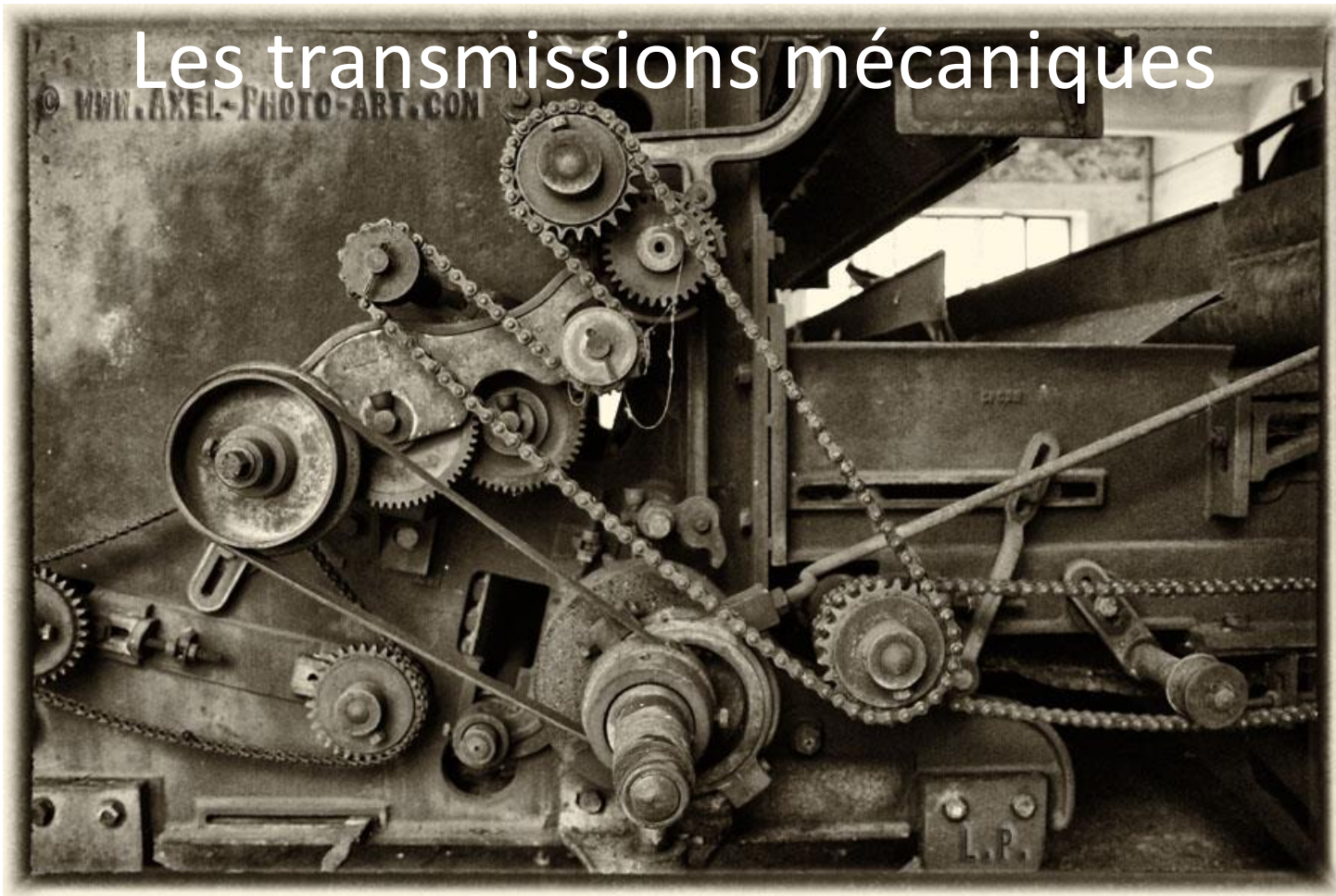


# Les transmissions mécaniques





## Plan du cours

- Définitions, représentations mathématiques, exemples
- Notion de charge ramenée sur un axe
- Composants pour la conversion rotation-rotation
- Composants pour la conversion rotation-translation
- Synthèse



# Généralités

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : Les transmissions mécaniques*

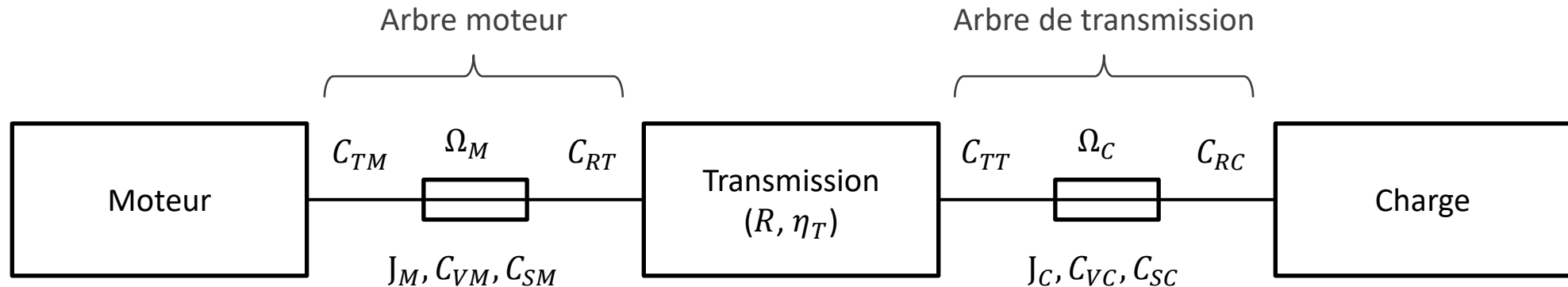


## Définition

- Système mécanique permettant de réaliser la transformation d'un mouvement et de transmettre une puissance mécanique
- Souvent : augmenter ou réduire une vitesse de rotation
- Parfois : transformer une rotation en translation
- Cas particulier : changement d'axe de rotation sans modification de la vitesse



## Représentation générale en rotation



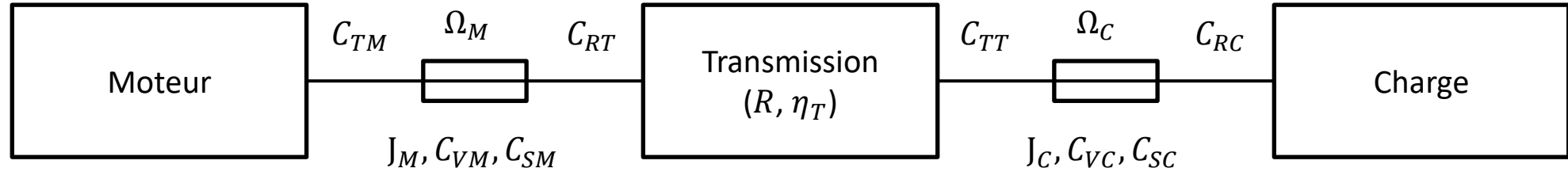
- $C_{TM}$  : couple transmis par le moteur
- $\Omega_M$  : vitesse de rotation de l'arbre moteur
- $C_{RT}$  : couple reçu par la transmission
- $J_M$  : inertie sur l'arbre moteur
- $C_{VM}$  : frottements visqueux sur l'arbre moteur (huile, graisse...)
- $C_{SM}$  : frottements secs sur l'arbre moteur

$$R = \frac{\Omega_M}{\Omega_C} \quad (\text{pas de glissement})$$

$$\eta_T = \frac{P_{TT}}{P_{RT}} = \frac{C_{TT} \times \Omega_C}{C_{RT} \times \Omega_M} \quad (\text{mode moteur})$$



