

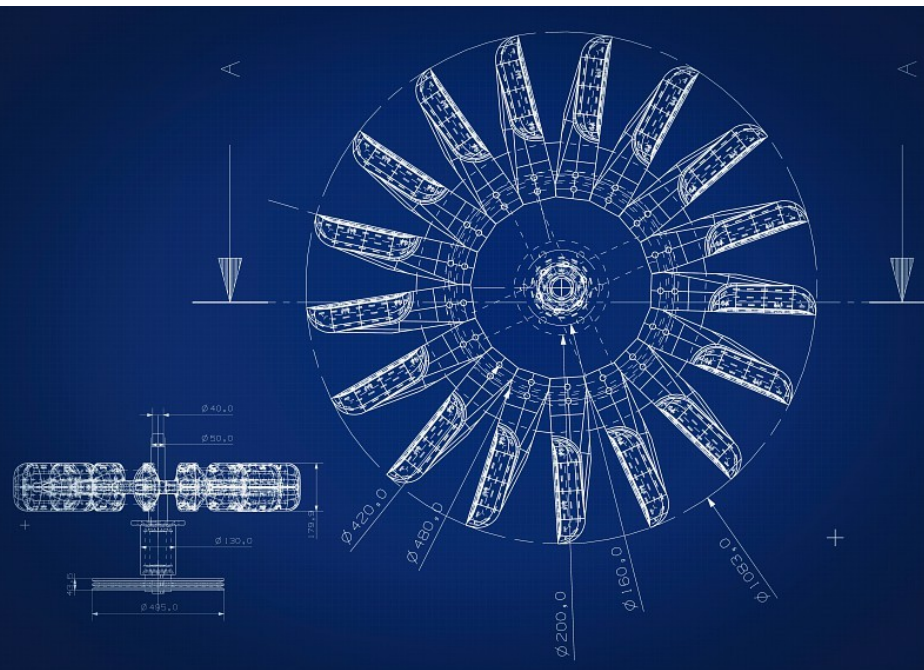
MAINTENANCE PRÉDICTIVE

COURS 3



Plan du cours

- **Introduction**
- **Modélisation statistique des lois de vie**
- **Capteurs, construction d'indicateurs de santé**
- **Sélection de variables, types de variables et prédiction**
- **Analyse de risques, réseaux bayésiens**
- **Examen**



MAINTENANCE & DONNÉES STATIQUES

Maintenance & données statiques

▪ Rappels & illustration

▪ Le suivi périodique : différentes granularités de maintenances planifiées

- Vérification de l'avion ou l'hélicoptère avant chaque vol
- Maintenance régulières selon un certain nombre d'heures de vols ou d'atterrissage / décollage
- Les maintenances régulières ont des exigences plus ou moins grandes
 - Sans démonter l'équipement
 - En le démontant et en le laissant au soin de la compagnie
 - En le démontant et en le renvoyant au constructeur ou dans un « shop » agréé
- Toutes les instructions sont dans les **manuels de maintenance**

▪ Les maintenances non planifiées / correctives

- Ingestion de corps étrangers
- Dégradations imprévues (corrosion, érosion)



Maintenance & données statiques

- **Comment aller au-delà de la modélisation statistique pure ?**

- En ajoutant des données & de la connaissance

- **Comment sont construits les manuels de maintenance ?**

- Connaissances physiques / métier

- Modélisations
 - Cycles de vie

- Retour d'expérience

- Impact de l'environnement
 - Impact de l'usage

- **Comment décide-t-on d'une maintenance imprévue ?**

- Connaissances physiques

- Notions de marges
 - Inspections

- Retour d'expérience

- Inspections

Maintenance & données statiques

▪ Les données statiques : quelles sont-elles ?

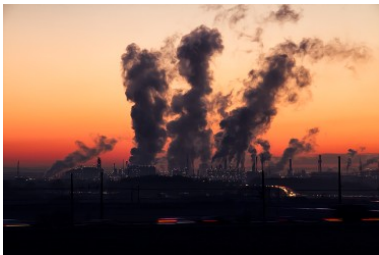
- Les dates de pannes
- Mais aussi d'autres variables disponibles simplement
 - Type d'avion
 - Pollution de l'air
 - Météo moyenne
 - ...
- Ainsi que des modélisations physiques
 - ➔ ce ne sont pas à proprement parler des données, mais plus des connaissances a priori, sans données d'utilisation

Maintenance & données statiques

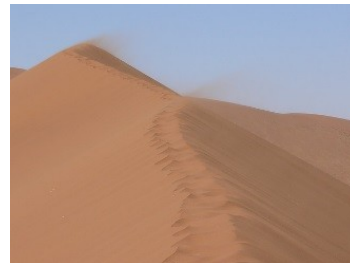
▪ L'impact de l'environnement

- > Les moteurs absorbent de l'air
- > En fonction de la qualité de l'air et de ses composantes, le moteur s'endommagera plus ou moins

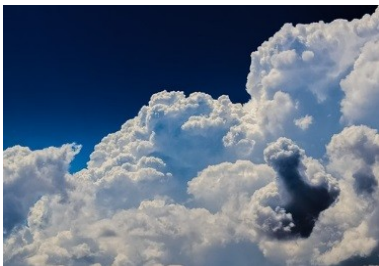
> Pollution



> Sable



> Humidité



> Salinité



Maintenance & données statiques

- **L'impact de l'environnement**

- > Les moteurs absorbent de l'air
- > En fonction de la qualité de l'air et de ses composantes, le moteur s'endommagera plus ou moins

- **Cet effet est pris en compte dans le manuel de maintenance :**

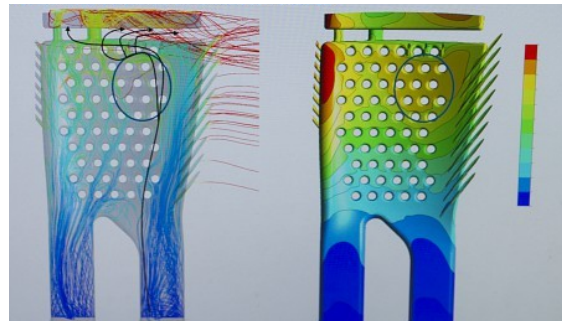
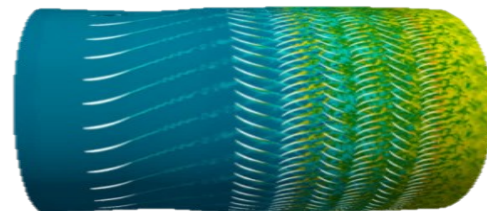
- > Ajout de filtres pour le sable
- > Lavage plus régulier pour la pollution et la salinité

- > Dans un cas simple de l'utilisation de ces données, elles sont utilisées comme covariables pour les lois statistiques qu'on a vu dans le cours précédent

