

Conception et Analyse de Systèmes Mécaniques

TD1 - Compresseur de climatisation




GÉNIE MÉCANIQUE





INSA Lyon - Université de Lyon

Équipe pédagogique CONAN

✦ RESSOURCES POUR TD

✦  TD-1: Statique, cinématique, analyse d'un système 

✦ TD2 - Compresseur de Climatisation (Le modèle 3D doit être ouvert avec Adobe Reader.)

- ▼  TD2 - Compresseur de Climatisation
 -  climatisation3D_v2.pdf
 -  conan_TD2.pdf
 -  plan_climatisation.pdf

Objectifs - compétences

- Comprendre les enjeux environnementaux que la multiplication d'un système technique simple implique
- Proposer des améliorations techniques pertinentes prenant en compte des enjeux globaux de soutenabilité

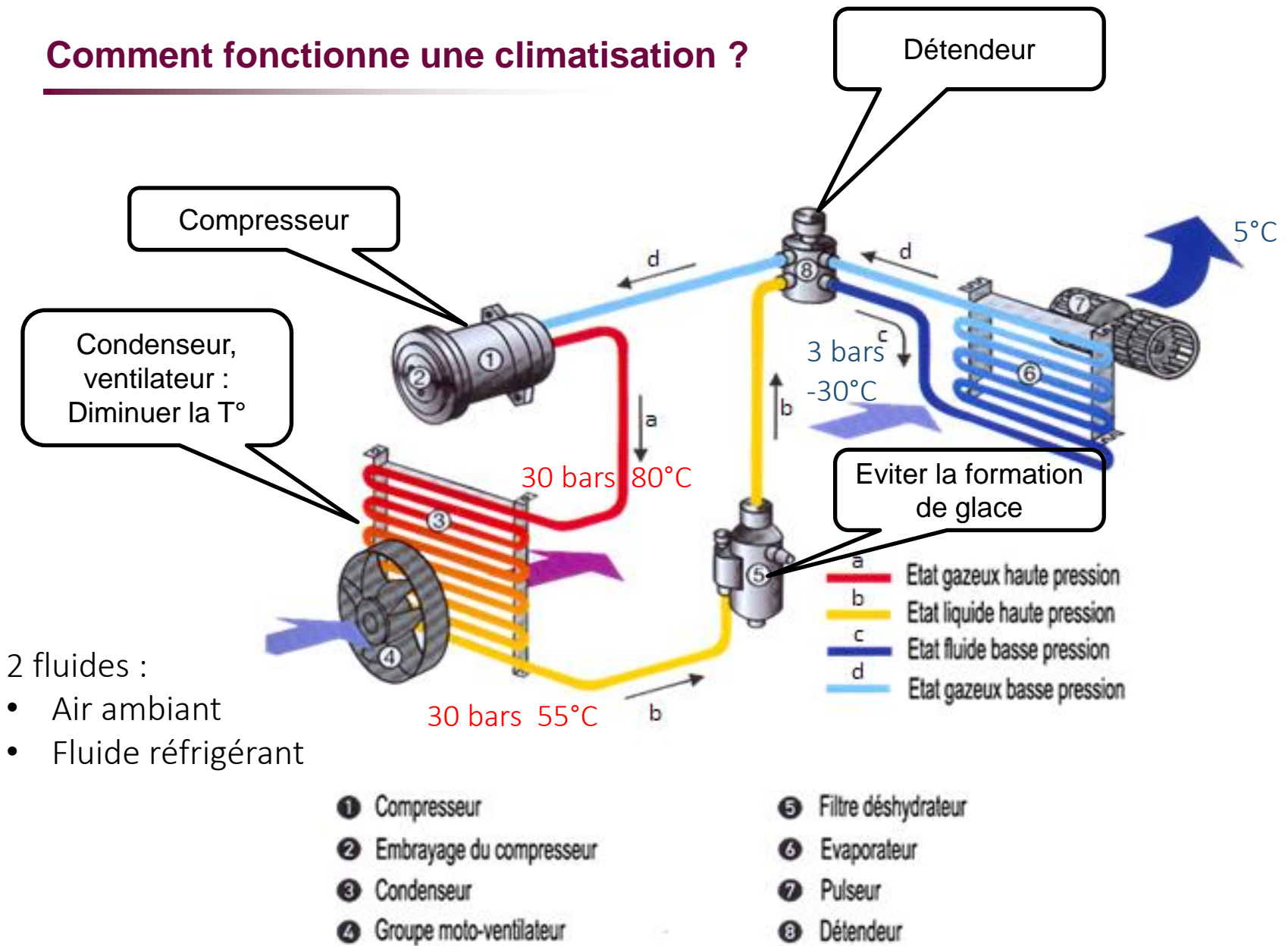
Pour cela il est nécessaire d'être capable de :

- Comprendre le système, ses usages et son environnement,
- Modéliser le système à partir d'un dessin d'ensemble,
- Étudier la réalisation de différentes liaisons,
- Valider un choix technique vis-à-vis d'une performance environnementale attendue.

Fonction : Ne pas nuire excessivement au milieu terrestre dans toutes les phases de vie du produit

Question 1 à 5 – analyse générale

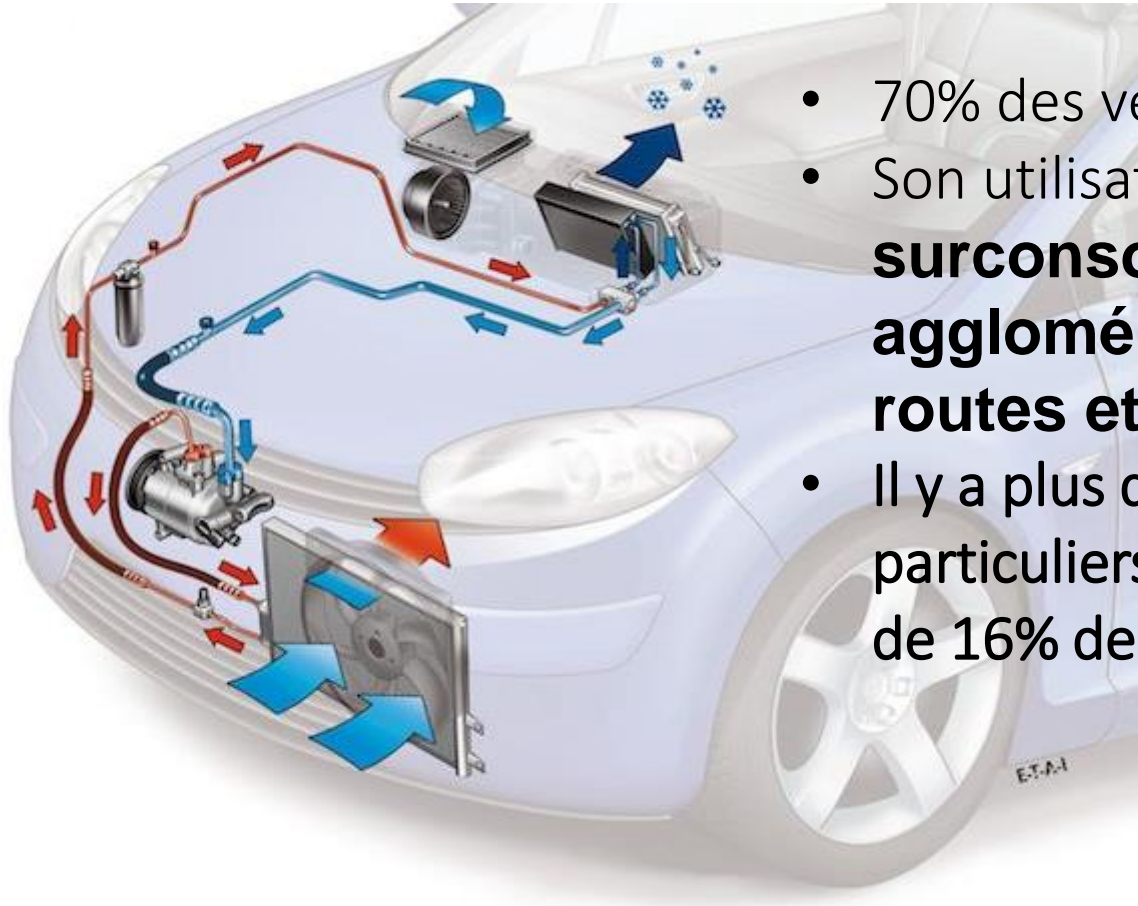
Comment fonctionne une climatisation ?



2 fluides :

- Air ambiant
- Fluide réfrigérant

Quel reproche fait-on à l'usage de la climatisation dans les véhicules ?



- 70% des véhicules sont équipés
- Son utilisation entraîne **une surconsommation de 20% en agglomération et de 6% sur routes et autoroutes**
- Il y a plus de 32 millions de véhicule particuliers en France, responsables de 16% des émissions de GES

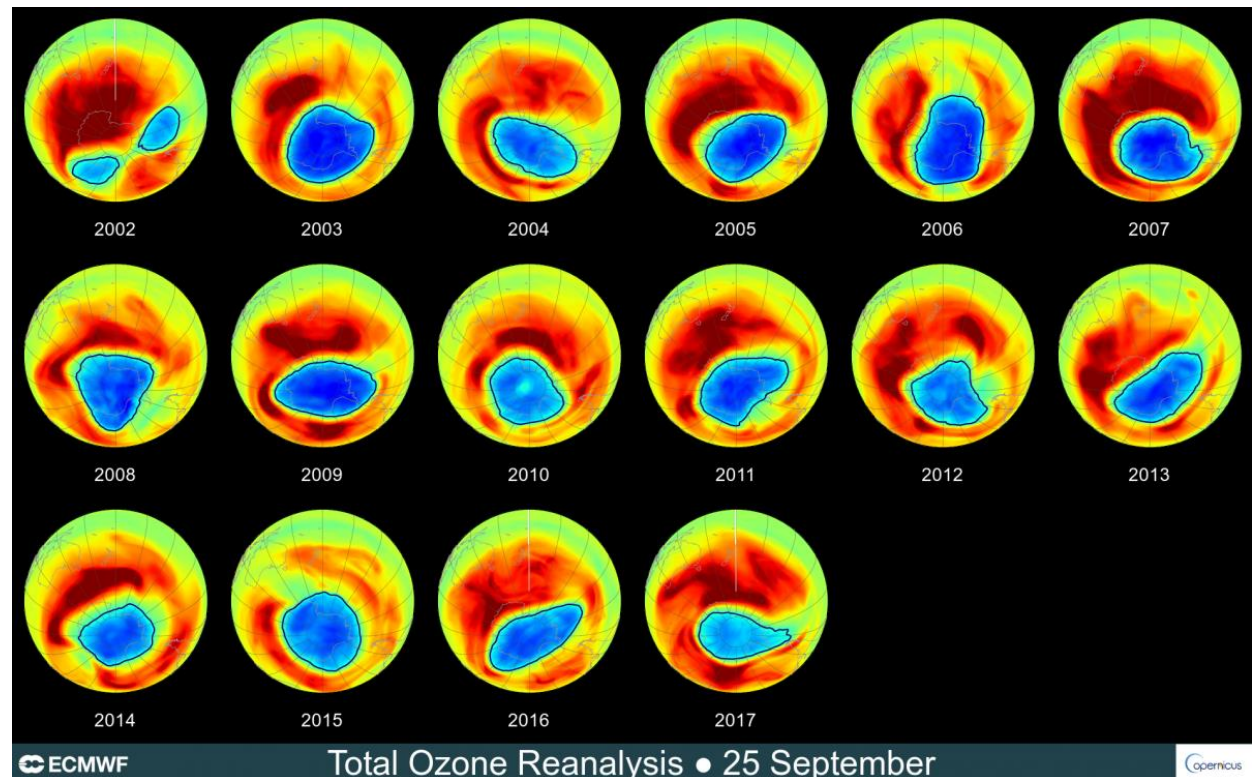
Données ShiftProject

<http://www.guillaumedarding.fr/dossier-fonctionnement-de-la-climatisation-4415037.html>

Le fluide réfrigérant, casse-tête environnemental – la couche d’ozone

- L’utilisation de la climatisation émet des GES du à la surconsommation de carburant
- Mais l’utilisation de fluide réfrigérant pose aussi des problèmes environnementaux !
- Les fluide de type CFC, interdit par le protocole de Montréal en 1987 en raison de son impact sur le trou de la couche d’ozone (protection rayonnement ultra violet), caractérisé par son Potentiel de Déplétion Ozonique (ODP)

couche d'ozone



Le fluide réfrigérant, casse-tête environnemental – le climat

- Remplacement par un fluide de type HFC pour les climatisations (HFC-134a) dont l'effet de serre a un PRG (Pouvoir de réchauffement global) de 1300

+1,1°C en mars 2019, selon la NASA

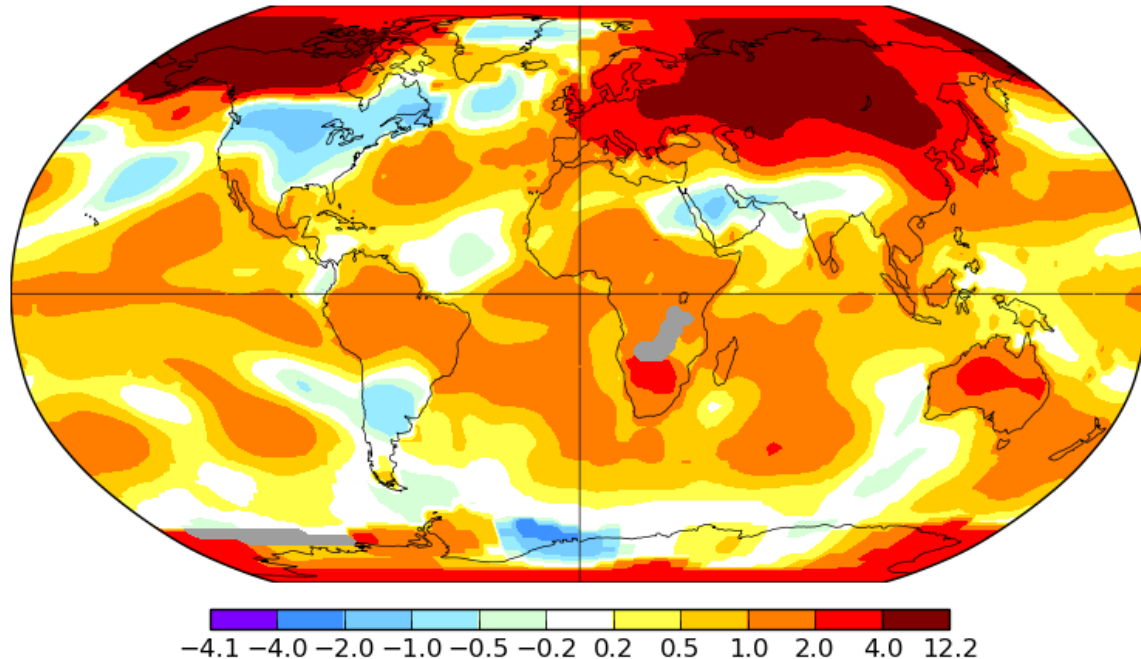
March 2019

L-OTI(°C) Anomaly vs 1951-1980

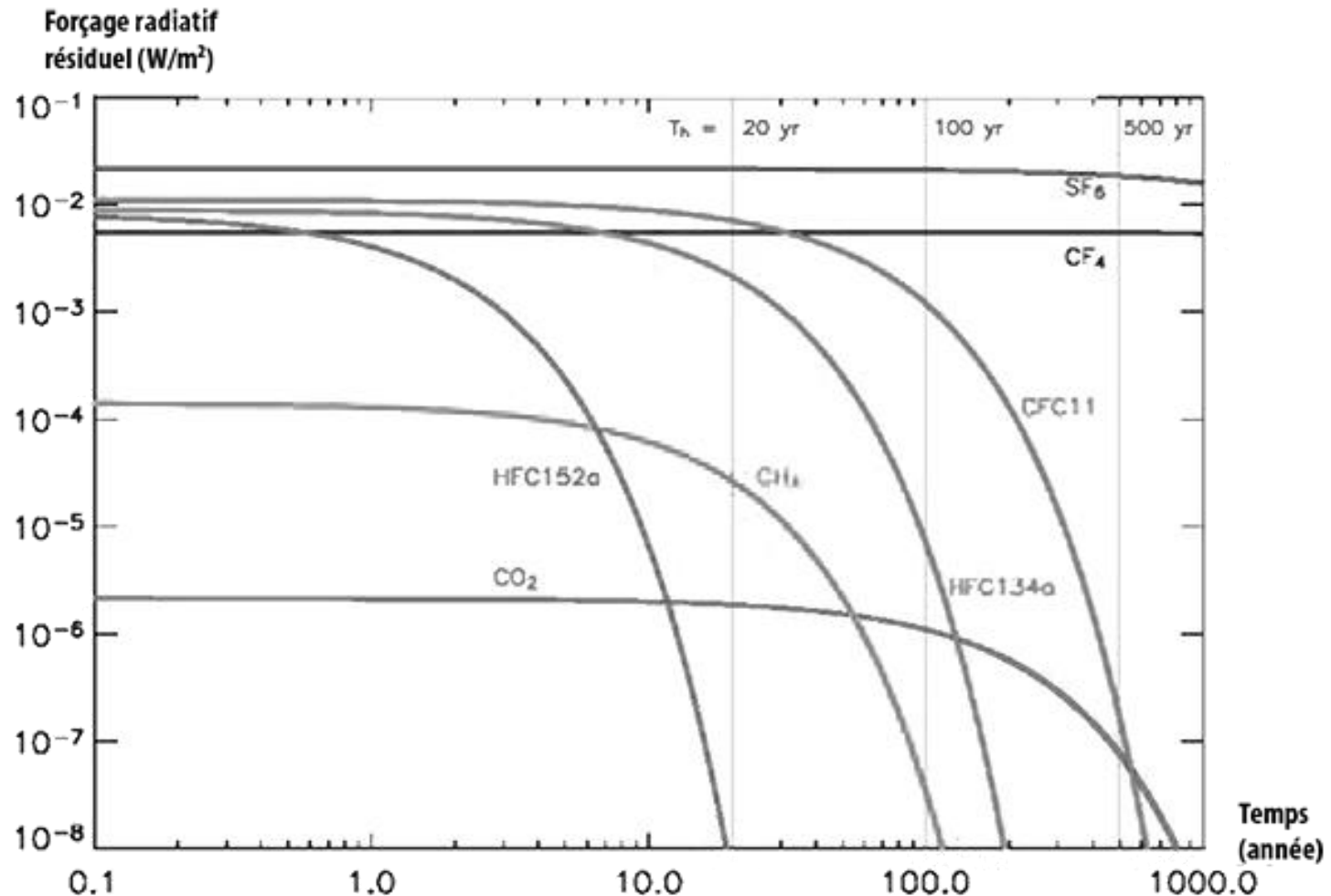
1.11

$$PRG = \frac{\int_0^N F_{gaz}(t)dt}{\int_0^N F_{CO_2}(t)dt}$$

Où :
- F est le forçage radiatif (la quantité du rayonnement intercepté et renvoyé vers le sol) exprimé en watt par mètre carré
- N est le nombre d'années égal à 100



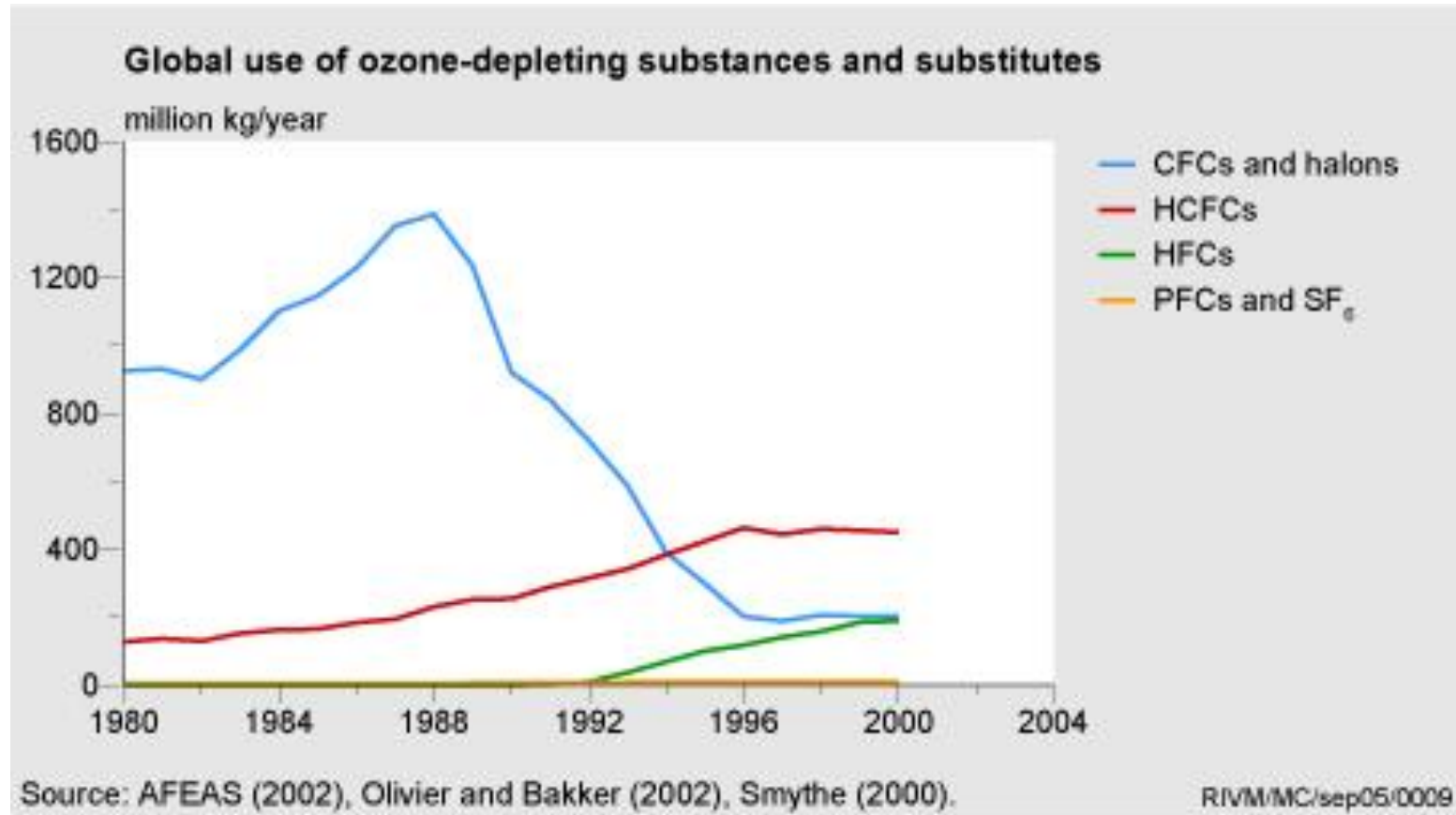
Comparaison du forçage radiatif de quelques gaz



Conclusion : obligation de remplacement par un fluide dont le PRG <150 (directive européenne depuis 2006 et interdiction depuis le **1^{er} Janvier 2017**)

Le fluide réfrigérant, casse-tête environnemental – la vie aquatique

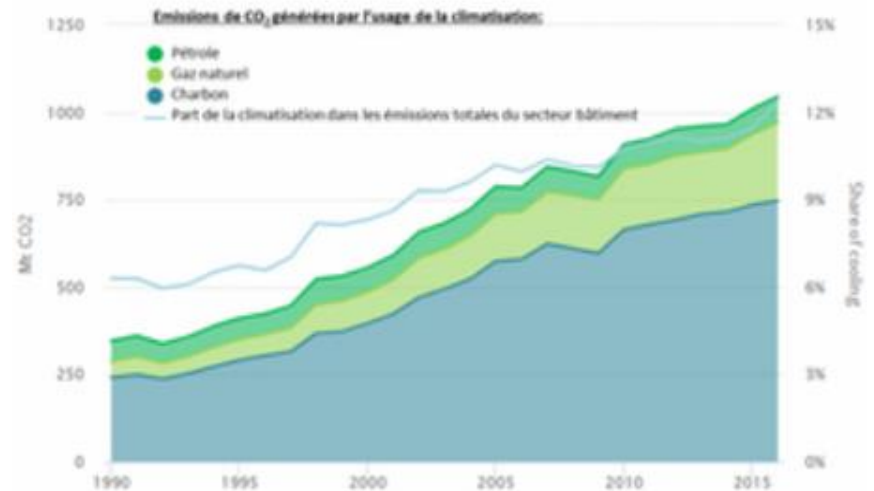
- Le candidat actuel est le R1234yf ou HFC-1234yf dont l'ODP est de 0 et le PRP de seulement 4 ! La tendance est donc à son déploiement massif.



- Malheureusement en se décomposant dans l'atmosphère il produit de l'acide trifluoroacétique toxique pour les écosystèmes aquatiques. L'évaluation est en cours...

Une climatisation raisonnée, raisonnable ?

- Rejet d'air chaud
- Rejet de fluides au PRG >1300



1,6 milliard de climatiseurs installés dans le monde : un milliard de tonnes de CO₂, selon l'AIE

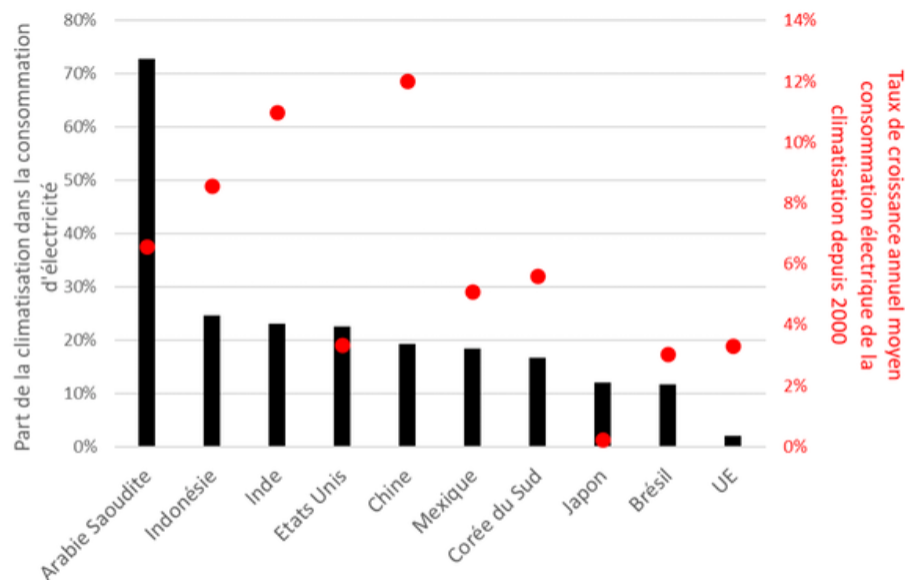
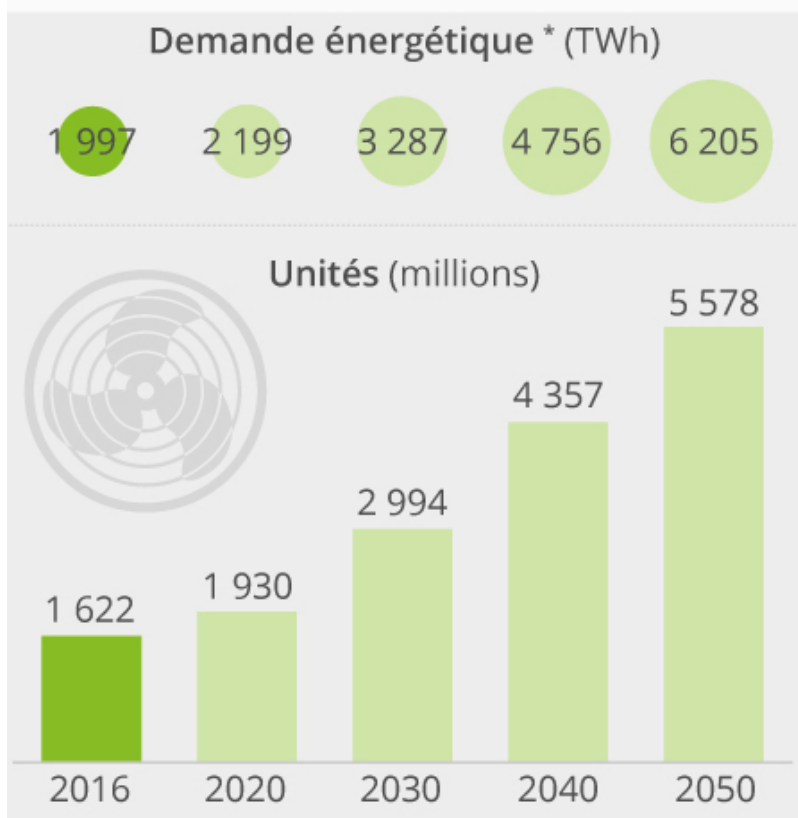
12 % des émissions mondiales de CO₂ du secteur tertiaire et résidentiel seraient dues à la climatisation.

