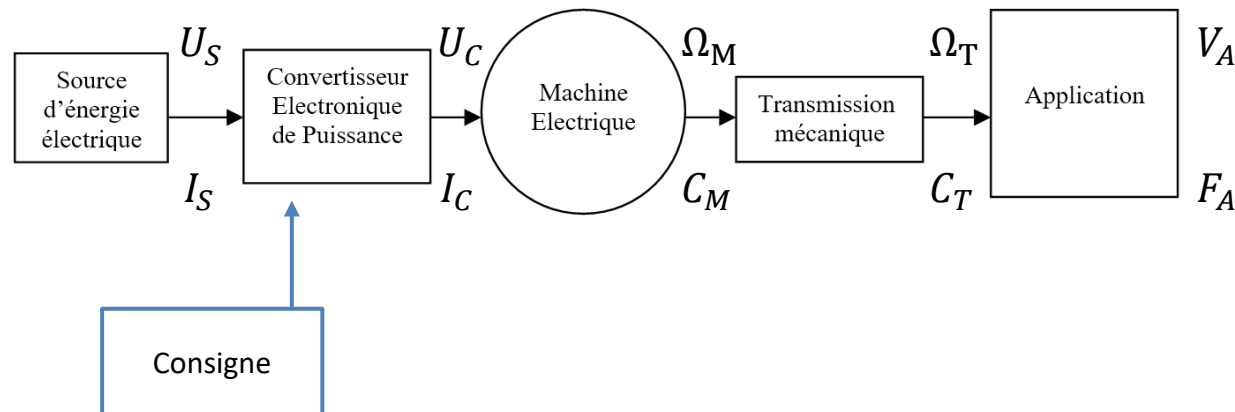
- Ex : tapis roulant d'usine, pompe, sèche cheveux...
- Commande en boucle ouverte
 - Pas forcément besoin de capteur
 - Il faut connaître parfaitement le système à commander
- La vitesse est fixée lors de la conception du système
- Avantages : simple, faible coût
- Inconvénients : peu robuste, sensible aux perturbations et réponse lente





Applications à vitesse constante sans régulation

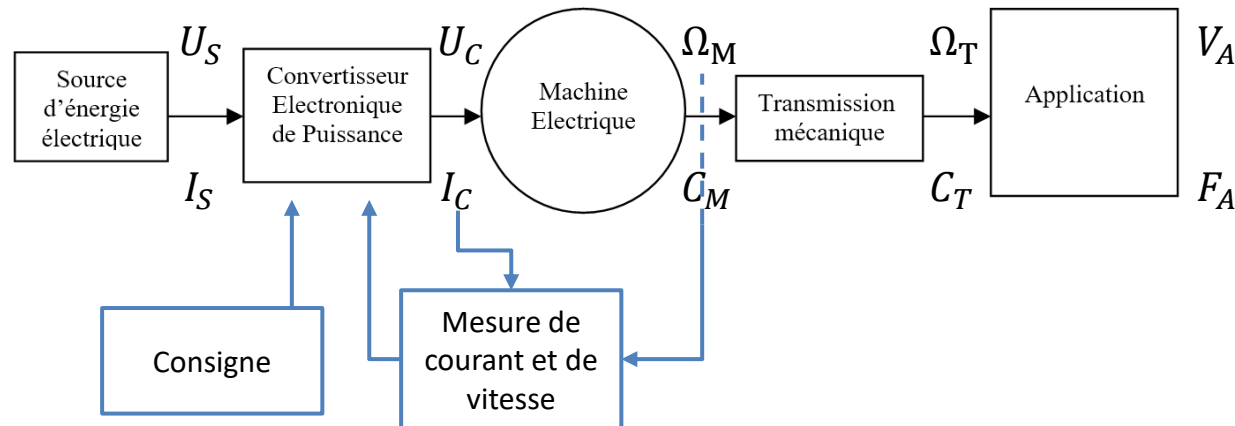
- Ex : machine synchrone branchée sur le réseau 230/400V - 50 Hz
 - Vitesse exactement proportionnelle à la fréquence
 - Le couple s'adapte pour maintenir la vitesse (le courant consommé aussi)
- Machine à courant continu alimentée à tension constante U
 - $U = E + RI = k_\phi \Omega + RC/k_\phi$, soit $\Omega = U/k_\phi - RC/k_\phi^2 = f(\text{couple})$
 - Si le couple augmente => la vitesse diminue
- Machine asynchrone branchée sur le réseau 230/400V - 50 Hz
 - Vitesse à peu près proportionnelle à la fréquence (au glissement près)
 - Si le couple augmente => le glissement augmente => la vitesse diminue





Applications à vitesse constante avec régulation

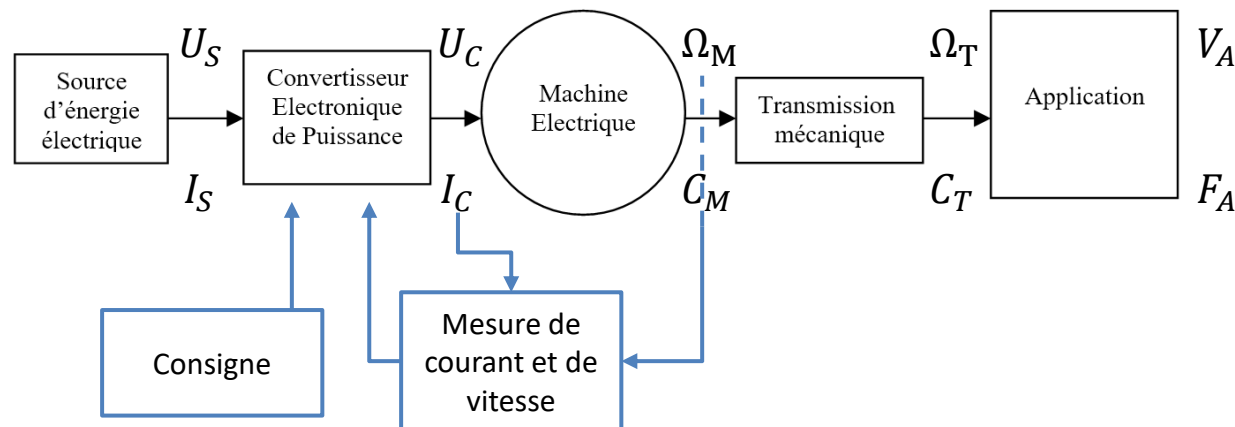
- Ex : régulateur de vitesse automobile
- Commande en boucle fermée
 - Besoin de capteur(s)
- Un signal de commande fixe impose une vitesse Ω_c
 - Mais la vitesse peut varier à cause de perturbations (pente, vent, graviers...)
 - Besoin d'adapter le couple (donc l'alimentation) pour garantir la vitesse





Applications à vitesse constante avec régulation

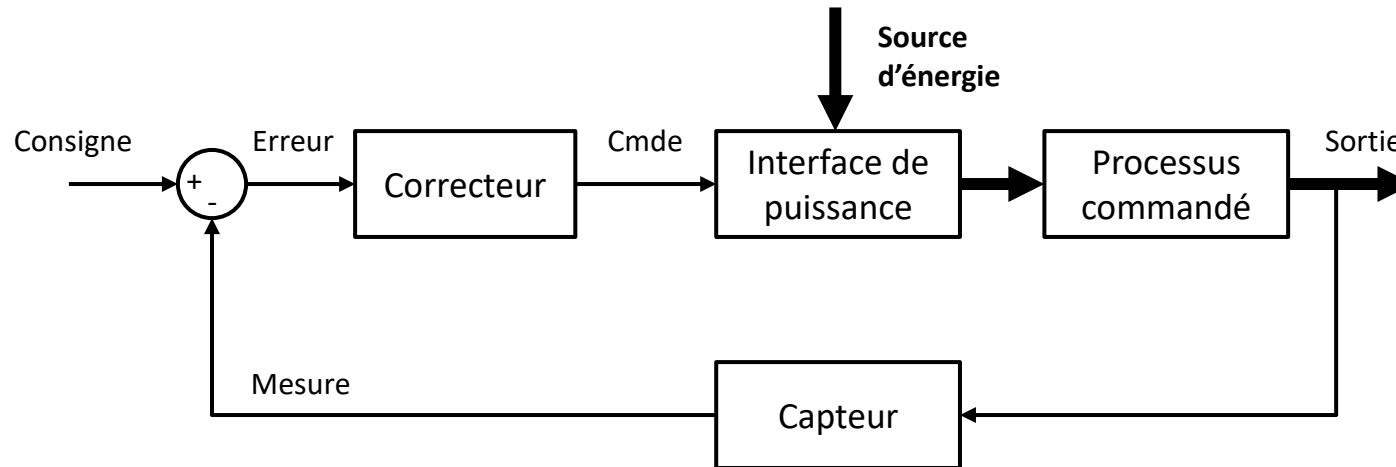
- Ex : machine à courant continu alimentée par un CEP
 - Consigne Ω_c et mesure de la vitesse Ω_{mes}
 - Si $\Omega_{mes} > \Omega_c$: diminution de la tension \Leftrightarrow diminution du rapport cyclique
 - Si $\Omega_{mes} < \Omega_c$: augmentation de la tension \Leftrightarrow augmentation du rapport cyclique
- /!\ Respect des limites de fonctionnement /!\
 - Besoin d'une mesure de courant
 - Si le courant dépasse la valeur limite : réduction de la tension
 - Ex : commande à 1500 tr/min mais rotor bloqué... \Rightarrow courant infini ?! \Rightarrow non





Principe de la boucle fermée (« système bouclé »)

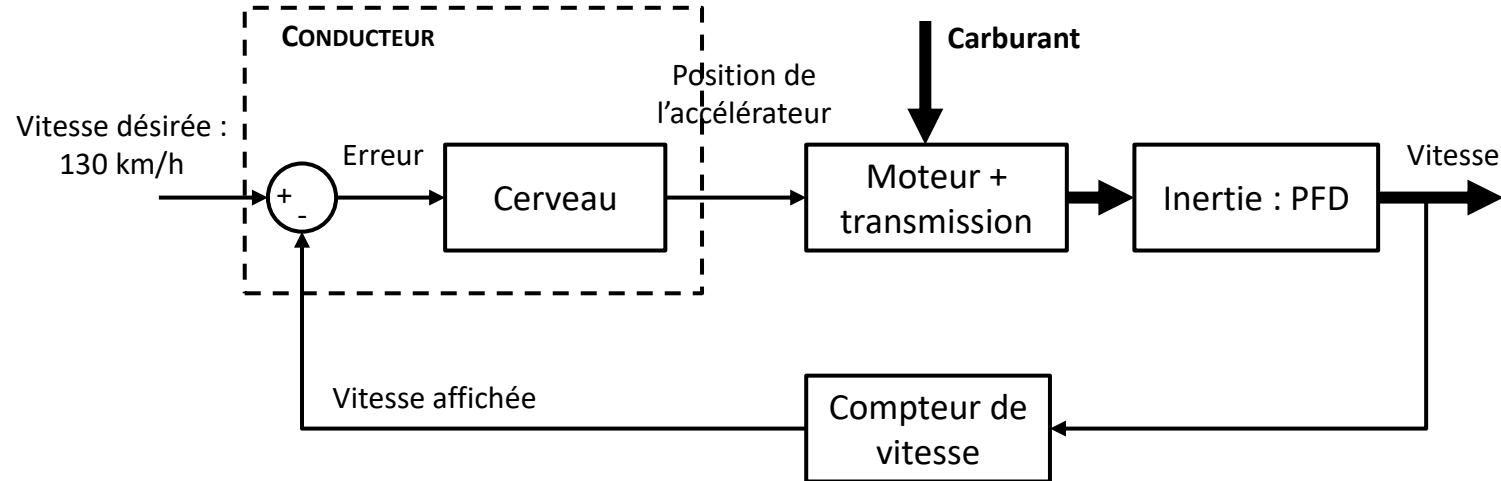
- Objectif : sortie = consigne
 - Vérification de la « sortie » par la mesure
 - Action sur la commande (cmde) si sortie \neq consigne



