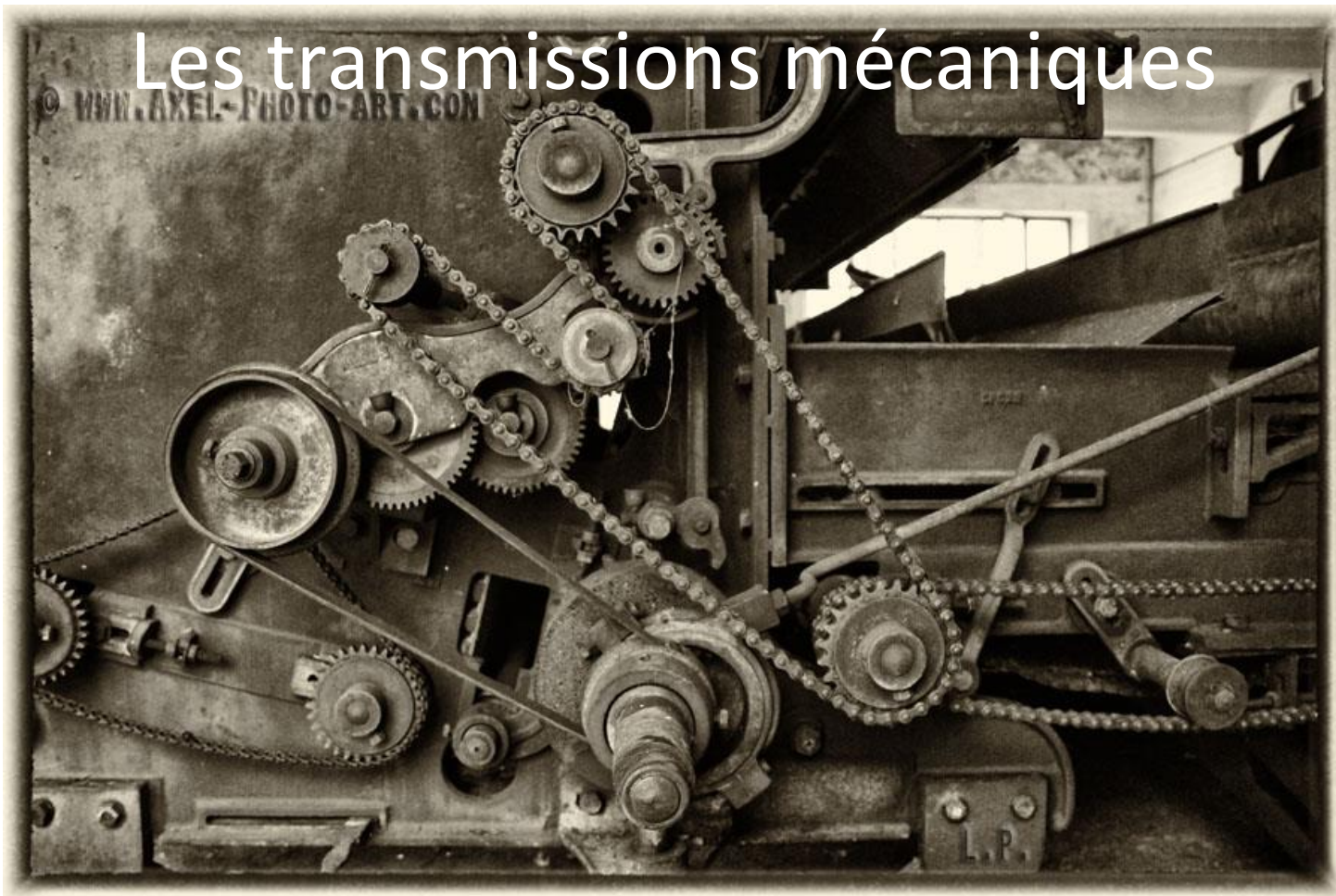


Les transmissions mécaniques





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
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Les transmissions mécaniques

