

Dynamique des Systèmes Mécaniques

Introduction

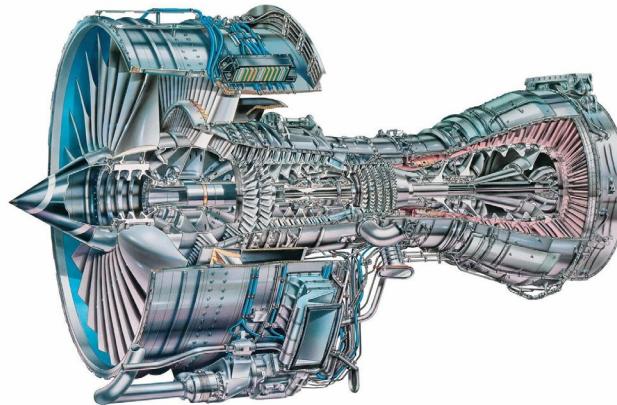
Prof. J. Schiffmann

Presentation

- 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

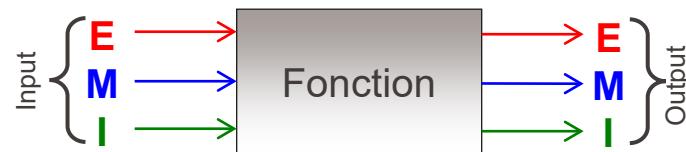


- Satisfaction d'un besoin
- Transformation d'énergie et de mouvement
- Transformation d'information
- Transformation de matière
- Pluridisciplinarité