Maintenance & données statiques

■ Utilisation des modèles physiques

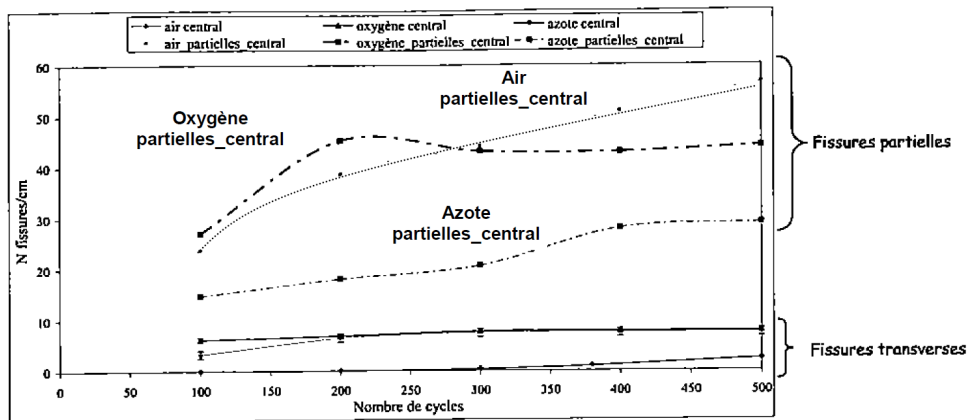
- > À partir des **contraintes physiques** exercées sur une pièce mécanique
 - Changement de température
 - Forces et moments exercés sur les matériaux
- > Il est possible de simuler les effets d'**usure** sur les pièces:
 - Apparition de fissures
 - Risque de ruptures
 - Etc...



Maintenance & données statiques

■ Utilisation des modèles physiques

- Ces simulations physiques permettent donc d'estimer des cycles
 - Un cycle est une séquence typique vu par un équipement
 - Les simulations prédisent quel est l'impact de chaque cycle sur les différentes pièces de l'équipement
 - Le moteur est déposé pour être placé en maintenance après N cycles
 - Ex : endofluage, freins d'avion, ...
- Dans un cas d'usage simple de l'utilisation de ces modélisation, ces cycles **remplacent le temps** dans les modèles statistiques



Exemple nb cycles vs fissure

Maintenance & données statiques

La maintenance planifiée : le lien entre activités des clients et états des moteurs

- En fonction du business du client, les équipements s'usent différemment
- Exemple dans l'aéronautique
- Par ce retour d'expérience, une typologie de mission a été créée basée sur cette idée
- Actuellement, les missions sont réparties en différents grands types:

> Emergency Medical Services



Utilitaire



> Militaire



> Tourisme



> VIP



> Off-shore



> Police



Maintenance & données statiques

- **Cependant, l'utilisation des données statiques a ses limites**
 - Exemple sur les types de missions : deux compagnies de tourisme, deux utilisations différentes



Tourisme à Hawaii



Tourisme au grand canyon

Maintenance & données statiques

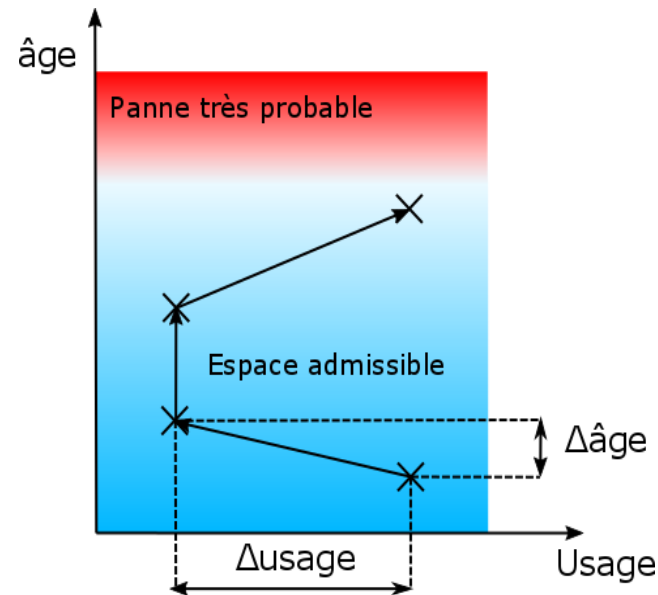
▪ Cependant, l'utilisation des données statiques a ses limites

- Exemple sur le cyclage : l'utilisation non continue des équipements
 - Que faire si un client fait des manœuvres particulières qui endommagent l'équipement mais ne sont pas standard ?
 - Solution possible : on introduit la notion de cycle partiel
 - Un algorithme détecte automatiquement ces manœuvres
 - Une table physique vient prédire l'impact de telles manœuvres sur le moteur
 - ... Que faire si le client s'adapte ... ?
 - Ici, on est passé aux données dites longitudinales, des données récoltées tout au long de la vie de l'appareil

Maintenance & données statiques

Les données longitudinales, une granularité plus fine

- ◆ Pour chaque usage particulier on veut mesurer un vieillissement particulier
- ◆ On décompose usage et vieillissement
 - > L'usage est l'usage effectué
 - > Le vieillissement est l'état de l'équipement





COLLECTER LES DONNÉES



Collecter les données : quelles données ?

- **Interne**

- > Les capteurs utilisés pour le contrôle de l'équipement
- > Les capteurs de l'équipement spécifique pour la maintenance

- **Externe**

- > Environnement
 - Humidité, températures, pressions, ...
- > Commandes
 - Valeurs de consignes, accélérations, ...

- **Résultats intermédiaires**

- > Indicateurs embarqués
- > Résumés de vol

Collecter les données : quels systèmes/technologies de collecte ?

- **La chaîne de collecte :**

- > Capteurs
- > Cloud (stockage & analyse)
- > Réseaux de transport d'information (fibre / wifi / bluetooth, faible énergie, ...)

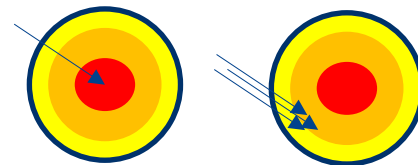
- **En tant qu'analyste, ne pas sous-estimer les étapes dans le monde matériel !**

- > Placer les capteurs,
- > Monter les réseaux locaux / externes
- > Raccorder le tout au cloud
- > Certains clients ont des contraintes particulières
- > Anecdote : Usine bosch, 2 mois par machine

Focus sur les capteurs

▪ Capteurs pour la maintenance

- La maintenance prédictive est souvent associée à certains capteurs particuliers
- Le traitement peut être embarqué ou hors ligne



▪ Les propriétés d'un capteur :

- L'*exactitude*/le *biais* d'un capteur renvoie à la véracité des données qu'il produit
- La *résolution* d'un capteur renvoie au plus petit incrément ou décrément de position pouvant être mesuré par celui-ci
- La *précision* d'un capteur est déterminée par son degré de *répétabilité*.

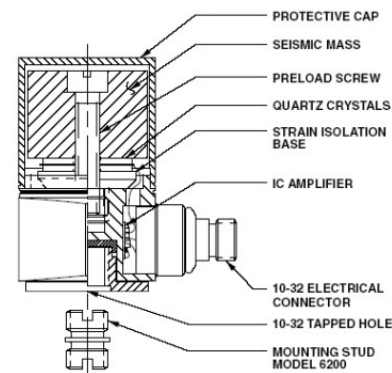
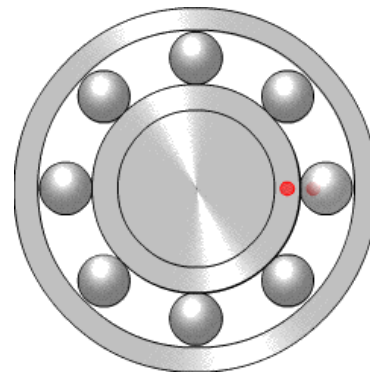
Accéléromètres

▪ Que peut-on mesurer ?