Ces climatiseurs en rejetant de l'air chaud seraient responsables d'une hausse de la température de 2°C en centre ville la nuit comme à Yale ou Tokyo ...



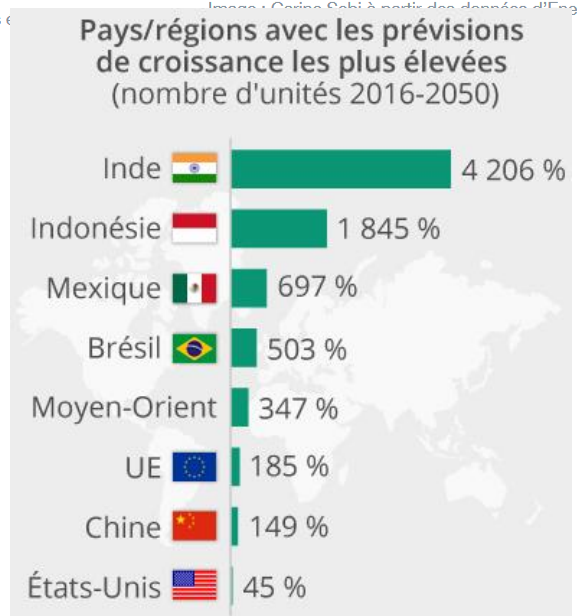
Une climatisation raisonnée, raisonnable ?

- Energie donc CO₂
- Augmentation des équipements

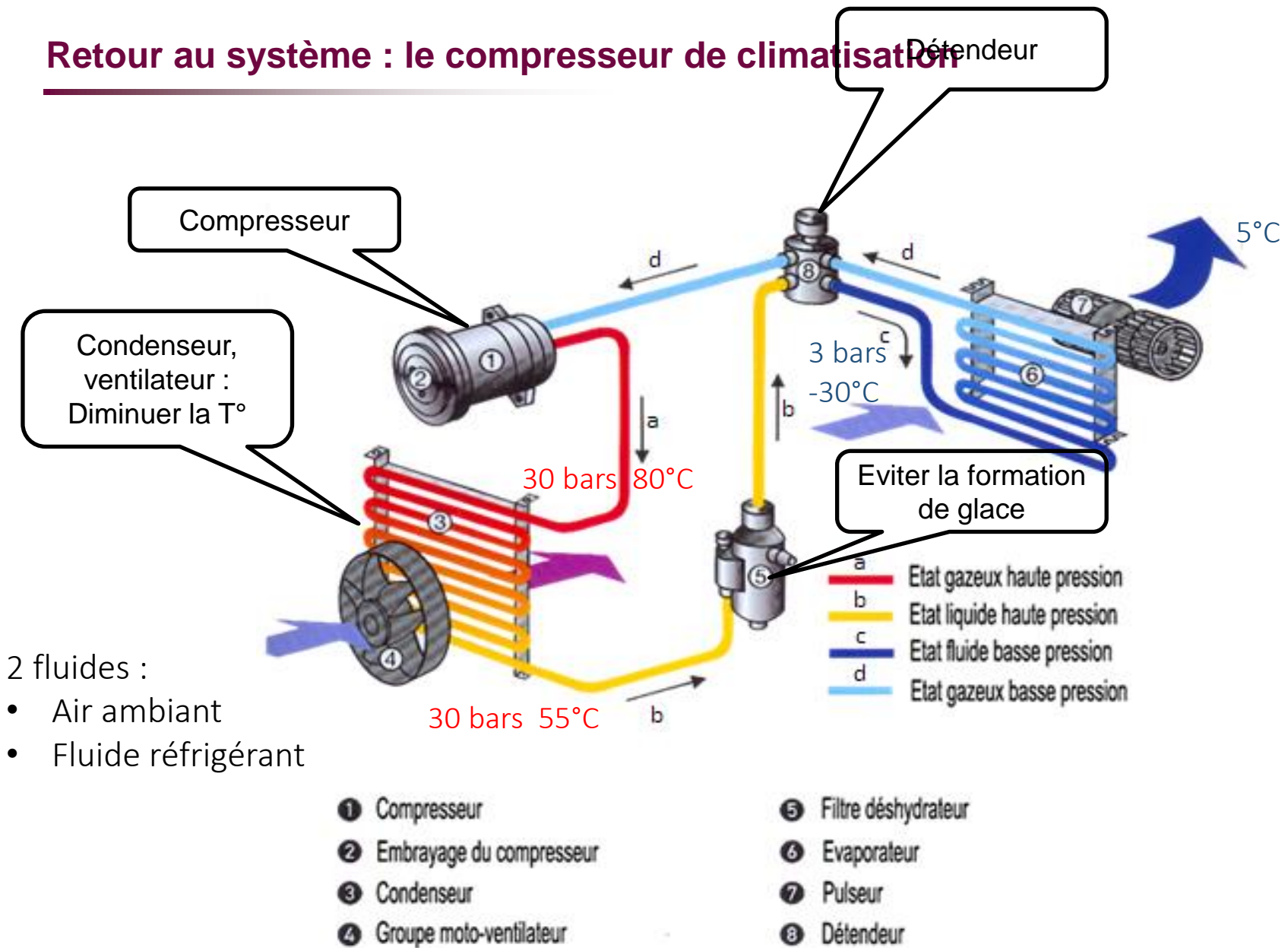


Refroidir, une pratique très é

Image : Carine Sabi à partir des données d'Enerdata, CC BY-NC-SA



Retour au système : le compresseur de climatisation



2 fluides :

- Air ambiant
- Fluide réfrigérant

- | | |
|----------------------------|-----------------------|
| ① Compresseur | ⑤ Filtre déshydrateur |
| ② Embrayage du compresseur | ⑥ Evaporateur |
| ③ Condenseur | ⑦ Pulseur |
| ④ Groupe moto-ventilateur | ⑧ Détendeur |

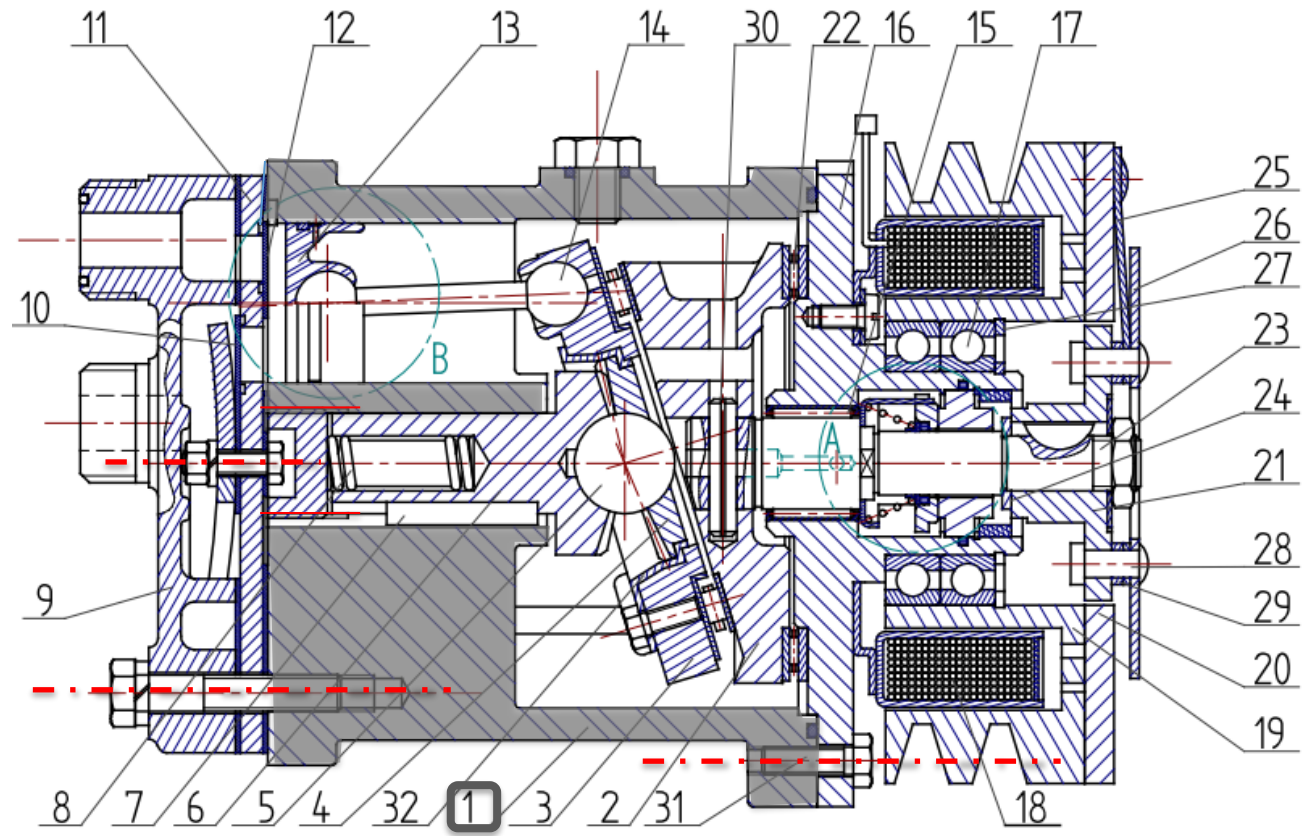
Les étapes proposées

- Chaîne de transmission du mouvement / puissance
- Trajet du fluide – Principe de compression - Etanchéité
- Analyses technologiques : « comment ça marche » / Classes d'équivalences / Liaisons cinématiques équivalentes / Etanchéité - Lubrification

*Fonction : Mettre en mouvement les pistons,
transmettre la puissance*

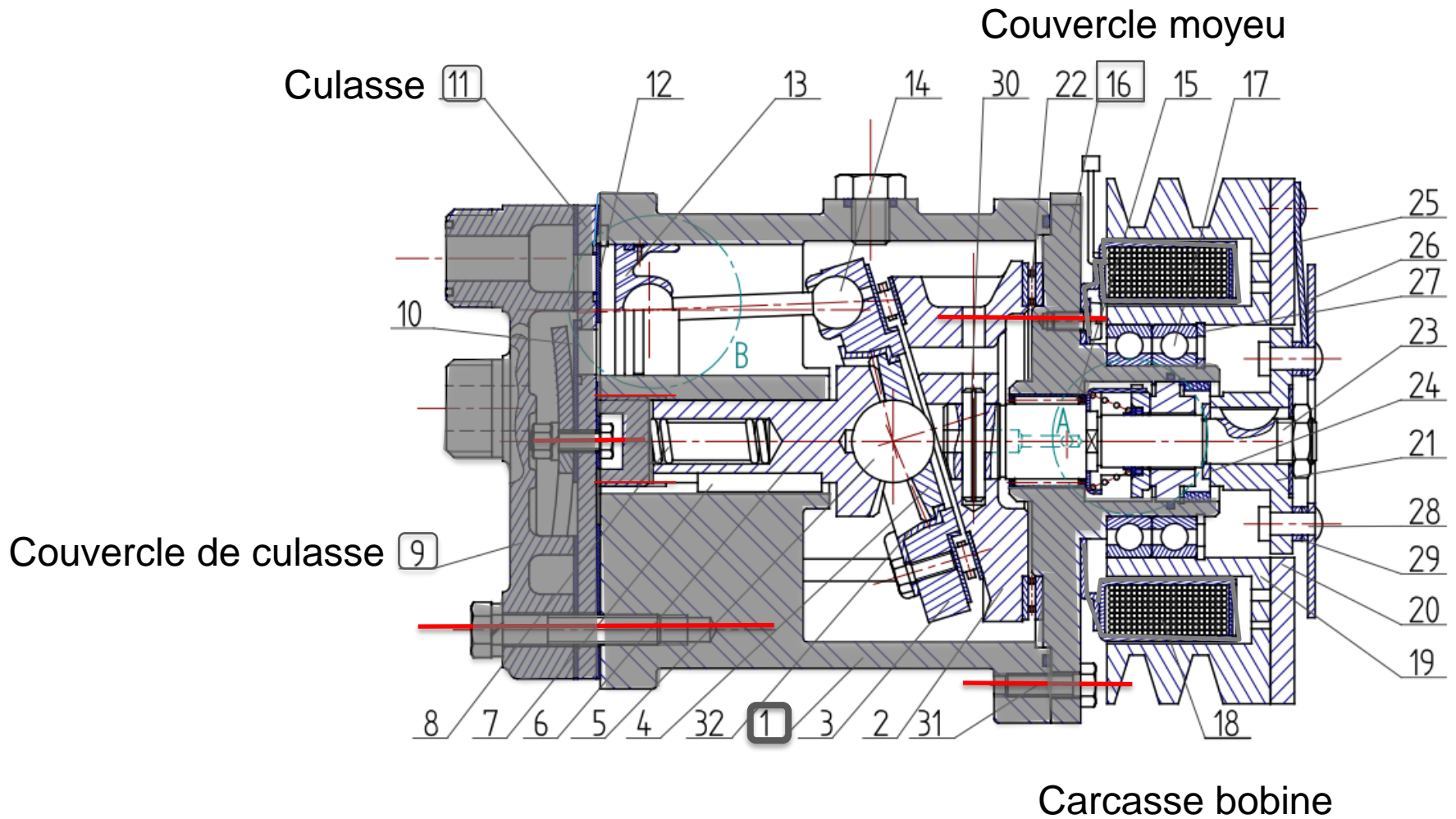
Question 6 - Chaîne de puissance

Transmission de puissance Partie Fixe - Bâti

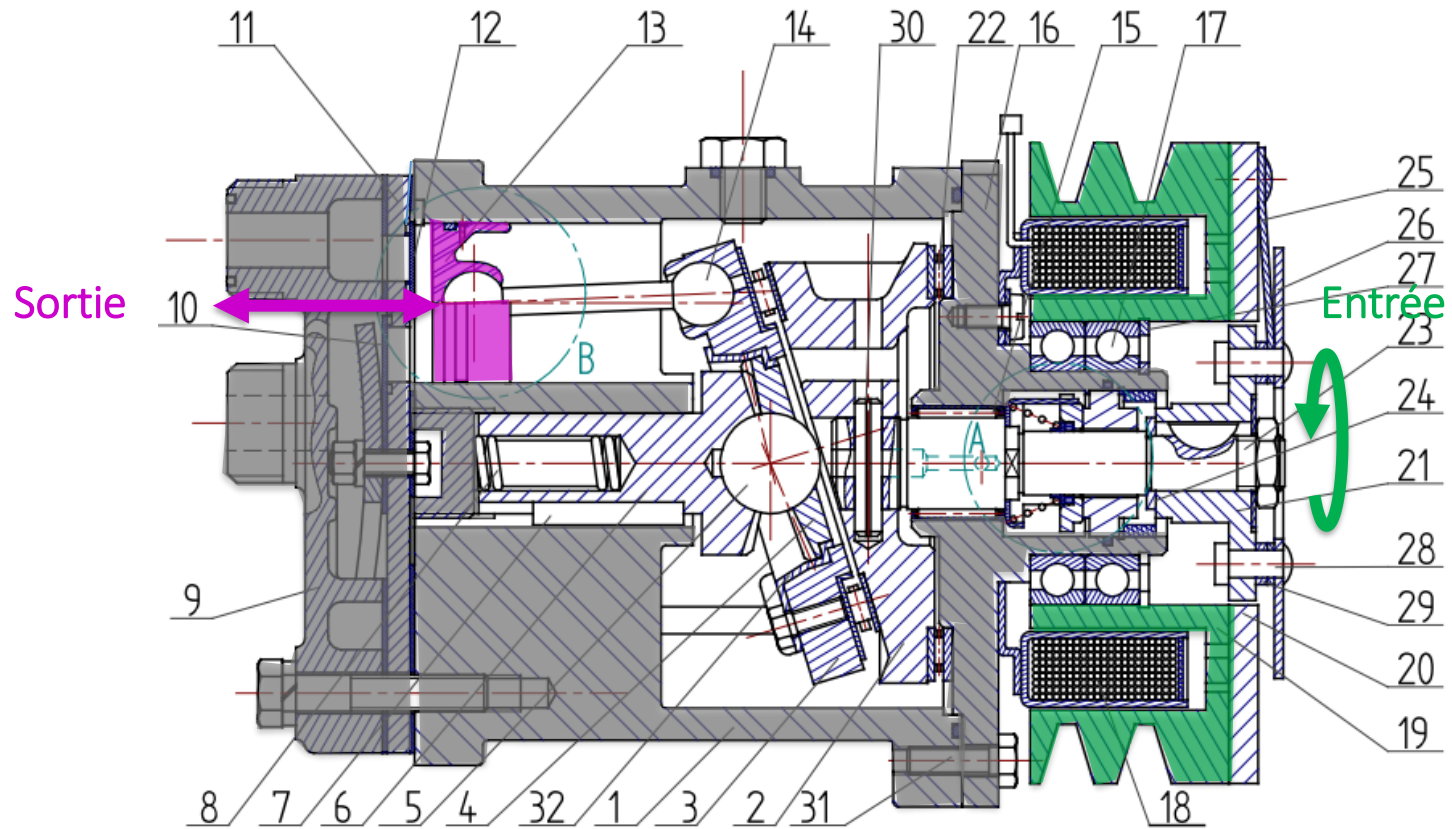


Repérer les vis (liaisons rigides)

Transmission de puissance Partie Fixe - Bâti



Transmission de puissance Partie Mobile



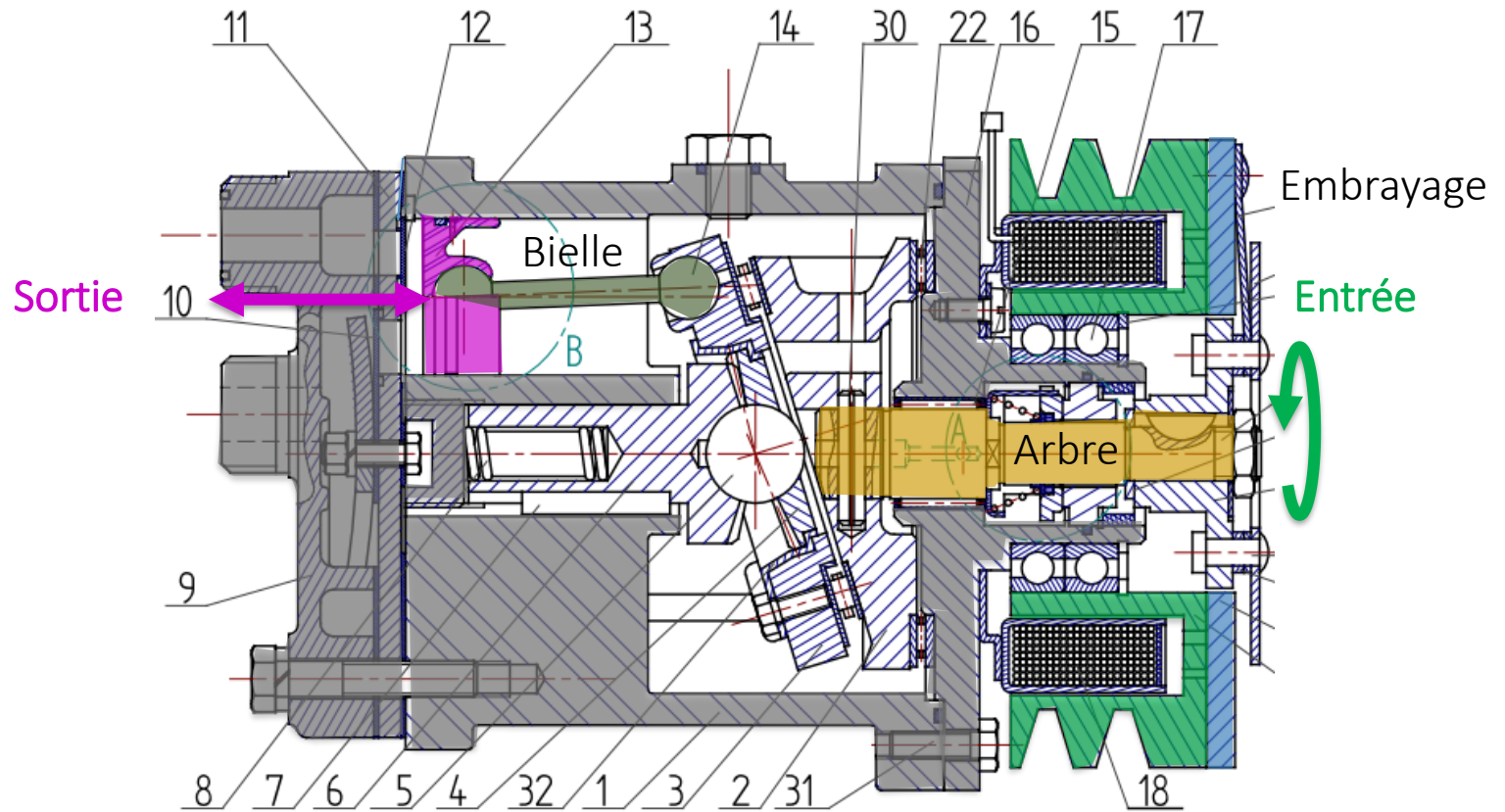
Analyse de la nomenclature : Trouver des éléments « remarquables »

NOMENCLATURE

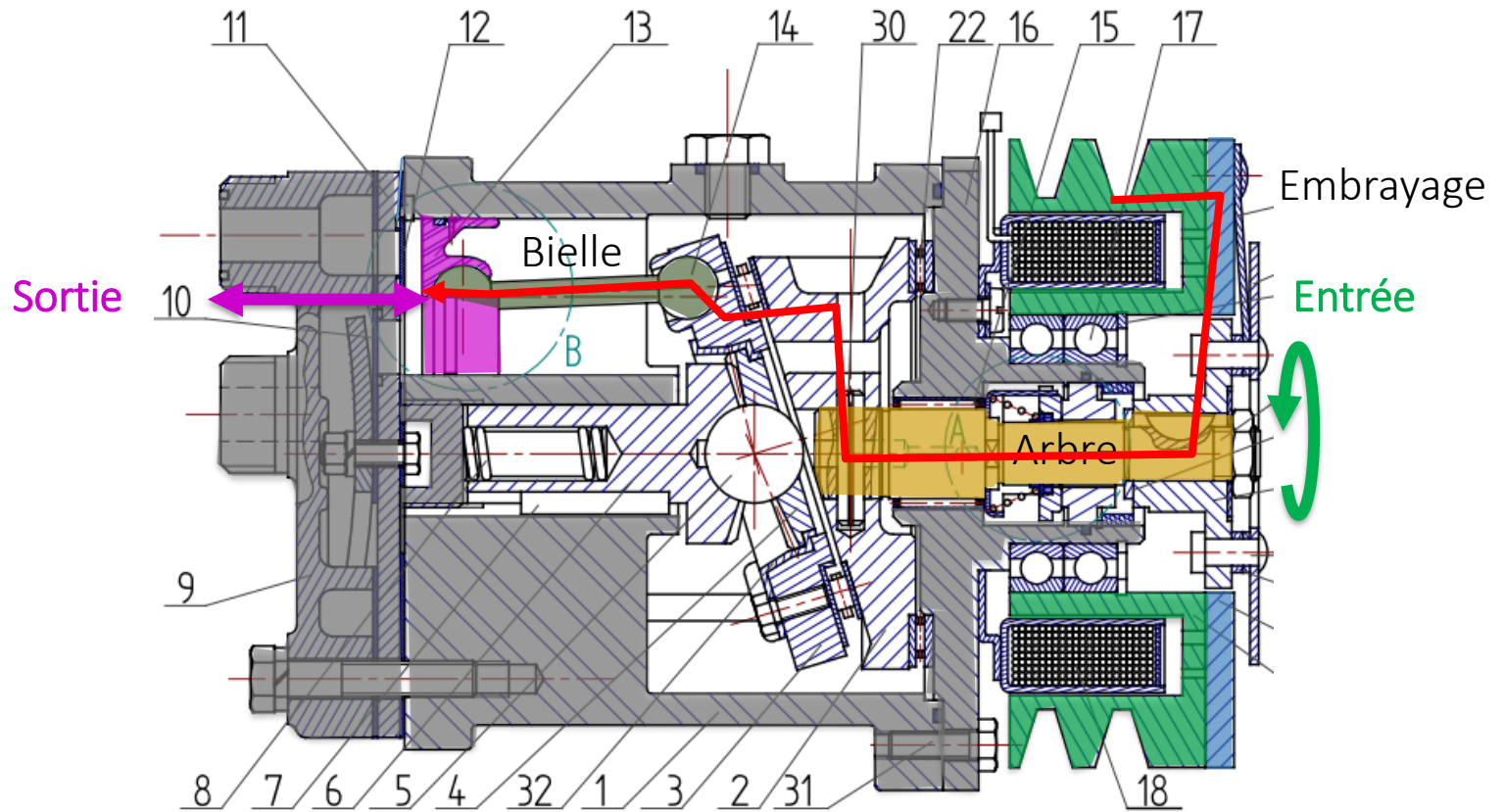
31	5	Vis HM 515
30	1	Goupille élastique
29	6	Rondelle
28	6	Rivet
27	1	Circlip
26	1	Rondelle butée
25	1	Rondelle ressort
24	1	Rondelle de réglage
23	1	Arbre d'entrée
22	1	Butée à aiguilles
21	1	Moyeu
20	1	Rondelle flasque d'embrayage
19	1	Poulie d'entraînement
18	1	Bobine
17	2	Roulement à billes
16	1	Couvercle moyeu
15	1	Roulement à aiguilles
14	5	Bielle
13	5	Piston

12	1	Clapet
11	1	Culasse
10	1	Clapet
9	1	Couvercle de culasse
8	1	Ressort
7	1	Clavette
6	1	Pignon fixe 17 dents
5	1	Bille de poussée
4	1	Roue conique 17 dents
3	1	Plateau oscillant
2	2	Plateau came
1	1	Corps
Rep	Nb	Désignation

