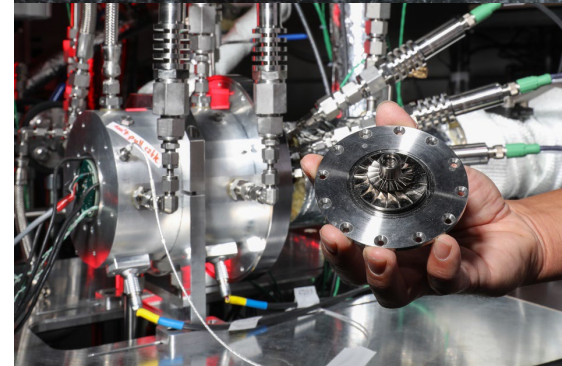


# **Dynamique des Systèmes Mécaniques**

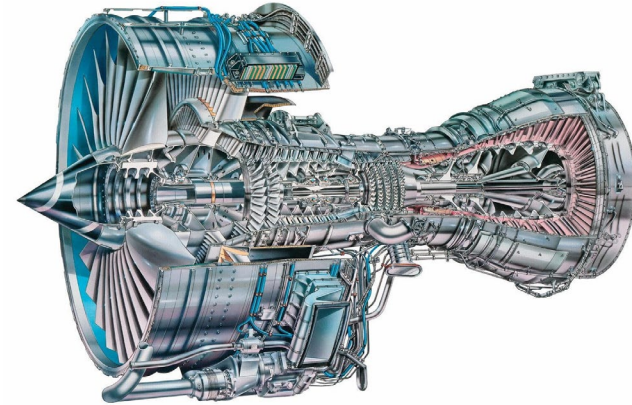
**Introduction**

**Prof. J. Schiffmann**

- Laboratory for Applied Mechanical Design (LAMD)
- Turbomachines de petite échelle
  - Pompes à chaleur
  - Cycles thermodynamiques
  - Intégration aux piles à combustible
- Pallier a gas et dynamique des rotors
- Méthodologies de conception automatisées

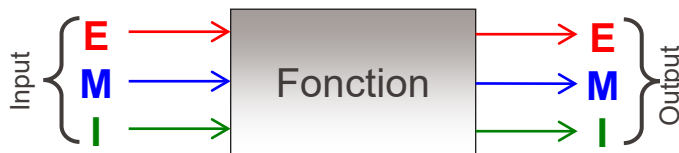


- Satisfaction d'un besoin
- Transformation d'énergie et de mouvement
- Transformation d'information
- Transformation de matière
- Pluridisciplinarité



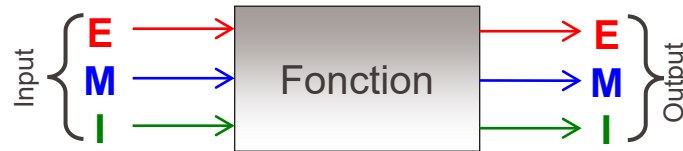
Rolls Royce Trent 500

- Le système mécanique est un ensemble d'éléments intégrés de manière à
    - **Recevoir** de l'énergie (E), matière (M), information (I)
    - **Transformer** l'énergie (E), matière (M), information (I)
    - **Restituer** l'énergie (E), matière (M), information (I)
- pour accomplir une fonction spécifique

