

## Présentation des ateliers

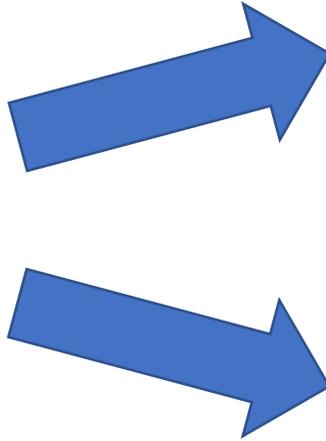
# Et si c'était vous ?

Réflexions en groupes, regards critiques et optimisations d'un montage sous vide

Pascal Morfin

# Déroulement des ateliers

On n'a pas souvent l'occasion de se rencontrer

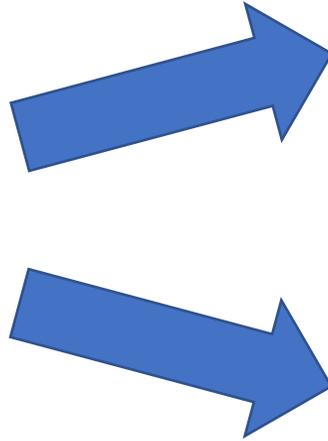


Découvrir d'autres membres du RTVide

Echanger avec des personnes que l'on ne connaît pas

# Déroulement des ateliers

On n'a pas souvent l'occasion de se rencontrer



Découvrir d'autres membres du RTVide

Echanger avec des personnes que l'on ne connaît pas

Réfléchir, ensemble, autour d'un montage sous vide

Divisés en groupes de 15 personnes dont 2 animateurs

Pour que ça marche, tout le monde doit participer et interagir

# Le challenge

## Inventer un système

- Fonctionnant sous vide
- On chauffe
- On refroidit
- *Et pourquoi pas d'autres choses ?*

