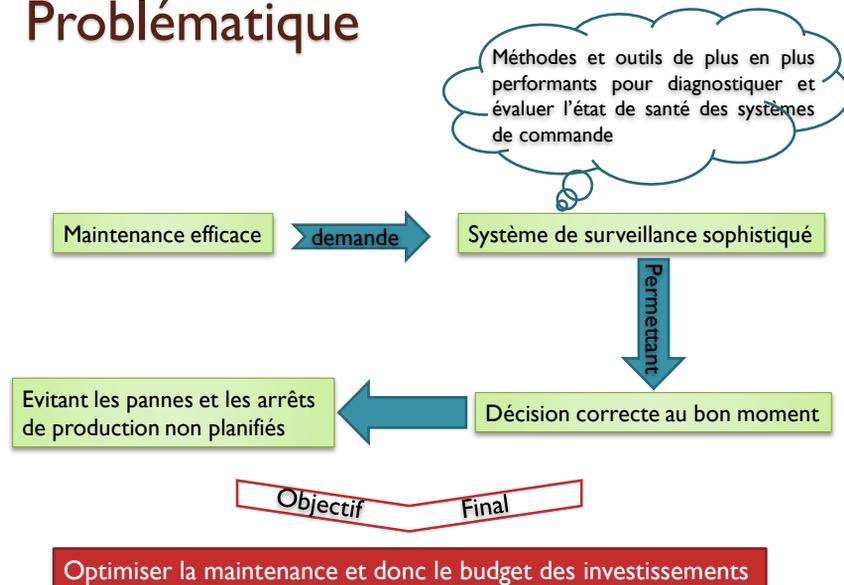


# Diagnostic des défaillances des systèmes de commande

Dr. M. Mohammadi

2019-2020

## Problématique



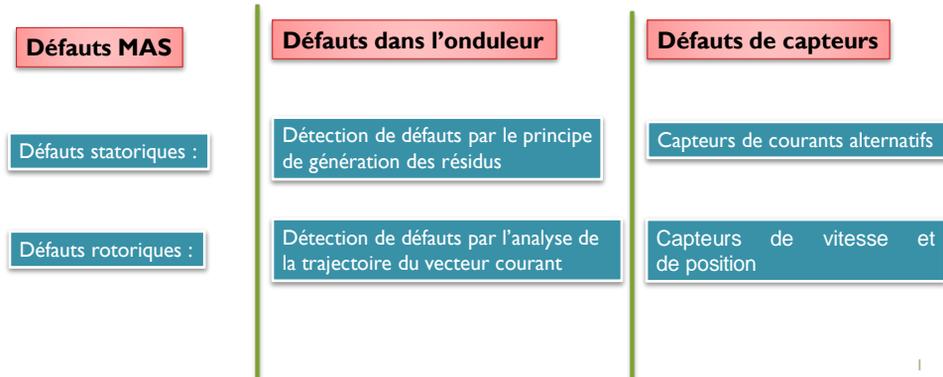
2

# Plan de cours

## CONCEPTS ET TERMINOLOGIE

### Définition du diagnostic

### diagnostic des entraînements électriques



## CONCEPTS ET TERMINOLOGIE

### Système et composants

Un **processus industriel** est une installation complexe assumant un objectif fonctionnel de haut niveau (production de bien ou de service).

Pour assurer ces objectifs fonctionnels de haut niveau, le processus fait appel à un ensemble de systèmes interconnectés, Figure 1. Chaque système assure une ou plusieurs fonctions bien définie(s).

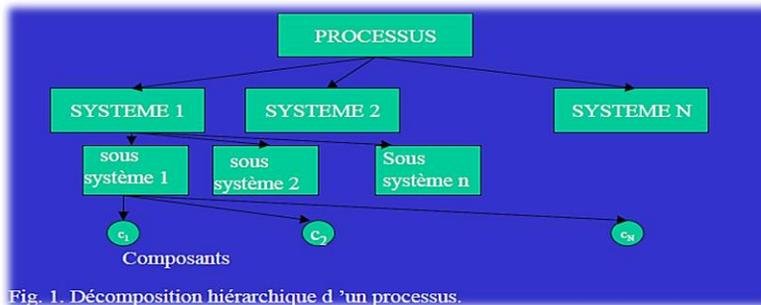


Fig. 1. Décomposition hiérarchique d'un processus.

- Les systèmes sont décomposés en sous-systèmes.
- Les sous-systèmes sont décomposés en composants bien déterminés. En règle générale et en pratique ce sont sur ces composants que l'on effectuera de la maintenance et non sur des systèmes.
- Chaque composant peut être ensuite décomposé en pièce élémentaire qui fera l'objet d'un échange standard.

Exemples des composants bien identifiés :

- Des moteurs électriques et diesels
- Des vannes et des pompes
- Des unités centrales d'ordinateurs

5

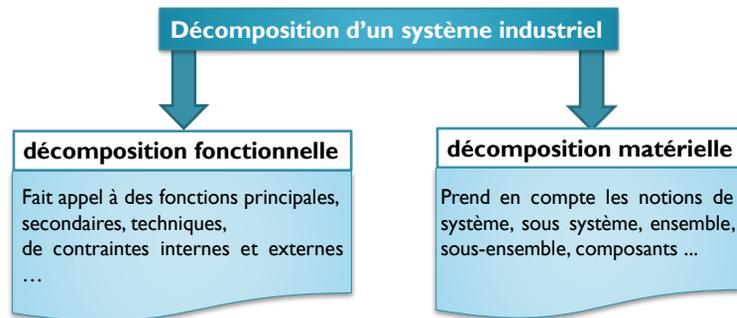
### Nature des systèmes et composants

Les méthodes de diagnostic ne possèdent pas de caractère universel. En fonction de la nature de processus, systèmes, sous systèmes, composants, il faudra mettre en œuvre à chaque fois des méthodes spécifiques tenant compte des technologies déployées.

### Définition de la défaillance

C'est la cessation de l'aptitude d'un ensemble à accomplir sa ou ses fonctions requise(s) avec les performances définies dans les spécifications techniques. L'ensemble est indisponible suite à la défaillance.

6



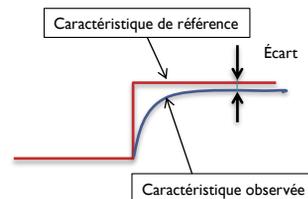
La décomposition fonctionnelle est en parfaite cohérence avec la définition d'une défaillance,

Le principe de décomposition fonctionnelle est indispensable pour éclairer les notions de défaillance, de leurs causes et de leurs effets. En effet, la principale source d'incompréhension dans les discussions entre spécialistes provient du fait que chaque interlocuteur possède sa propre décomposition fonctionnelle qui ne correspond pas nécessairement à celle des autres interlocuteurs.

7

### Définition d'un défaut

Un **défaut** est tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique de référence lorsque celui-ci est en dehors des spécifications.



### Définition d'une panne

La **panne** est l'inaptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise. Dès l'apparition d'une défaillance, caractérisé par la cessation du dispositif à accomplir sa fonction, le dispositif sera déclaré en panne.

### DISPONIBILITE

C'est l'aptitude d'un système à fonctionner lorsqu'on le sollicite.

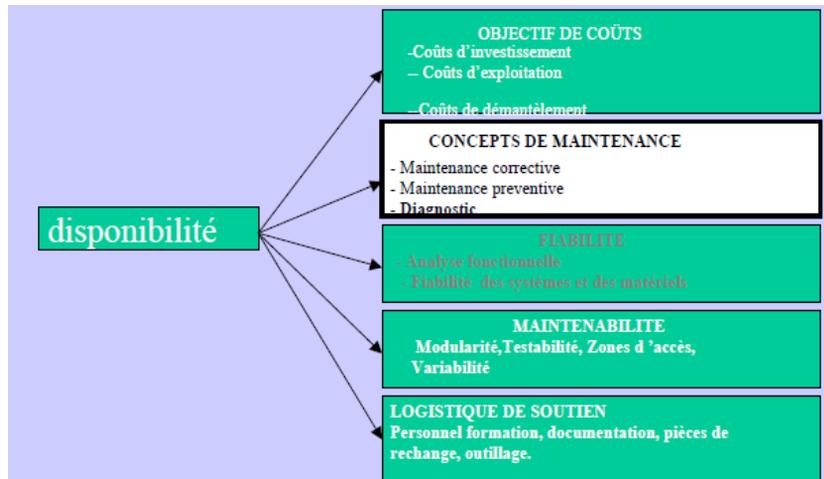
La disponibilité peut décliner en terme de **Fiabilité**, **Maintenance** et **Sûreté**.

