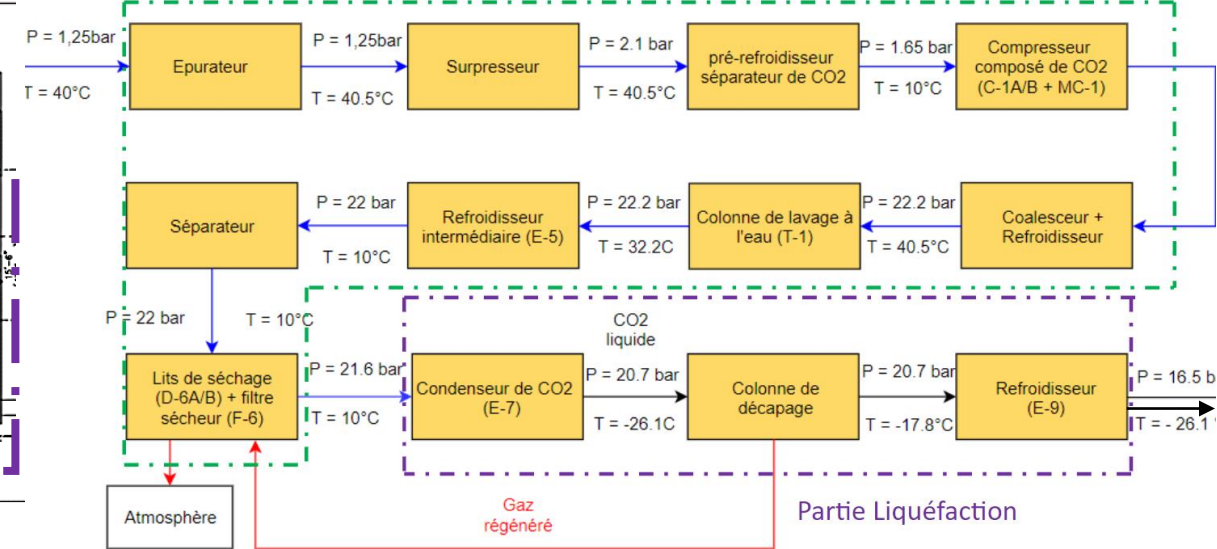
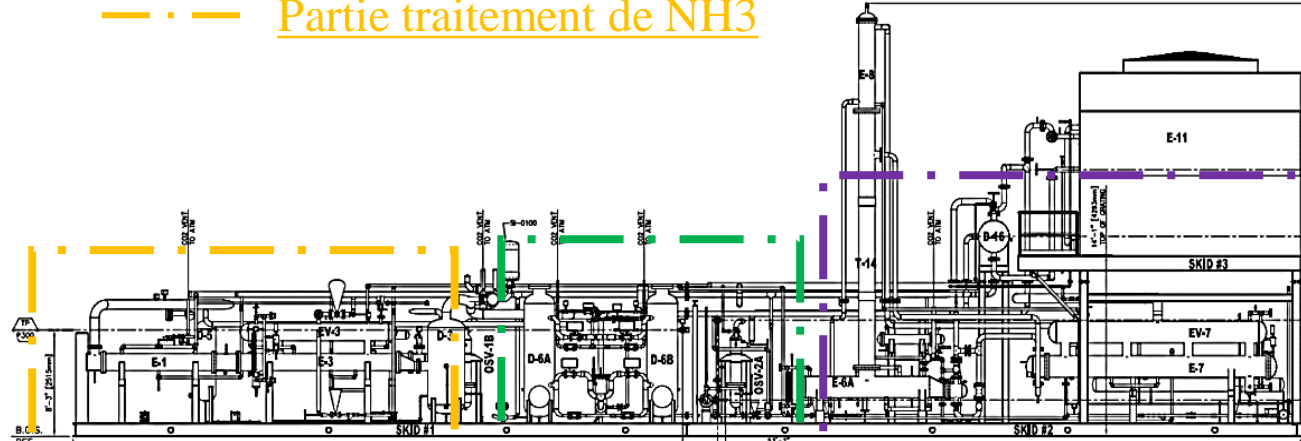


# UNITE DE LIQUEFACTION DU CO2

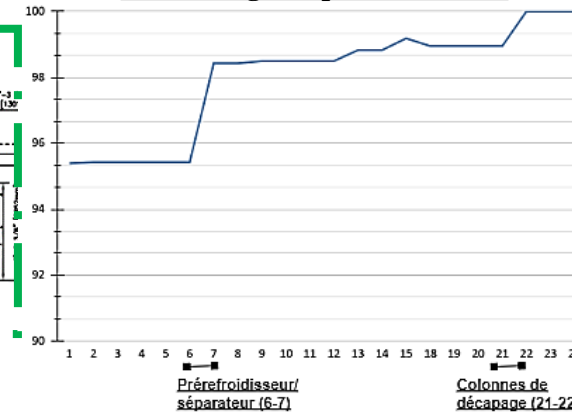
Partie liquéfaction

Partie purification et compression

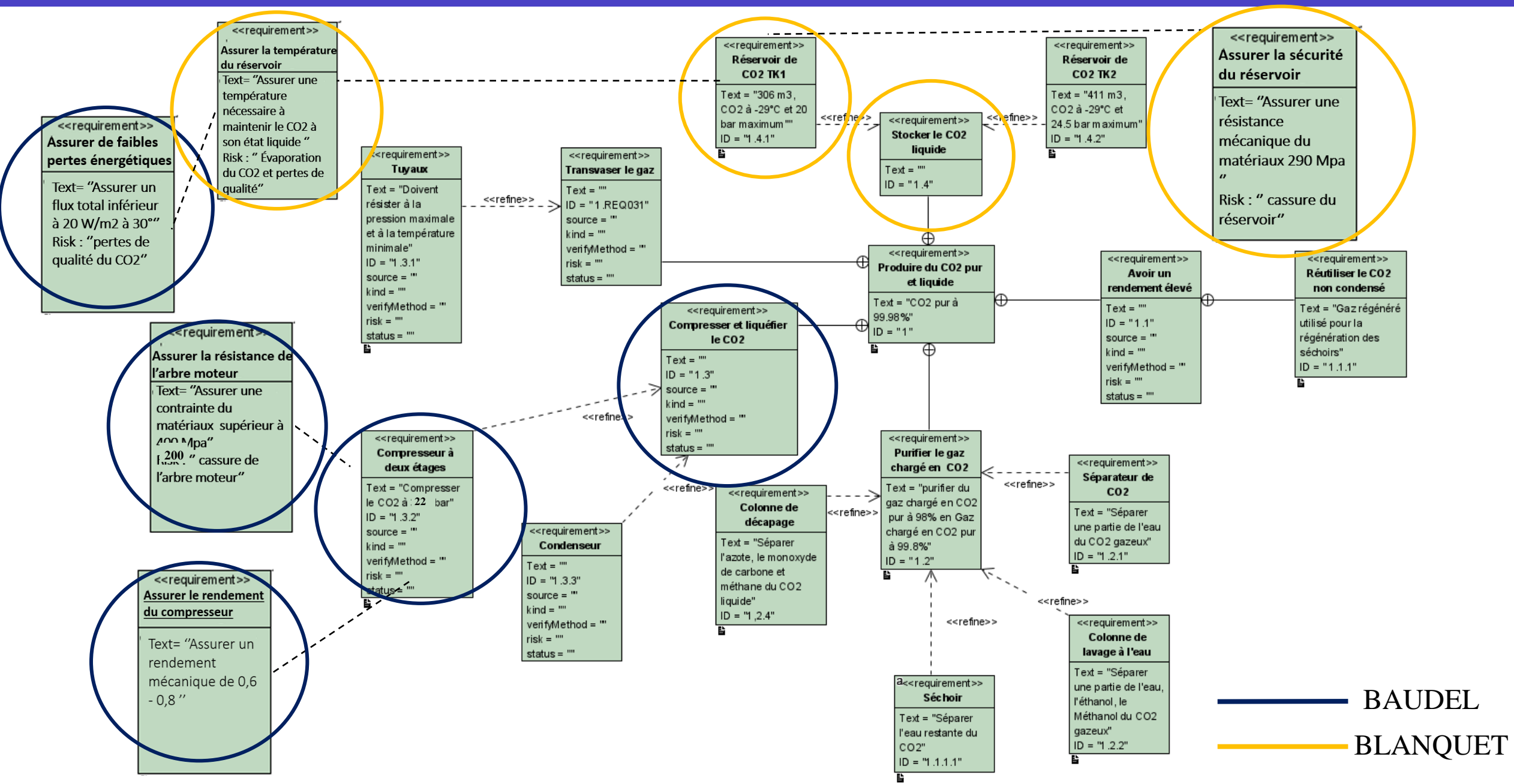
Partie traitement de NH<sub>3</sub>



Pourcentage de pureté du CO<sub>2</sub>



# DIAGRAMME DES EXIGENCES



**Problématique:** Dans quelle mesure les exigences de qualité du CO<sub>2</sub> ainsi que les contraintes de sécurité du système répondent elles au cahier des charges?