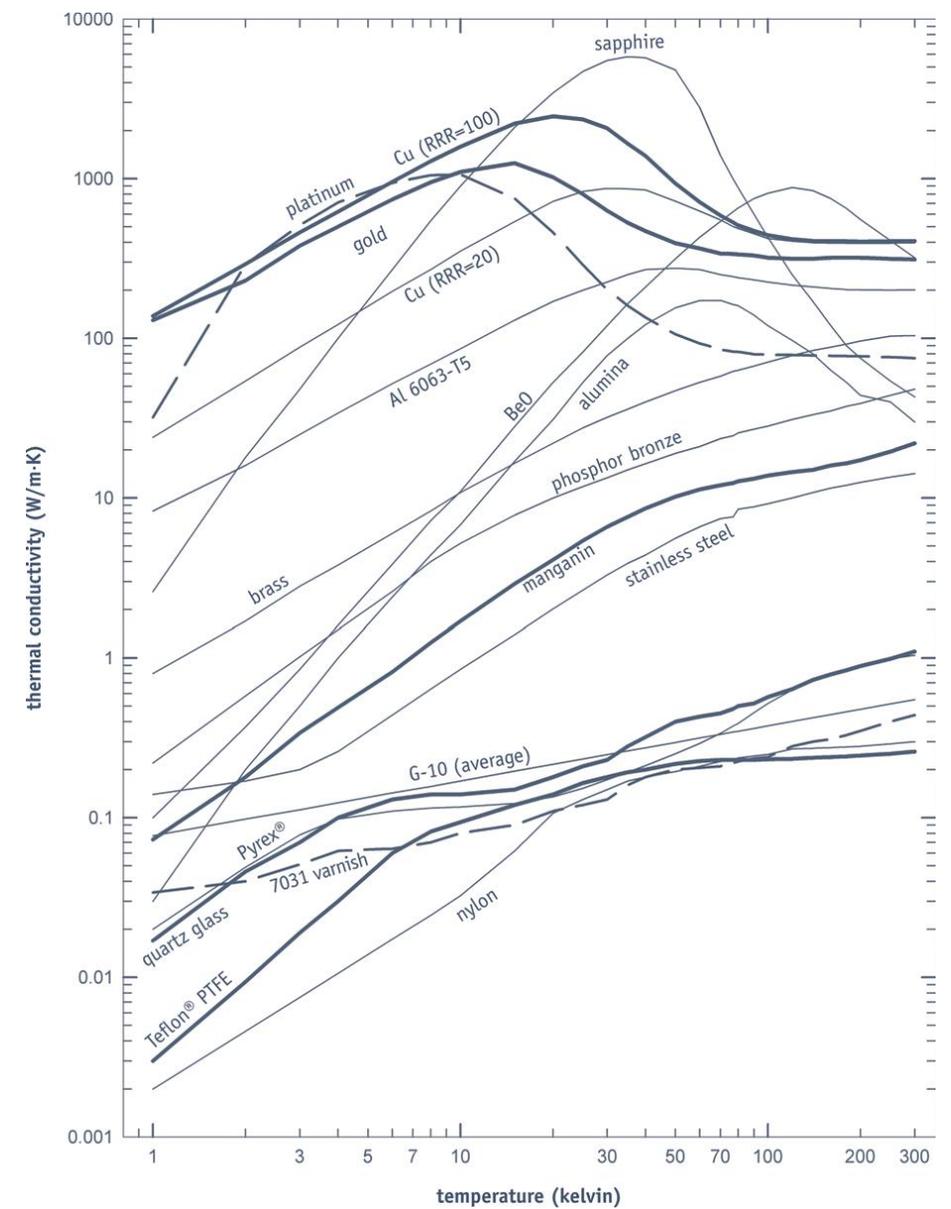
# Le challenge

## Inventer un système

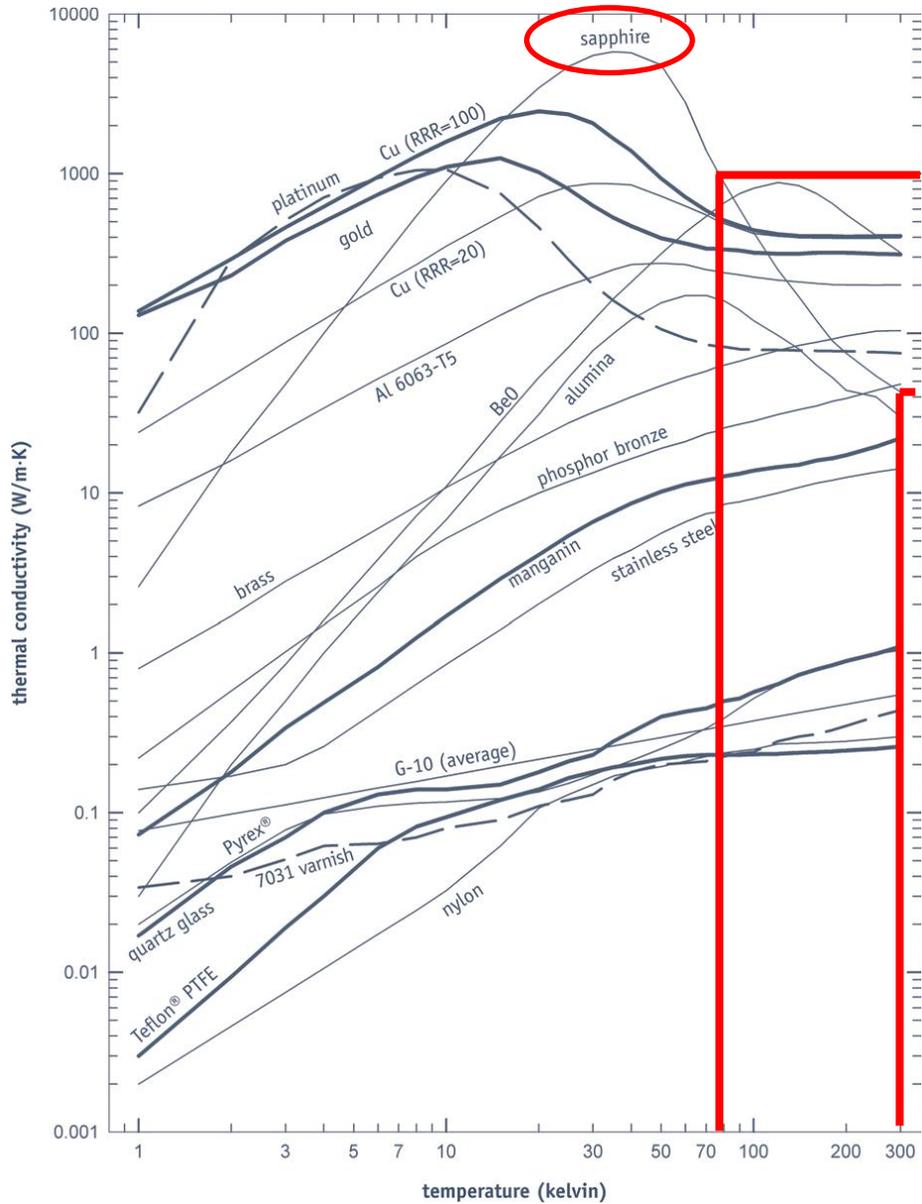
- Fonctionnant sous vide
- On chauffe
- On refroidit
- *Et pourquoi pas d'autres choses ?*