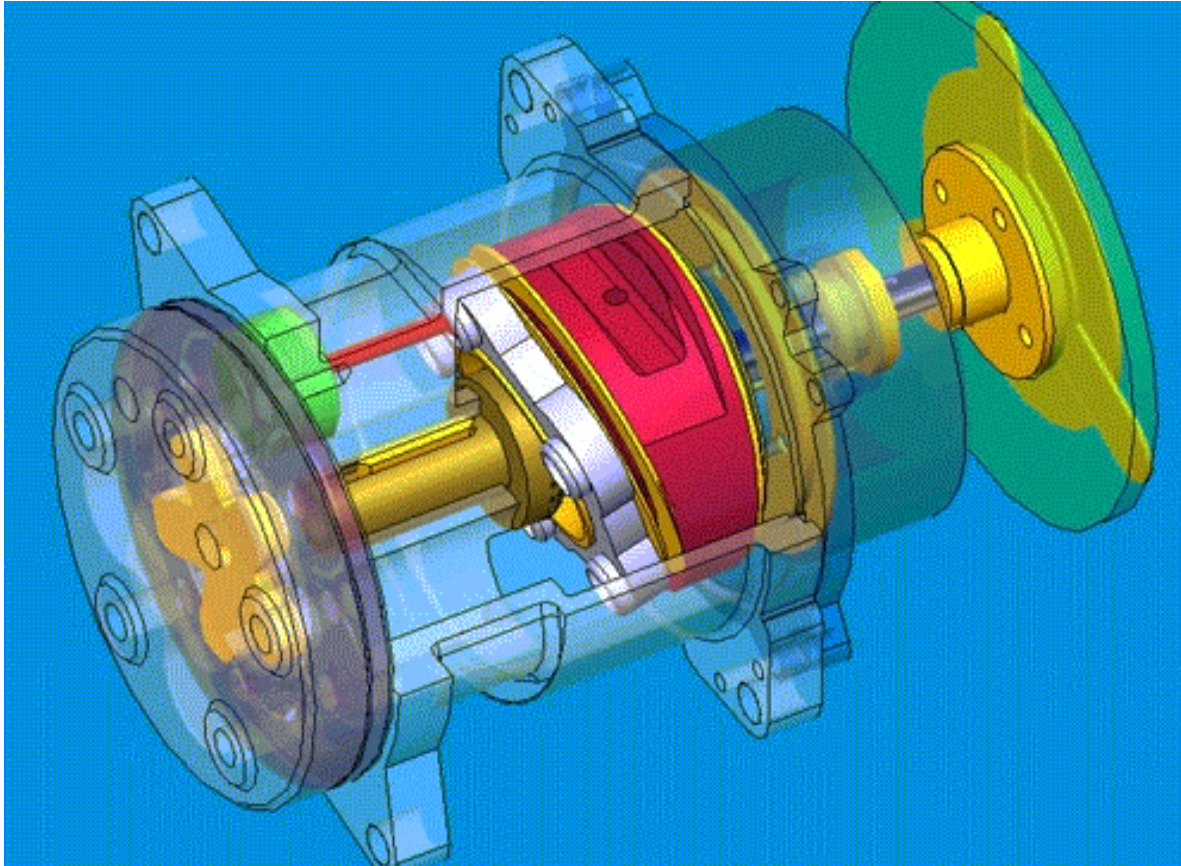
Transmission de puissance Partie Mobile



Transmission de puissance Partie Mobile



Fonctionnement



Fonction principale : Augmenter la pression du fluide

Question 7, 8 et 9 – trajet du fluide

Analyse de la nomenclature : Trouver des éléments « remarquables »

NOMENCLATURE

31	5	Vis HM 515
30	1	Goupille élastique
29	6	Rondelle
28	6	Rivet
27	1	Circlip
26	1	Rondelle butée
25	1	Rondelle ressort
24	1	Rondelle de réglage
23	1	Arbre d'entrée
22	1	Butée à aiguilles
21	1	Moyeu
20	1	Rondelle flasque d'embrayage
19	1	Poulie d'entraînement
18	1	Bobine
17	2	Roulement à billes
16	1	Couvercle moyeu
15	1	Roulement à aiguilles
14	5	Bielle
13	5	Piston

12	1	Clapet
11	1	Culasse
10	1	Clapet
9	1	Couvercle de culasse
8	1	Ressort
7	1	Clavette
6	1	Pignon fixe 17 dents
5	1	Bille de poussée
4	1	Roue conique 17 dents
3	1	Plateau oscillant
2	2	Plateau came
1	1	Corps
Rep	Nb	Désignation

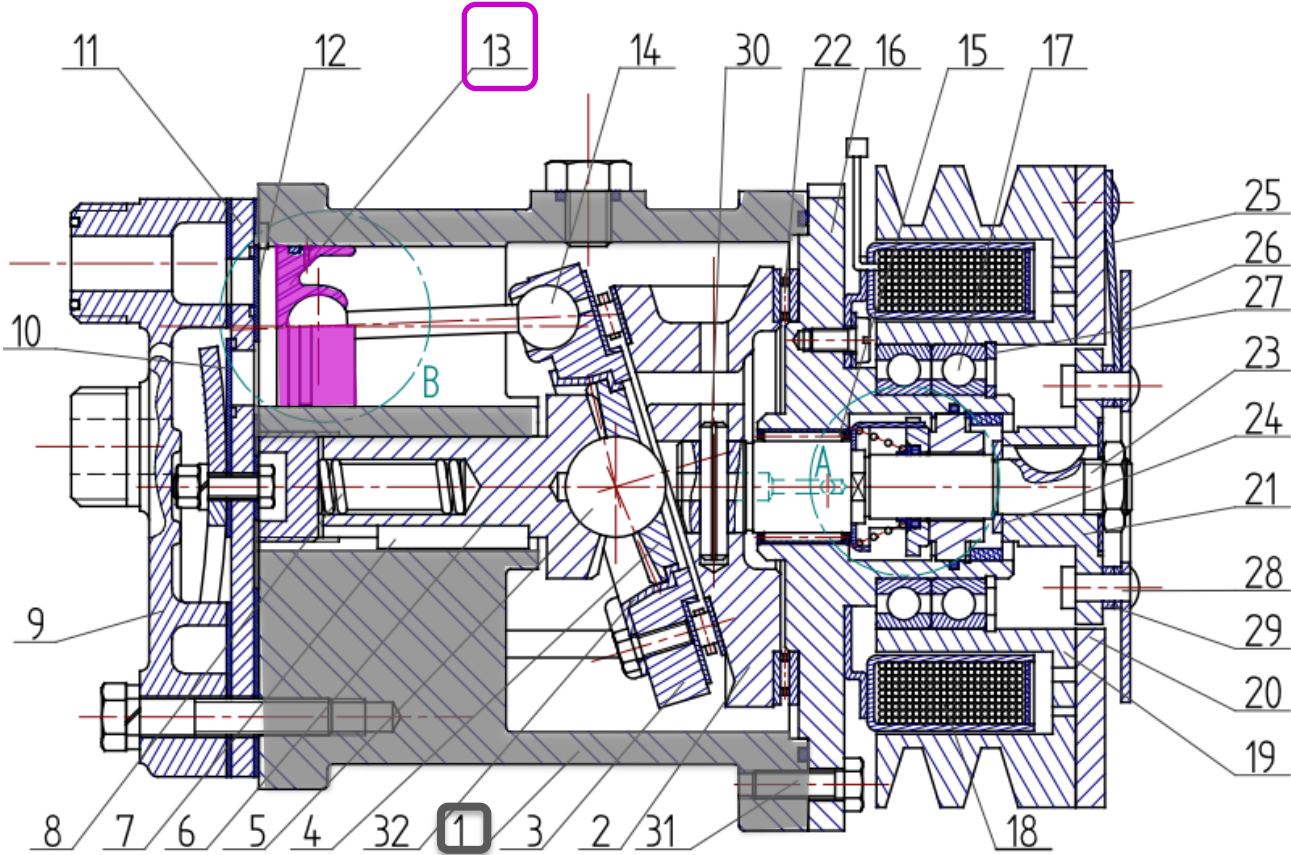
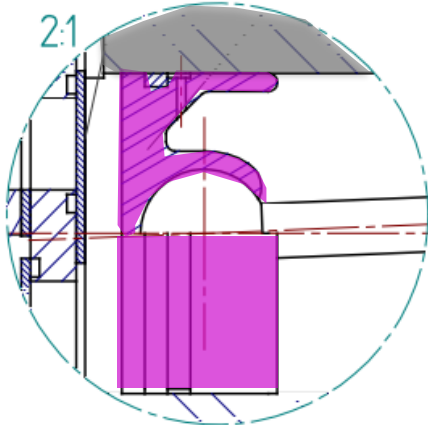
Il y a différents types de compresseurs (centrifuge, axial, à palettes ...) ici c'est donc un compresseur à pistons.

[animation compresseur 1](#)
[animation compresseur 2](#)

Identification de ces principaux constituants

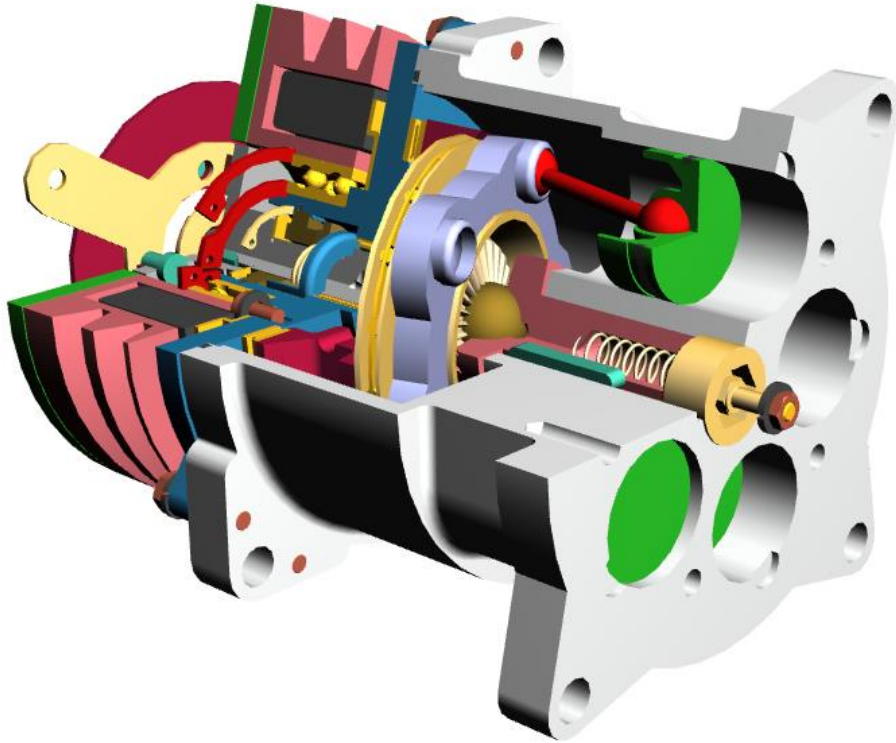
DETAIL B

2:1



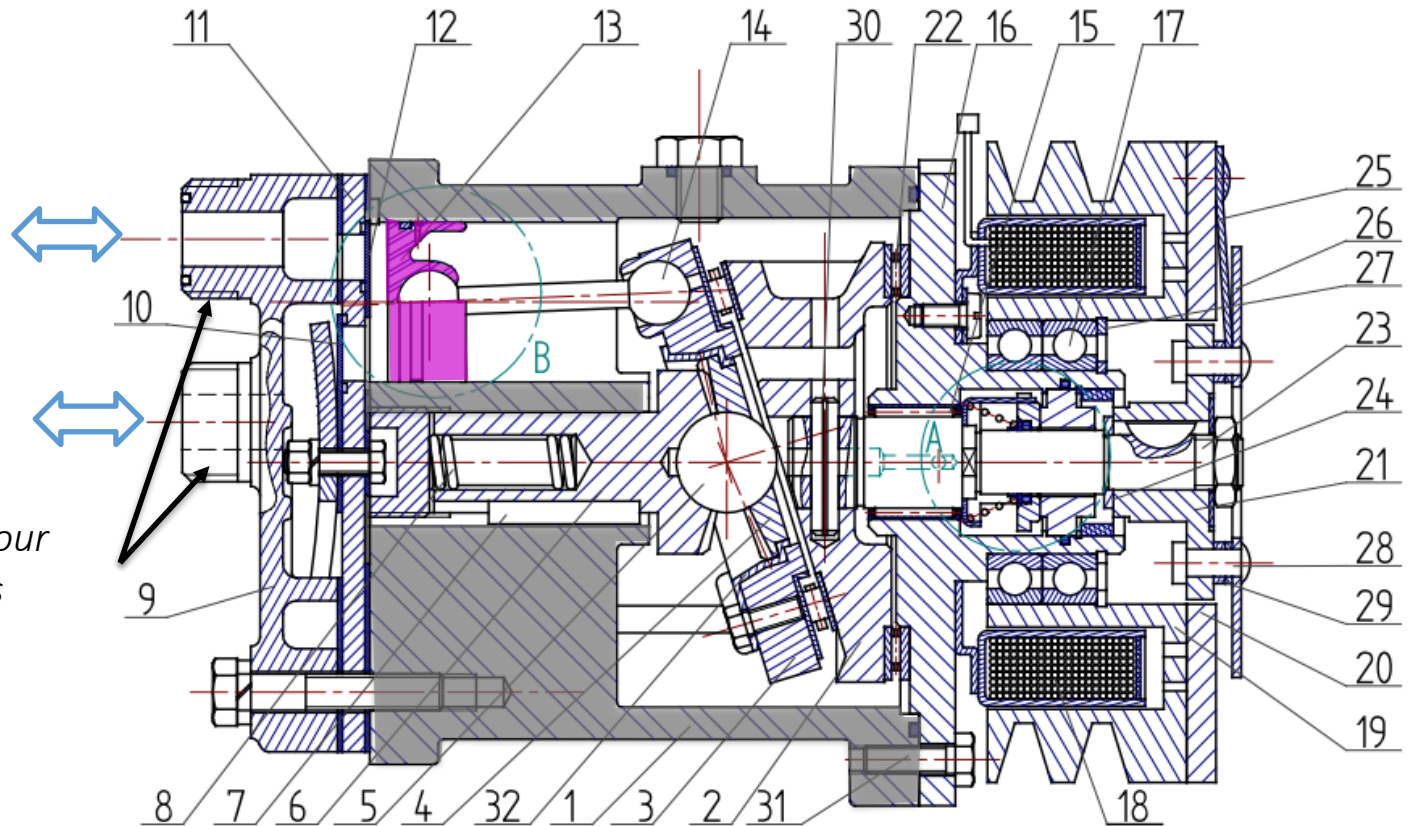
Corps

Géométrie cyclique



Entrée / Sortie ?

Fonction principale : le fluide entre avec une pression P_e et sort avec une pression P_s



Présence de filetage pour assembler les raccords

Question : Où est l'entrée ? Où est la sortie ?

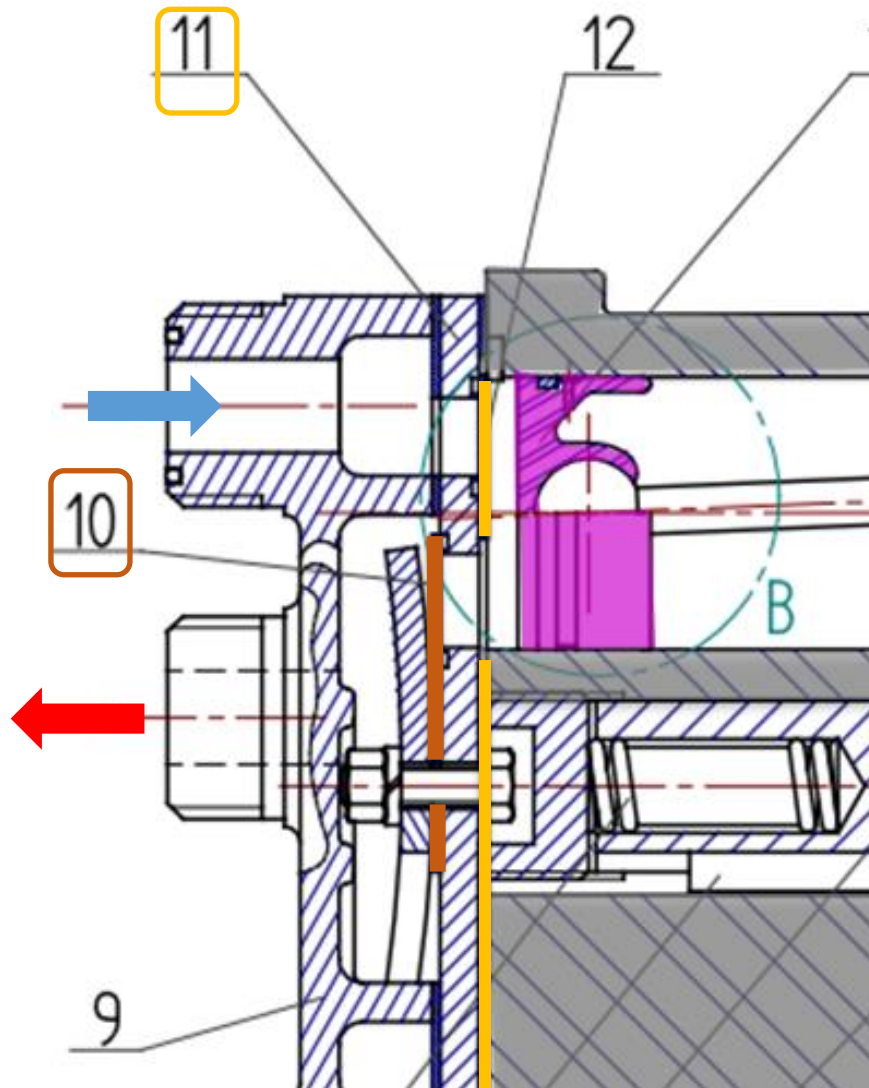
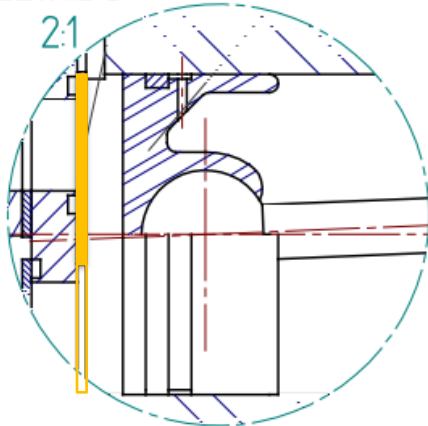
Entrée / Sortie ?

12	1	Clapet
11	1	Culasse
10	1	Clapet

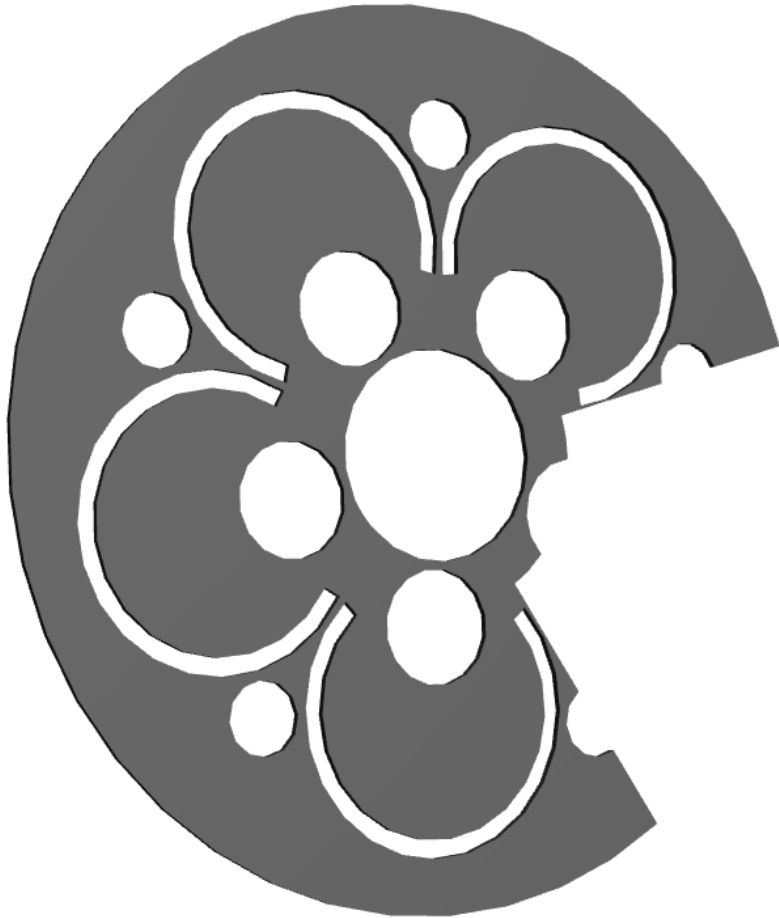
Un **clapet antiretour** est un dispositif installé sur une tuyauterie qui permet de contrôler le sens de circulation d'un fluide qui ne peut passer que dans un sens,

DETAIL B

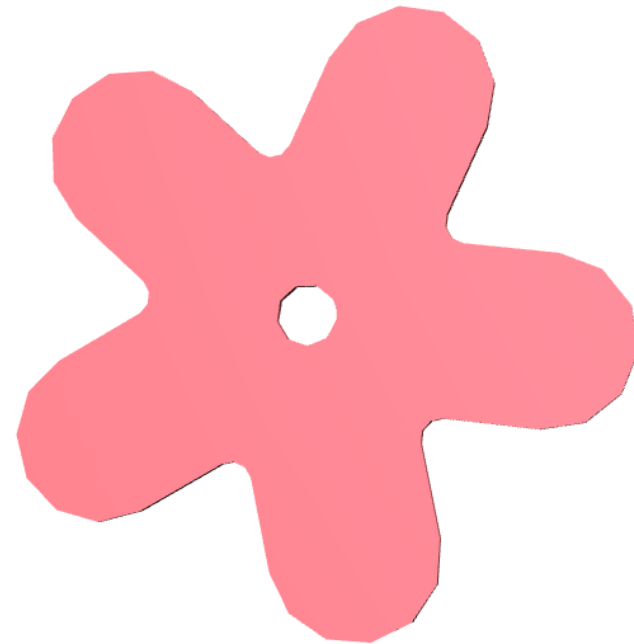
2:1



Détails des clapets



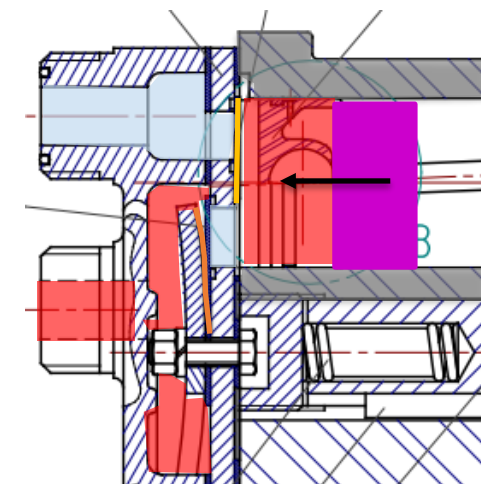
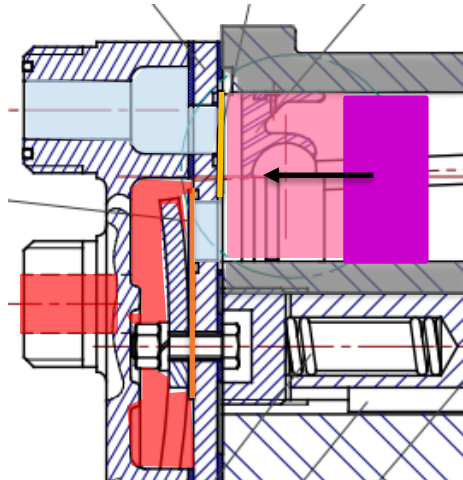
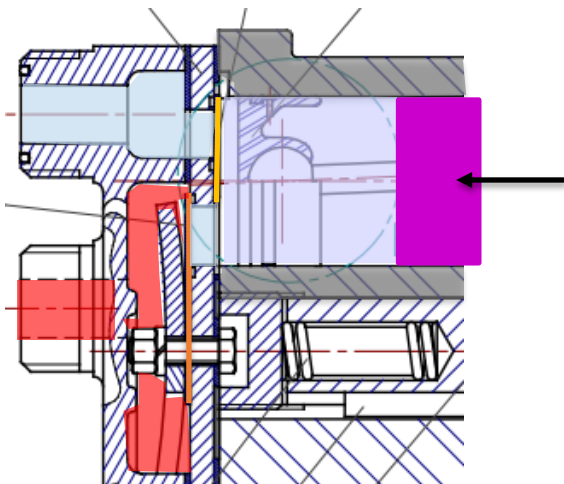
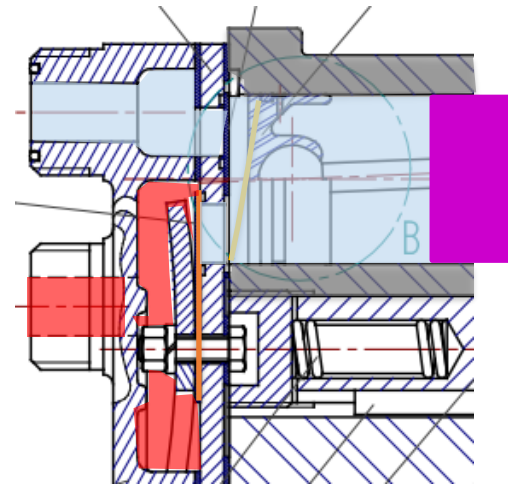
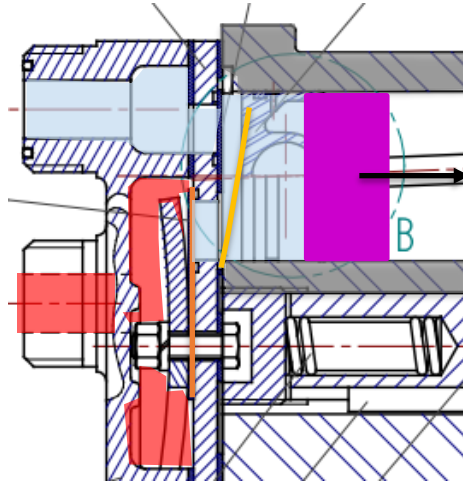
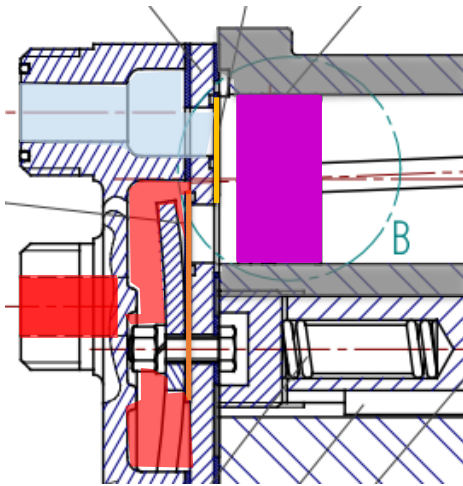
Clapet d'admission



Clapet de refoulement

Etapes de fonctionnement

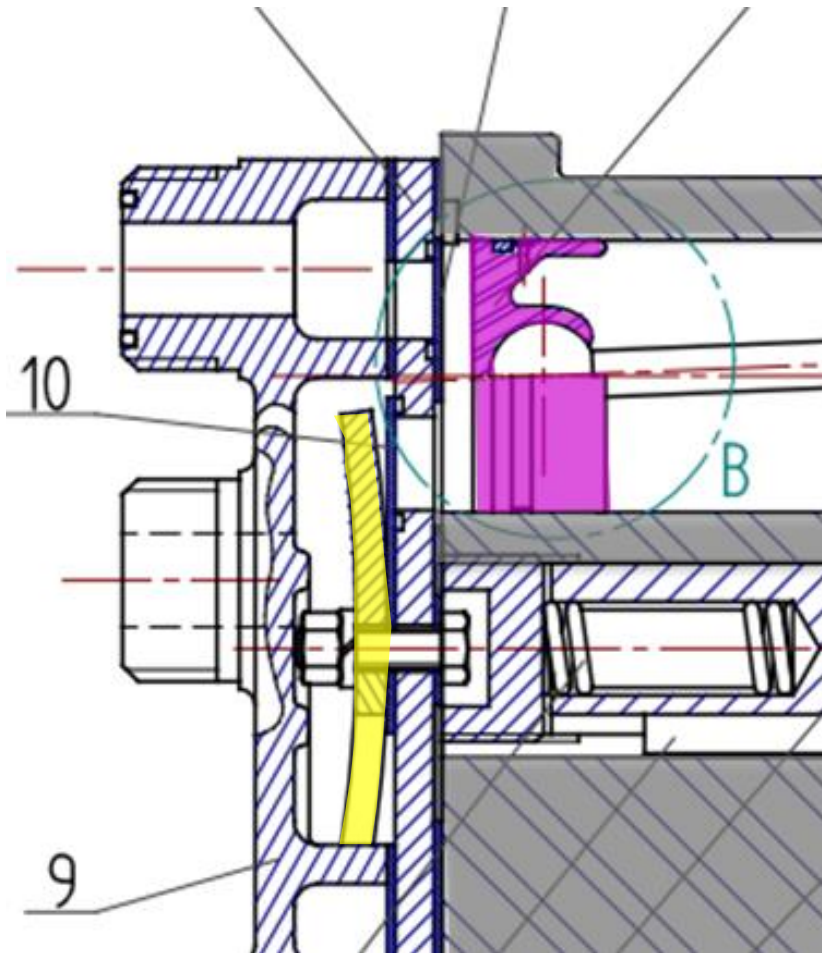
En se déplaçant le piston crée une dépression, le clapet s'ouvre, le fluide entre la chambre



