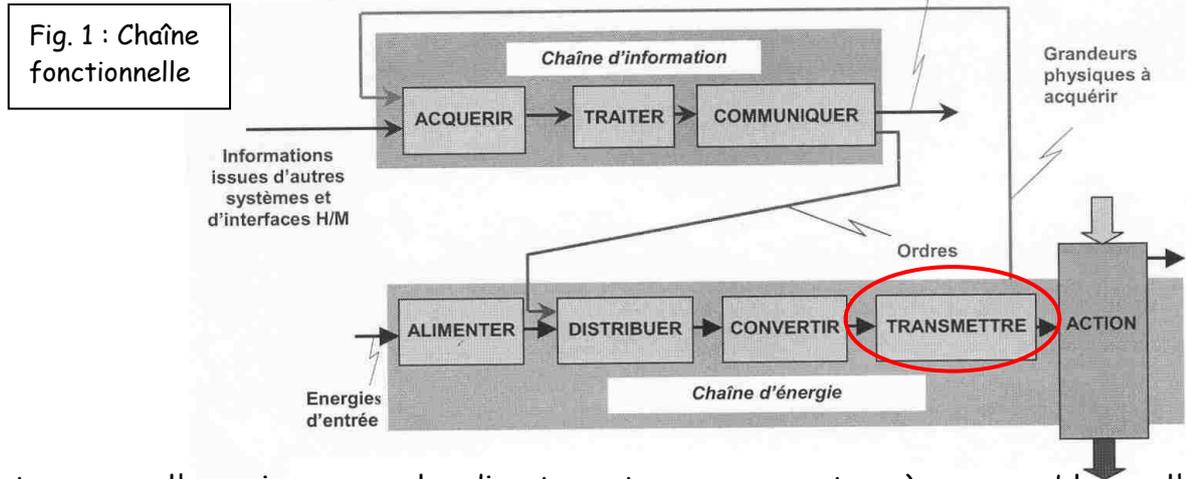


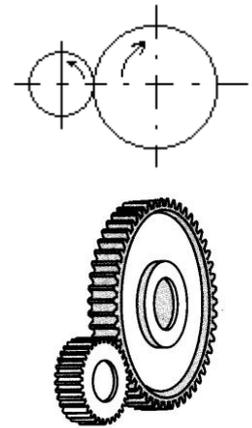
Engrenages, trains d'engrenages, systèmes roues et vis sans fin, trains épicycloïdaux



Il est rare que l'on puisse accoupler directement un organe moteur à un ensemble que l'on désire entraîner. Il convient, en général, de disposer entre eux un ensemble réducteur ou multiplicateur de vitesse.

Dans le cas des *roues de friction*, l'entraînement se fait par *adhérence* ; par conséquent le couple à transmettre se trouve très limité.

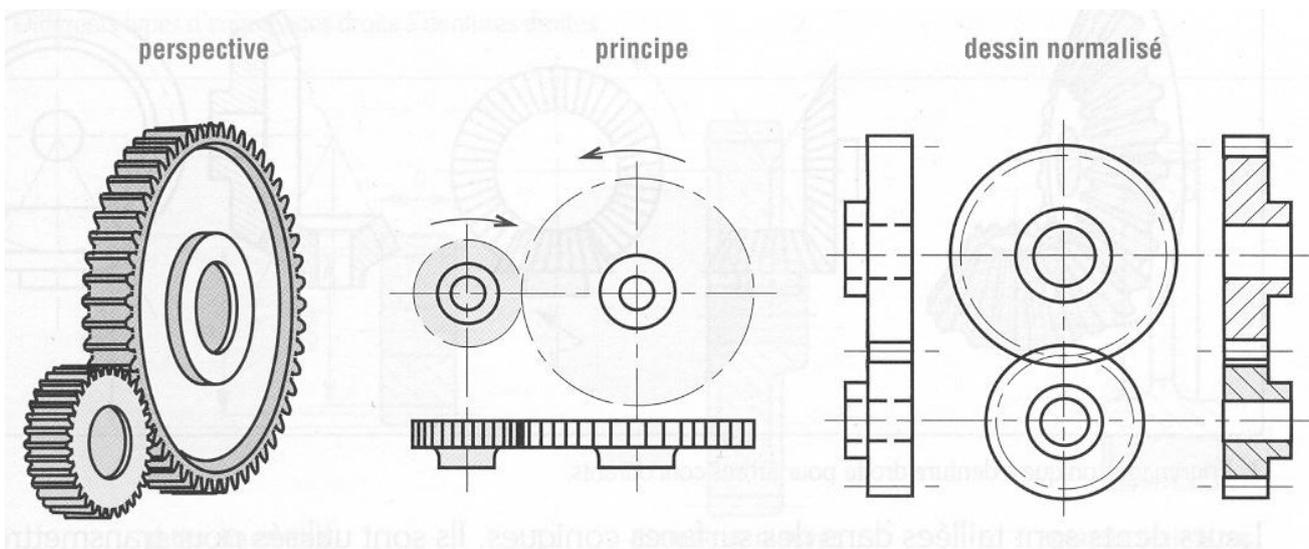
Les solutions par *engrenages* (fabrication d'obstacles (denture) sur les roues de friction) s'imposent le plus souvent grâce, à leur *fiabilité*, à leur capacité à transmettre des *couples*, des *vitesses* et des *puissances importants*, et à leur *excellent rendement* (≈ 0.95)



I. Différents types d'engrenages :

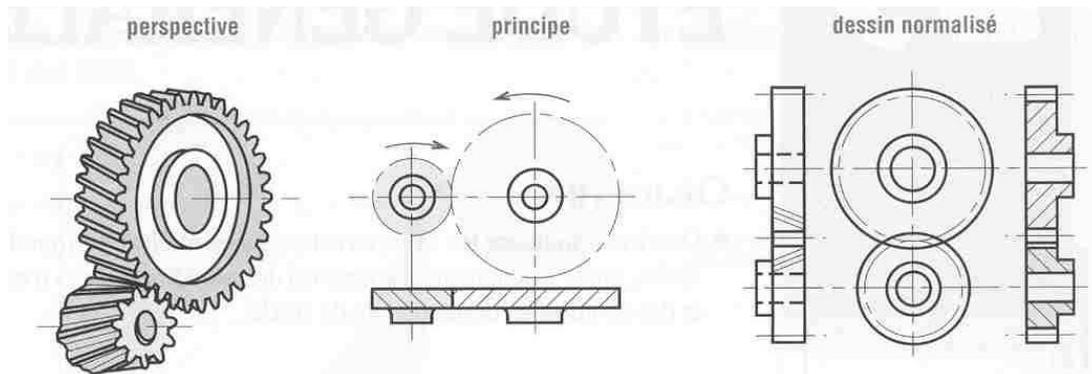
Définition : on appelle *engrenage* l'ensemble des 2 roues dentées engrénant l'une avec l'autre.