- > Vibrations
 - Surveiller les fréquences & amplitudes des mouvements
 - Isoler la ou les sources de vibration
- > Chocs
 - Détecter les mouvements anormalement brutaux de l'équipement

▪ Quels défauts sont liés à ce genre de mesure ?

- > État des roulements
- > Engrènement des engrenages
- > Cavitation de la pompe
- > Désalignement
- > Déséquilibre
- > État de charge



Accéléromètres

▪ Les principales technologies

▪ Piézoélectriques

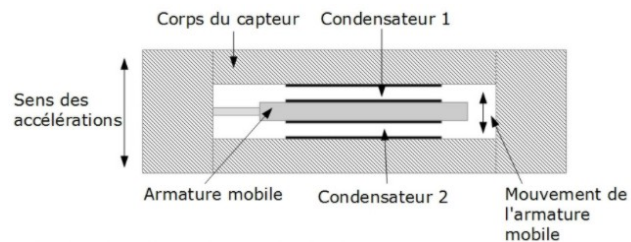
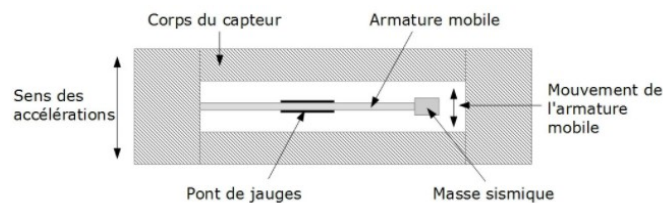
- Certains cristaux et certaines céramiques se chargent électriquement lorsqu'ils sont soumis à une déformation
- Le cristal se charge sur deux faces en regard avec des charges opposées lorsqu'on le soumet à une force exercée entre ces deux faces
- Une métallisation des faces permet de recueillir une tension électrique qui pourra être utilisée dans un circuit
- Bien pour les vibrations

▪ Piézorésistif

- Changement de résistance plutôt que la création de charge

▪ Capacitif

- Changement dans la capacité des condensateurs quand les plaques se rapprochent ou s'éloignent



Sources : <https://www.dmesures.fr/fr/produits/inclinaison-acceleration-fr.html>
http://www.alliantech.com/pdf/coin_des_experts/generalite_sur_accelerometrie.pdf

Accéléromètres

■ Les principales technologies

■ À jauge de déformation

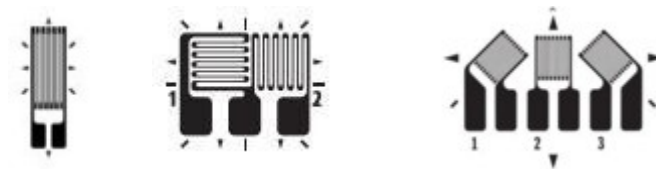
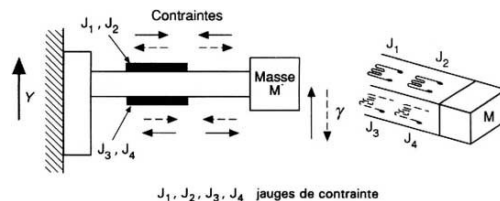
- Proche du résistif
- On mesure des courants dans une jauge qui se déforme

■ Inductif

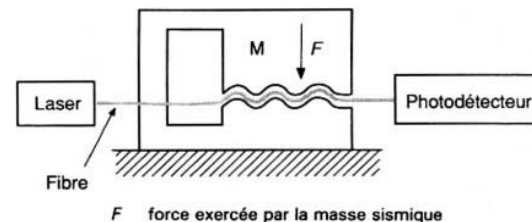
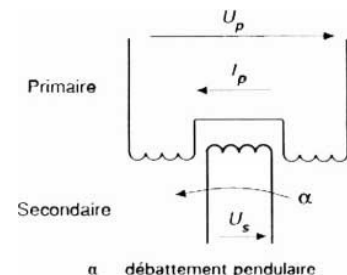
- On utilise deux bobines de sens contraires, on mesure un courant

■ Par laser / source lumineuse

- Avec une fibre optique et on mesure des temps de parcours
- Avec des systèmes d'occultation, ...



<https://www.dmesures.fr/fr/11-produits/capteur.html>



Source: *Accélération* de Alain DEVAL Ingénieur Civil de l'Aéronautique Directeur Technique Adjoint de la SAGEM et Yvon AMAND Ingénieur de Recherche, SAGEM

Accéléromètres

- **Les principales technologies**

- **Et d'autres**

- > plus expérimentaux ou pour d'autres usages (navigation inertielle par exemple)
- > Pendules
- > Poutres vibrantes
- > Ondes de surface
- > Effet hall
- > Piézo-optique
- > Etc...

- **Quelles spécificités pour le traitement de données ?**

- > Connaissance en traitement du signal : les fréquences, les bande-passantes, seront déterminantes pour détecter et/ou caractériser les défauts considérés.

Source: *Accélération* de Alain DEVAL Ingénieur Civil de l'Aéronautique Directeur Technique Adjoint de la SAGEM et Yvon AMAND Ingénieur de Recherche, SAGEM

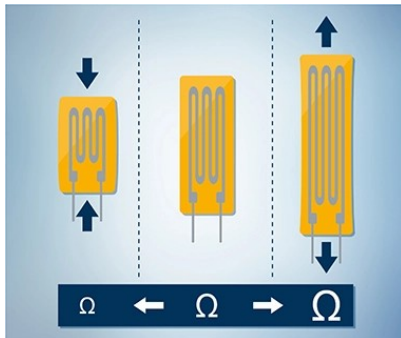
Force / Couple

- **Principales technologies**

- > Jauges de contraintes

- **Quels défauts peut-on mesurer ?**

- > Généralement, pour la maintenance, un couple / une force est une sortie désirée
 - > Un changement dans la sortie désirée indique un problème dans le système en général
 - > Il faudra certainement l'associer à d'autres variables



Jauges de contrainte



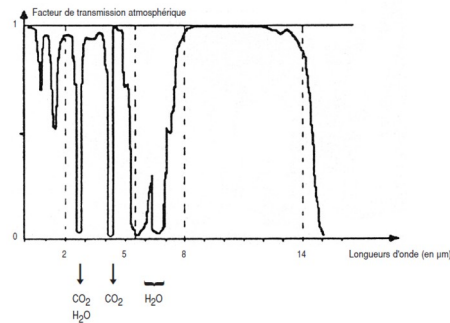
Thermographie infrarouge, rayon X, tomographie

▪ Quels défauts peut-on détecter ?