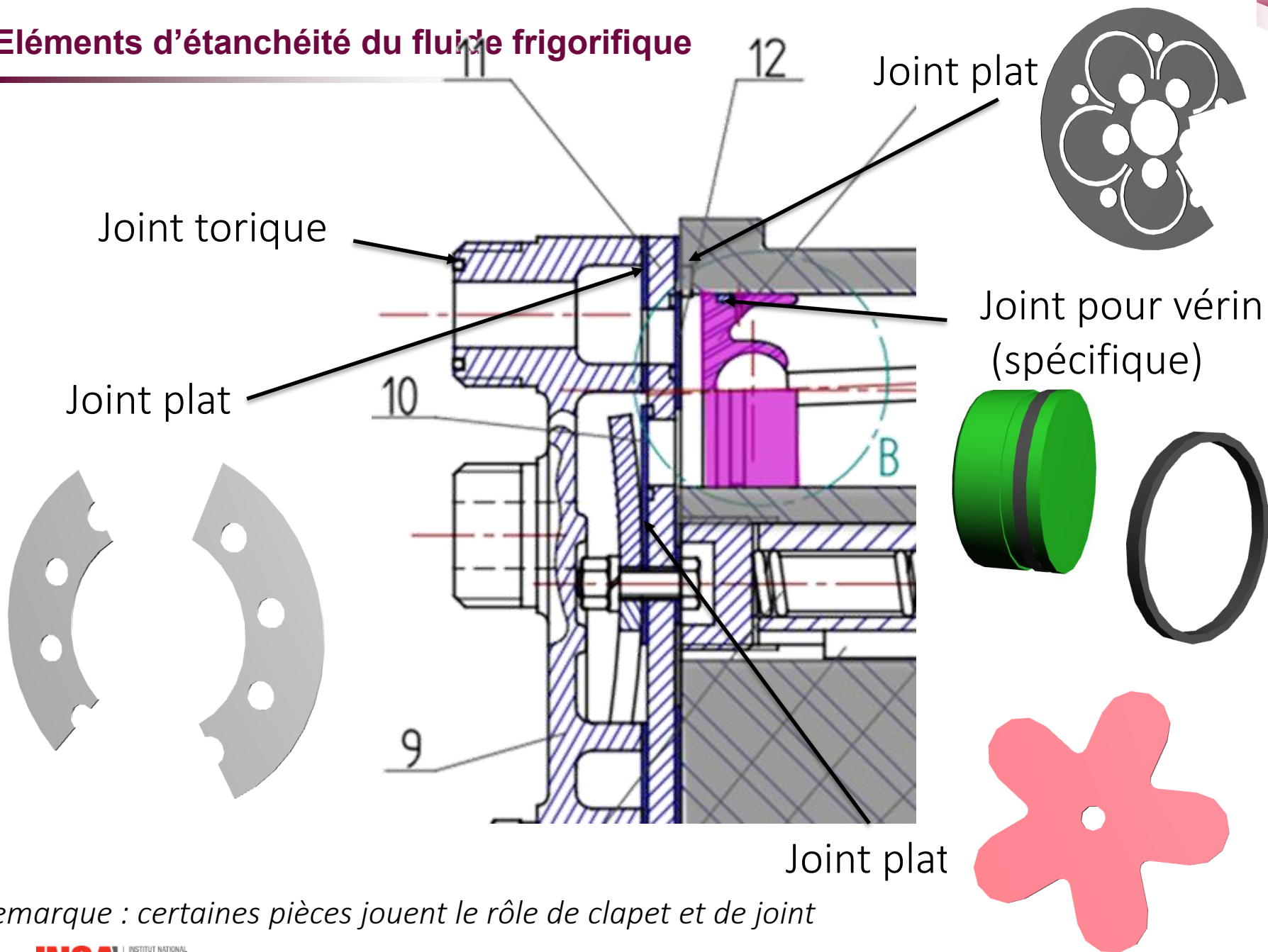
Lors du mouvement retour, le piston comprime le fluide, la pression augmente, le clapet d'admission se referme

Lorsque la pression de sortie est atteinte, le clapet s'ouvre, le fluide sort

Rôle de la pièce « courbe »



Éléments d'étanchéité du fluide frigorigé



Remarque : certaines pièces jouent le rôle de clapet et de joint

L'étanchéité, c'est... vital !

Type de transport	charge moyenne (kg de fluide)	taux de fuites annuel (%)	taux de fuites en fin de vie (%)
Climatisation automobile (R134a) - neuf	0.52	5	98

La réglementation européenne F-Gaz impose de recourir à des personnes qualifiées pour la prise en charge des systèmes de réfrigération et d'effectuer des contrôles d'étanchéité périodiques dans les installations. Les véhicules particuliers ne sont pas concernés car la charge est inférieure à 2kg...

CATÉGORIE DE FLUIDE	CHARGE EN FLUIDE FRIGORIGÈNE DE L'ÉQUIPEMENT	PÉRIODE DES CONTRÔLES en l'absence de dispositif de détection de fuites (*)	PÉRIODE DES CONTRÔLES si un dispositif de détection de fuites (*) est installé
HCFC	2 kg ≤ charge < 30 kg	12 mois	
	30 kg ≤ charge < 300 kg	6 mois	
	300 kg ≤ charge	3 mois	
HFC, PFC	5 t.éq.CO2 ≤ charge < 50 t.éq.CO2	12 mois	24 mois
	50 t.éq.CO2 ≤ charge < 500 t.éq.CO2	6 mois	12 mois
	500 t.éq.CO2 ≤ charge	3 mois	6 mois

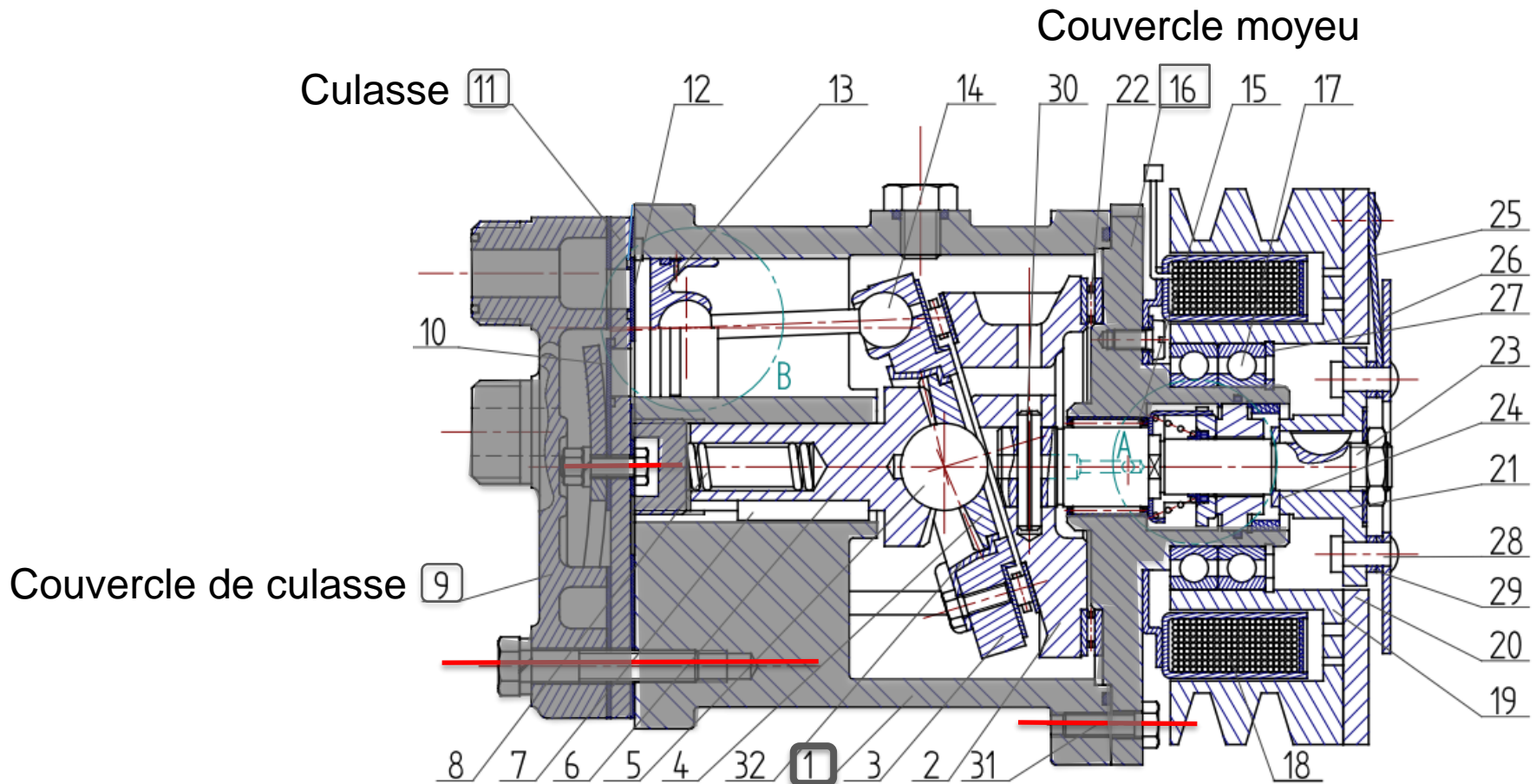
(*) Dispositif de détection de fuites respectant les prescriptions de l'article 3 du présent arrêté.

Fonction : transmettre momentanément la puissance du moteur à l'ensemble tournant du compresseur

Question 10 - embrayage

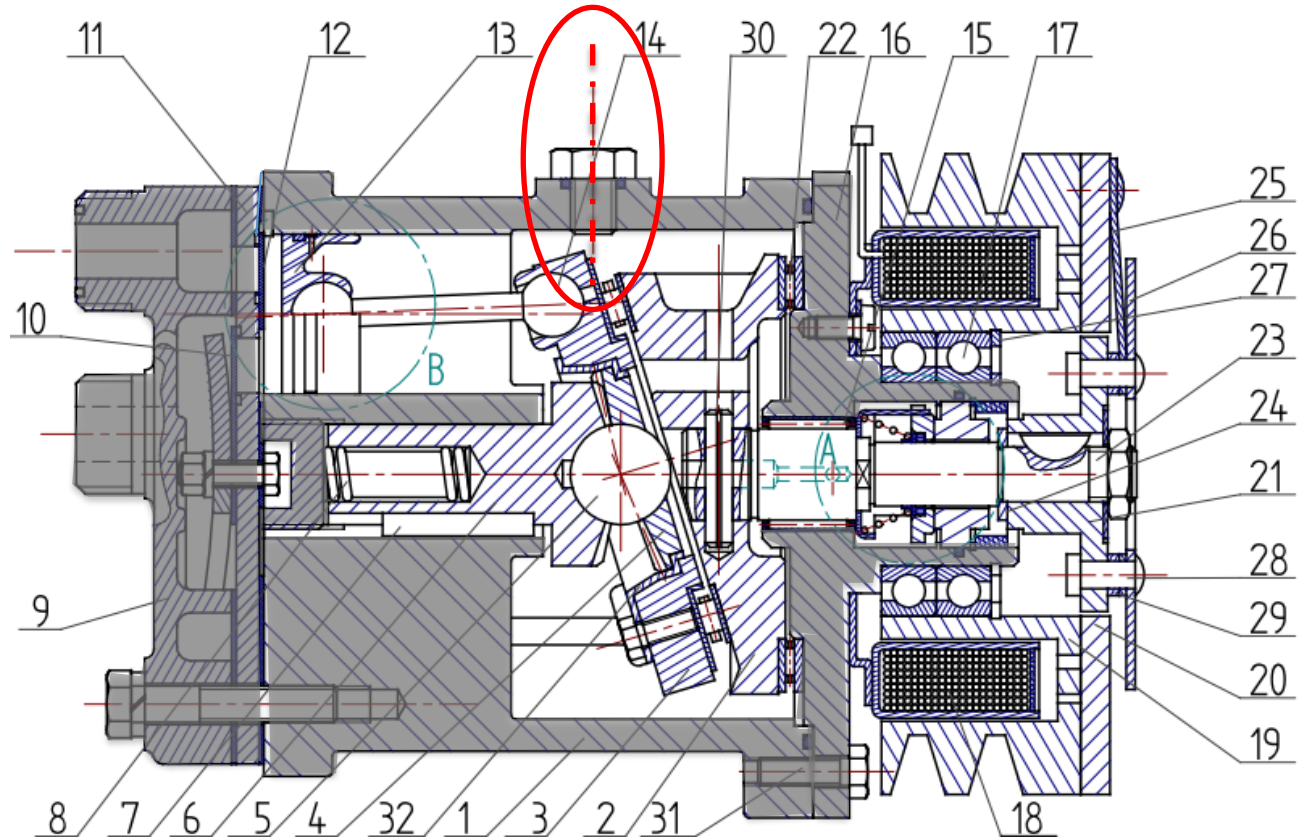
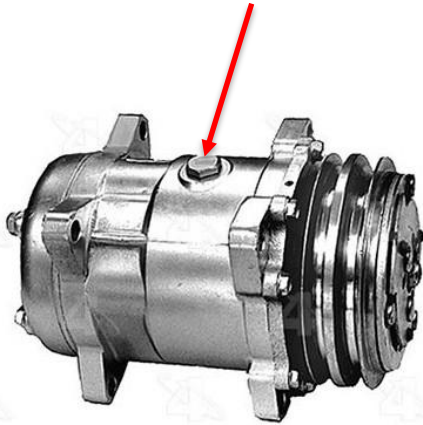
Mais avant, le bâti...

S0 : Partie Fixe – Bâti (déjà vue)

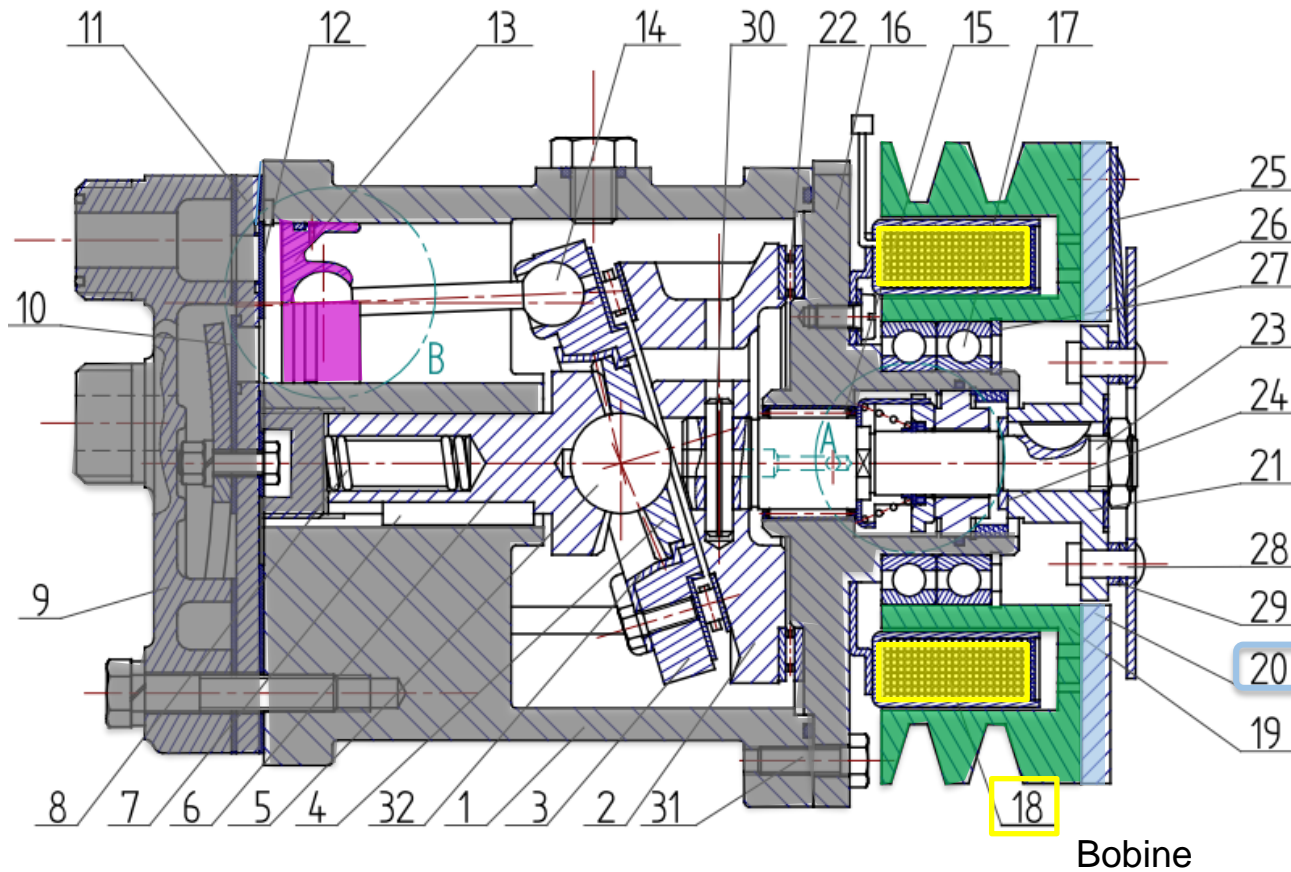


Mais avant, le bâti...

S0 : Partie Fixe – Bâti (déjà vue)

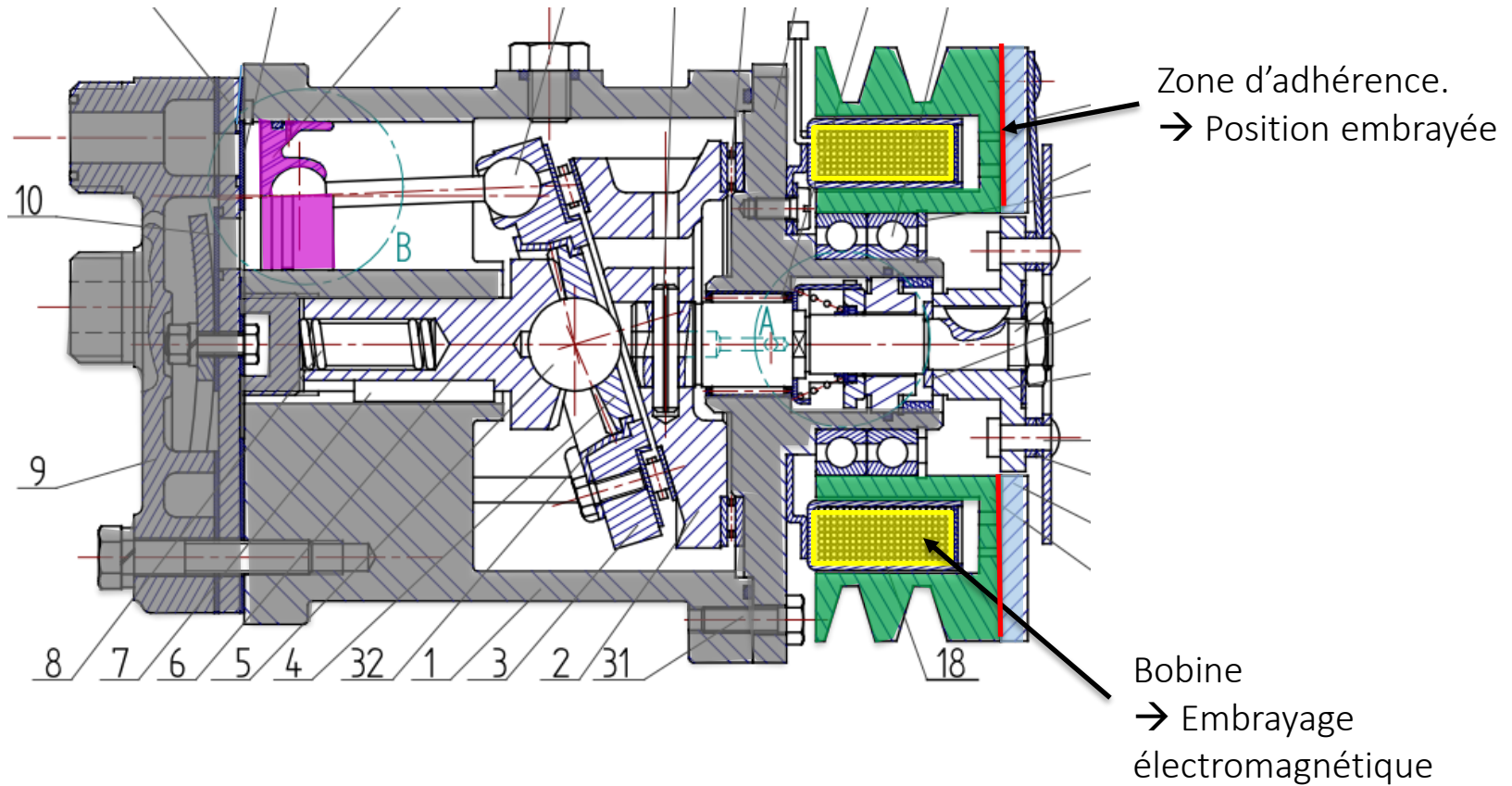


Rôle de la vis centrale ?

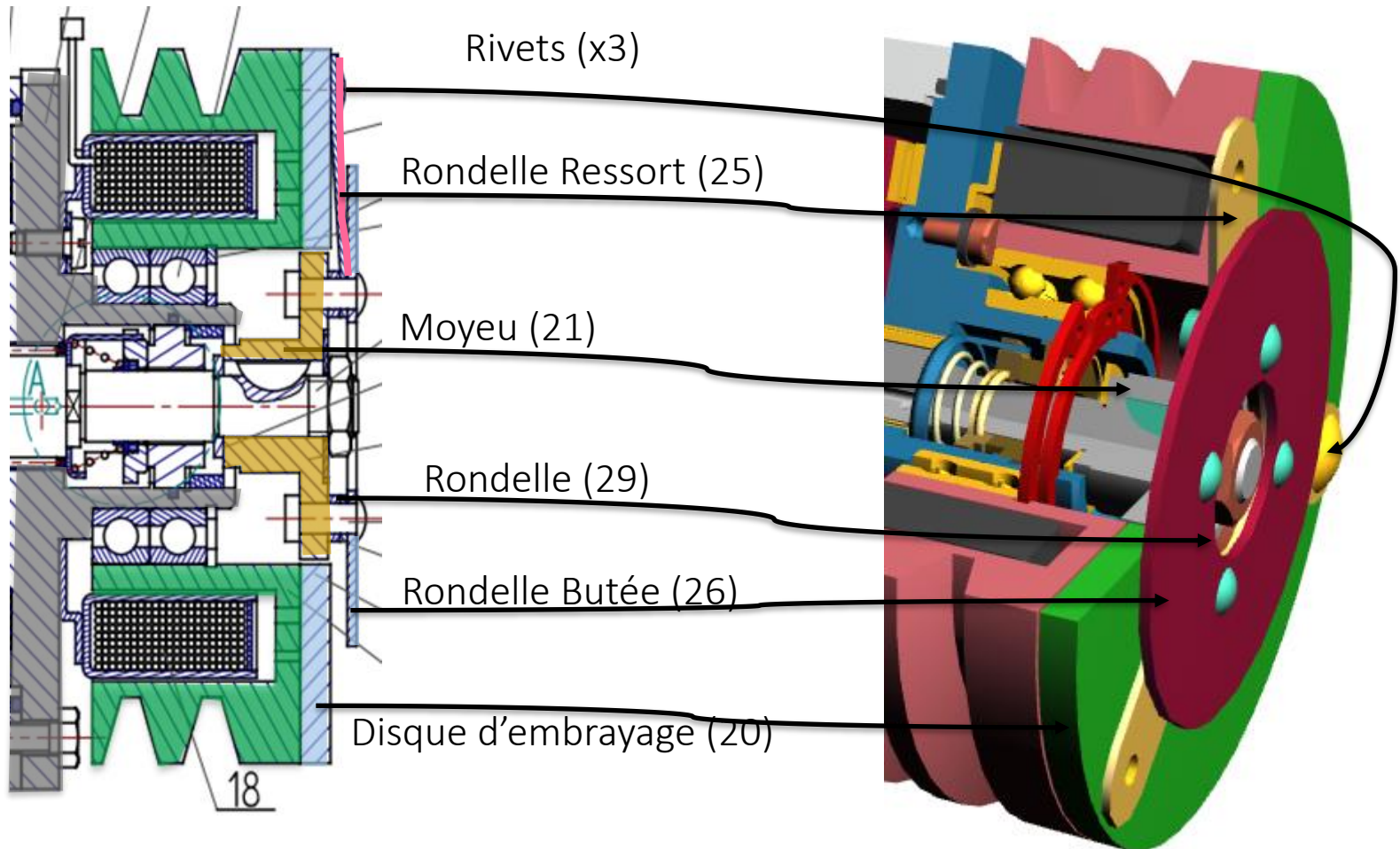


Principe d'un embrayage

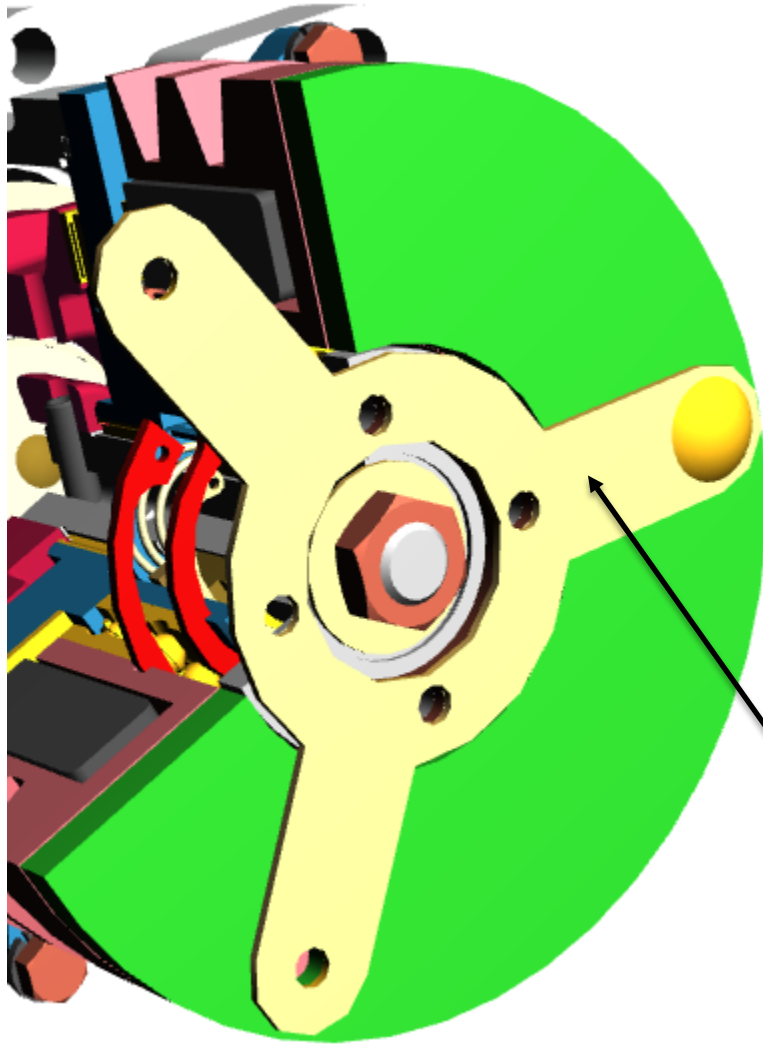
Un embrayage est un dispositif d'accouplement **par adhérence** entre un élément moteur (ici la poulie) et un autre dit récepteur (moyeu).