## **I . Assurer la liquéfaction du CO<sub>2</sub>**

- Étude du diagramme des frigoristes

## **II Assurer la compression du CO<sub>2</sub>**

- Modélisation des efforts dans les lobes.
- Vérifier le rendement mécanique du compresseur
- Modélisation mécanique du compresseur
- Assurer la torsion de l'arbre de la vis motrice

## **III Assurer l'isolation du réservoir**

- Étude de la résistance thermique du réservoir
- Étude des flux surfaciques dans le réservoir ( modèle SolidWorks)

### **Domaines d'applications:**

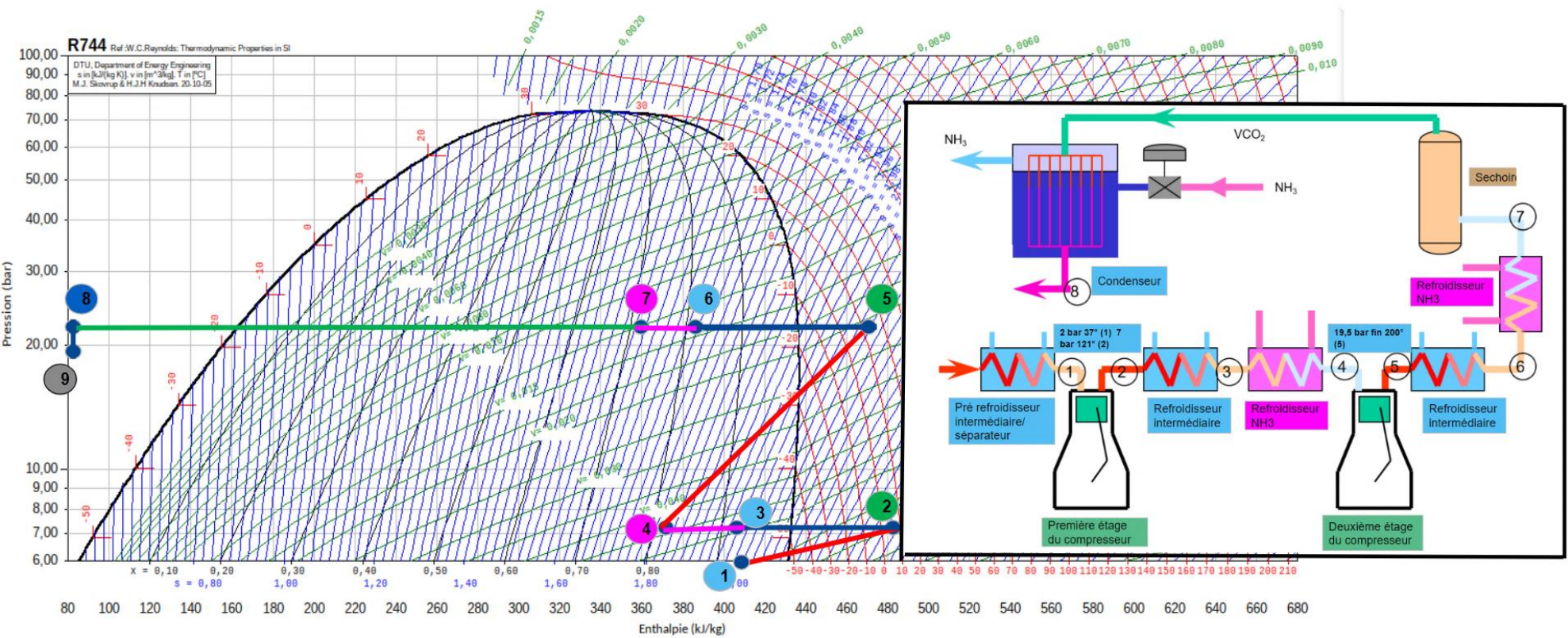
Santé, Alimentaire, Électronique, industrie, aéronautique.

### **Enjeux sociétaux**

La pureté et la qualité du CO<sub>2</sub> sont des contraintes importantes pour le bon fonctionnement de ces secteurs. Ainsi, cela constitue un enjeux sociétaux.



# DIAGRAMME DES FRIGORISTES (ln(P),h)



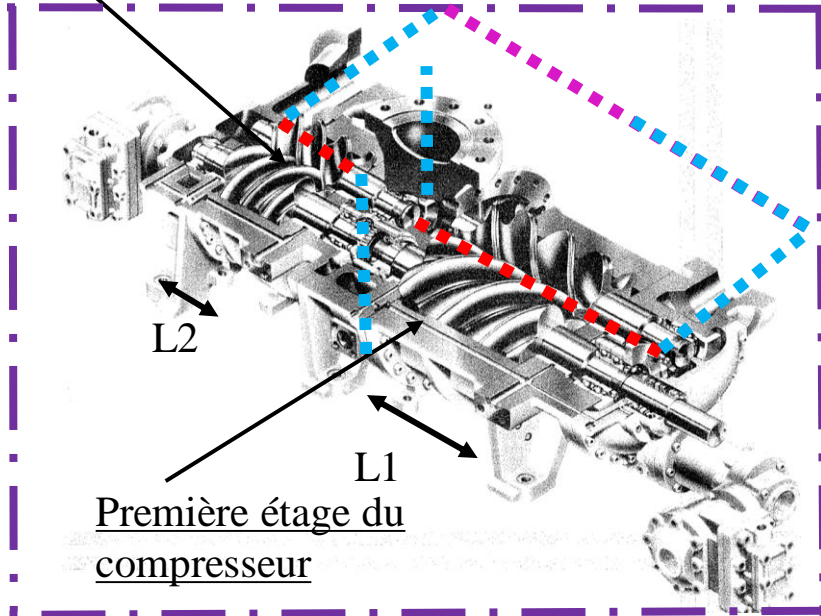
Systèmes:	$\Delta h$
Première compression	80 kJ/kg
Refroidisseur	80 kJ/kg
Deuxième compression	93 kJ/kg
Refroidisseur NH3	25 kJ/kg
Condenseur/séchoir	318 kJ/kg
Colonnes de décapages	1 kJ/kg
Cycle ( 7-22)	597 kJ/kg

**Conclusion:** La contrainte d'un cout enthalpique inférieur 800 kJ/kg est vérifiée

# MODELISATION DES VIS DU COMPRESSEUR



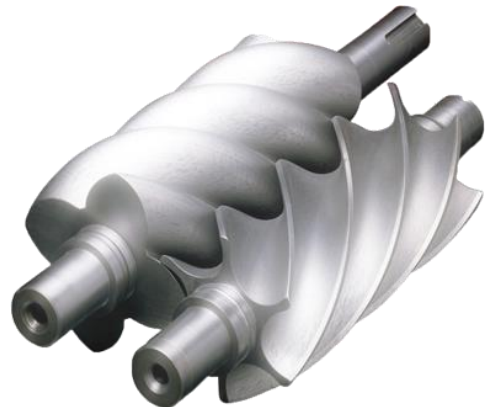
Deuxième étage du compresseur



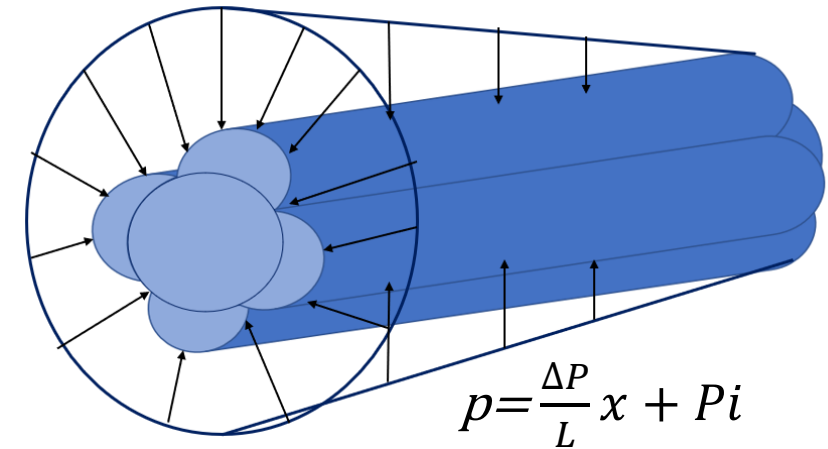
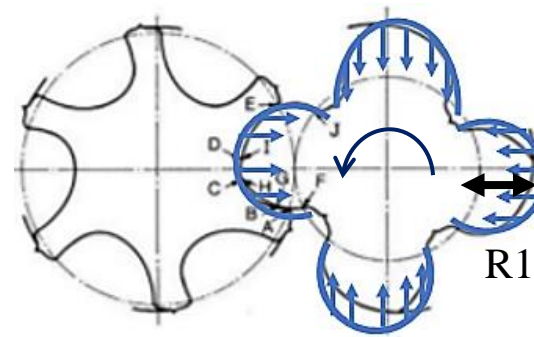
L2

L1

Première étage du compresseur



**Modèle utilisé pour trouver le couple exercé par la pression du gaz dans une vis:**



**Limite du modèle:**

- Néglige le régime dynamique
- Symétries et aires homogènes dans la vis hélicoïdale
- Réarrangement des aires
- Facteur de frottement  $f$  difficile à estimer (  $0,2; \varphi = 10^\circ \varphi$  )
- Fluide légèrement polyphasique
- Couple égale dans les quartes demi sphères