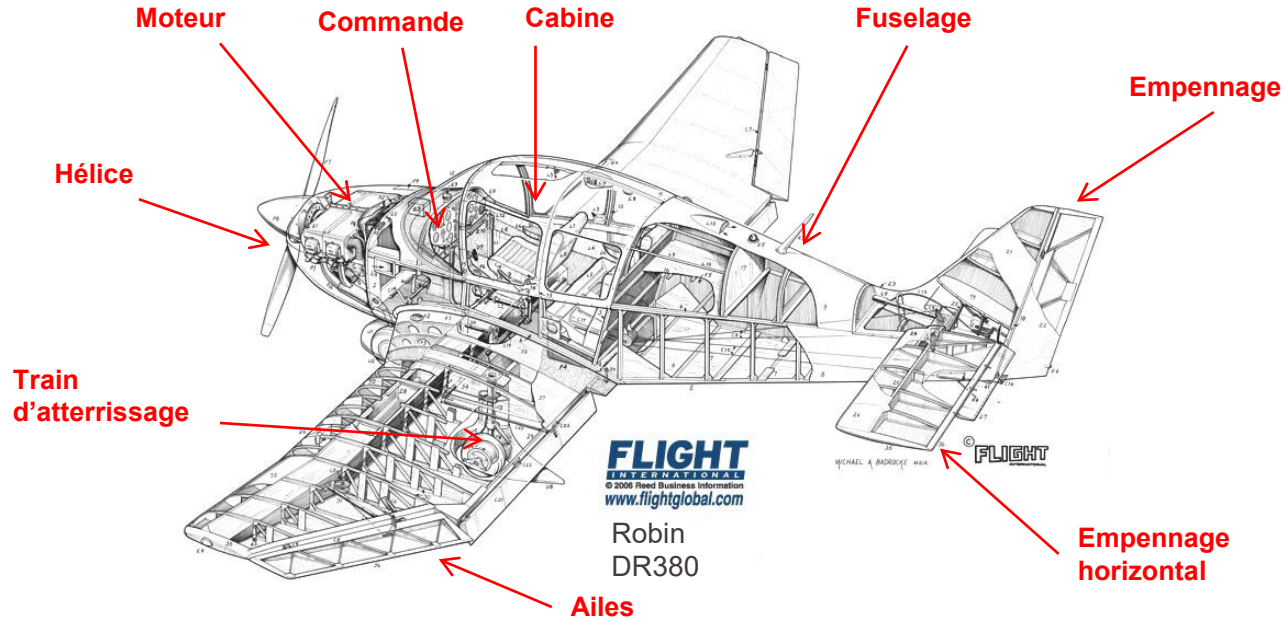


# Système / sous-système / élément

- Un système mécanique complexe peut être décomposé en plusieurs couches de sous-systèmes et éléments
- A chaque (sous)-système on peut associer une fonction bien spécifique
- Organisation systématique et hiérarchique
- → Décomposition fonctionnelle

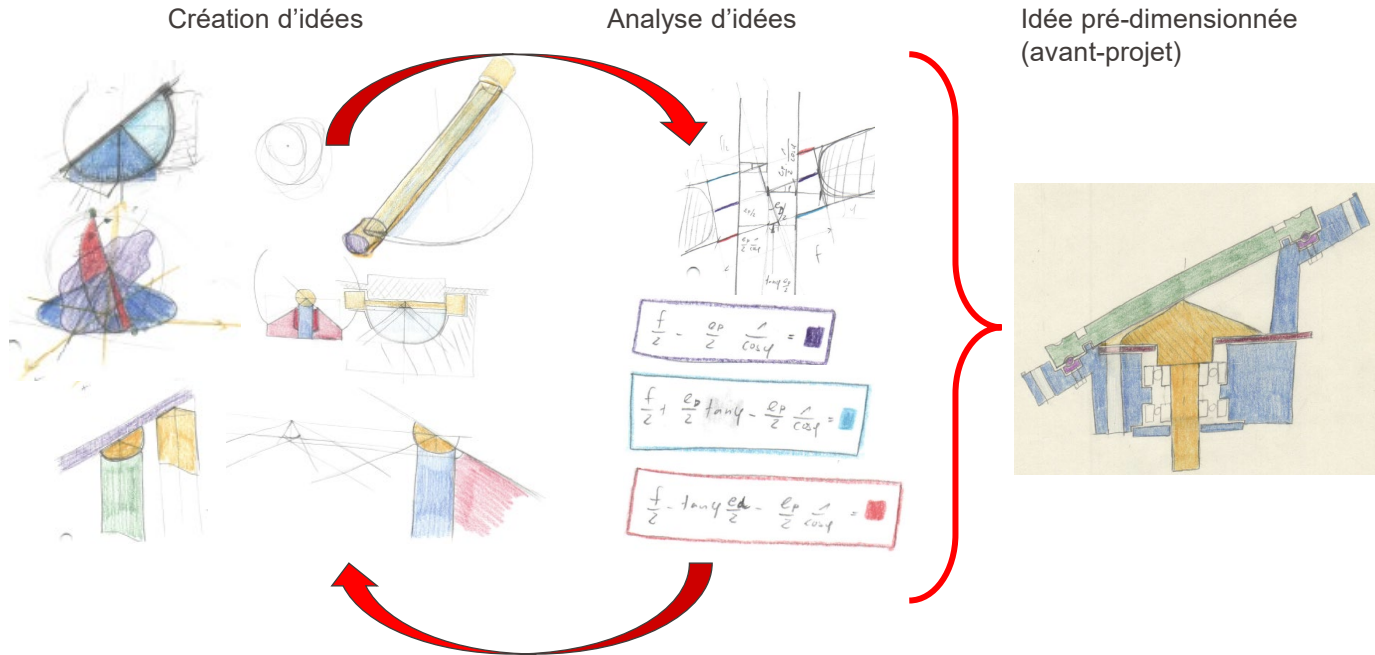


# Système / sous-système / élément



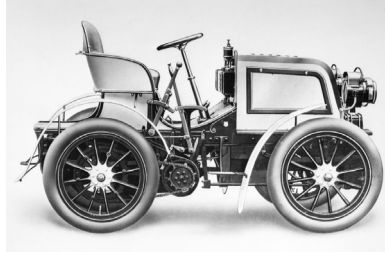
Système mécanique =  $\Sigma$  sous-systèmes

- Processus créatif contrôlé. Surtout itératif!