- **Capteur** : convertit la grandeur de sortie en signal utilisable par la commande
- **Compateur** : soustracteur qui réalise l'opération « Consigne - Mesure »
- **Correcteur** : agit sur la commande pour tenter d'annuler l'erreur



Exemple de contrôle de la vitesse d'une voiture



Remarques

- Le conducteur ne connaît pas le processus, il se base uniquement sur l'erreur
- En réalité, **c'est la mesure qui est asservie** et non la sortie (/!\ fiabilité)
 - Une personne ne régule pas la vitesse de la voiture, mais la vitesse indiquée par le compteur
- Un système bouclé mal conçu ou mal réglé peut être instable
 - Il se met à osciller ou à diverger



Correcteur P (proportionnel)

$$Commande(t) = K_p \times Err(t)$$

- **Action P** : action de base qui tend à réduire l'erreur mais ne l'annule pas toujours
- En effet, quand l'erreur est nulle, la commande s'annule elle aussi
- Il faut donc qu'il y ait une erreur pour que la commande soit non nulle
- Coefficient K_p : permet de régler le correcteur
 - S'il est fort : dynamique plus rapide, erreur statique diminuée mais risque d'instabilité
 - S'il est faible : dynamique plus lente, erreur statique augmentée mais plus de stabilité

Correcteur PI (Proportionnel Intégral)

$$Commande(t) = K_p \times Err(t) + K_I \times \int_0^t Err(\tau).d\tau$$

- **Action I** : doit permettre d'obtenir une erreur nulle lorsque la consigne est constante

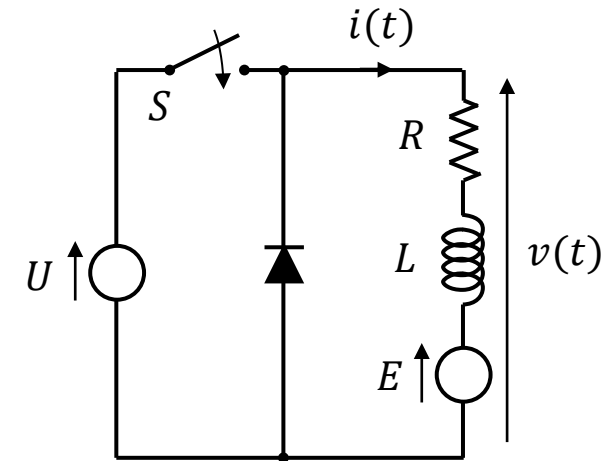


Ex : régulation en courant (correcteur P)

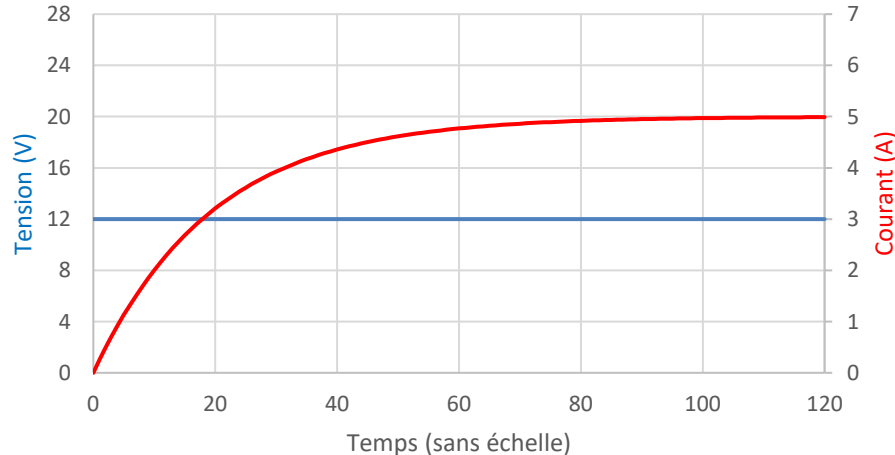
- Respect des limites (ex : tension max = 24 V)

$$\frac{L}{R} \frac{di}{dt} + i = \frac{\alpha U - E}{R}$$

- Objectif : atteindre un courant de 5 A ($E = 0$ V)
- Commande de la tension (rapport cyclique α)

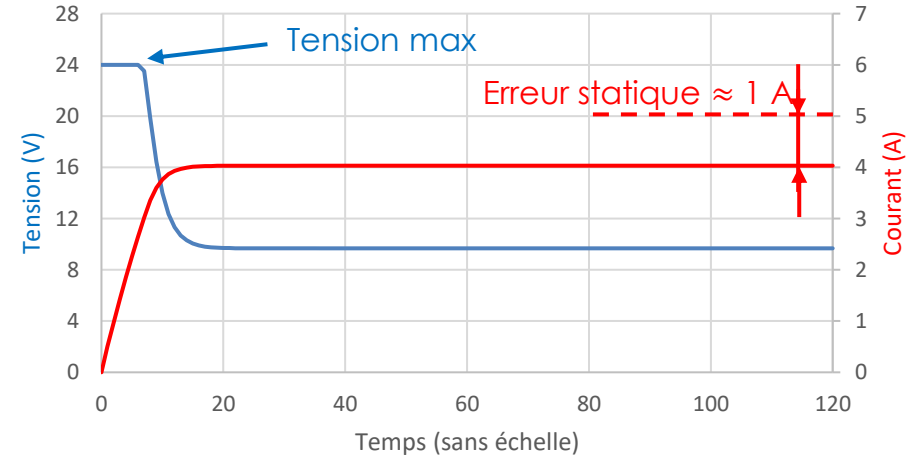


Boucle ouverte



- Estimation de la tension nécessaire
- Dynamique lente et peu robuste (/!\ incertitudes)

Boucle fermée avec correcteur P

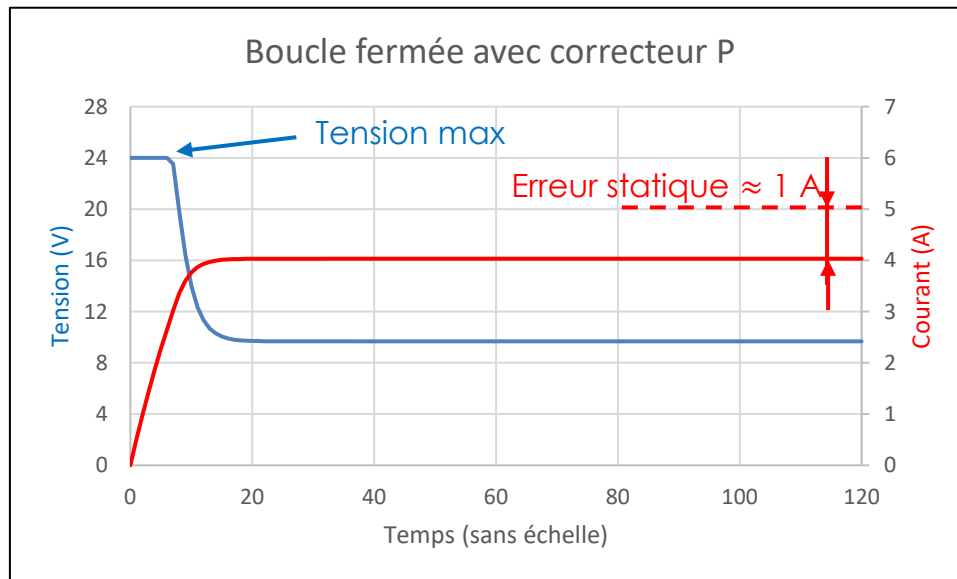
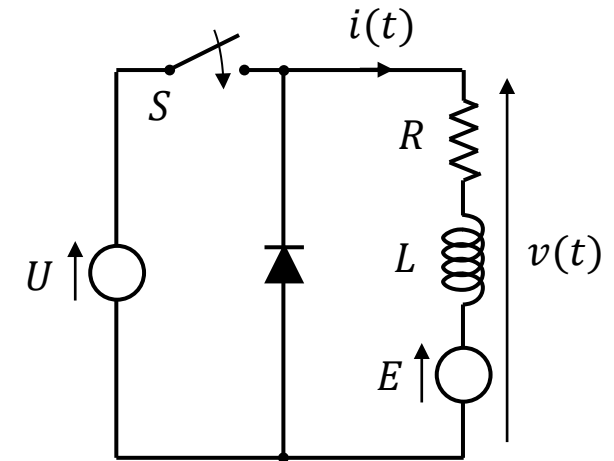


- Augmentation de la tension si sortie < consigne
- Meilleure dynamique, mais erreur statique

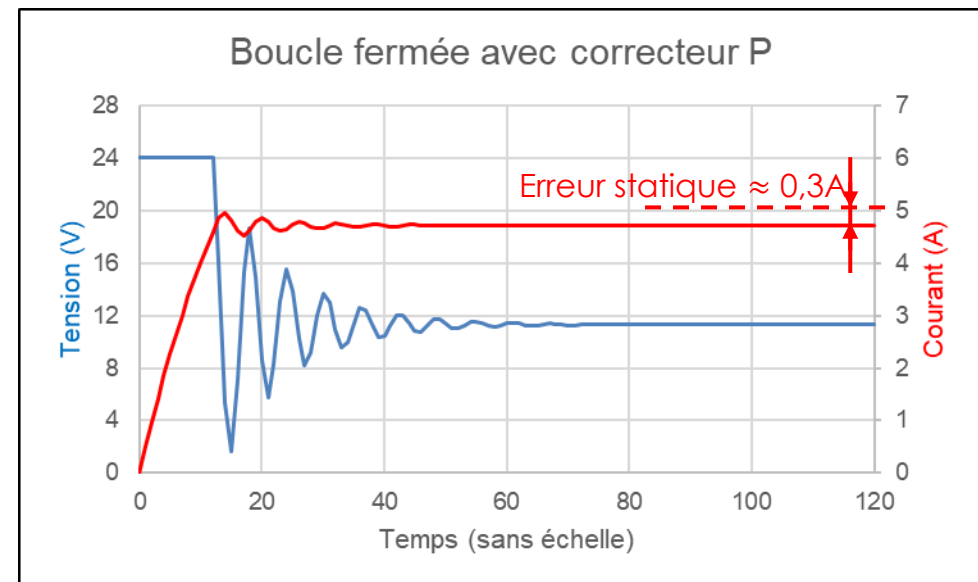


Ex : régulation en courant (correcteur P)

- Coefficient K_P : permet de régler le correcteur
 - S'il est fort : dynamique plus rapide, erreur statique diminuée mais risque d'instabilité
 - S'il est faible : dynamique plus lente, erreur statique augmentée mais plus de stabilité



- Augmentation de la tension si sortie < consigne
- Meilleure dynamique, mais erreur statique