I.1 : engrenages droits (ou parallèles) à denture droite :



Les plus simples et les plus économiques, ils sont utilisés pour transmettre le mouvement et la puissance entre 2 arbres parallèles. Les dents des 2 roues de l'engrenage sont parallèles à l'axe de rotation des arbres.

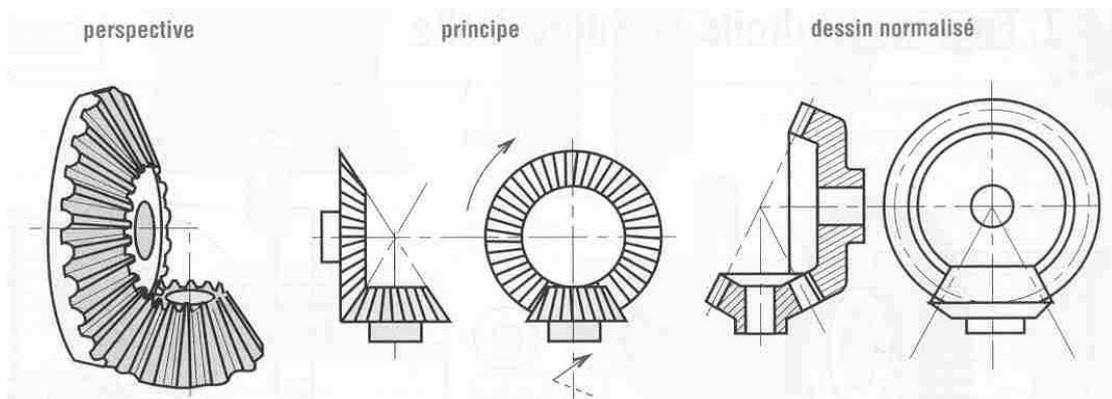
I.2 : engrenages droits (ou parallèles) à denture hélicoïdale :



De même usage que les précédents, ils sont très utilisés en transmission de puissance ; les dents des roues sont inclinées par rapport à l'axe de rotation des 2 arbres.

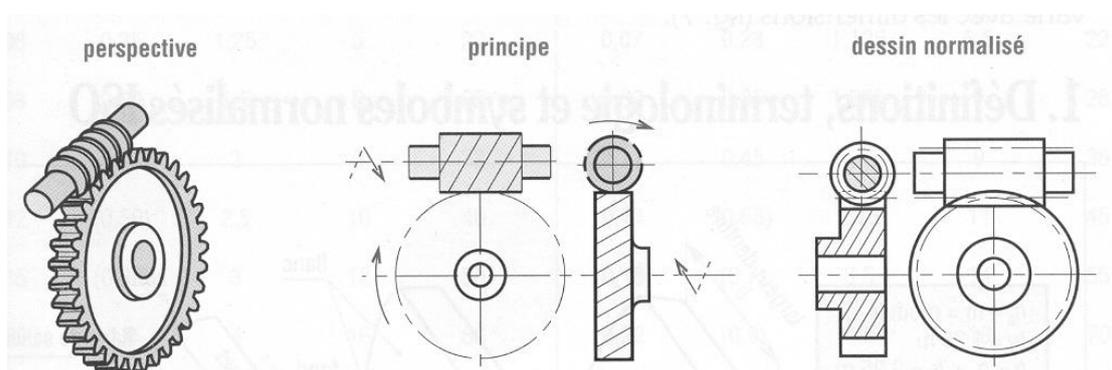
A taille égale, ils sont plus performants (et plus silencieux) que les précédents pour transmettre puissance et couple (2 ou 3 couples de dents en prise simultanément).

I.3 : engrenages coniques :



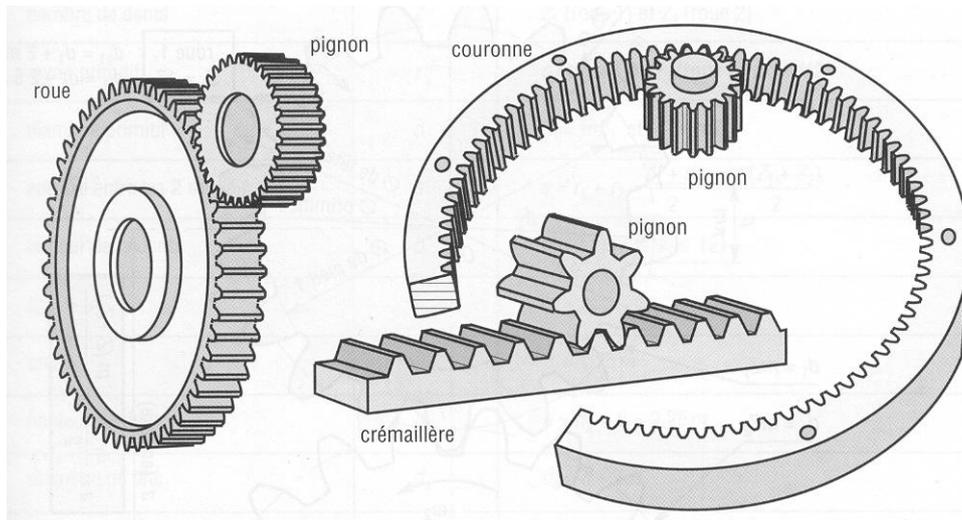
Leurs dents sont taillées dans des surfaces coniques. Ils sont utilisés pour transmettre le mouvement entre des arbres concourants, perpendiculaires ou non. La denture peut être droite, mais aussi hélicoïdale ou spirale.

I.4 : engrenages roue et vis sans fin :

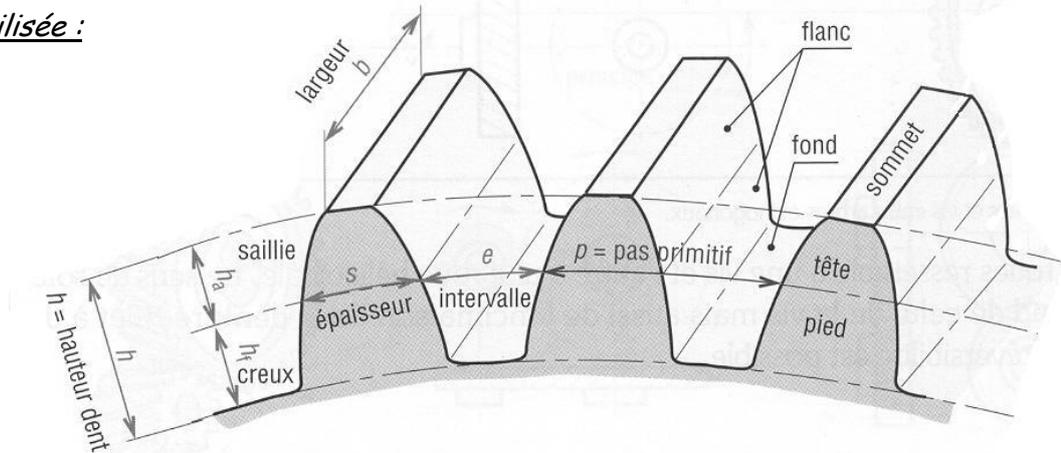


L'une des roues ressemble à une vis et l'autre à une roue hélicoïdale. Le sens de rotation de la roue dépend de celui de la vis mais aussi de l'inclinaison de la denture, filet à droite ou à gauche. L'irréversibilité est possible.

