



C03_TD 12

Modéliser le comportement d'un transmetteur linéaire.

Sommaire

TD 1 : MODÉLISER LE COMPORTEMENT CINÉMATIQUE DES TRANSMETTEURS ET TRAINS SIMPLES..... 2

 Exercice 1.1 : RÉDUCTEUR À ARBRES COAXIAUX – TRAIN SIMPLE 2

 Exercice 1.2 : MONTE-CHARGE 3

 Exercice 1.3 : COFFRE MOTORISÉ DE 607 4

 Exercice 1.4 : RESTITUTEUR ACTIF D’EFFORT D’EMBRAYAGE 5

TD 2 : MODÉLISER LE COMPORTEMENT CINÉMATIQUE DES TRAINS ÉPICYCLOÏDAUX..... 7

 Exercice 2.1 : RÉDUCTEUR À ARBRES COAXIAUX – TRAIN ÉPICYCLOÏDAL 7

 Exercice 2.2 : TREUIL DE PONT ROULANT 8

 Exercice 2.3 : POULIE REDEX 9

 Exercice 2.4 : DIFFÉRENTIEL ET VÉHICULE EN VIRAGE 10

EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES 12

 1.1 CHARIOT DE MANUTENTION MOTORISÉ..... 12

 2.1 VARIATEUR DE VITESSE CONTINU DE LA TOYOTA PRIUS..... 13

 2.2 RÉDUCTEUR À DEUX VITESSES 14

ÉLÉMENTS DE RÉPONSE..... 15

 TD1 15

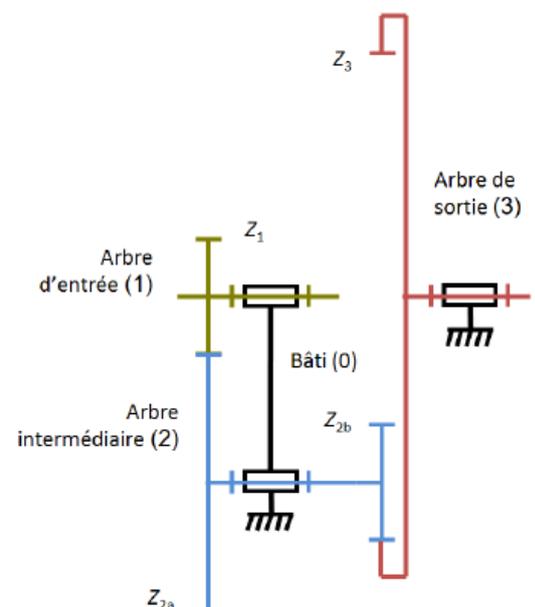
 TD2 15

 Exercices supplémentaires..... 16

TD 1 : MODÉLISER LE COMPORTEMENT CINÉMATIQUE DES TRANSMETTEURS ET TRAINS SIMPLES

Exercice 1.1 : RÉDUCTEUR À ARBRES COAXIAUX – TRAIN SIMPLE

Le schéma cinématique ci-contre représente un réducteur à train d’engrenage simple et arbres d’entrée et de sortie coaxiaux : les axes des liaisons pivots L1-0 et L3-0 sont confondus. Nombre de dents des pignons : $Z_1 = 31$ $Z_{2a}=52$ $Z_{2b}=17$ $Z_3=79$ Module de l’engrenage 1-2a : $m_1=1,5$ mm



Q1 : Compléter la représentation du réducteur en définissant les noms des transmetteurs élémentaires et les grandeurs d’entrée et de sortie cinématiques.

Q2 : Déterminer le rapport de transmission de chacun des engrenages. En déduire le rapport de réduction du réducteur.

Q3 : Déterminer l’entraxe correspondant à la distance entre les 12 axes des pivots L1-0 et L2-0.

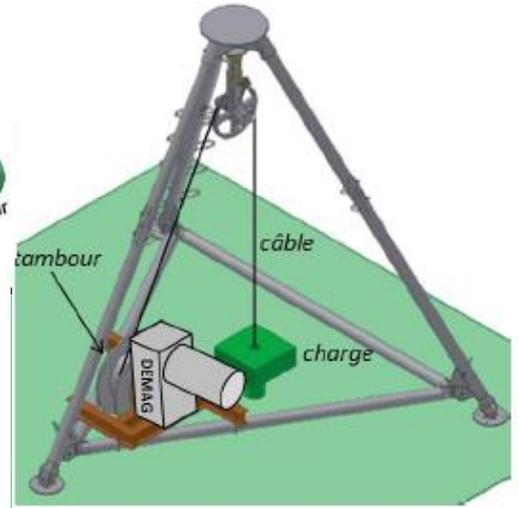
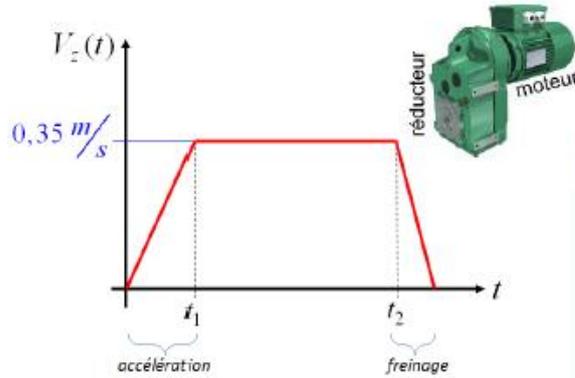
Q4 : Déterminer le module m_2 de l’engrenage 2b-3 pour que les arbres d’entrée et de sortie soient coaxiaux.

Remarque : par « correction de denture », il est possible de réaliser à peu près n’importe quel module.

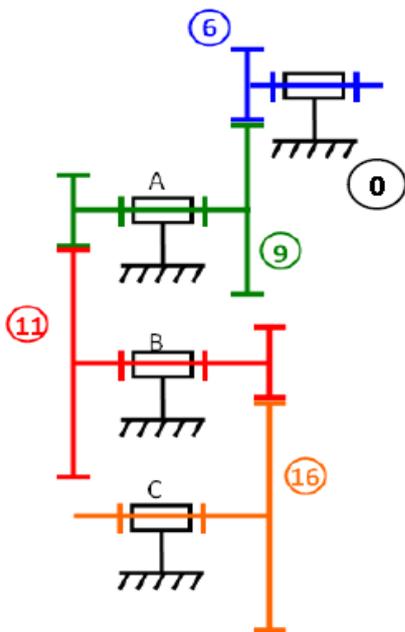
Exercice 1.2 : MONTE-CHARGE

Le monte-charge représenté ci-contre utilise un moteur (1500 tr/min) associé à un réducteur du fabricant DEMAG pour enrouler un câble sur un tambour et faire ainsi monter une charge.

Pour obtenir un temps de montée minimal, tout en limitant la norme de l'accélération pendant le démarrage qui pourrait être à l'origine de dégâts sur la charge transportée, on impose le profil de vitesse ci-contre.



Le modèle cinématique du réducteur ainsi que les caractéristiques des pignons sont donnés ci-dessous.



Caractéristiques des roues dentées :		
Rep	m	z
6	1	16
9a	1	46
9b	1	19
11a	1	59
11b	1,25	17
16	1,25	85

Objectif : Valider le choix du concepteur du monte-charge d'utiliser ce réducteur

Q1 : Décomposer la structure du réducteur en transmetteurs élémentaires en complétant la chaîne d'énergie partielle ci-dessous.