Mettre en avant une propriété thermique d'un matériau



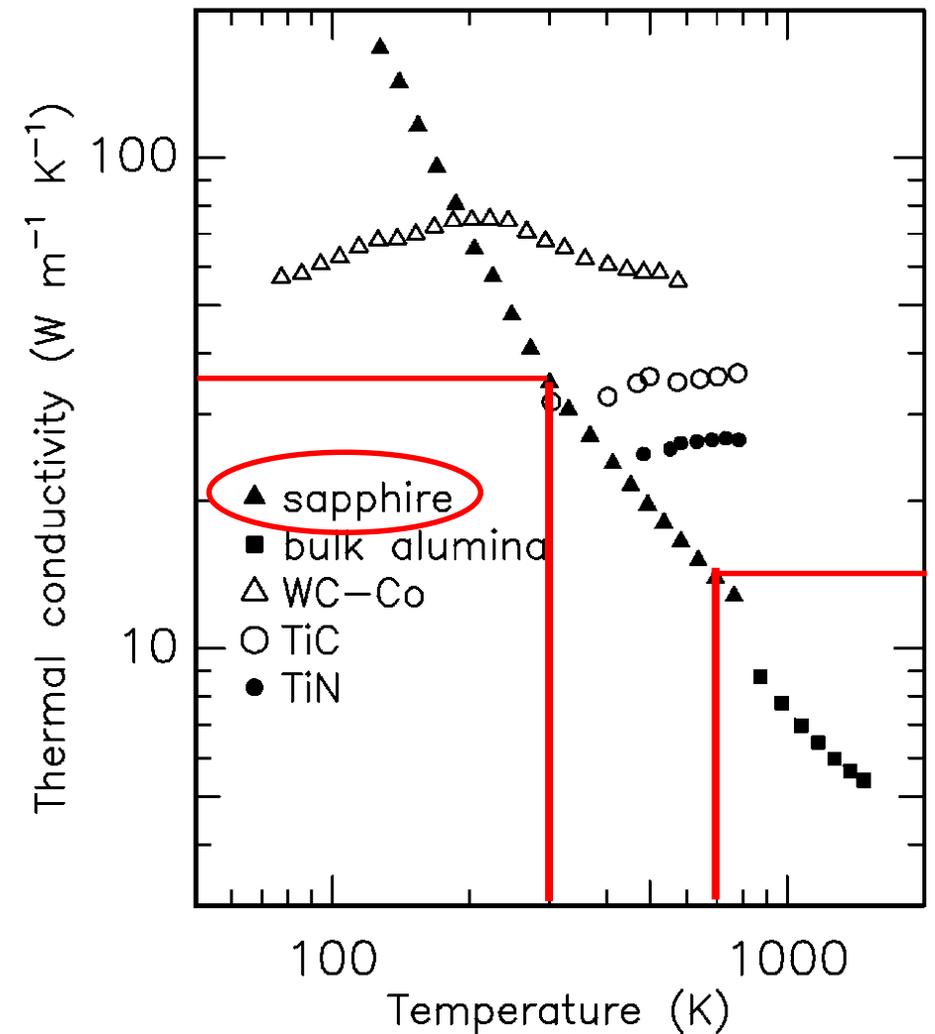
Conductivité thermique



## Conductivité thermique

Figure récupérée sur le site de Lake Shore

[https://www.lakeshore.com/docs/default-source/product-downloads/literature/lstc\\_appendixi\\_l.pdf](https://www.lakeshore.com/docs/default-source/product-downloads/literature/lstc_appendixi_l.pdf)



Cahill et Al. (*Journal of Applied Physics* 83, 5783 (1998))

## Conductivité thermique du saphir

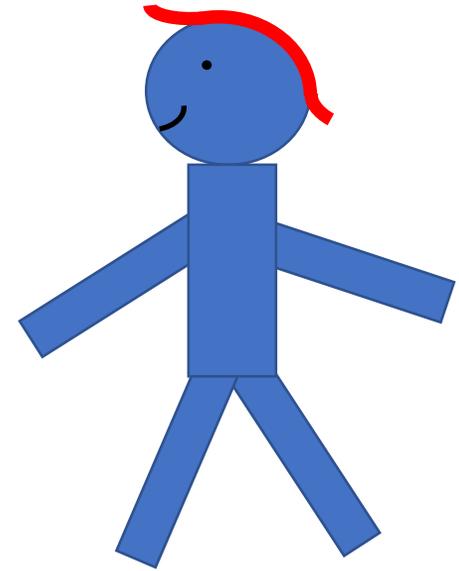
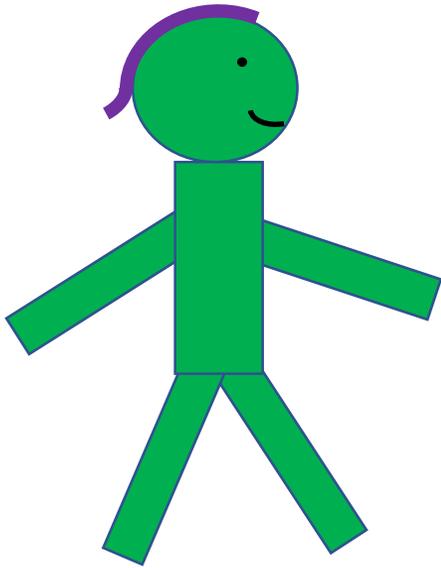
@77K :  $1000 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

@300K :  $42 \dots \text{ou } 35 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  disons  $40 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