II. Caractéristiques principales des engrenages droits à denture droite :



Terminologie utilisée :

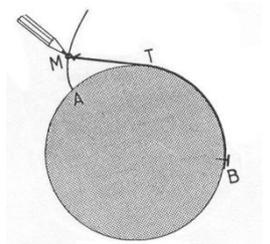


autres caractéristiques :

• **Forme de la denture**

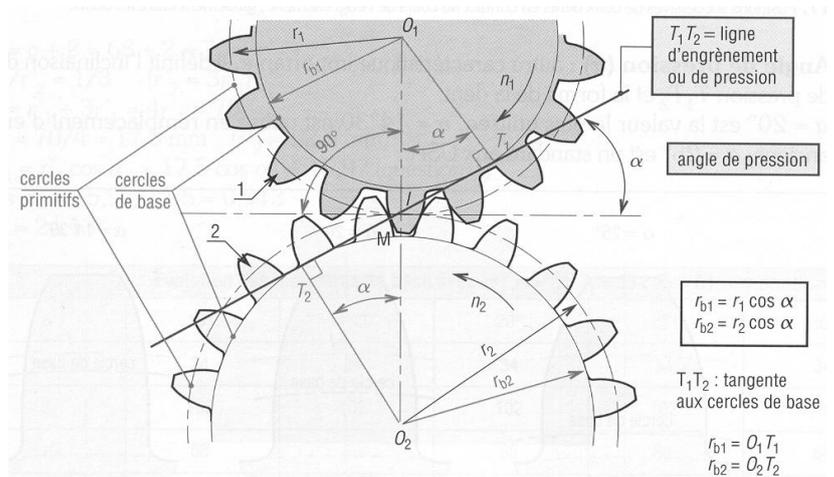
Parmi les profils qu'il est possible de donner à une denture, on utilise essentiellement le *profil en développante de cercle* :

- Tolérance notable sur l'entraxe des roues sans que le fonctionnement soit troublé.
- L'usure des surfaces est plus régulièrement répartie.
- Les vibrations sont atténuées.



• **Angle de pression α ($\alpha = 20^\circ$)**

La ligne de pression porte en permanence l'effort de contact s'exerçant entre les 2 roues.



Remarques concernant le bon fonctionnement des engrenages :

⇒ Pour que l'engrènement (conduite) soit correct, un couple de dents doit entrer en contact avant que le précédent ne perde contact.

⇒ Lorsque le nombre de dents du pignon est faible (le fond du creux de la dent est étroit) et qu'en même temps le nombre de dents de la roue est grand (le sommet des dents est large), le fonctionnement de l'engrenage peut devenir impossible, la tête des dents de la roue n'ayant pas la possibilité de se déplacer dans le creux des dents du pignon. On dit que les dents sont en **interférences**.

Remède : C'est pour éviter ces interférences que des **corrections de denture** (déports) ont été introduites dans la construction des engrenages. En fait, on décale la denture par rapport au cercle primitif (le rapport de transmission reste inchangé).

On peut faire soit des **déports sans variation d'entraxe** (distance entre les axes de la roue et du pignon) d'où un déport positif (augmentation de la résistance de la denture (→ pignon)) et l'autre négatif (affaiblissement de la denture) ; soit des **déports avec variation d'entraxe** (ce qui permet d'augmenter la résistance des dentures du pignon et de la roue).

III. Etude des trains d'engrenages classiques :

III.1 : trains à un engrenage

⇒ L'engrènement est possible uniquement si les pas de la roue et du pignon sont égaux.

⇒ Le nombre de pas (sur le cercle primitif) doit être entier (Pas = Largeur denture + intervalle).

Soient d_1 : diamètre primitif du pignon

Z_1 : nombre de dents du pignon

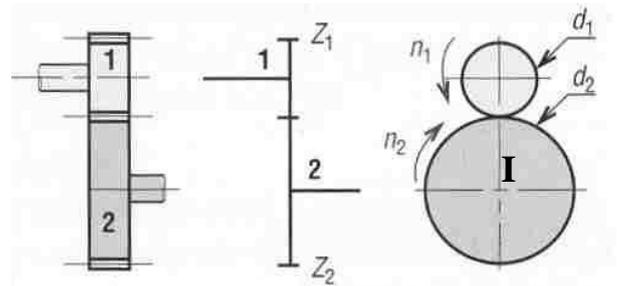
p_1 : pas

On a $Z_1 \times p_1 = \pi \times d_1 \Leftrightarrow p_1 = \pi d_1 / Z_1$

Soient d_2 : diamètre primitif de la roue dentée

Z_2 : nombre de dents de la roue

p_2 : pas



Pour que l'engrènement soit possible, il faut avoir :

$$p_1 = p_2 \quad \Leftrightarrow \quad \pi d_1 / Z_1 = \pi d_2 / Z_2$$

On appelle **module "m"** le rapport suivant : $m = d / Z = p / \pi$

$$d = m \cdot Z$$

$$\frac{d_1}{Z_1} = \frac{d_2}{Z_2}$$

d (diamètre primitif) en mm ; Z (nombre de dents) et m (module) en mm

Calcul du rapport de transmission :