Q2 : Déterminer l'expression du rapport de réduction du réducteur. Faire l'application numérique. $i = \omega_s / \omega_e$

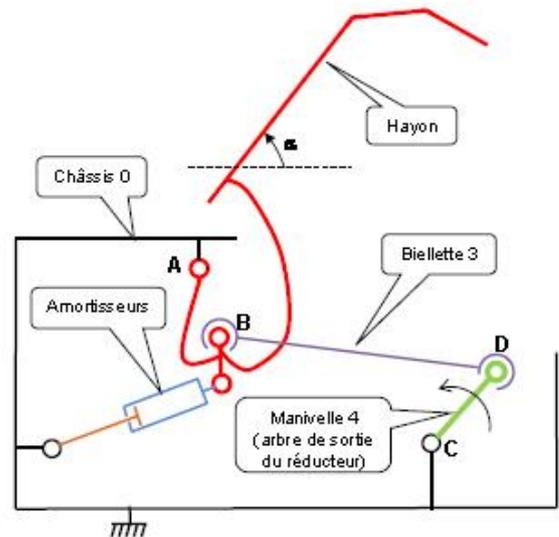
On fait l'hypothèse que pendant toute la montée de la charge, le diamètre d'enroulement des spires sur le tambour reste constant et est égal à 20 cm (et qu'il n'y a pas de glissement entre le tambour et le câble).

Q3 : Déterminer la vitesse de rotation du tambour, en tr/min, permettant d'obtenir la vitesse Vz maximale imposée.

Q4 : Conclure quant au choix du concepteur d'utiliser ce réducteur.

Exercice 1.3 : COFFRE MOTORISÉ DE 607

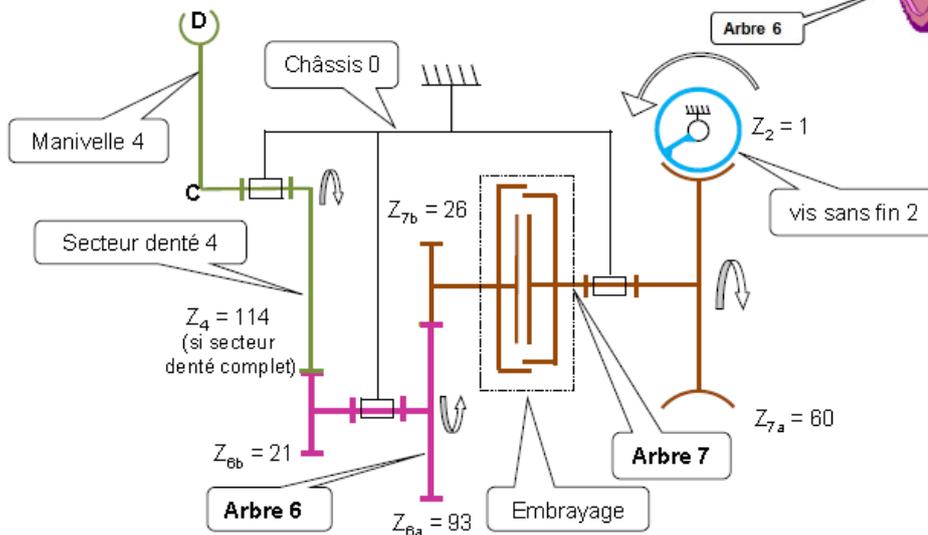
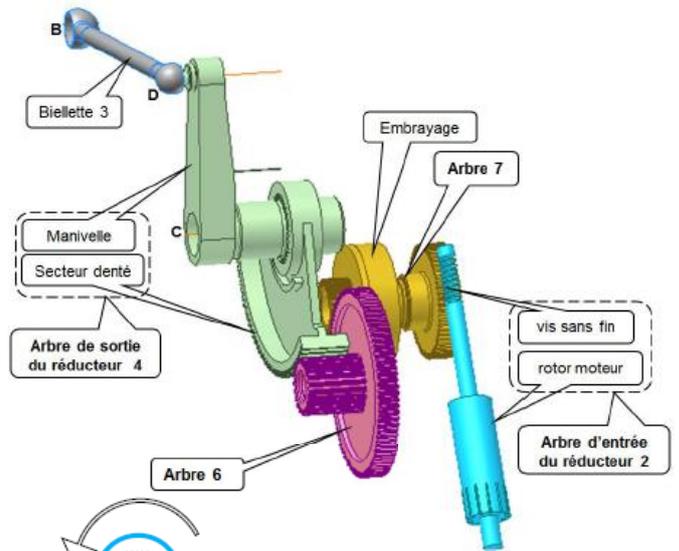
Certaines voitures sont dotées en série d'un système d'ouverture et de fermeture du hayon de coffre électrique.



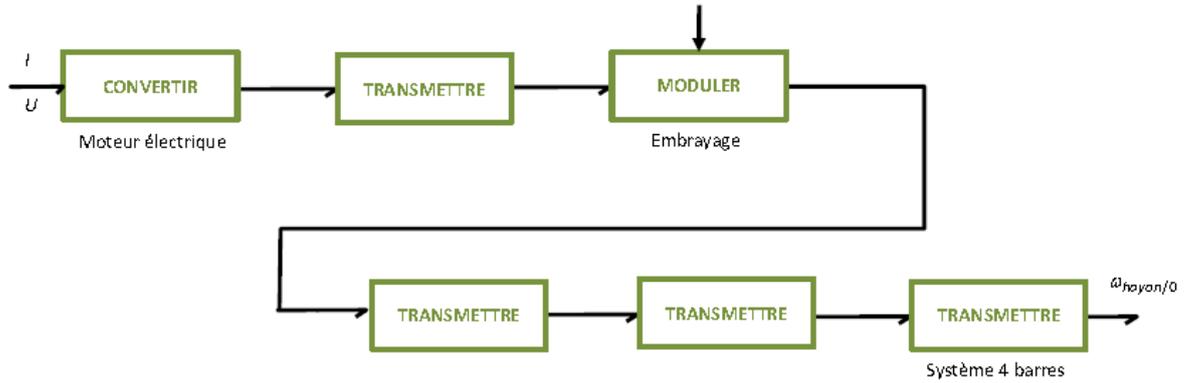
Le transmetteur non linéaire dit « système 4 barres » (CD-DB-BA-AC) dont le schéma cinématique est donné ci-avant, transforme le mouvement de rotation de l'arbre de sortie du réducteur 4 en mouvement de rotation du hayon. Le constructeur désire que le coffre motorisé mette sensiblement le même temps pour s'ouvrir qu'un coffre non motorisé, c'est à dire **entre 3 et 5 secondes**.

Objectif : valider le temps d'ouverture (ou de fermeture) du coffre prévu par le constructeur.

L'actionneur est un **moteur électrique** dont le **rotor moteur (2)** est solidaire de la vis du transmetteur roue-vis sans fin. L'effecteur est la biellette (3), composant du système 4 barres non étudié. L'ouverture est réalisée pour un angle de rotation de l'ensemble (4), **manivelle et secteur denté**, de $68,4^\circ$. La vitesse nominale du moteur est $N_m = 3300 \text{ tr/min}$.



Q1 : Compléter la chaîne d'énergie partielle en définissant les noms des transmetteurs élémentaires et les grandeurs d'entrée et de sortie cinématiques.



Q2 : Déterminer le rapport de réduction des différents transmetteurs et en déduire l'expression du rapport de transmission $\omega_{4/0} / \omega_{2/0}$.

Q3 : En déduire la vitesse de rotation $N_{4/0}$ en tr/min, si le moteur tourne à sa vitesse nominale, et le temps de fermeture T du coffre. Conclure.