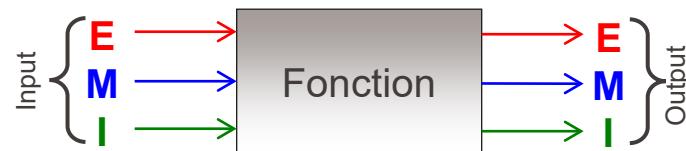
Rolls Royce Trent 500

- 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

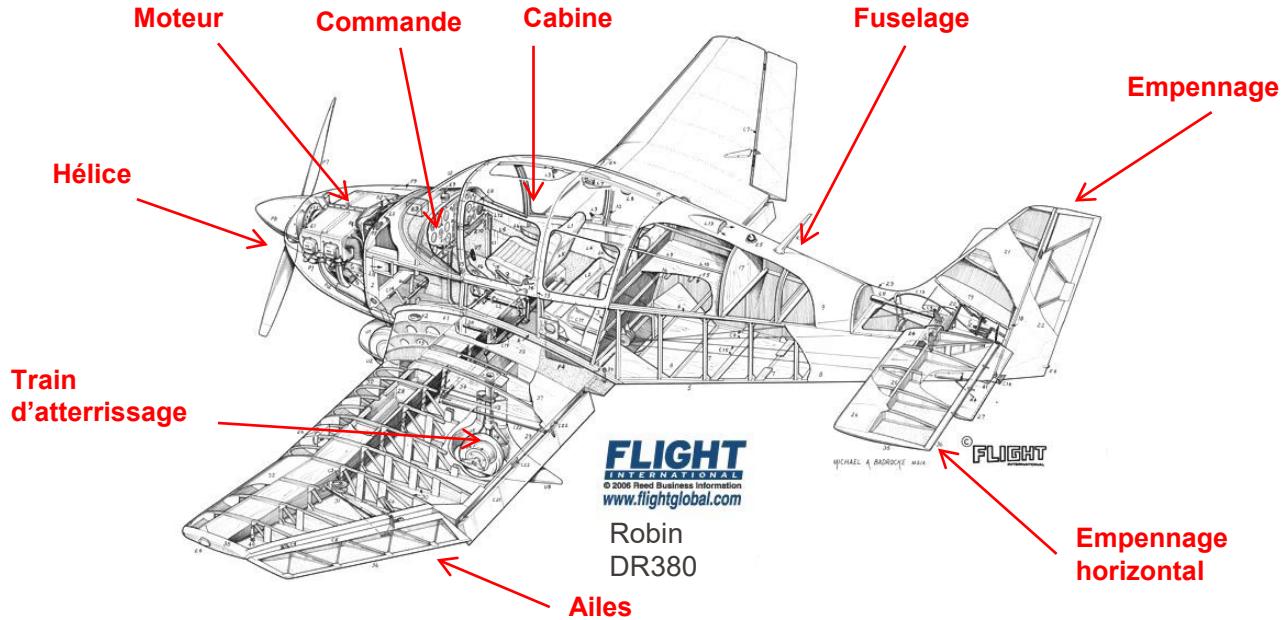


Système / sous-système / élément

- 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

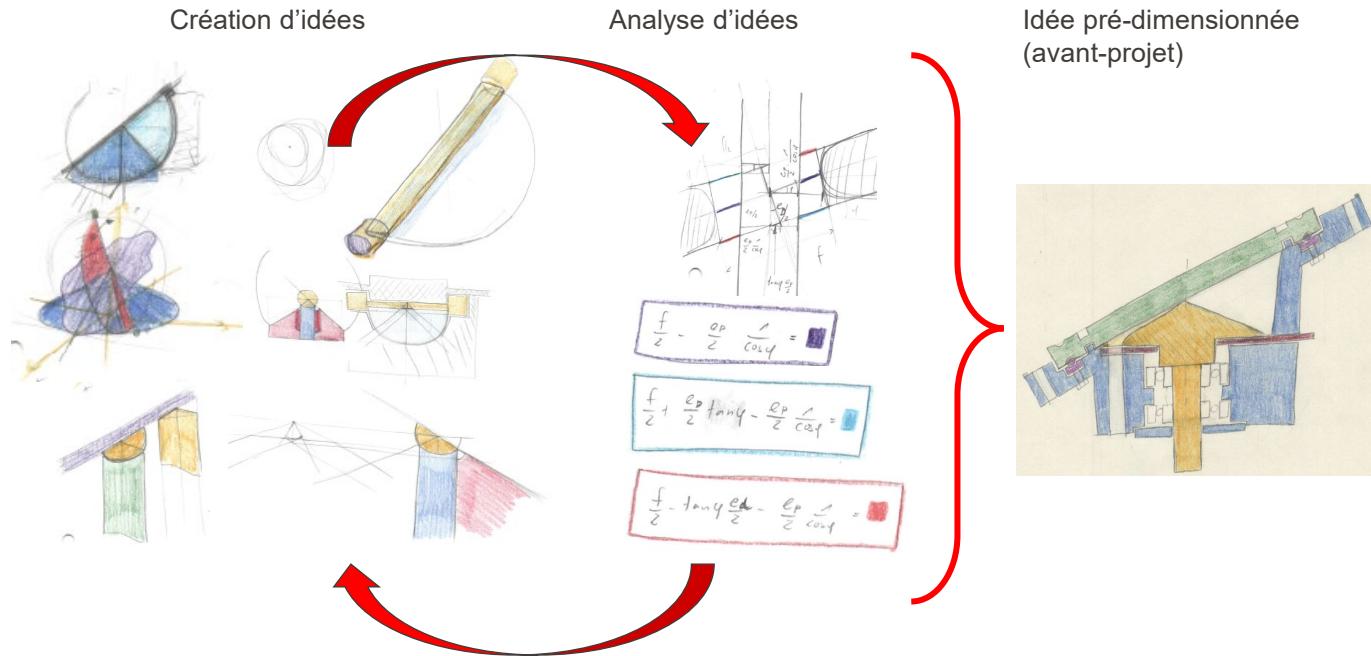


Système / sous-système / élément

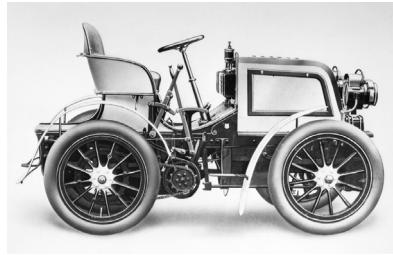


Système mécanique = Σ sous-systèmes

- 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

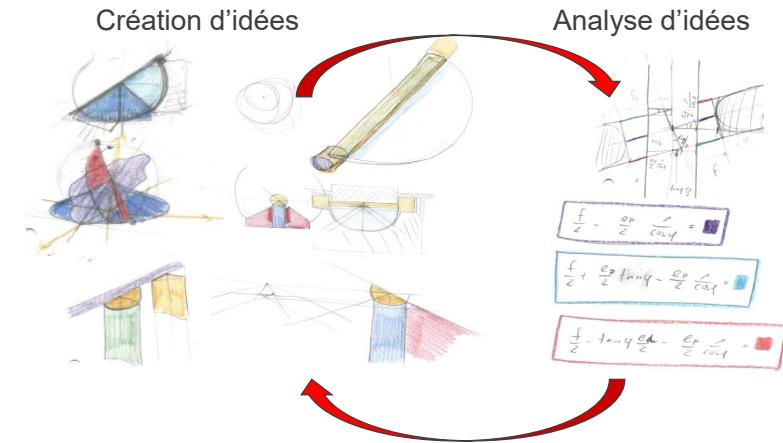


Pile à combustible