# Le résultat évolue avec le temps





# Multitudes de solutions possibles

- Différents concepts d'entraînement



Moteur à combustion



Hybride moteur à combustion & électrique

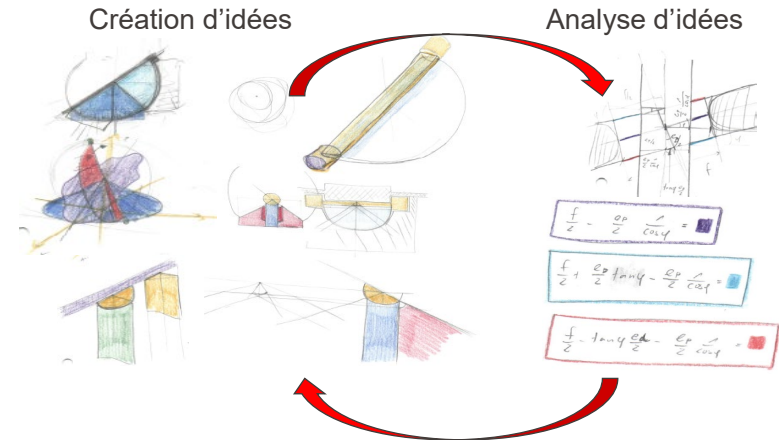


Pile à combustible



Electrique

- Analyse d'idées
  - Architecture
  - Statique & cinématique
  - Thermodynamique & dynamique des fluides
  - Structures & choix de matériaux
  - Choix d'éléments de machines
  - Management thermique
  - **Dynamique**



# **Dynamique des Systèmes Mécaniques**

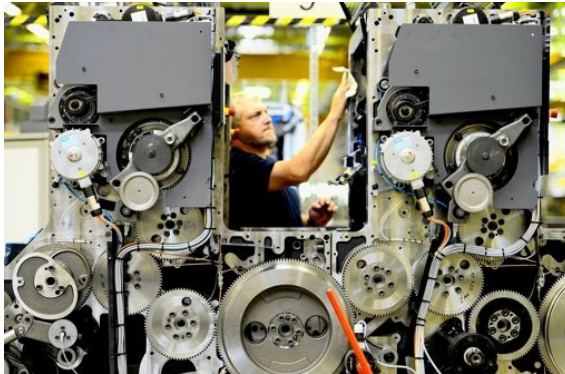
**Dynamique dans  
des systèmes réels**

**Prof. J. Schiffmann**

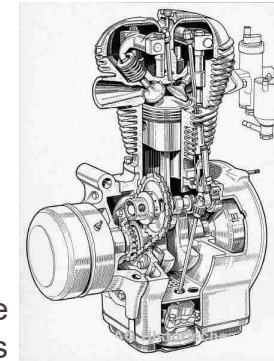
- La dynamique est une partie importante dans la conception de systèmes mécaniques
- Qu'est-ce que c'est la dynamique?
- Où est-ce qu'il y a de la dynamique dans les systèmes mécaniques?

# Mouvement de groupe

- Comment accélérer ou freiner un groupe?
- Comment stabiliser le mouvement en régime stationnaire?



Machine à imprimer



Moteur monocylindre  
4 temps

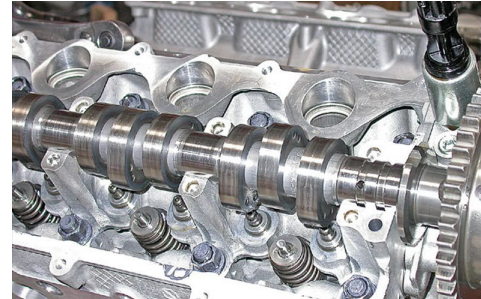
- Quel sont les efforts d'entraînement liés au mouvement de systèmes?



Machines de chantier



Robot industriel

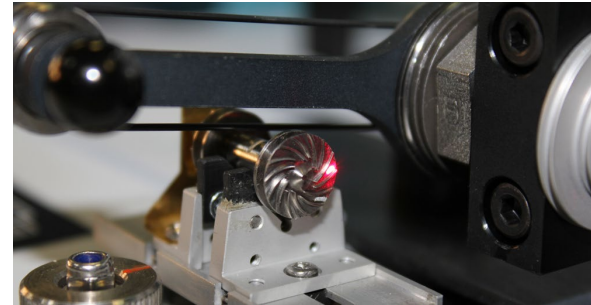


Commande par came

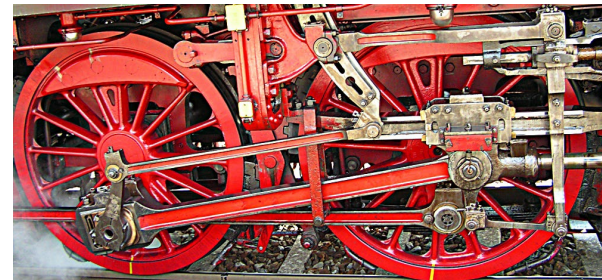
- Comment diminuer / compenser les efforts liés au mouvement?