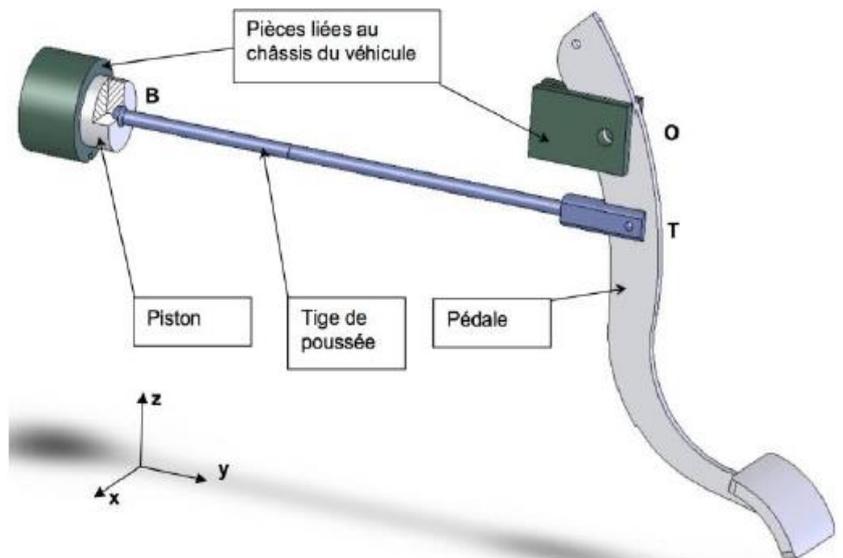
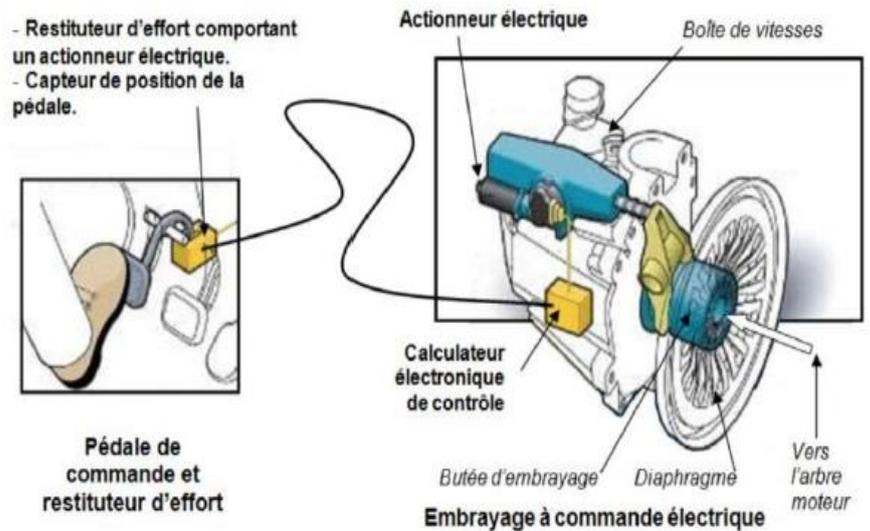
Exercice 1.4 : RESTITUTEUR ACTIF D'EFFORT D'EMBRAYAGE

La conduite en ville nécessite des répétitions fréquentes de la manœuvre d'embrayage / débrayage. Pour améliorer le confort de conduite, on peut substituer la force musculaire du conducteur par une commande électrique de l'embrayage. Dans ce cas, il devient nécessaire de renseigner l'unité de contrôle électronique sur les intentions du conducteur à partir d'un capteur de position placé sur la pédale d'embrayage.

L'automatisation de la fonction embrayage permet de corriger les éventuelles fausses manœuvres du conducteur, d'assurer la fonction anti-calage du moteur et de participer aux fonctions d'anti-patinage et d'anti-blocage des roues.

En cas d'utilisation de la pédale, il faut recréer les sensations au conducteur, c'est-à-dire une résistance mécanique proche de celle d'une commande mécanique classique. Pour réaliser ce système de retour d'effort la solution peut être passive (un ressort, par exemple) ou utiliser un système actif (à l'aide d'un actionneur électrique), objet de l'étude.

L'étude porte sur un démonstrateur de **restituteur actif d'effort** à la pédale. Le démonstrateur permet de tester différentes lois de restitution d'effort pour rechercher la plus ergonomique. Le système contrôle, par l'intermédiaire

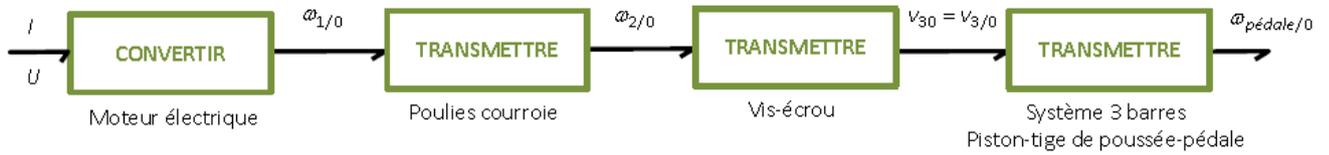
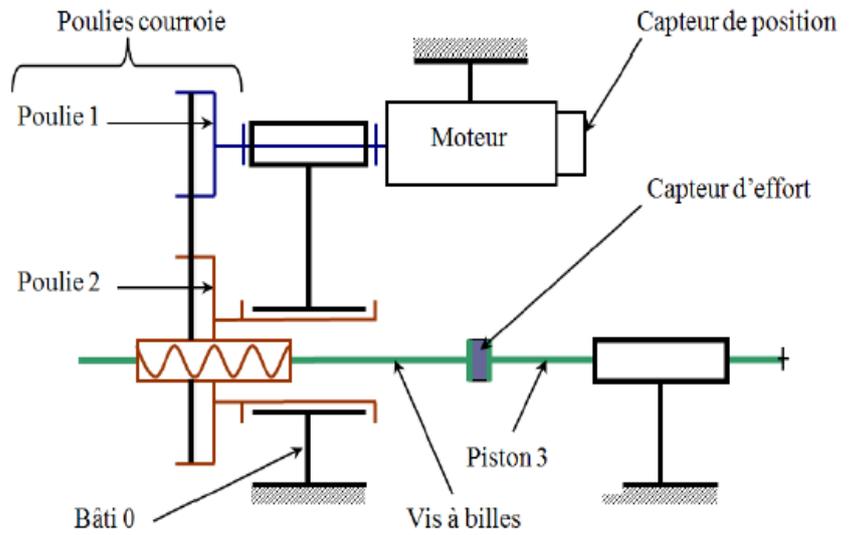


d'un **piston**, l'effort sur la **tige de poussée** de la **pédale**.
Le schéma du restituteur actif est donné ci-contre.

Le pas de la vis est $p_v = 10\text{mm}$.
Le diamètre de la poulie 2 est le double de celui de la poulie 1.

Q1 : Compléter la chaîne d'énergie partielle en définissant les noms des transmetteurs et les grandeurs d'entrée et de sortie cinématiques.