Electrique

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



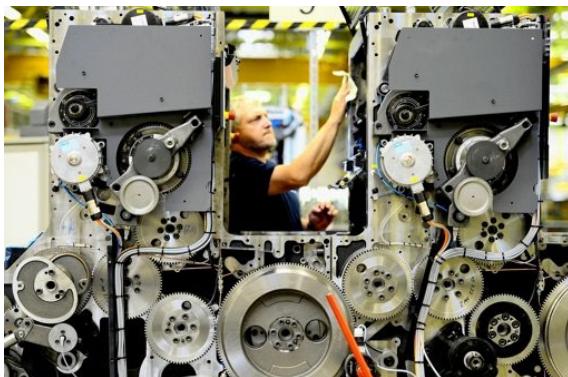
Dynamique des Systèmes Mécaniques

Dynamique dans
des systèmes réels

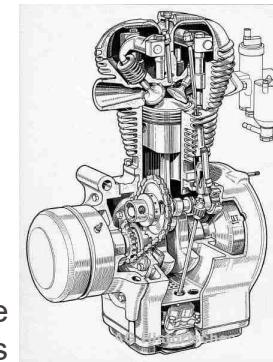
Prof. J. Schiffmann

- 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?

- 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

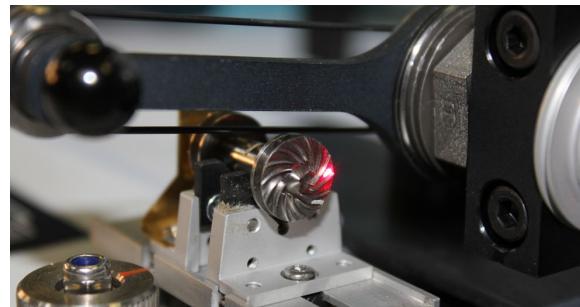


Commande par came

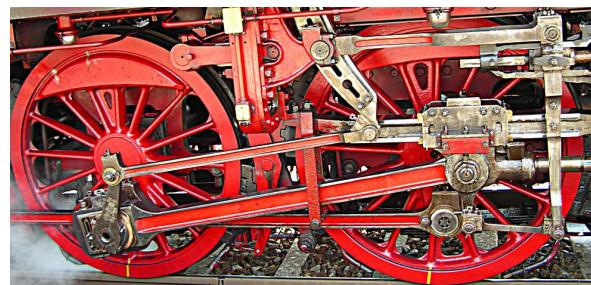
- Comment diminuer / compenser les efforts liés au mouvement?