# VERIFIER LE RENDEMENT DU COMPRESSEUR



Après une étude de charge répartie le couple total exercé par le gaz dans les quatre demi-sphères est défini par :

$$C_{g1} = 4 \iint \overrightarrow{OM} \wedge p(\vec{n} + f\vec{t}) ds \cdot \vec{x} = 4 \iint ((x\vec{x} + R\vec{u}) \wedge (pRd\theta dx(-\vec{u} - f\vec{v}))) \cdot \vec{x} =$$

Seul terme non nul en projection sur  $\vec{x}$

$$\Rightarrow = \int_{-L/2}^{L/2} 4 \int_0^\pi -fR^2 \left( \frac{\Delta P_1}{L_1} x + P_i \right) d\theta dx = -4\pi f \int_{-L/2}^{L/2} R^2 \left( \frac{(pf - pi)}{L_1} x + P_i \right) dx$$

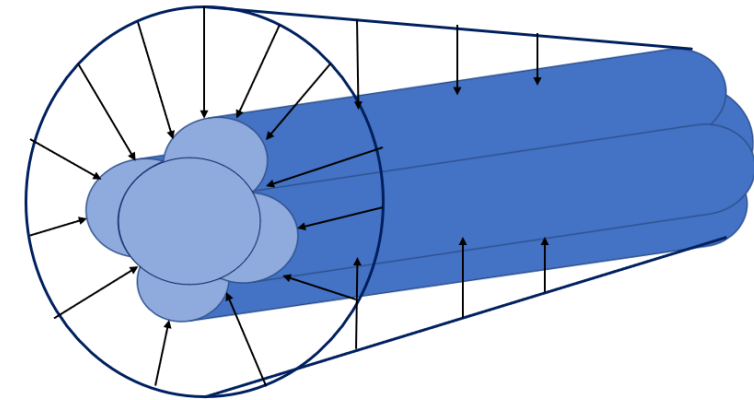
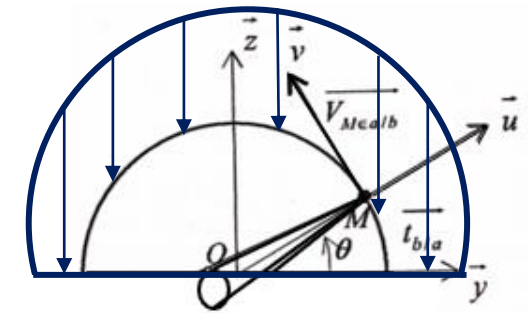
$$\Rightarrow \boxed{C_{g1} = -4 \pi f L R^2 \frac{pf1 + pi1}{2}}$$

Ainsi, le couple totale transmis par le gaz dans les deux étages est défini par:

$$C_g = C_{g1} + C_{g2} = -4 \pi f \left( \left( \frac{(pf1 + pi1)}{2} \right) R_1^2 L_1 + \left( \frac{(Pf2 + Pf1)}{2} \right) R_2^2 L_2 \right) = \boxed{-1040 \text{ Nm}}$$

$$\Rightarrow \boxed{\eta = \frac{C_g}{C_m} = 0,63}$$

**Conclusion:** Rendement de 0,6- 0,7 vérifié.



**Pf1** pression final a l'étage 1 = 7 bar ;

**Pf2** pression final à l'étage 2 = 22 bar;

**Pi1** pression initial à l'étage 1 = 1 bar;

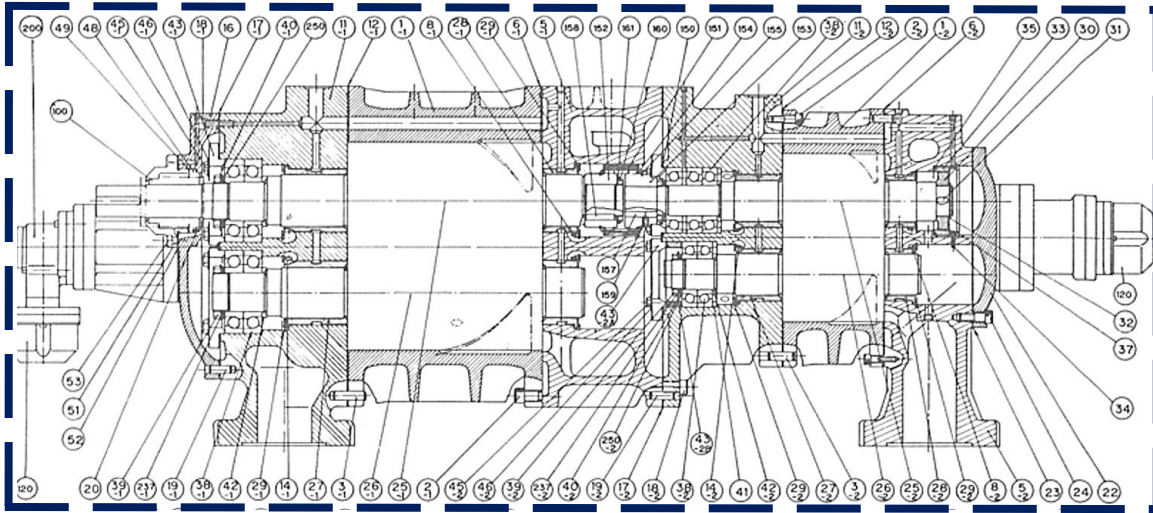
**Pi2** pression initial à l'étage 2 = 7 bar;

**R1** = 5 cm ( Rayon de la demi-sphère étage 1)

**L1** = 15 cm ; **Cm** = 1650 Nm; **R2** = 3 cm ; **L2** = 30 cm

; **ΔP** différence de pression initial et final

# MODELISATION MECANIQUE DU COMPRESSEUR



D'après le théorème du moment sur l'axe  $\vec{x}$  on en déduit:

$$M_t = -C_m + C_{g1} + C_{g2} + I_1 F_1 + I_2 F_2 + 2C_f + C_{r1} + C_{r2} + C_{r3}$$

$$C_{g1} = 560 \text{ Nm} ; C_{g2} = 480 ; C_g = C_{g1} + C_{g2} = 1040 \text{ Nm}$$

$C_m$  Couple moteur

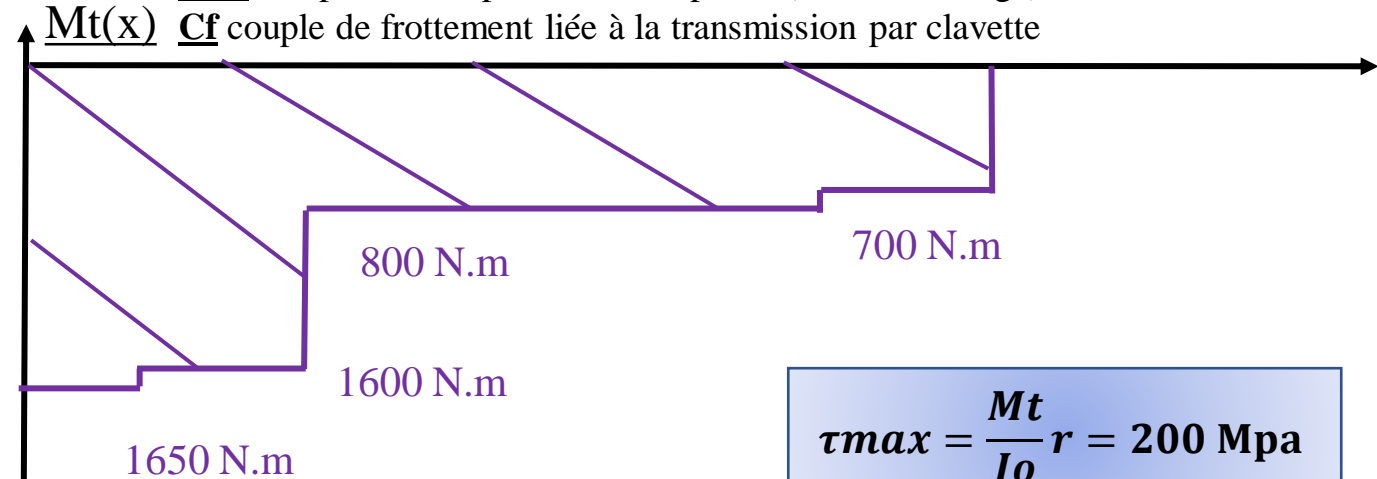
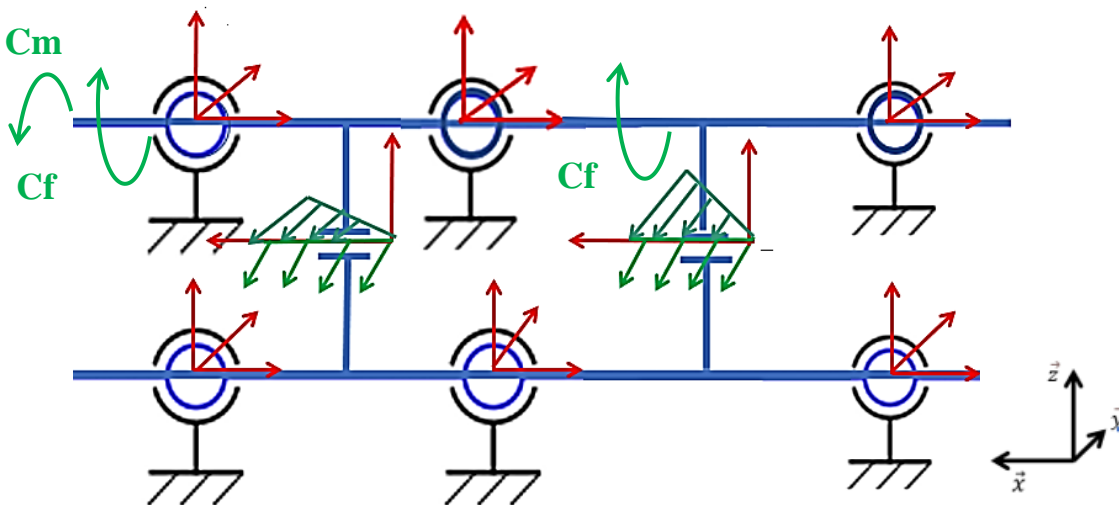
$C_{g1}$  Couple du gaz ( première étage)