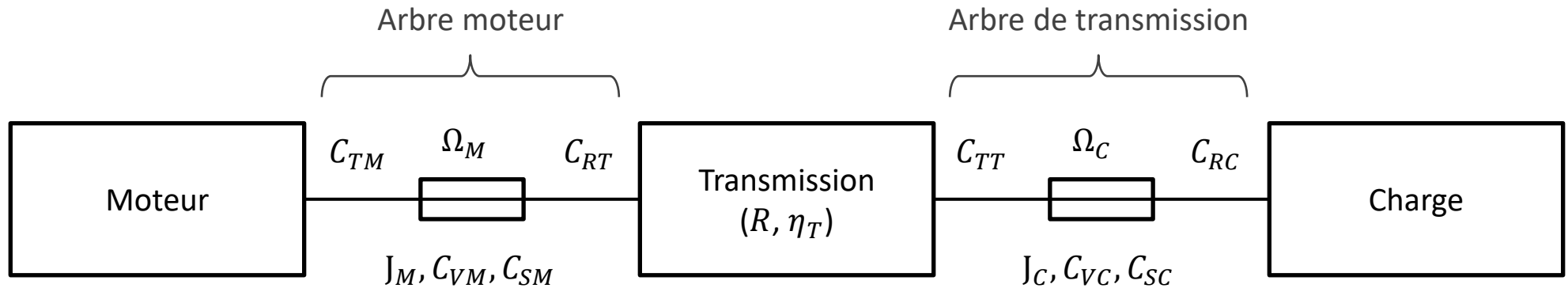


Définition

- 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



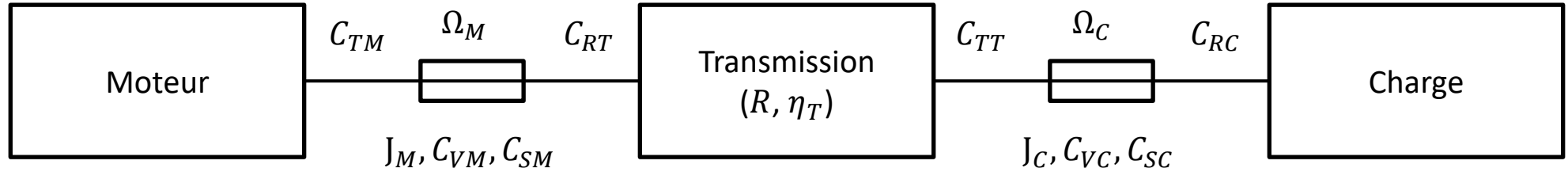
- C_{TM} : couple transmis par le moteur
- Ω_M : vitesse de rotation de l'arbre moteur
- C_{RT} : couple reçu par la transmission
- J_M : inertie sur l'arbre moteur
- C_{VM} : frottements visqueux sur l'arbre moteur (huile, graisse...)
- C_{SM} : frottements secs sur l'arbre moteur

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

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



Représentation générale en rotation



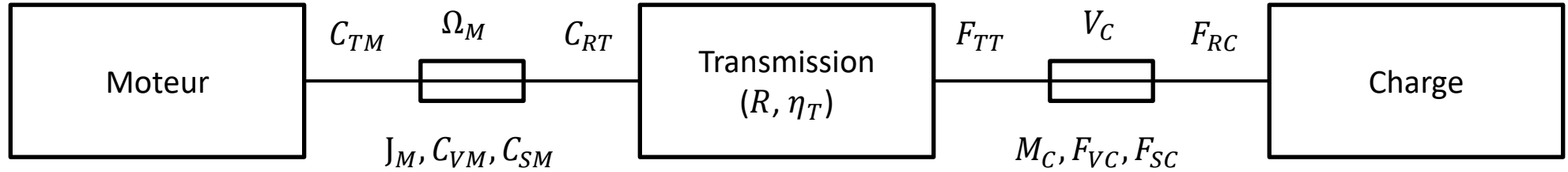
Relations

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



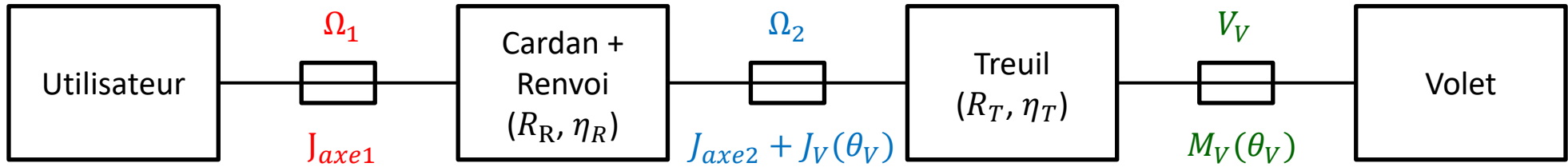
- F_{TR} : force transmise par la transmission
- V_T : vitesse de translation
- F_{RC} : force reçue par la charge
- M_C : masse en mouvement côté charge
- F_{VC} : frottements visqueux côté charge
- F_{SM} : frottements secs côté charge

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

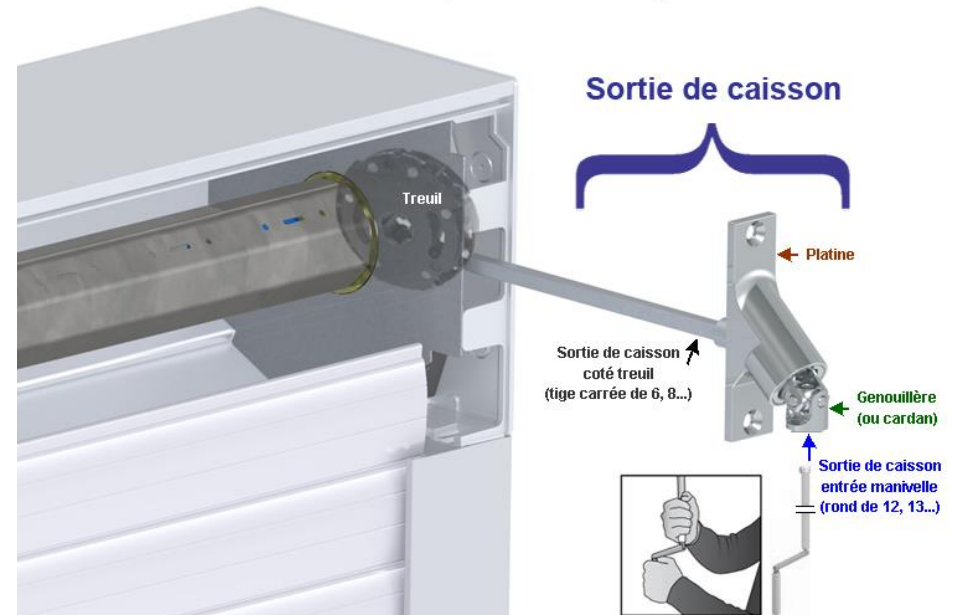
$$\eta_T = \frac{F_{TT} \times V_C}{C_{RT} \times \Omega_M} \text{ (moteur)}$$