## Représentation générale en rotation



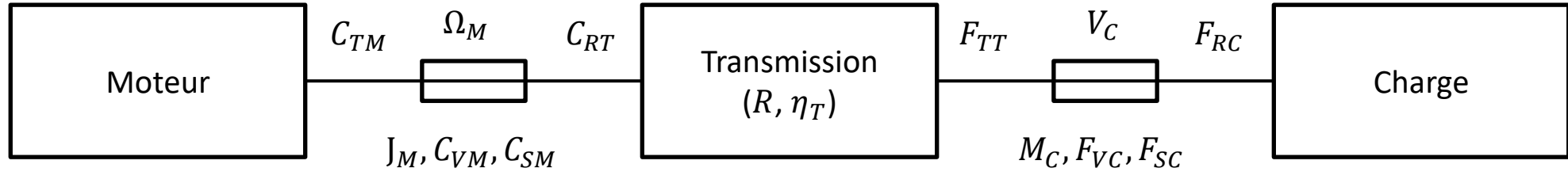
### Relations

- $\Omega_C = \Omega_M / R$
- $C_{RT} = C_{TM} - J_M \dot{\Omega}_M - C_{VM} - C_{SM} \approx C_{TM} - J_M \dot{\Omega}_M$
- $C_{TT} = \frac{C_{RT} \times \Omega_M}{\Omega_C} \times \eta_T = C_{RT} \times R \times \eta_T$
- $C_{RC} = C_{TT} - J_C \dot{\Omega}_C - C_{VC} - C_{SC} \approx C_{TT} - J_C \dot{\Omega}_C$
- D'où :  $C_{RC} \approx C_{TT} - J_C \dot{\Omega}_C \approx (C_{TM} - J_M \dot{\Omega}_M) \times R \times \eta_T - J_C \dot{\Omega}_C$

Souvent négligeables,  
mais pas toujours !



## Représentation générale en translation



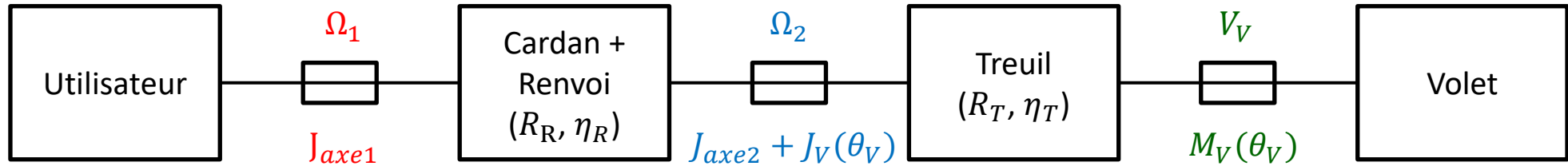
- $F_{TR}$  : force transmise par la transmission
- $V_T$  : vitesse de translation
- $F_{RC}$  : force reçue par la charge
- $M_C$  : masse en mouvement côté charge
- $F_{VC}$  : frottements visqueux côté charge
- $F_{SM}$  : frottements secs côté charge

$$R = \frac{\Omega_M}{V_C} \text{ [rad/m] ou [m}^{-1}\text{]}$$

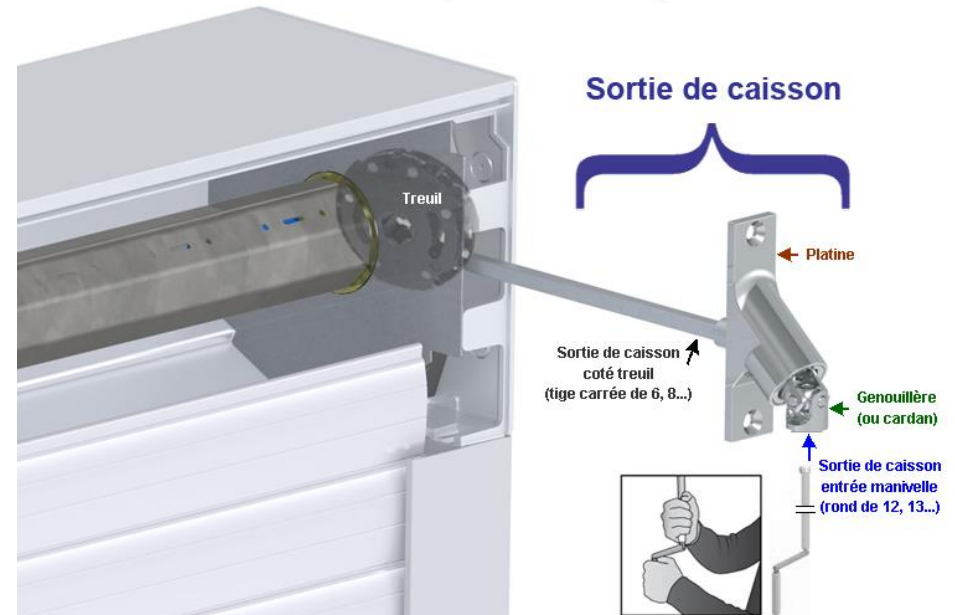
$$\eta_T = \frac{F_{TT} \times V_C}{C_{RT} \times \Omega_M} \text{ (moteur)}$$



## Exemple : mécanisme de volet roulant (rotation-translation)

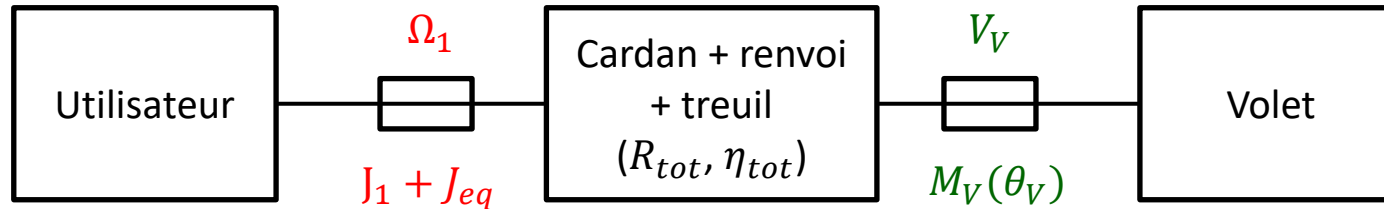


VOLET ROULANT MANUEL (A MANIVELLE)