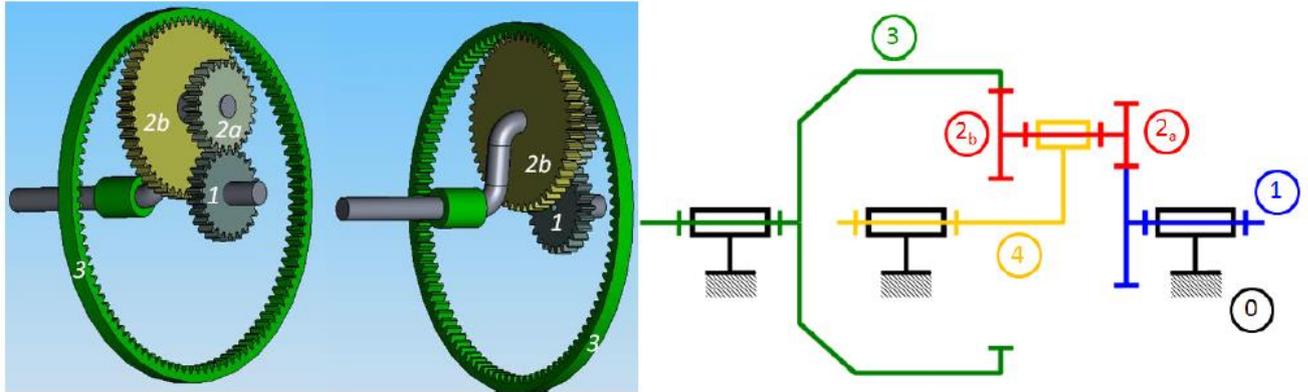
Q2 : Définir la loi entrée-sortie entre la vitesse de translation du piston 3 et la vitesse de rotation du moteur 1.



TD 2 : MODÉLISER LE COMPORTEMENT CINÉMATIQUE DES TRAINS ÉPICYCLOÏDAUX

Exercice 2.1 : RÉDUCTEUR À ARBRES COAXIAUX – TRAIN ÉPICYCLOÏDAL

Un train épicycloïdal est représenté ci-dessous à l'aide de son schéma cinématique.



Q1 : Compléter les tableaux suivants représentant les différentes configurations possibles de ce train.

Satellite	Porte satellite	Planétaire A	Planétaire B	Relation de Willis	Raison de base du train

Pièce d'entrée	Pièce de sortie	Pièce fixe/bâti 0	Relation de Willis simplifiée avec e et s, et en tenant compte de la pièce qui est fixe	Rapport de transmission : $i = \frac{\omega_e}{\omega_s}$
1	4	3		
1	3	4		
3	4	1		
4 = 3	1			
1 = 3	4			

Les rapports inverses sont possibles en échangeant entrée et sortie.

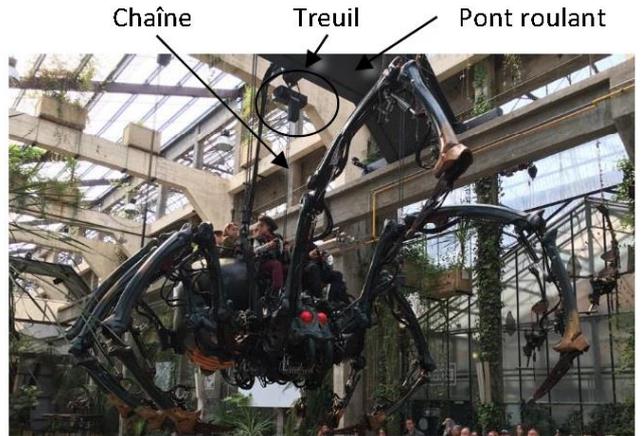
Exercice 2.2 : TREUIL DE PONT ROULANT

Dans la galerie des machines de Nantes, certains « insectes » de grandes tailles, comme l'araignée mécanique, sont animés de mouvements pilotés par les visiteurs. Mais leur poids et, probablement, des raisons de sécurité font que leur positionnement dans le hall, horizontal et vertical, est réalisé par l'intermédiaire d'un pont roulant.

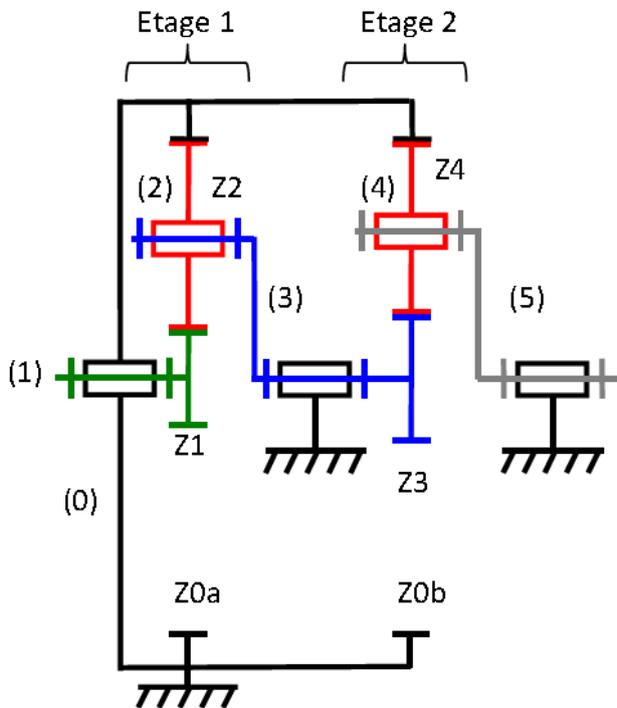
L'araignée est ainsi suspendue au pont roulant par une chaîne reliée à un treuil. Le treuil est composé d'un moteur électrique, d'un réducteur et d'une poulie de diamètre $D=15$ cm.

La vitesse de rotation maximale du moteur est de 3000 tr/mn.

Le modèle cinématique du train est donné ci-dessous. L'entrée du réducteur est notée (1).



Objectif : vérifier que la vitesse d'enroulement de la chaîne peut atteindre 0,6 m/s.



	Nb de dents Z	Module (mm)
Pignon 1	21	
Roue 2		2
Couronne 0a	123	
Pignon 3		3
Roue 4	34	
Couronne 0b	91	

Remarque : les deux couronnes sont notées 0a et 0b. Elles font parties du même ensemble cinématique (i.e. le bâti 0).

Q1 : Décomposer la structure du réducteur en 2 transmetteurs élémentaires (nommés étages) et compléter le schéma ci-dessous. Identifier les composants des trains épicycloïdaux.



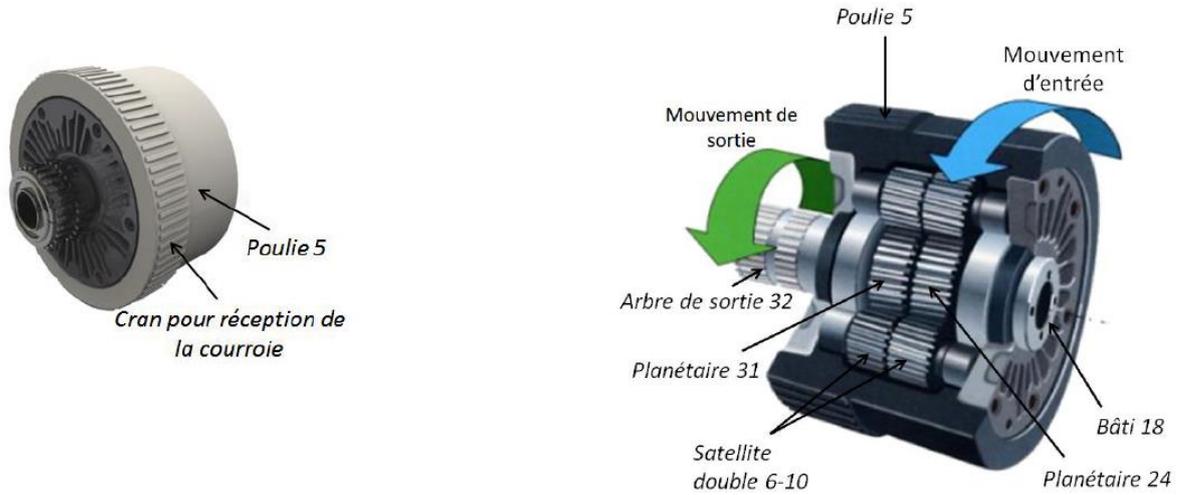
Q2 : Compléter le tableau ci-dessus. Que vaut le diamètre primitif de la roue.