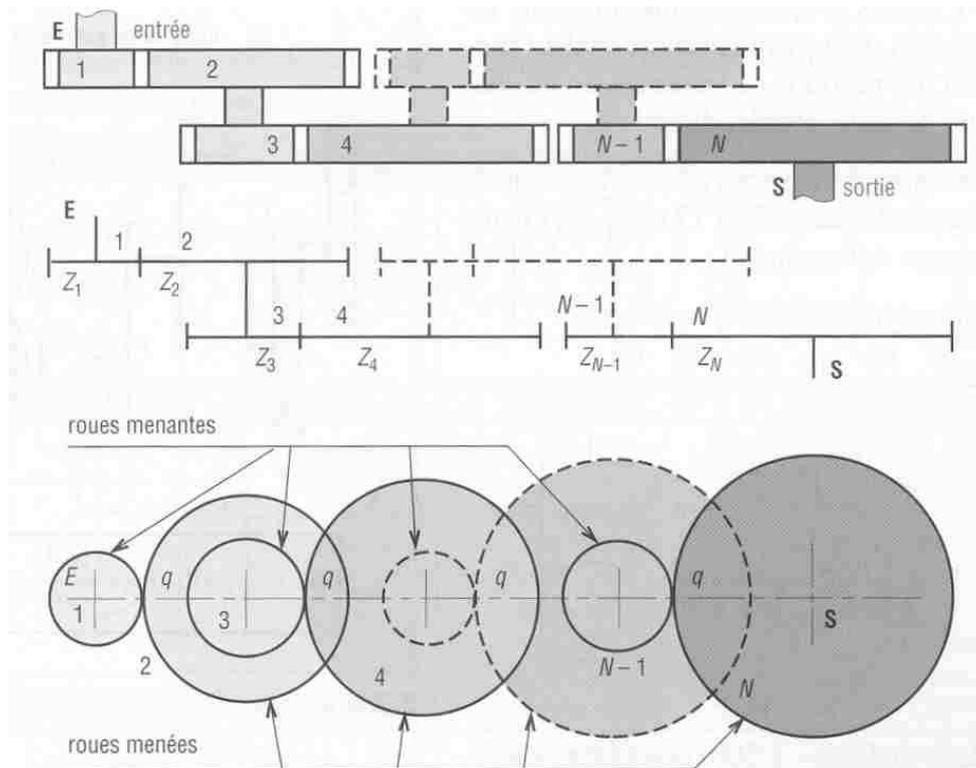
Au point de contact entre les 2 roues dentées, la vitesse est identique (sinon il y a glissement) :

$$\vec{V}_{I(1/0)} = \vec{V}_{I(2/0)} \quad \text{avec} \quad V = r \omega$$

(r : rayon primitif d'une roue dentée et ω : vitesse de rotation de cette roue dentée)

$$d'où \quad r_1 \times \omega_1 = r_2 \times \omega_2 \quad \Leftrightarrow \quad d_1 \times \omega_1 = d_2 \times \omega_2 \quad \Leftrightarrow \quad \boxed{\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{Z_1}{Z_2}}$$

III.2 : cas général : trains à N engrenages

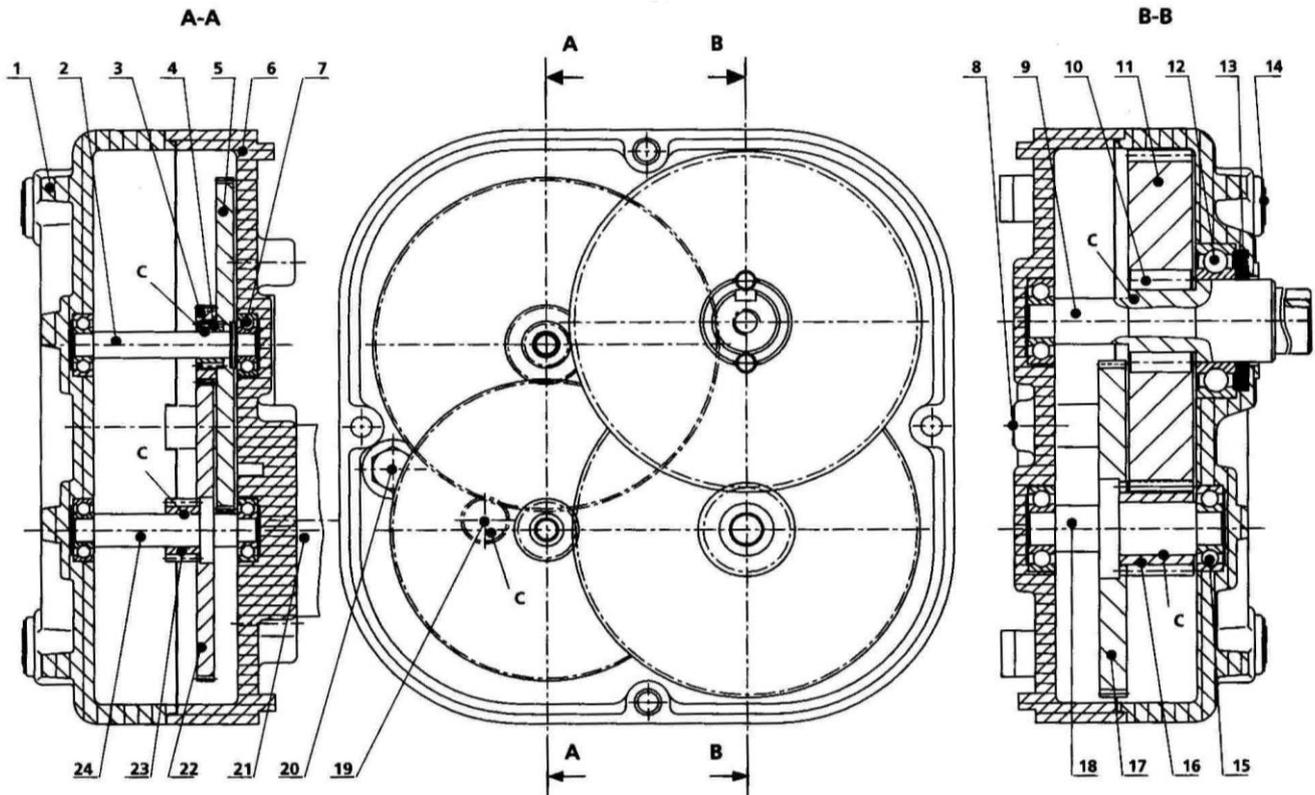


$$\text{Rapport de transmission (réduction)} = r = \frac{\omega_{\text{sortie}}}{\omega_{\text{entrée}}} = (-1)^n \frac{\prod Z_{\text{menantes}}}{\prod Z_{\text{menées}}}$$

- Dans le cas présenté, on a $r = \frac{\omega_{\text{sortie}}}{\omega_{\text{entrée}}} = (-1)^n \frac{Z_1 \times Z_3 \times \dots \times Z_{N-1}}{Z_2 \times Z_4 \times \dots \times Z_N}$
- Les roues menantes sont les roues motrices de chaque couple de roues. Les roues menées sont les roues réceptrices.
- "n" = nombre de contacts entre les dentures extérieures des engrenages. (-1)ⁿ permet de savoir s'il y a ou non inversion du sens de rotation entre l'entrée et la sortie.
- "Π" = produit (multiplication).