Equilibrage d'efforts tournants et oscillants



Equilibrage de rotor



Equilibrage d'efforts tournants

Amortissement de vibrations

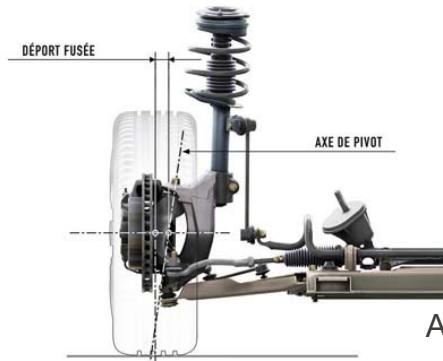
- Limitations de vibrations



Amortisseur de Frahm sur vilebrequin

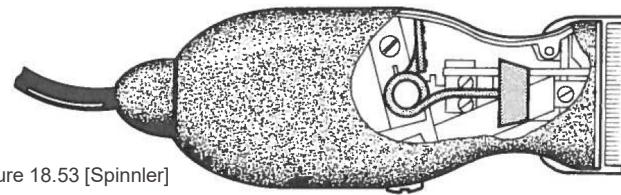
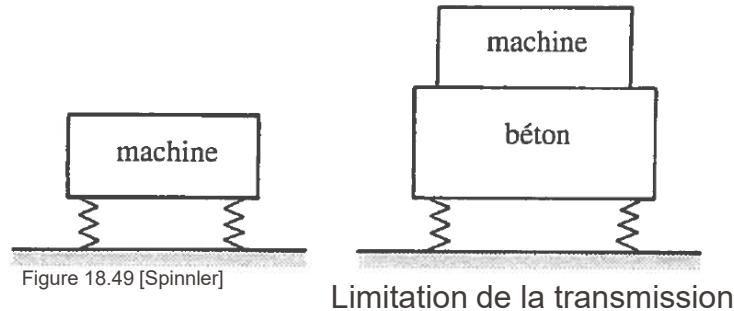


Amortisseurs de pales de rotor d'hélicoptère



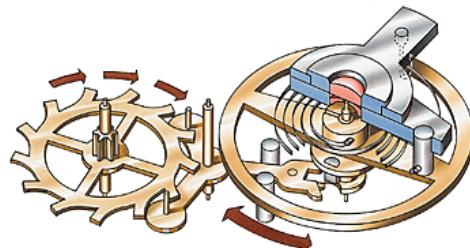
Amortisseur de suspension

- Limitation de la transmission d'efforts



Amortisseur de Frahm dans rasoir

Vibrations volontaires



Régulation: oscillateur et échappement de montre



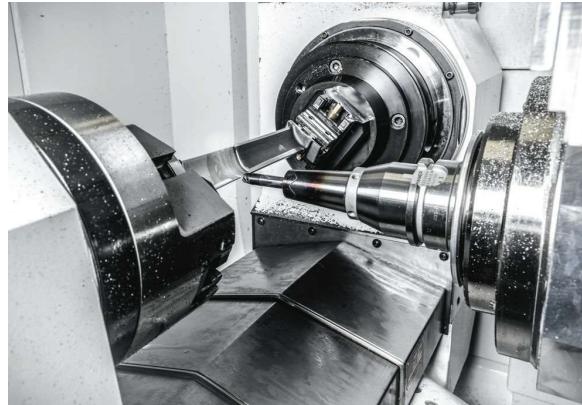
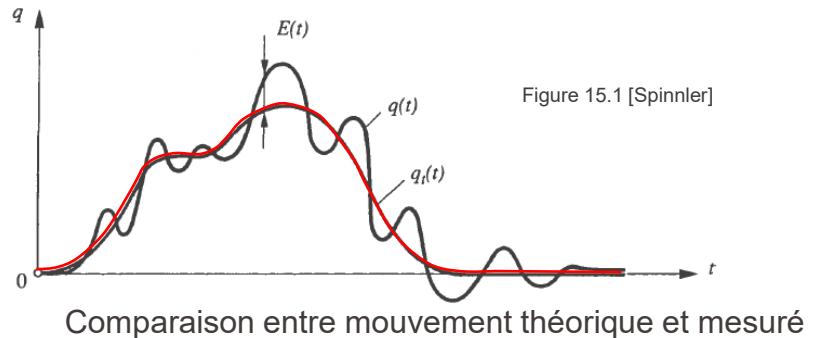
Génération d'efforts: compacteur de chantier