Q3 : Déterminer littéralement, en fonction du nombre de dents, le rapport de transmission ω_e / ω_s . On notera λ_1 et λ_2 les raisons de base de chaque étage. Réaliser l'application numérique.

Q4 : Conclure vis-à-vis du cahier des charges.

Exercice 2.3 : POULIE REDEX

Le système poulie Redex est un réducteur à poulie (voir photos ci-dessous).
 Une courroie crantée (non représentée) impose le mouvement d'entrée à la poulie 5.
 Les trois satellites doubles 6-10 sont en liaison pivot par rapport à la poulie 5.
 Le planétaire 24 est solidaire du bâti 18.
 Le planétaire 31 est solidaire de l'arbre de sortie 32.

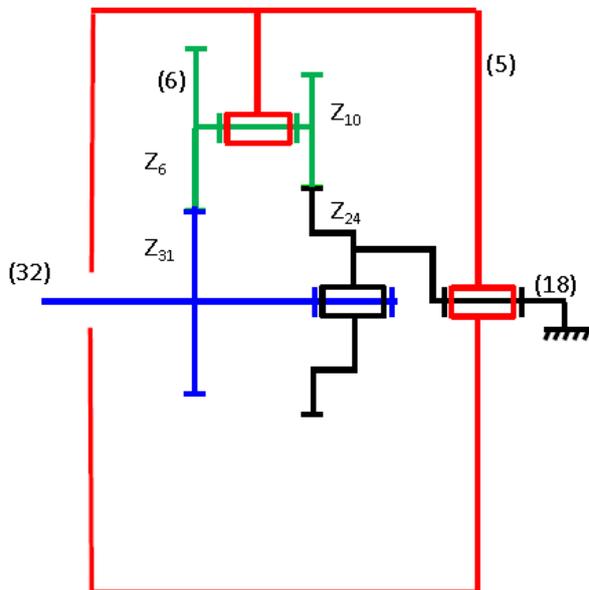


Q1 : Déterminer l'expression du rapport de réduction $r = \frac{\omega_s}{\omega_e} = \frac{\omega_{32/18}}{\omega_{5/18}}$ en fonction des nombres de dents Z_i des roues dentées.

Q2 : Faire l'application numérique.

Q3 : Déterminer le module de l'engrenage 31-6.

Q4 : Retrouver le résultat de la question 2 en inversant l'ordre des planétaires dans la relation de Willis, par rapport au choix fait précédemment



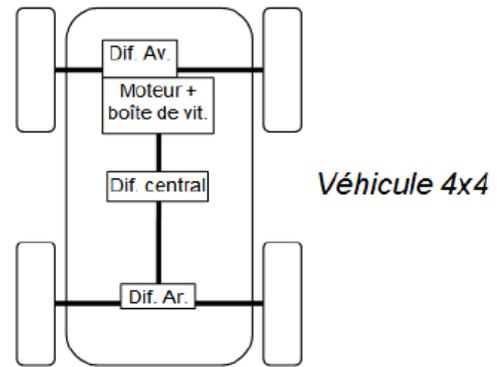
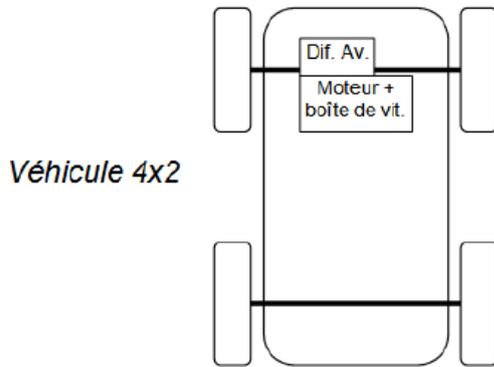
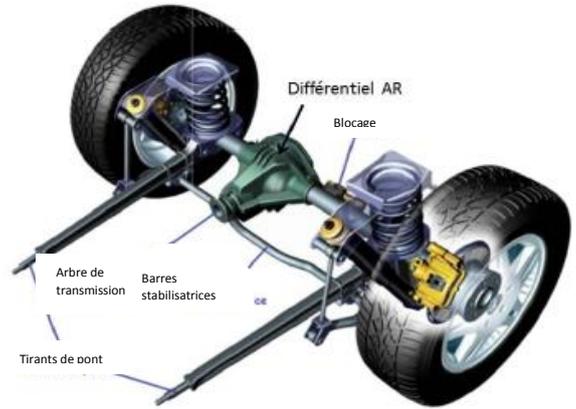
Caractéristiques des roues dentées				
N°	24	10	6	31
m	1,75	1,75		
Z	49	31	34	46

Exercice 2.4 : DIFFÉRENTIEL ET VÉHICULE EN VIRAGE

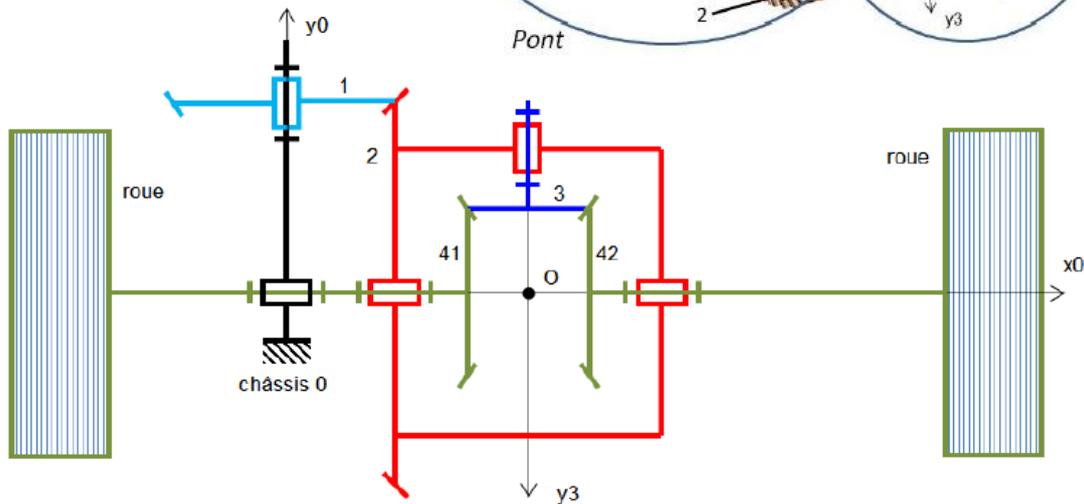
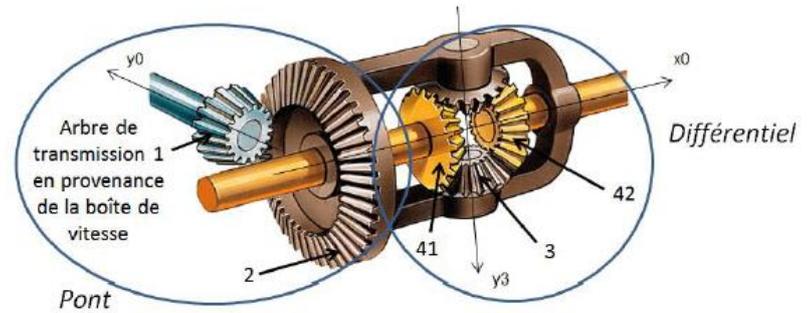
Le **différentiel** est présent sur toutes les voitures.
 Il permet aux roues motrices (entraînées par le moteur) de tourner à des vitesses différentes pour faciliter la prise de courbe et limiter l'usure des pneus.