@700K :  $12 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

# Il était une fois...

# Au début du XXI<sup>ème</sup> siècle, au LIRTV (Laboratoire Imaginaire du RTVide)...



# Au début du XXI<sup>ème</sup> siècle, au LIRTV (Laboratoire Imaginaire du RTVide)...

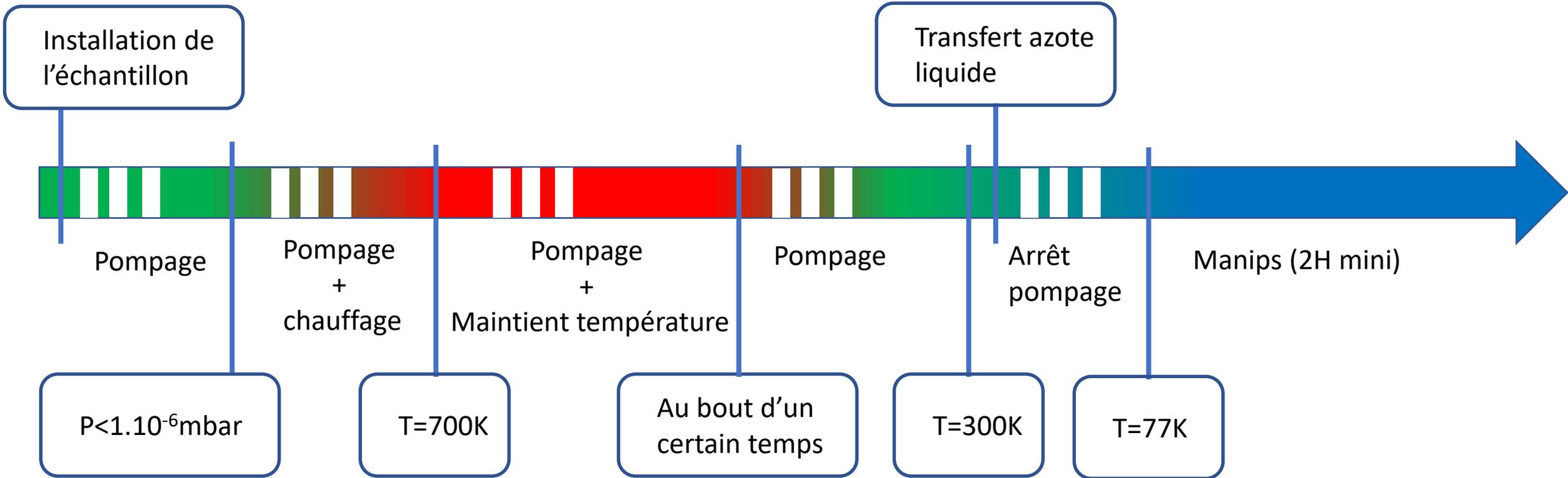


# Le cahier des charges succinct

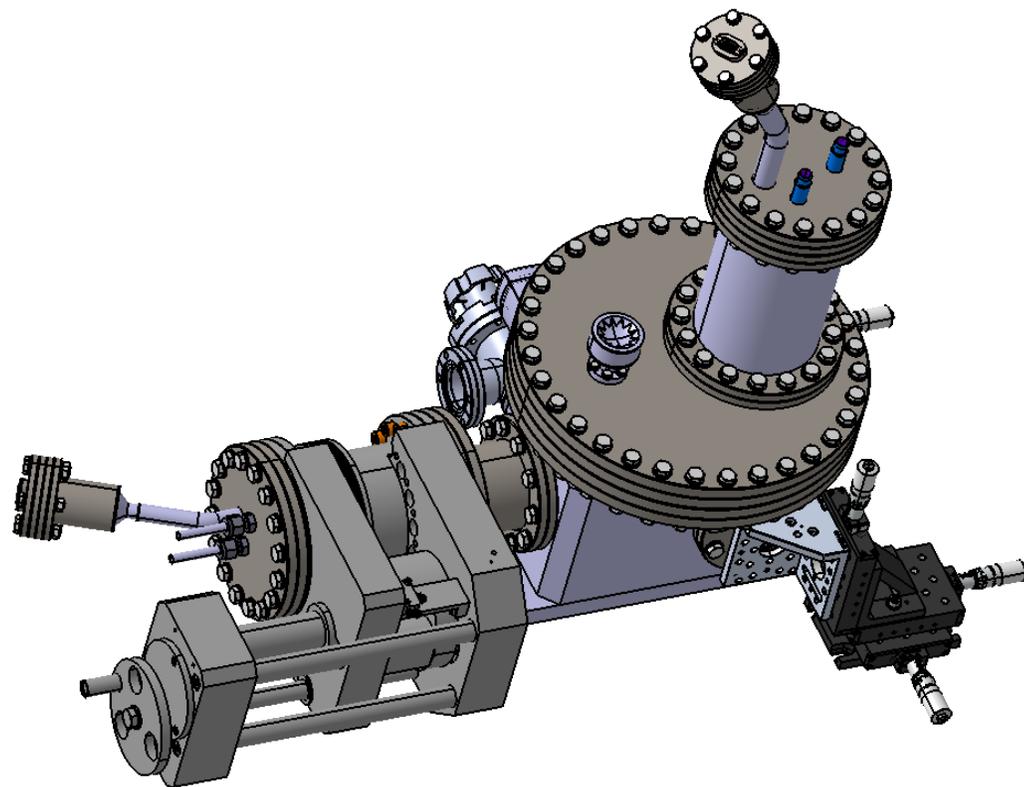
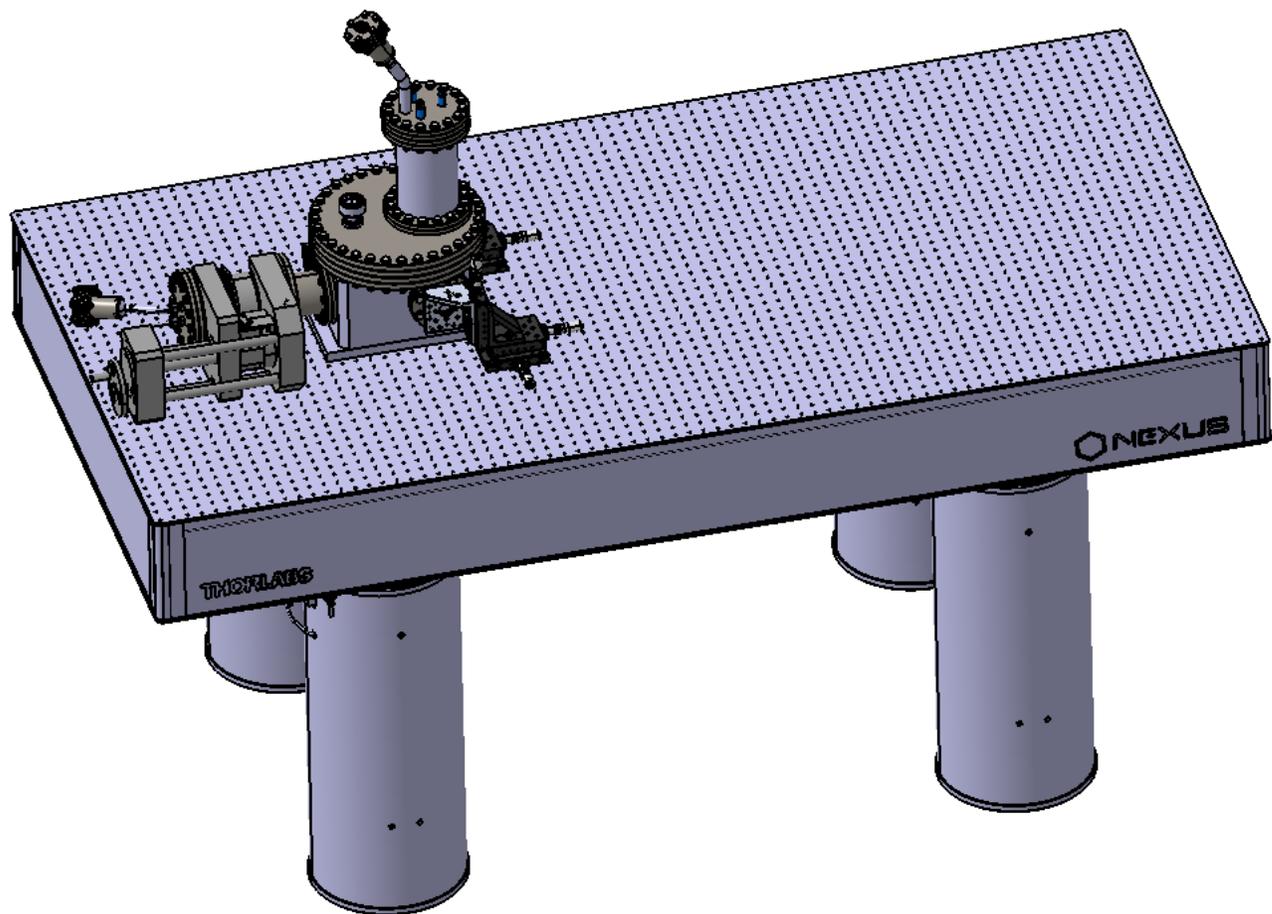
- Mesures optiques en transmission
- Longueur d'onde : on veut regarder jusqu'à 2  $\mu\text{m}$
- Échantillon déposé sur un substrat de saphir (15mm x 15mm)
- Échantillon qui se contamine si exposé à l'air