Pièces de l'embrayage



Liaisons entre les pièces de l'embrayage

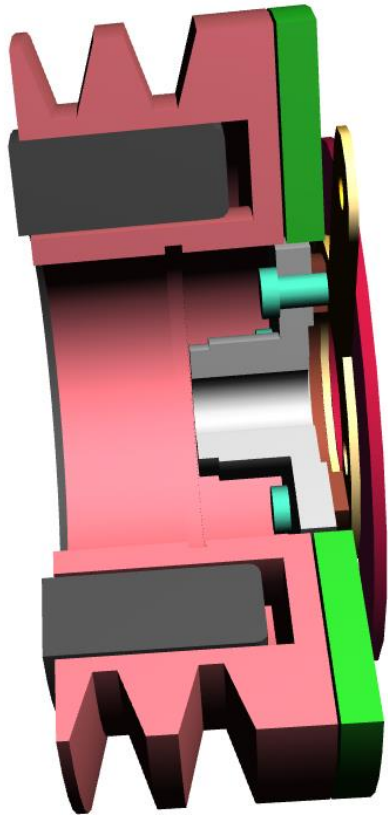


- Le disque d'embrayage et la rondelle ressort sont assemblés à l'aide de rivets
- La rondelle est considérée rigide radialement et flexible axialement

→ Transmission du couple

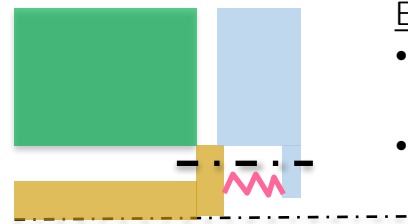
Partie assurant la flexibilité axiale

Liaisons entre les pièces de l'embrayage



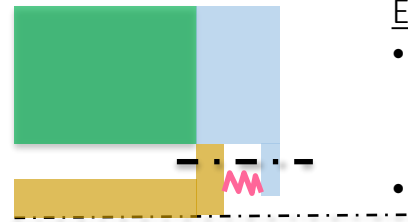
- Les rondelles ressort (25), butée (26) et (29) sont montées rigidement à l'aide de 4 rivets (28)
→ Transmission du couple

Schéma de principe



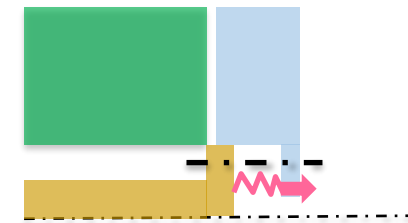
En position débrayée :

- Le disque ne touche pas la poulie
- La rondelle ressort est non sollicitée



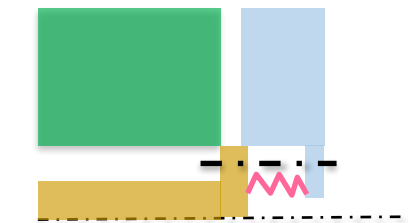
En position embrayée :

- L'électro aimant exerce un effort sur le disque qui vient en contact avec la poulie
- La rondelle ressort est comprimée

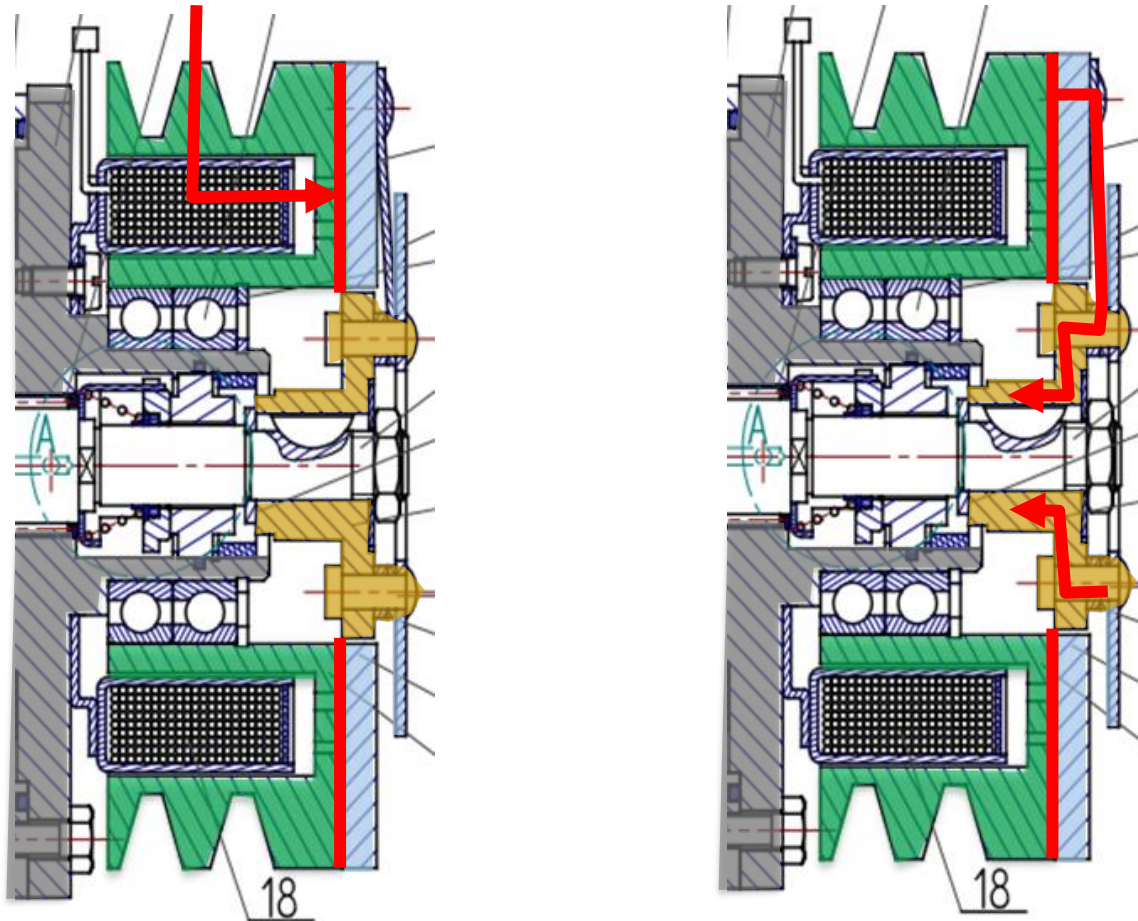


Au débrayage :

- Le disque n'est plus soumis qu'à l'effort de la rondelle ressort
- Il retrouve sa position initiale



Transmission de la puissance

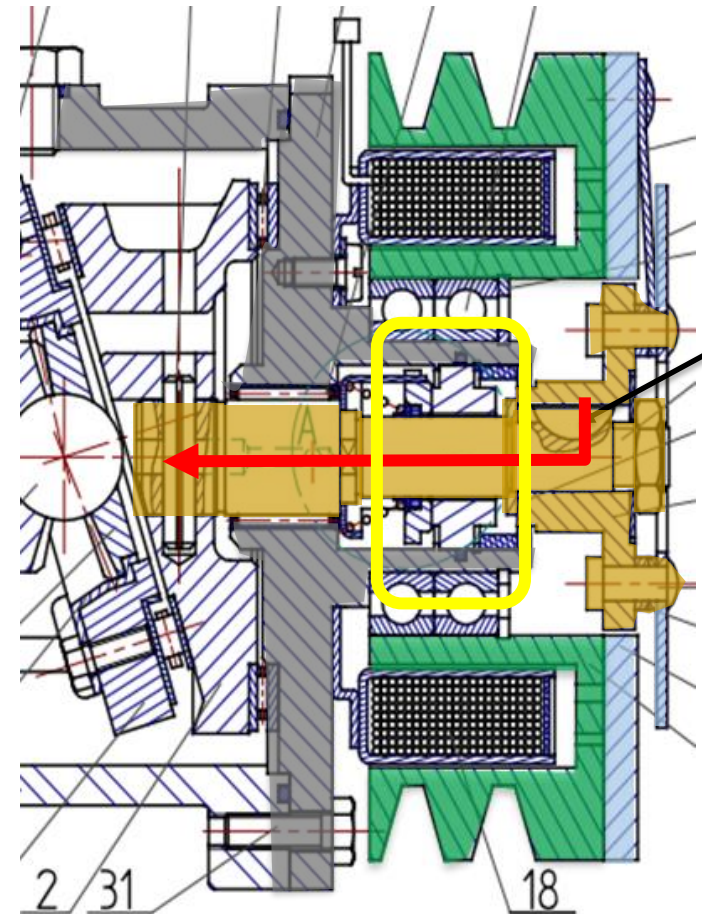
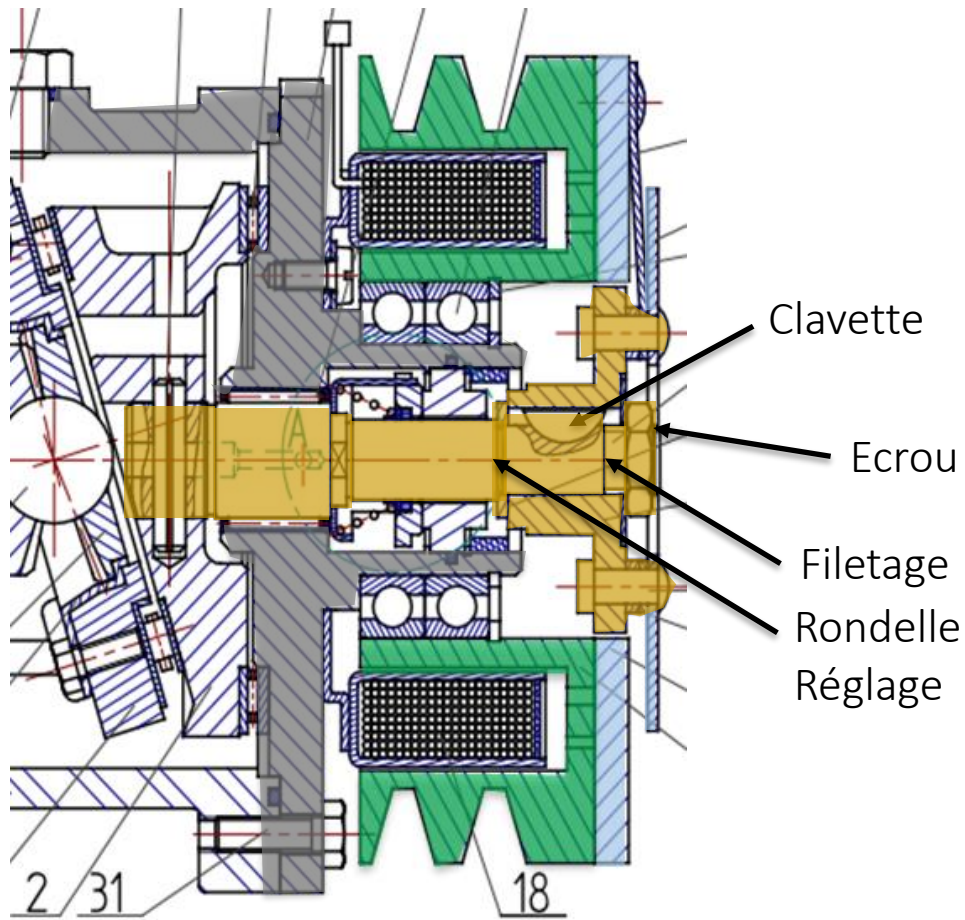


On considère par la suite que l'entrée de puissance se fait au niveau du moyeu

Fonction : transformer le mouvement de rotation en mouvement de translation alternée

Question 11 – ensemble tournant

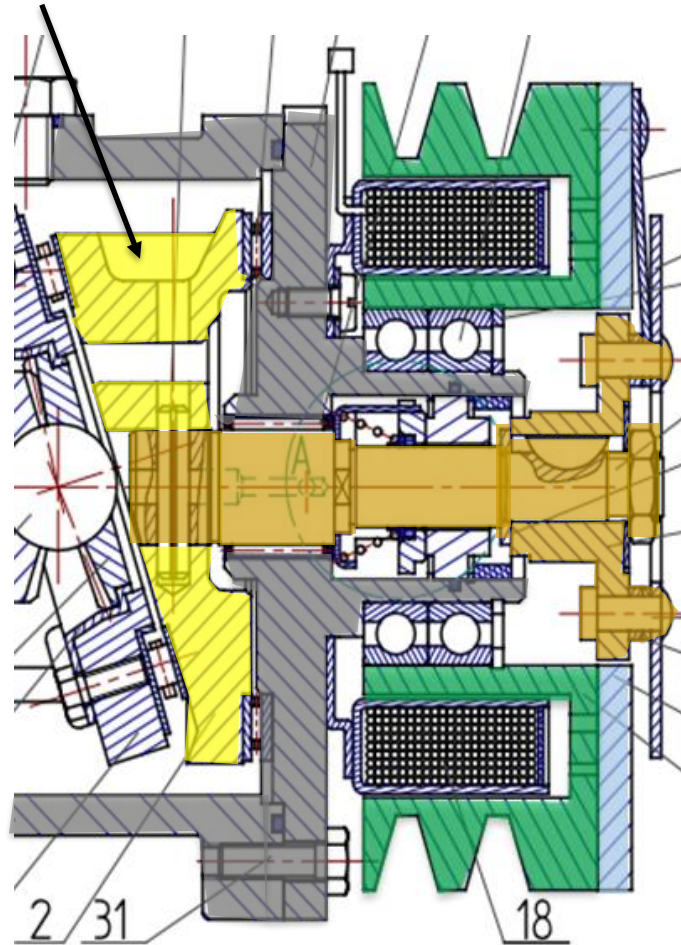
Classe d'équivalence S1 : Ensemble tournant



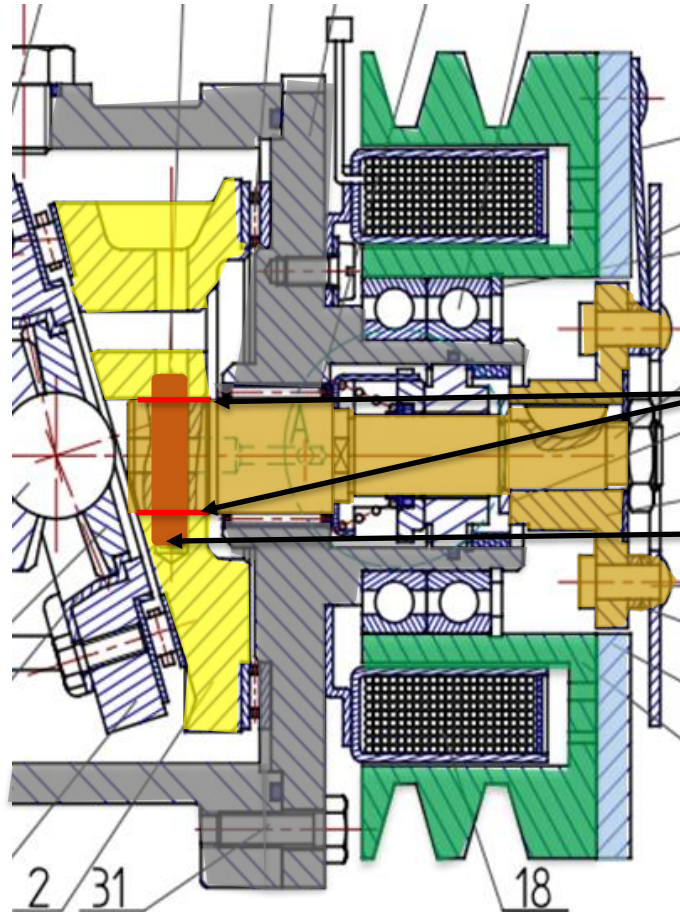
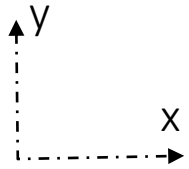
Le détail de cette zone sera vue plus tard

Classe d'équivalence S1 : Ensemble tournant

Plateau Came ?



Classe d'équivalence S1 : Ensemble tournant



La goupille élastique réalise une liaison de type encastrement avec l'arbre uniquement

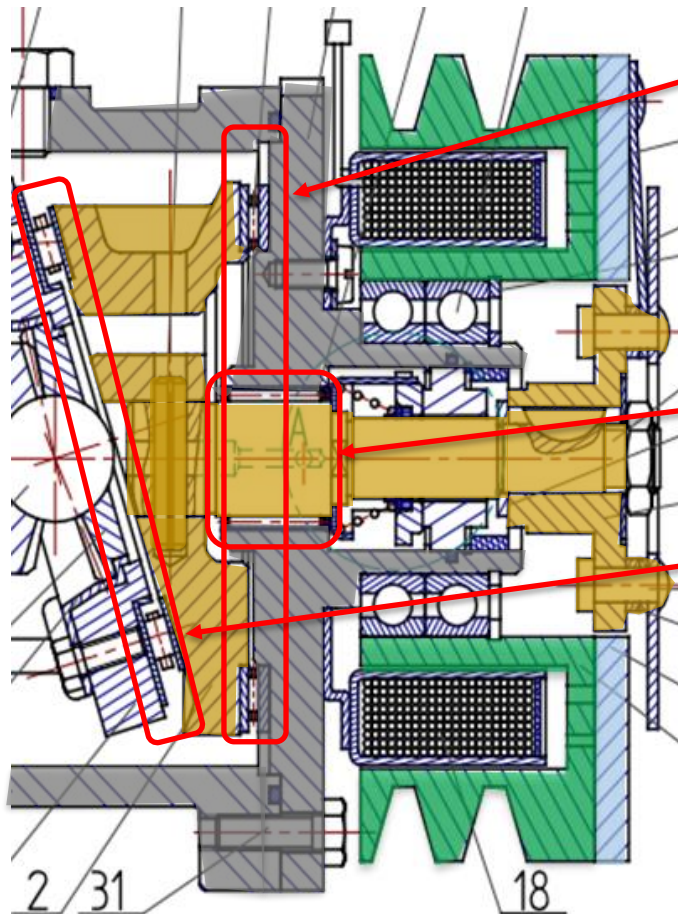
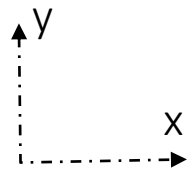
Arbre : 2 Cylindres courts (-T_y, -T_z)

Goupille (-T_x, -T_z, -R_x, -R_z)



R_y → Pivot d'axe y

Classe d'équivalence S1 : ensemble tournant



Butée à aiguilles



Liaison S1/S0 : Appui plan

roulement à aiguilles

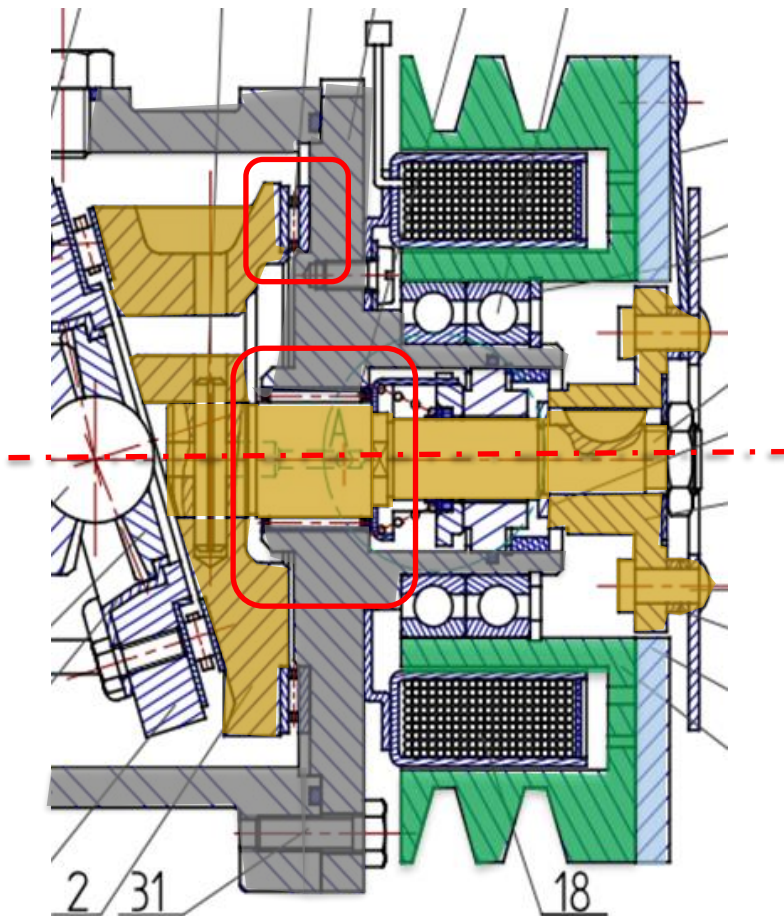
Liaison S1/S0 : pivot

Butée à aiguilles



Liaison S1/S3 : Appui plan

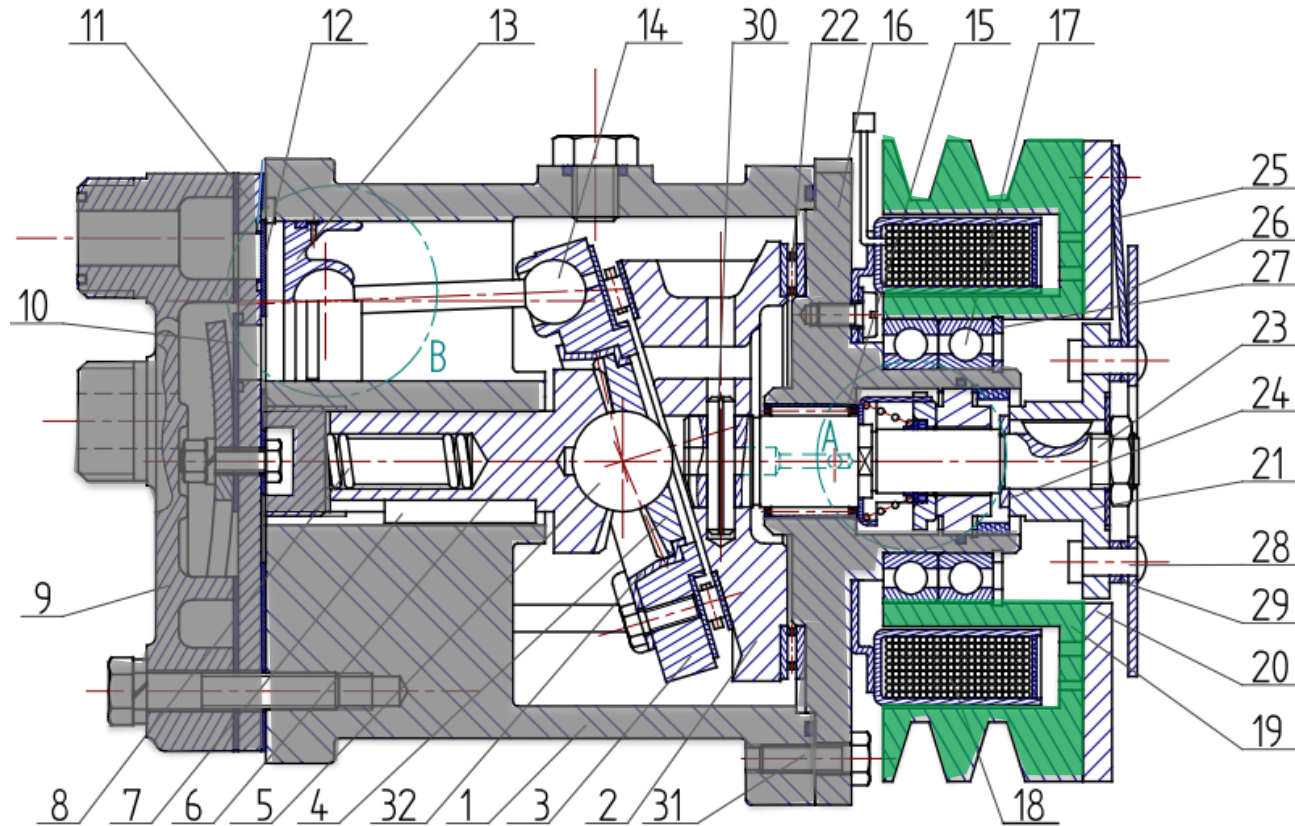
Remarques sur les tolérances

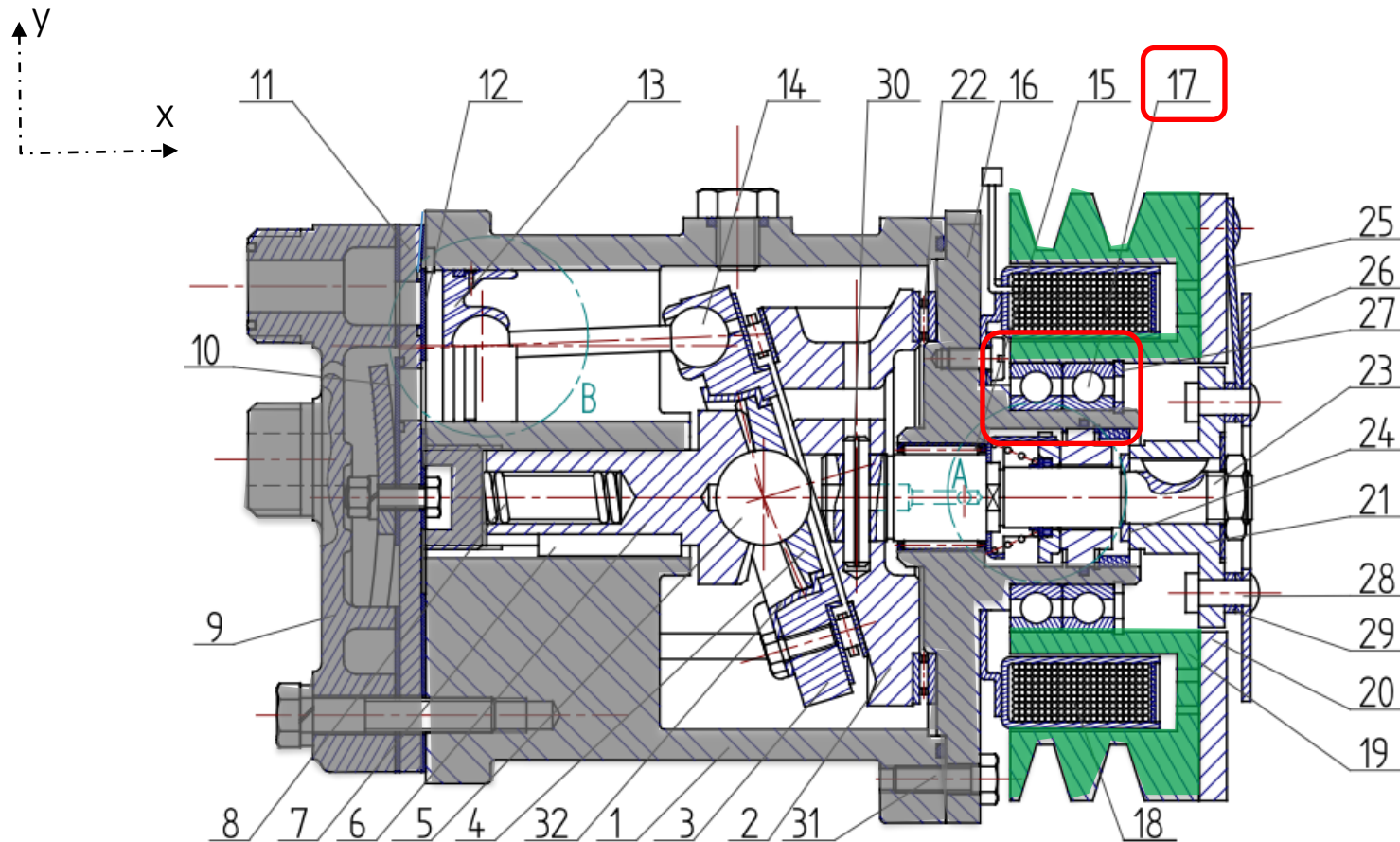


Contrainte de co-axialité

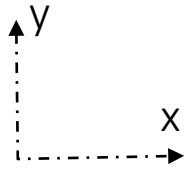
Fonction : Réceptionner la puissance motrice