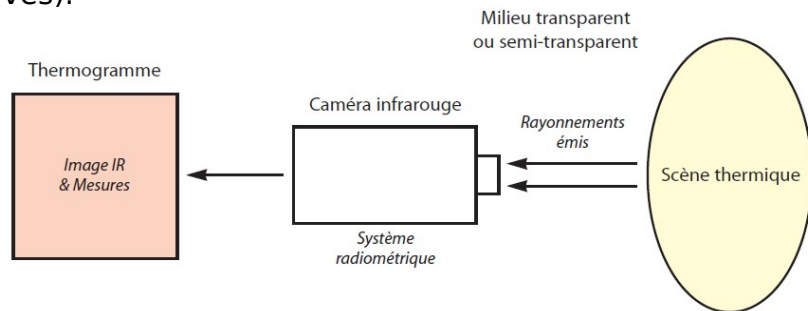
- > Défauts de structure / composition
- > Défauts de surface

▪ Quelles spécificités pour le traitement de données ?

- > Méthodes de résolution de problèmes inverses
- > Méthodes de traitement d'image classique
- > Méthodes de Deep Learning



- La bande 2-5 µm appelée Ondes courtes (SW, Short Waves).
- La bande 7-15 µm appelée Ondes longues (LW, Long Waves).



Thermographie infrarouge, rayon X, tomographie

■ Principales technologies

Name	Source of data	Abbreviation	Year of introduction
<u>Aerial tomography</u>	<u>Electromagnetic radiation</u>	AT	2020
<u>Array tomography</u> [2]	<u>Correlative light and electron microscopy</u>	AT	2007
<u>Atom probe tomography</u>	<u>Atom probe</u>	APT	
<u>Computed tomography imaging spectrometer</u> ^[3]	<u>Visible light spectral imaging</u>	CTIS	2001
<u>Computed tomography of chemiluminescence</u> ^{[4][5]}	<u>Chemiluminescence Flames</u>	CTC	2009
<u>Confocal microscopy (Laser scanning confocal microscopy)</u>	<u>Laser scanning confocal microscopy</u>	LSCM	
<u>Cryogenic electron tomography</u>	<u>Cryogenic transmission electron microscopy</u>	CryoET	
<u>Electrical capacitance tomography</u>	<u>Electrical capacitance</u>	ECT	<u>1988</u> [6]
<u>Electrical capacitance volume tomography</u>	<u>Electrical capacitance</u>	ECVT	
<u>Electrical impedance tomography</u>	<u>Electrical impedance</u>	EIT	1984
<u>Electrical resistivity tomography</u>	<u>Electrical resistivity</u>	ERT	
<u>Electron tomography</u>	<u>Transmission electron microscopy</u>	ET	1968 ^{[7][8]}
<u>Focal plane tomography</u>	<u>X-ray</u>		1930s
<u>Functional magnetic resonance imaging</u>	<u>Magnetic resonance</u>	fMRI	1992
<u>Hydraulic tomography</u>	<u>fluid flow</u>	HT	2000
<u>Infrared microtomographic imaging</u> [9]	<u>Mid-infrared</u>		2013
<u>Laser Ablation Tomography</u>	<u>Laser Ablation & Fluorescent Microscopy</u>	LAT	2013

Thermographie infrarouge, rayon X, tomographie

■ Principales technologies

Name	Source of data	Abbreviation	Year of introduction
Microwave tomography ^[12]	<u>Microwave</u>		
Multi-source tomography ^[10] [11]	<u>X-ray</u>		
Muon tomography	<u>Muon</u>		
Neutron stimulated emission computed tomography			
Neutron tomography	<u>Neutron</u>		
Ocean acoustic tomography	<u>Sonar</u>	OAT	
Optical coherence tomography	<u>Interferometry</u>	OCT	
Optical diffusion tomography	<u>Absorption of light</u>	ODT	
Optical projection tomography	<u>Optical microscope</u>	OPT	
Photoacoustic imaging in biomedicine	<u>Photoacoustic spectroscopy</u>	PAT	
Photoemission Orbital Tomography	<u>Angle-resolved photoemission spectroscopy</u>	POT	2009 [13]
Positron emission tomography	<u>Positron emission</u>	PET	
Positron emission tomography - computed tomography	<u>Positron emission & X-ray</u>	PET-CT	
Quantum tomography	<u>Quantum state</u>	QST	
Seismic tomography	<u>Seismic waves</u>		
Single-photon emission computed tomography	<u>Gamma ray</u>	SPECT	
Terahertz tomography	<u>Terahertz radiation</u>	THz-CT	
Thermoacoustic imaging	<u>Photoacoustic spectroscopy</u>	TAT	
Ultrasound computer tomography	<u>Ultrasound</u>	USCT	
Ultrasound transmission tomography	<u>Ultrasound</u>		

Et bien d'autres

- **Capteurs plus bas niveau**
 - > Résistance
 - > Courant
 - > Tension
- **Thermomètres**
- **Baromètres**
- **Microphones**
- **Moniteur de particules**
- **Capteurs d'humidité**
- ...

Commentaire général

- **Vous aurez compris que chaque type de variables à mesurer a un grand nombre de capteurs disponibles**
 - > Vous devrez apprendre à comprendre le principe des capteurs qui vous fournissent les données
 - > Ne jamais prendre les données comme une boîte noire
- **Un capteur = des techniques spécifiques de traitement**
 - > Les capteurs créent des données structurées, spécifiques
 - > La prise en compte de ces structures dans les données est la clef d'une bonne analyse
 - > L'adéquation entre les structures dues au défaut et/ ou au système et les capteurs est clef pour une bonne détection
- **Les capteurs ont des contraintes aussi**
 - > Température, pressions, forces ...
 - > Ils ne vous donneront donc pas toujours l'information dont vous avez besoin, mais un dérivé
 - > **Ne pas oublier qu'ils sont aussi des composants qui peuvent tomber en panne**



MAINTENANCE & DONNÉES LONGITUDINALES : CONSTRUCTION D'INDICATEURS

Données longitudinales : la construction d'indicateurs

- **Qu'est-ce qu'un indicateur de santé ?**

- > Une vision (souvent partielle) de l'état de santé du système
- > On souhaite que lorsque l'état de santé du système se dégrade, l'indicateur suive les variations de santé

- **Pourquoi faire des indicateurs ?**

- > On n'a souvent pas accès direct à la santé du système

- **Exemples pour la santé d'un humain :**

- > Température
- > Douleurs au ventre
- > Taux de glycémie

- > Ce sont des symptômes, pas des maladies
- > Parfois, les symptômes sont invisibles sans inspection

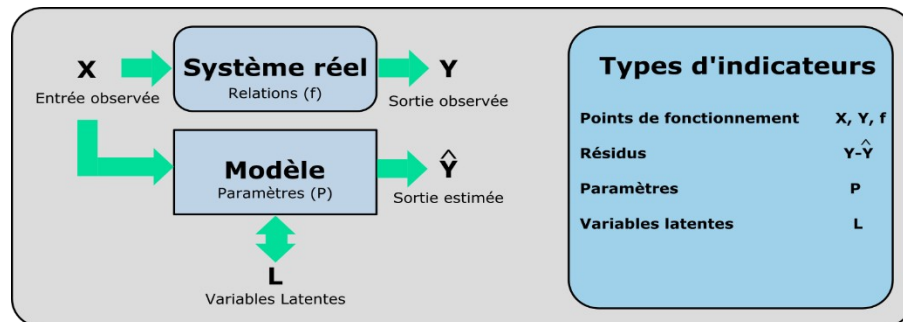
Données longitudinales : la construction d'indicateurs