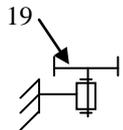
Application : Réducteur type FDA/FDJ 539

Repère		Nb de dents (Z)	Module (m)
19	Roue menante	17	0,75
5	Roue menée	133	0,75
3	Roue menante	30	0,75
22	Roue menée	120	0,75
23	Roue menante	17	1
17	Roue menée	100	1
16	Roue menante	17	1,5
11	Roue menée	67	1,5



C : assemblage collé (Loctite 638)

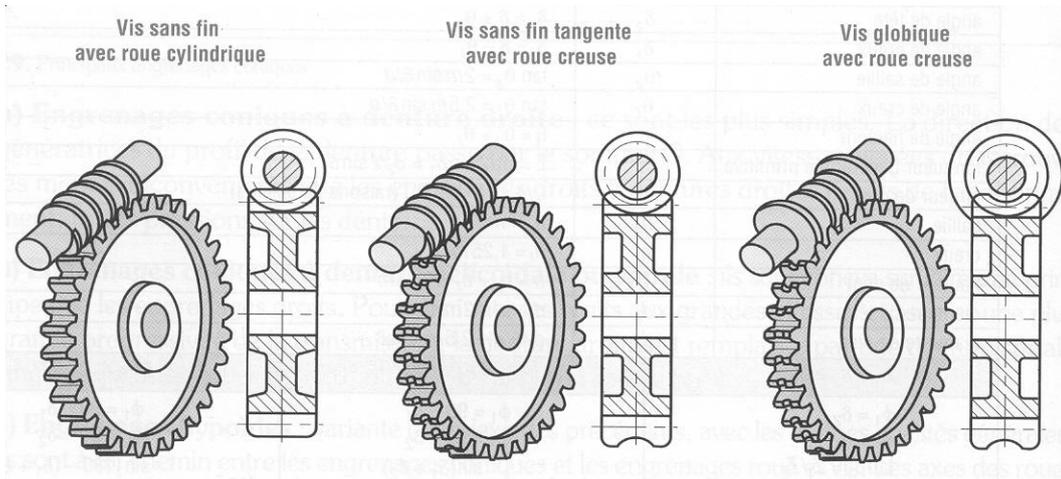
Q1 : proposer un schéma cinématique (développé) du réducteur :



Q2 : déterminer le rapport de transmission, $r = \frac{\omega_9}{\omega_{moteur}}$

IV. Systèmes roue et vis sans fin :

IV.1 : principales familles

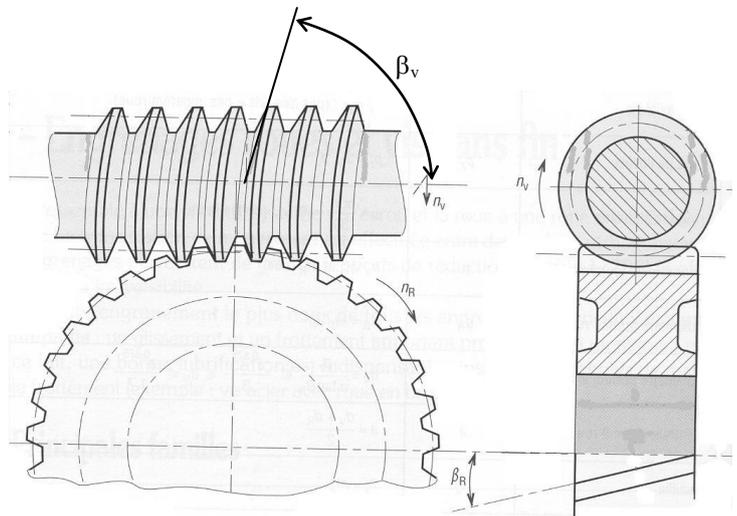


IV.2 : caractéristiques géométriques et cinématiques

Ces engrenages permettent de grands rapports de réduction (jusqu'à 1/200) et offrent des possibilités d'irréversibilité.

Ils donnent l'engrènement le plus doux de tous les engrenages, silencieux et sans chocs.

Contrepartie : un glissement et un frottement important provoquent un rendement médiocre. De ce fait, une bonne lubrification est indispensable ainsi que des couples de matériaux à faible frottement (ex : vis acier avec roue en bronze).



- Condition géométrique à respecter : $\beta_v + \beta_R = 90^\circ$

- Le rapport de transmission d'un tel mécanisme = $r = \frac{\omega_{roue}}{\omega_{vis}} = \frac{Z_v}{Z_{roue}}$

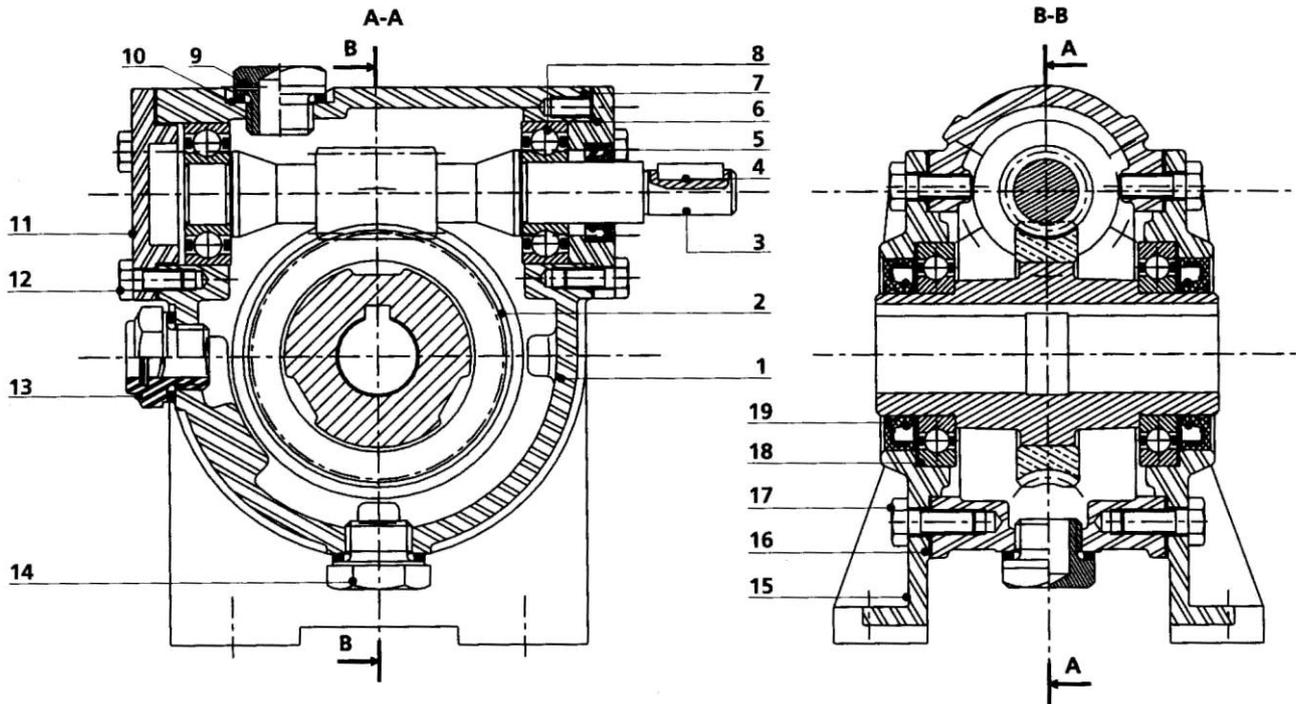
Avec Z_v = nombre de filets de la vis et Z_R = nombre de dents de la roue