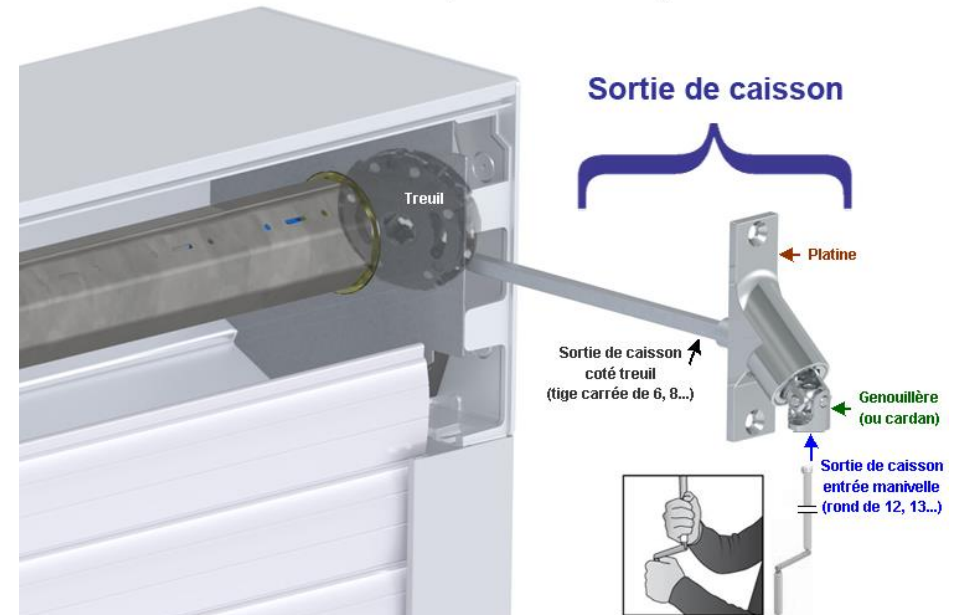




## Exemple : mécanisme de volet roulant (rotation-translation)



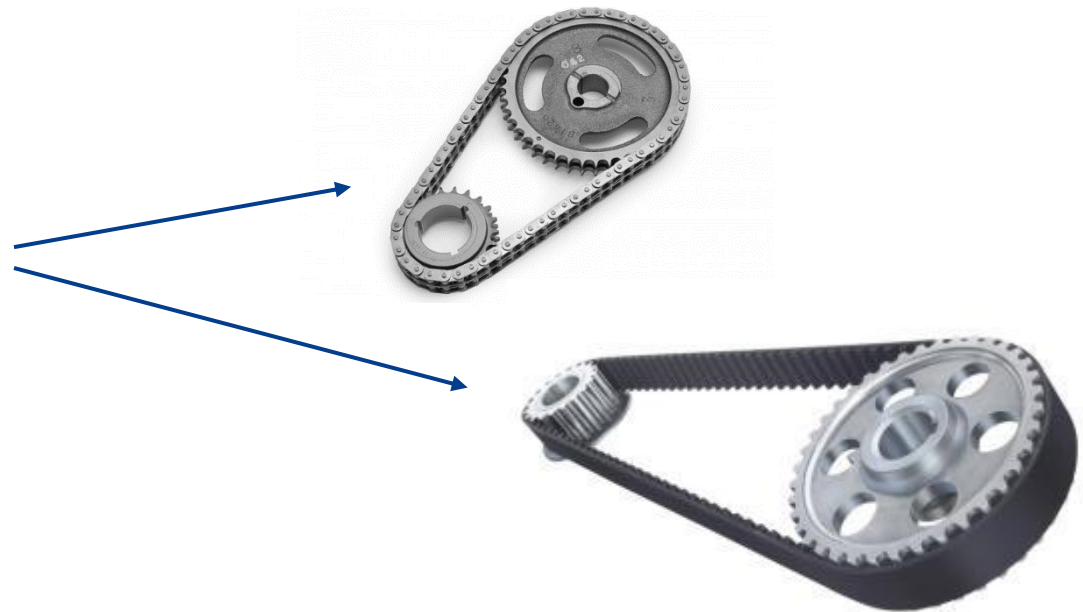
VOLET ROULANT MANUEL (A MANIVELLE)





## Caractéristiques essentielles d'une transmission

- Rapport de réduction  $R$
- Encombrement  $L \times H \times P$
- Vitesse maximale admissible  $\Omega_{max}$  ou  $V_{max}$
- Couple/force maximale admissible  $C_{max}$  ou  $F_{max}$  (/!\ déformation ou casse)
- Puissance transmissible  $P_{max}$
- Masse  $M$  ou inertie  $J$
- Rendement  $\eta$
- Réversibilité
- **Raideur de transmission**





## Raideur d'une transmission

- Ratio entre le couple transmis et le décalage d'angle

$$K_R = \frac{C}{\Delta\theta} \left[ \frac{Nm}{rad} \right]$$

- Raideur faible ► perte de précision
- Raideur faible ► protection du moteur contre les chocs
- Raideur forte ► souvent un  $C_{max}$  plus élevé



Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)



## Exemple : pignon et vis sans fin

- Cas **irréversible** : rendement de 0,3 à 0,4
- Cas **réversible** : rendement de 0,5 à 0,95 si bien lubrifié
- Rapport de réduction élevé
- Possibilité de réglage fin
- Changement d'axe de rotation



Dispositif d'accord d'une contrebasse (irréversible)



# Notion de charge ramenée sur un axe

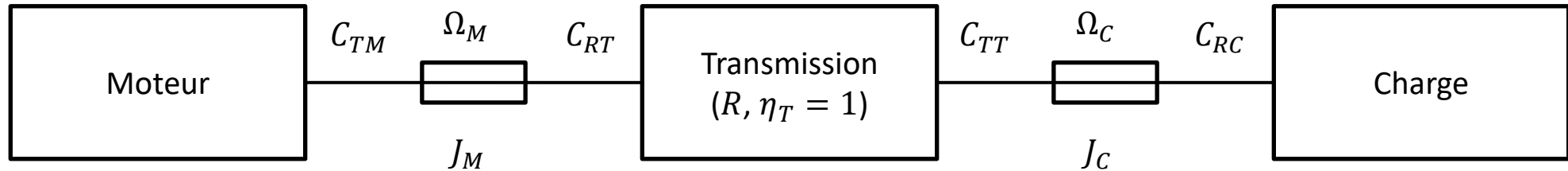
Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : Les transmissions mécaniques*



## Conversion rotation-rotation idéale



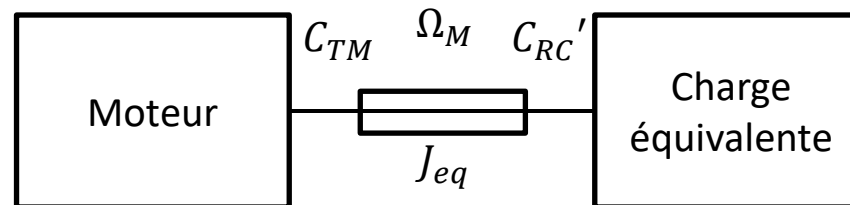
- Conversion idéale :  $\eta_T = 1$
- $\Omega_C C_{TT} = \Omega_M C_{RT}$  et  $R \Omega_C = \Omega_M$  donc  $C_{TT} = R C_{RT}$