Exemple : mécanisme de volet roulant (rotation-translation)

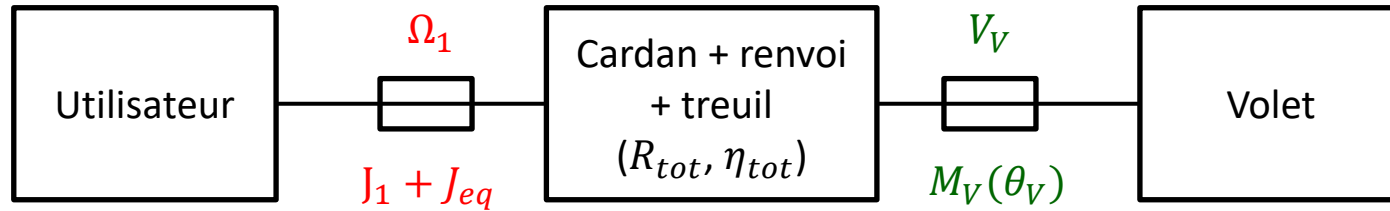


VOLET ROULANT MANUEL (A MANIVELLE)

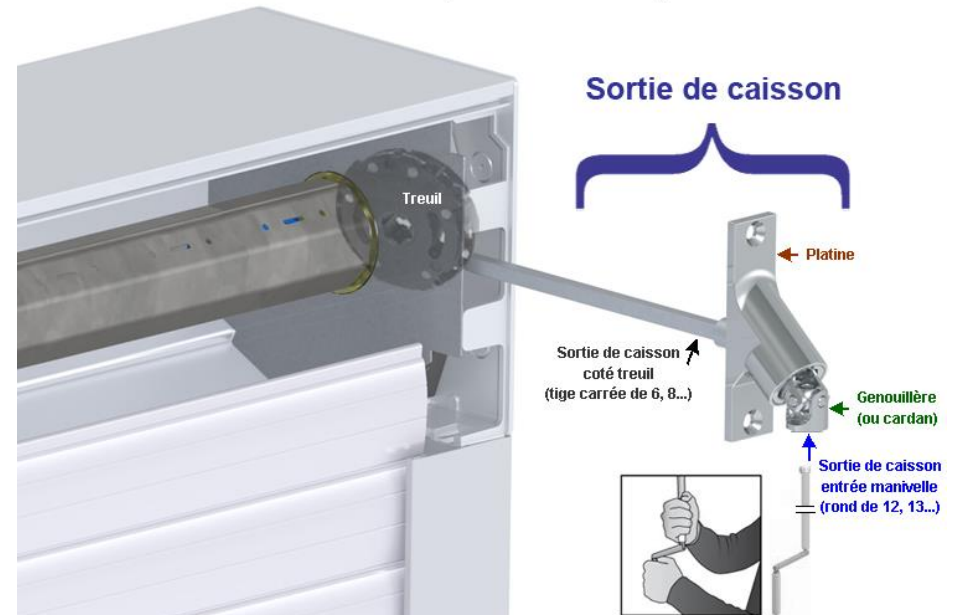




Exemple : mécanisme de volet roulant (rotation-translation)



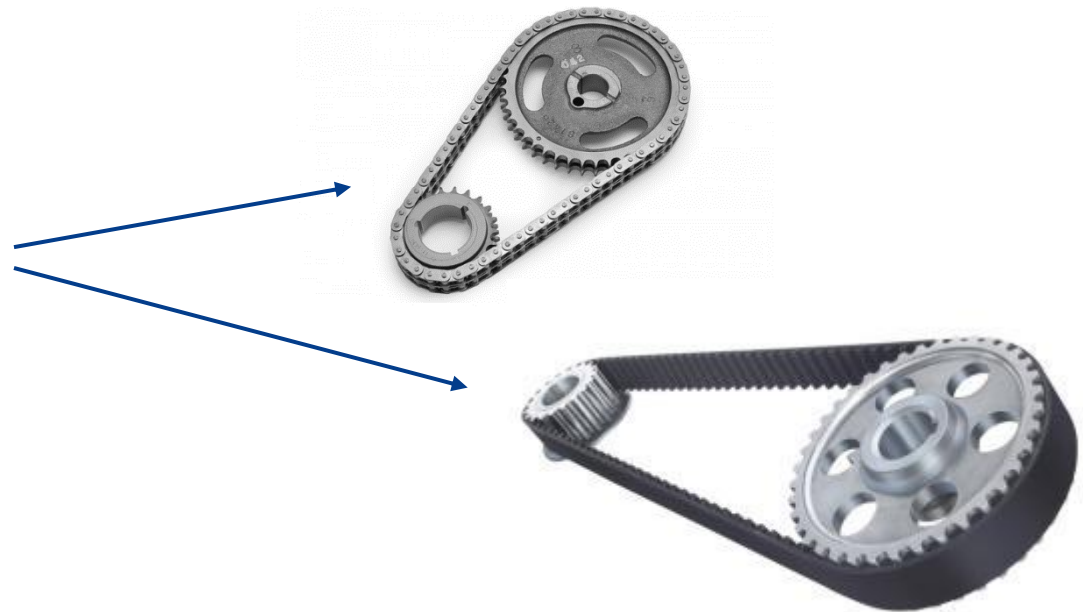
VOLET ROULANT MANUEL (A MANIVELLE)