▪ Les indicateurs

- > Points opérationnels
- > Résidus
- > Paramètres
- > Variables latentes

▪ Propriétés souhaitées

- > Temps de calcul
- > Conservation de l'information de tendance
- > Conservation de l'information de rupture

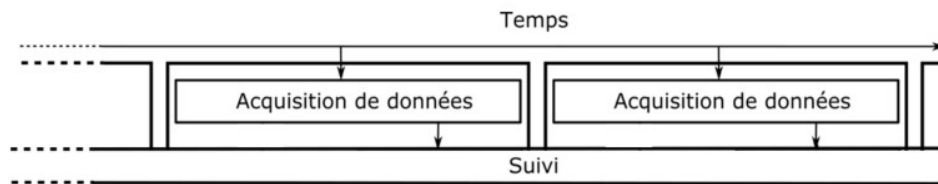


Données longitudinales : la construction d'indicateurs

■ Les indicateurs

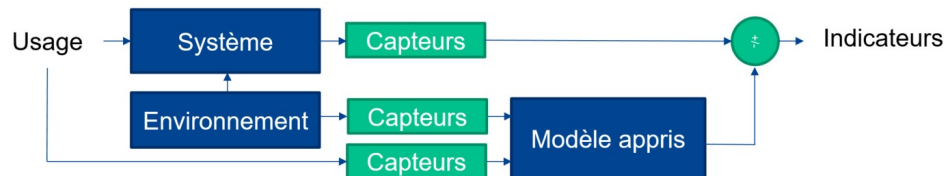
> Points opérationnels

- Max
- Min
- Mediane
- Moyenne
- Conditionnés à certains autres variables



> Résidus

- Construction d'un modèle « black box » à partir des données
- Suivi de $\hat{Y} - Y$

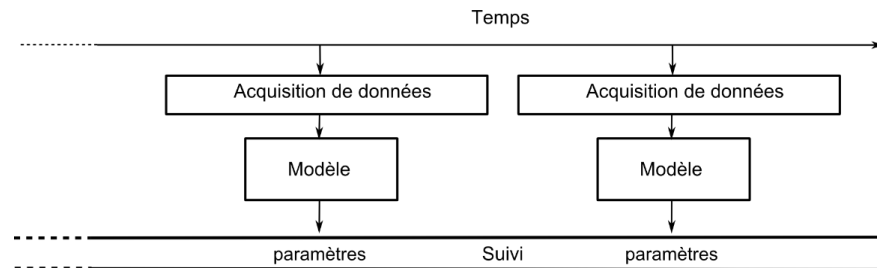


Données longitudinales : la construction d'indicateurs

▪ Les indicateurs

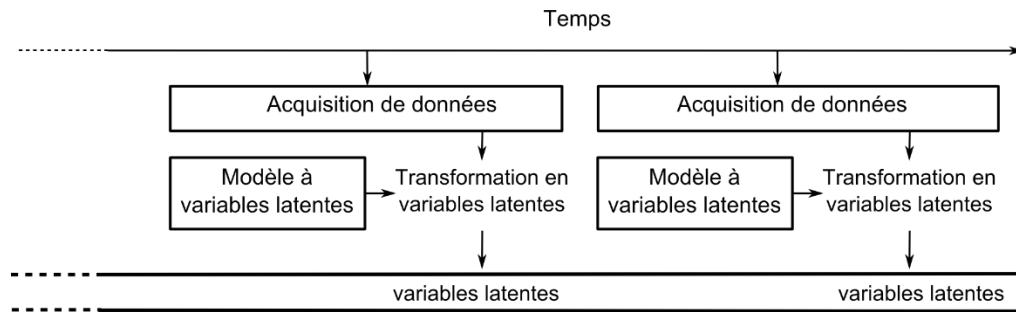
> Paramètres

- Apprentissage d'un modèle
- Suivi de ces paramètres dans le temps
- Précautions à prendre :
 - ♦ Les variables doivent être indépendantes
 - ♦ Les modèles doivent être pertinents



> Variables latentes

- Construction d'un modèle de construction de variables latentes
- Ex: Analyse en Composantes Principales
- Suivi des variables



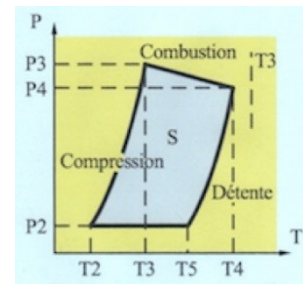
Données longitudinales : la construction d'indicateurs

Déclencher une maintenance non planifiée : les marges (indicateur par résidu)

- Les modèles thermodynamiques permettent de connaître les relations entre les variables d'un moteur
 - Ces relations dépendent des conditions extérieures
 - Il est possible de se ramener aux conditions standards T0, P0 (conditions de laboratoires)
- Ces corrections sont générales, il est possible d'effectuer des « super-corrections », qui s'obtiennent par le recalage sur les données de banc d'essai

$$XNHR1 = \frac{XNH}{\sqrt{T1/288.15}}$$

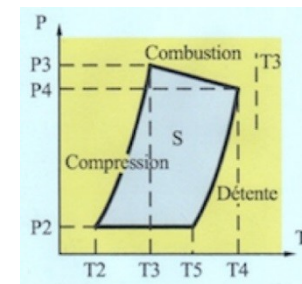
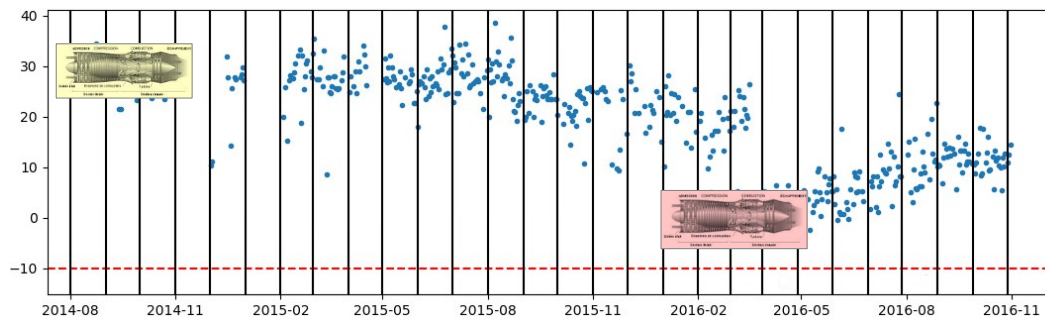
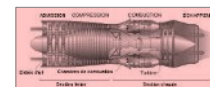
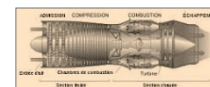
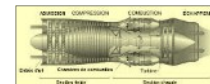
$$WOR1 = \frac{W0 \cdot \sqrt{T1/288.15}}{P1/101.325}$$



Données longitudinales : la construction d'indicateurs

Déclencher une maintenance non planifiée : les marges (indicateur par résidu)

- Les modèles thermodynamiques permettent de connaître les relations entre les variables d'un moteur
 - La **puissance maximum atteignable** est une caractéristique importante du moteur
 - Pour atteindre une puissance, il faut atteindre une certaine **température interne**
 - Cette température nécessaire varie selon l'état du moteur
 - Si la température à atteindre devient trop élevée, le moteur est déclaré inapte à voler : il a dépassé la limite, la **marge**