## Charge équivalente sur l'arbre moteur

- $C_{TM} \approx C_{RT} + J_M \dot{\Omega}_M \approx C_{RC}' + J_{eq} \dot{\Omega}_M$
- Inertie équivalente  $J_{eq} = J_M + \frac{1}{R^2} J_C$
- Couple utile équivalent  $C_{RC}' = \frac{1}{R} C_{RC}$

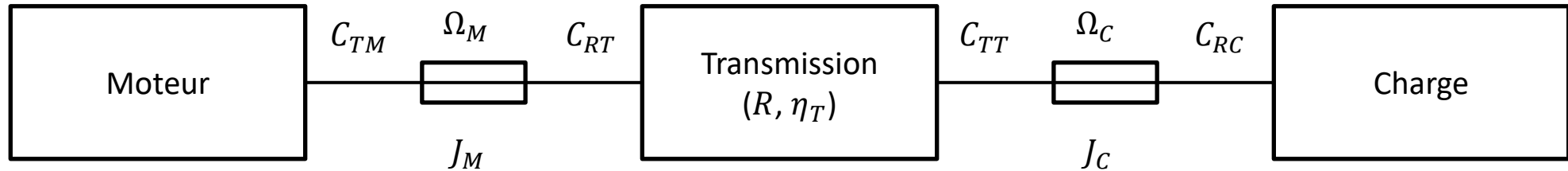
démo

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{RT} = C_{TT}/R \\ C_{TT} = C_{RC} + J_C \dot{\Omega}_C \\ C_{RT} = (C_{RC} + J_C \dot{\Omega}_C)/R \\ C_{RT} = (C_{RC} + J_C \frac{\dot{\Omega}_M}{R})/R \\ C_{TM} \approx C_{RC}/R + (J_M + \frac{1}{R^2} J_C) \dot{\Omega}_M \\ C_{TM} \approx C_{RC}' + J_{eq} \dot{\Omega}_M \end{array} \right.$$





## Conversion rotation-rotation réelle



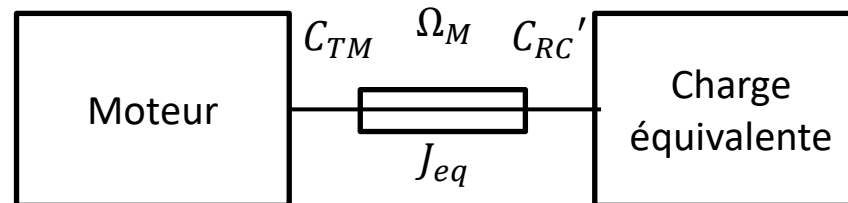
- Conversion idéale :  $\eta_T < 1$
- $\Omega_C C_{TT} = \eta_T \Omega_M C_{RT}$  et  $R \Omega_C = \Omega_M$  donc  $C_{TT} = \eta_T R C_{RT}$

## Charge équivalente sur l'arbre moteur

- $C_{TM} \approx C_{RT} + J_M \dot{\Omega}_M \approx C_{RC}' + J_{eq} \dot{\Omega}_M$
- Inertie équivalente  $J_{eq} = J_M + \frac{1}{\eta_T R^2} J_C$
- Couple utile équivalent  $C_{RC}' = \frac{1}{\eta_T R} C_{RC}$

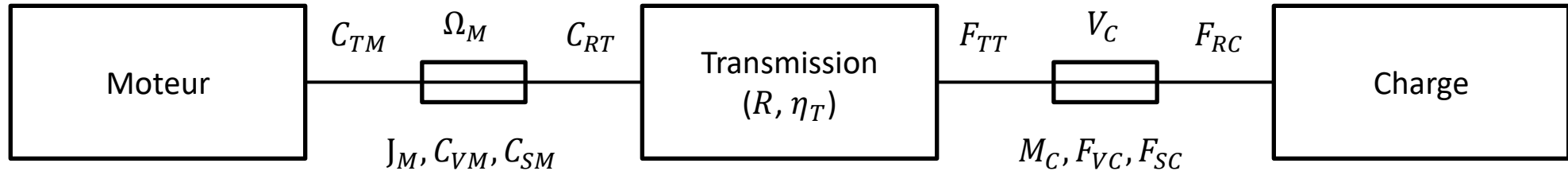
Expressions définies  
en mode moteur

/!\ rendements en  
mode générateur





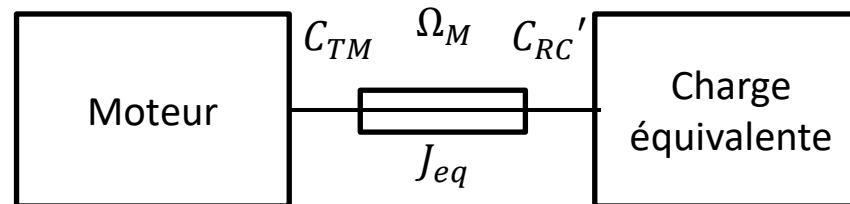
## Conversion rotation-translation idéale



- Conversion idéale :  $\eta_T = 1$
- $V_C F_{TT} = \Omega_M C_{RT}$  et  $R V_C = \Omega_M$  donc  $F_{TT} = R C_{RT}$

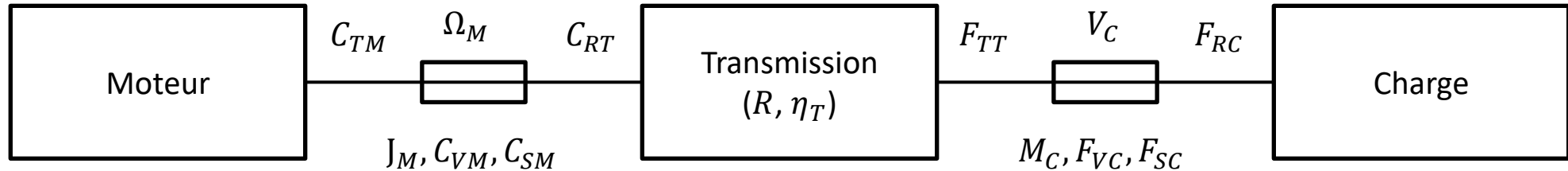
## Charge équivalente sur l'arbre moteur

- $C_{TM} \approx C_{RT} + J_M \dot{\Omega}_M \approx C_{RC}' + J_{eq} \dot{\Omega}_M$
- Inertie équivalente  $J_{eq} = J_M + \frac{1}{R^2} M_C$
- Couple utile équivalent  $C_{RC}' = \frac{1}{R} F_{RC}$