**Fiabilité** : C'est l'aptitude d'un système à accomplir sa mission dans des conditions données d'utilisation.

**Sûreté** : C'est l'aptitude d'un système à respecter l'utilisateur et son environnement.

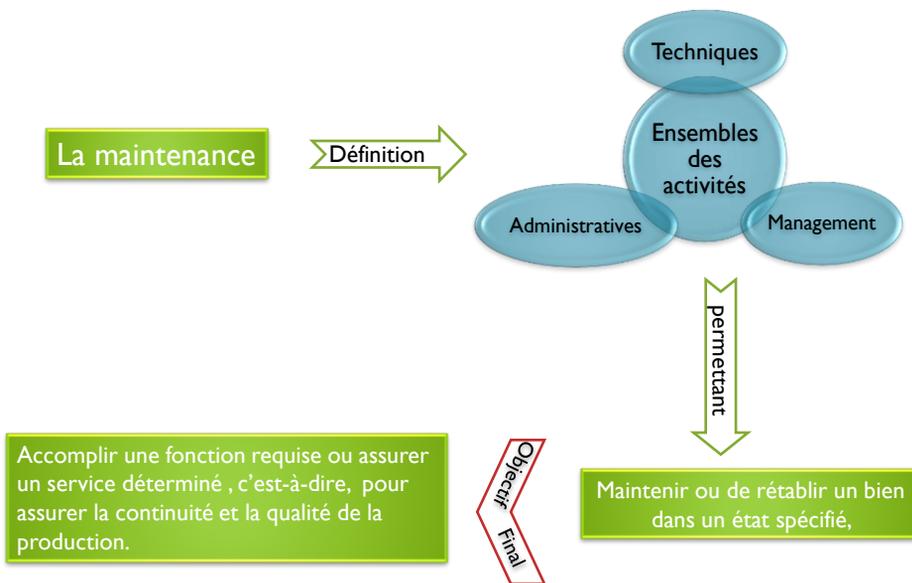
8

Composantes de la disponibilité



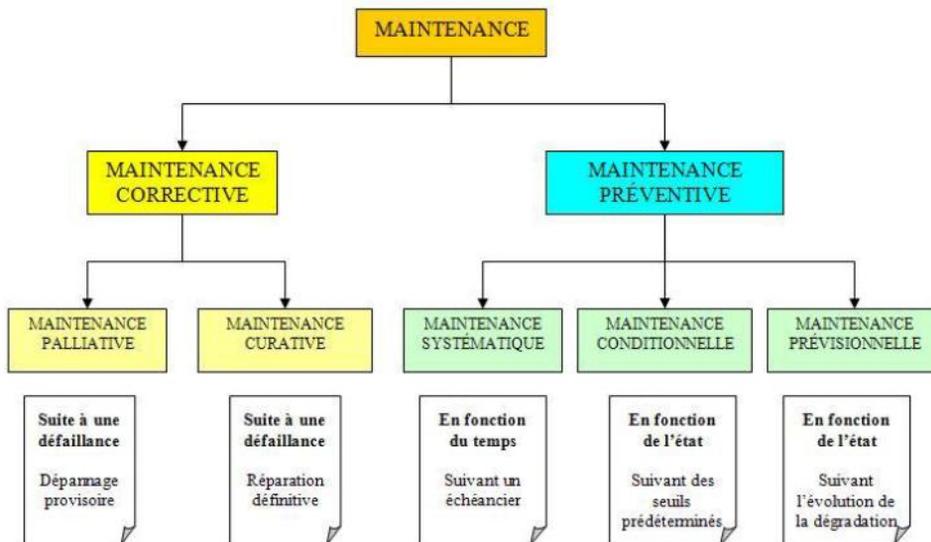
9

Définition générale de la maintenance



16/04/2020

10



11

### maintenance préventive ou planifiée

maintenance ayant pour **objet de réduire la probabilité de défaillance** ou de dégradation d'un bien ou d'un service rendu. Les activités correspondantes sont déclenchées selon un échéancier établi à partir d'un nombre prédéterminé d'unités d'usage (maintenance systématique) et/ou de critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou du service (maintenance conditionnelle).

### La maintenance corrective

Il s'agit d'une « **maintenance effectuée après défaillance** ». C'est une politique de maintenance qui correspond à une attitude de réaction à des événements plus ou moins aléatoires et qui s'applique après la panne. On parle dans ce cas de dépannage.

12

## Définition du diagnostic

*identification de la cause d'une défaillance à l'aide d'un raisonnement logique.*

**La défaillance** désigne tout ce qui est anormal, tout ce qui s'écarte d'une norme de bon fonctionnement (alarme, arrêt intempestif, produit défectueux, etc.). Le défaut qui apparaît s'appelle le symptôme.

**Un symptôme** est un écart entre ce qui est et ce qui devrait être. Le symptôme est le défaut que l'agent de maintenance constate. C'est à partir du symptôme qu'il va chercher les causes.

Il faut décrire le symptôme de la façon la plus précise possible, c'est-à-dire caractériser la défaillance :

- Un moteur qui s'arrête brutalement ;
- Un bruit sourd et fort (localisation difficile) ;
- Une odeur de frein brûlé.

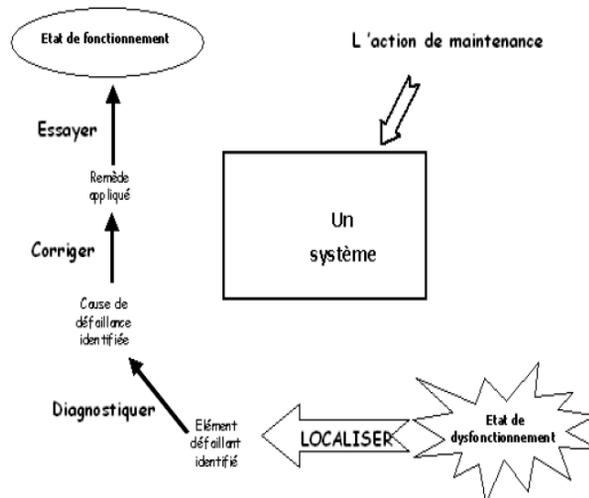
Le diagnostic est une phase importante de la maintenance corrective. De sa pertinence et de sa rapidité dépend l'efficacité de l'intervention entreprise.

13

L'action de maintenance effectuée suite à une défaillance permet le passage de l'état de dysfonctionnement à l'état de fonctionnement. Elle corrige l'erreur sur le système.

Cette action comprend plusieurs phases :

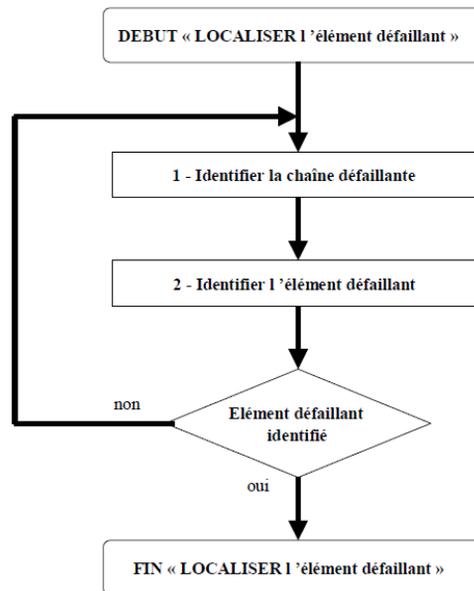
- **Localiser** (identifier l'élément défaillant)
- **Diagnostiquer** (identifier la cause de la défaillance)
- **Corriger** (appliquer le remède)
- **Essayer** (vérifier l'effet du remède).