Nettoyage: bain ultrason



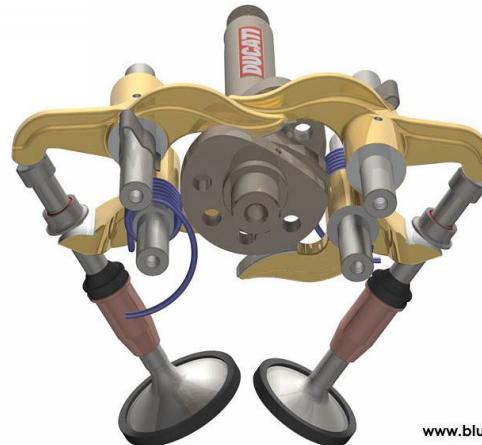
Son: haut parleur



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

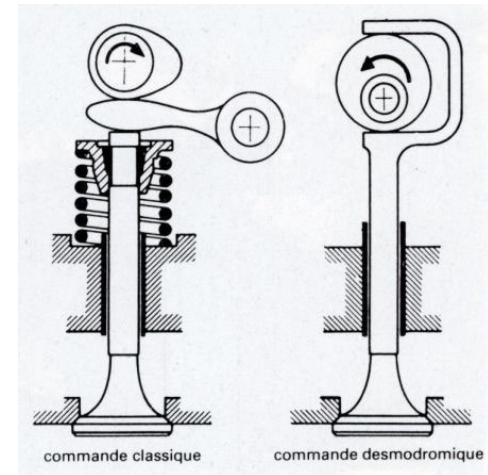
- Affolement

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



Commande de came desmodromique

La fonction de rappel se fait par une commande active

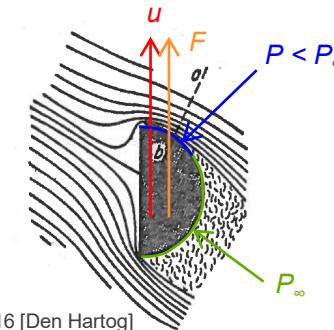
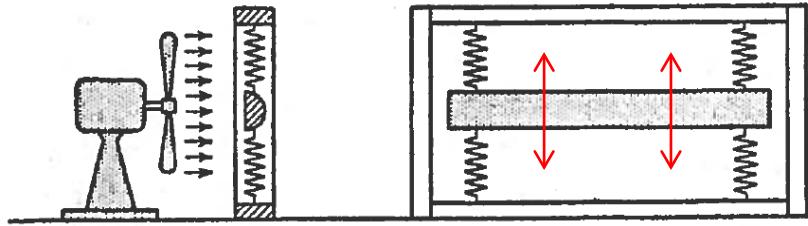