## Conversion rotation-translation réelle



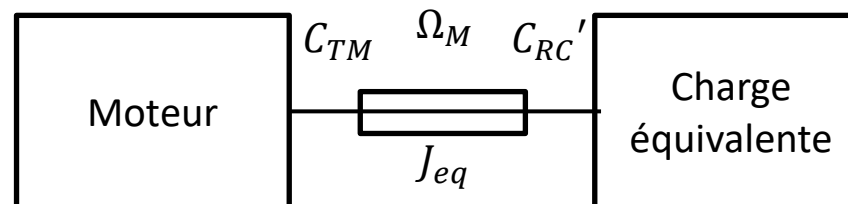
- Conversion idéale :  $\eta_T < 1$
- $V_C F_{TT} = \eta_T \Omega_M C_{RT}$  et  $R V_C = \Omega_M$  donc  $F_{TT} = \eta_T R C_{RT}$

## Charge équivalente sur l'arbre moteur

- $C_{TM} \approx C_{RT} + J_M \dot{\Omega}_M \approx C_{RC}' + J_{eq} \dot{\Omega}_M$
- Inertie équivalente  $J_{eq} = J_M + \frac{1}{\eta_T R^2} M_C$
- Couple utile équivalent  $C_{RC}' = \frac{1}{\eta_T R} F_{RC}$

Expressions définies  
en mode moteur

/!\ rendements en  
mode générateur





# Composants pour la conversion rotation-rotation

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : Les transmissions mécaniques*



## Réducteur à engrenages

$$R = \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = (-1)^{C_{ext}} \frac{\text{Nb de dents roue 2}}{\text{Nb de dents roue 1}}$$

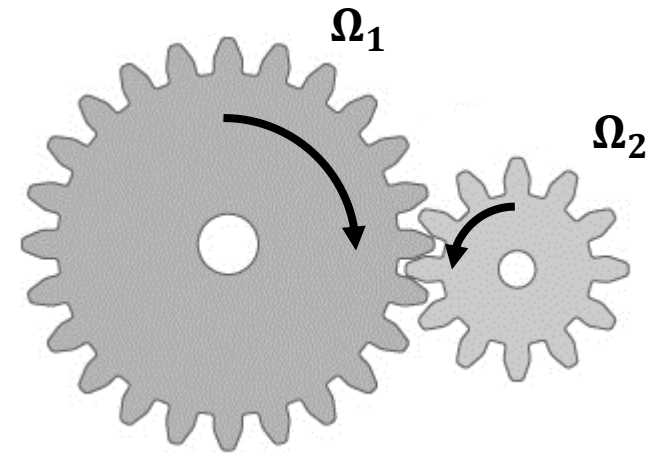
- $C_{ext}$  : nombre de contacts extérieurs
- Liaison rigide et réversible (/!\ jeu)
- Possible inversion du sens de rotation
- Axes parallèles ou perpendiculaires

## Avantages

- Très bon rendement
- Simple et fiable

## Inconvénients

- Encombrement et poids importants
- Inertie importante
- Jeux moyens (/!\ usure)
- $R$  faible (sauf si plusieurs étages)

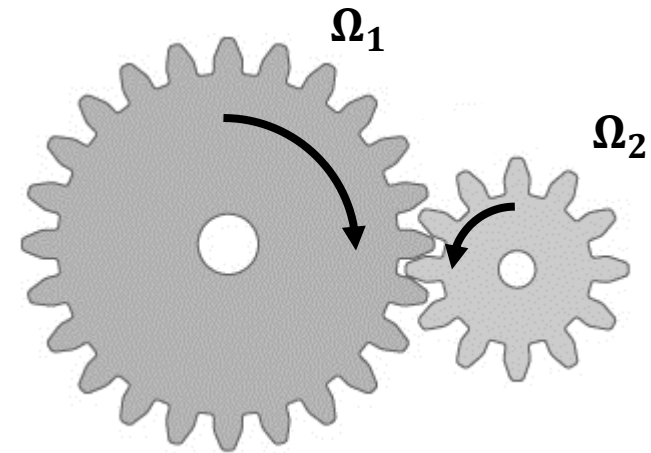




## Réducteur à engrenages

$$R = \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = (-1)^{c_{ext}} \frac{\text{Nb de dents roue 2}}{\text{Nb de dents roue 1}}$$

- Usure : augmente le jeu
- Usure : peut entraîner des vibrations
- **Nombres de dents : premiers entre eux**
  - Répartition de l'usure





## Poulies et courroies lisses

$$R = \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = \frac{\text{Diamètre roue 2}}{\text{Diamètre roue 1}}$$

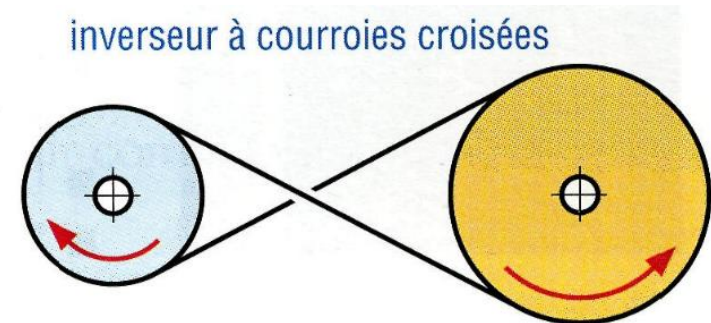
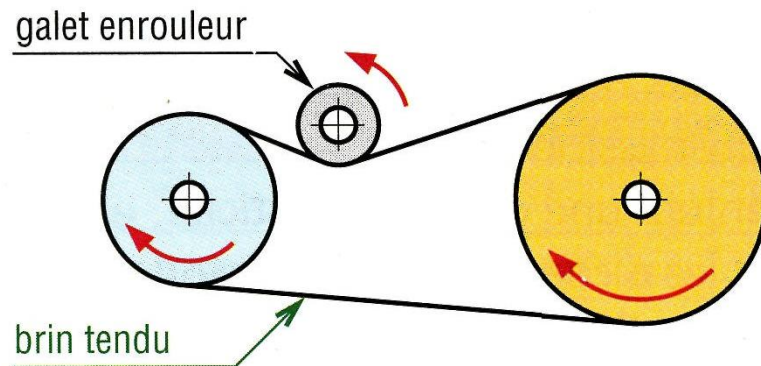
- Liaison peu rigide
- Axes parallèles

## Avantages

- Simple et fiable. Distance variable entre les axes.

## Inconvénients

- Encombrement. Elasticité et **glissement**.  $R$  faible





## Poulies et courroies crantées

$$R = \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = \frac{\text{Diamètre roue 2}}{\text{Diamètre roue 1}}$$

- Liaison peu rigide (*sauf courroie armée*)
- Axes parallèles

## Avantages

- Simple et fiable. Distance variable entre les axes. **Pas de glissement.**

## Inconvénients

- Encombrement. Elasticité.  $R$  faible





## Chaîne et pignons

$$R = \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = \frac{\text{Nb de dents roue 2}}{\text{Nb de dents roue 1}}$$

- Liaison **rigide**
- Axes parallèles

## Avantages

- Simple et fiable
- Distance variable entre les axes

## Inconvénients

- Encombrement
- Inertie importante (chaîne longue)
- $R$  faible





## Pignon et vis sans fin

$$R = \frac{\Omega_{vis}}{\Omega_{roue}} = \frac{Nb \text{ de dents roue}}{Nb \text{ de filets de la vis}}$$

- Vis à filet simple ou double
- Liaison rigide. Axes perpendiculaires. Généralement irréversible.