Données longitudinales : la construction d'indicateurs

▪ Les marges en maintenance prédictive

- > Calcul automatique
 - Conditionnement pour correspondre au modèle physique
- > Suivi de tendance
 - Régressions
 - Filtrages
 - ...
- > Puis, lien avec les connaissances métier :
 - L'allongement des pales crée une augmentation de rendement
- > ou le retour d'expérience :
 - À chaque fois que la marge sur la variable 1 monte & la marge sur la variable 2 descend, alors c'était de l'érosion du second module

Données longitudinales : la construction d'indicateurs

- **Les marges ne sont qu'un exemple parmi d'autres**

- > Temps de repos du moteur avant arrêt
 - > Vitesses maximales
 - > Températures atteintes...
- > Ces indicateurs sont en lien avec l'usage et l'usure, et comme les marges, peuvent être suivis et prédits
- > On voit ici qu'on boucle entre retour d'expérience & physique

Données longitudinales : la construction d'indicateurs

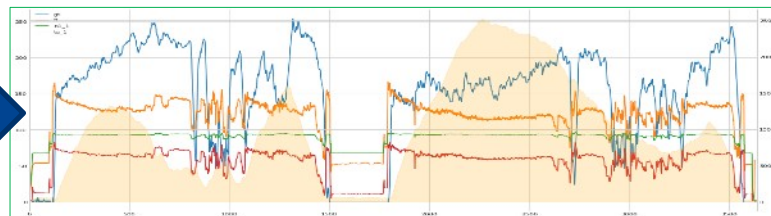
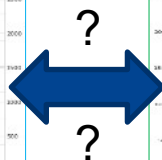
▪ Les contraintes

➤ Intégration de la physique

- ♦ La typologie trouvée doit être insensible à l'état du système
- ♦ Les variables ont différentes unités et la normalisation est cruciale avant une intégration dans un algorithme
- ♦ Les données vont de quelques minutes à plusieurs heures
- ♦ La physique induit des contraintes sur les échelles de temps et les déformations acceptables

➤ Interprétation

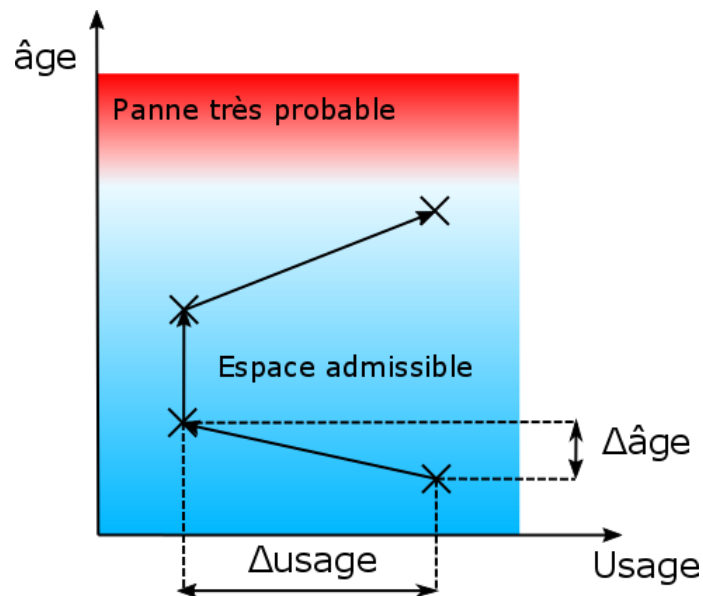
- ♦ Les résultats doivent être interprétables
- ♦ Pour comprendre les résultats il est nécessaire d'avoir l'état du moteur, donc une bonne connaissance de la maintenance et de la configuration



Données longitudinales : la construction d'indicateurs

- **Avoir des indicateurs permet de suivre la santé, mais il manque une notion importante**

- > L'indicateur permet de mesurer un proxy de l'âge
- > Mais pas le modèle de dégradation
- > On pourrait dire que l'estimation pas de temps par pas de temps suffit, cependant :
 - On souhaite prédire la panne
 - Il y a présence de bruits et d'incertitudes





MAINTENANCE & DONNÉES LONGITUDINALES: MODÉLISATION TEMPORELLE

Analyse de données : Remaining Useful Life

- **Modélisation physique**

- > Filtre de Kalman
- > Filtre à particules (ou filtrage particulaire)
- ➔ En général, les méthodes de filtrage par conditionnement bayésien

- **Modélisation par analyse de données / time series analysis**

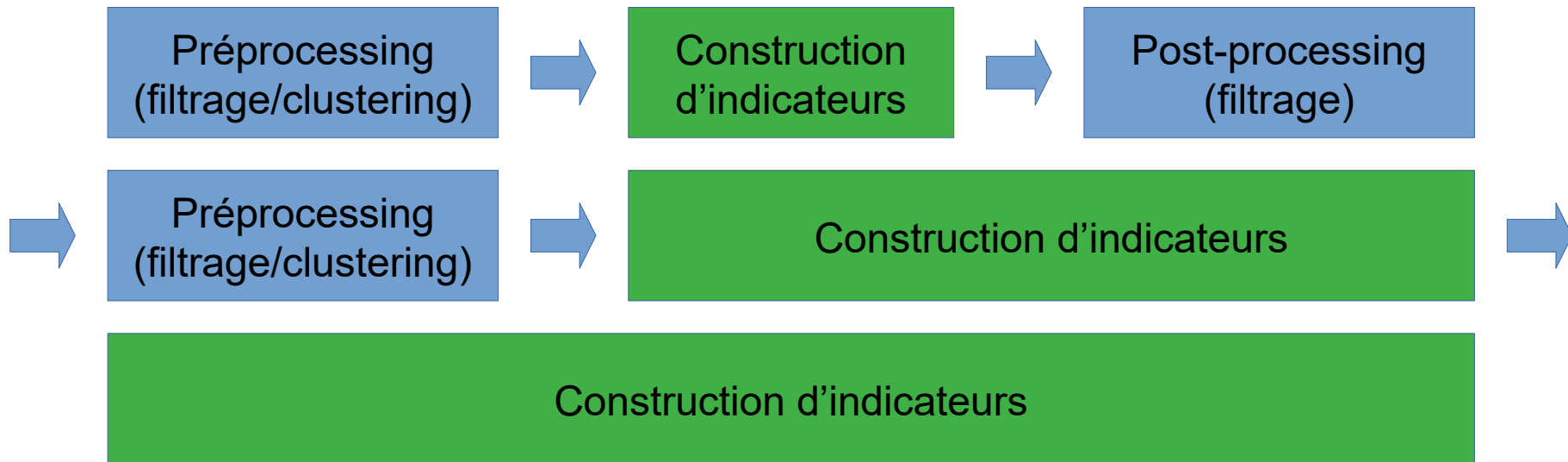
- > AR models
- > Random Coefficient models
- > Processus
 - Wiener process models
 - Gamma process models
 - Inverse Gaussian process
- > Modèles de Markov

- **Modélisation par analyse de données / régression standard**

- > Régressions SVM
- > Neural Nets (MLPs or RNNs)
- > Gaussian Process Regression
- > ...