- Twin Commande: tail flutter

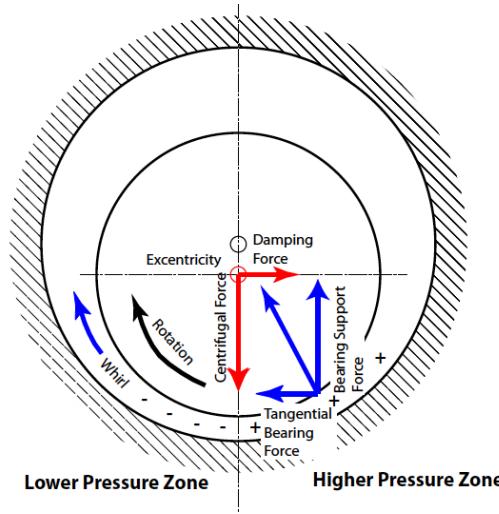


<http://www.youtube.com/watch?v=qfkkiDsEXUA>

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



- Rotors sur paliers à gaz
 - Caractéristique couplée des paliers



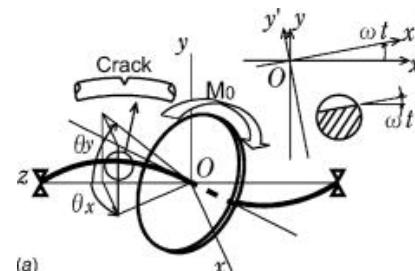
- Naissance potentielle de vibrations lorsque les inerties, amortissements ou rigidités varient périodiquement avec le mouvement



Balançoire

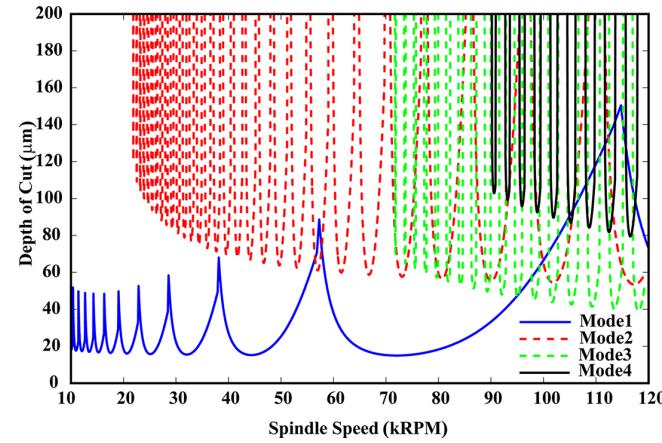
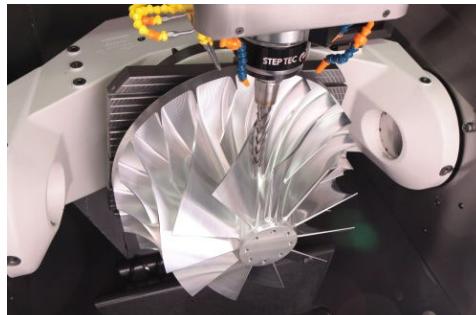