## Avantages

- Précision
- Très compact
- $R$  élevé

## Inconvénients

- Risque de jeu
- Mauvais rendement (frottements)
- Durée de vie limitée



Dispositif d'accord d'une contrebasse (irréversible)



## Train épicycloïdal

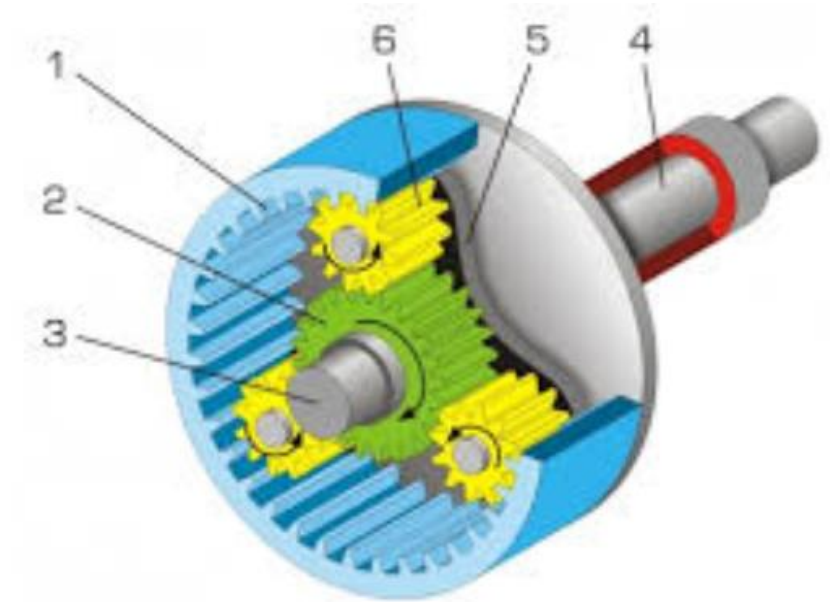
- Liaison rigide
- Réversible (sauf  $R$  trop élevé)
- Axes parallèles

## Avantages

- Très compact

## Inconvénients

- Jeux moyens
- Complexe
- Poids
- Inertie du porte-satellites



1. Couronne
2. Planétaire menant
3. Axe du planétaire menant
4. Axe du porte-satellites
5. Porte-satellites
6. Satellite

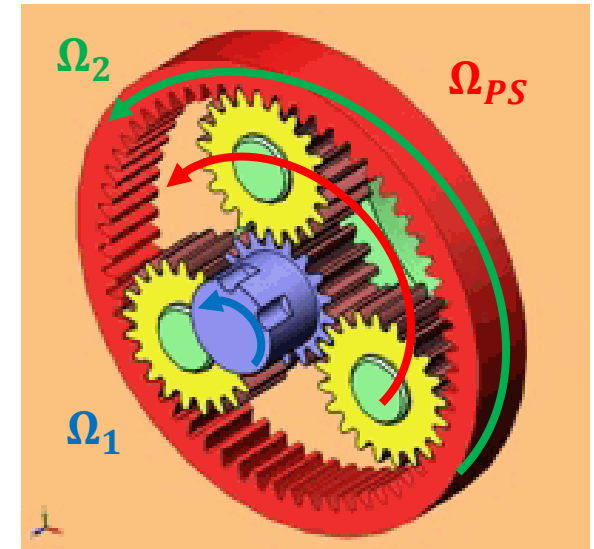


## Train épicycloïdal

- Relation de Willis

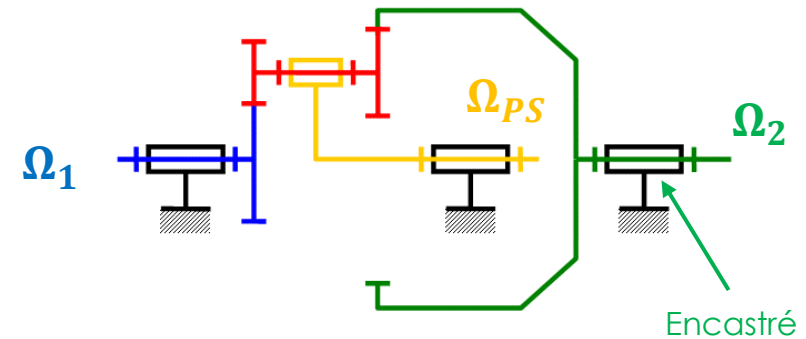
$$\frac{\Omega_2 - \Omega_{PS}}{\Omega_1 - \Omega_{PS}} = (-1)^{C_{ext}} \frac{\prod \text{Nb dents roues menantes}}{\prod \text{Nb dents roues menées}}$$

- $\Omega_1 = \Omega_M$  : vitesse de l'arbre d'entrée (menant)
- $\Omega_2 = 0$  : vitesse de la couronne (considérée menée)
- $\Omega_{PS} = \Omega_C$  : vitesse du porte-satellites (menant + mené)
- $C_{ext} = 1$  (satellite-planétaire)
- Cas particulier : 1 seule roue par satellite



$$\frac{\Omega_2 - \Omega_{PS}}{\Omega_1 - \Omega_{PS}} = \frac{-\Omega_C}{\Omega_M - \Omega_C} = - \frac{N_1 \times N_{PS}}{N_{PS} \times N_2}$$

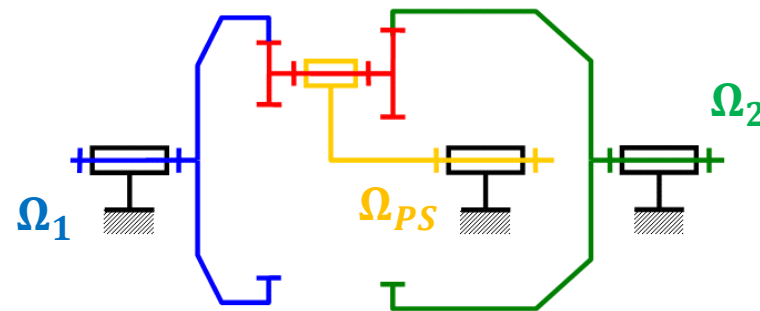
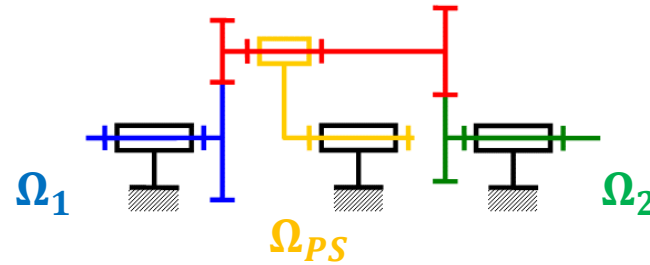
$$\frac{\Omega_C}{\Omega_M} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} = \frac{R_1}{2(R_1 + R_{PS})}$$