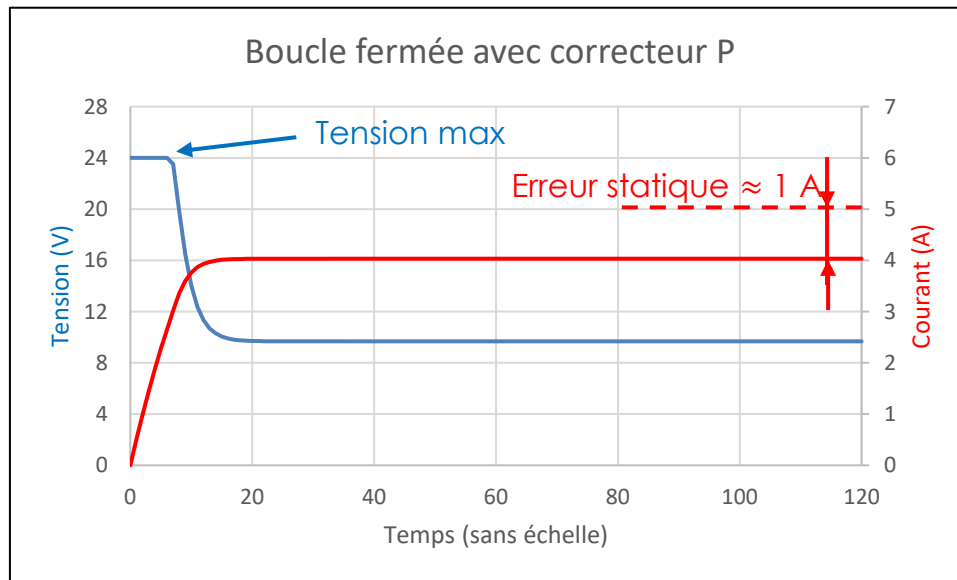
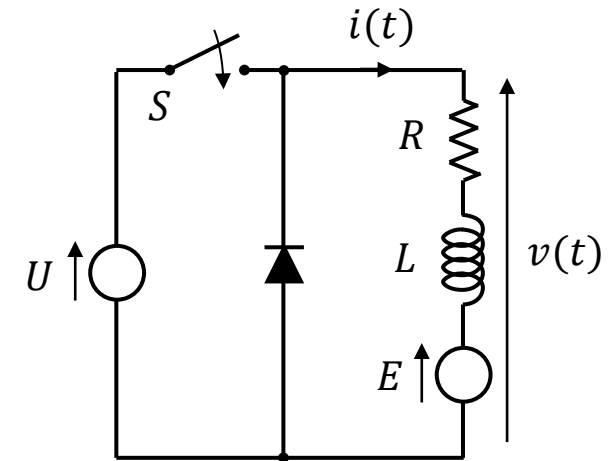


- Ex : correcteur P avec un **coeff K_P plus élevé**
- Erreur statique réduite, mais apparition **d'oscillations**

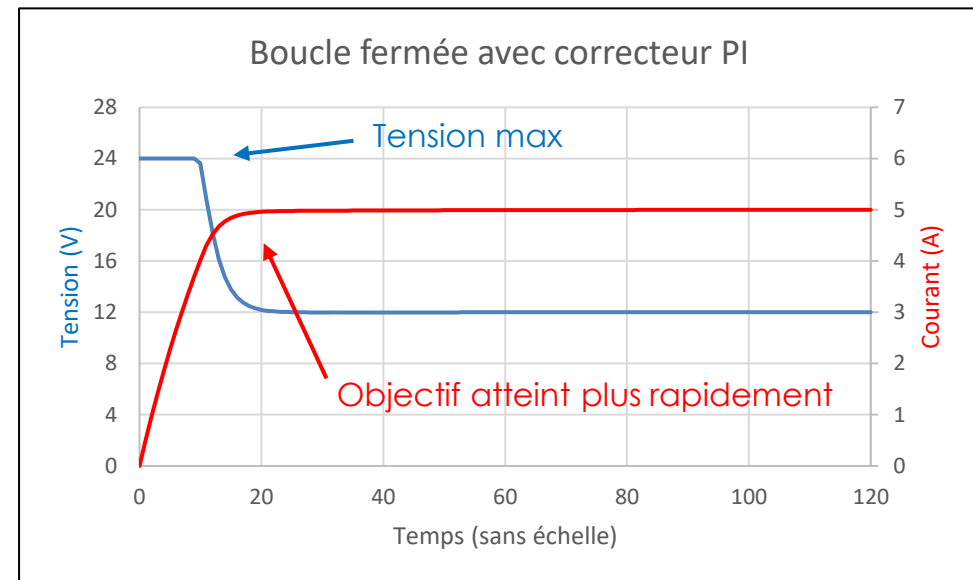


Ex : régulation en courant (correcteur PI)

- $Commande(t) = K_p \times Err(t) + K_I \times \int_0^t Err(\tau).d\tau$
- **Action I** : doit permettre d'obtenir une erreur nulle lorsque la consigne est constante
- Amélioration de la commande



- Dynamique intéressante, mais erreur statique

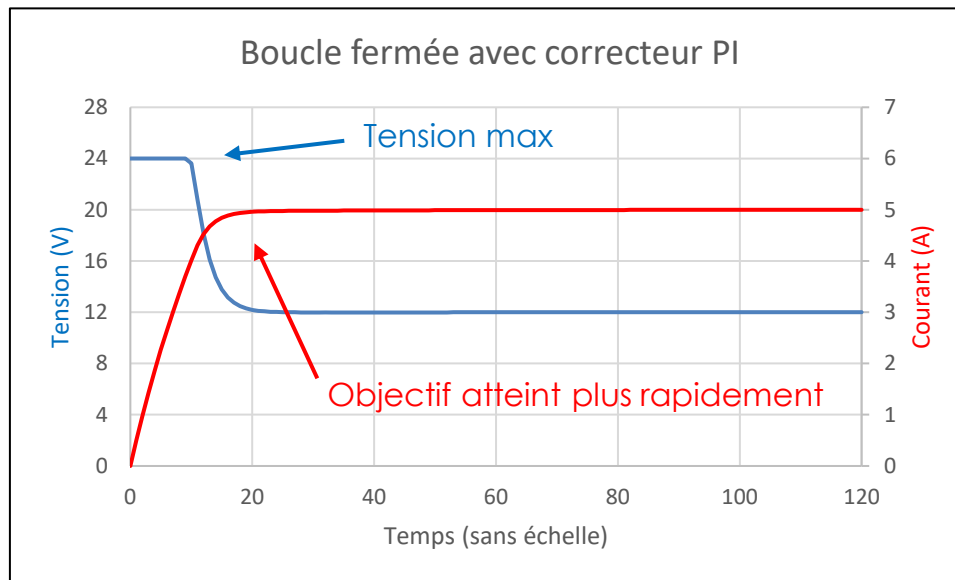
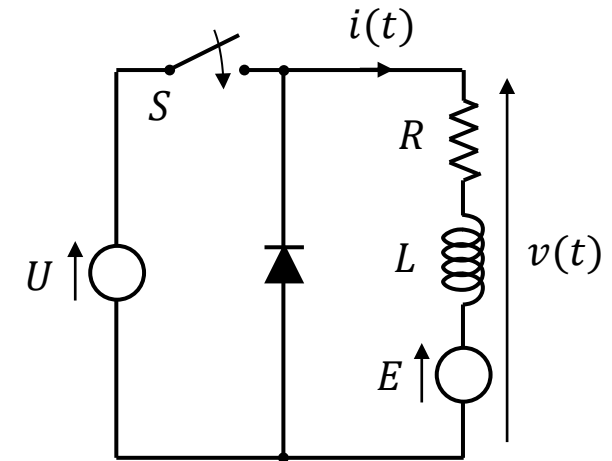


- Dynamique comparable au correcteur P, mais annulation de l'erreur statique

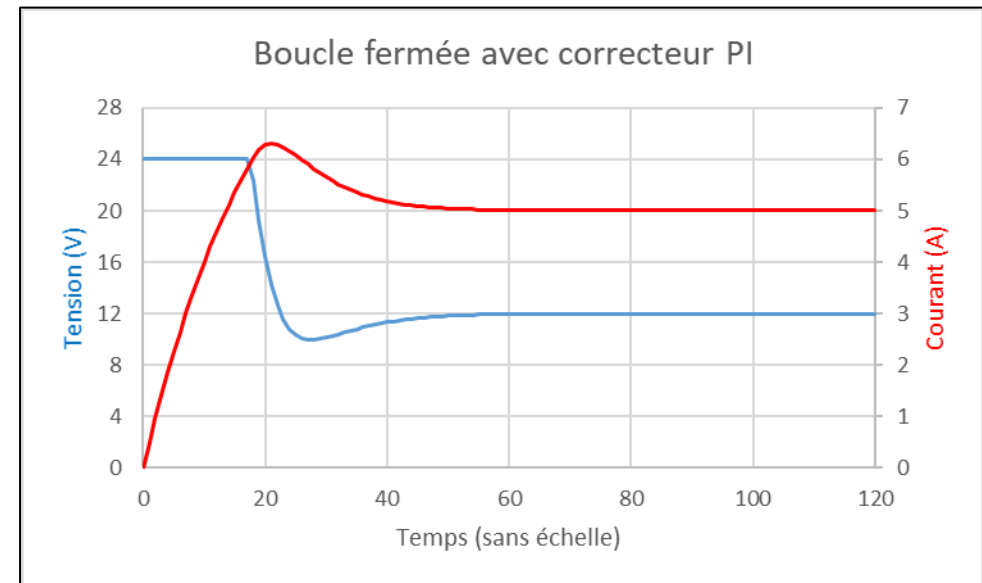


Ex : régulation en courant (correcteur PI)

- $Commande(t) = K_p \times Err(t) + K_I \times \int_0^t Err(\tau).d\tau$
- **Action I** : doit permettre d'obtenir une erreur nulle lorsque la consigne est constante
- Attention au réglage de K_I



- Dynamique comparable au correcteur P, mais forte réduction de l'erreur statique



- Ex : correcteur PI avec un **coeff K_I plus élevé**
- Apparition d'un **dépassement** (*overshoot*) qui peut endommager le système



Correcteur PID (Proportionnel Intégral Dérivée)

$$Commande(t) = K_P \times Err(t) + K_I \times \int_0^t Err(\tau). d\tau + K_D \frac{d Err(t)}{dt}$$

- **Action D** : doit tenir compte de l'évolution de l'erreur dans la commande (effet prédictif)
- Ce type de correcteur est très largement utilisé dans l'industrie
- Le réglage des coefficients K_P , K_I et K_D est parfois délicat et se fait souvent de manière empirique

Autres principes

- Retour d'état
- Logique floue
- Réseaux de neurones
- ...