***Le diagnostic contient et dépasse la localisation, et lui seul contient une potentialité de progrès par des actions sur les causes. Il permet d'aboutir à des actions correctives qui doivent éviter que la même défaillance se reproduise à nouveau.***

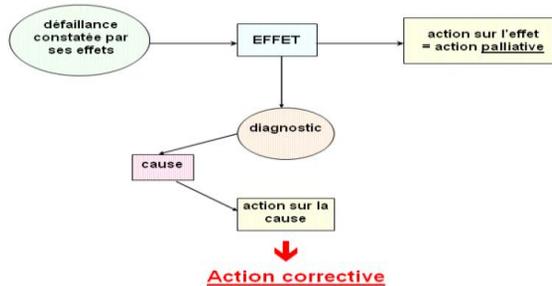
14

La localisation de l'élément défaillant est une étape primordiale du diagnostic. Elle doit être réalisée avec rigueur et méthode.

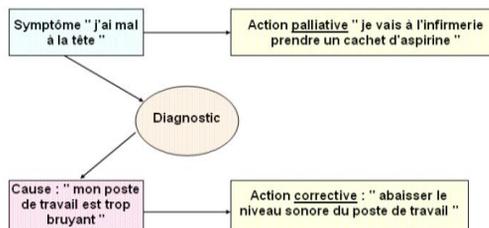


15

Les figures de la page suivante illustrent la différence entre action palliative et action corrective.



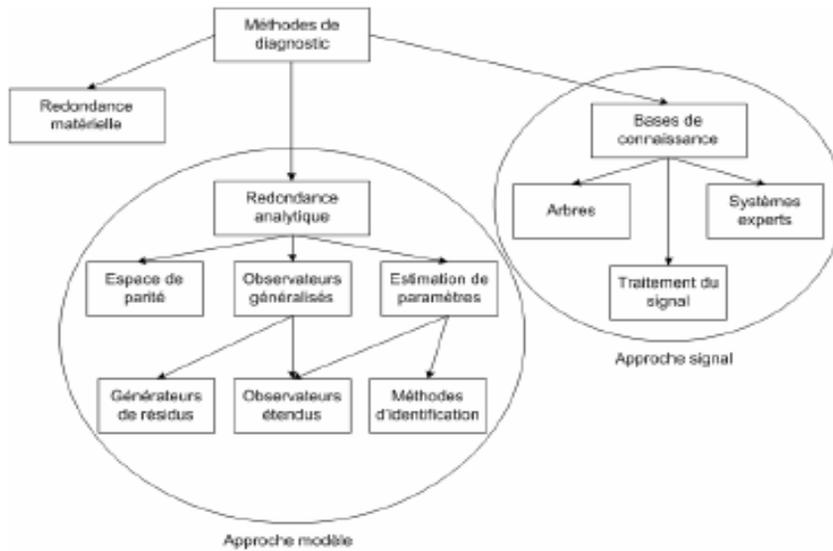
### Exemple



16

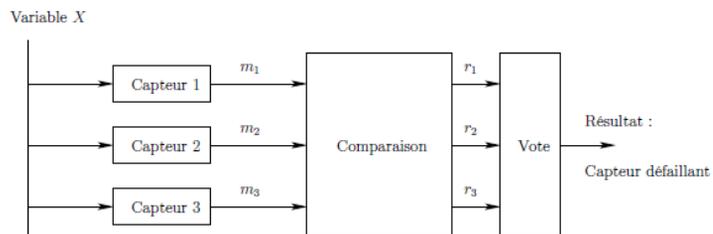
## Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic sont nombreuses mais on peut les classer en trois grandes familles



17

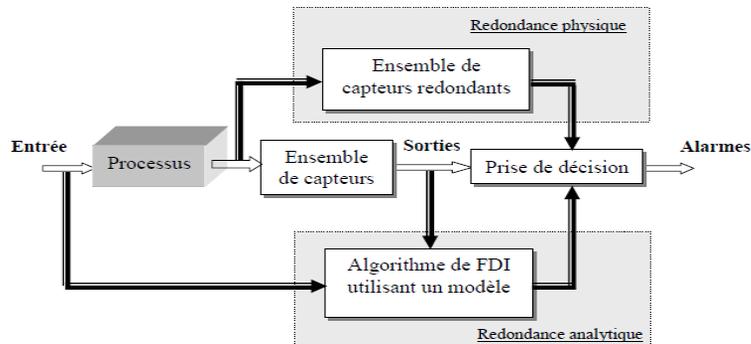
**méthode de redondance matérielle** Cette méthode est associée aux systèmes très critique où la moindre panne est inenvisageable (centrales nucléaires, aérospatiale, transport aérien,...). Il s'agit de multiplier les systèmes pour que, dans le cas d'une défaillance de l'un, un autre prenne immédiatement le relais. Si l'un des systèmes à un comportement trop éloigné des autres, il est exclu de l'ensemble. Cette approche est pertinente, par exemple, pour des mesures effectuées par un réseau de capteurs. Ce type d'approche est évidemment très cher à mettre en œuvre.



Principe de la redondance matérielle

18

**méthode de redondance analytique** Celles-ci reposent sur un modèle mathématique du système. Ce modèle comporte souvent quelques paramètres. Lors du fonctionnement, les paramètres sont estimés et comparés aux grandeurs théoriques, le différentiel étant la signature du défaut. Si ce différentiel dépasse un certain seuil, la présence du défaut est signalé à l'utilisateur. Cette approche est particulièrement utilisée par les automaticiens.



Architecture de redondance physique et analytique

19

**méthode heuristique ou s'appuyant sur une base de connaissance** Elle ne nécessite pas forcément de modèle précis du système mais repose plutôt sur une reconnaissance de signatures déjà observées. Les signatures de défauts, obtenus par modélisation ou par mesure sur maquette, sont généralement classées dans une base de données. L'analyse est réalisée par une interprétation du type signal, par système expert ou par réseaux de neurones

Pour des raisons de simplicité et d'efficacité, l'approche signal est très utilisée actuellement en diagnostic. Cette approche repose sur la connaissance du comportement du système sain et des défauts, elle est ensuite comparée avec les signaux mesurés. Parmi les approches existantes, les approches basées sur l'analyse de la signature spectrale sont les plus couramment rencontrées pour détecter la présence d'une anomalie. Le principal défaut de l'analyse spectrale est qu'elle est très sensible à la qualité de la mesure.

20

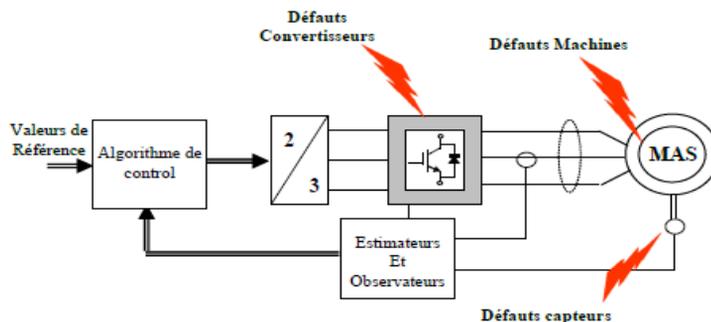
## diagnostic des entraînements électriques

Les entraînements électriques à vitesse variable représentent actuellement une part importante des types d'entraînements industriels. Leur gamme de puissance étendue et leur souplesse d'utilisation liées aux progrès de l'électronique de puissance ont contribué à leur succès allant de la traction ferroviaire à la machine outil.

Assurer la sûreté de fonctionnement d'une machine en vitesse variable est un problème qui doit être pris en compte à tous les stades de sa vie technique:

- pendant la phase de conception du produit,
- lors de sa première mise en marche,
- Durant les phases d'exploitation,
- lors des phases d'arrêt pour la maintenance.