$C_{g2}$  Couple du gaz ( deuxième étage) ;  $C_{r1}$  ;  $C_{r2}$  ;  $C_{r3}$ : Couples des roulements

$I_1 F_1$  Couple exercé par la vis réceptrice (première étage)

$I_2 F_2$  Couple exercé par la vis réceptrice (deuxième étage)

$C_f$  couple de frottement liée à la transmission par clavette



$$\tau_{max} = \frac{M_t}{I_o} r = 200 \text{ Mpa}$$



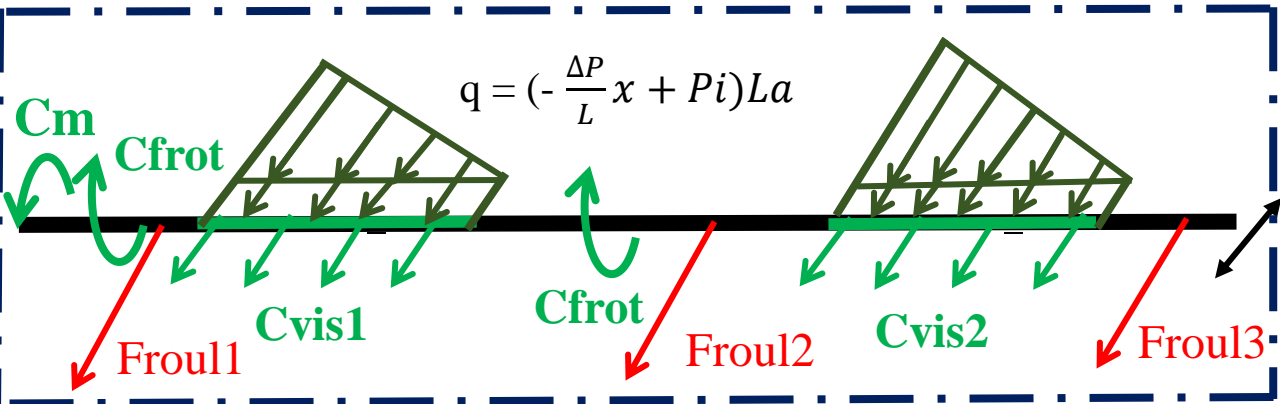
# ASSURER LES CONTRAINTES DE TORSION DE L' ARBRE MOTEUR

On sait que la répartition de pression est défini par :

$P: -\frac{\Delta P}{L}x + Pi \Rightarrow q = (-\frac{\Delta P}{L}x + Pi)L a$

$\Rightarrow F(x) = \int_0^x \left(-\frac{\Delta P}{L}x + Pi\right) La dx$

$\Rightarrow Mt(x) = -\int_0^x \left(-\frac{\Delta P}{2L}x^2 La + Pi2Lax\right) dx$

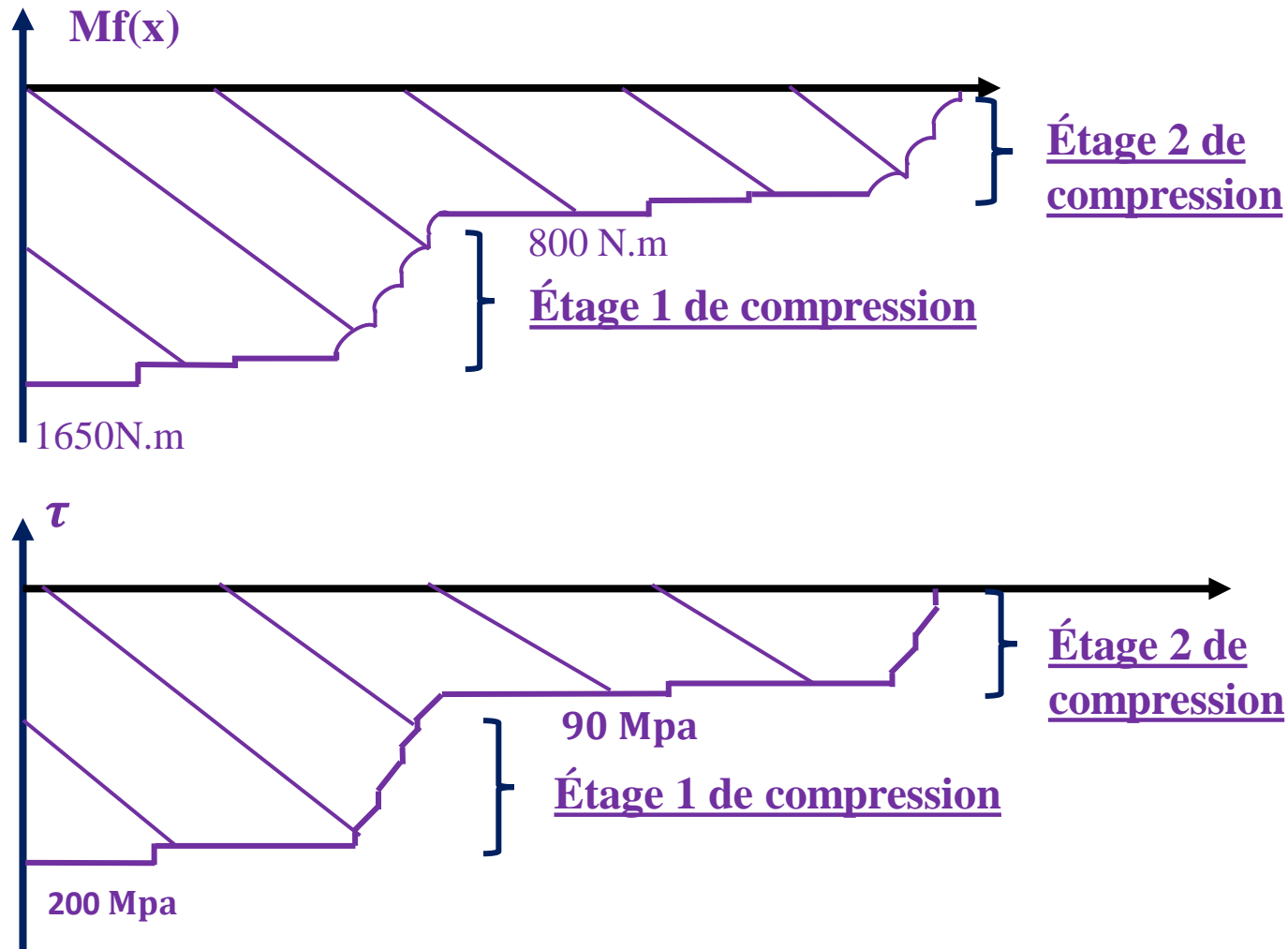


$Mt(x) = -Cm + \frac{\Delta P}{6L}x^3La - P1La\frac{x^2}{2} + Cvis + Croul + Cfrot$

Ainsi, on obtient les torseurs de cohésion dans les deux étages du compresseur avec  $\Delta P$  ( différence entre pression initial et final ) et  $Cvis$ ;  $Cfrot$ ;  $Croulements$  :

$$\{Tcoh\}_{G(x)} = \begin{bmatrix} 0 & +\frac{\Delta P}{6L}x^3La - Pi1La\frac{x^2}{2} + Cvis + Cfrot + Croulement - Cm \\ -\frac{\Delta P}{2L}x^2La + PiLax + 4Fvis + Froulement & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}_{G(x)}$$