IV.3 : irréversibilité du système roue et vis

Si la vis peut toujours entraîner la roue, par contre l'inverse n'est pas toujours possible. Lorsque l'angle d'inclinaison de l'hélice β_R est suffisamment petit (moins de 6 à 10°) le système devient irréversible et la roue ne peut entraîner la vis, il y a blocage en position. Cette propriété est intéressante pour des dispositifs exigeant une position mécanique stable sous charge (ex : mécanismes de levage). Les engrenages roue et vis sont les seuls à posséder cette propriété.

IV.4 : performances d'un système roue et vis

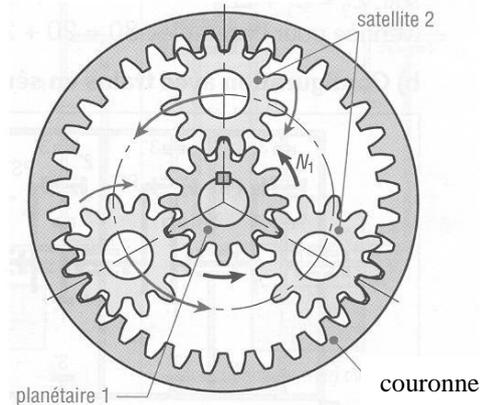
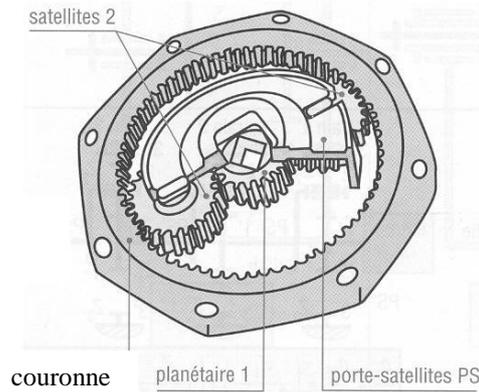
Exemple : réducteur roue et vis sans fin SNT RI 40



Rapport de réduction	7	10	15	20	28	40	49	56	70	80	100
Couple maximal transmissible en (daN) *	4,4	5,8	5,15	4,4	5,35	4,5	4	3,72	4,8	2,4	2
* Pour une vitesse d'entrée égale à 1 400 tr / minute.											
Rapport de réduction	7	10	15	20	28	40	49	56	70	80	100
Rendement dynamique *	0,87	0,85	0,81	0,77	0,71	0,63	0,60	0,57	0,49	0,47	0,48
* Ces valeurs sont définies pour une vitesse d'entrée de 1 400 tr / minute avec un réducteur rodé et lubrifié à l'huile, travaillant sous une charge correspondant à son couple nominal.											
Rapport de réduction	7	10	15	20	28	40	49	56	70	80	100
Rendement statique *	0,69	0,65	0,58	0,58	0,43	0,43	0,40	0,37	0,35	0,31	0,27
* Le rendement statique correspond à un démarrage à froid du réducteur chargé au couple nominal.											

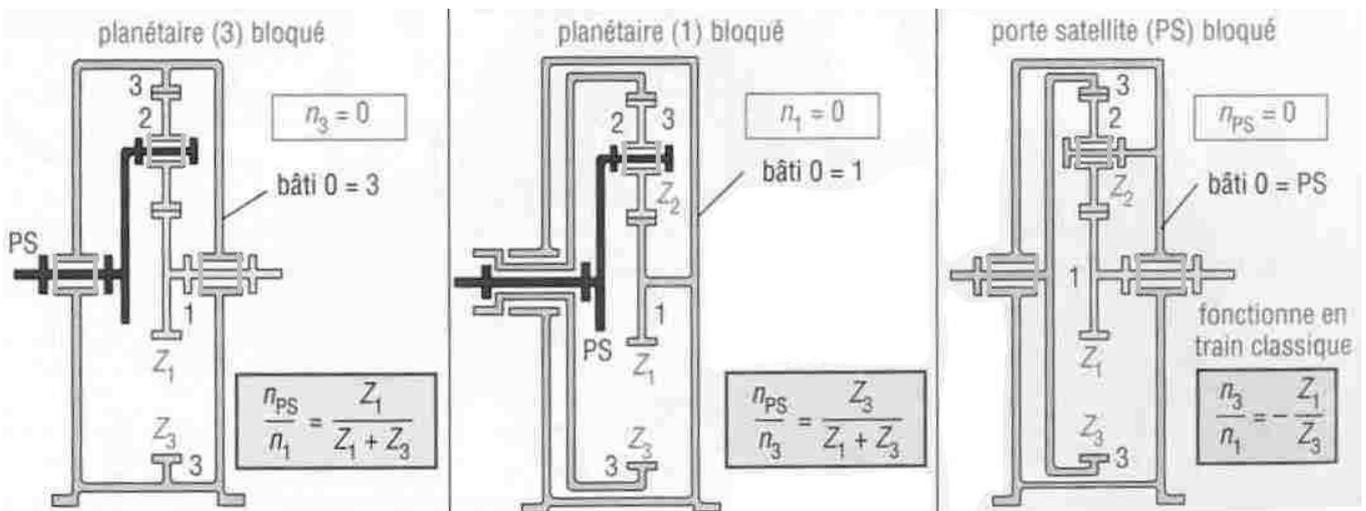
V. Trains épicycloïdaux :

Ils autorisent de grands rapports de réduction sous un faible encombrement. Les puissances transmises sont modérées et les rendements diminuent quand le rapport de réduction augmente. Une particularité permet de les identifier : les axes de rotation des roues



appelées « satellites » ne sont pas fixes dans le bâti mais « tourbillonnent » par rapport aux autres roues.