Caractéristiques essentielles d'une transmission

- Rapport de réduction R
- Encombrement $L \times H \times P$
- Vitesse maximale admissible Ω_{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 η
- 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





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

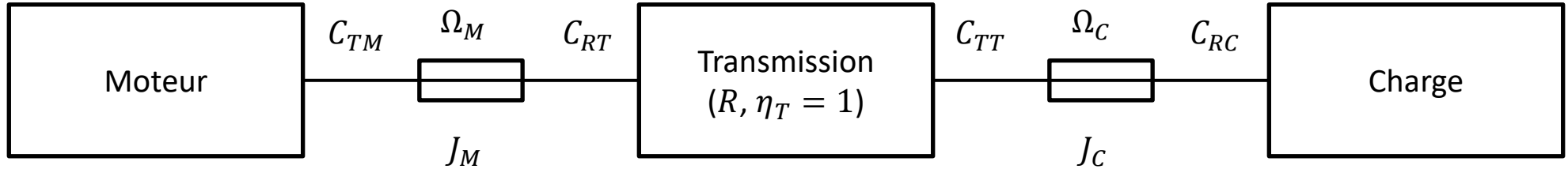
Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Les transmissions mécaniques



Conversion rotation-rotation idéale



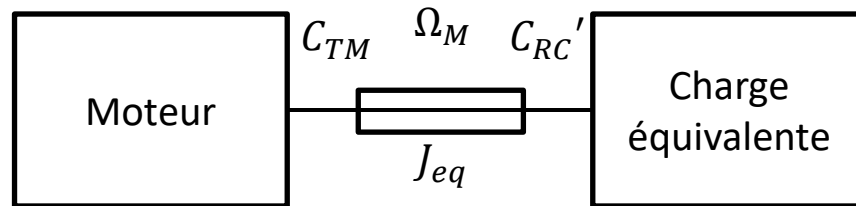
- Conversion idéale : $\eta_T = 1$
- $\Omega_C C_{TT} = \Omega_M C_{RT}$ et $R \Omega_C = \Omega_M$ donc $C_{TT} = R C_{RT}$

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 $C_{RC}' = \frac{1}{R} C_{RC}$

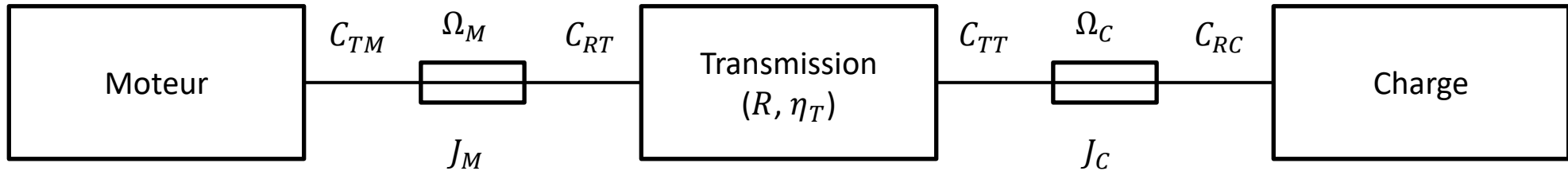
démo

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





Conversion rotation-rotation réelle



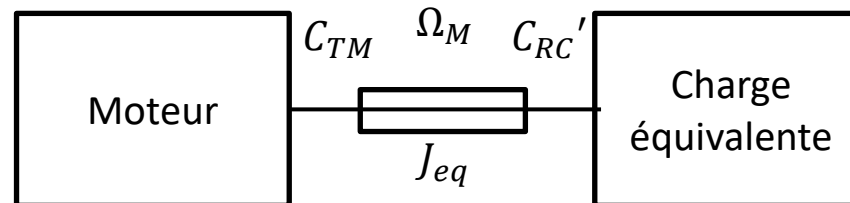
- Conversion idéale : $\eta_T < 1$
- $\Omega_C C_{TT} = \eta_T \Omega_M C_{RT}$ et $R \Omega_C = \Omega_M$ donc $C_{TT} = \eta_T R C_{RT}$

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 $C_{RC}' = \frac{1}{\eta_T R} C_{RC}$