Architecture structurelle de la transmission.

Sur un véhicule à 2 roues motrices (4x2), un seul différentiel est installé entre les roues droite et gauche.
 Sur un véhicule à 4 roues motrices (4x4), trois différentiels sont installés entre les ponts avant et arrière, et entre les roues droite et gauche de chaque pont.



Le pont qui est associé au différentiel permet une réduction supplémentaire par rapport à celle effectuée par la boîte de vitesse.



Un différentiel est un train d'engrenage épicycloïdal dit **sphérique**.

- Q1** : Après avoir identifié les composants du train épicycloïdal, déterminer la raison du train puis la relation de Willis.
- Q2** : Quelles conditions imposent la vitesse de rotation des roues en conduite « normale » ?
- Q3** : Déterminer la relation entre les vitesses lorsque le véhicule est en ligne droite. Que vaut $\omega_{3/2}$, dans cette condition, ?

EXERCICES SUPPLÉMENTAIRES

1.1 CHARIOT DE MANUTENTION MOTORISÉ

On s'intéresse à un chariot motorisé du fabricant HYSTER utilisé pour assister des opérateurs dans des tâches de manutention de charges lourdes.

La rotation du timon autour des différents axes permet d'orienter et/ou freiner le chariot.

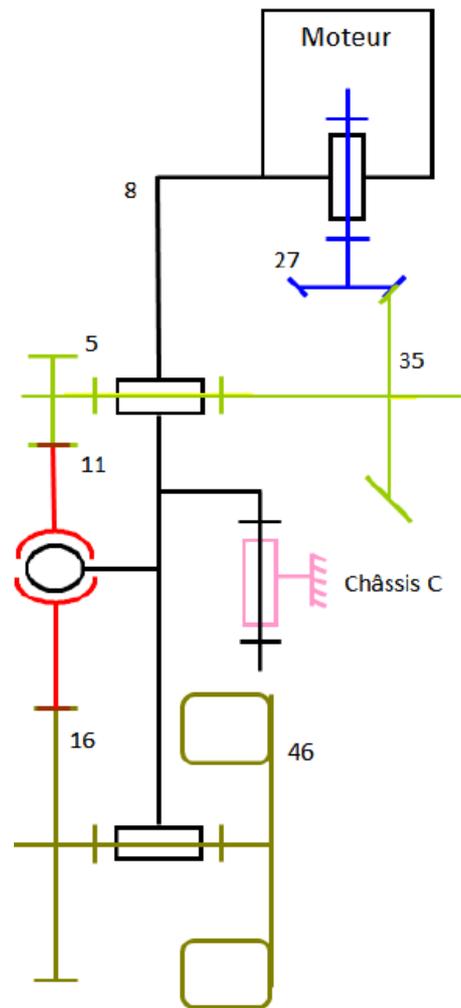
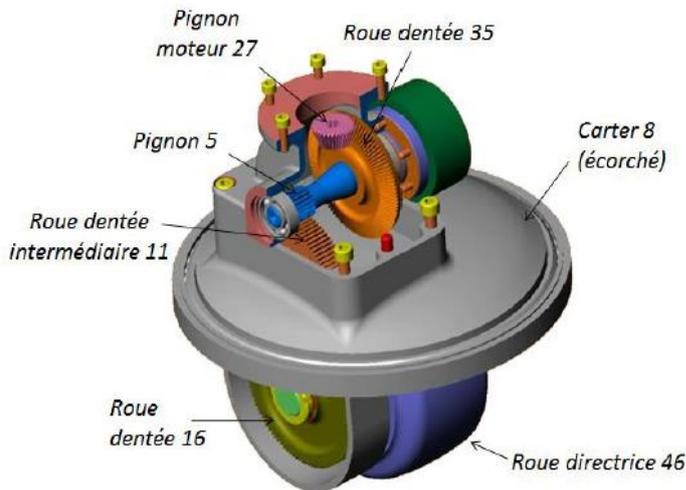
Les commandes des vitesses avant et arrière et la commande d'élévation de la fourche qui supporte la charge sont placées en bout du timon, sous la main de l'utilisateur.

L'étude porte plus particulièrement sur l'unité **motrice** et **directrice** du chariot dont une représentation technique 3D, ainsi qu'un schéma cinématique sont donnés ci-dessous. Cet ensemble se compose :

- d'un carter 8 qui peut pivoter par rapport au châssis C du chariot autour de l'axe vertical ;
- d'un moteur à courant continu (non représenté sur la représentation 3D), 24 Volts, à axe vertical, alimenté par

batteries. $N_{max}=1500$ tr/min ;

- d'une chaîne cinématique composée de :
- un engrenage conique à denture droite :
 - pignon moteur 27 : $Z_{27} = 16$ dents, $m=1$ mm.
 - roue dentée 35 : $Z_{35} = 84$ dents,
- un train d'engrenages cylindriques à denture droite :
 - pignon 5 : $Z_5 = 14$ dents, $m=1,5$ mm,
 - roue dentée intermédiaire 11 : $Z_{11} = 56$ dents,
 - roue dentée 16 : $Z_{16} = 75$ dents,
- une roue directrice 46 dont le rayon est de $R_{46} = 90$ mm.



Exigence	Critère	Niveau
Présenter peu de danger pour l'environnement	Vitesse d'avance maximale	± 2 km/h 5%

Q1 : Déterminer le rapport de transmission $i = \omega_{46/8} / \omega_{27/8}$ du train d'engrenage.

Q2 : Déterminer la vitesse d'avance du chariot 8 par rapport au sol 0 en ligne droite lorsque le moteur tourne à vitesse maximale. Vous préciserez les hypothèses. Conclure vis-à-vis de l'exigence.

Q3 : Déterminer les modules des différents pignons ainsi que l'entraxe a_{5-16} entre la liaison L5-8 et L46-8.

2.1 VARIATEUR DE VITESSE CONTINU DE LA TOYOTA PRIUS

L'hybridation des véhicules de tourisme est une des solutions mises en œuvre afin de diminuer la consommation énergétique du transport des particuliers.

La technologie hybride de TOYOTA (cf. schémas ci-dessous) associe un **moteur thermique** à combustion interne à essence (**MT**) avec un **moteur électrique (ME)**, une **génératrice électrique (GE)** et une batterie de puissance. Moteur électrique et génératrice sont réversibles.

La transmission comprend, à la place de la boîte de vitesse usuelle, un train épicycloïdal fonctionnant en **réducteur à rapport continument variable (CVT, Continuously Variable Transmission)**.

La puissance en sortie du moteur thermique est transmise, grâce au train épicycloïdal, à la **chaîne silencieuse** et à la génératrice. La **génératrice est asservie en vitesse**.