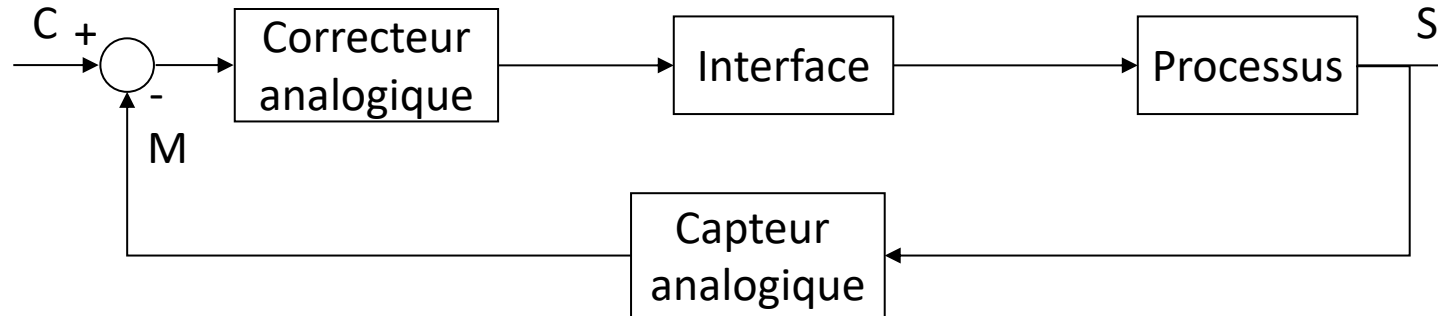


Comparaison boucle ouverte / boucle fermée

	Boucle ouverte	Boucle fermée
Avantages	- Economique (pas de capteur)	- Meilleure précision - Bonne compensation des perturbations
Inconvénients	- Nécessite un modèle précis - Réponse lente pour certains systèmes (tels que les moteurs électriques)	- Nécessite un capteur et l'étude de la boucle



Commandes analogiques et numériques

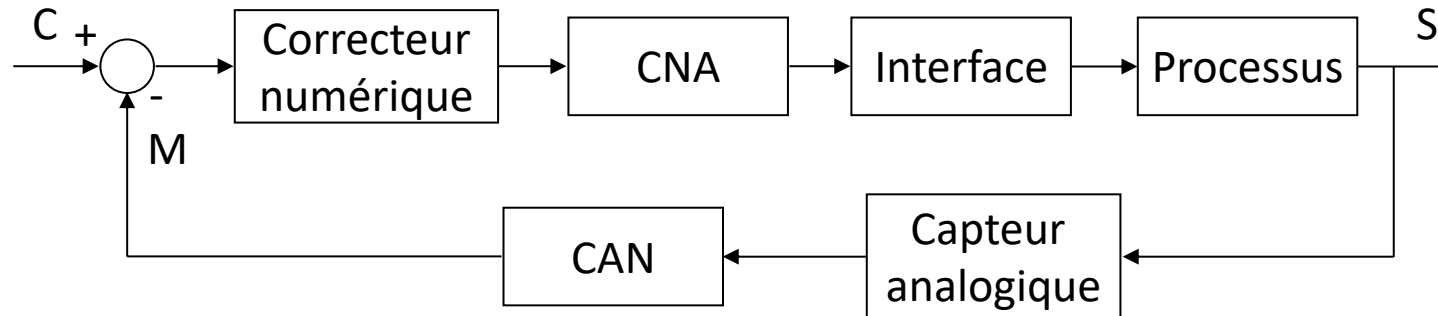


Correcteur *analogique* et capteur *analogique*

- Commande analogique :
correcteur = circuit électronique linéaire (voir EN21)
information = signaux électriques
- Commande numérique :
correcteur = calculateur
information = signaux numériques



Commandes analogiques et numériques

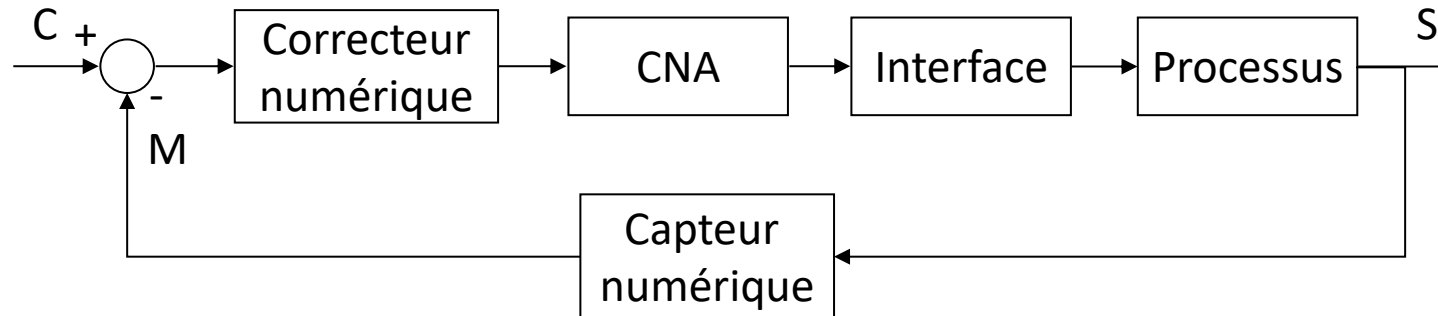


Correcteur *numérique* et capteur *analogique*

- Commande analogique :
correcteur = circuit électronique linéaire (voir EN21)
information = signaux électriques
- Commande numérique :
correcteur = calculateur
information = signaux numériques



Commandes analogiques et numériques

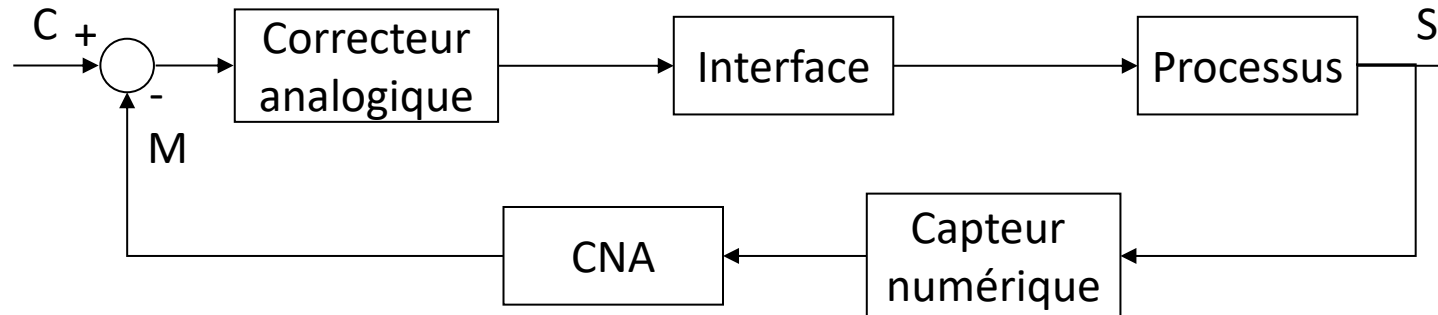


Correcteur **numérique** et capteur **numérique**

- Commande analogique :
correcteur = circuit électronique linéaire (voir EN21)
information = signaux électriques
- Commande numérique :
correcteur = calculateur
information = signaux numériques



Commandes analogiques et numériques



Correcteur *analogique* et capteur *numérique*

- Commande analogique :
correcteur = circuit électronique linéaire (voir EN21)
information = signaux électriques
- Commande numérique :
correcteur = calculateur
information = signaux numériques



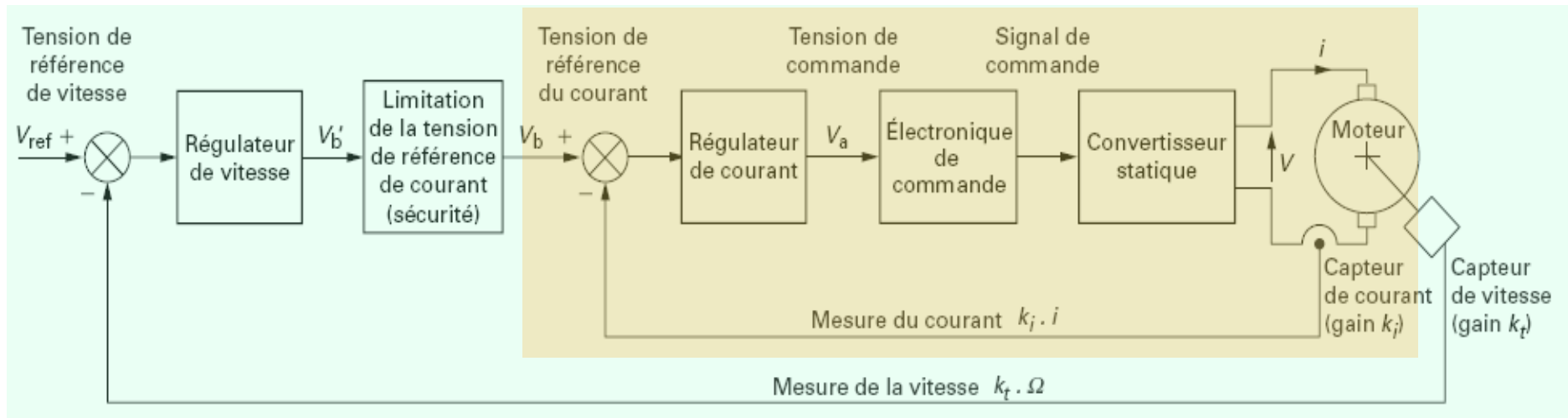
Commandes analogiques et numériques

	Analogique	Numérique
Précision	Moyenne : tolérance sur les composants du correcteur, prix des capteurs précis.	Calculs aussi précis qu'on le désire . Capteurs numériques précis.
Dérive dans le temps	Moyenne : dérive thermique et vieillissement des composants	Nulle
Rapidité	Grande ou très grande	Moyenne (en progrès rapide)
Sensibilité aux bruits	Moyenne ou forte	Très faible
Liaisons longues	Difficiles (perturbations électromagnétique)	Fiable (signaux logiques avec codes d'erreur)
Evolutivité	Mauvaise : évolution matérielle	Bonne : évolution logicielle.
Bilan	Economique en faible précision Indispensable pour les grandes bandes passantes	Indispensable en haute précision et pour les systèmes complexes à commander.



Boucles imbriquées

Boucle de courant



Boucle de vitesse



Capteurs

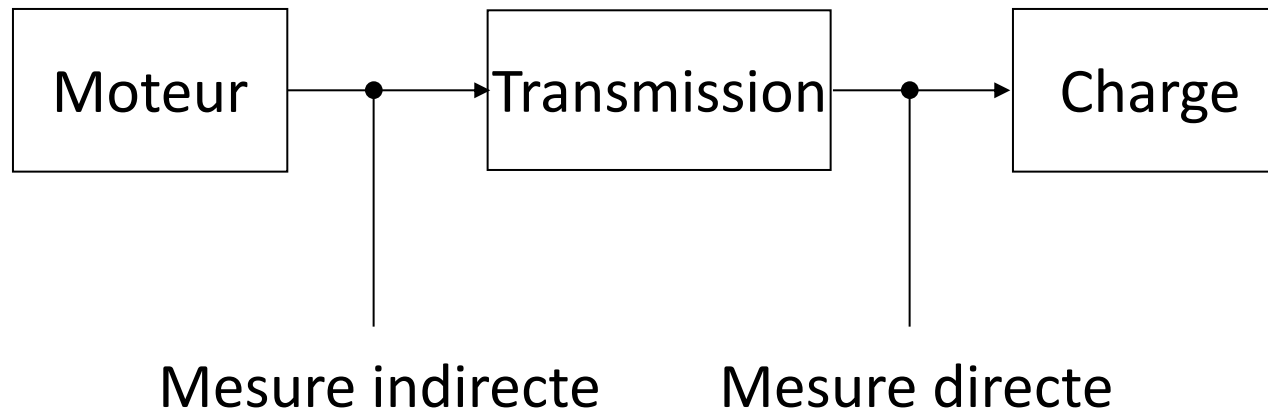
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : contrôle des machines électriques



Mesure directe ou indirecte

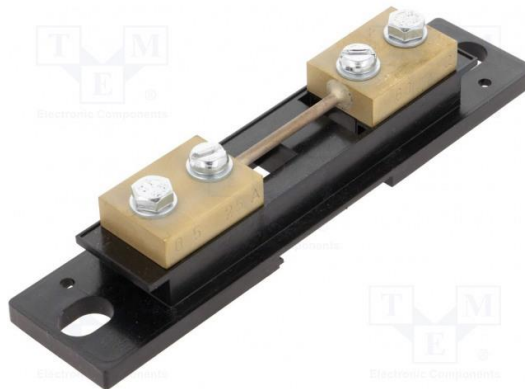


	Mesure indirecte	Mesure directe
Avantages	Solution économique et fiable : capteur rotatif monté sur le moteur Résolution multipliée par le réducteur	Précision optimale : défauts de la transmission masqués.
Inconvénients	Erreurs supplémentaires dues à la transmission => trans. précise et rigide.	Capteur et montage plus cher Risque de problèmes de stabilité.