Question 12 - Poulie

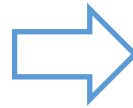
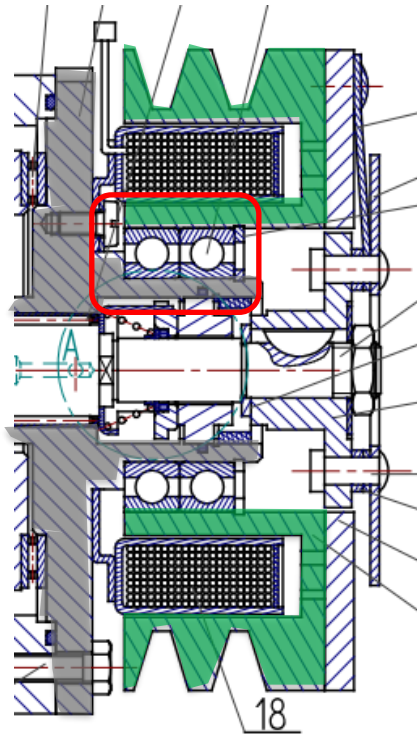




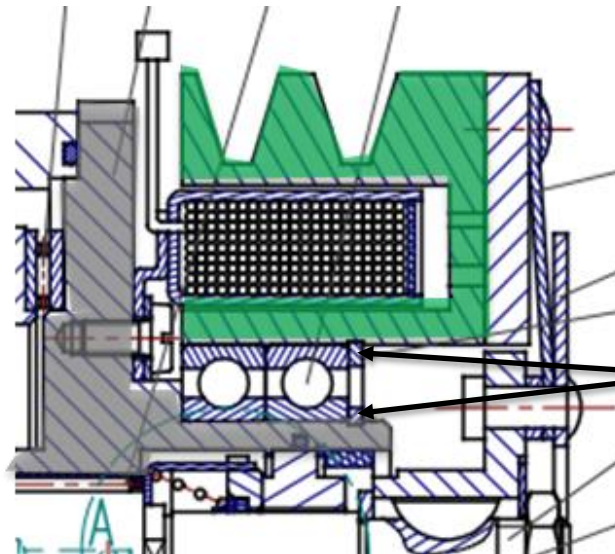
Deux roulements à billes en parallèle → Liaison Pivot d'axe x



- Axe intérieur fixe (bâti)
- Moyeu tournant (poulie)
- Charge fixe / ref fixe



- Bagues intérieures glissantes
- Bagues extérieures serrées

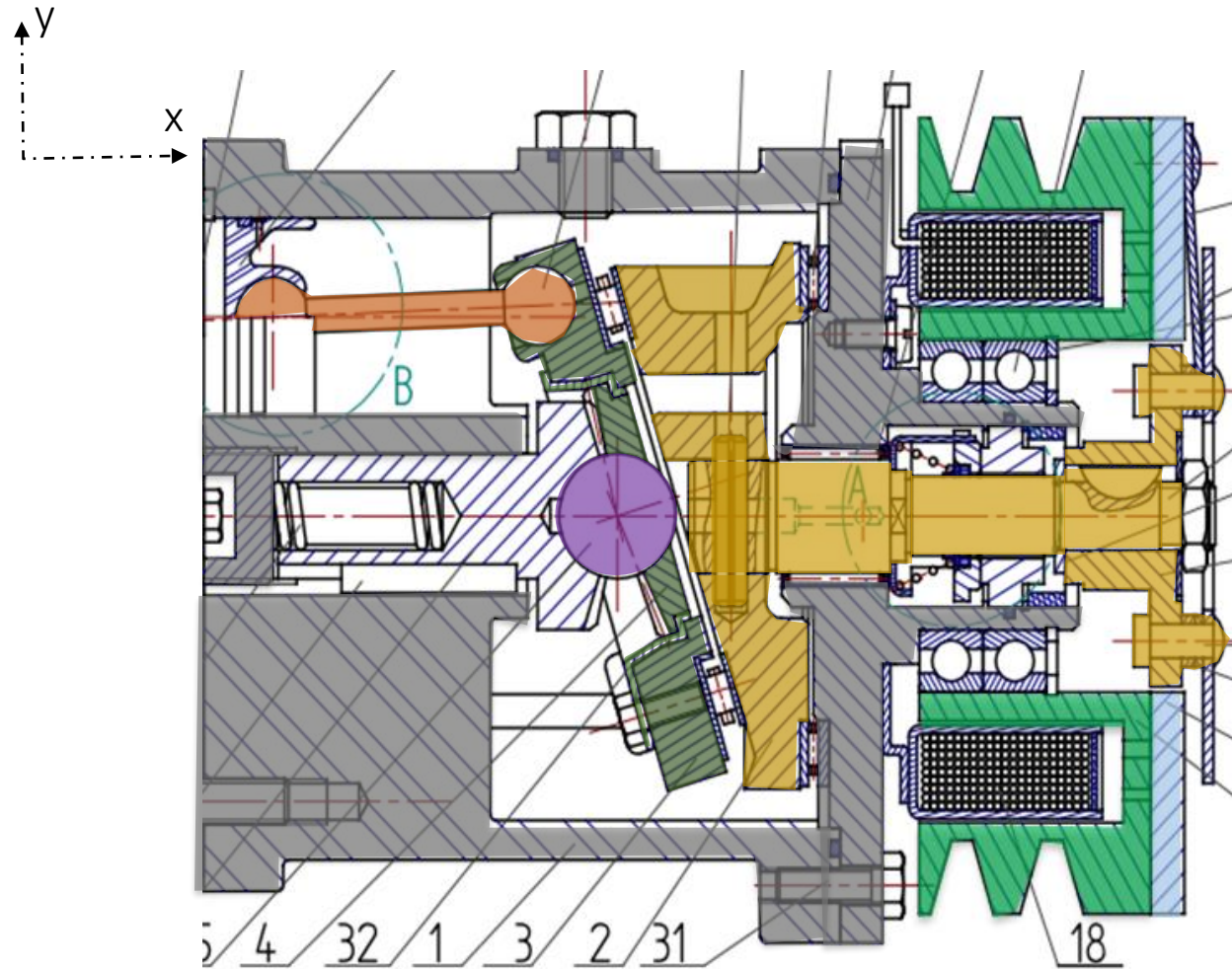


Il y a 2 circlips !

Fonction : assurer le maintien des trajectoires et mouvements désirés

**Question 13 et 14 – maîtrise des
mobilités**

Classe d'équivalence S5 : Bille



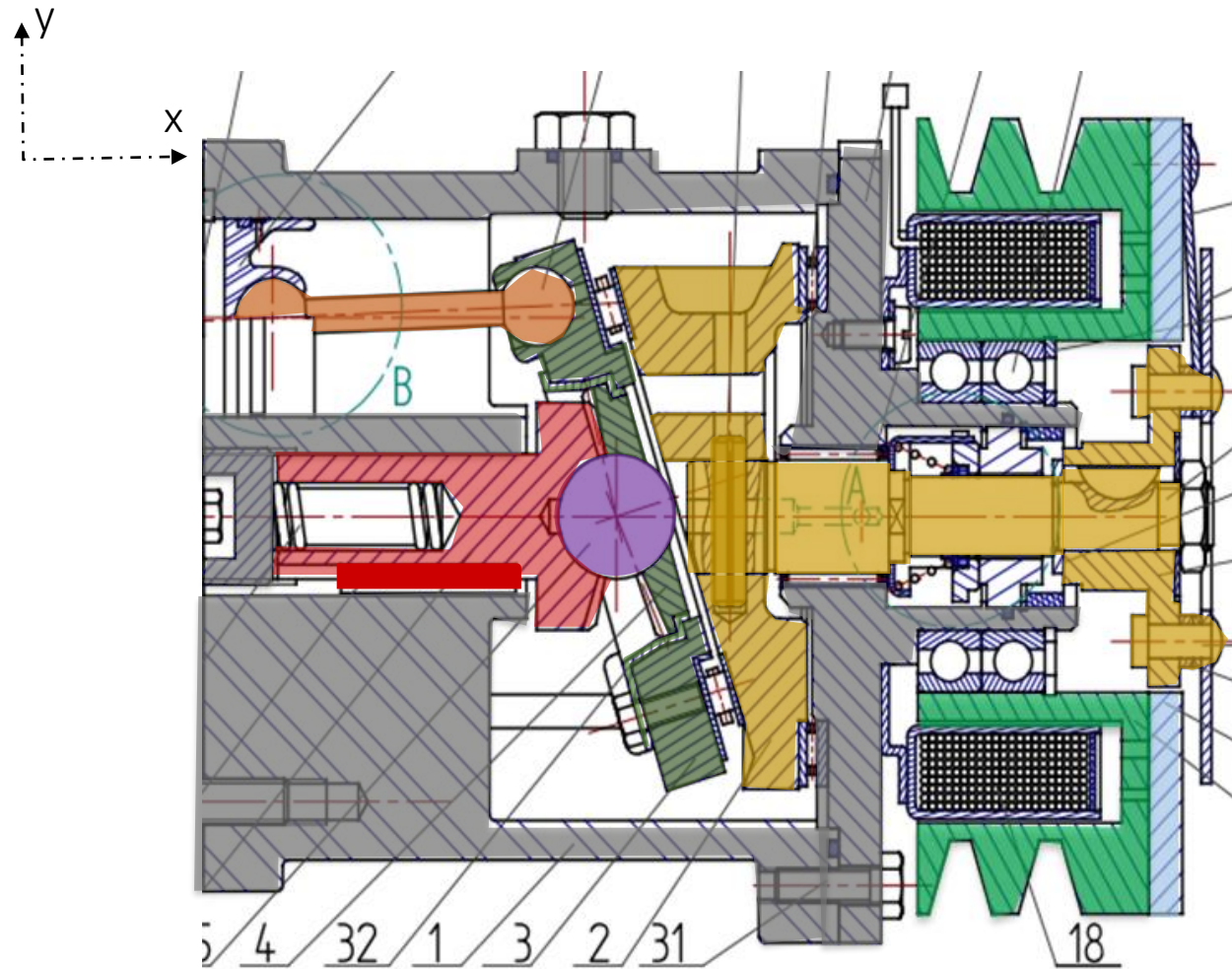
Liaison avec S3 :

- Contact sphérique



Liaison rotule

Classe d'équivalence S6: Pignon fixe



Liaison avec S0 :

- Guidage long
- Appuis plan
- Clavette



Liaison glissière

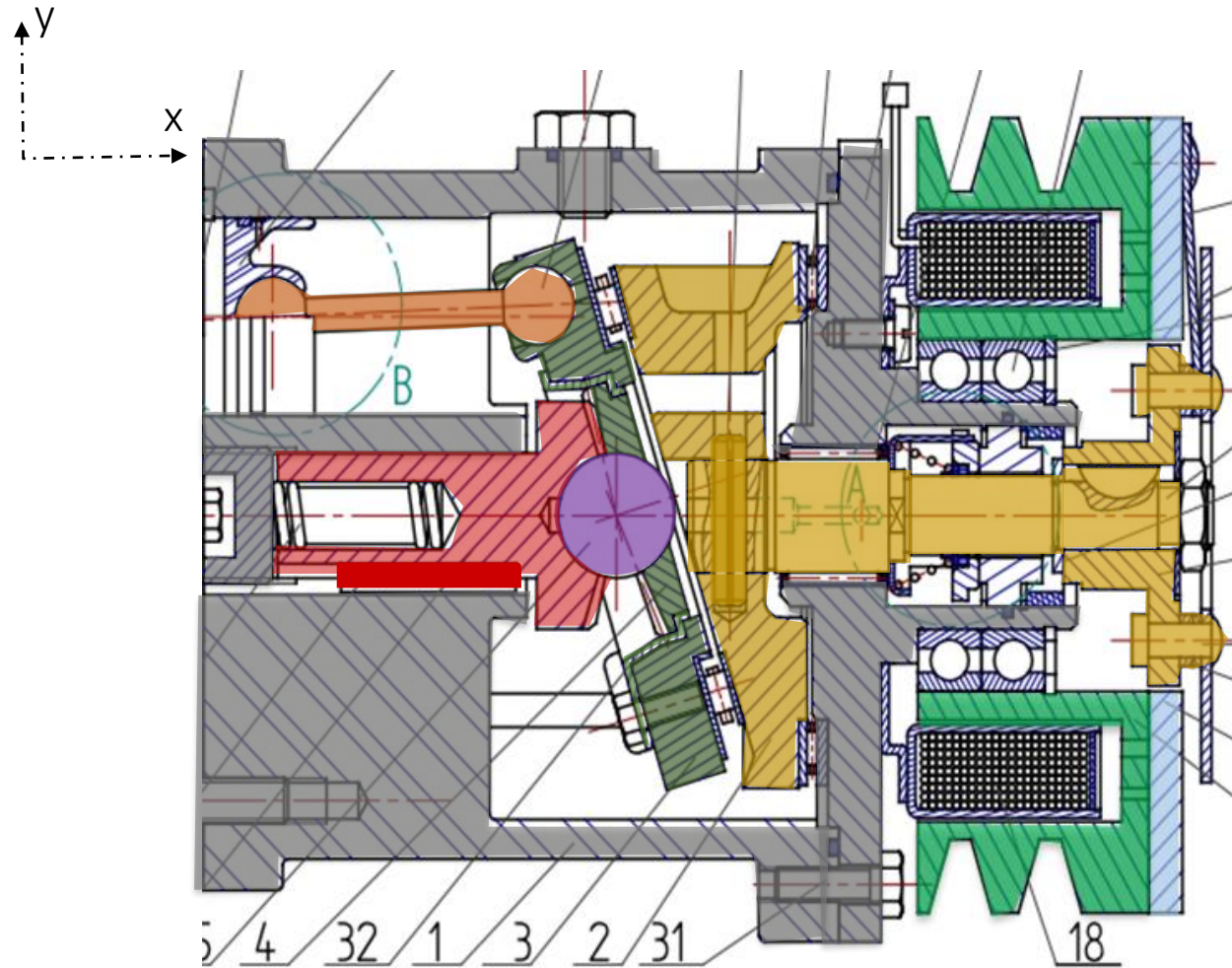
Liaison avec S5 :

- Contact sphérique



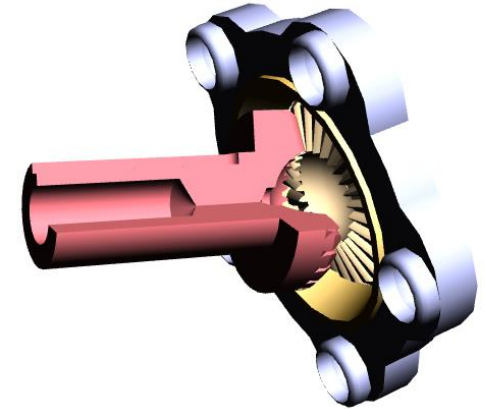
Liaison rotule

Classe d'équivalence S6 : Pignon fixe



Liaison avec S3 :

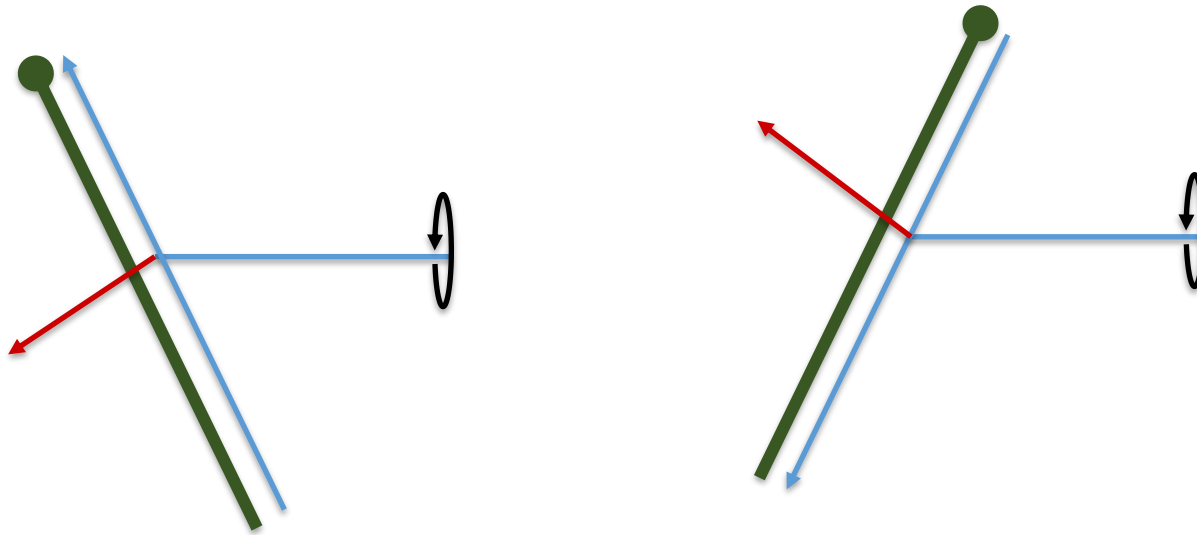
- Engrenage conique



Liaison ponctuelle

Remarques sur la liaison précédente

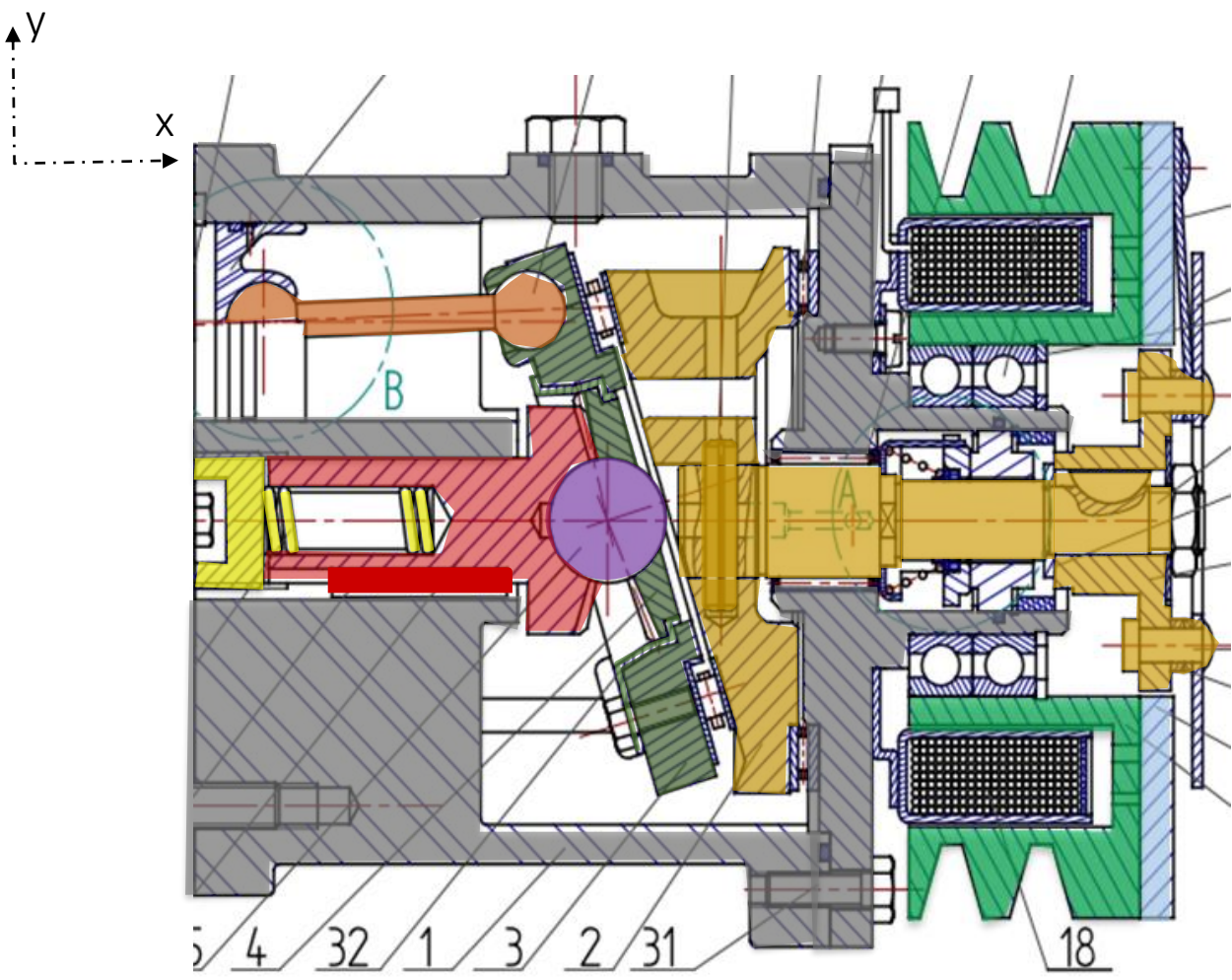
- Ce n'est pas une « vraie » liaison par engrenages (couplage en rotation)
- La position du point de contact change avec la rotation de S2
- Permet d'assurer le blocage en rotation autour de la normale au contact du plan entre S3 et S2 lors de la rotation de S2



Pièce réelle



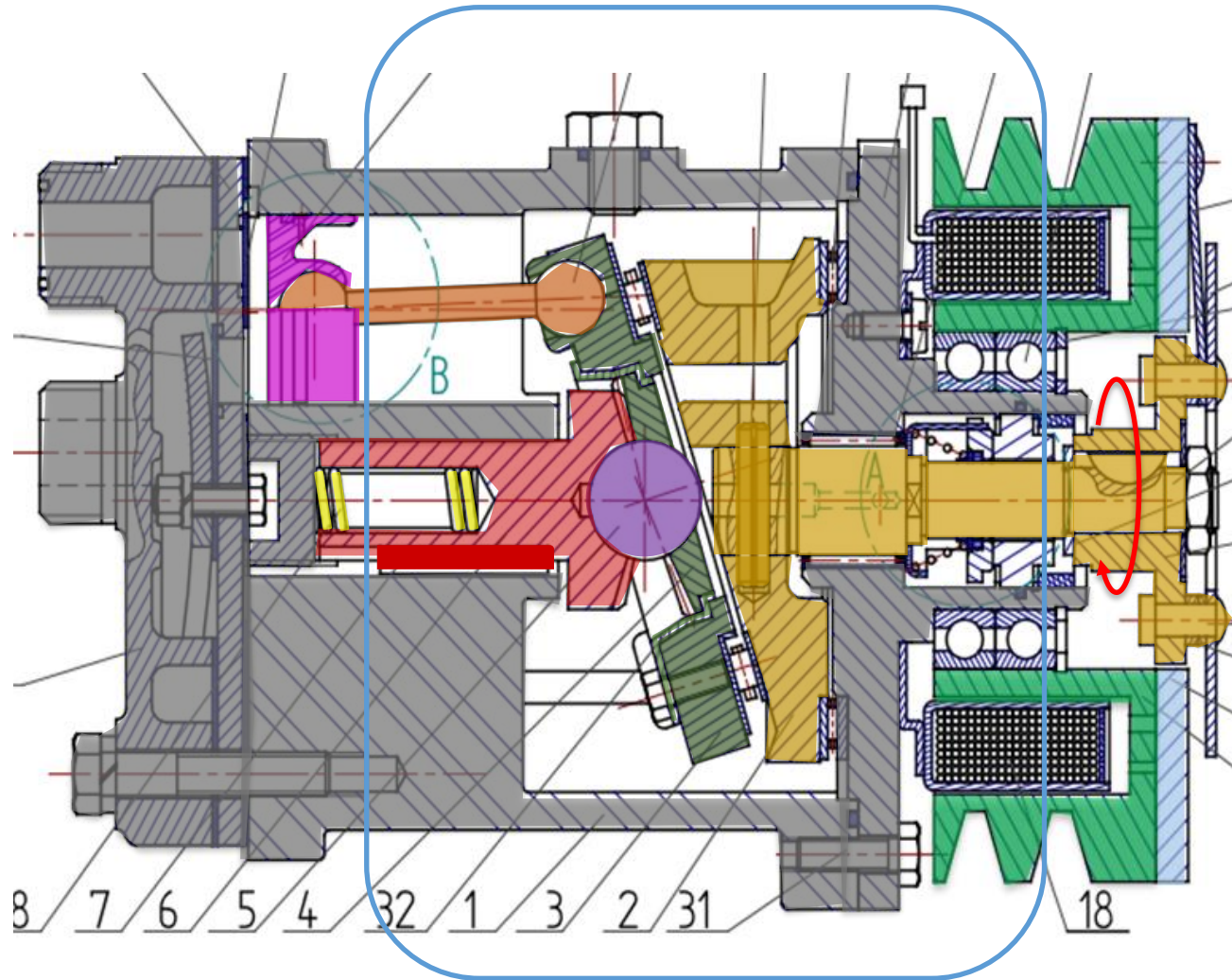
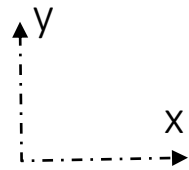
Rôle du ressort 8 et du bouchon fileté