Analyse de données : Remaining Useful Life

- La question du traitement du temps est par rapport à un « tout intégré » vs un « pas à pas »



Analyse de données : Remaining Useful Life

■ Modélisation physique

- > Filtre de Kalman
- > Filtre à particules (ou filtrage particulaire)
- En général, les méthodes de filtrage par conditionnement bayésien

Des outils pour intégrer filtrage & indicateurs simultanément (modèles du système + de dégradation)

■ Modélisation par analyse de données / time series analysis

- > AR models
- > Random Coefficient models
- > Processus
 - Wiener process models
 - Gamma process models
 - Inverse Gaussian process
- > Modèles de Markov

■ Modélisation par analyse de données / régression standard

- > Régressions SVM
- > Neural Nets (MLPs or RNNs)
- > Gaussian Process Regression
- > ...

Analyse de données : Remaining Useful Life

■ Modélisation physique

- > Filtre de Kalman
- > Filtre à particules (ou filtrage particulaire)
- En général, les méthodes de filtrage par conditionnement bayésien

■ Modélisation par analyse de données / time series analysis

- > AR models
- > Random Coefficient models
- > Processus
 - Wiener process models
 - Gamma process models
 - Inverse Gaussian process
- > Modèles de Markov

Des outils pour filtrer a posteriori sur
des modèles particuliers de
dégradation

■ Modélisation par analyse de données / régression standard

- > Régressions SVM
- > Neural Nets (MLPs or RNNs)
- > Gaussian Process Regression
- > ...

Analyse de données : Remaining Useful Life

■ Modélisation physique

- > Filtre de Kalman
- > Filtre à particules (ou filtrage particulière)
- ➔ En général, les méthodes de filtrage par conditionnement bayésien

■ Modélisation par analyse de données / time series analysis

- > AR models
- > Random Coefficient models
- > Processus
 - Wiener process models
 - Gamma process models
 - Inverse Gaussian process
- > Modèles de Markov

■ Modélisation par analyse de données / régression standard

- > Régressions SVM
- > Neural Nets (MLPs or RNNs)
- > Gaussian Process Regression
- > ...

Des outils pour filtrer a posteriori ou a priori

Analyse de données : Remaining Useful Life

- **Intégration du temps pas à pas**

- > Plus simple
- > Moins optimale
- > Meilleure si on part de rien !

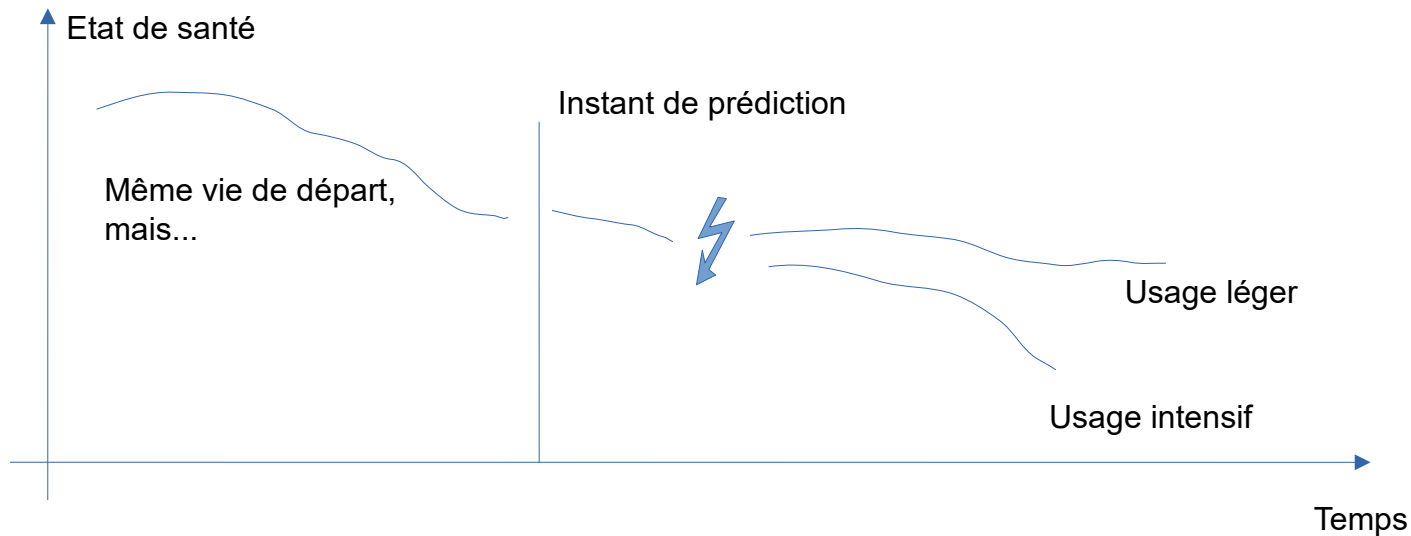
- **Intégration du temps simultané**

- > Théoriquement optimale
- > En pratique dépend de la justesse des modèles et surtout de la robustesse à l'écart aux modèles choisis

Analyse de données : Remaining Useful Life

■ Les variables d'environnement et d'usage

- > Rappelons nous le cours précédent : un même équipement ne peut vivre de manière déterministe
- > Connaître son passé n'assure pas le futur
- > Les modélisations prennent en compte un aspect supplémentaire lors de la prédiction : l'environnement & l'usage
- > Une modélisation spécifique devient nécessaire, et tous les modèles ne peuvent pas le prendre en compte





MAINTENANCE & DONNÉES LONGITUDINALES: QUELQUES MOTS SUR LES MÉTRIQUES

Analyse de données : Remaining Useful Life, métriques

▪ Métriques

➤ Métriques dépendant d'une vérité terrain (complètes ou partielles) :

- RMSE
- Prediction horizon
- a-k accuracy
- Relative accuracy
- Cumulative relative accuracy → remember Brier Score ?
- Convergence → basée sur une autre métrique
- Mean prediction error
- Overall average bias
- Overall average variability
- Reproducibility
- Predictability

Analyse de données : Remaining Useful Life, métriques

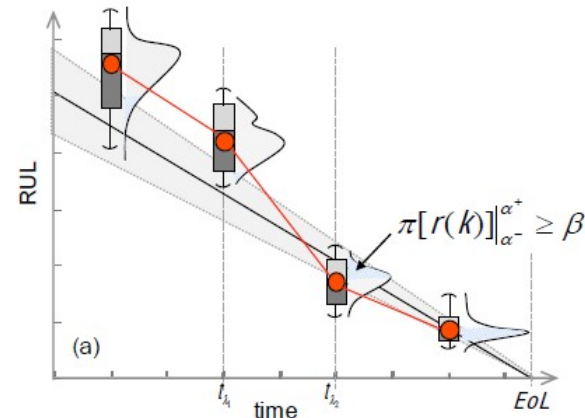
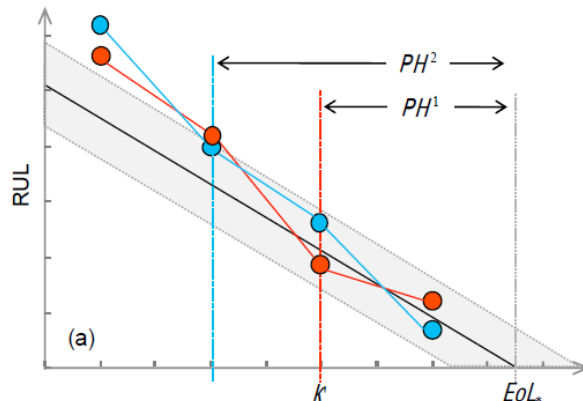
■ Métriques

➤ Basées sur une vérité terrain

- RMSE sur le tRUL
- RMSE sur la trajectoire
- Prognostic horizon
- a-k accuracy
- Relative accuracy
- Cumulative relative accuracy
- Convergence
- ...