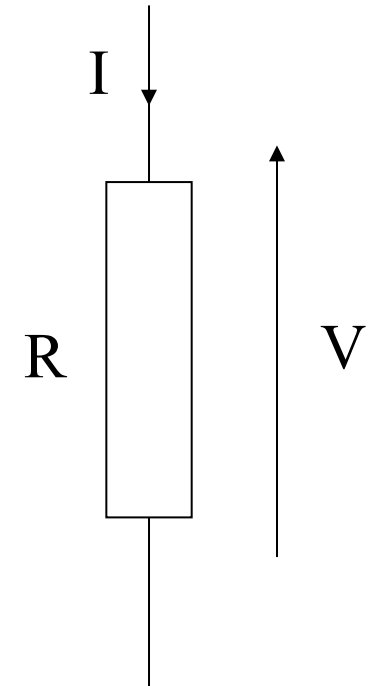


Mesure de courant : capteurs résistifs

- La mesure de la tension aux bornes d'une résistance de valeur ohmique connue permet de connaître le courant qui la traverse.
- Incertitudes liées à la température, à la précision du voltmètre
- Ce genre de capteur est parfois appelé « shunt »



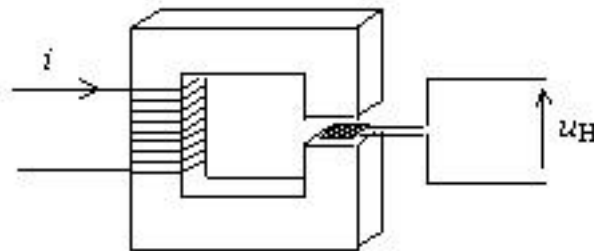
Shunt de courant : 25 A, 60 mV





Mesure de courant : sonde à effet Hall

- Exploitation de l'effet Hall pour produire une tension qui est l'image exacte (à un facteur près) du courant à mesurer
- **Effet Hall** : Apparition d'un champ électrique transversal, puis d'une différence de potentiel u_H dans un métal ou un semi-conducteur parcouru par un courant i lorsqu'on l'introduit dans un champ d'induction magnétique B perpendiculaire à la direction du courant.

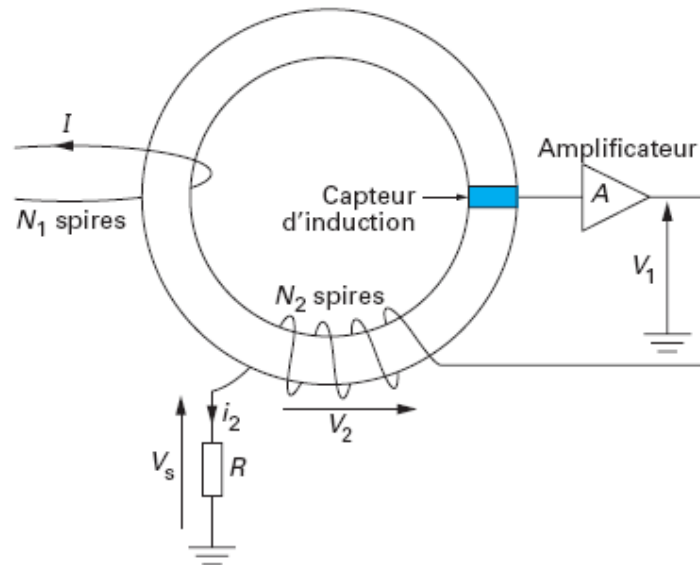


$$u_H = K \times i$$



Mesure de courant : sonde à effet Hall

- Le courant à mesurer est I . Il traverse un circuit magnétique dont le courant I_2 est asservi pour annuler le champ magnétique. Une conversion tension/courant permet d'obtenir la tension V_S , image du courant I .



$$V_S = R \frac{N_1}{N_2} I$$

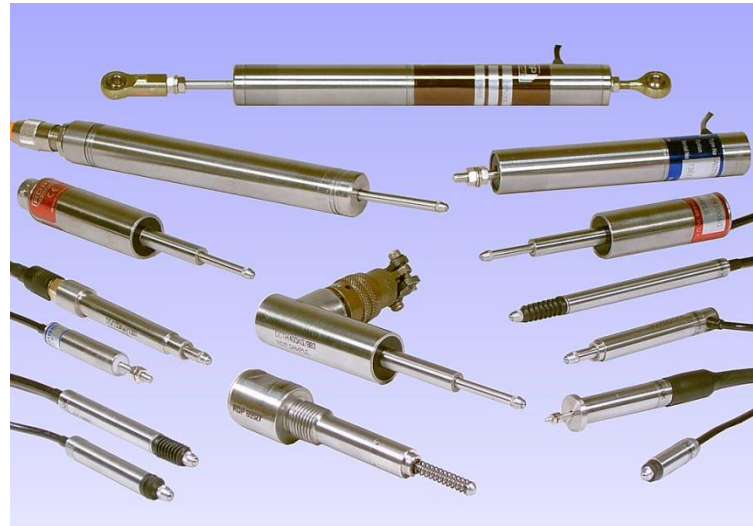
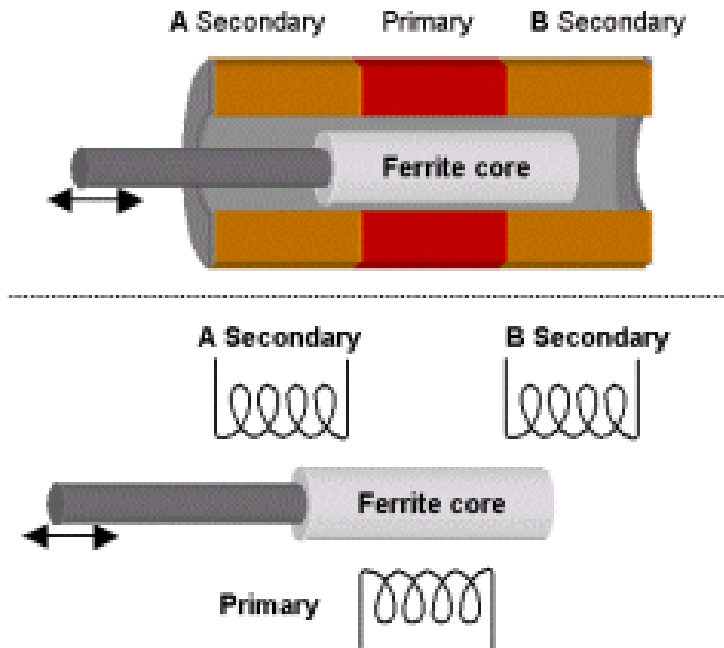




Mesure de position analogique : transformateur différentiel

(LVDT : Linear Variable Differential Transformer)

- Le noyau ferromagnétique se déplace entre le circuit (bobinage) primaire et les 2 circuits secondaires branchés en opposition.
- Il y a alors variation du couplage selon la position du noyau



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

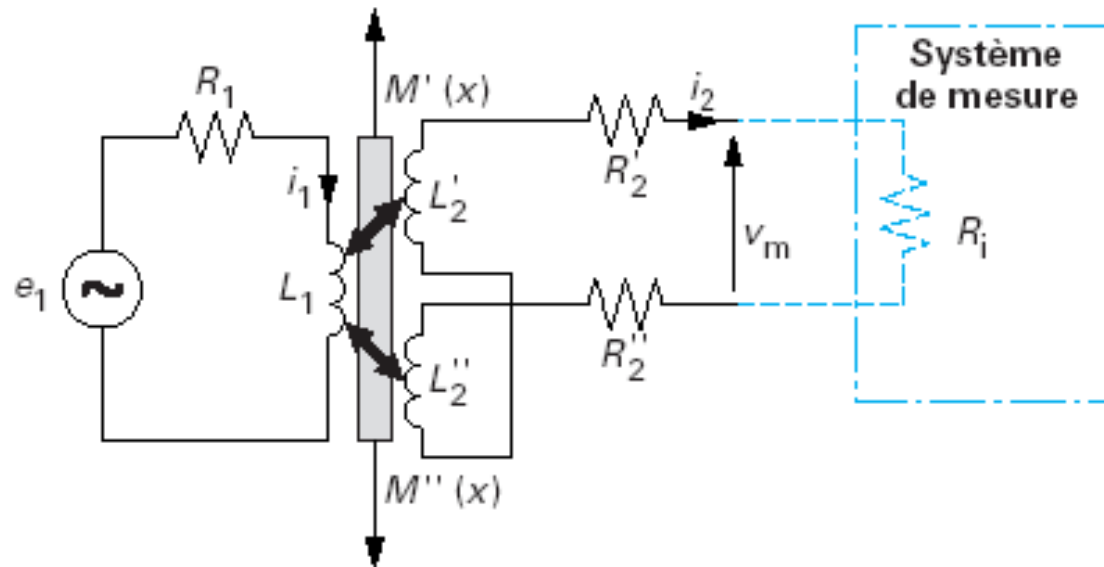
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr



Mesure de position analogique : transformateur différentiel

(LVDT : Linear Variable Differential Transformer)

- Le noyau ferromagnétique se déplace entre le circuit (bobinage) primaire et les 2 circuits secondaires branchés en opposition.
- Il y a alors variation du couplage selon la position du noyau