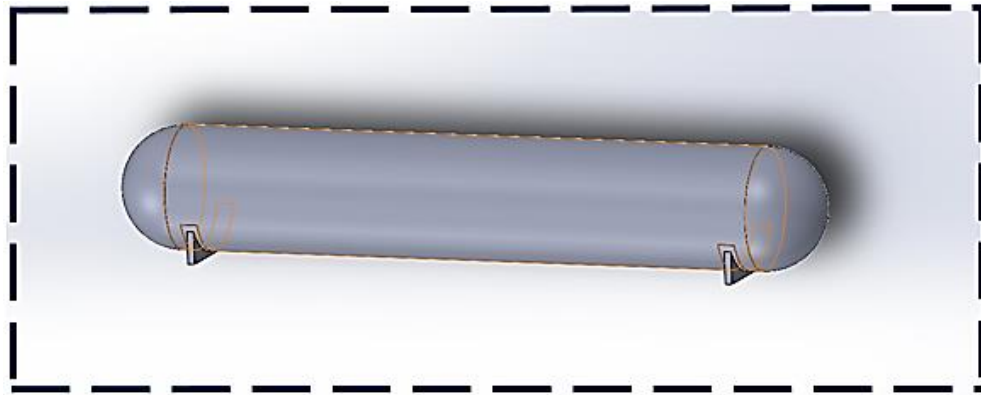
# ASSURER LES CONTRAINTES DE TORSION DE L'ARBRE MOTEUR



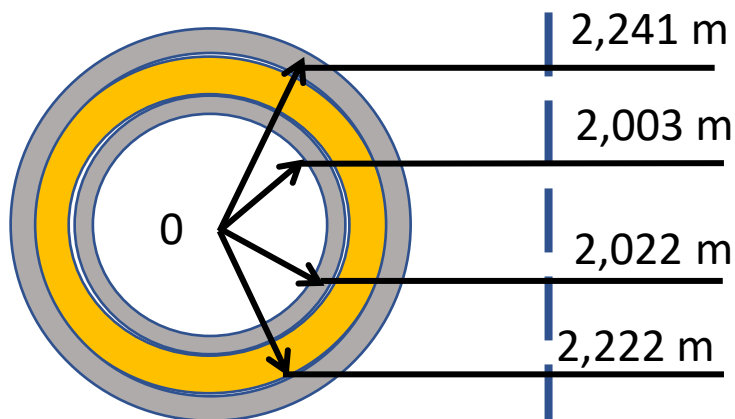
## Conclusion:

- Contrainte de torsion assurée
- $\tau_{max} = 200 \text{ Mpa} < R_{pge} = \frac{R_e}{s} = 330 \text{ Mpa}$
- Arbre en acier faiblement allié trempé (30 Cr Ni Mo 16  $R_e = 1000 \text{ Mpa}$  ;  $s = 3$ )
- Apparition d'une légère contrainte de fatigue
- Contrainte thermique (  $250^\circ$  )

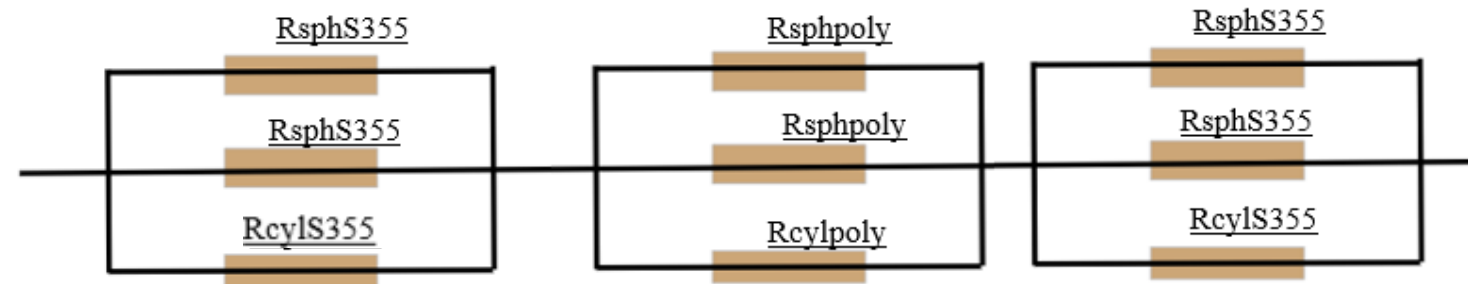
# RESISTANCE THERMIQUE EQUIVALENTE DU RESERVOIR



Coupe du cylindre



Le modèle associé à la résistance thermique équivalente du réservoir est :



$$Y_{eq1} = \frac{1}{R_{dsph}} + \frac{1}{R_{dsph}} + \frac{1}{R_{cyl}} \Rightarrow R_t = \sum_{i=0}^3 \frac{R_{dsph} * R_{cyl}}{2R_{cyl} + R_{dsph}}$$

$$\Rightarrow R_t = \sum_{i=0}^3 \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right) * (r_{ext} - r_{int})}{\frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{L} + \frac{2(r_{ext} - r_{int})}{(r_{ext} * r_{int})}} \frac{1}{2\pi\lambda * L * r_{ext} * r_{int}} = 0,025 \text{ K/W}$$



# FLUX SURFACIQUES DANS LE RESERVOIR



Les calculs des resistances thermiques donne :

$$R_{cyl} = \sum_{i=0}^3 \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2L\lambda\pi} = \mathbf{0.032 \text{ K/W}}$$

$$R_{dsph} = \sum_{i=0}^3 = \frac{1}{2\pi\lambda} \left( \frac{1}{r_{int}} - \frac{1}{r_{ext}} \right) = \mathbf{0.26 \text{ K/W}}$$

$$R_t = \sum_{i=0}^3 \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right) * (r_{ext} - r_{int})}{\frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{L} + \frac{2(r_{ext} - r_{int})}{(r_{ext} * r_{int})}} \frac{1}{2\pi\lambda * L * r_{ext} * r_{int}} = \mathbf{0,025 \text{ K/W}}$$

Ainsi, les flux surfaciques sont:

$$\phi_{dsph} = \frac{\Delta T}{R_{dsph} * S_{dsph}} = \mathbf{20 \text{ W/m}^2} \quad \phi_{ssphm} = \mathbf{27 \text{ W/m}^2}$$

$$\phi_{scyl} = \frac{\Delta T}{R_{cyl} * S_{cyl}} = \mathbf{5 \text{ W/m}^2} \quad \phi_{scylm} = \mathbf{5,5 \text{ W/m}^2}$$

$$\phi_{st} = \frac{\Delta T}{R_t * St} = \mathbf{10 \text{ W/m}^2 < 20 \text{ W/m}^2}$$

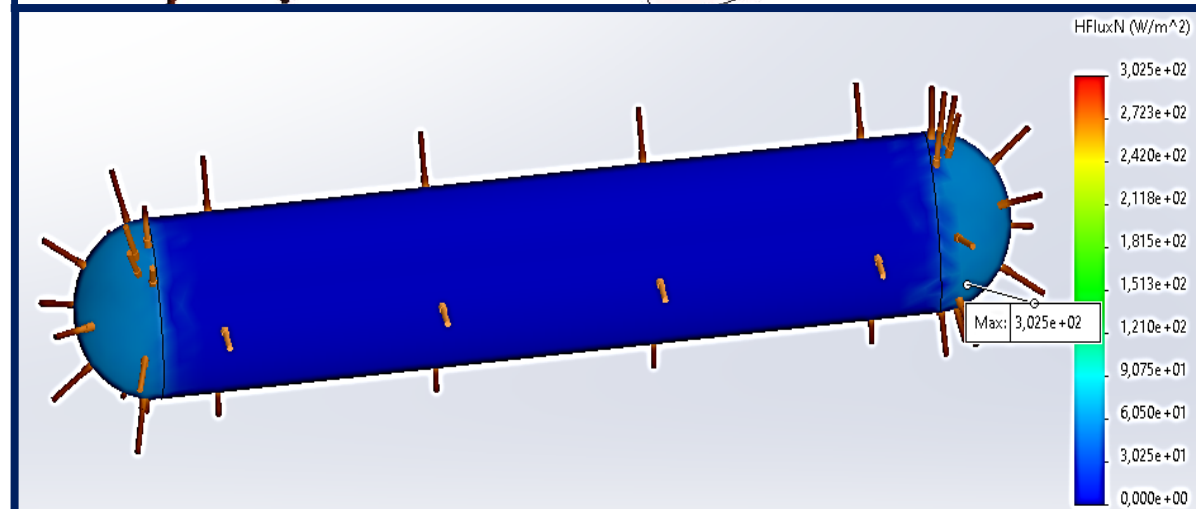
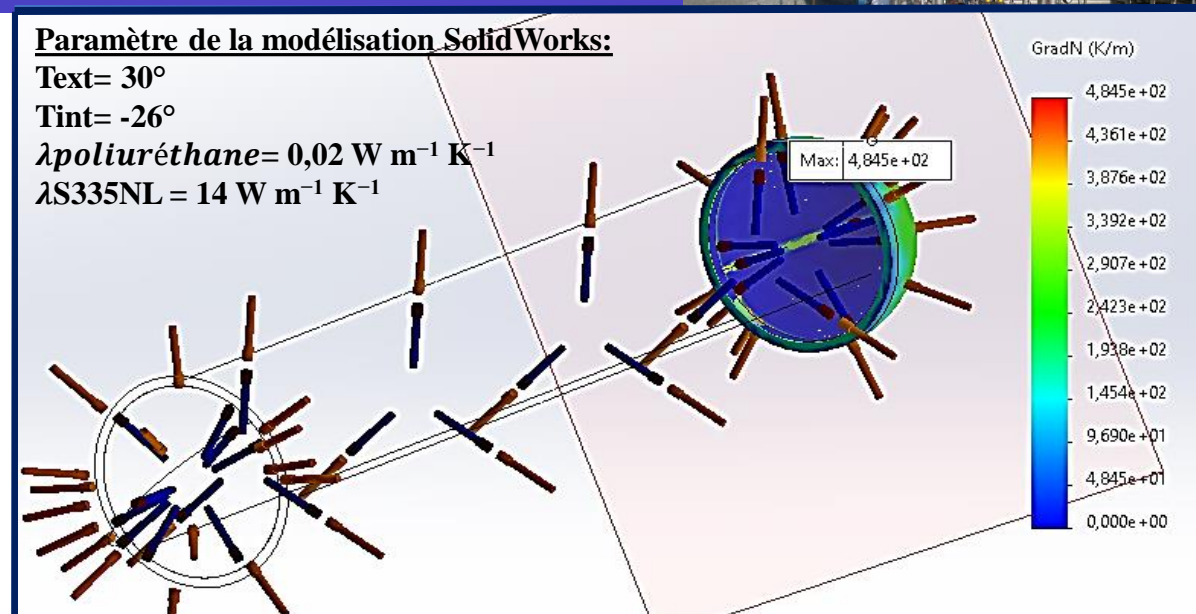
Paramètre de la modélisation SolidWorks:

Text= 30°

Tint= -26°

$\lambda_{\text{polyuréthane}} = 0,02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$\lambda_{\text{S335NL}} = 14 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$



# CONCLUSION

## I Liquéfaction du CO2

- La contrainte du cout enthalpique associée à la liquéfaction (cycle 7-22) est assurée  $\Delta h = 600 \text{ KJ/kg} < 800 \text{ kJ/kg}$

## II Compresseur

- Rendement mécanique assuré  $\eta = 0,63 \in [0,6;0,7]$
- Torsion mécanique de l'arbre moteur assurée  $\tau_{max} = 200 \text{ Mpa} < 330 \text{ Mpa}$

## III Réservoir

- Assurer la sécurité du réservoir ( modèle SolidWorks )
- Contrainte du flux surfacique totale assurée  $10 \text{ W/m}^2 < 20 \text{ W/m}^2$
- Assurer le stockage du CO2 liquide pendant 3 jours (programme python)

## VI Modèles

- Modèle de la contrainte en flexion du réservoir  $\sigma_{max} = 290 \text{ Mpa}$
- Modèle des pertes énergétiques du réservoir ( modèle SolidWorks )

- BAUDEL
- BLANQUET

## Mai-Août 2020

- Choix du sujet
- Prise de contact avec M. Raul, ingénieur sur le site de l'unité de liquéfaction du CO<sub>2</sub> en Argentine
- Analyse fonctionnelle
- Étude de la chaîne de liquéfaction

## Septembre Janvier

- Étude du réservoir sur SolidWorks
- Décryptage des documents reçus
- Réalisation du programme python donnant la température du réservoir en fonction du temps

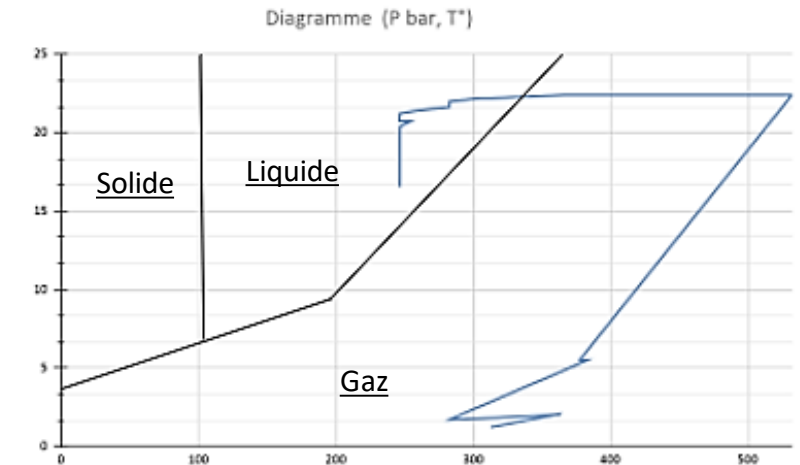
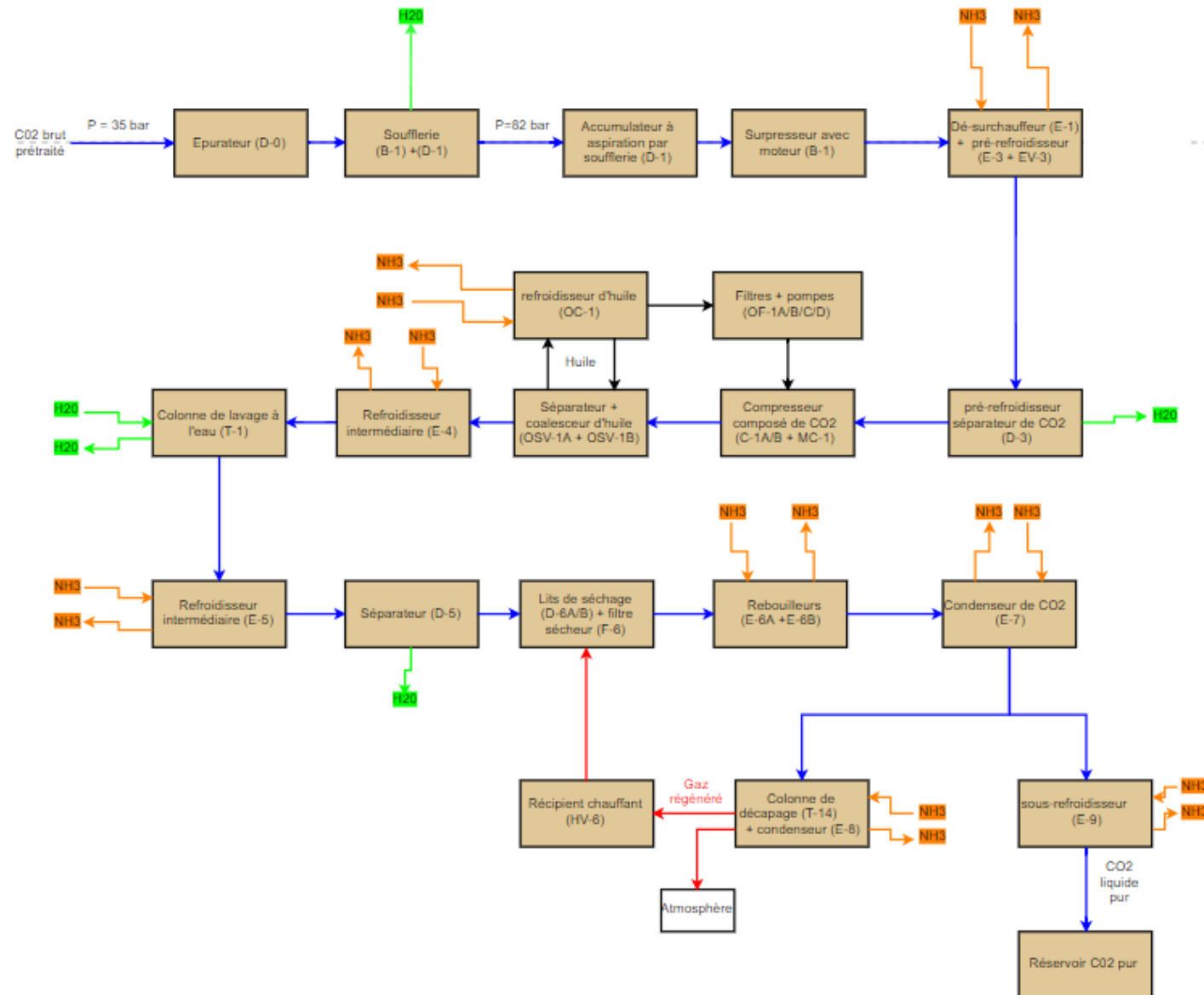
## Février- Mai

- Finalisation programme python
- Étude RDM du réservoir
- Étude mécanique du compresseur biétage
- Finalisation de la présentation