21



Système de commande d'une MAS avec les différents types de défauts

### CLASSIFICATION DE DEFAUTS

En fonction de leur localisation

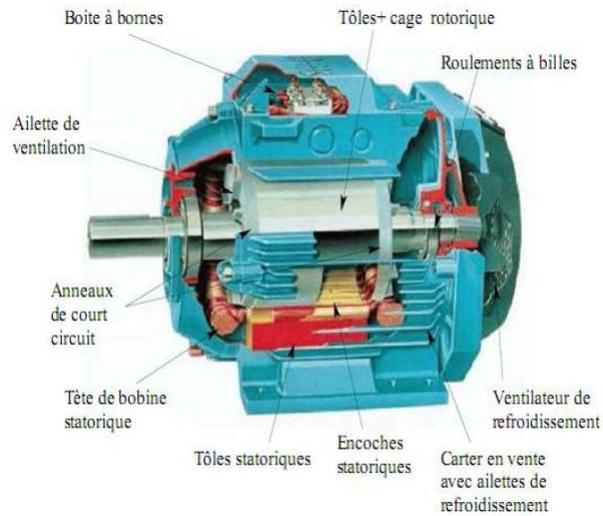
défauts d'actionneurs,  
capteurs ou systèmes.

Selon leurs évolutions temporelles

ponctuelles, abruptes, intermittentes  
ou graduelles

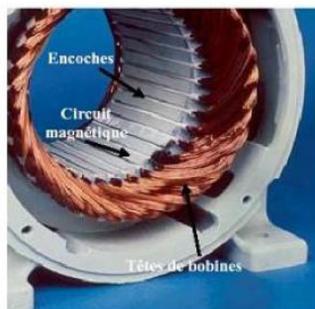
22

## Défauts MAS



Éléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écurueil

23



stator d'une machine asynchrone



rotor d'une machine asynchrone

24

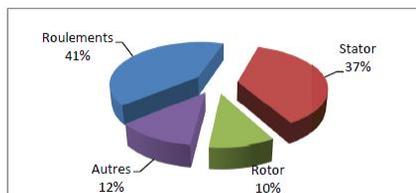
## Défaits des machines électriques selon leurs origines

Défaillances des machines électriques	Interne	Mécanique	Contact entre le stator et rotor
			Défaut de roulements
			Excentricité
		Électrique	Mouvement des enroulements et des tôles
			Défaillance au niveau de l'isolation
			Rupture de barre
	Externe	Mécanique	Défaillance au niveau du circuit magnétique
			Charge oscillante
			Surcharge de la machine
		Environnementale	Défaut de montage
			Humidité
			Température
		Électrique	Propreté
			Fluctuation de la tension
Sources de tensions déséquilibrées			
Réseau bruité			

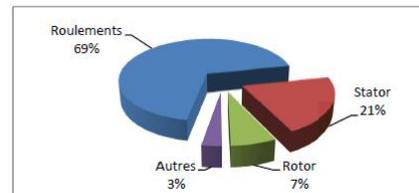
25

Des multiples études statistiques sur des machines ont été effectuées depuis les années 80 jusqu'à présent. Toutes ces statistiques mentionnées dans [1, 2, 11-14] concernent les machines asynchrones de moyenne et grande puissance exploitées dans l'industrie.

Les études effectuées sur des machines asynchrones de grande puissance (de 100 kW à 1 MW) dans les années 90 par Thorsen [13, 15] mentionnées après par Thomson [14] ont montré que sur cette gamme de puissance certaines pannes sont plus fréquentes que d'autres et les pannes le plus fréquentes sont du type mécanique (voir Figure I.1(a)). La majorité d'entre elles se situent sur les roulements (41 %) et le stator (37 %). Les moins fréquentes sont les pannes au rotor (10 %) et les autres types constituent 12 %.



(a) Thomson 1999 [14]



(b) Bonnett 2008 [12]

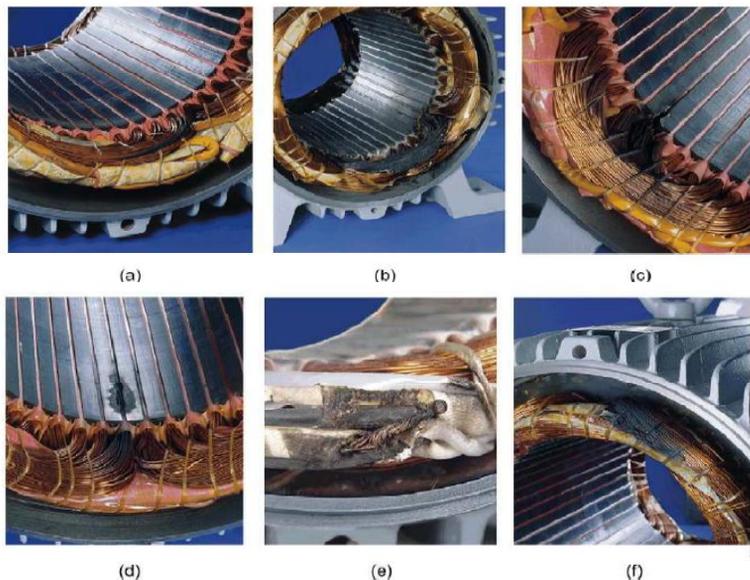
Évolution du pourcentage des défauts pendant une décennie

26

### Défauts statoriques :

- court-circuit entre spires : surtension, température excessive, vibration, humidité ;
- court-circuit entre phases : haute température, alimentation déséquilibré, défaut d'installation ;
- défaut d'isolation : démarrage fréquent, décharge partielle, condition, température et humidité extrême ;
- défaut entre le stator et carcasse : cycle thermique, abrasion de l'isolant, encrassement des spires par la carcasse, présence des points anguleux dans les encoches, choc ;
- déplacement des conducteurs : démarrage fréquent, vibration de tête de bobines;
- défaillance des connecteurs : vibration excessive ;
- vibration de la carcasse : mauvaise installation, déséquilibre magnétique, déséquilibre d'alimentation, surcharge, mouvement des enroulements, contact avec le rotor.

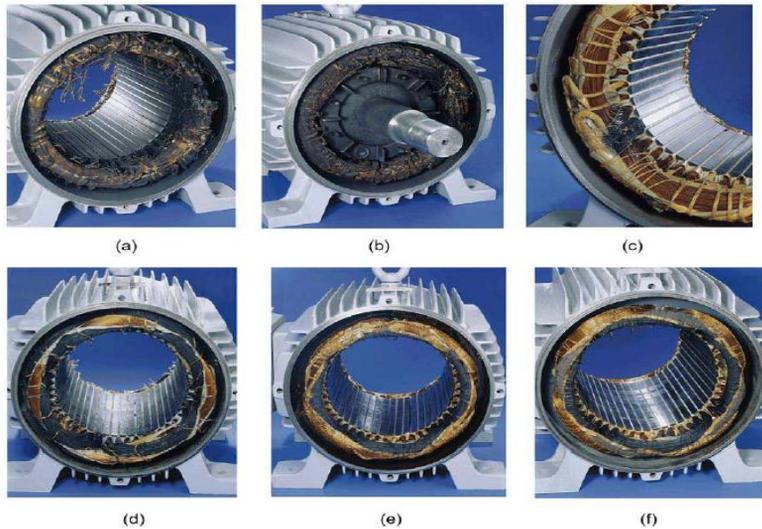
27



détérioration typiques d'isolation menant a des courts-circuits dans les enroulements statorique de la machine asynchrone. (a) court-circuit entre spires des spires de la même phase.

(b) Enroulement court-circuité. (c) Court-circuit entre l'enroulement et le noyau statorique à l'extrémité de l'encoche statorique. (d) (e) Court-circuit entre l'enroulement et le noyau statorique au centre de l'encoche statorique. (f) court-circuit entre phases.