Rotor de générateur



(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

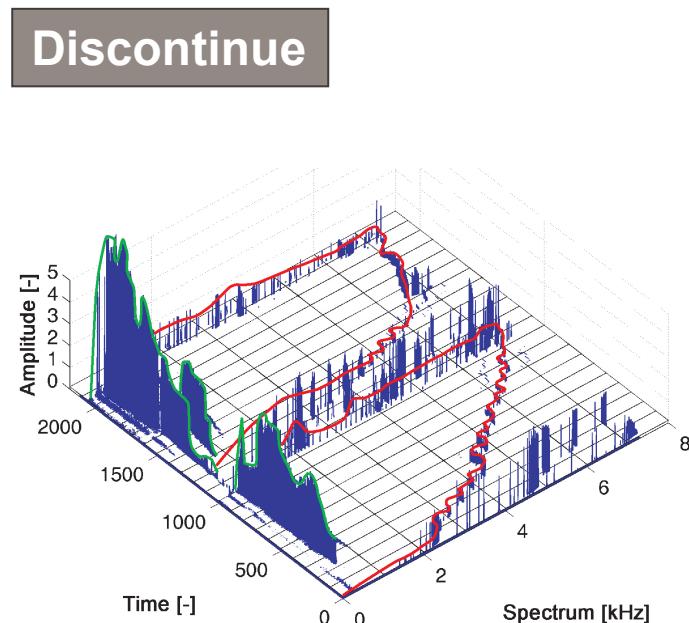
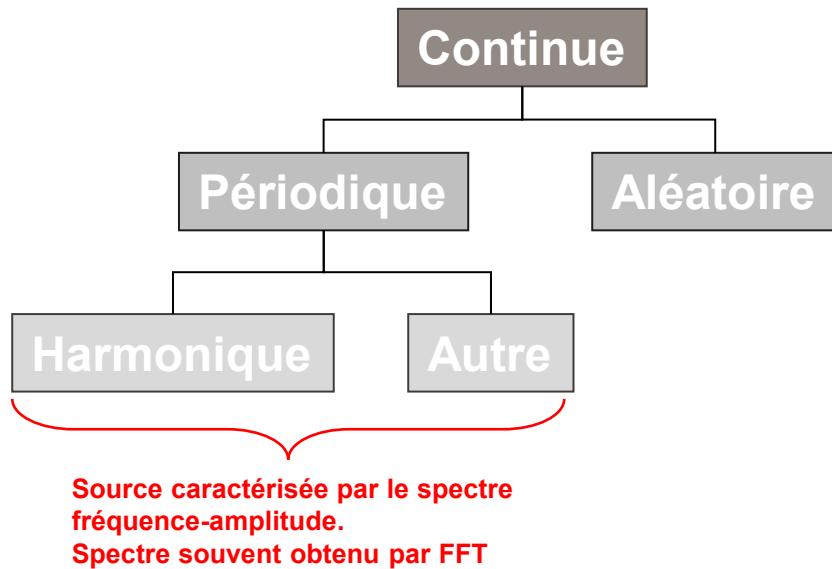


X. Jin, Y. Altintas *J. Manuf. Sci. Eng.*,
2013, 135(3), 031011

- 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



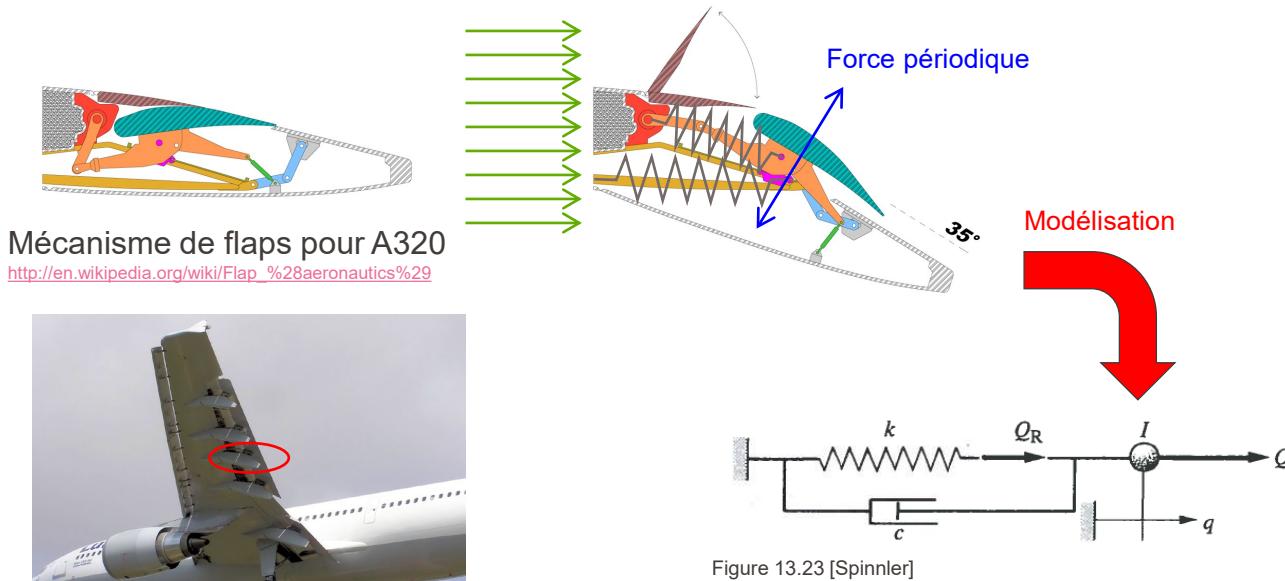
Dynamique des Systèmes Mécaniques

Cinématique ou
dynamique?