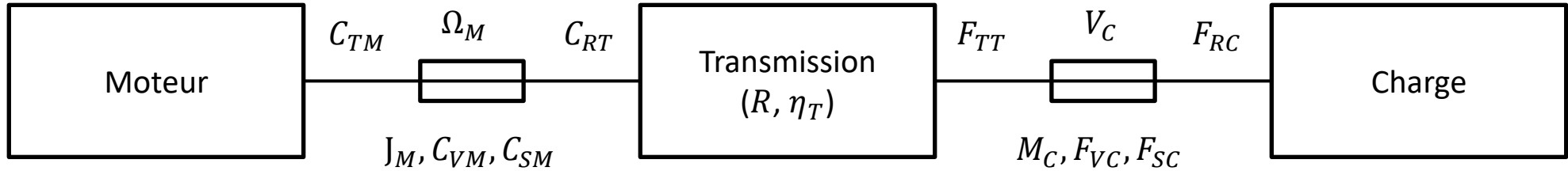
Expressions définies
en mode moteur

/!\ rendements en
mode générateur





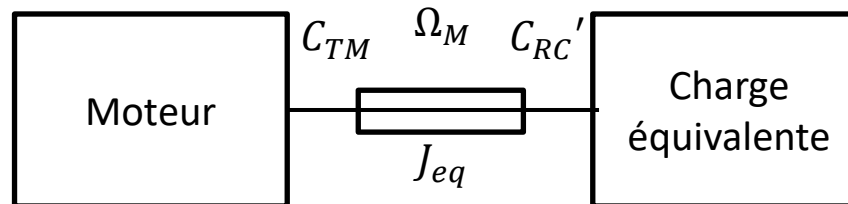
Conversion rotation-translation idéale



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

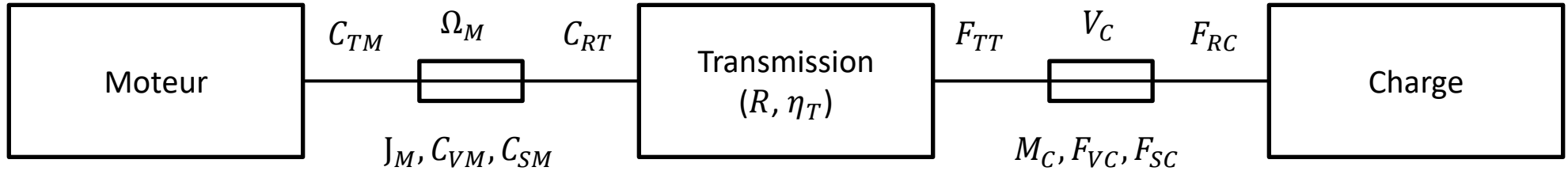
Charge équivalente sur l'arbre moteur

- $C_{TM} \approx C_{RT} + J_M \dot{\Omega}_M \approx C_{RC}' + J_{eq} \dot{\Omega}_M$
- 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



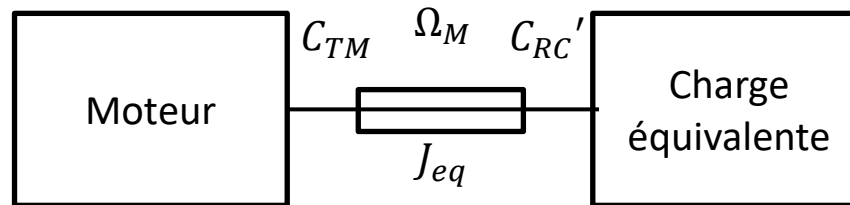
- Conversion idéale : $\eta_T < 1$
- $V_C F_{TT} = \eta_T \Omega_M C_{RT}$ et $R V_C = \Omega_M$ donc $F_{TT} = \eta_T R C_{RT}$

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
nicolas.damay@utc.fr

Cours SY03 : Les transmissions mécaniques



Réducteur à engrenages

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

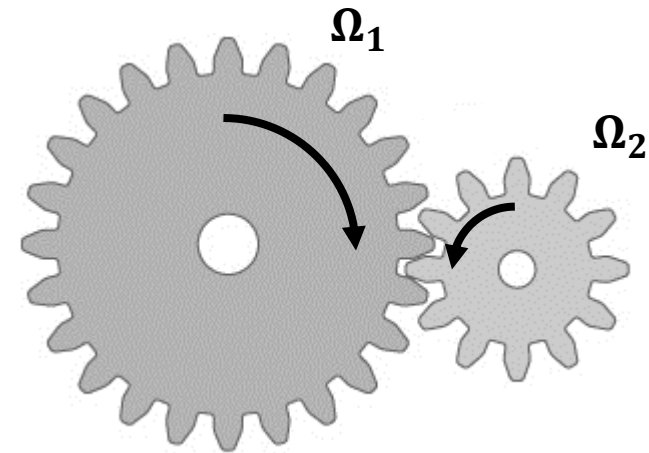
- C_{ext} : nombre de contacts extérieurs
- Liaison rigide et réversible (/!\ jeu)
- Possible inversion du sens de rotation
- Axes parallèles ou perpendiculaires