Fonction : assurer l'étanchéité du système

Question 15 – étanchéité et lubrification

Problématique

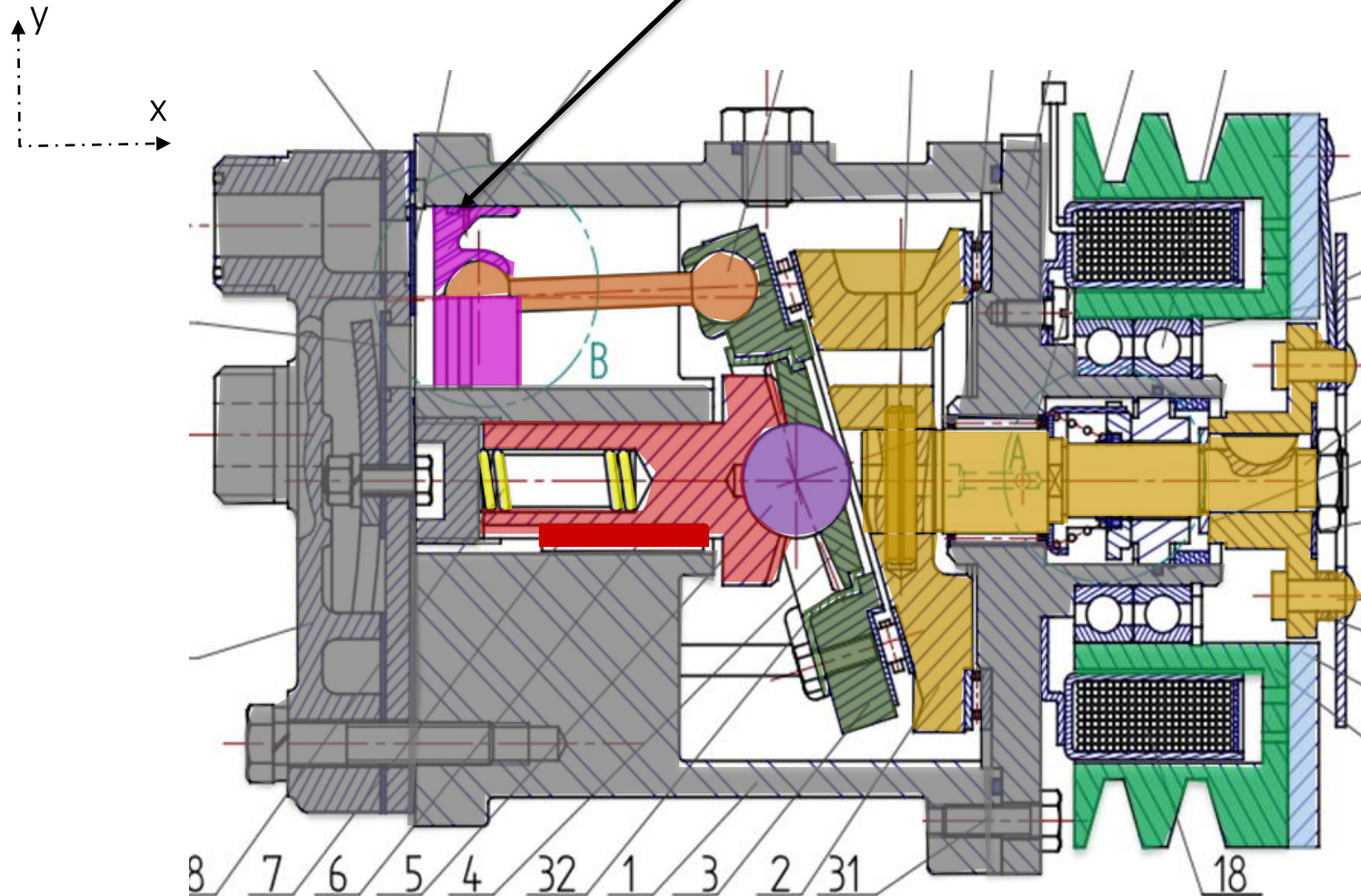


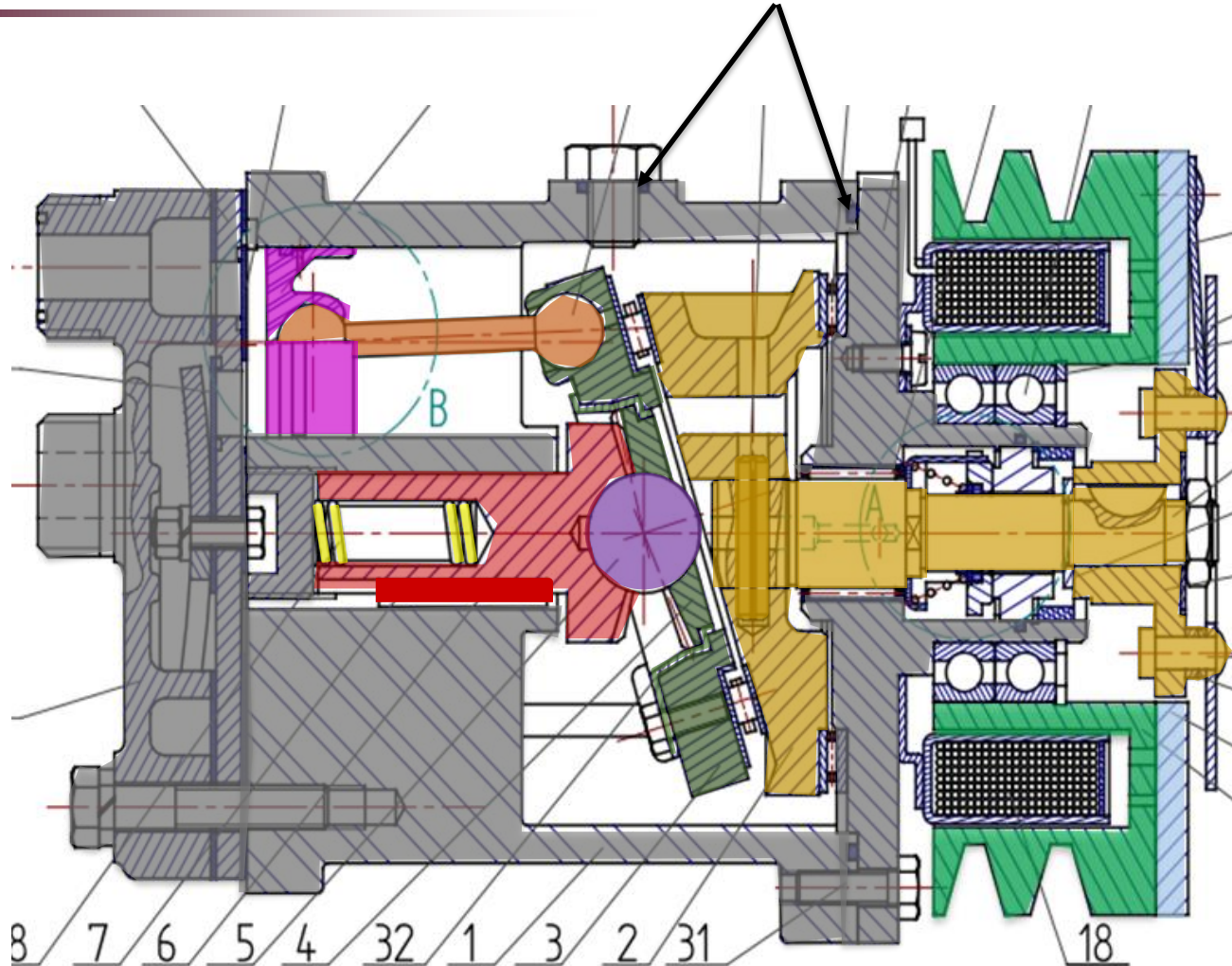
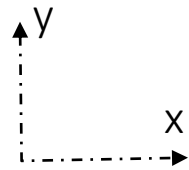
Élément tournant

Lubrifiant

Solutions technologiques

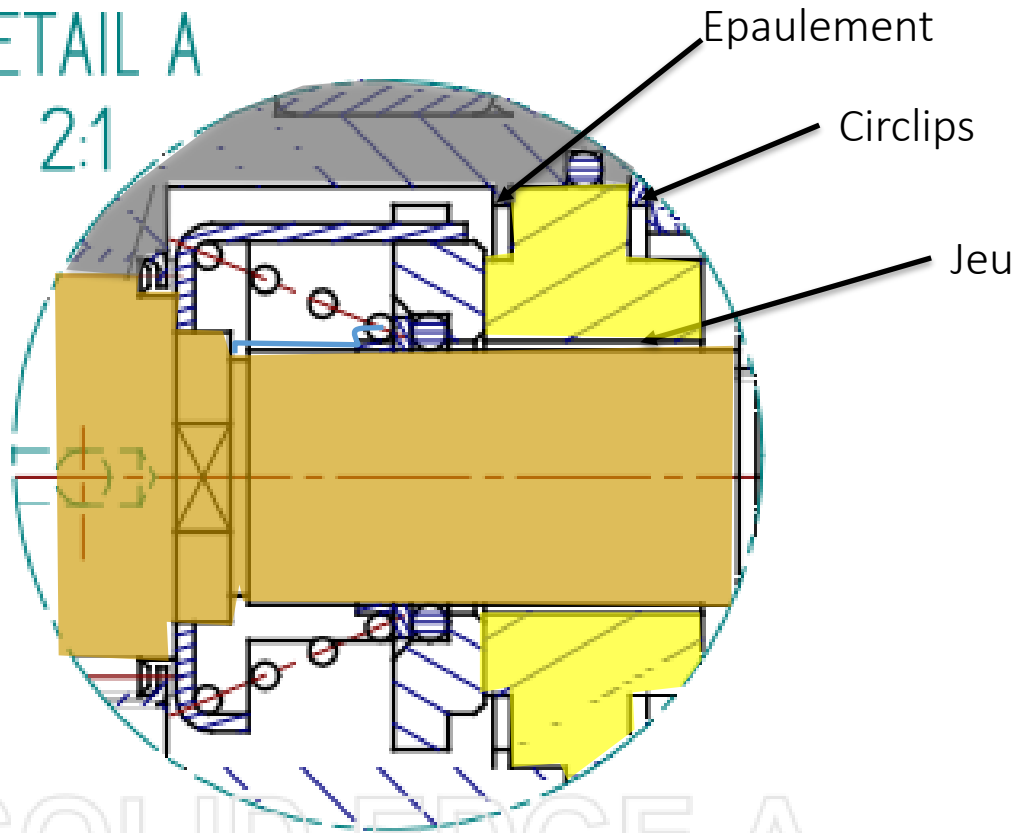
Dynamique : joint spécifique + rainure de récupération d'huile



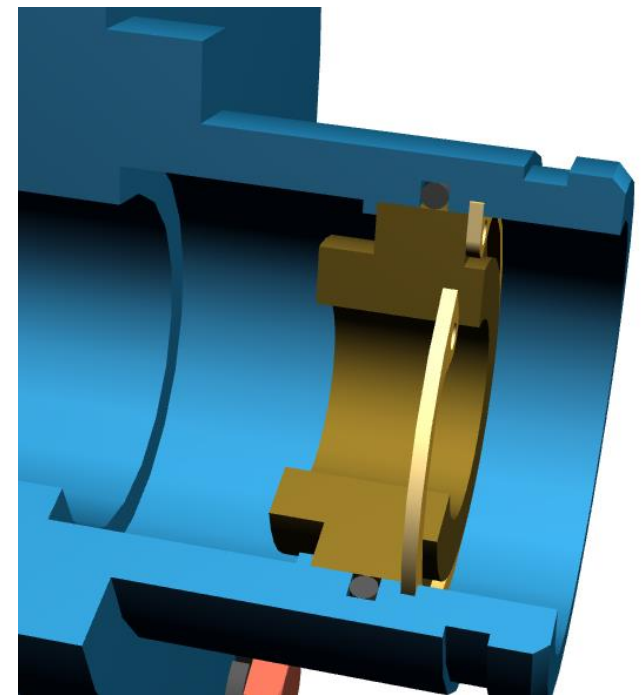


Solutions technologiques

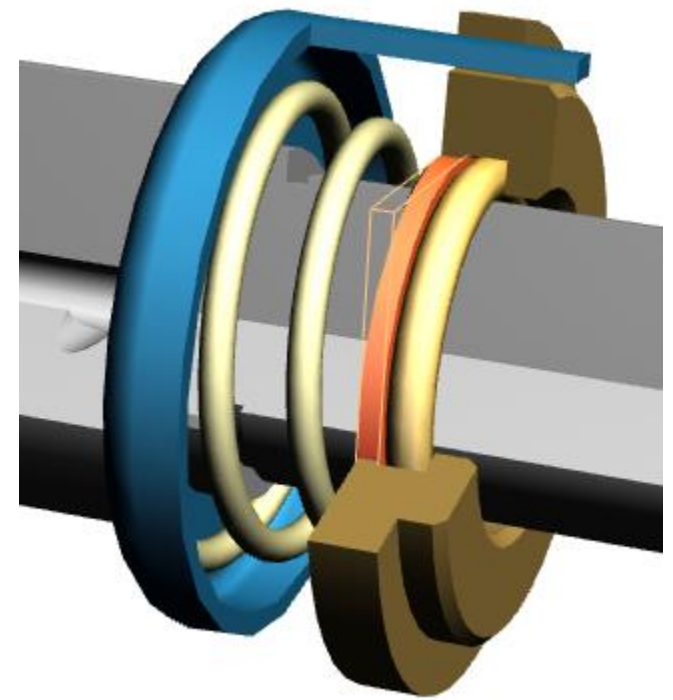
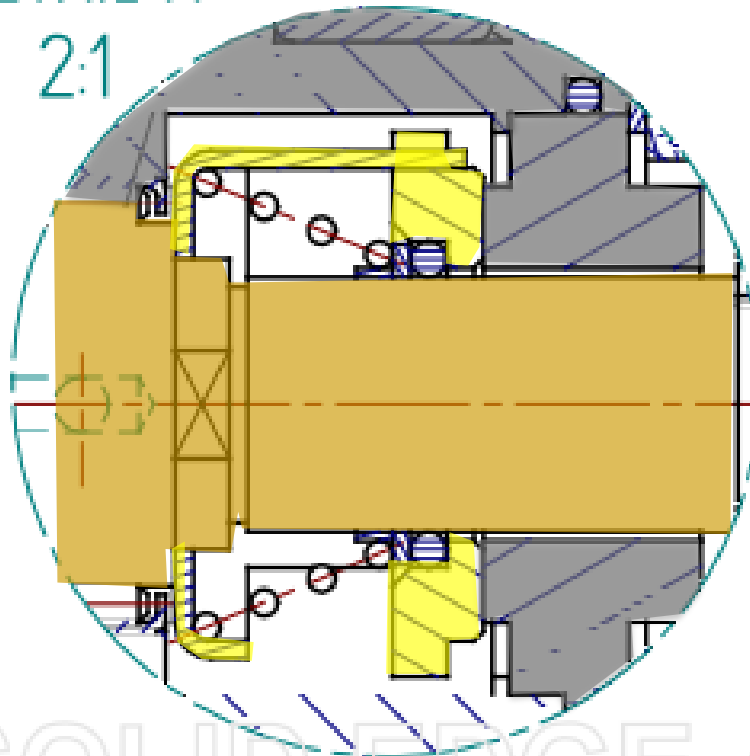
DETAIL A
2:1



SOLID EDGE A



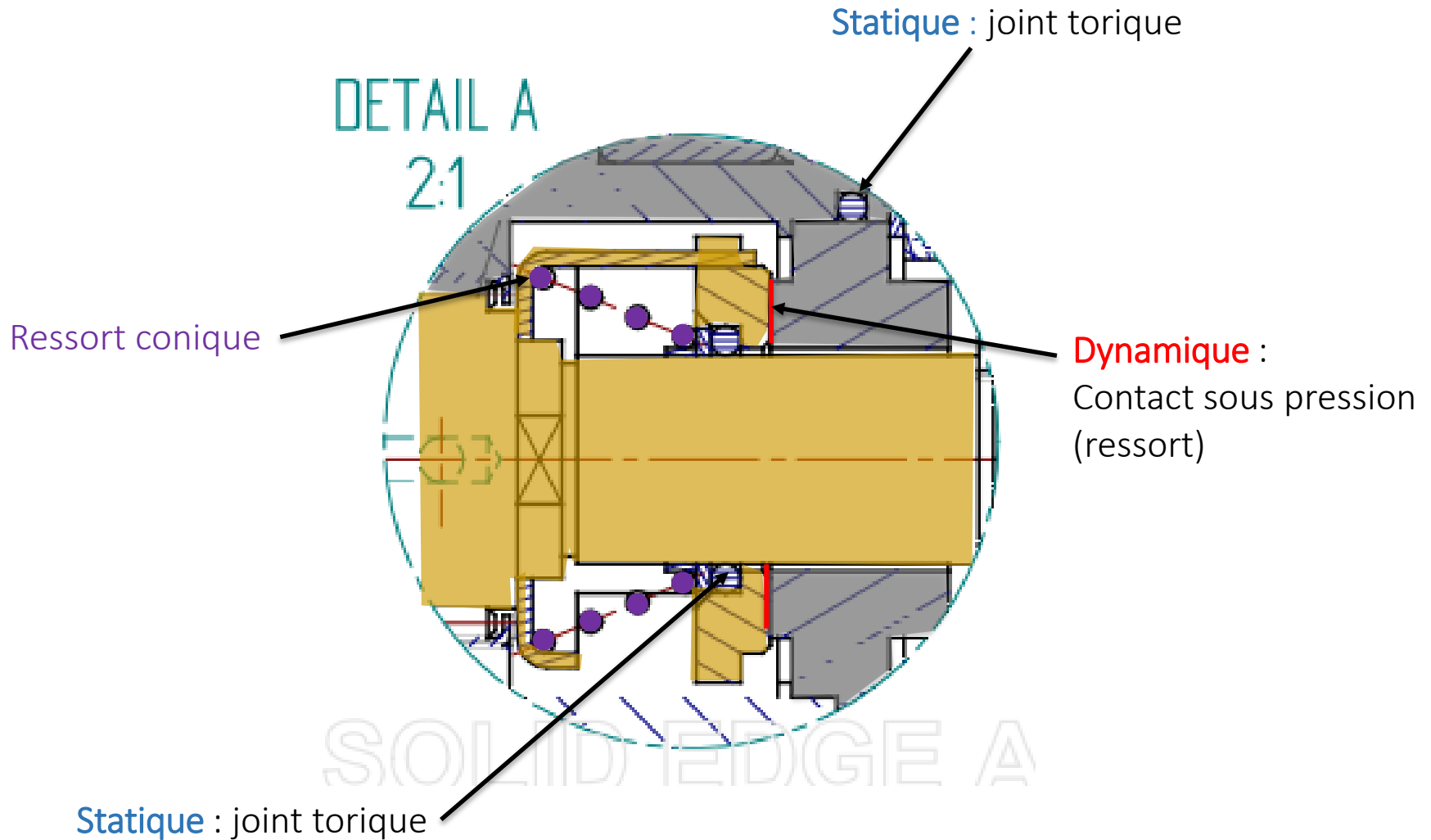
DETAIL A
2:1



SOLID EDGE A

→ Tourne avec l'arbre

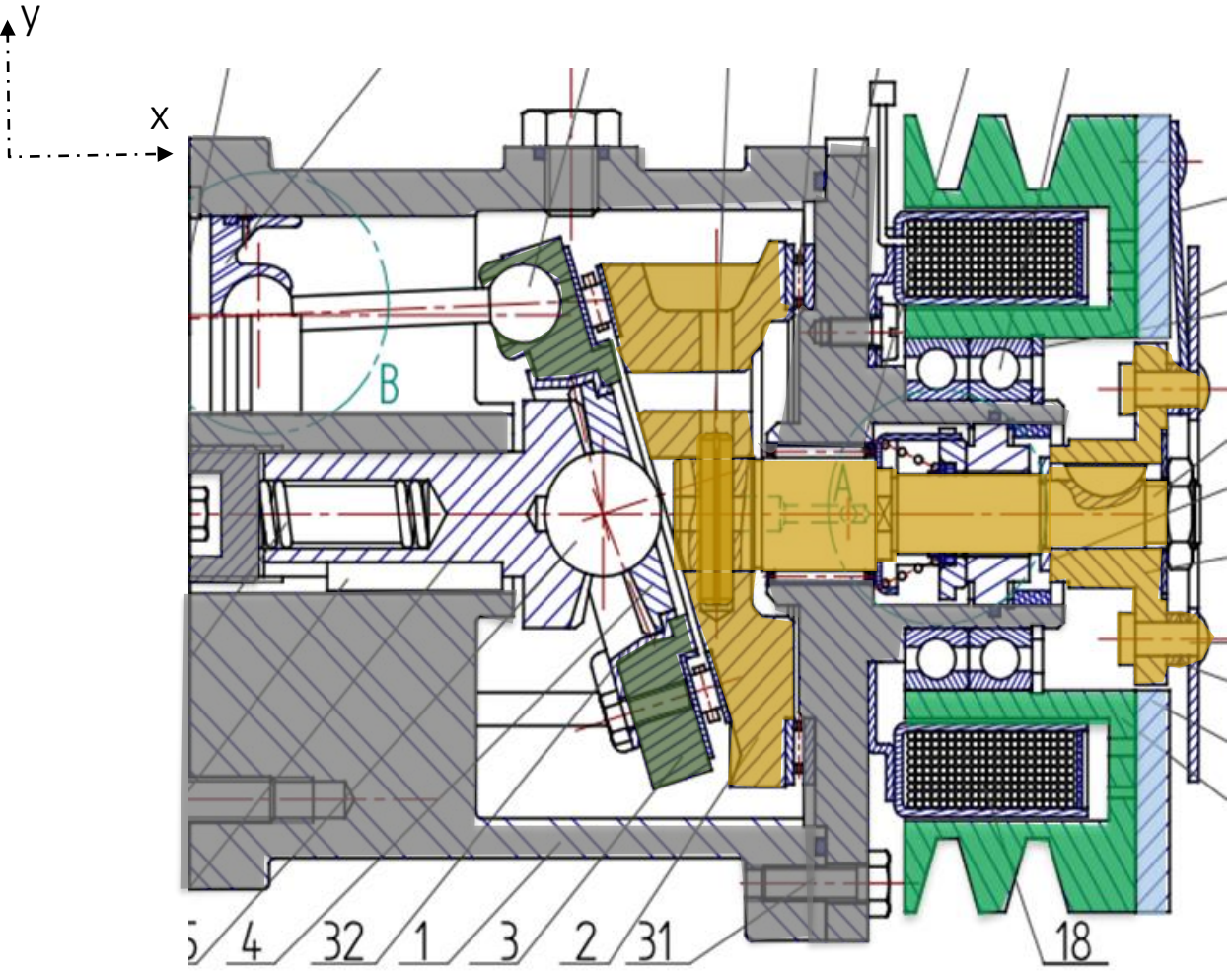
Solutions technologiques



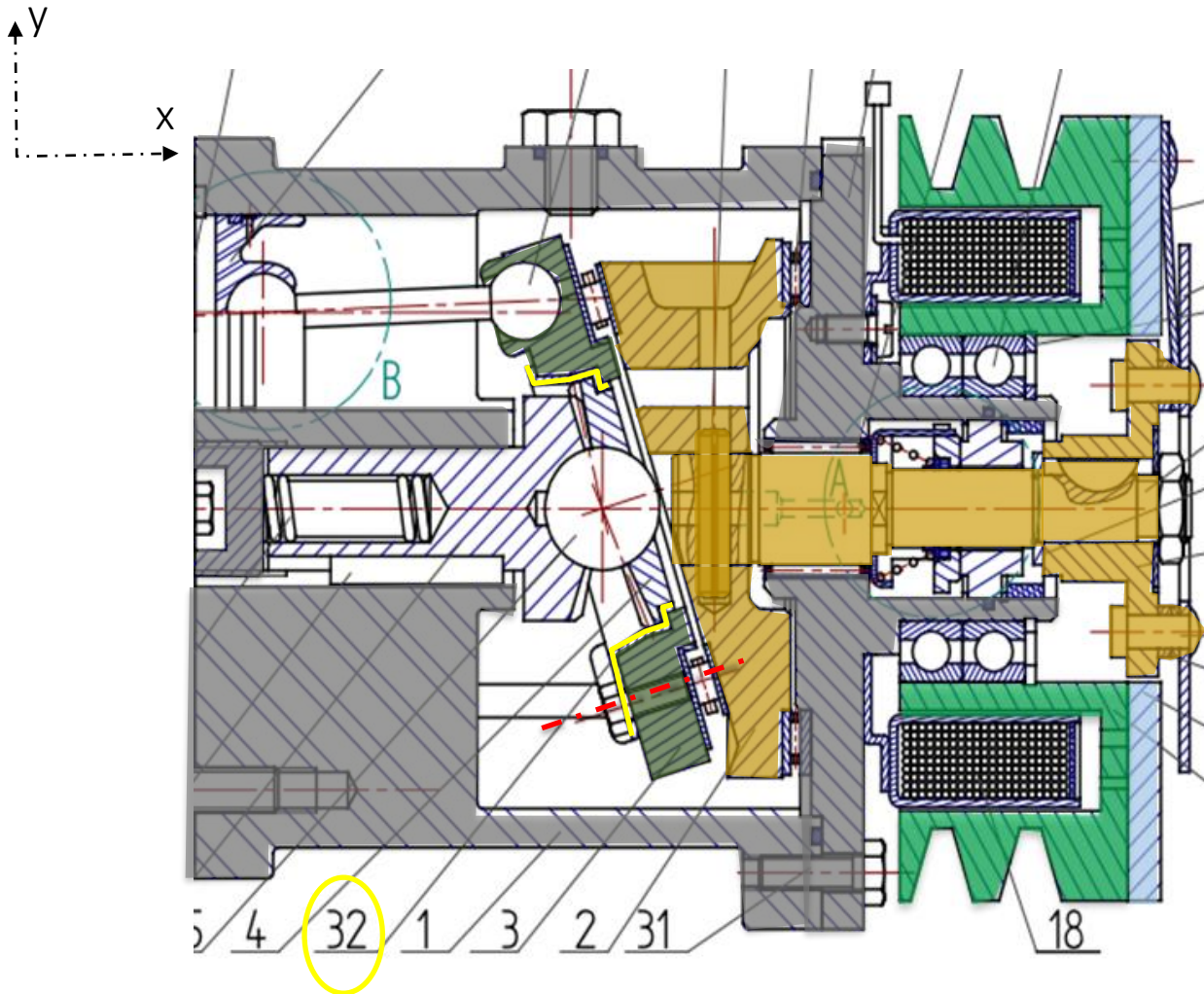
Fonction : transformer le mouvement de rotation en translation alternée