- Pression de fonctionnement :  $< 1.10^{-6}\text{mbar}$
- Température de chauffage : 700K
- Température de mesure : 80K
- Durée des mesures : 2H minimum

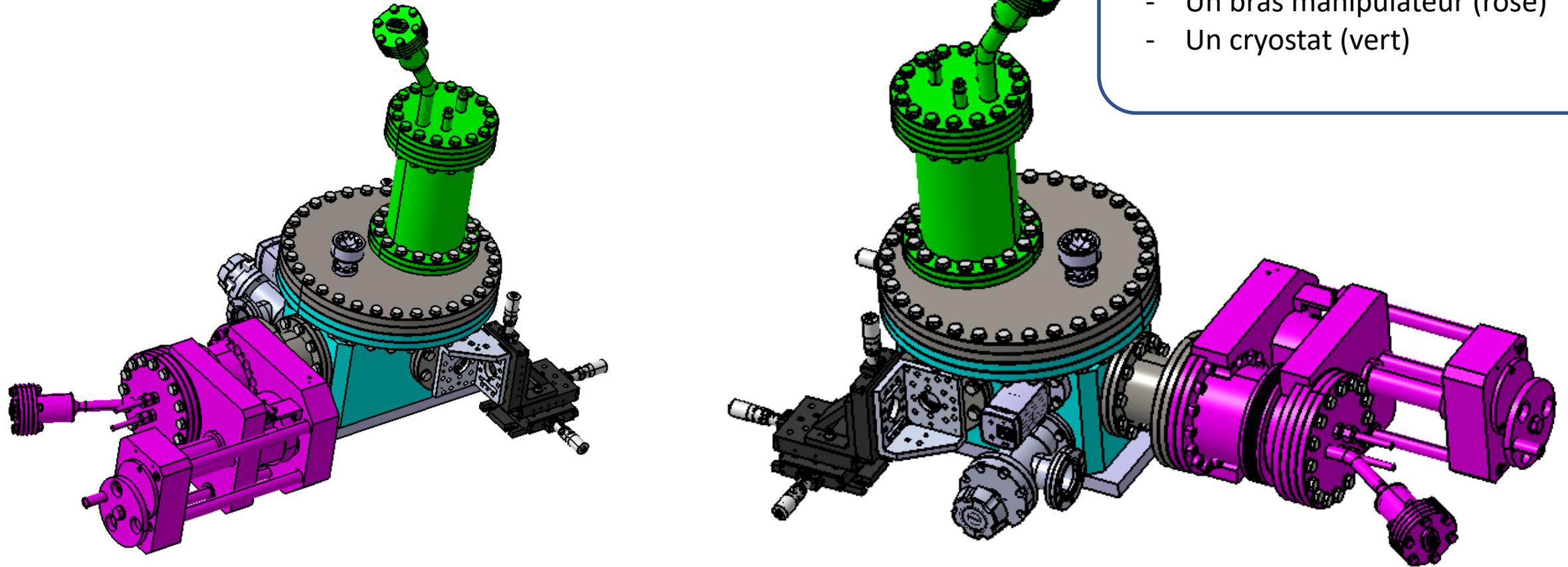
# Le déroulement de la manip



# Le système imaginé



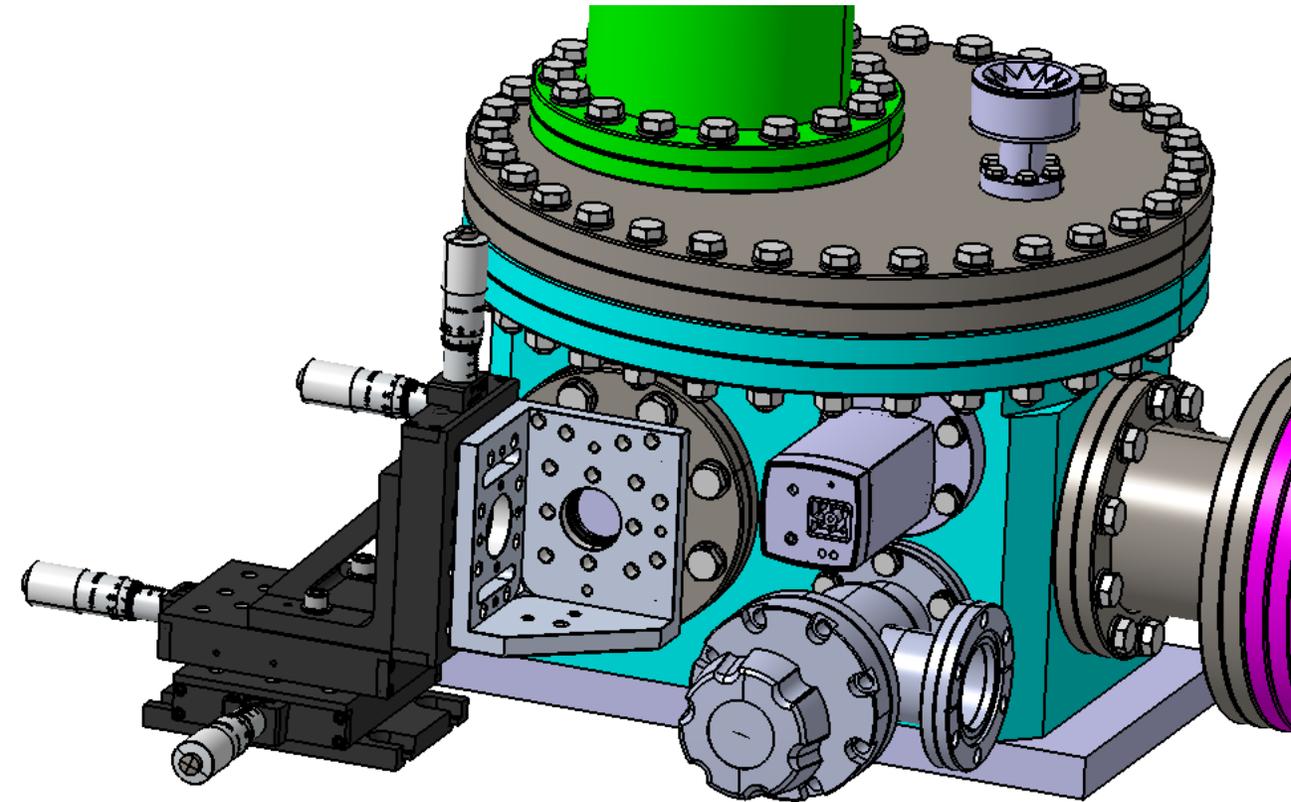