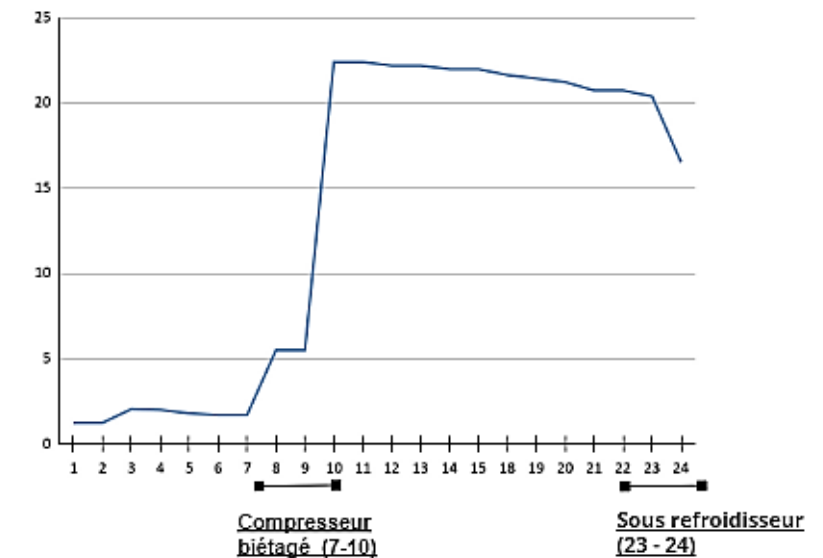


# ANNEXE

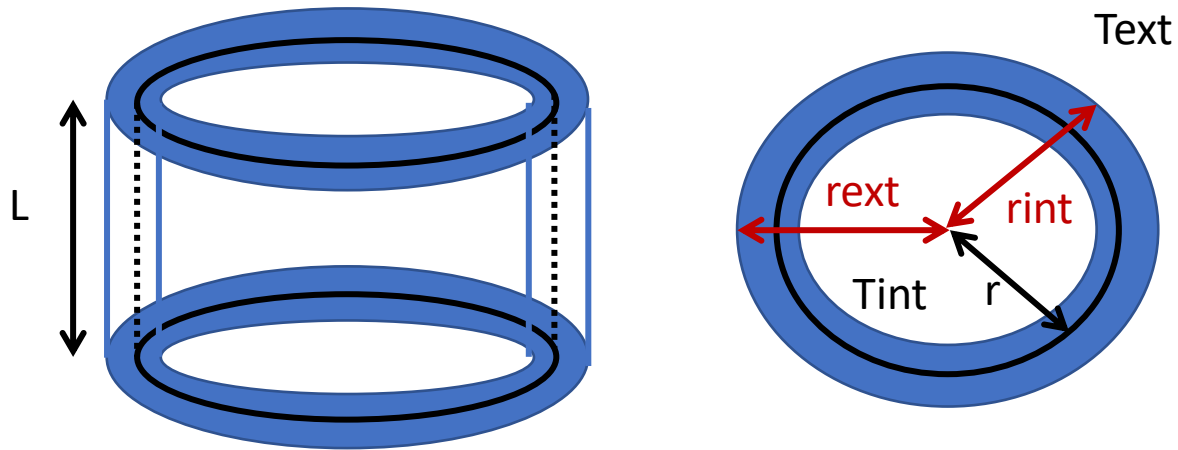
# COMPLEMENT SUR L'UNITE DE LIQUEFACTION



Pression en bar en fonction des étapes du système (réel)



# Démonstration de la résistance thermique d'un cylindre



Hypothèse: - flux permanent

$$\Phi = \int_{\text{cylindre}} \overrightarrow{j_{th}(r)} * \overrightarrow{dS}$$

$$\Rightarrow \Phi = j_{th}(r) * \int_{\text{cylindre}} dS$$

$$\Rightarrow \Phi = 2\pi L r * j_{th}(r)$$

En utilisant la loi de Fourier on en déduit par invariances :

$$\Rightarrow \Phi = -2\pi\lambda L r * \frac{dT}{dr}$$

$$\Rightarrow dT = -\frac{\Phi}{2\pi\lambda L} \frac{dr}{r}$$

$$\Rightarrow \int_{T_{int}}^{T_{ext}} dT = -\frac{\Phi}{2\pi\lambda L} \int_{r_{int}}^{r_{ext}} \frac{dr}{r}$$

$$\Rightarrow T_{ext} - T_{int} = -\frac{\Phi}{2\pi\lambda L} * \ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)$$

Or, on sait que:  $R_{cyl} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{\Phi}$

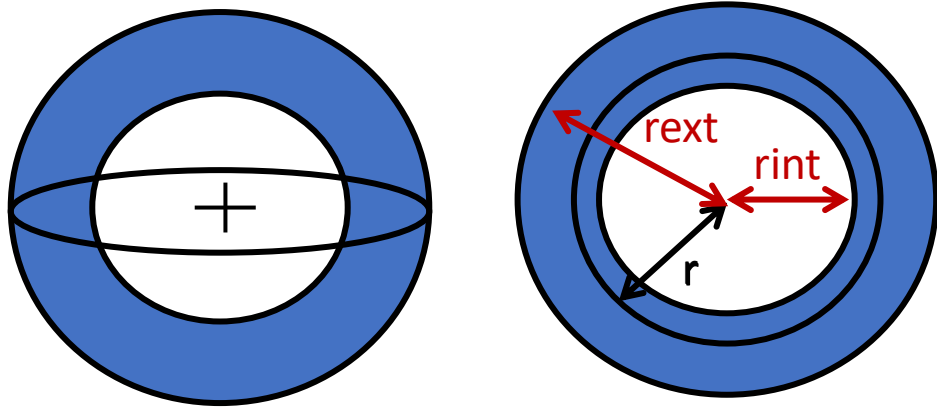
D'où:

$$R_{cyl} = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2L\lambda\pi}$$

$$\begin{aligned} S_{ph} &= 24 \text{ m}^2 \\ S_{cyl} &= 326 \text{ m}^2 \\ S_t &= 350 \text{ m}^2 \end{aligned}$$



# Démonstration de la résistance thermique d'une demi sphère



Hypothèse: - flux permanent

$$\Phi = \int_{\text{sphère}} \overrightarrow{j_{th}(r)} * \overrightarrow{dS}$$

$$\Rightarrow \Phi = j_{th}(r) * \int_{\text{sphère}} dS$$

$$\Rightarrow \Phi = 2\pi r^2 * j_{th}(r)$$

En utilisant la loi de Fourier on en déduit par invariances :

$$\overrightarrow{\varphi}_r = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T = -\lambda \frac{dT}{dr} \overrightarrow{e_r}$$

$$\Rightarrow \Phi = -4\pi\lambda r^2 \frac{dT}{dr}$$

$$\Rightarrow dT = -\frac{\Phi}{2\pi\lambda r^2} dr$$

$$\Rightarrow \int_{T_{int}}^{T_{ext}} dT = -\frac{\Phi}{2\pi\lambda} \int_{r_{int}}^{r_{ext}} \frac{dr}{r^2}$$

$$\Rightarrow T_{ext} - T_{int} = -\frac{\Phi}{2\pi\lambda} \left( \frac{1}{r_{ext}} - \frac{1}{r_{int}} \right)$$

Or, on sait que:  $R_{sph} = \frac{T_{int} - T_{ext}}{\Phi}$

D'où:

$$R_{dsph} = \frac{1}{2\lambda\pi} \left( \frac{1}{r_{int}} - \frac{1}{r_{ext}} \right)$$

$$S_{ph} = 24 \text{ m}^2$$

$$S_{cyl} = 326 \text{ m}^2$$

$$S_t = 350 \text{ m}^2$$

# INTERET D'UN FLUX THERMIQUE FAIBLE

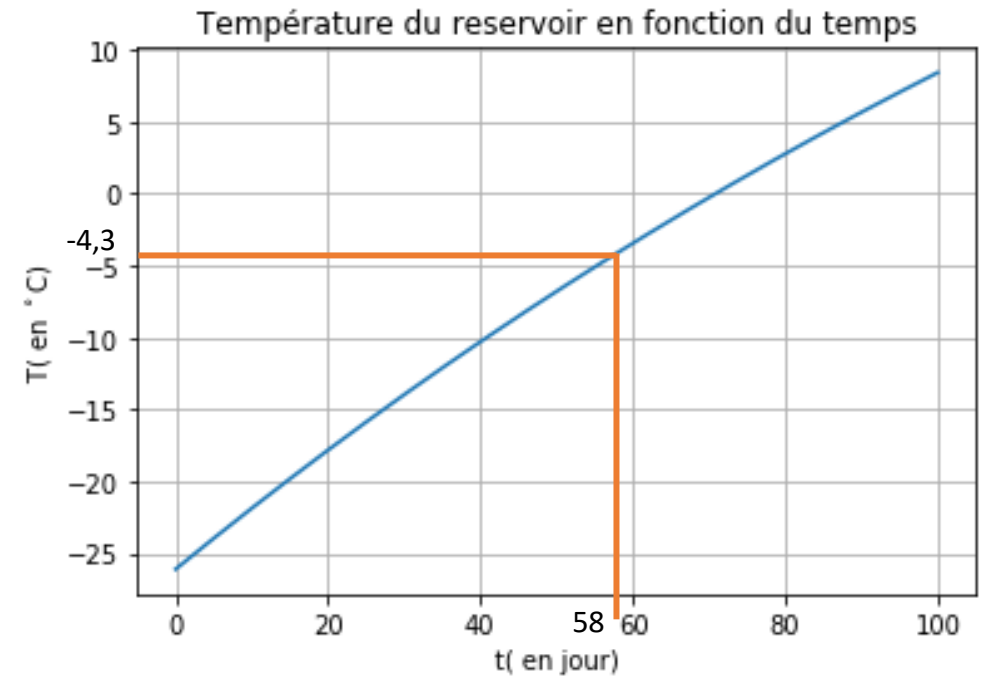
On applique le 1er principe de la thermodynamique au CO2 liquide. Ainsi, comme c'est un gaz parfait on a d'après la première loi de Joule :

$$dU = mtot * cp * dT = \Phi * dt \quad \text{Et on a: } \phi = \frac{T_{ext} - T}{Rth}$$

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau} = \frac{T_{ext}}{\tau} \quad \text{Avec } \tau = Rth * mtot * cp = mtot * cp \frac{\Delta T}{\phi}$$

La solution de l'équation différentielle est:

$$T(t) = T_{ext} + (T_o - T_{ext})e^{-\frac{t}{\tau}} = T_{ext} + (T_o - T_{ext})e^{-\frac{t}{mtot * cp \frac{\Delta T}{\phi}}}$$