28



court-circuit entre spires dans l'enroulement statorique du moteur asynchrone. (a) courts-circuits dans une phase due à la surcharge du moteur (b) court-circuit dans une phase due au rotor bloqué. (c) court-circuit entre spires dû aux coupures de tension. (d) Courts-circuits dans une phase due à une perte de phase dans un moteur connectée en étoile. (e) Courts-circuits dans une phase due à une perte de phase dans un moteur connecté en triangle. (f) Courts-circuits dans une phase due à un déséquilibre d'alimentation.

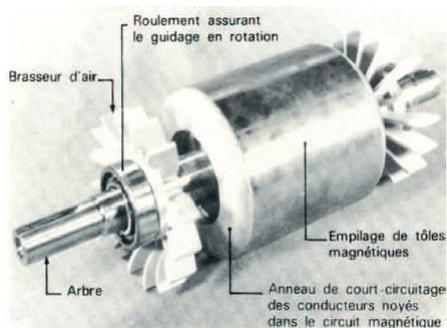
29

### Défauts rotoriques :

DEFAUTS DE ROULEMENTS

DEFAUTS D' EXCENTRICITE

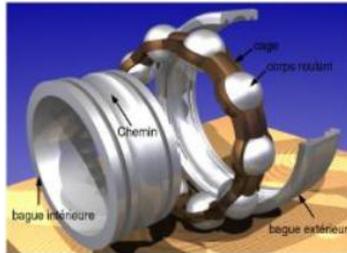
DEFAUTS DE RUPTURE DE BARRES ET D'ANNEAU DE COURT CIRCUIT



30

## DEFAUTS DE ROULEMENTS

Les défauts de roulement représentent la majorité des défauts survenant dans les machines électriques .



Représentation d'un roulement à billes

Ces défauts peuvent avoir des origines diverses

- Contraintes mécaniques dues à une surcharge
- mauvais assemblage,
- corrosion
- circulation des courants de fuite et la contamination du lubrifiant

31

Effets des défauts de roulements

- augmentation du niveau sonore
- l'apparition de vibrations par les déplacements du rotor autour de l'axe longitudinal de la machine: induit également des oscillations dans le couple .
- Le point ultime de roulements défectueux est le blocage du rotor.



bague cassée



billes écorchées

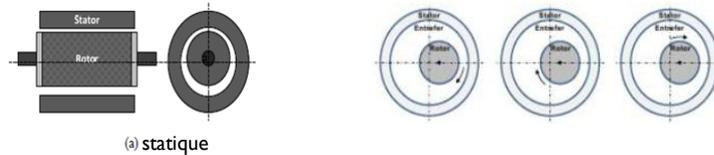
Vue des roulements sains et défectueux

32

## DEFAUTS D' EXCENTRICITE

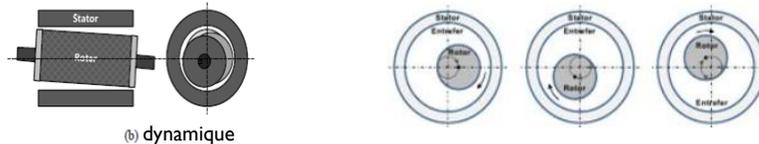
L'excentricité peut être une conséquence des défauts mécaniques, elle se manifeste généralement par un décentrement du rotor par rapport au stator entraînant une variation de l'entrefer. Elle peut apparaître lors de sa fabrication. Généralement, trois catégories d'excentricité sont distinguées.

**L'excentricité statique** correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor reste fixe mais ne coïncide pas avec l'axe de symétrie du stator. La cause principale est un défaut de centrage des flasques.



(a) statique

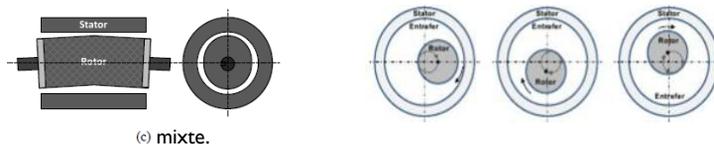
**L'excentricité dynamique** correspondant au cas où l'axe de rotation du rotor n'est pas fixe mais tourne autour de l'axe de symétrie du stator. Ce type d'excentricité est causé par une déformation du cylindre rotorique, une déformation du cylindre statorique ou la détérioration des roulements à billes



(b) dynamique

33

**L'excentricité mixte** qui est la somme des deux premiers cas. En pratique ce dernier type de défaut est le plus fréquent,



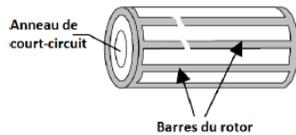
(c) mixte.

Les défauts d'excentricité modifient le comportement magnétique et mécanique de la machine. En effet, l'augmentation de l'excentricité induit, d'une part l'augmentation des forces électromagnétiques qui agissent sur le stator. D'une autre part, augmente le risque de frottement entre le stator et le rotor

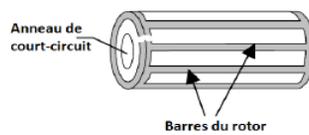
34

## DEFAUTS DE RUPTURE DE BARRES ET D'ANNEAU DE COURT CIRCUIT

Pour une machine asynchrone avec un rotor à cage d'écreuil, les défauts se résument à la rupture de barres ou à la rupture d'anneaux de court-circuit.



rupture de barres



rupture d'anneau de court-circuit.

Les ruptures de barres peuvent être dues à plusieurs origines qui sont souvent indépendantes les unes des autres, telle qu'une mauvaise utilisation de la machine par exemple une surcharge mécanique (démarrages fréquents,...etc.), un échauffement local excessif ou encore un défaut de fabrication (bulles d'air ou mauvaises soudures).

Ces défauts engendrent des oscillations sur le couple électromagnétique pour les machines à grande inertie. Si l'inertie est plus faible, des oscillations apparaissent sur la vitesse mécanique et sur l'amplitude des courants statoriques.

La rupture d'une barre n'induit pas l'arrêt immédiat de la machine, du fait que le courant de la barre cassée se répartit sur les barres adjacentes. Ces barres sont alors surchargées qui peuvent engendrer leurs ruptures et ainsi de suite, jusqu'à l'arrêt de la machine.

La cassure d'une portion d'anneau est due soit à des bulles de coulées, aux dilatations différentielles entre les barres et les anneaux, un mauvais dimensionnement des anneaux, aux surcharges de la machine.

35

La démarche la plus souvent utilisée pour le diagnostic des défauts sur les machines électriques repasse sur l'analyse des grandeurs mesurables et les signaux de défaut. Les grandeurs et signaux de

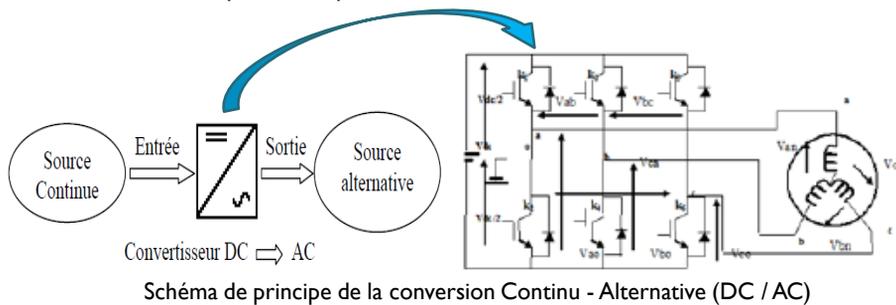
défauts les plus fréquemment utilisés sont : les courants statoriques [17, 38-42], la tension d'alimentation [43, 44], le flux de dispersion [4-6, 25, 39, 45-48], le couple électromagnétique [49, 50], la vitesse de rotation [51], la puissance instantanée aussi que les vibrations mécaniques [21, 52, 53].

36

## Défauts dans l'onduleur

### Définition de l'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En effet, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande.



37

### Types d'onduleurs

#### Onduleur autonome

Un onduleur est dit autonome s'il utilise l'énergie d'un circuit auxiliaire propre à lui pour la commutation des thyristors

- Les onduleurs de tension alimentée par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continue.