# Le système imaginé : 3 parties



- Une enceinte (bleue)
- Un bras manipulateur (rose)
- Un cryostat (vert)

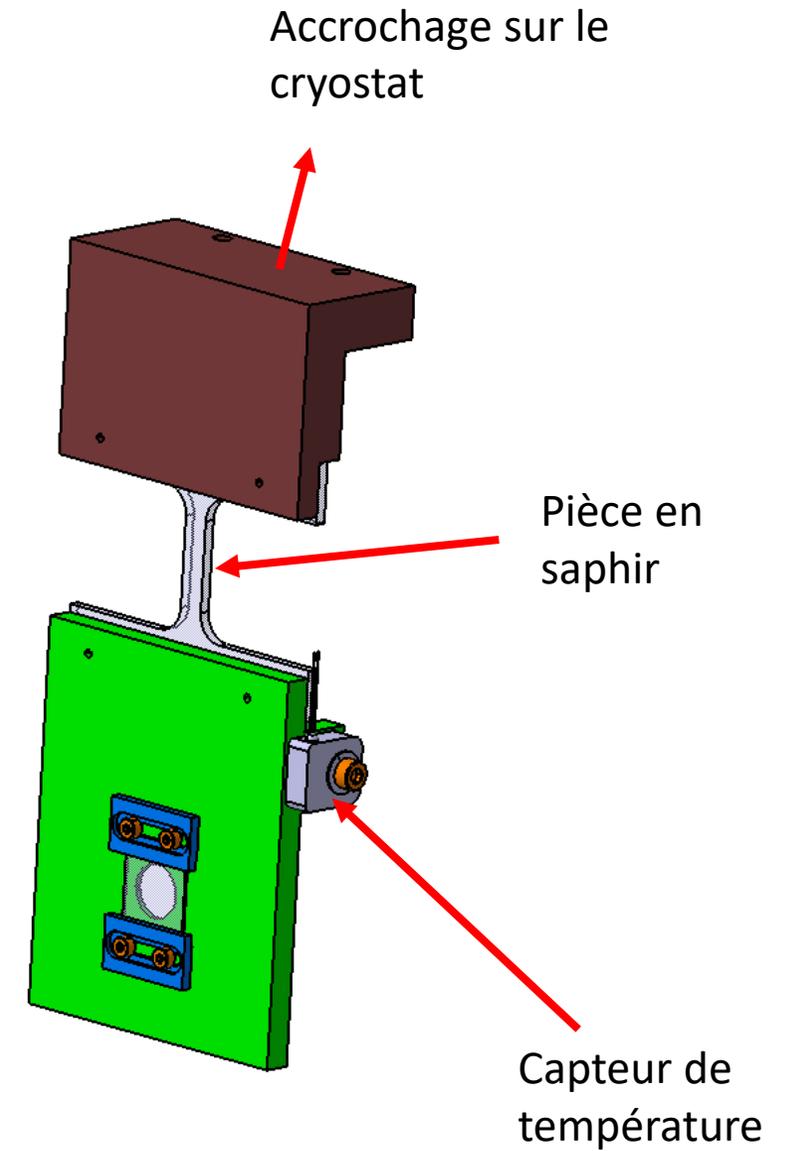
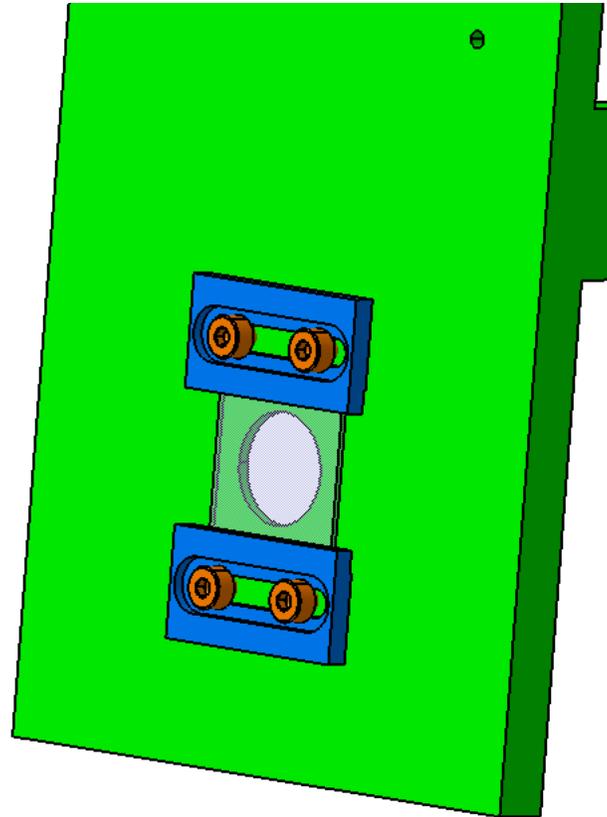
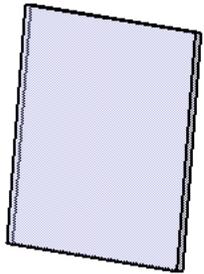
# Le système imaginé : les accessoires