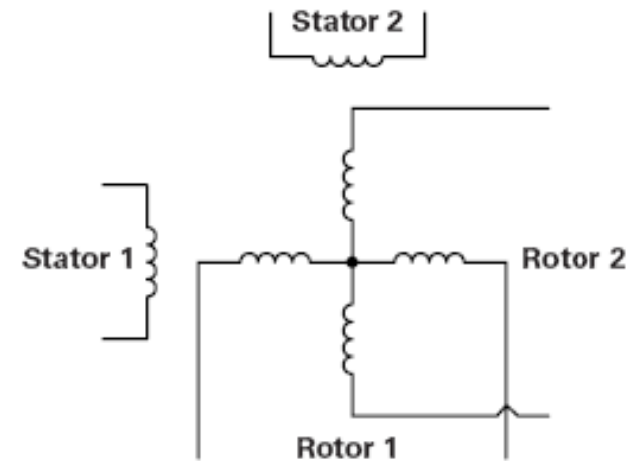
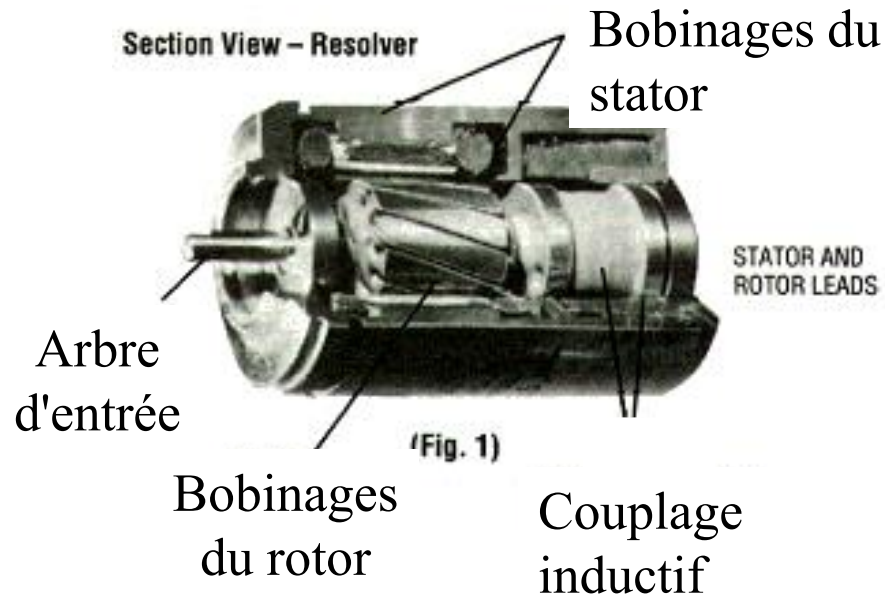
$$V_m = \frac{j\omega[M''(x) - M'(x)]}{R_1 + jL_1\omega} e_1$$

$$V_m = \frac{-2j\omega a e_1}{R_1 + jL_1\omega} x = K \times x$$

Avec $M''(x) - M'(x) = -2ax$



Mesure de position analogique : résolveur

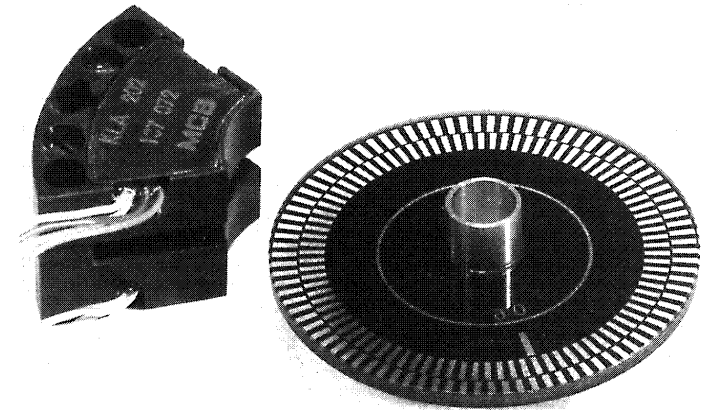


- Différentes configurations sont possibles : soit l'inducteur se situe au stator, soit au rotor. Des f.e.m. apparaissent donc au rotor ou au stator.
- Le couplage entre les bobines du stator et celles du rotor varie en fonction de la position angulaire.

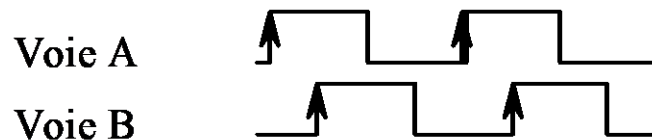


Mesure de position numérique : codeur incrémental optique

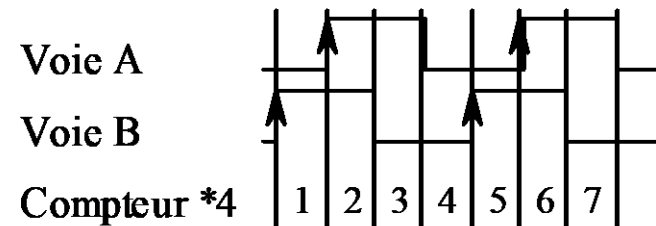
- C'est un capteur optique qui permet de donner une position relative et un sens de rotation.
- Mesure de la position = comptage des fronts passant devant les photodétecteurs
- Mesure du sens de rotation = voir schéma



Rotation positive: $\uparrow A$ avant $\uparrow B$



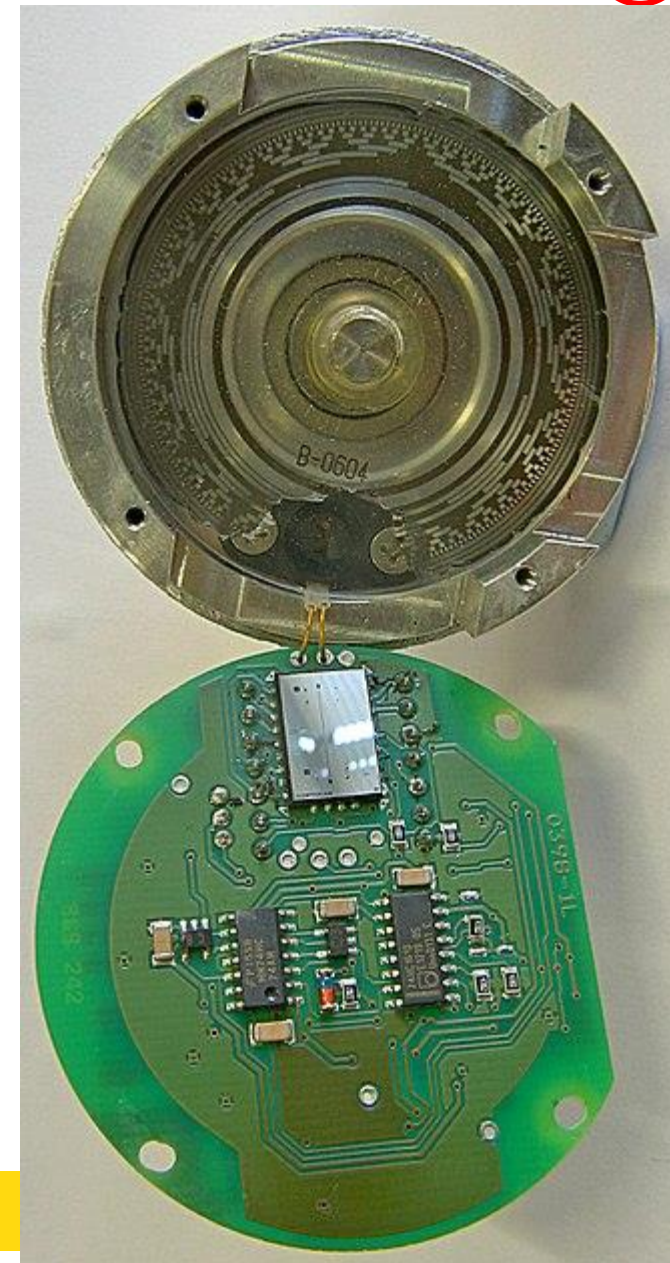
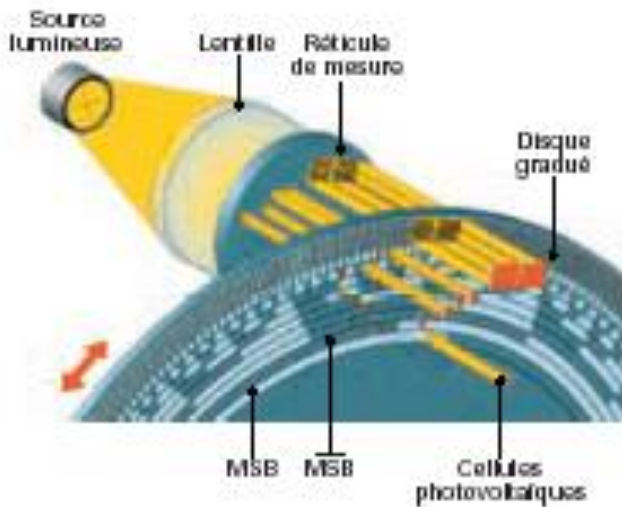
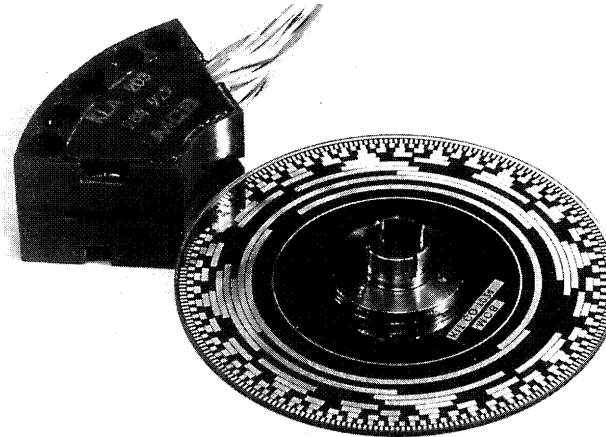
Rotation négative: $\uparrow B$ avant $\uparrow A$





Mesure de position numérique : codeur absolu optique

- C'est un capteur optique qui permet de donner une position absolue et un sens de rotation.
 - Chaque piste a son propre système de lecture.
 - N pistes : résolution de 2^N





Mesure de vitesse numérique

- Utilisation d'un capteur de position numérique
- Comptage des impulsions + mesure du temps entre 2 impulsions
- $V_N = \Delta P_N / \Delta t$

Mesure de vitesse analogique

- Génératrice tachymétrique
- Principe : petite machine à courant continu utilisée en génératrice
- $E = k_\phi \Omega$ si le courant est négligeable (couple négligeable)
- Souvent proposé en option sur les machines CC



Pilotage de la machine à courant continu

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

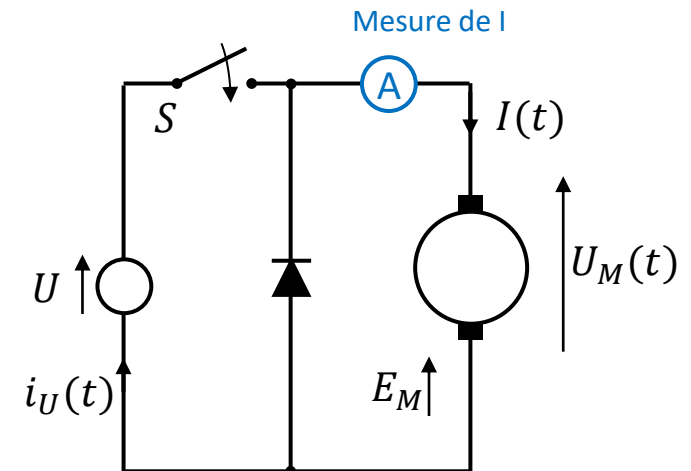
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : contrôle des machines électriques

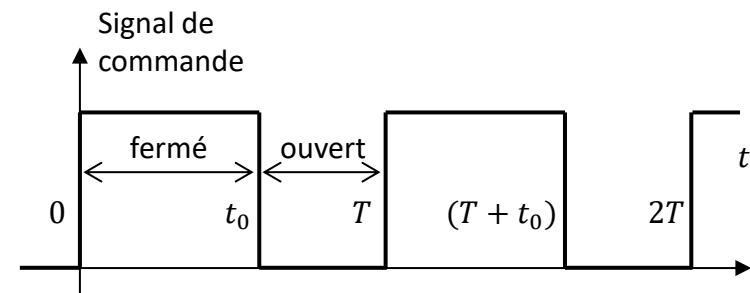


Pilotage en vitesse par la tension

- Rappel des équations d'une MCC
 - $E = k_\phi \cdot \Omega$
 - $U_M = E + RI \approx E$
 - $I = C/k_\phi$
- Exemple d'un pilotage en vitesse
 - Contrôle du rapport cyclique $\alpha = \frac{t_0}{T}$
 - Or, $\alpha U = U_M \approx E = k_\phi \cdot \Omega$
 - Contrôle de $\alpha \Rightarrow$ contrôle de Ω