Avantages

- Très bon rendement
- Simple et fiable

Inconvénients

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

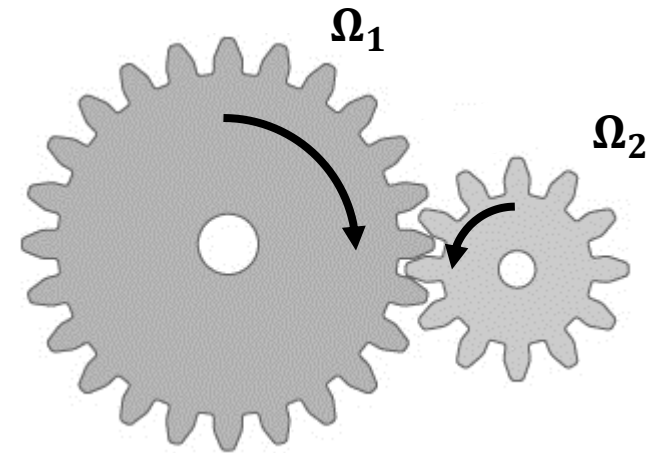




Réducteur à engrenages

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

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





Poulies et courroies lisses

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

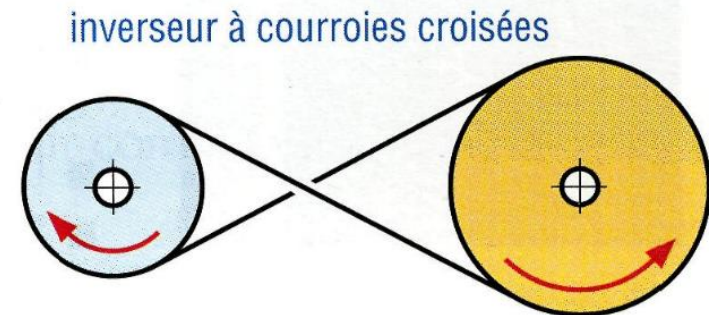
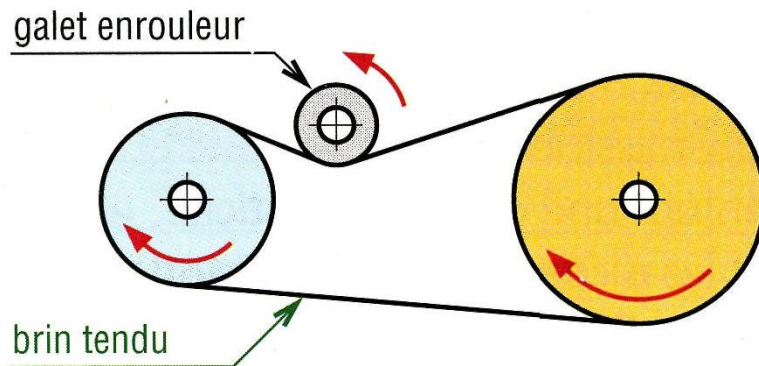
- Liaison peu rigide
- Axes parallèles

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

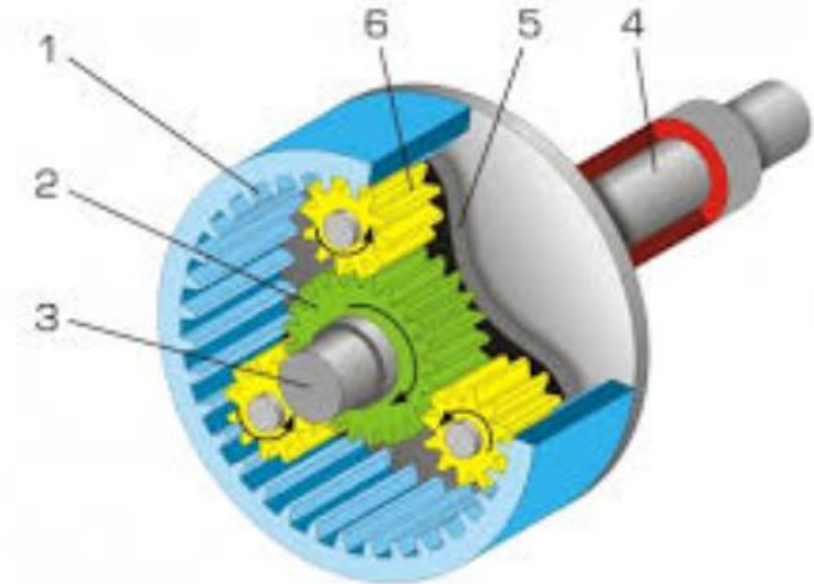
- Liaison rigide
- Réversible (sauf R trop élevé)
- Axes parallèles

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

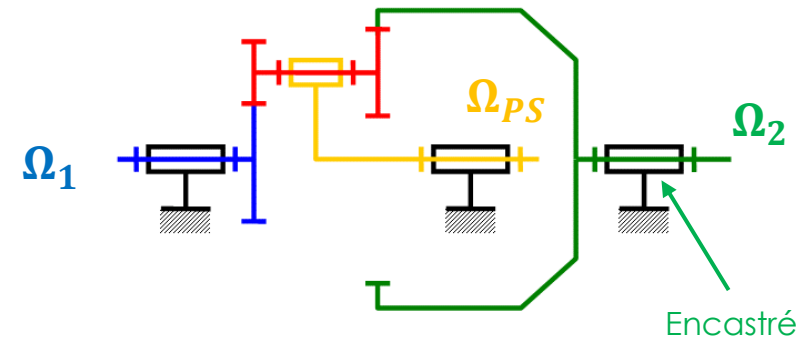
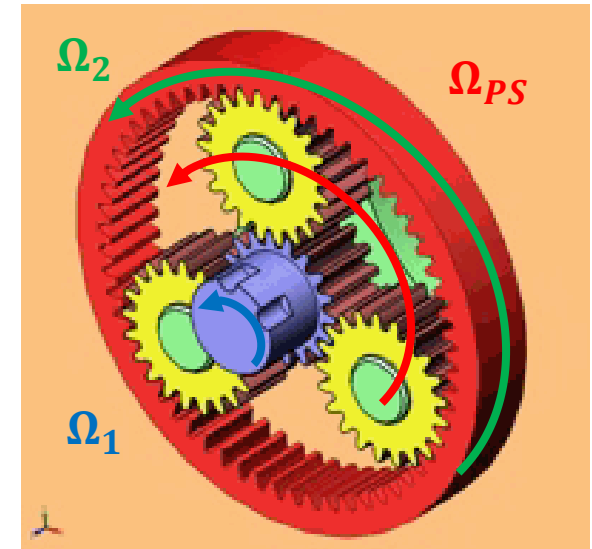
- Relation de Willis