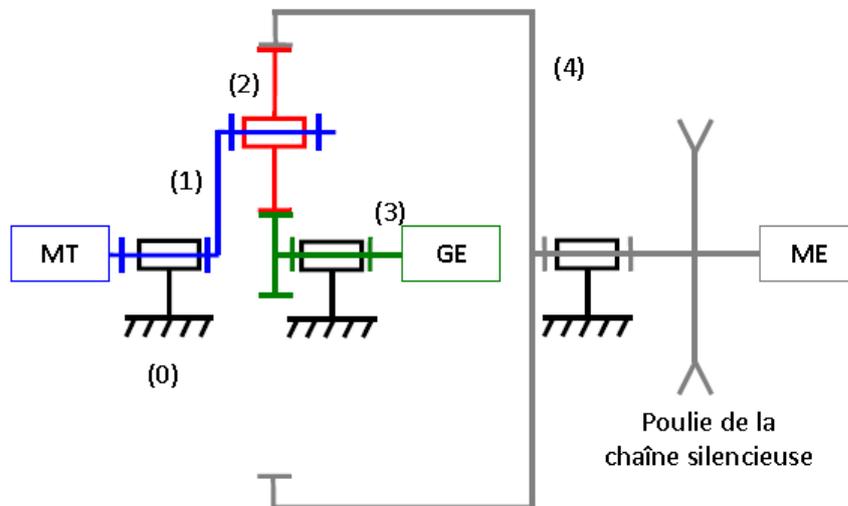
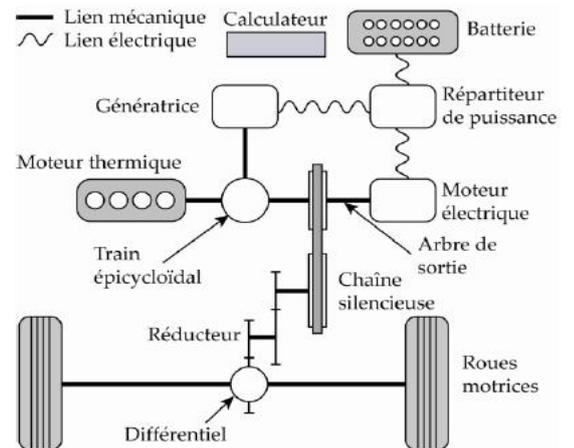
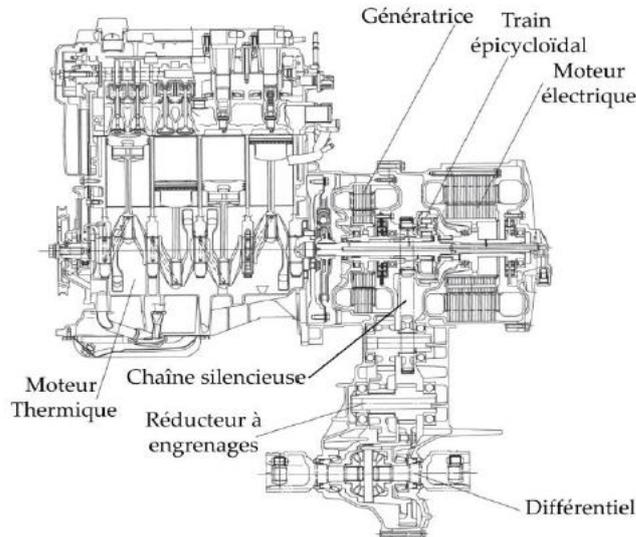
Le moteur électrique entraîne aussi la chaîne silencieuse, seul ou en complément du moteur thermique. Il récupère également l'énergie cinétique ou potentielle du véhicule lors des phases de ralentissement.

La chaîne silencieuse entraîne un **réducteur** de rapport 0,25, lui-même relié au **différentiel**.

Le train épicycloïdal est utilisé ainsi :

- le moteur thermique à combustion interne (MT) est relié au porte-satellite (1) ;
- la génératrice électrique (GE) est reliée au planétaire intérieur (3) ;
- l'arbre de sortie (S) est relié au planétaire extérieur (4) et au moteur électrique (ME).

Le référentiel choisi (0) est lié au carter du groupe motopropulseur. On pose $\omega_m = \omega_{1/0}$, $\omega_g = \omega_{3/0}$ et $\omega_s = \omega_{4/0}$. Le nombre de dents des pignons du train sont : $Z_3=30$, $Z_4=78$, $Z_2=23$ avec (2) un satellite.



Q1 : Déterminer la raison et la relation de Willis du train en fonction de ω_m , ω_g et ω_s

Q2 : Déterminer le rapport ω_s / ω_m en fonction de λ et du rapport ω_g / ω_m .

Q3 : En quoi ce système répond bien à la fonction d'un CVT ? Quel est l'élément de contrôle du rapport de réduction ?

Q4 : Déterminer le rapport ω_g / ω_m lorsque le véhicule est à l'arrêt, moteur thermique allumé (phase de démarrage ou de recharge des batteries à l'arrêt).

Considérons la situation de fonctionnement suivante :

- vitesse d'avance du véhicule de 90 km/h correspondant à une vitesse de rotation de (4) de 3250 tr/mn,
- moteur thermique proche de son point de rendement optimal supposé à 2700 tr/mn.

Q5 : Déterminer la vitesse de rotation du rotor du générateur (3).

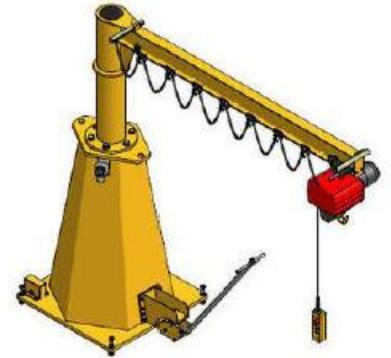
2.2 RÉDUCTEUR À DEUX VITESSES

Le réducteur à trains épicycloïdaux représenté ci-dessous est utilisé dans les appareils de manutention et de levage lorsqu'on a besoin d'une grande vitesse lors d'une phase d'approche ou de dégagement, et d'une petite vitesse lors d'une phase de travail.

Fonctionnement « Petite vitesse » (PV) :

Seul le moteur PV tourne à 1500 tr/min. La couronne 2b de l'ensemble (2) est entraînée en rotation par l'intermédiaire de la roue 2a et de la vis sans fin (1) liée à l'arbre moteur PV.

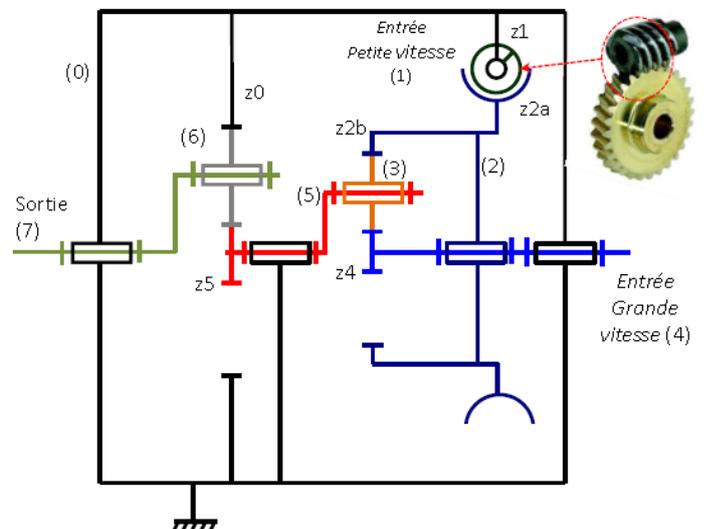
Le pignon (4) est maintenu fixe par le frein du moteur GV (Grande Vitesse).



Fonctionnement « Grande vitesse » (GV) :

Les deux moteurs GV et PV tournent en même temps à 1500 tr/min.