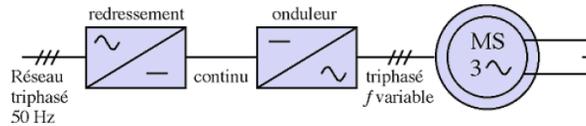
#### Onduleur non autonome

C'est le nom donné au montage redresseur tous thyristors (pont de Graëtz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur.

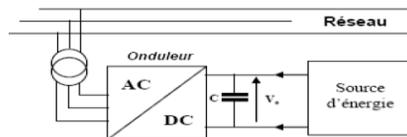
38

## Applications des onduleurs

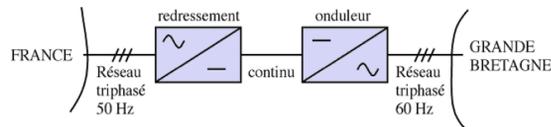
### Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone



### Alimentation de secours



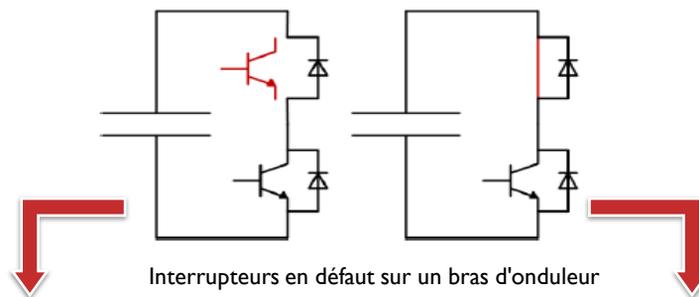
### Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes



39

## Détection et localisation de défauts à l'aide de modèles

Dans, la modélisation des défauts des interrupteurs comportent deux cas : présence de circuit continûment ouvert ou fermé.



Interrupteurs en défaut sur un bras d'onduleur

le courant de la phase connectée à ce bras ne peut être contrôlé que pour un sens du courant. Quand ce dernier est nul, les courants des deux autres phases peuvent prendre des valeurs élevées pour un couple de charge donné.

Le cas du défaut de court-circuit d'un transistor d'un bras de l'onduleur est également dangereux (en haut à droite sur la figure. En fait, si la commande rapprochée de l'interrupteur du bas ne détecte pas le défaut et n'ouvre pas son transistor, le condensateur de l'étage continu se retrouve court-circuité et le courant dans le bras devient très important. Les courants des phases deviennent alors incontrôlables.

40

### Détection de défauts par le principe de génération des résidus

Le principe de détection de défauts par redondance analytique (à base de modèle) [58, 59] peut être représenté par le schéma suivant. Il consiste à comparer le comportement du système réel à surveiller et son modèle. Les vecteurs de sortie du système ou du modèle devront regrouper toutes les grandeurs nécessaires à la détection et la localisation des défauts. Le vecteur résidu n'est autre que la différence entre les grandeurs correspondantes du système réel et de son modèle.

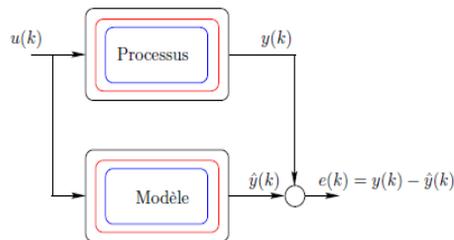


FIGURE 3.22 – Principe de génération des résidus pour la détection de défauts

41

### Détection de défauts par l'analyse de la trajectoire du vecteur courant

Les méthodes utilisées, dans cette étude pour la détection et la localisation de défauts dans les onduleurs à MLI, sont basées sur l'analyse des formes de trajectoire de Lissajous relatives à chaque interrupteur en défaut sont illustrés par la figure suivante

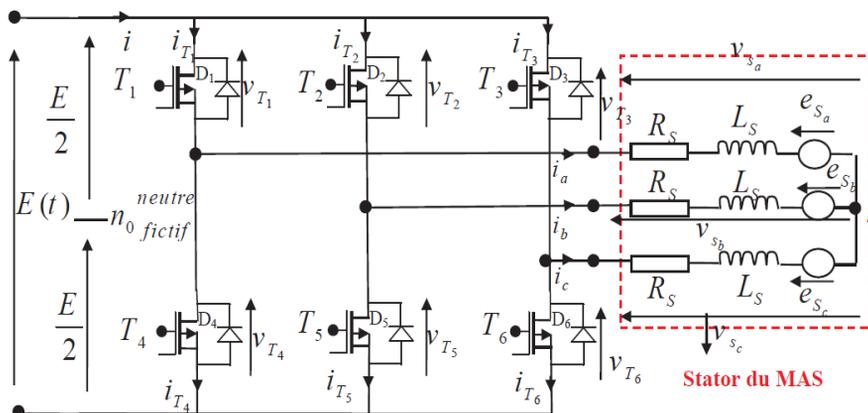
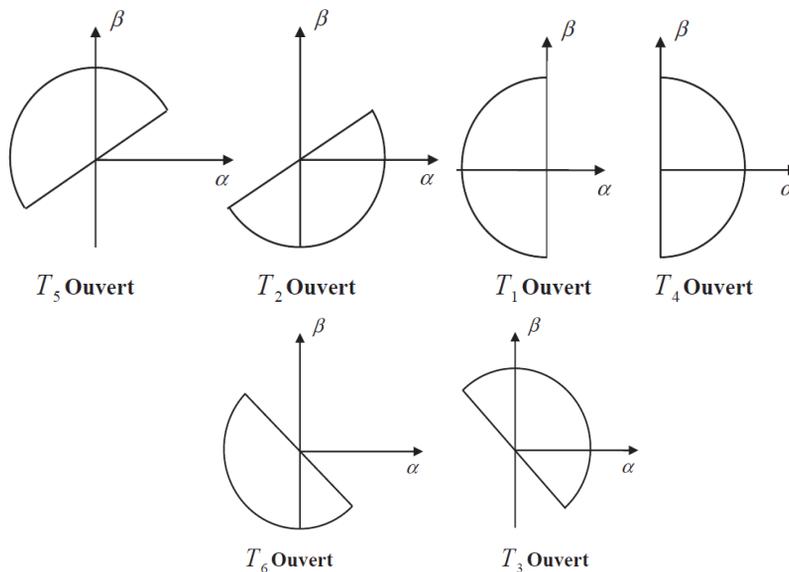


Schéma de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux

42

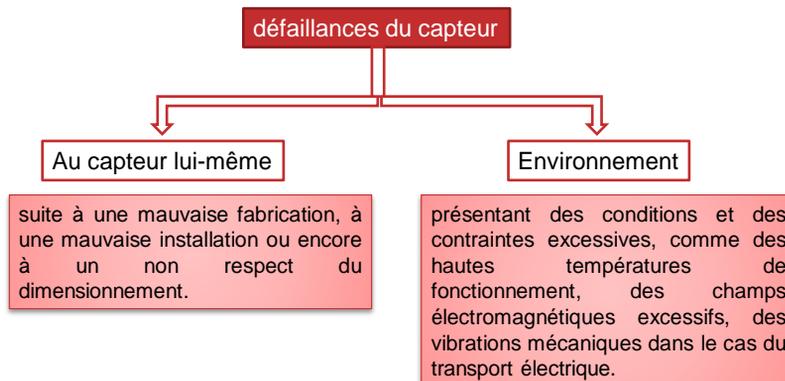


43

### Défauts de capteurs

Dans le domaine industriel, les capteurs sont des éléments indispensables pour la commande, la surveillance et le diagnostic. En effet, deux types de capteurs sont couramment utilisés, capteurs électriques (courant, tension), capteurs mécaniques (vitesse, position). Ces capteurs sont néanmoins sujets à deux types de défauts :

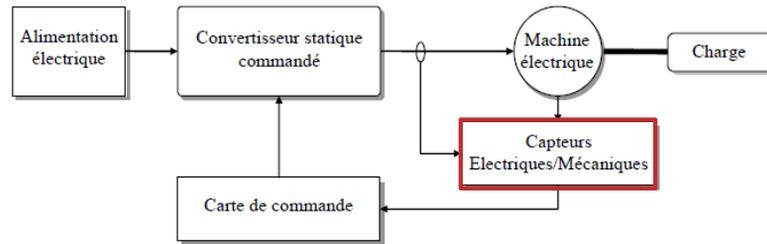
- défaut partiel : un signal transmis n'est pas égale avec la vraie valeur mesurée (présence d'un bruit, d'offset ou le gain d'adaptation est faux).
- défaut total : un signal transmis est nul.