## Train épicycloïdal

- Autres possibilités géométriques

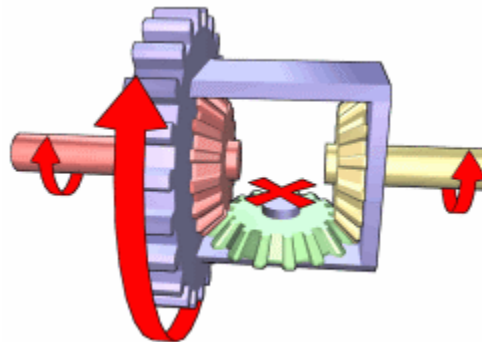




## Cas du différentiel

- Porte-satellite entraîné par le moteur
- Roues accrochées aux planétaires
- Possibilité pour les roues de tourner à des vitesses différentes, mais la moyenne de leur vitesse est constante

$$2\Omega_M = \Omega_1 + \Omega_2$$



Différentiel d'automobile



## Engrenage à onde de déformation (*harmonic drive*)

$$R = \frac{\Omega_1}{\Omega_2} = \frac{\text{Nb de dents roue 1}}{\text{Nb de dents roue 1} - \text{Nb de dents roue 2}}$$

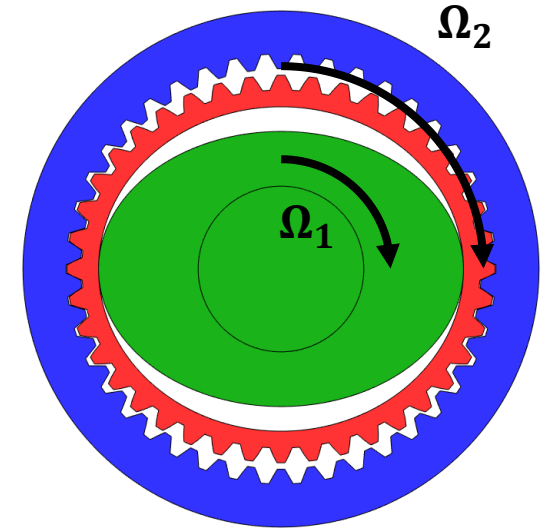
- Liaison rigide, irréversible
- Axes colinéaires

### Avantages

- Encombrement réduit, jeu faible, fort couple transmissible

### Inconvénients

- Coût élevé, sensible à la poussière et à l'humidité





# Composants pour la conversion rotation-translation

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : Les transmissions mécaniques*



## Système vis-écrou

$$R = \frac{\Omega_M}{V_C} = \frac{2\pi}{\text{Pas de la vis}} \quad [\text{rad/m}]$$

- Liaison rigide
- Rarement réversible

## Avantages

- Précision
- $R$  élevé

## Inconvénients

- Rendement faible
- Course limitée
- Inertie
- Flambage de la vis
- Vitesse max faible



Etau



Clé à molette



## Vis à billes

$$R = \frac{\Omega_M}{V_C} = \frac{2\pi}{\text{Pas de la vis}} \quad [\text{rad/m}]$$

- Liaison rigide
- **Réversible**

## Avantages

- Précision
- $R$  élevé
- **Rendement élevé**

## Inconvénients

- Course limitée
- Inertie **plus élevée**
- Flambage de la vis
- Vitesse max faible



Vis à billes



## Pignon et crémaillère

$$R = \frac{\Omega_M}{V_C} = \frac{1}{\text{Rayon moyen du pignon}} \quad [\text{rad/m}]$$

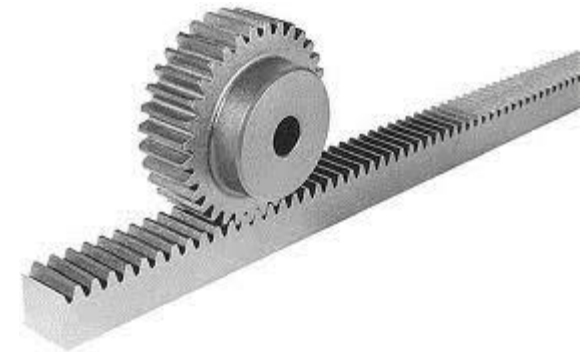
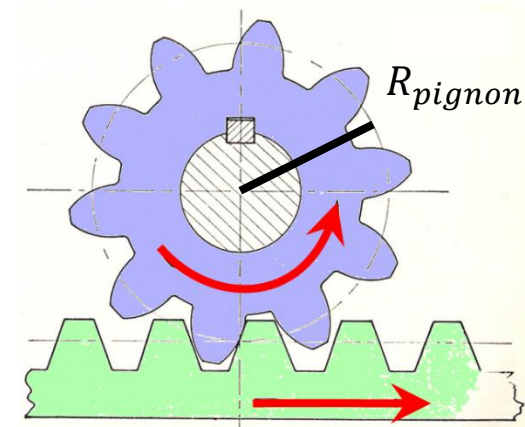
- Liaison rigide
- Réversible

### Avantages

- Rendement correct

### Inconvénients

- Course limitée
- Masse de la crémaillère
- Précision moyenne
- $R$  faible





## Cabestan ou tapis roulant

$$R = \frac{\Omega_M}{V_C} = \frac{1}{\text{Rayon du cabestan/rouleau}} \quad [\text{rad/m}]$$

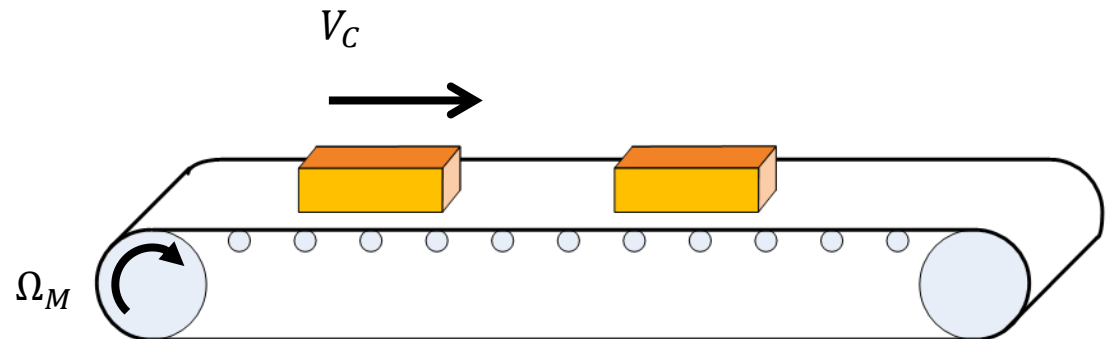
- Peu rigide
- Réversible
- Glissement possible