(1)	Vis sans fin (entrée PV)	1 filet – pas à droite
2a	Roue liée à (2)	$z_{2a} = 41$ dents
2b	Couronne liée à (2)	$z_{2b} = 83$ dents
(3)	Pignon satellite	$z_3 = 32$ dents
(4)	Arbre d'entrée GV	$z_4 = 19$ dents ; $m = 1,25$ mm
(5)	Pignon porte satellite	$z_5 = 17$ dents
(6)	Pignon satellite	$z_6 = 31$ dents
(7)	Arbre de sortie	
(0)	Carter avec couronne fixe	$z_0 = 79$ dents ; $m = 1,8$ mm



La configuration est telle que les vitesses de rotation $\cdot 1/0$ et $\cdot 2/0$ sont de même signe. En fonctionnement grande vitesse, $\cdot 1/0$ et $\cdot 4/0$ sont aussi de même signe.

Q1 : Déterminer les relations de Willis associées aux 2 trains épicycloïdaux.

Q2 : Déterminer la vitesse de rotation de l'arbre de sortie 7 en fonctionnement « Petite Vitesse », puis en fonctionnement « Grande Vitesse ».

ÉLÉMENTS DE RÉPONSE

TD1

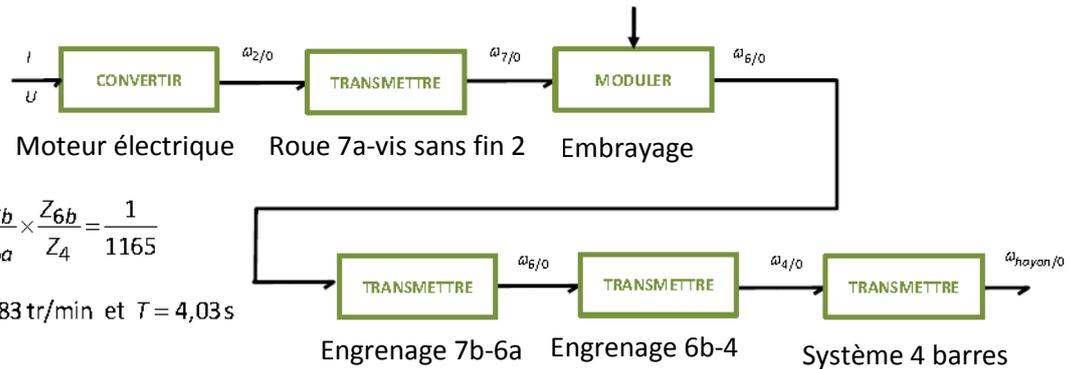
1.1 Réducteur à arbres coaxiaux

$$Q2 : \frac{\omega_{3/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{-Z_1}{Z_{2a}} \times \frac{Z_{2b}}{Z_3} = \frac{-1}{7,8} \quad Q3 : a_{12} = 62,5 \text{ mm} \quad Q4 : m_2 = 2,01 \text{ mm}$$

1.2 Monte-charge

$$Q2 : i = -0,022 \quad Q3 : V_z = R \omega_{1/0}, N_{\text{tambour}} = \frac{V_z}{2\pi R_{\text{tambour}}} = 33,4 \text{ tr/mn} \quad Q4 : N_{\text{moteur}} = 1518 \text{ tr/mn}$$

1.3 Coffre motorisé de 607



$$Q2 : \left| \frac{\omega_{4/0}}{\omega_{2/0}} \right| = \frac{Z_2}{Z_{7a}} \times \frac{Z_{7b}}{Z_{6a}} \times \frac{Z_{6b}}{Z_4} = \frac{1}{1165}$$

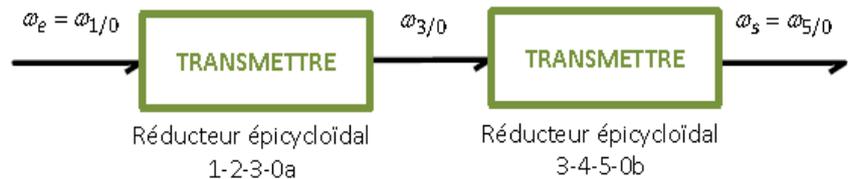
$$Q3 : N_{4/0} = \frac{N_{2/0}}{1165} = 2,83 \text{ tr/min et } T = 4,03 \text{ s}$$

1.4 Restituteur actif d'effort d'embrayage

$$Q2 : v_{30} = \frac{p_v}{4\pi} \omega_{1/0}$$

TD2

2.2 Treuil de pont roulant



$$\text{Deuxième étage } \omega_{3/0} + (\lambda_2 - 1)\omega_5 = 0$$

$$\frac{\omega_e}{\omega_s} = 33,99$$

Q1 :

$$Q2 : Z_2 = 51, Z_3 = 23, D_{0a} = 246 \text{ mm}$$

$$Q3 : \text{premier étage } \omega_e + (\lambda_1 - 1)\omega_{3/0} = 0$$

$$Q4 : v_{\text{max}} = 0,69 \text{ m/s}$$

2.3 Poulie Redex

$$Q1 : \frac{\omega_s}{\omega_e} = 1 - \frac{Z_6}{Z_{31}} \frac{Z_{24}}{Z_{10}} \quad Q2 : -0,17 \quad Q3 : m_2 = 1,75 \text{ mm}$$

2.4 Différentiel et véhicule en virage

$$Q1 : \lambda = -1 \quad \omega_{2/0} = \frac{\omega_{41/0} + \omega_{42/0}}{2}$$

Exercices supplémentaires

1.1 Chariot de manutention motorisé

$$Q1 : i = \left| \frac{\omega_{46/8}}{\omega_{27/8}} \right| = 0,035 \quad Q2 : v_{80} = 1,78 \text{ km/h} \quad Q3 : a_{5-16} = 150,75 \text{ mm}$$

2.1 Variateur de vitesse continu de la Toyota Prius

$$Q1 : \lambda = -2,6 \text{ et } \omega_g - \lambda \omega_s + (\lambda - 1) \omega_m = 0$$

$$Q2 : \frac{\omega_s}{\omega_m} = \frac{1,8}{1,3} - \frac{1}{2,6} \frac{\omega_g}{\omega_m} \quad Q4 : \frac{\omega_g}{\omega_m} = 3,6 \quad Q5 : \omega_g = 1270 \text{ tr/mn}$$

2.2 Réducteur à deux vitesses

$$Q1 : \text{train 1 } \omega_{4/0} - \lambda_1 \omega_{2/0} + (\lambda_1 - 1) \omega_{5/0} = 0 \text{ avec } \lambda_1 = -4,37$$

$$Q2 : \frac{\omega_{2/0}}{\omega_{1/0}} = \frac{1}{41}$$

$$\text{train 2 } \omega_{5/0} + (\lambda_2 - 1) \omega_3 = 0 \text{ avec } \lambda_2 = -4,65$$

$$\text{Petite vitesse } \omega_{4/0} = 0 \text{ et } \omega_e = \omega_{1/0} \cdot \omega_s = \frac{-\lambda_1}{(1-\lambda_1)(1-\lambda_2)} \frac{z1}{z2a} \omega_e = \frac{1}{284} \omega_e \quad N_s = 5,3 \text{ tr/mn}$$

$$\text{Grande vitesse } \omega_e = \omega_{1/0} = \omega_{4/0} \quad \omega_s = \frac{\left(1 - \lambda_1 \frac{z1}{z2b}\right)}{(1-\lambda_1)(1-\lambda_2)} \omega_e = \frac{1}{27,4} \omega_e \quad N_s = 54,8 \text{ tr/mn.}$$