# PROGRAMME PYTHON DE LA TEMPERATURE DANS LE RESERVOIR

```
>>> import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.integrate as spi

P = 16.5          #pression interieure en bar supposee constante
Rth = 2.527*0.01  #resistance thermique du reservoir(en K/W)
Text = 60+273.15  #temperature exterieure
T0 = -26.1+273.15 #temperature interieure initiale
tmax = 100*24*60*60 # correspond à 100 jours

Lt = [-26,-25,-24,-23,-22,-21,-20,-19,-18,-17,-16,-15,-14,-13,-12,-10] #liste température(°C)

cp = [2.1045069 , 2.110710392 , 2.117312624 , 2.124266599 , 2.131532073 , 2.139076681, 2.146876859 , 2.154918566,
      2.163197793, 2.171720884 , 2.180504656 , 2.189576336 , 2.198973311 , 2.208742718 , 2.218940861 , 2.218940861]
#capacite massique en fonction de la temperature (kJ/(kg*K))

v=[0.9483763414 , 0.9523714274, 0.9564339066, 0.9605662147, 0.9647709246,
  0.969050758, 0.9734085964, 0.9778474942, 0.9823706925, 0.9869816346, 0.9916839835, 0.9964816404,
  1.001378766, 1.006379804, 1.011489508, 1.016712968]
#liste volume massique en fonction de la temperature, (dm^3/kg)

Vol= 306          #volume CO2 liquide en m^3
Lt = Lt+273.15*np.ones(len(Lt))

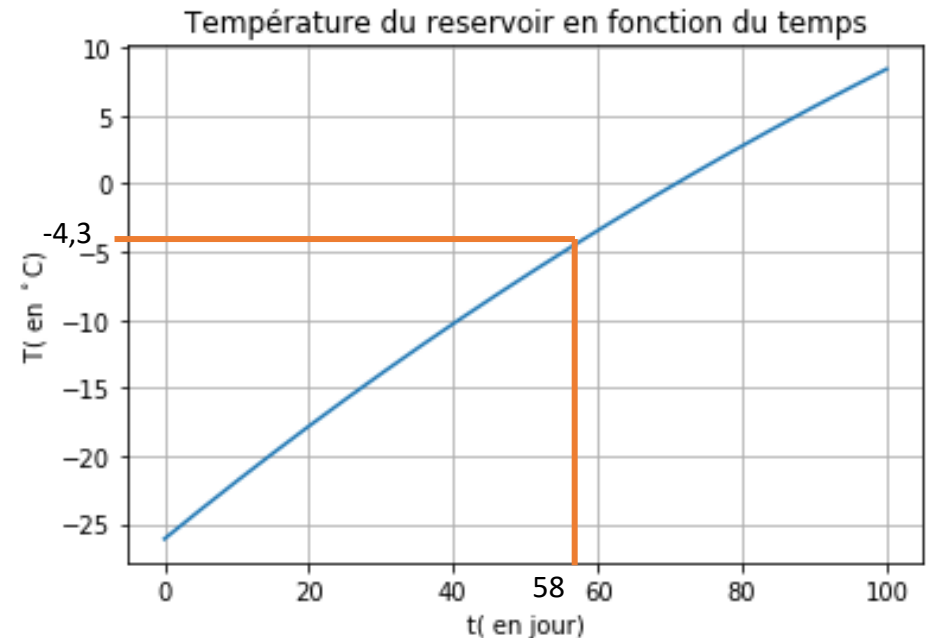
##cp en J/(K.kg) et v en m^3/kg
A = 0.001*np.polyfit(Lt,v,2)
B = 1000*np.polyfit(Lt,cp,2)

def tau(T):
    tau = (Vol*Rth/(A[0]*T**2+A[1]*T+A[2]))*(B[0]*T**2+B[1]*T+B[2])
    return tau

def F(T,t):
    return (Text-T)/tau(T)
```

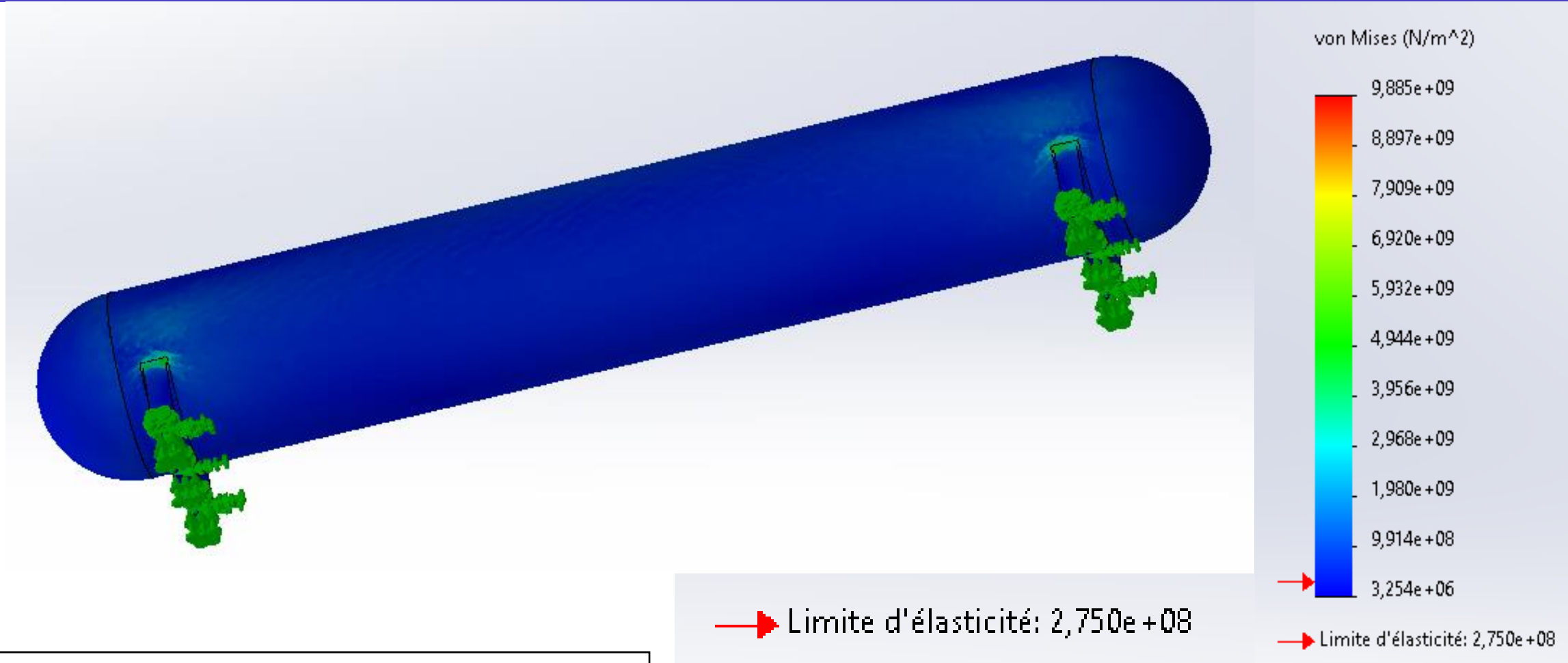
```
t = np.linspace(0,tmax,10000)
T = spi.odeint(F,T0,t)
```

```
## trace de la solution
plt.grid()
plt.plot(t/(3600),T-273.15)
plt.xlabel('t(h)')
plt.ylabel('T( en °C)')
plt.title('Température du reservoir en fonction du temps')
plt.savefig('./Evolution_temperature.pdf')
plt.show()
```





# ASSURER LA SECURITE DU RESERVOIR

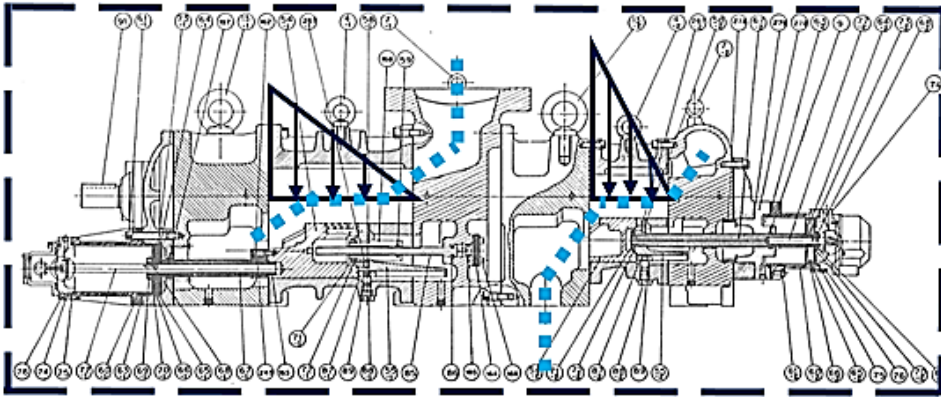


Conclusion: On a  $\sigma_{max} < \frac{E}{s}$  avec  $s = 5$

Le réservoir est sécurisé.

# COMPLEMENT SUR LE COMPRESSEUR

## Complément sur le fonctionnement du compresseur



- L1 (30 cm) et L2(15 cm) les longueurs des vis hélicoïdales
- R1( 5cm) et R2(3cm) les rayons des demi-cercles des vis.

Cg1= 560 Nm  
Cg2= 480 Nm  
Cgt= 1040 Nm  
C1vis= 210 Nm  
C2vis= 100 Nm  
2Cfrot= 100 Nm  
Croul1= 60 Nm  
Croul2=100 Nm  
Croul3= 40 Nm