Equilibrage d'efforts tournants et oscillants



Equilibrage de rotor



Equilibrage d'efforts tournants



# Amortissement de vibrations

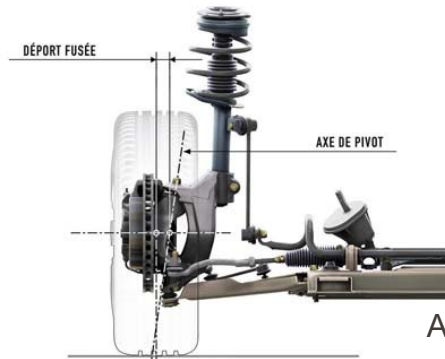
- Limitations de vibrations



Amortisseur de Frahm sur vilebrequin

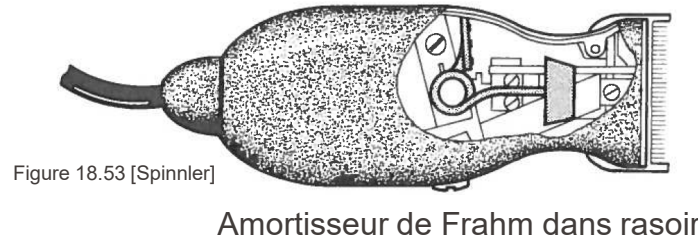
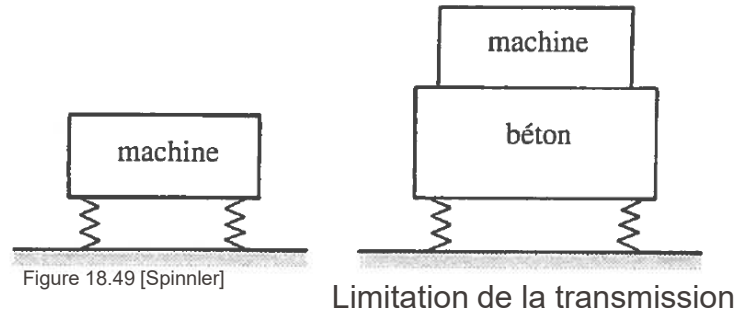


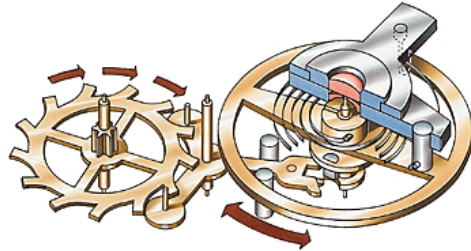
Amortisseurs de pales de rotor d'hélicoptère



Amortisseur de suspension

- Limitation de la transmission d'efforts





Régulation: oscillateur et échappement de montre



Nettoyage: bain ultrason



Génération d'efforts: compacteur de chantier



Son: haut parleur

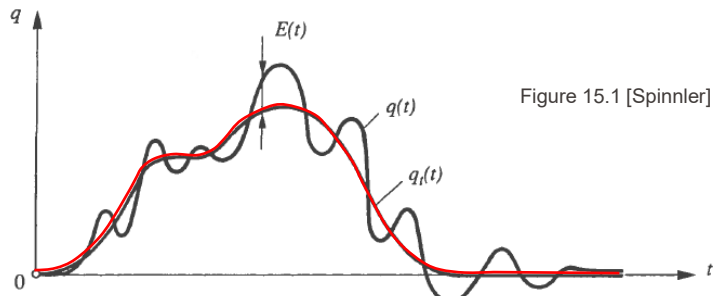
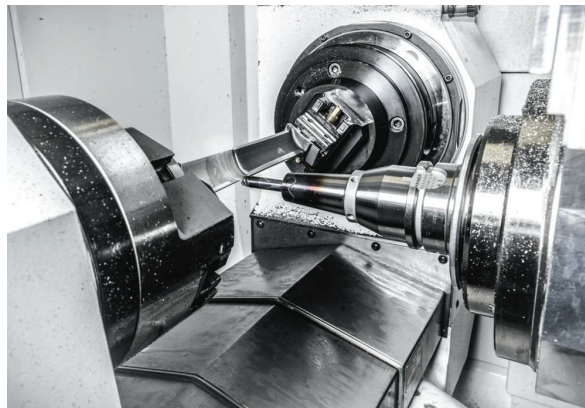


Figure 15.1 [Spinnler]

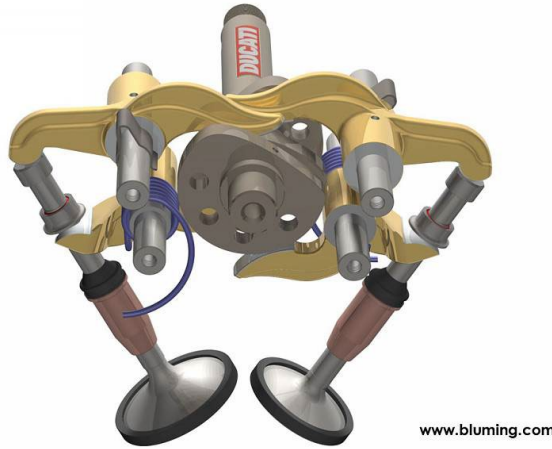
Comparaison entre mouvement théorique et mesuré



- Erreurs cinématiques
  - Tolérances d'usinage, jeux, dilatation thermique,...
- Erreurs dynamiques
  - Lorsque le spectre du mouvement excite les fréquences propres du système