Prof. J. Schiffmann

Cinématique ou dynamique?

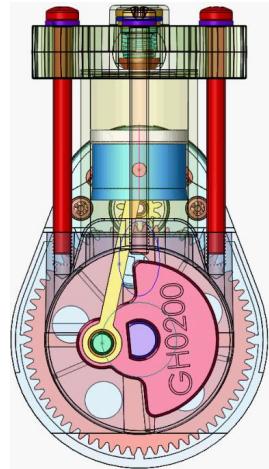
- Cinématique: mouvement de corps rigides



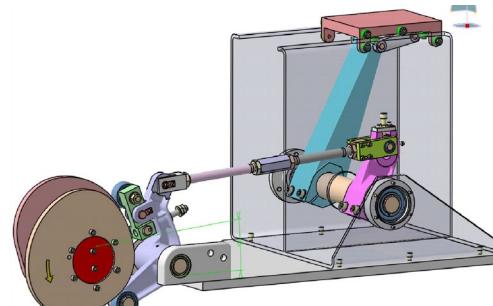
- Dynamique: tient compte de la déformation des éléments

- 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

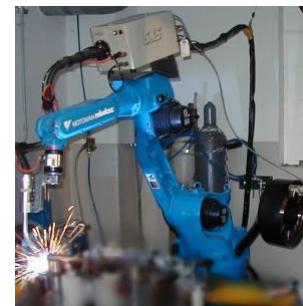
- Ensemble de corps rigides liés entre eux



Bielle-manivelle-piston



Mécanisme pour introduction de feuilles de carton

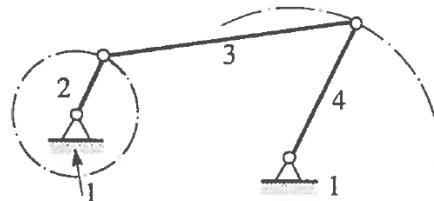


Robot industriel

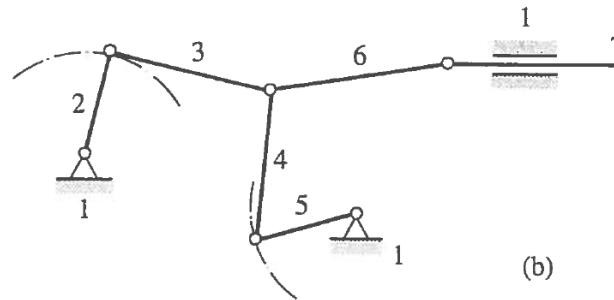


Treib pour palan

- 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 $n_{si} = 6 - n_{ci}$

- 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

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

Bâti

- 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

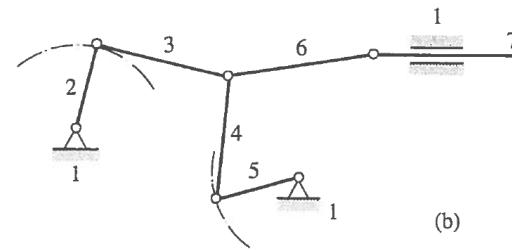
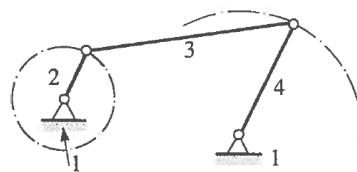
$$m_c = 3(N_p - 1) - 2N_{L1} - N_{L2}$$

Nombre de liaisons avec un degré de liaison = 1

Nombre de liaisons avec un degré de liaison = 2

Nombre d'éléments

- Exemples



- 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, discréétisation, 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	Discréétisation 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