Cas usuels de fonctionnement



- Le rapport de transmission est obtenu grâce à la « formule de willis » :
$$\frac{\omega_p - \omega_{ps}}{\omega_c - \omega_{ps}} = -\frac{Z_c}{Z_p}$$
 (formule non démontrée dans ce cours).
- le fonctionnement n'est possible que si l'un des 3 éléments principaux (planétaire 1, planétaire 3 (ou couronne) ou porte-satellites PS) est bloqué (cas général) ou entraîné par un autre dispositif (dispositif particulier).
- La configuration avec la couronne 3 bloquée est de loin la plus utilisée.
- Si le porte satellites est bloqué, l'ensemble fonctionne comme un train classique à un engrenage intérieur avec roue (satellite) d'inversion (de sens).
- Le nombre de satellites est sans influence sur le rapport de la transmission.
- Remarque géométrique utile : $d_3 = d_1 + 2d_2$; autrement dit, $mZ_3 = mZ_1 + 2.mZ_2$, soit $Z_3 = Z_1 + 2.Z_2$
- C'est le plus couteux des types de réducteurs.

Application n°1 : Transmission de puissance d'un hélicoptère

A) Mise en situation :

L'étude porte sur une boîte de transmission principale de l'entraînement des rotors d'un hélicoptère.

L'énergie mécanique nécessaire à l'ascension et à l'avancement de l'appareil est obtenue à partir d'un groupe turbo-propulseur à hautes performances (turbine avec un faible couple et une grande vitesse de rotation).

Par l'intermédiaire d'une boîte de transmission, cette énergie atteint le rotor principal et les pales.



B) Travail demandé :

1 : Coloriez (avec des couleurs différentes) sur les figures ② et ③ :

- le porte satellites.
- les satellites.
- la couronne.
- le planétaire.
- l'engrenage conique d'axe vertical.
- l'engrenage conique d'axe horizontal.

2 : La vitesse maximale de l'hélicoptère en vol horizontal (sans vent) par rapport au sol est égale à : $\|\vec{V}_{\max i(\text{hélico} / \text{sol})}\| = 263 \text{ km/h}$.

Déterminez la vitesse de rotation du rotor principal par rapport à la cellule de l'hélicoptère lorsque celui-ci vole à sa vitesse maxi ; et de telle façon qu'il ne soit pas possible, en aucun cas, d'atteindre la vitesse du son en extrémité de pale. Tout en conservant une sécurité de 15 % par rapport à ce risque (à cause d'éventuelles vibrations). On adoptera une **vitesse du son dans l'air = 330,4 m/s**.

3 : A partir de la disposition du train épicycloïdal présenté sur les figures 2 et 3, calculez la vitesse de rotation de l'arbre intermédiaire.

4 : A partir des caractéristiques des deux engrenages coniques, et sachant qu'à la sortie du groupe turbo-propulseur (axe de la turbine) se trouve un réducteur : $r = 1/6$ (réducteur non représenté sur les différentes figures), déterminez la fréquence de rotation de la turbine en tr/min.