## ■ Affolement

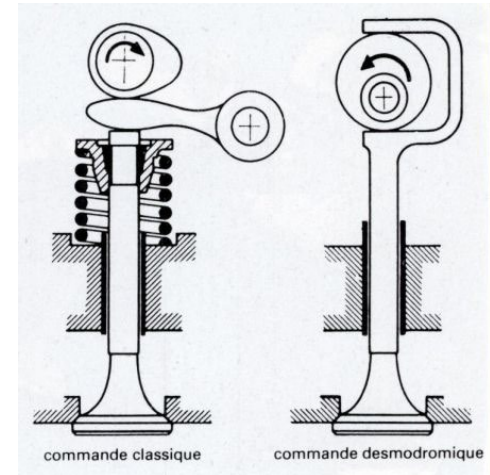
- Mouvement de cames → décollage du galet suiveur si la came tourne au delà d'une vitesse limite



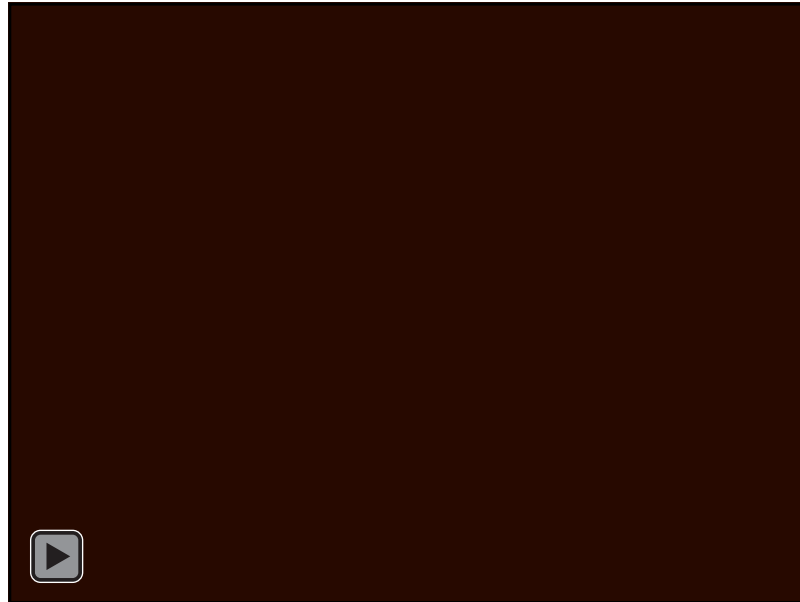
www.bluming.com

Commande de came desmodromique

La fonction de rappel se fait  
par une commande active



- Twin Commanche: tail flutter



<http://www.youtube.com/watch?v=qfkkiDsEXUA>

- Instabilités aeroélastiques (flutter)
  - Force positive générée par le mouvement

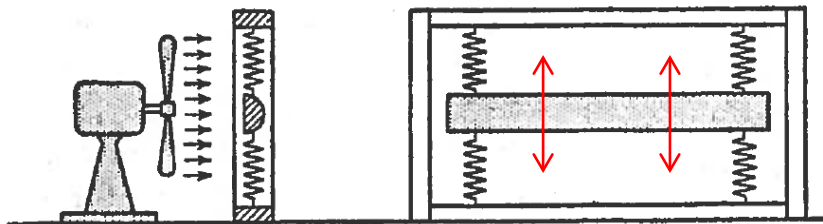


Figure 7.17 [Den Hartog]

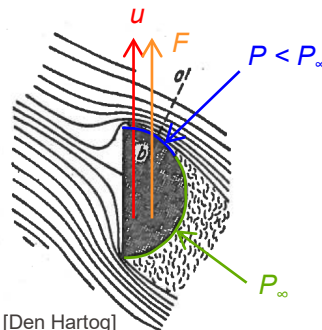
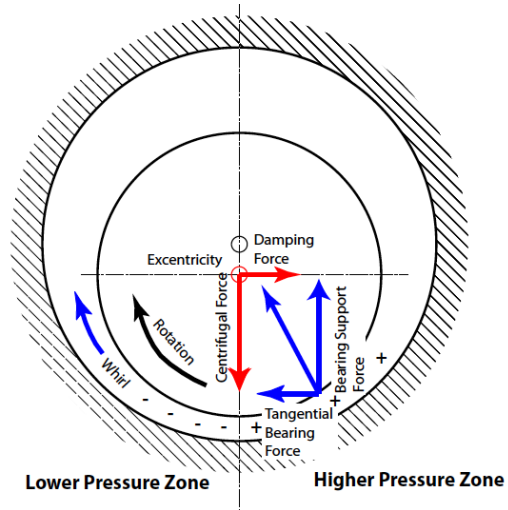


Figure 7.16 [Den Hartog]



- Rotors sur paliers à gaz
  - Caractéristique couplée des paliers



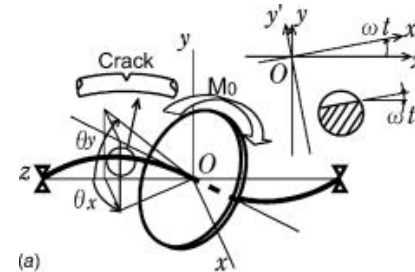
- Naissance potentielle de vibrations lorsque les inerties, amortissements ou rigidités varient périodiquement avec le mouvement