Question 16 – Plateau, bielles, piston

Classe d'équivalence S3 : Plateau Oscillant

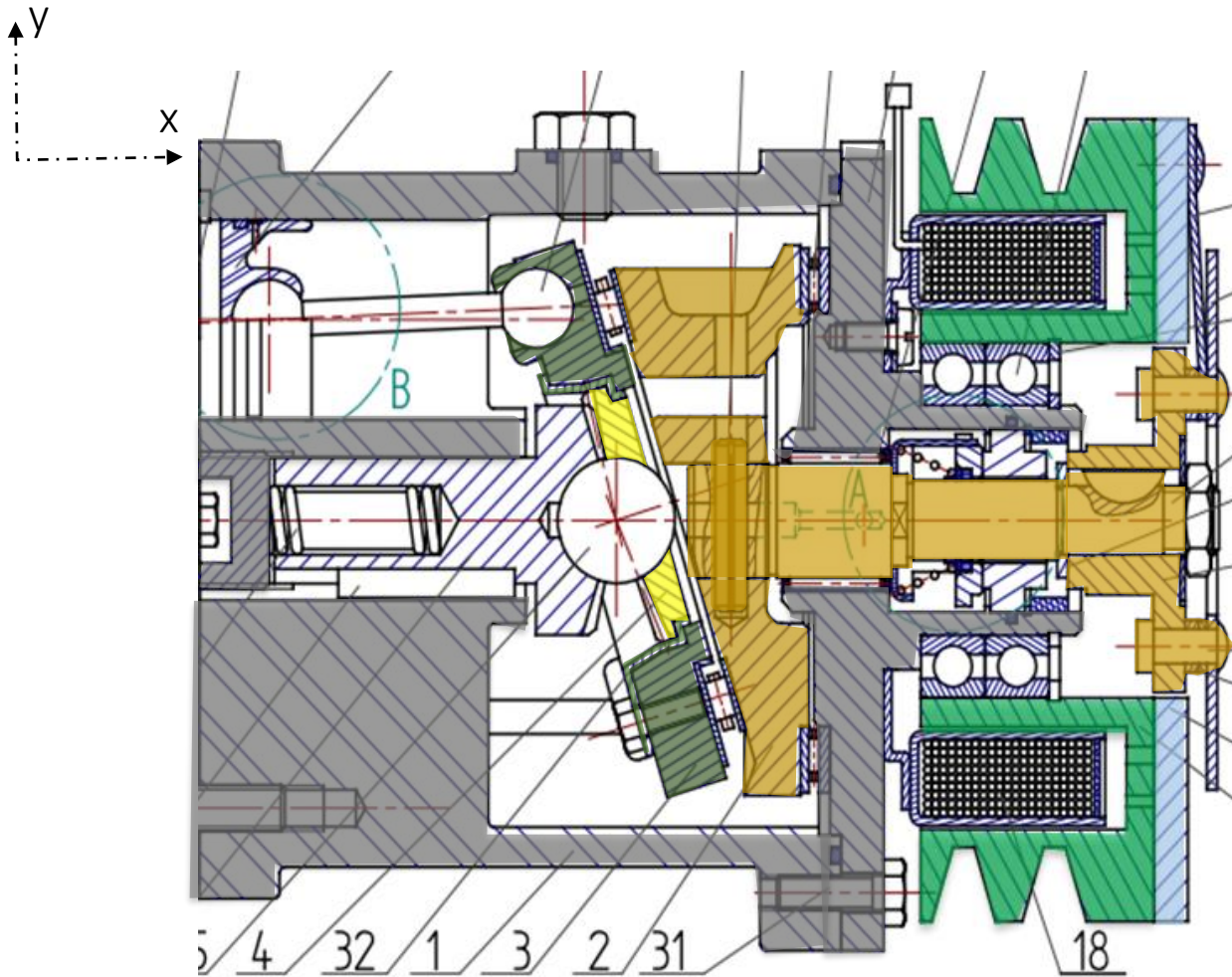


Classe d'équivalence S3 : Plateau Oscillant

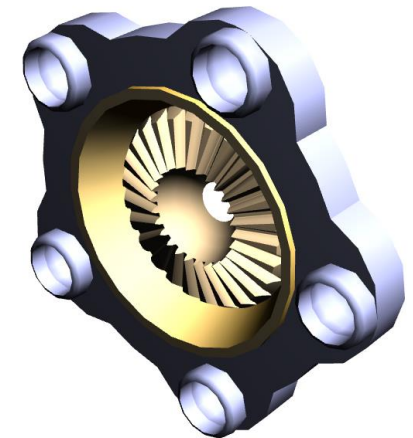


- Appui plan
- Centrage
- Serrage par vis

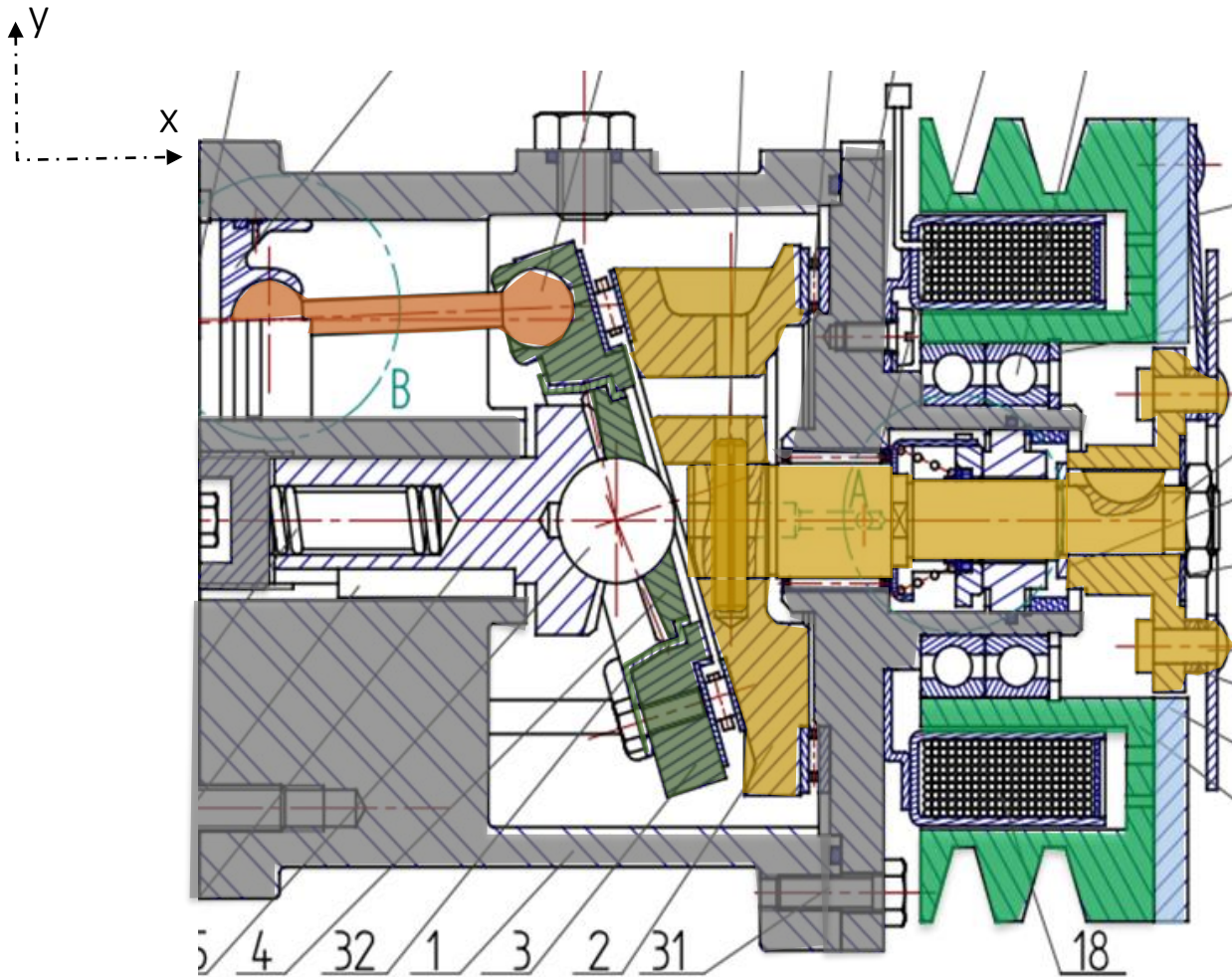
Classe d'équivalence S3 : Plateau Oscillant



- Appui plan
- Centrage court
- Monté serré



Classe d'équivalence S4a,...e : Bielles



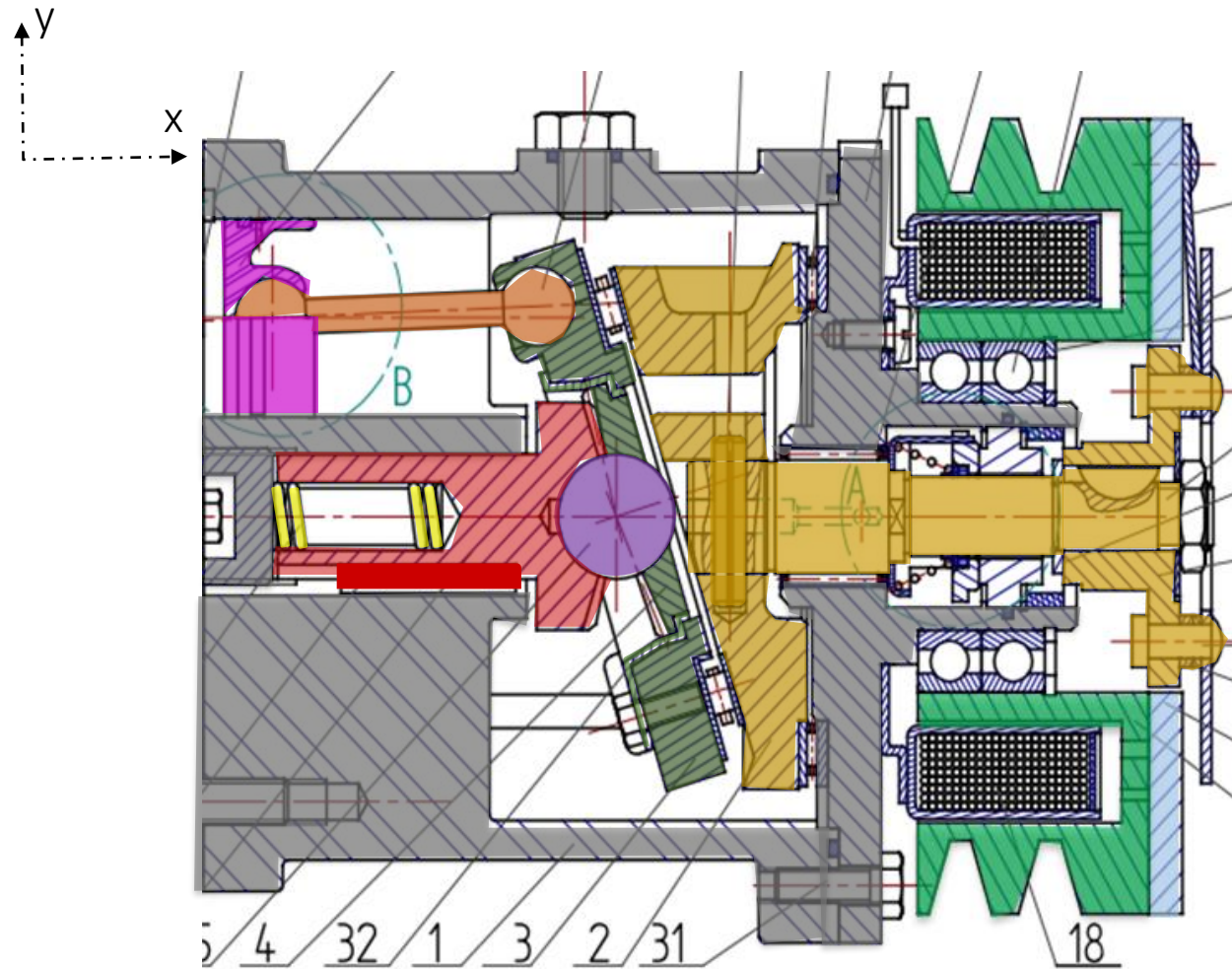
Liaison avec S3 :

- Contact sphérique



Liaison rotule

Classe d'équivalence S7a,b...e : Piston



Liaison avec S4 :

- Rotule

Liaison avec S0 :

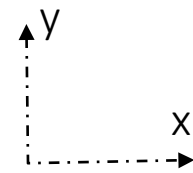
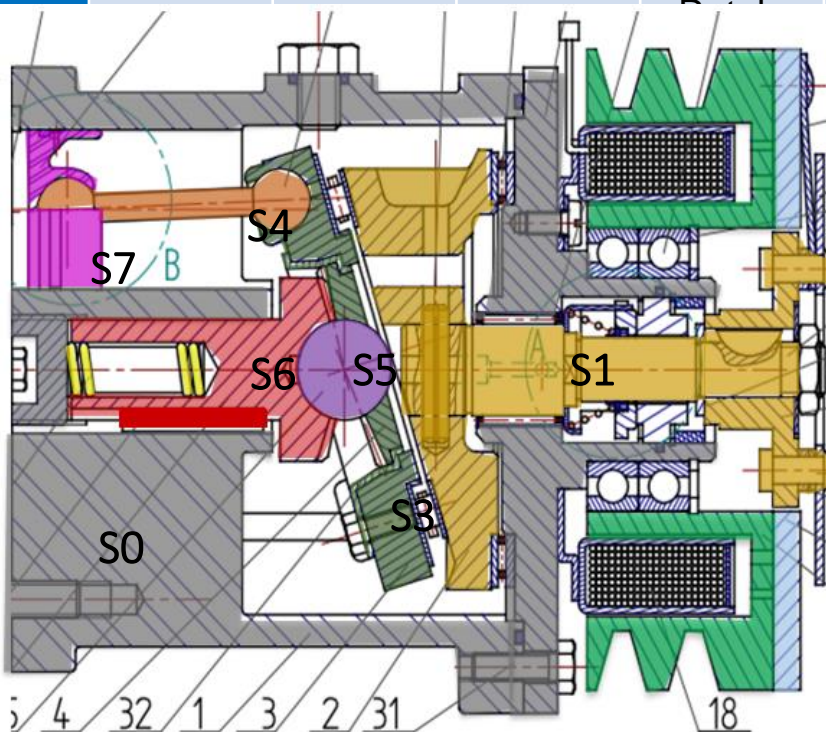
- Cylindrique



Question 17 à 19 – Bilan des liaisons

Bilan des liaisons

	S0	S1	S3	S4	S5	S6	S7
S0		Pivot Gli x + Plan x				Gliss x	Piv G x
S1			Plan v				
S3					Rotule	Ponctuelle	
S4							Rotule
S5						Rotule	
S6							



Rappels

Type	Schémas	Torseur Cinématique	Torseur Interefforts	Type	Schémas	Torseur Cinématique	Torseur Interefforts
Pivot d'axe (A, \vec{x})		$\begin{pmatrix} \omega_x & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_A$ $\forall M \in (A, \vec{x})$	$\begin{pmatrix} X & 0 \\ Y & M \\ Z & N \end{pmatrix}_A$	Appui plan de normale \vec{x}		$\begin{pmatrix} \omega_x & 0 \\ 0 & V_y \\ 0 & V_z \end{pmatrix}_A$ $\forall A$	$\begin{pmatrix} X & 0 \\ 0 & M \\ 0 & N \end{pmatrix}_A$
Glissière d'axe \vec{x}		$\begin{pmatrix} 0 & V_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_A$ $\forall A$	$\begin{pmatrix} 0 & L \\ Y & M \\ Z & N \end{pmatrix}_A$	Rotule de centre A		$\begin{pmatrix} \omega_x & 0 \\ \omega_y & 0 \\ \omega_z & 0 \end{pmatrix}_A$	$\begin{pmatrix} X & 0 \\ Y & 0 \\ Z & 0 \end{pmatrix}_A$
Hélicoïdale d'axe (A, \vec{x})		$\begin{pmatrix} \omega_x & V_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_A$ $\forall M \in (A, \vec{x})$ $V_x = \text{pas} \times \omega_x$	$\begin{pmatrix} X & L \\ Y & M \\ Z & N \end{pmatrix}_A$ $X = \text{pas} \times L$	Rotule à doigt d'axes (A, \vec{x}) et (A, \vec{y})		$\begin{pmatrix} \omega_x & 0 \\ \omega_y & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_A$	$\begin{pmatrix} X & 0 \\ Y & 0 \\ Z & N \end{pmatrix}_A$
Pivot glissant d'axe (A, \vec{x})		$\begin{pmatrix} \omega_x & V_x \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_A$ $\forall M \in (A, \vec{x})$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ Y & M \\ Z & N \end{pmatrix}_A$	Linéaire rectiligne de normale \vec{x} et axe \vec{y}		$\begin{pmatrix} \omega_x & 0 \\ \omega_y & V_y \\ 0 & V_z \end{pmatrix}_A$ $\forall M \in (A, \vec{x}, \vec{y})$	$\begin{pmatrix} X & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & N \end{pmatrix}_A$
Linéaire annulaire centre (A, \vec{x})		$\begin{pmatrix} \omega_x & V_x \\ \omega_y & 0 \\ \omega_z & 0 \end{pmatrix}_A$ $\forall A$	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ Y & 0 \\ Z & 0 \end{pmatrix}_A$	Ponctuelle de normale (A, \vec{x})		$\begin{pmatrix} \omega_x & 0 \\ \omega_y & V_y \\ \omega_z & V_z \end{pmatrix}_A$ $\forall M \in (A, \vec{x})$	$\begin{pmatrix} X & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}_A$

Degré d'hyperstatisme

$$h = I_s - (E_s - m) = m + I_s - E_s$$

I_s : nombre total d'inconnues statiques dues aux liaisons

	S0	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
S0		Pivot x					Gliss x	Piv G x
S1								
S2	5			Plan				
S3			3		Rotule	Rotule	Ponctuelle	
S4				3				Rotule
S5				3			Rotule	
S6	5			1		3		
S7	4				3			

$$I_s = 30$$

Degré d'hyperstatisme

$$h = I_s - (E_s - m) = m + I_s - E_s$$

E_s : nombre total d'équations statiques avec n : nombre total de solides du mécanisme (bâti compris) , $E_s = 6 (n - 1)$

$$E_s = 6.(7-1)=36$$

$m = m_u + m_i$: mobilités du mécanisme telles que :

m_u : mobilités utiles = nombre de mouvements nécessaires pour le fonctionnement
= nombre de mouvements d'entrée

m_i : mobilités internes = nombre de mouvement possible d'une (ou plusieurs) pièce n'entraînant pas de modification de position de l'ensemble étudié

$m_u = 1$: rotation arbre d'entrée – Translation piston

$m_i = 5$: rotation piston / axe
rotation bielle
3 rotations bille

$$h=6+30-36=0$$

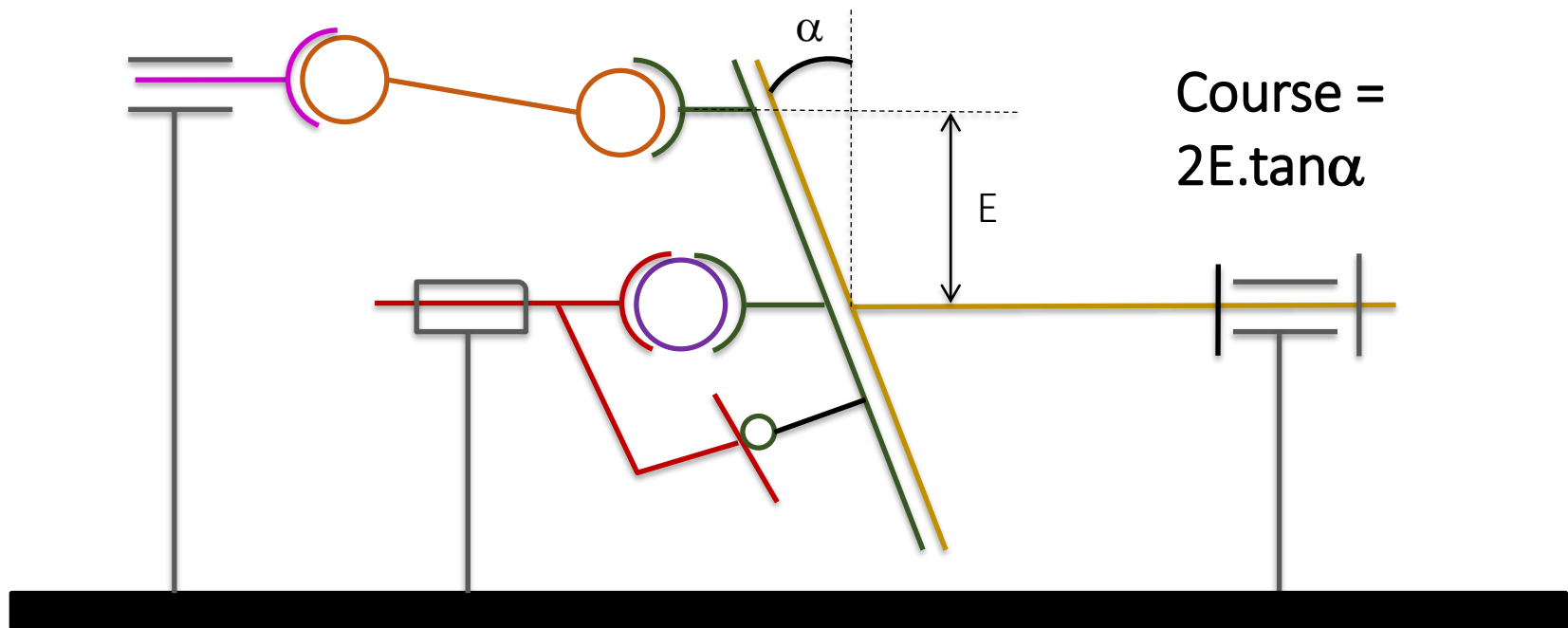
Modèle isostatique



Question 20 et 21 - amélioration

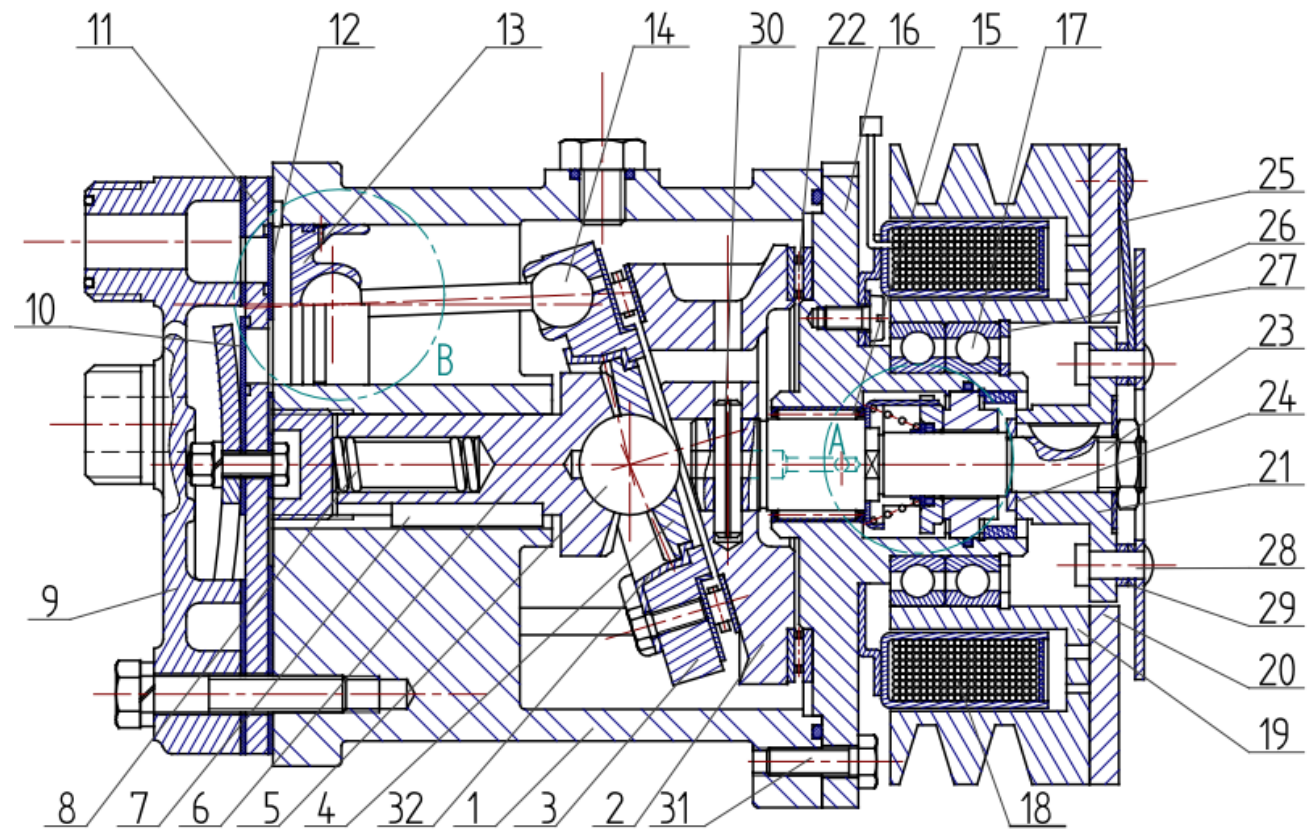
Modification de la cylindrée

- La cylindrée est le volume balayée par le piston soit $\pi D^2/4 \times \text{course}$, avec D le diamètre du piston.
- La modification du diamètre est difficile (5 pistons, 5 alésages, pièces complexes, surtout le bâti moulé...)
- La modification de la course demande de modifier le plateau came : en diminuant l'angle de la came, la course sera diminuée.



Modification de la cylindrée

- La modification de l'angle de came entraîne une modification des pièces 6 et 2 (angle de conicité de l'engrènement)
- Par ailleurs le volume mort (volume minimal de fluide dans la chambre de compression) va augmenter, à moins que les bielles soient allongées pour compenser la perte de course



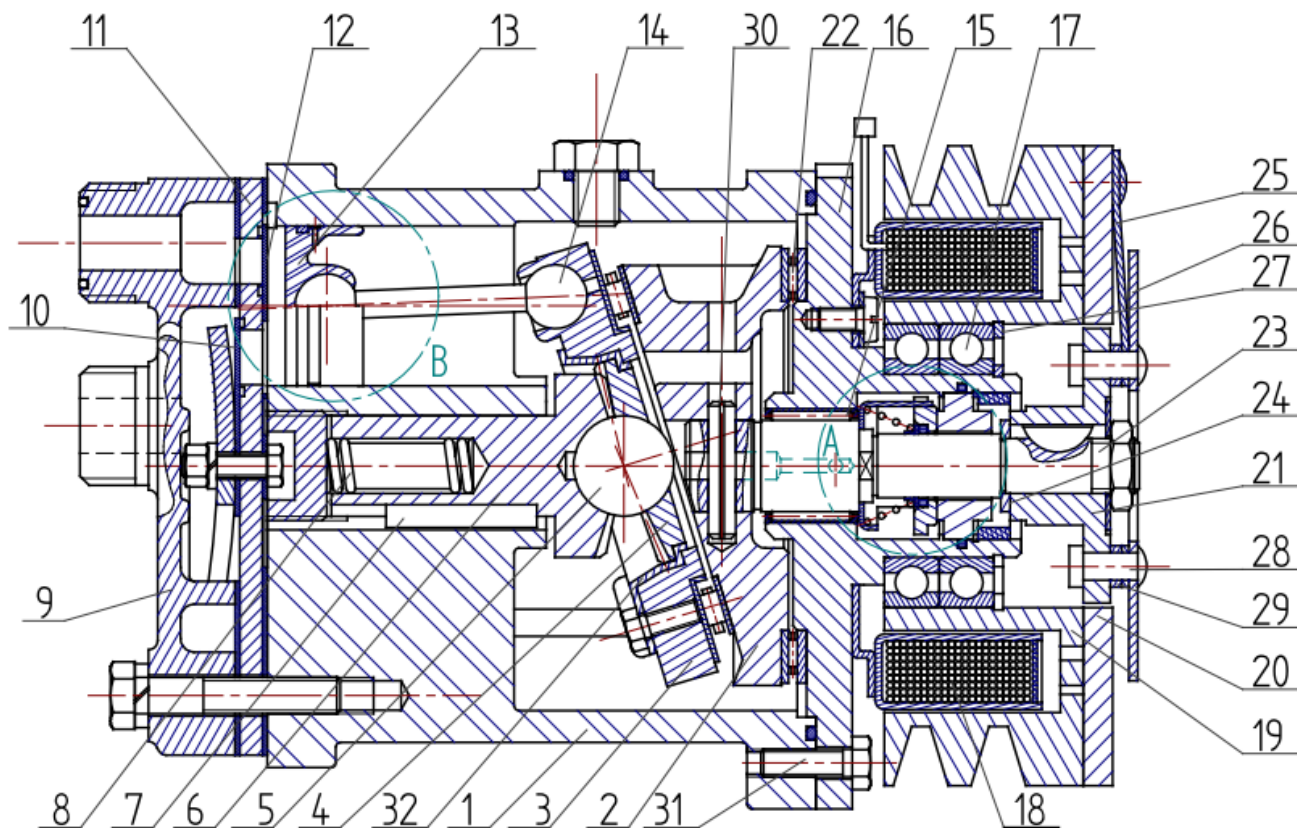
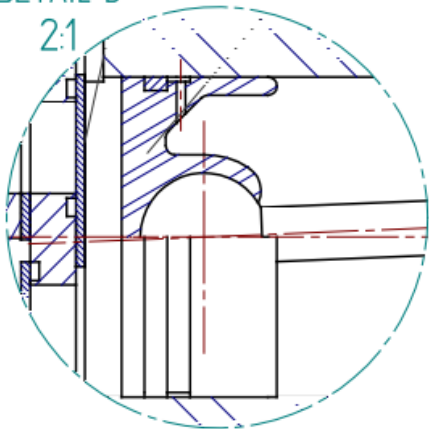
Modification de la cylindrée

- Face aux défis posés par la climatisation les améliorations proposées pour le nouveau fluide sont nécessaires mais de portée limitée.
- Dans les années à venir, il faudra songer à adapter les usages (heures de conduite, vitesse adaptée à la conduite vitres ouvertes, temps de conduite réduits...)
- La conception d'un véhicule ventilé et rafraîchi de façon passive est plus indiquée

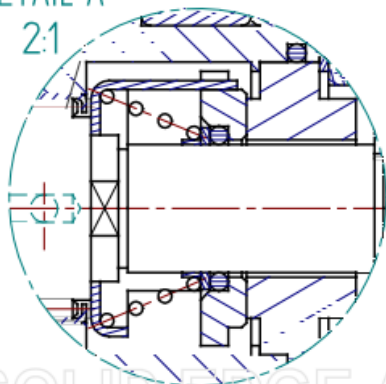


Vue d'ensemble

DETAIL B
2:1



DETAIL A
2:1



0				
Rep	Nb	Désignation	Matière	Observation
⊗	⊘	COMPRESSEUR DE CLIMATISATION		
Format: A3				
Ech. 1:1				
Dessiné par:		INSA		
Le 03/03/99		N°		