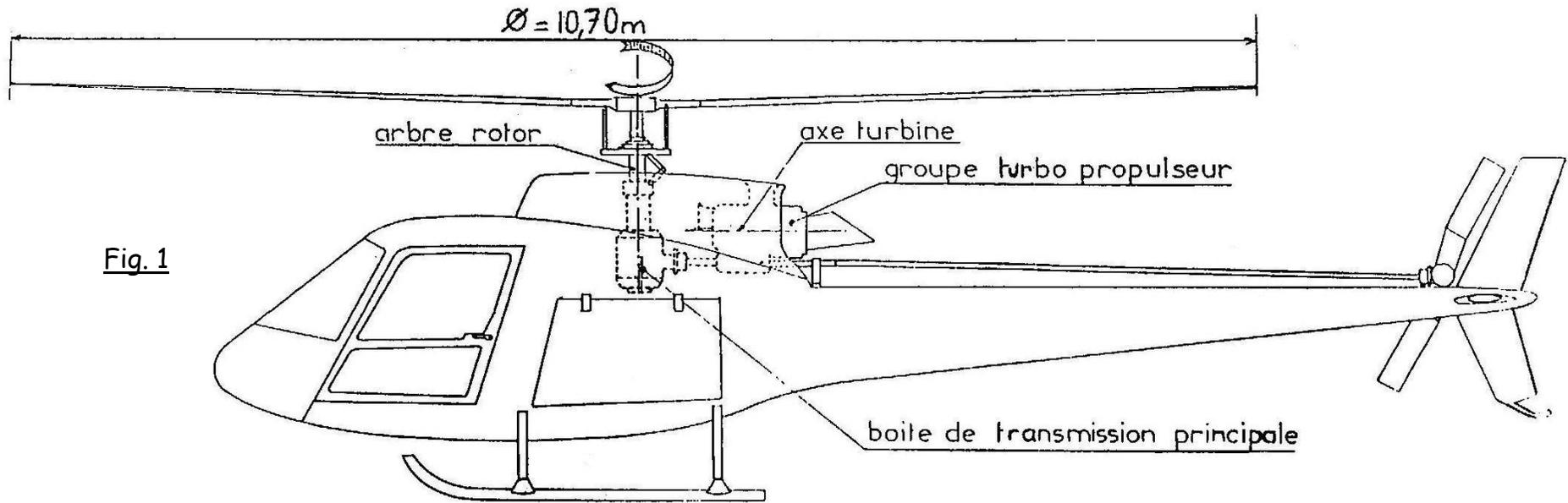


Fig. 1

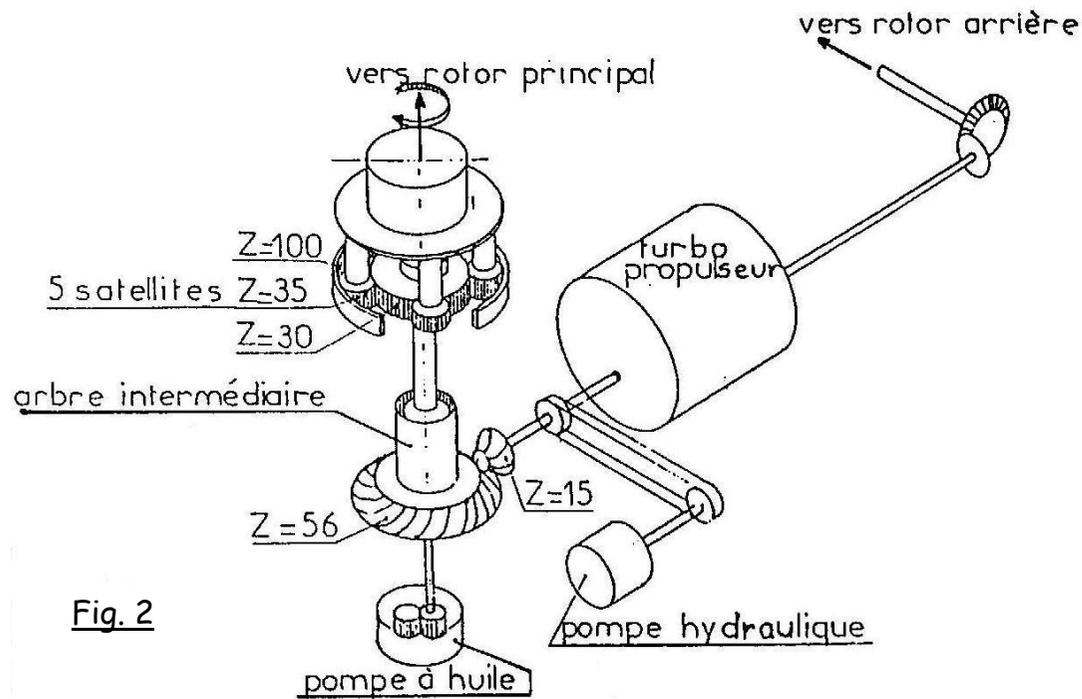


Fig. 2

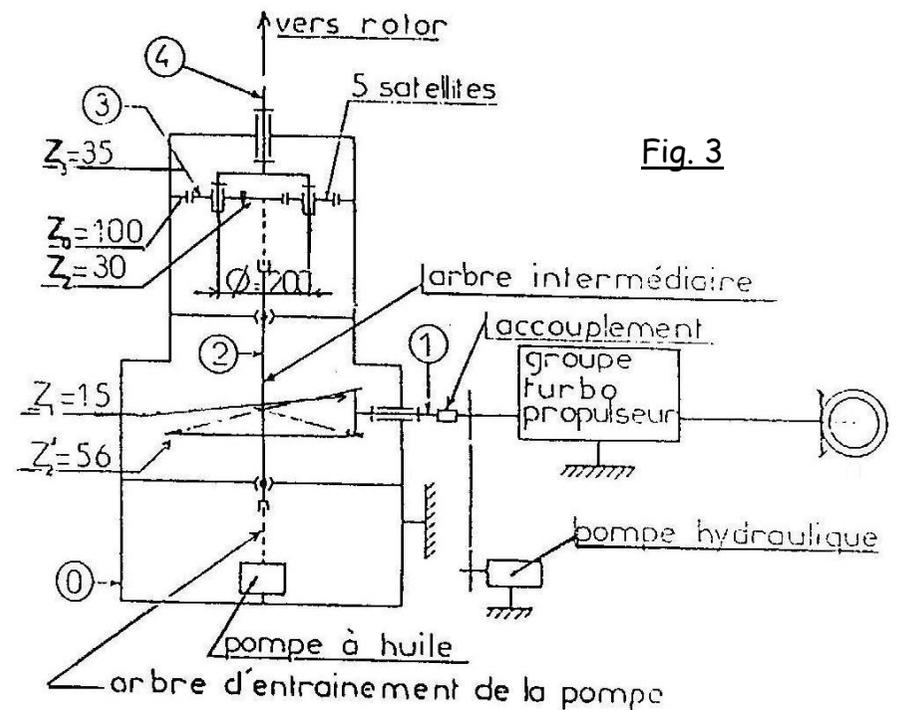


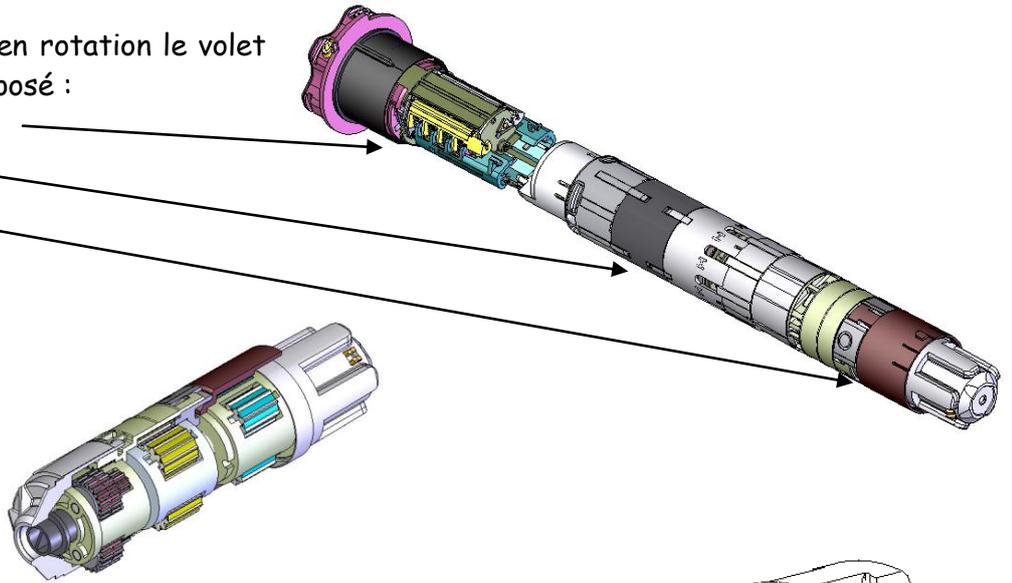
Fig. 3

Application n°2 : réducteur du volet roulant

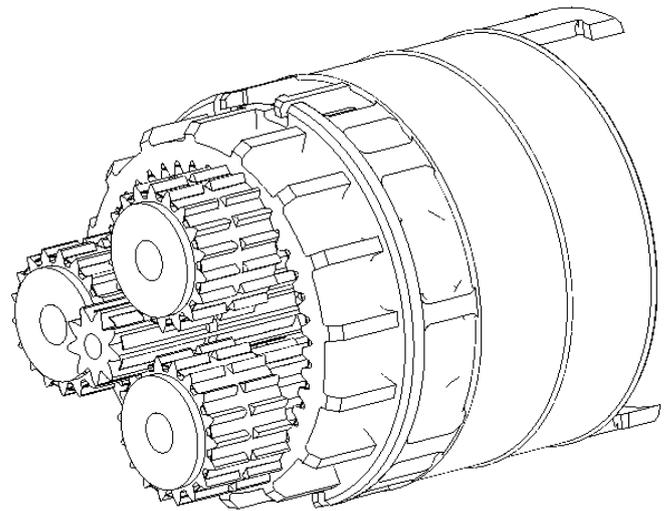
Le tube motorisé qui entraîne en rotation le volet roulant est principalement composé :

- D'une cage fin de course
- D'un moteur frein
- D'un réducteur

Le réducteur est constitué d'une série de 3 trains épicycloïdaux



Q1 : proposer un schéma cinématique du 1^{er} étage du réducteur.



Q2 : déterminer le rapport de transmission de ce 1^{er} étage de réduction, et en déduire la vitesse de rotation du porte-satellites si le moteur tourne à 3000 tr/min.

- Planétaire central : 9 dents
- Couronne : 42 dents
- Satellites ($n = 3$) : contact avec le planétaire : 18 dents
Contact avec la couronne : 14 dents