Balanoire



Rotor de générateur

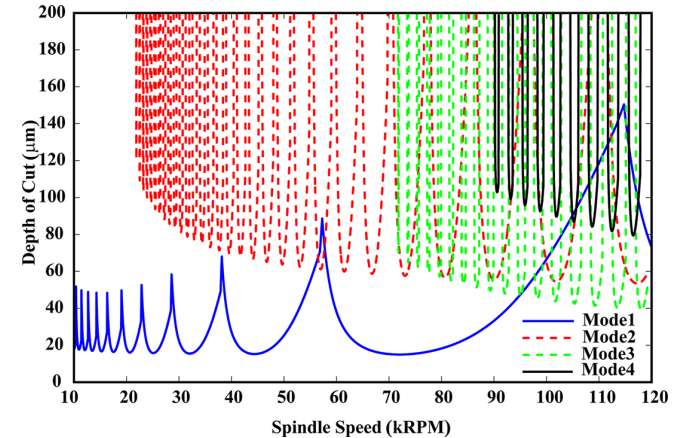
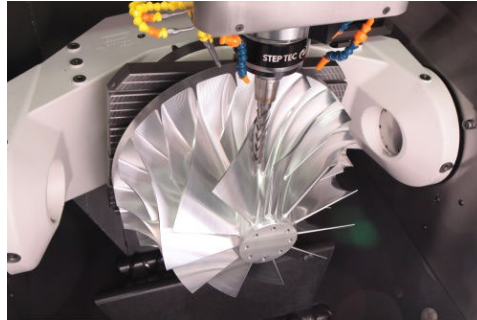


(a)

Arbre avec défaut

Y. Ishida, T. Inoue *J. Vib. Acoust.* 2006,  
128(6), pp. 741-749

- “Chatter” dans le fraisage
  - Vibrations instables entre l’outil et la pièce à usiner

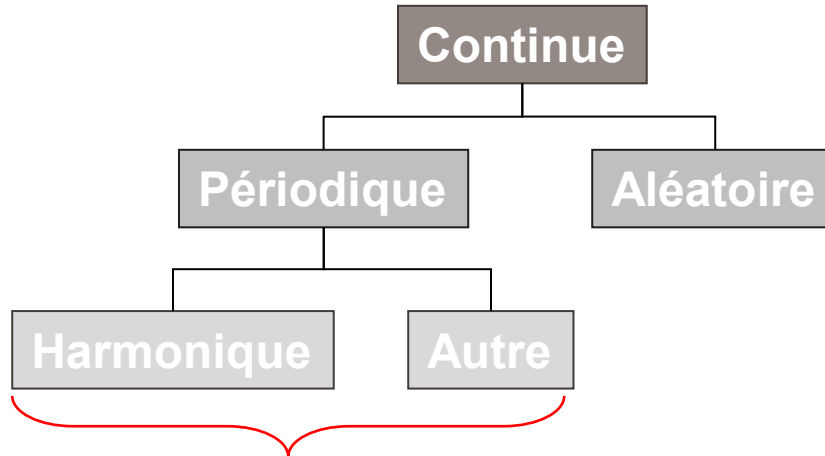


X. Jin, Y. Altintas *J. Manuf. Sci. Eng.*,  
2013, 135(3), 031011

- Aspect temporel
  - Variations temporelles du mouvement et de l'effort
- Effets cinématiques
  - Mouvement de groupe
  - Efforts d'inertie et leur équilibrage
- Effets vibratoires
  - Amplifications dynamiques
  - Instabilités
  - Excitations extérieures

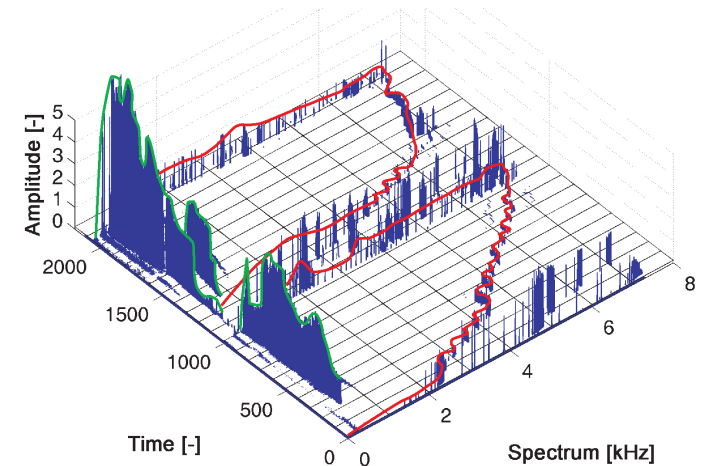
- Régimes transitoires & chocs
- Fonctionnement propre de la machine
  - Outil de coupe, rotor tournant,...
- Entraînement
  - Moteur et transmission
- Interactions avec environnement
  - Fluide, matériaux, vibrations...
- Imperfections de fabrication
  - Géométrie, jeux

- Caractérisation de l'excitation



Source caractérisée par le spectre  
fréquence-amplitude.  
Spectre souvent obtenu par FFT