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

- $\Omega_1 = \Omega_M$: 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

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

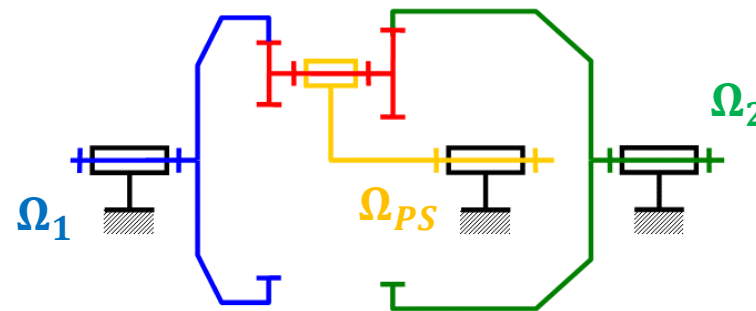
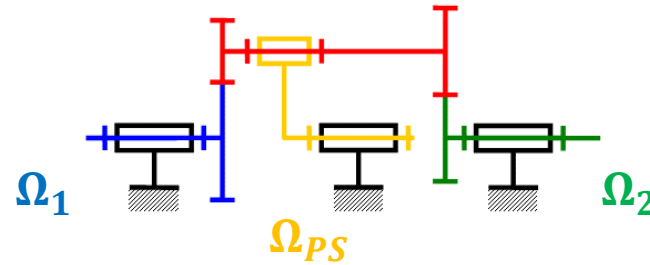
$$\frac{\Omega_C}{\Omega_M} = \frac{N_1}{N_1 + N_2} = \frac{R_1}{2(R_1 + R_{PS})}$$





Train épicycloïdal

- Autres possibilités géométriques

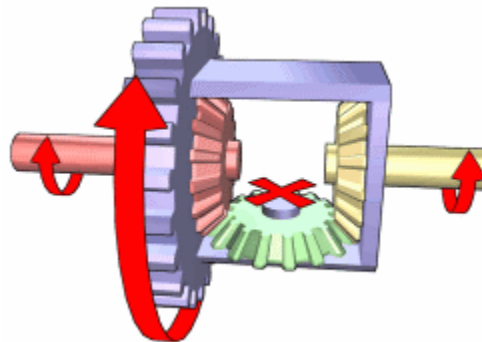




Cas du différentiel

- 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



Composants pour la conversion rotation-translation

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
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

Inconvénients

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



Vis à billes



Pignon et crémaillère

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

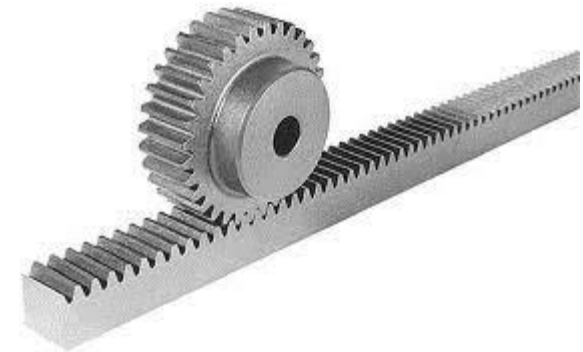
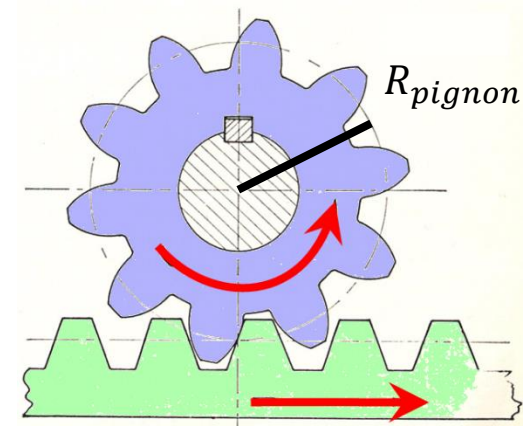
- Liaison rigide
- Réversible

Avantages

- Rendement correct

Inconvénients

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





Cabestan ou tapis roulant

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

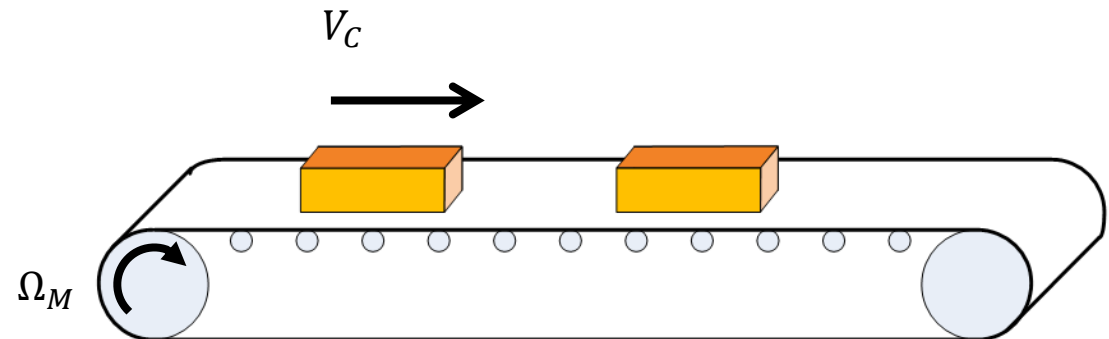
- Peu rigide
- Réversible
- Glissement possible