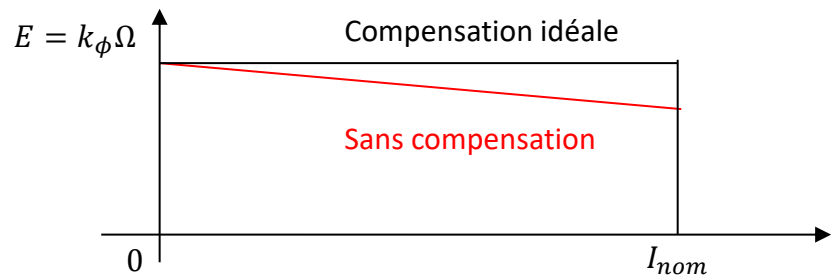
- Important : respect des limites de la machine
 - $I < I_{max}$: besoin d'une mesure de courant
 - Si $I > I_{max}$: diminution de α
 - Puissance : $U_M \cdot I = \alpha U \cdot I$
 - Si $P > P_{max}$: diminution de α





Pilotage en vitesse par la tension

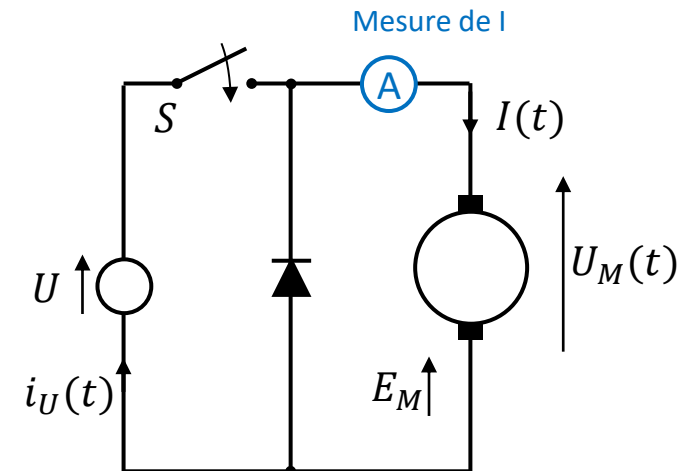
- Biais lié à la résistance interne : $E = U_M - RI$



- Correction du biais lié à la résistance
 - Mesure de $I \Rightarrow$ estimation de RI
 - Alors on peut estimer $U_M = E + RI$

$$U_M = \alpha U = k_\phi \Omega + RI$$

\Rightarrow Amélioration de la précision du contrôle en vitesse

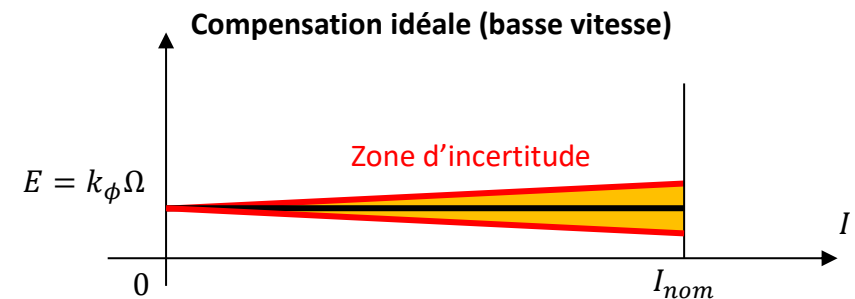
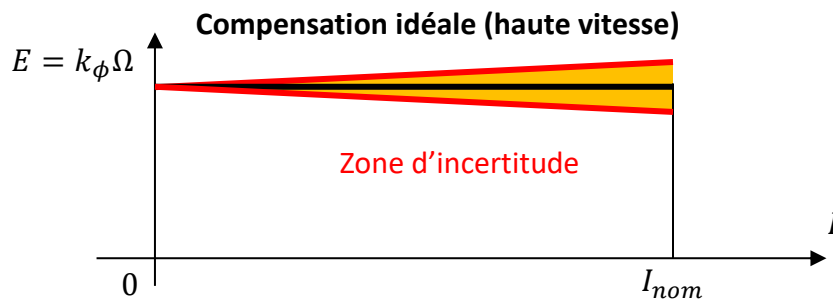
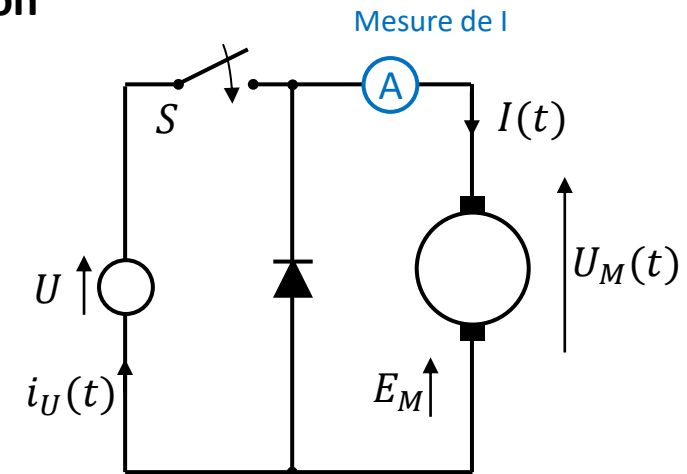




Pilotage en vitesse par la tension avec compensation

- Ce calcul est impacté par les incertitudes sur R
 - Dispersion de fabrication
 - Evolution avec la température
 - Vieillessement (oxidation...)
- Valeur physique $R = R_{theorique} + \Delta R$
- D'où :

$$U_M = \alpha U = k_\phi \Omega + (R + \Delta R)I$$

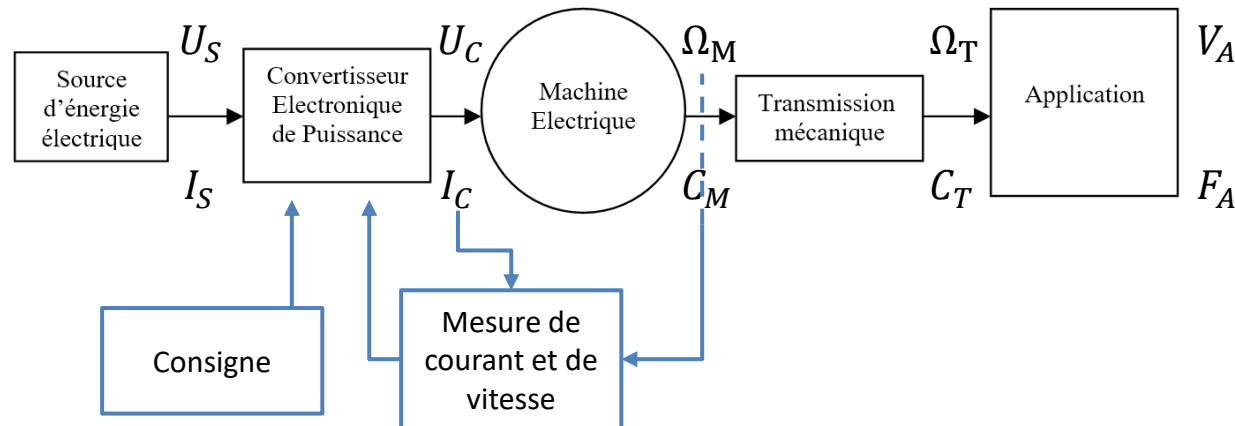


- De plus, l'erreur est relativement plus grande si $\Omega (= E/k_\phi)$ est faible
- « U-RI » : la plage de vitesse commandable est généralement de 1 à 10



Pilotage en vitesse avec mesure de vitesse

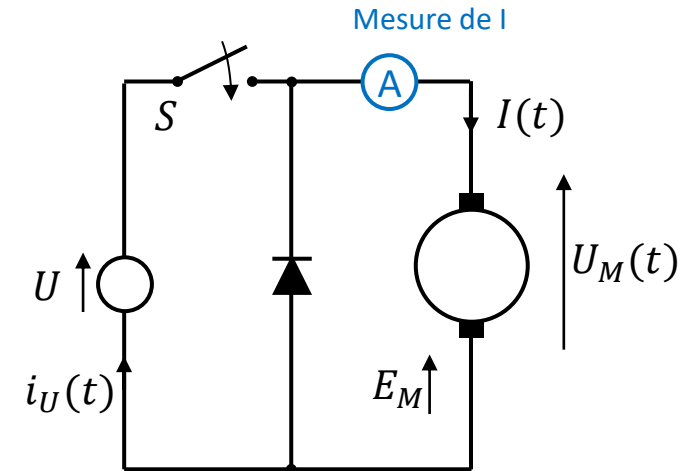
- Pour gagner en précision, il faut un capteur de vitesse
- On peut alors utiliser une commande en boucle fermée
- Précision de la commande = précision du capteur
 - Précision < 1% avec génératrice tachymétrique
 - Très élevée avec un codeur incrémental
- « Tachy » : la plage de vitesse commandable est alors de 1 à 1000 (et plus)





Pilotage en couple

- Ex : machine d'entraînement sportif
- Commande indirecte en commandant le courant
 - Consigne en courant : $I = \frac{C}{k_\phi}$
 - Contrôle du couple de sortie
- Commande directe possible avec capteur de couple
 - Mais cela représente un coût supplémentaire
- Cas de la direction assistée :
 - Physique : le couple est lié à la torsion de la colonne de direction
 - Mesure : de la différence d'angle $\Delta\theta$ entre deux points de la colonne de direction
 - Commande : maintien de $\Delta\theta$ en dessous d'une certaine valeur
 - Conséquence : limitation du couple fourni par l'utilisateur (car limitation de $\Delta\theta$)





Pilotage de la machine synchrone

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : contrôle des machines électriques



Avantages

- Machine robuste, excellent rendement, grandes performances dynamiques
- Peut fournir son couple nominal quelle que soit la vitesse
- Machine à aimant (terre rare) : forte puissance massique

Inconvénients

- Aimants à base de terres rares : plus chers et l'extraction minière a un impact fort sur le Vivant.
- Pilotage plus difficile qu'une MCC (mais moins qu'une machine asynchrone)



Commande

- Par conception, la machine synchrone est synchronisée sur l'alimentation
 - Vitesse proportionnelle à la fréquence
- Risque : « décrochage » si elle ne peut pas suivre la fréquence (inertie)
- Solution : mesurer la position du rotor et piloter les courants en conséquence

Machine synchrone auto-commutée (brushless)

- 6 détecteurs pour savoir quand démarrer/arrêter l'alimentation de chacune des trois phases.
- Simple et coût réduit, mais couple irrégulier.