## Discontinue



# **Dynamique des Systèmes Mécaniques**

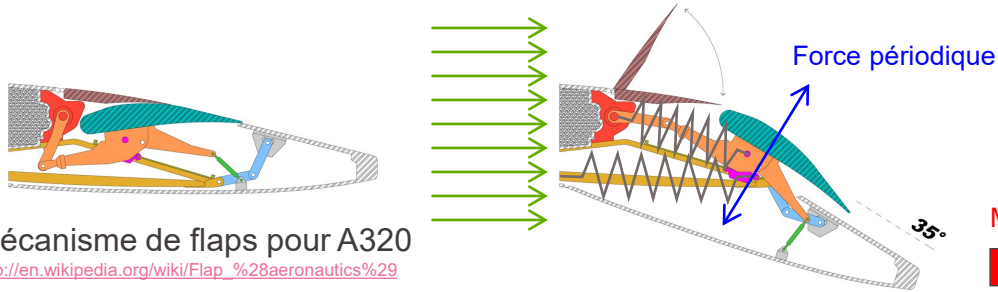
**Cinématique ou  
dynamique?**

**Prof. J. Schiffmann**



# Cinématique ou dynamique?

- Cinématique: mouvement de corps rigides



Mécanisme de flaps pour A320

[http://en.wikipedia.org/wiki/Flap\\_%28aeronautics%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Flap_%28aeronautics%29)

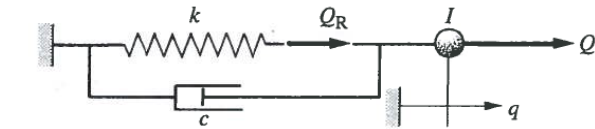
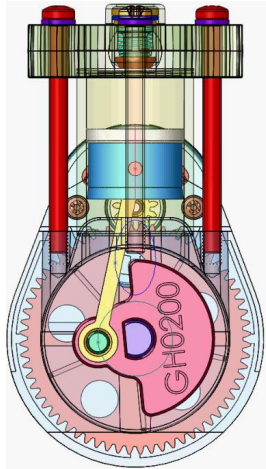


Figure 13.23 [Spinnler]

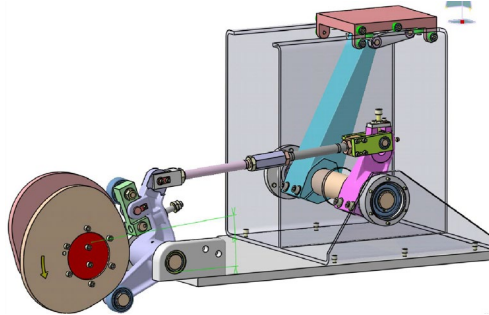
- Dynamique: tient compte de la déformation des éléments

- La cinématique étudie le mouvement, la vitesse et l'accélération de points et de corps rigides dans l'espace
- Le mouvement est généralement limité par des contraintes géométriques
  - Degrés de liberté
  - Lois d'espace
- L'analyse cinématique d'un système mécanique est la première étape dans l'établissement des équations de mouvement

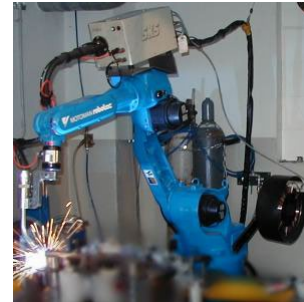
- Ensemble de corps rigides liés entre eux



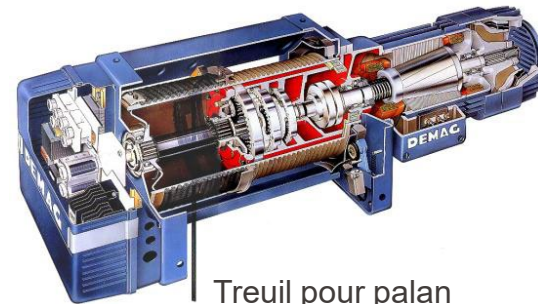
Bielle-manivelle-piston



Mécisme pour introduction de feuilles de carton

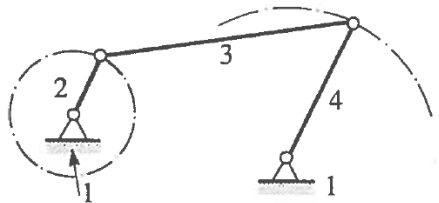


Robot industriel

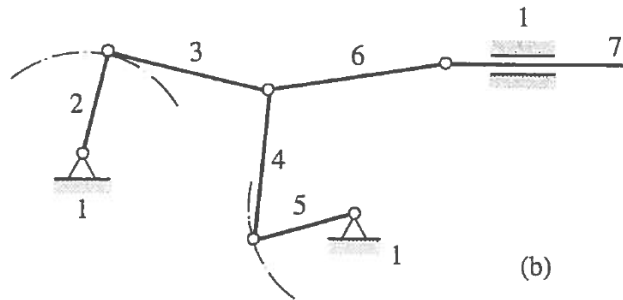


Treuil pour palan

- Degré de mobilité d'une chaîne cinématique
  - Détermine le nombre de paramètres indépendants nécessaires pour fixer tout élément dans l'espace



Quadrilatère articulé:  
système plan à 1  
degré de mobilité



Système plan à 2 degrés de  
mobilité

■ Déterminer le degré de mobilité





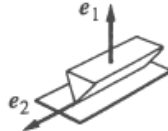
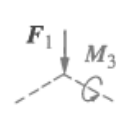