- Jauge à vide
- Vanne pour pompage
- Disque de rupture
- 2 Déplacements XYZ pour objectifs de microscope

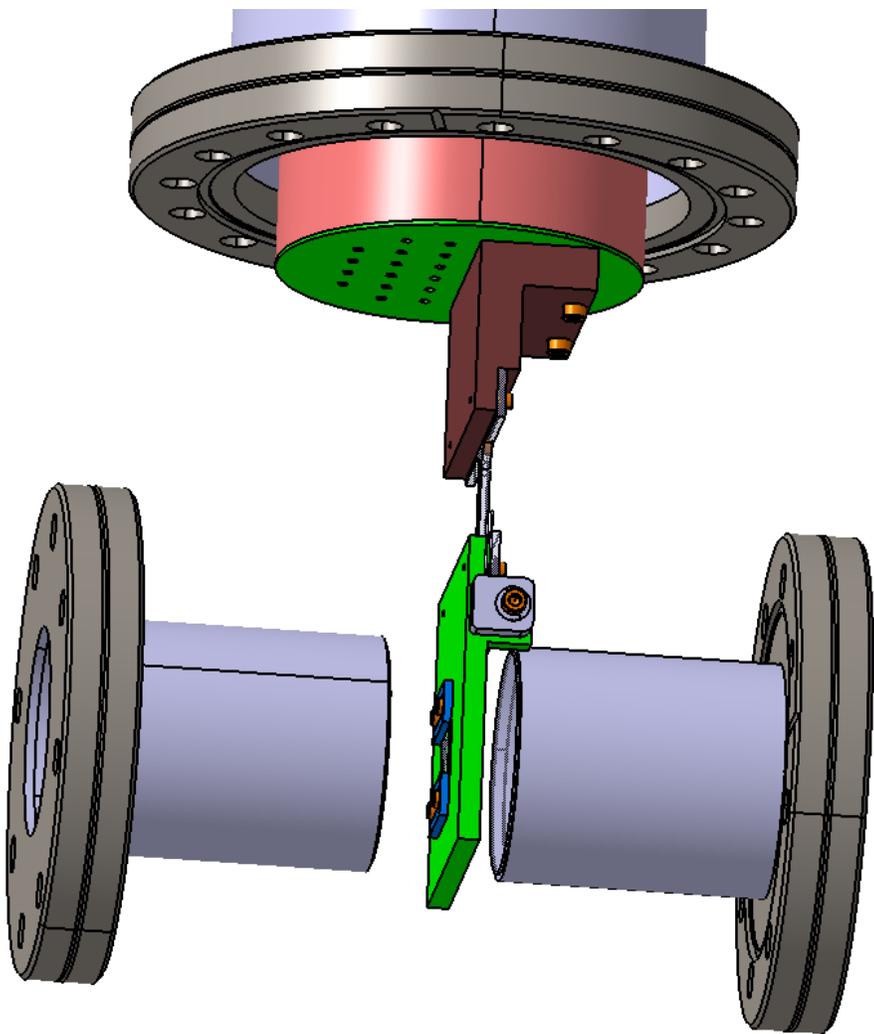