Machine synchrone auto-pilotée

- Mesure de position par un résolveur qui fournit des courants sinusoïdaux
 - Couple précis et constant
- Grande précision et très grande plage de vitesse : de 1 à 10 000



Pilotage de la machine asynchrone

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : contrôle des machines électriques



Avantages

- Machine standardisée, très robuste et économique (pas d'aimants)
 - Donc pas d'aimants à base de terres rares (moins d'impact environnemental)
- Possibilité de haute vitesse et puissance de 1 kW à 10 MW
- Machine extrêmement courante dans l'industrie (2/3 des machines)

Inconvénients

- Rendement moins bon que les machines synchrones
- Pertes au rotor : il faut ajouter une ventilation motorisée à basse vitesse
- Commande difficile à cause du glissement



Rappel

- Vitesse de rotation $\Omega_M = \frac{60}{p} F_s (1 - g)$

Commande sans capteur

- Glissement = $\frac{\Omega_M - \Omega_S}{\Omega_S}$ (Ω_S : pulsation au stator)
- Si $C < C_{nom}$: faible glissement ($g < 5\%$) => faible erreur de vitesse

Commande avec mesure de courant

- Glissement proportionnel au couple
- Couple proportionnel au courant
- Mesure du courant => estimation du couple => estimation du glissement
=> estimation de Ω_S



Commande avec mesure de vitesse

- Contrôle en boucle fermée
- Commandes élémentaires
 - « Commande scalaire » : modèle simplifié de la machine en régime permanent
 - « Commande vectorielle » ou « Commande directe de couple » : nécessite un modèle dynamique complet, mais très bonnes performances

Commande	Sans capteur	Avec capteur
"Scalaire"	<ul style="list-style-type: none"> - Solution très économique - Faibles performances dynamiques - Précision en vitesse moyenne : 3 % et 0.5 % avec compensation de glissement. - Plage de vitesse réduite : rapport 3 et 10 avec compensation de glissement => Vitesse faible ou nulle impossible. <p>Applications : pompes, convoyeurs, levage, ventilateurs...</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Faibles performances dynamiques - Très bonne précision en vitesse : meilleure que 0.1% - Vitesse très faible ou nulle mal maîtrisée. <p>Applications : pompes (dosage), convoyeurs synchronisés, ponts roulants</p>
"Vectorielle" ou "Directe de couple"	<ul style="list-style-type: none"> - Solution économique - Bonnes performances dynamiques - Plage de vitesse : rapport 1 à 100 - Vitesse faible, mais non nulle. <p>Applications : broches d'usinage, haute vitesse, traction</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Solution très performante - Très bonne précision en vitesse : meilleure que 0.1% (0.001 % possible) - Grande plage de vitesse : 1 à 1000 (voir 10 000) - Vitesse très faible ou nulle contrôlée. <p>Applications : mandrin de tour, traction, enrouleuse (papier, tissus, câble)</p>



Exemples de variateurs industriels

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

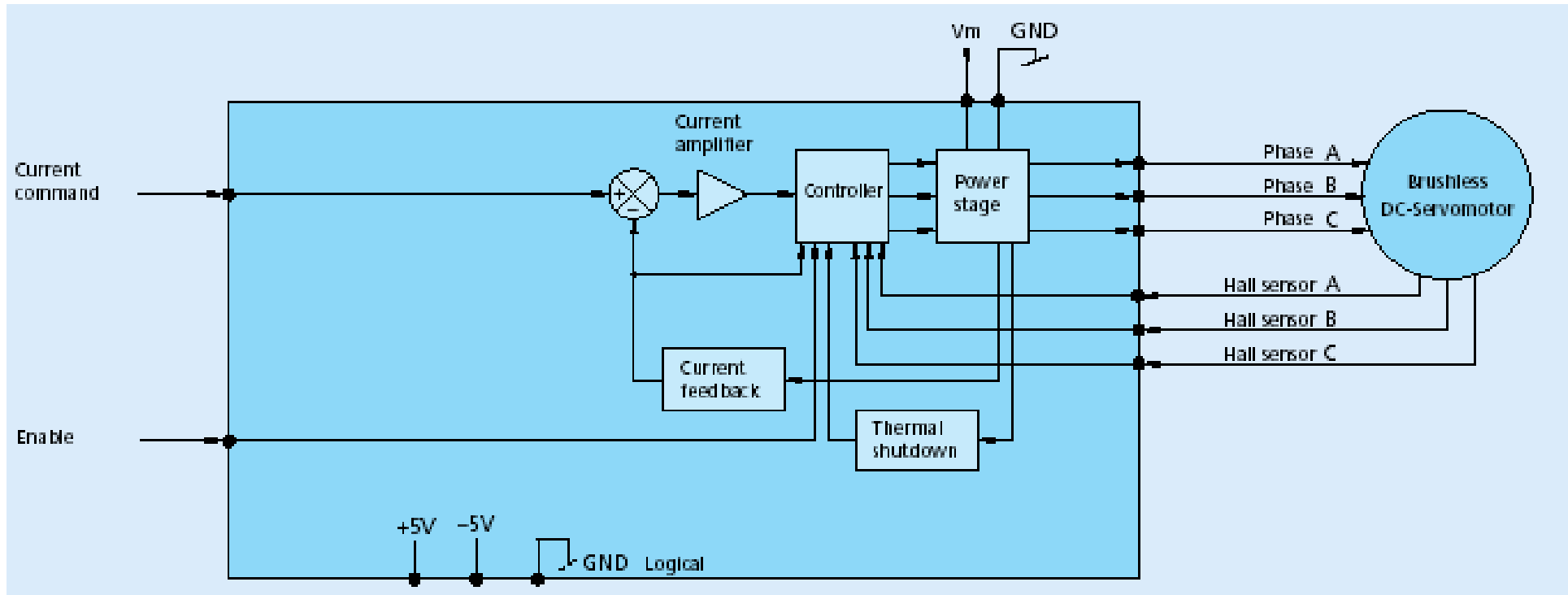
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : contrôle des machines électriques



Variateur électronique BLD (Faulhaber)

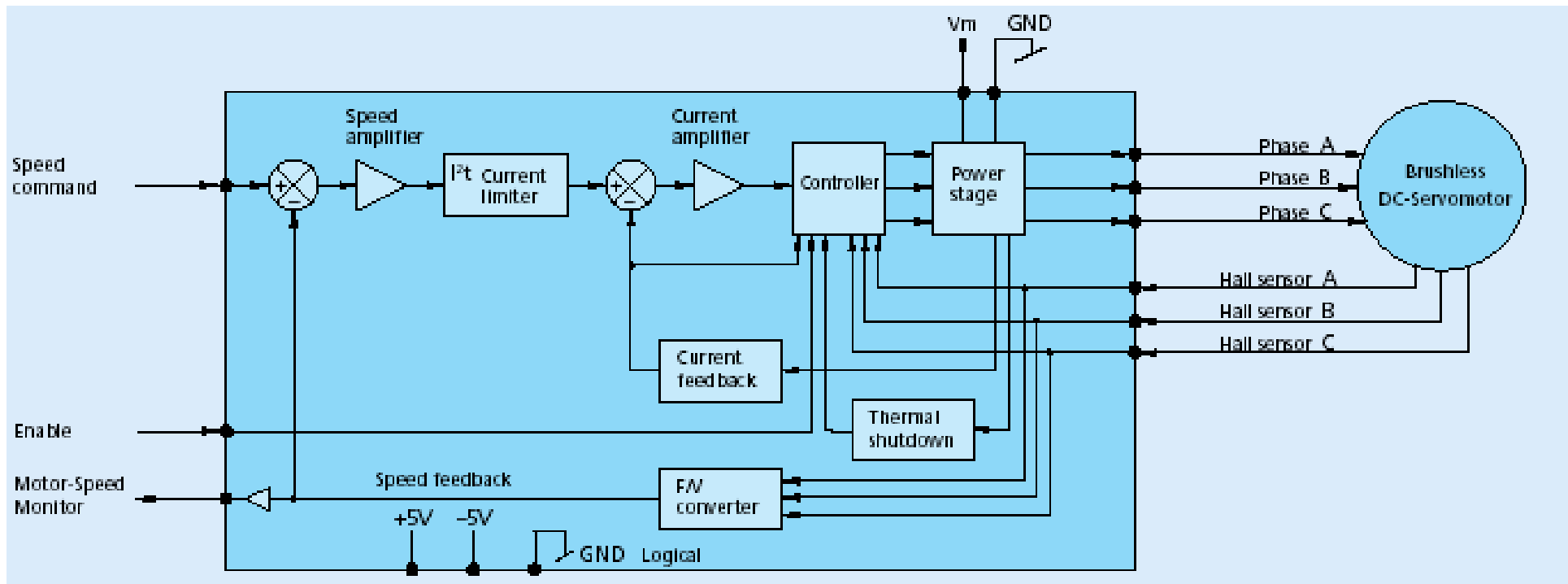
- Commande en courant => contrôle du couple





Variateur électronique BLD (Faulhaber)

- Commande en vitesse **sans** codeur
- Vitesse minimale : 1000 tr/min



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

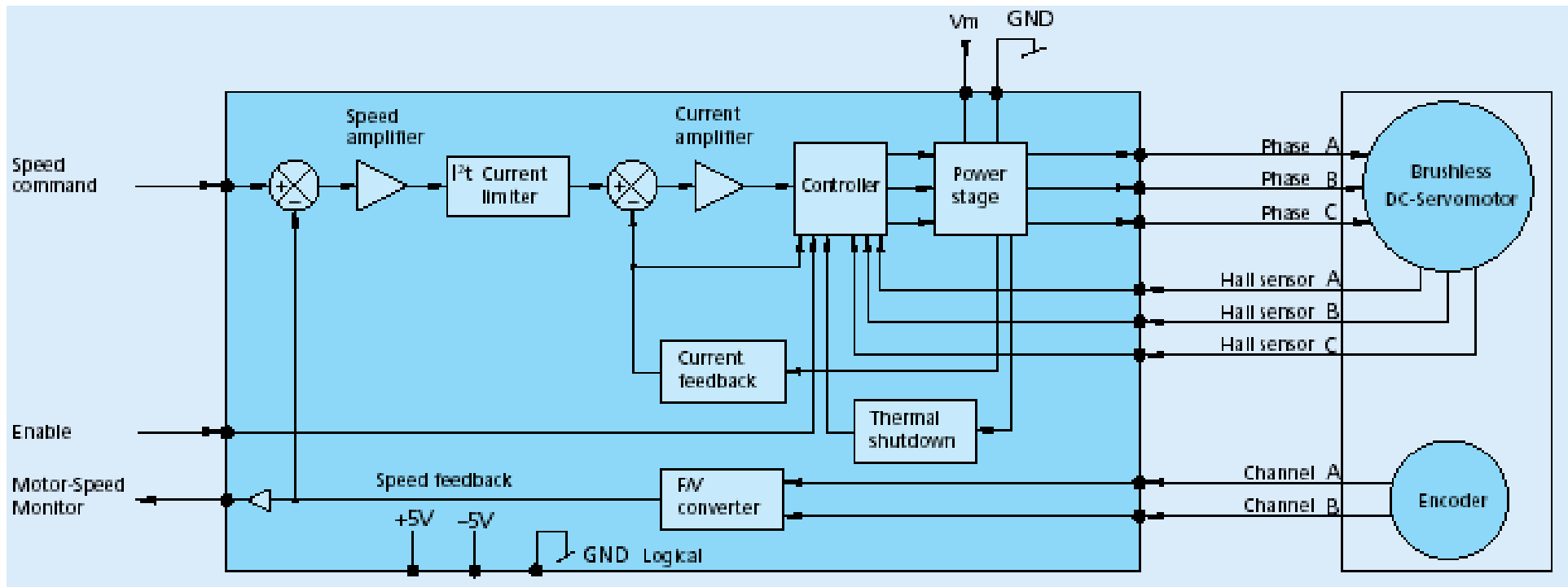
www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : contrôle des machines électriques



Variateur électronique BLD (Faulhaber)

- Commande en vitesse **avec** codeur
- Vitesse minimale : 20 tr/min



Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : contrôle des machines électriques