- Un mécanisme avec  $N_p$  éléments possède  $6(N_p - 1)$  degrés de liberté par rapport à un élément de base
- Les éléments sont liés par  $N_L$  liaisons. Le degré de liaison du couple  $i$  vaut  $n_{si} = 6 - n_{ci}$  ← Degré de liberté de la liaison
- Les liaisons enlèvent donc les degrés de liberté:

$$\sum_{i=1}^{N_L} n_{si} = \sum_{i=1}^{N_L} 6 - n_{ci} = 6N_L - \sum_{i=1}^{N_L} n_{ci}$$

- Le degré de mobilité d'un mécanisme devient

$$m_c = 6(N_p - 1) - \sum_{i=1}^{N_L} n_{si} = 6(N_p - N_L - 1) + \sum_{i=1}^{N_L} n_{ci}$$

- Le degré de liaison et de liberté d'une liaison

Fonctions	Schéma	Liaisons	Degré de liaison	Degré de liberté
1 Ponctuelle			1	5
2 Linéaire annulaire			2	4
3 Linéaire rectiligne			2	4
4 Rotule			3	3

Extrait de la Figure 9.9 [Spinnler]

- Le degré de mobilité pour un système plan
  - Pour un système plan le degré de mobilité devient

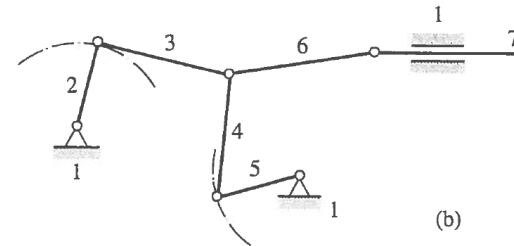
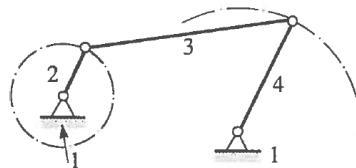
$$m_c = 3(N_P - 1) - 2N_{L1} - N_{L2}$$

Nombre de liaisons avec un  
degré de liaison = 1

Nombre de liaisons avec un  
degré de liaison = 2

Nombre d'éléments

- Exemples



(b)



- La position d'un mécanisme est décrite par les coordonnées de chacune de ses pièces
- Les équations de liaison limitent les coordonnées indépendantes
- La différence entre le nombre de coordonnées et les eq. de liaison détermine le nombre de coordonnées indépendantes → nombre de degré de mobilité

- Identification des effets dynamiques
- Cinématique d'un mécanisme pour impression

# **Dynamique des Systèmes Mécaniques**

**Aspects  
organisationnels**

**Prof. J. Schiffmann**

- Cinématique
  - Lois de mouvement et efforts d'inertie
  - Equilibrage d'efforts
  - Mouvement de groupe
  - Génération de modèles réduits
  
- Dynamique
  - Précision de mouvement
  - Génération de modèles réduits
  - Phénomènes vibratoires
  - Dynamique de rotor

- Etendre votre culture technologique
- Sensibilisation aux phénomènes physiques utilisés en conception
- Compréhension des effets dynamiques
- Introduction au dimensionnement dynamique
- Capacité de mettre en place un modèle réduit

- Organisation
  - Cours en présentiel (13h15-14h00)
  - Exercices et projet (14h15-16h00)
  - Cours, exercices et corrigés sur [Moodle](#)
  - Projet en groupe
  - Enseignants & assistants
    - A. Artomov, G. Iovanna, E. Pallaoro, A. Català
- Notation
  - Projet de dimensionnement (30%)
  - Examen écrit (70%)

## ■ Scénario

Semaine	Date		Cours	Slides	Exercices	Projet
1	20/02/2025	Introduction				
2	27/02/2025	Cinématique, discrétisation, efforts d'inertie				
3	06/03/2025	Equilibrage des efforts d'inertie				
4	13/03/2025	Mouvement de groupe				
5	20/03/2025	Résumé cinématique, modélisation dynamique				
6	27/03/2025	Discrétisation dynamique, estimation de $f$ propre				
7	03/04/2025	PROJET Annonce				
8	10/04/2025	Précision de mouvement I				
9	17/04/2025	Précision de mouvement II				
	24/04/2025	SPRING BREAK				
10	01/05/2025	PROJET Q&A				
11	08/05/2025	Commandes non-positives				
12	15/05/2025	Dynamique de rotor				
13	22/05/2025	Résumé dynamique				
14	29/05/2025	ASCENSION DAY				

- Ouvrages de références
  - *Conception des machines*, tomes 1, 2, 3 ,  
G. Spinnler, PPUR 1997
  - *Materials Selection in Mechanical Design*,  
M. F. Ashby, 4th ed, Butterworth-Heinemann 2011
  - *Mechanical Vibrations*,  
J.P. Den Hartog, Dover Press 1985
  - *Mécanique Vibratoire*,  
M. Del Pedro, P. Pahud, PPUR 1989
  - *Construction mécanique*, tomes 1-3,  
F. Esnault, Dunod ed. 2009