Avantages

- Bon rendement
- Course importante

Inconvénients

- Précision moyenne
- R faible





Came

$R = \text{variable}$

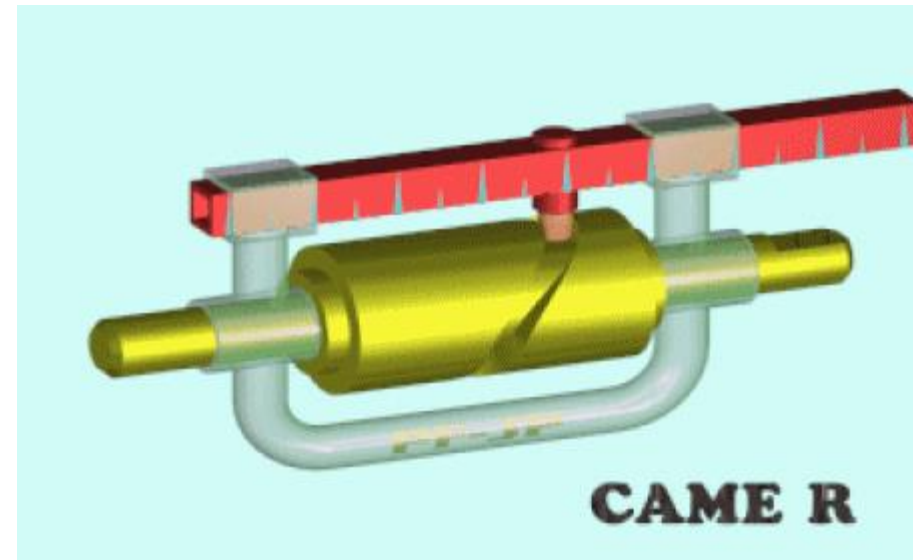
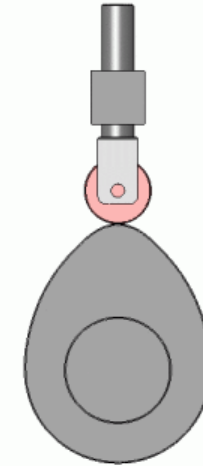
- Mouvement non régulier
- Pas toujours précis

Avantages

- Faible rendement
- Simple

Inconvénients

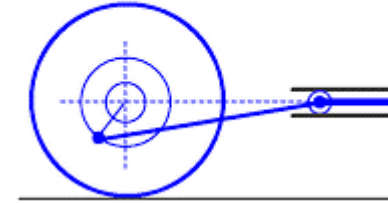
- Précision moyenne
- Généralement non réversible





Excentrique et bielle

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

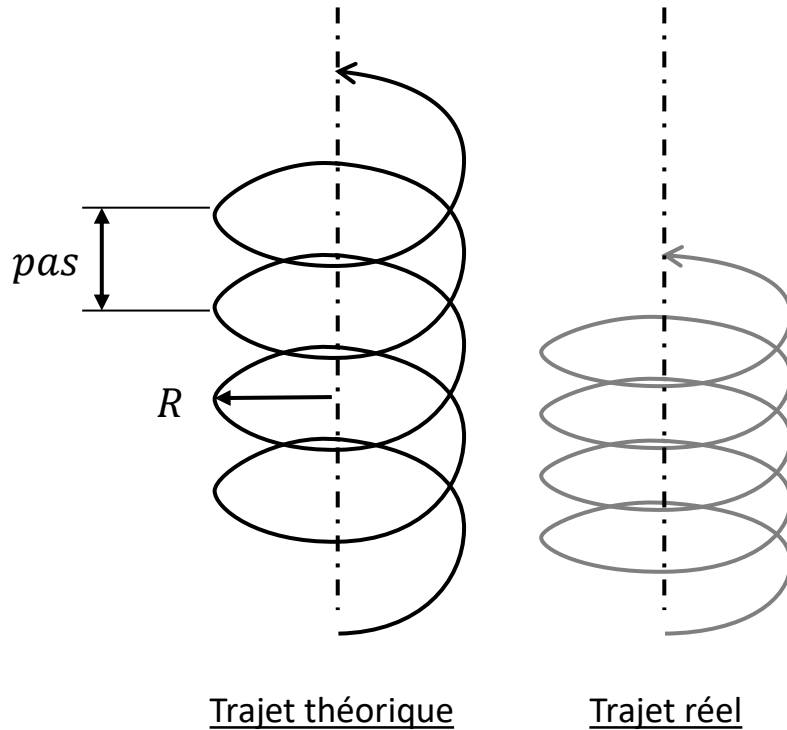


Système d'entraînement de roue de locomotive



Hélice

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



Avion à hélice



Hélice de bateau



Synthèse

Nicolas DAMAY
Maître de conférences
Département IM

www.utc.fr
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' 30' standard	> 15'	stand: 3 à 10' précis: 1 à 3'	3' à 5'	nul	nul (< 0.5')
Rendement	très bon > 0.9	faible (< 0.6) et variable	moyen 0.5 à 0.85	très bon > 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*