44

### Emplacement des capteurs

Schéma type d'une chaîne d'un entraînement électrique.



Représentation typique d'une chaîne d'entraînement électrique.

45

### Différents modes de régulation

- la régulation concerne directement les courants, on parlera de régulation des **modes rapides**.
- les grandeurs à réguler sont les flux, on parlera alors de régulation des **modes moyens**.
- le **mode lent** étant le mode mécanique et le **mode très lent** étant le mode thermique

Dans le cas de commandes basées sur la comparaison de la grandeur mesurée (ou reconstruite à partir des mesures) avec la grandeur de consigne, qu'elles soient linéaires (régulateurs PI, RST ou autres) ou non linéaires (contrôle par hystérésis), les performances obtenues **dépendent étroitement de la qualité de l'information obtenue**, soit directement par la mesure, soit par une reconstitution à partir des mesures.

46

### Capteurs de courant

Ils sont utilisés soit pour la surveillance et la protection, soit pour la commande de la machine électrique.

- Dans le premier cas, les capteurs utilisés sont ceux intégrés en série avec l'interrupteur de puissance.
- Dans le second cas, les capteurs de courant sont placés en série entre la machine et l'onduleur.

on s'intéressera dans le cadre de cette étude au cas des capteurs utilisés pour le contrôle et placés en série sur les lignes des phases du moteur électrique.

Les sorties des capteurs de courants et du capteur de vitesse/position sont traitées à l'aide de circuits d'interfaçage assurant essentiellement l'adaptation de niveau de tension, le filtrage, l'isolation et la conversion analogique numérique. Les signaux numériques ainsi obtenus constituent les entrées de la carte de commande qui comprend le composant cible (FPGA, DSP ou autres) dans laquelle sera implanté l'algorithme développé.

47

### Choix du capteur de courants alternatifs

Le choix du capteur à installer doit se faire en tenant compte de différentes contraintes et exigences imposées par l'application et par l'environnement . Ces dernières sont principalement les suivantes :

- **Contraintes électriques** du signal à mesurer : amplitude, fréquence, comportement dynamique, avec ou sans séparation galvanique,,,,,,,,,,,,,
- **Contraintes d'environnement** : température, vibration, volume, durée de vie, interférences électromagnétiques (CEM)...
- **Contraintes d'usage** : coût, résolution, précision,...

48

➤ Les capteurs les plus utilisés dans le domaine des entraînements électriques à vitesse variable et qui présentent une séparation galvanique sont:

- le capteur à effet Hall : basé sur la relation de *Maxwell-Ampère*. Il est aussi fiable et assure une bonne précision.
- le transformateur de courant : utilise les principes physiques mis en jeu par la relation de *Maxwell-Ampère*, celle de *Maxwell-Faraday* et la loi d'*Ohm* [9]. Il est surtout utilisé pour les applications à forts courants.
- l'enroulement de Rogowski : utilise les principes de la loi d'*Ampère*. Il permet de capter les régimes transitoires des courants. Il n'est pas assujéti au phénomène de saturation magnétique, ce qui lui donne une très grande linéarité. Il est surtout utilisé dans l'industrie de puissance

➤ Les capteurs sans séparation galvanique, nous pouvons citer:

- le capteur shunt (résistance) : basé sur la loi d'*Ohm*. Ce type de capteur est fiable et son prix est faible, mais des précautions de précision doivent être prises lors de la mesure vue que la résistance des fils de mesure n'est pas négligeable devant celle de la résistance shunt.

49

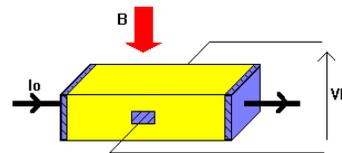
## Les capteurs à effet Hall

### RAPPEL DU PRINCIPE DE L'EFFET HALL

Si un courant  $I_0$  traverse un barreau en matériau conducteur ou semi-conducteur, et si un champ magnétique d'induction  $B$  est appliqué perpendiculairement au sens de passage du courant, une tension  $V_h$ , proportionnelle au champ magnétique et au courant  $I_0$ , apparaît sur les faces latérales du barreau. C'est la tension de Hall (du nom de celui qui remarqua le phénomène en 1879).

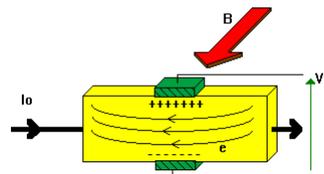
$$V_h = K_h * B * I_0$$

avec  $K_h$ : constante de Hall, qui dépend du matériau utilisé.



### CAUSES DE L'EFFET HALL

Les électrons sont déviés par le champ magnétique, créant une différence de potentiel appelée tension de Hall.



50

## APPLICATION A LA MESURE AVEC ISOLATION GALVANIQUE

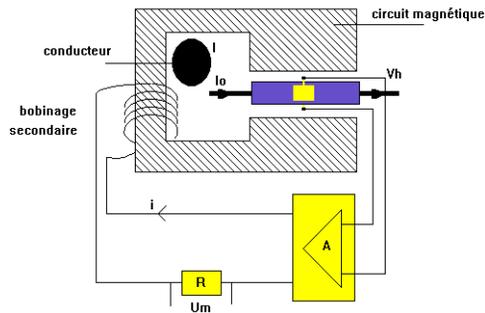
Un circuit magnétique constitué de ferrite permet de canaliser le flux créé par le conducteur parcouru par le courant  $I$ .

Un générateur de courant constant fournit le courant  $I_0$ .

Une tension  $V_h$  proportionnelle au courant  $I_0$  et à l'induction produite par le courant  $I$  apparaît.

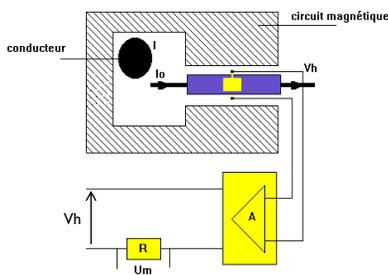
Cette tension est amplifiée pour fournir un courant  $i$  dans les  $N$  spires du bobinage secondaire, de façon à produire un flux opposé à celui créé par  $I$ .

A l'équilibre:  $B = 0$  et  $I = N * i$

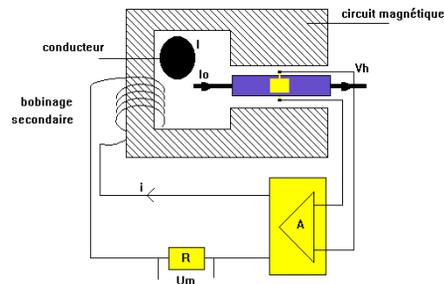


Capteur à effet Hall de courant en boucle fermée

51



Capteur à effet Hall de courant en boucle ouverte



Capteur à effet Hall de courant en boucle fermée

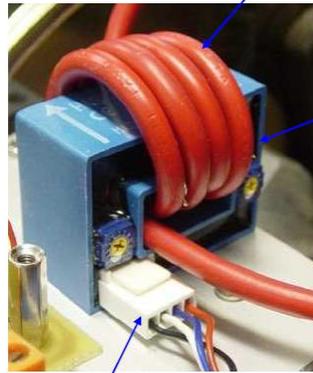
Tableau récapitulatif des principaux avantages de deux technologies de capteur à effet Hall

	Capteur à effet Hall en BF	Capteur à effet Hall en BO
Fréquence	Large	large
Précision	bonne	bonne
Temps de réponse	faible	faible
Exactitude envers température	bonne	faible
linéarité	excellente	saturation

52

Les marques les plus répandues des capteurs à effet Hall sont *LEM*, *ABB*,... Sur la figure suivante nous montrons un capteur type *LEM*.