➤ Basées sur un flux de données

- Online RMSE
- Online coverage (la RUL espérée appartient-elle à l'intervalle de confiance de la RUL prédite ?)
- Online width (largeur de l'intervalle de confiance)



Analyse de données : Remaining Useful Life, métriques

■ Métriques

- En l'absence de vérité terrain, on n'a que des indicateurs, que faire ?
- Si un seul indicateur
 - Monotonie (temporelle ou cyclique)
 - Robustesse
 - Attention aux données manquantes...
- Si plusieurs indicateurs et ou plusieurs systèmes ?
 - Consistance inter systèmes / intra systèmes

Pour en savoir plus :

LEI, Yaguo, LI, Naipeng, GUO, Liang, *et al.* Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical systems and signal processing*, 2018, vol. 104, p. 799-834.



CONCLUSIONS

Conclusions

▪ Analyse de données pour la maintenance

- Données statiques & lien avec la modélisation statistique
- Données longitudinales :
 - Collecte
 - Construction d'indicateurs
 - Suivi et la prédiction temporels
 - Métriques

▪ La semaine prochaine

- Nettoyage des données
- Traitement des données manquantes
- Sélection automatique de variables



AUTRES CAPTEURS

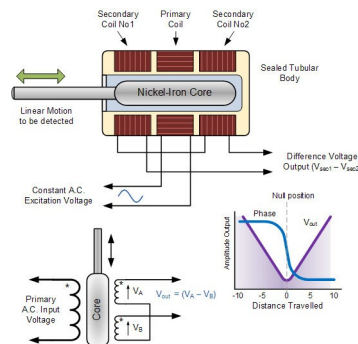
Vitesse / position

▪ Quels défauts peut-on détecter ?

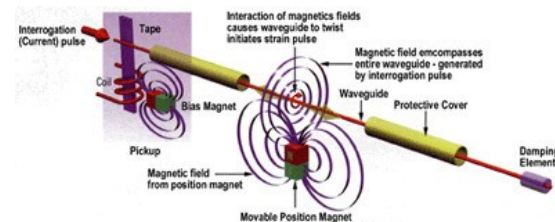
- > Jeux
- > Balourds

▪ Principales technologies

- > Potentiomètres
- > Optique
- > Magnétique
- > Magnétostrictif
- > Capacitif
- > Capteurs inductifs



Inductif



Magnetostrictif

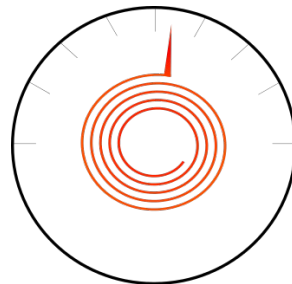
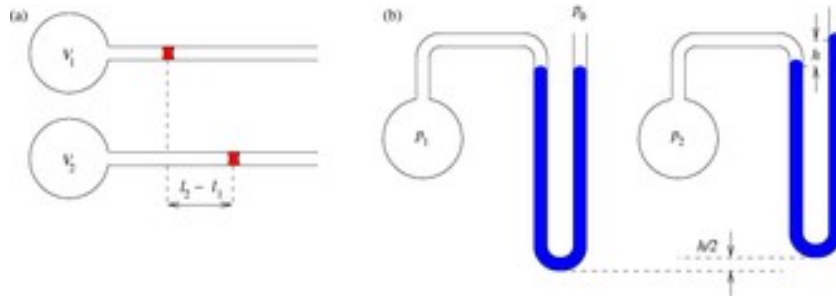
Thermomètres

▪ Quels défauts peut-on détecter ?

- > Frottements
- > Changements de charge
- > Démarrages/arrêts excessifs
- > Alimentation électrique insuffisante
- > ...

▪ Principales technologies

- > Expansion thermique (mercure)
- > Pression
- > Densité
- > Thermochromisme / Fulorescence
- > Radiations
- > Absorption
- > Résistance électrique
- > Magnétique



Microphones

▪ Que peut-on détecter ?

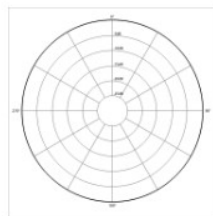
- > Vibrations anormales
- > Chocs

▪ Quels défauts détecter ?

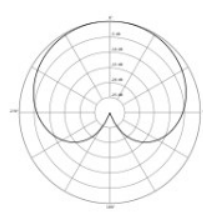
- > État des roulements
- > Engrènement des engrenages
- > Cavitation de la pompe
- > Désalignement
- > Déséquilibre
- > État de charge

▪ Principe général

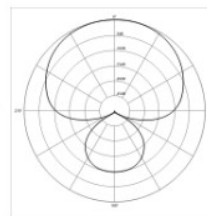
- > Une membrane vibre sous l'effet de la pression acoustique
- > La vibration est transformée en courant électrique



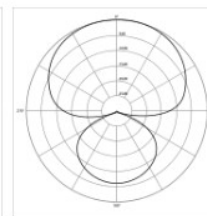
omnidirectionnelle



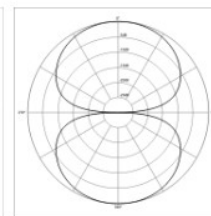
cardioïde



supercardioïde



hypercardioïde



bidirectionnelle

Microphones

▪ Les principales technologies

> La membrane

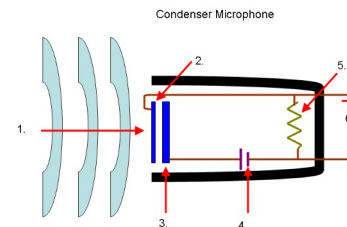
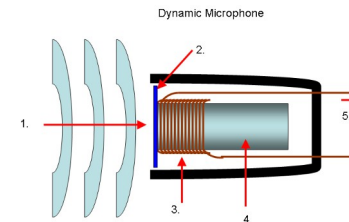
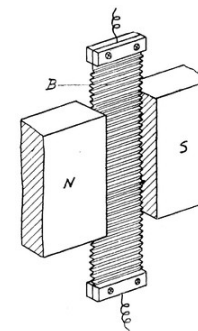
- Entre l'air et un milieu fermé → omnidirectionnel
- La membrane subit l'onde des 2 côtés → bidirectionnel
- On peut allier les deux pour avoir des zones de couverture différentes

> La conversion vibration → électricité

- microphone dynamique : une bobine collée à la membrane
- Microphone à ruban : un ruban (la membrane) est placé entre deux aimants
- Microphone électrostatique

▪ Quelles spécificités pour le traitement de données ?

- > Comme l'accéléromètre, traitement de signal
- > C'est aussi une mesure de **pression**



Source: wikipedia