### Avantages

- Bon rendement
- Course importante

### Inconvénients

- Précision moyenne
- $R$  faible





## Came

$$R = \text{variable}$$

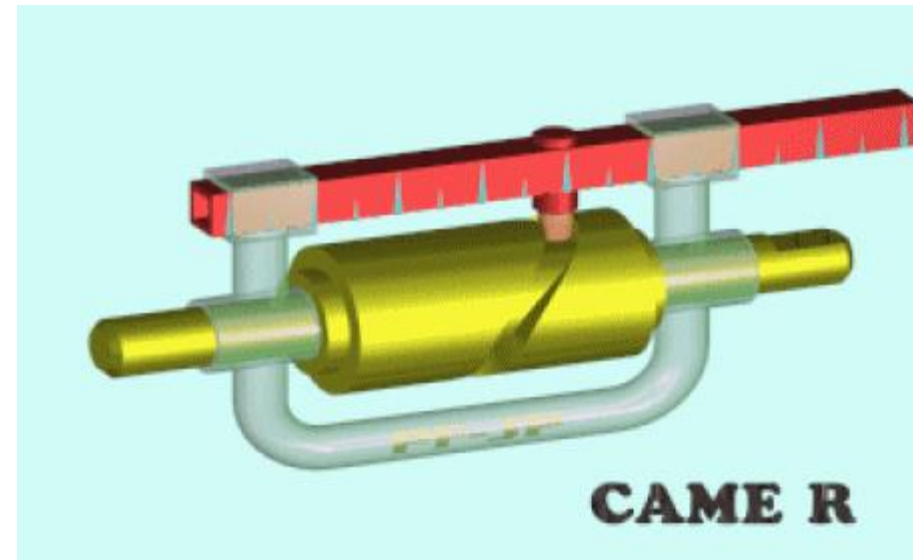
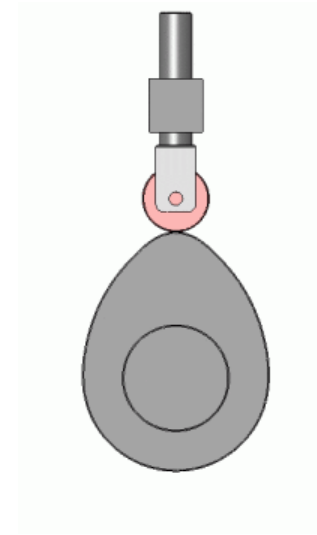
- Mouvement non régulier
- Pas toujours précis

## Avantages

- Faible rendement
- Simple

## Inconvénients

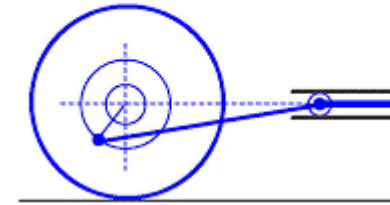
- Précision moyenne
- Généralement non réversible





## Excentrique et bielle

- Caractéristiques proches d'une came
- Translation sinusoïdale
- Liaison rigide
- Pas de glissement
- Bon rendement
- Réversible

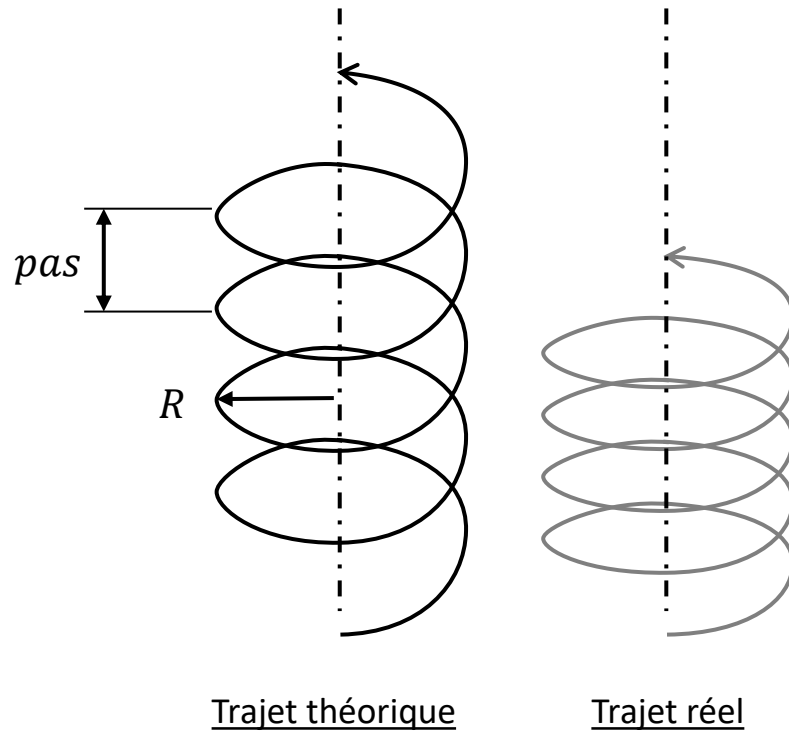


Système d'entraînement de roue de locomotive



## Hélice

- Comme vis-écrou, mais avec **glissement**
- Formules spécifiques



Trajet théorique

Trajet réel



Avion à hélice



Hélice de bateau



# Synthèse

Nicolas DAMAY  
Maître de conférences  
Département IM

[www.utc.fr](http://www.utc.fr)  
[nicolas.damay@utc.fr](mailto:nicolas.damay@utc.fr)

*Cours SY03 : Les transmissions mécaniques*



| Réducteur               | Standard                    |                            | A faible ou très faible jeu      |                   | Sans jeu                    |                                 |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Réalisations            | à engrenages (axes // ou ^) | roue et vis (axes ^)       | épicycloïdaux ou dérivés         | à engrenages      | à roue et vis précontrainte | à engrenage à rattrapage de jeu |
| Gamme de rapports       | 1 à 3 par étage             | 5 à 20                     | 10 à 400 (voir plus)             | 1 à 3 par étage   | jusqu'à 150                 | 10 à 50                         |
| Jeu mesuré en sortie    | > 15'<br>30' standard       | > 15'                      | stand: 3 à 10'<br>précis: 1 à 3' | 3' à 5'           | nul                         | nul (< 0.5')                    |
| Rendement               | très bon<br>> 0.9           | faible (< 0.6) et variable | moyen<br>0.5 à 0.85              | très bon<br>> 0.9 | faible (< 0.5) et variable  | bon à très bon                  |
| Motoréducteur standard  | oui                         | possible                   | oui, souvent                     | oui               | non                         | oui                             |
| Coût                    | limité                      | moyen                      | moyen                            | assez élevé       | très élevé                  | moyen à élevé                   |
| Durée de vie            | très élevée                 | moyenne                    | fonction de la qualité           | élevée            | moyenne                     | moyenne                         |
| Mise en œuvre           | très aisée                  | aisée                      | aisée                            | aisée             | délicate                    | aisée                           |
| Maintenance             | Faible                      | périodique                 | faible                           | faible            | nécessaire                  | faible                          |
| Dimensions standard     | oui                         | oui                        | non                              | non en général    | non                         | non                             |
| Exemples d'applications | toutes applications         | toutes applications        | machines spéciales               |                   | plateaux diviseurs          | robotique de précision          |

Extrait du *Technoguide E* de l'ADEPA