Fil dans lequel circule le courant qu'on veut mesurer



Capteur LEM de courant

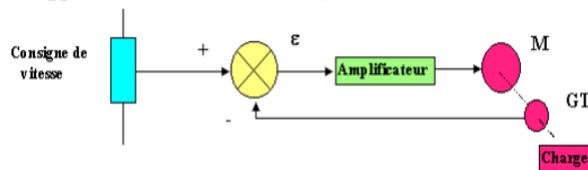
Connecteur pour fil alimentation et fil signal récupéré

53

## Capteurs de vitesse et de position

### Tachymétrie ( génératrice tachymétrique )

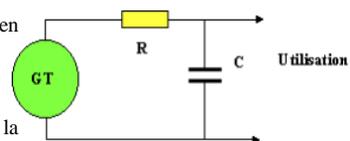
Elle délivre une tension proportionnelle à sa vitesse de rotation. Son principal domaine d'application se situe dans la régulation de vitesse d'un moteur électrique.



Le système évolue de sorte que l'erreur de vitesse  $\epsilon$  soit nulle.

### Caractéristiques essentielles d'une tachymétrie

- vitesse maximale de rotation (en tours par minute),
- constante de f.e.m. (en volts à 1000 trs/mn ou en v/tr/mn),
- linéarité (en %),
- ondulation crête à crête (en %),
- courant maximal. Pour atténuer l'ondulation sur la tension de sortie, un filtrage peut s'avérer nécessaire:

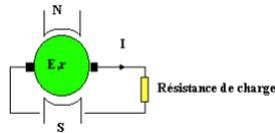


La fréquence de coupure du filtre passe-bas est donnée par:  $f_c = 1/(2.\pi.R.C)$ .

54

## Différents types

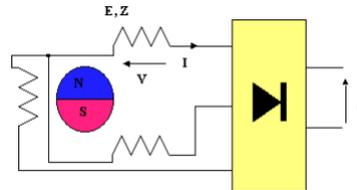
## génératrice à courant continu



L'excitation est assurée par des aimants permanents.

$U = E - r.I$  et  $U = R_c.I$   
d'où:  $U = E / (1+r/R_c) = K_e.\Omega / (1+r/R_c) = K.\Omega$   
Avec:  
 $R_c$ : résistance de charge  
 $K_e$ : constante de f.e.m. en v/rd/s  
 $\Omega$ : pulsation en rd/s  
La caractéristique tension-vitesse est donc linéaire.

## génératrice synchrone (alternateur)



L'excitation (rotor) est aussi assurée par des aimants permanents. La tension de sortie doit être redressée et filtrée avant d'être exploitée.

E et Z sont les f.e.m. et impédance par phase.  
 $V = E - Z . I$  et  $V = R_c . I$   
( $R_c$  résistance de charge par phase)  
d'où:  $V = E / (1 + Z / R_c)$   
Z est fonction de la pulsation des grandeurs électriques, donc dépend de la vitesse de rotation de la génératrice: la caractéristique tension-vitesse n'est plus linéaire.

55

## Tableau comparatif des génératrices tachymétriques

Génératrice	à courant continu	synchrone
Linéarité	bonne	à vide seulement
Collecteur et balais (entretien)	oui	non
Information sens de rotation	oui par le signe de la tension	non
Prix	élevé car fabrication délicate	plus économique

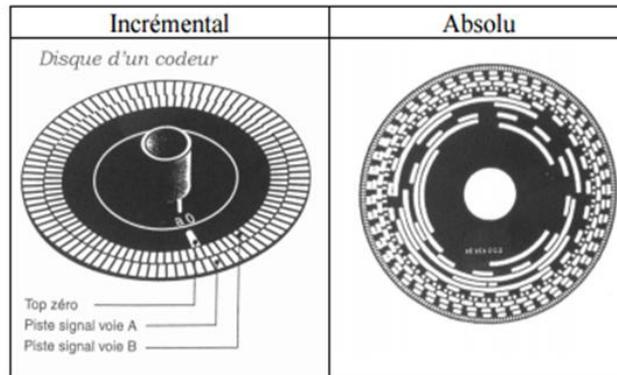
56

## Codeurs incrémentaux et absolus

### Constitution

Ils sont composés d'opto-coupleurs et de disques sérigraphiés.

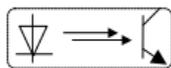
### Différents types



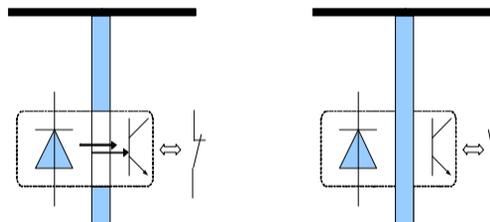
57

### Principe

Il s'agit d'un transistor qui est polarisé par une led émettrice



Si la lumière arrive sur le transistor, il se ferme  
Si la lumière est bloquée, le transistor reste bloqué.

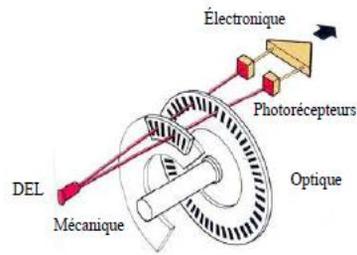


58

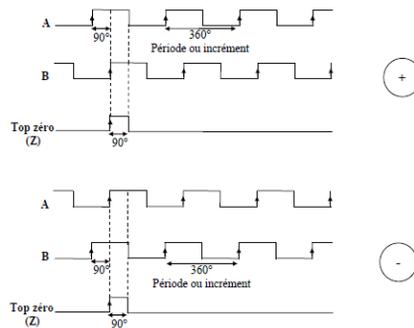
### Codeur incrémental

Un codeur incrémental délivre un certain nombre d'impulsions par tour. Le nombre d'impulsions est une mesure pour le déplacement angulaire ou linéaire. Un disque fixe sur un arbre est divisé en segments transparents et opaques. La plupart sont pourvus de deux rangées de segments (voie A et voie B) et d'un segment Top Z.

Les deux voies déphasées de  $90^\circ$  indiquent le sens de rotation, tandis que le top Z le nombre de tour. Leur résolution est le nombre maximum d'impulsions qu'il envoie par un tour, elle s'exprime en pts/tr (exemple 12 pts/tr)



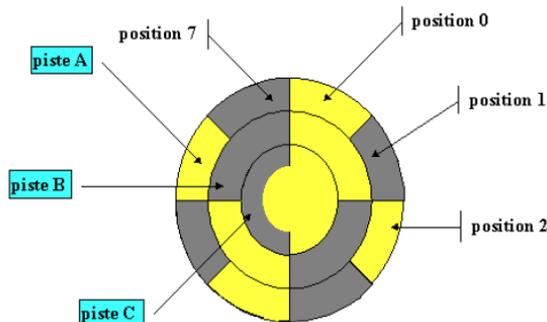
### Chronogramme



59

### Codeur absolu

Principe: un disque est divisé en pistes. Chaque piste comporte une alternance de secteurs réfléchissants et absorbants. Comme pour le codeur incrémental, un émetteur-récepteur par piste fournit les informations. Le nombre de pistes fixe le nombre de positions discrètes pouvant être définies: 1 piste = 2 positions, 2 pistes = 4 positions, 3 pistes = 8 positions... n pistes =  $2^n$  positions.



60

Son principal avantage est qu'il donne une information de position absolue, alors que le codeur incrémental donne la position relative (par rapport à une position initiale variable). En revanche, il est plus complexe, du fait qu'une grande précision de position dépend du nombre de pistes (alors que la précision d'un codeur incrémental dépend seulement du nombre de graduations sur la piste).

La figure suivante illustre un exemple de codeur incrémental, produit de 'AK Industries', que l'on peut trouver sur le marché. Il inclut une partie mécanique, associée à une partie optique et électronique.



61