# Au cœur de l'enceinte

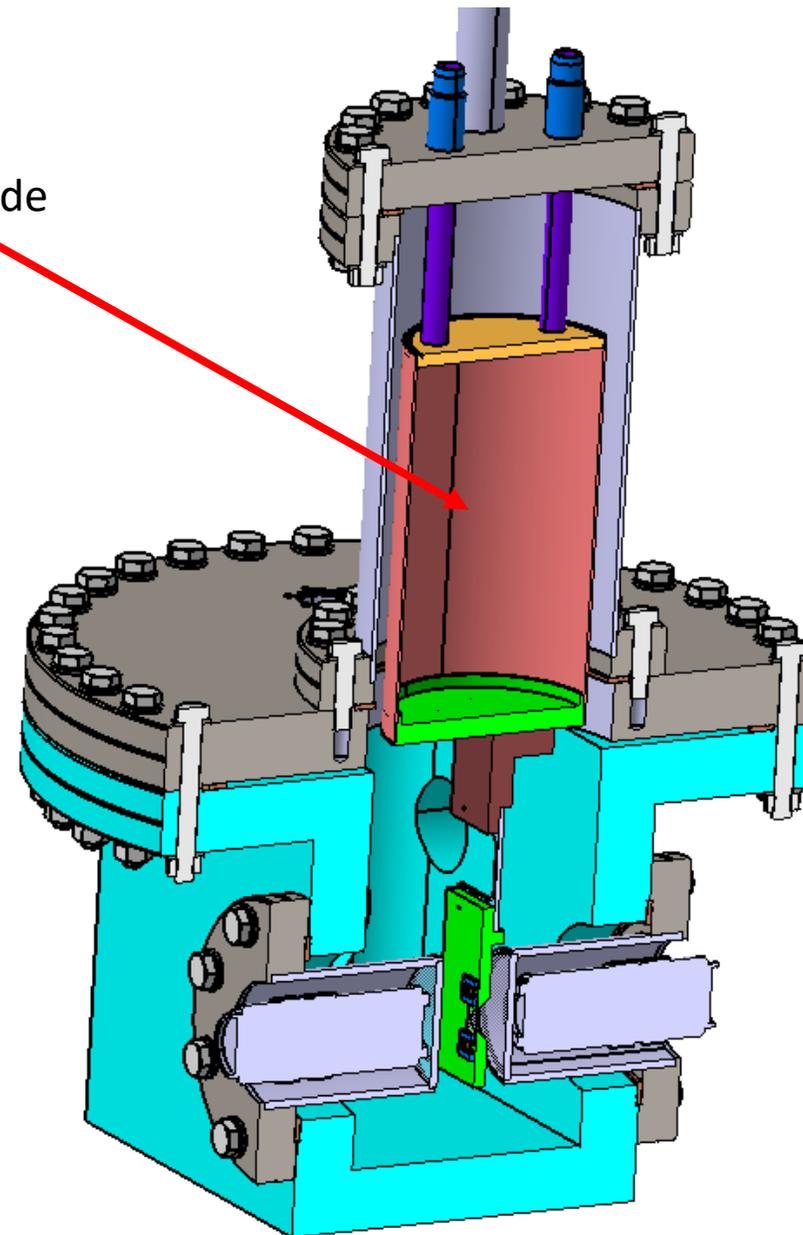
L'échantillon  
Sur son support (vert)



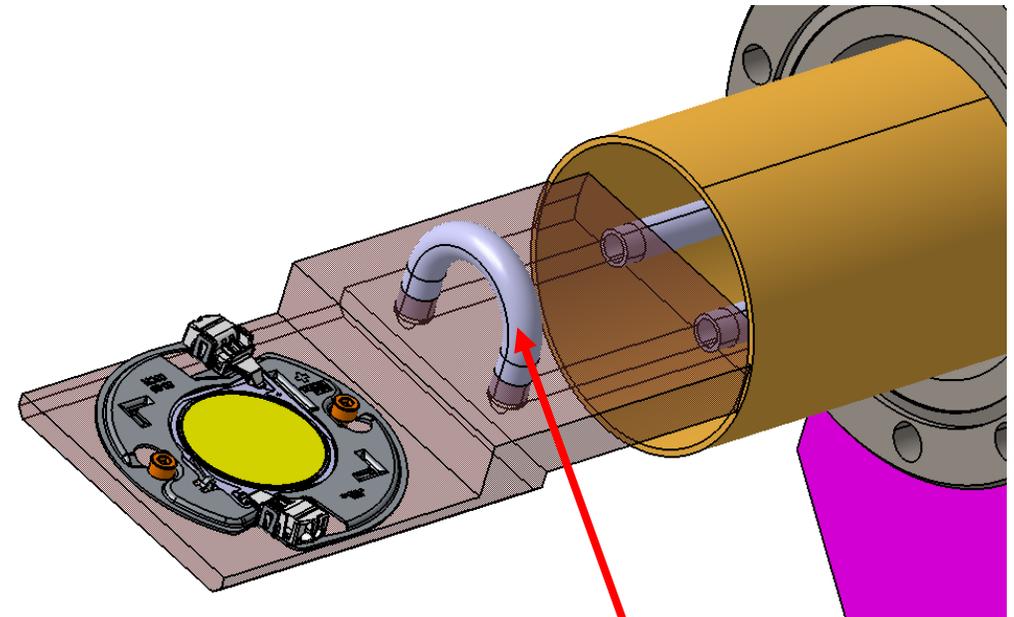
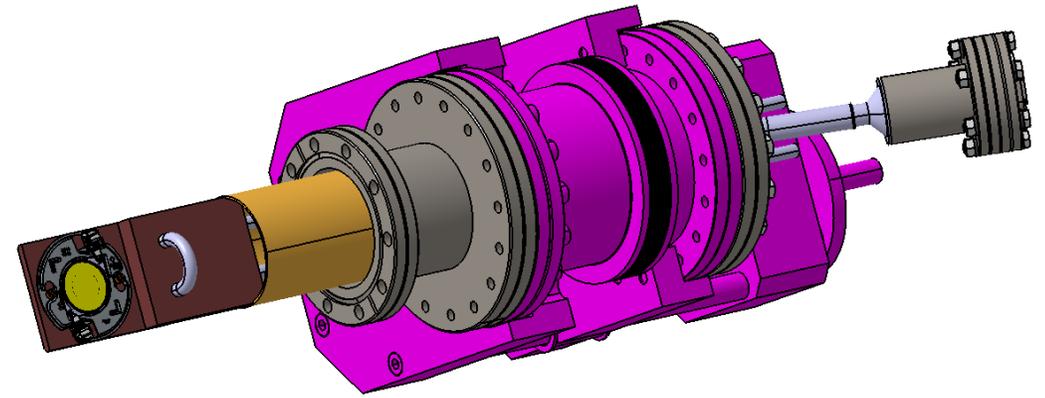
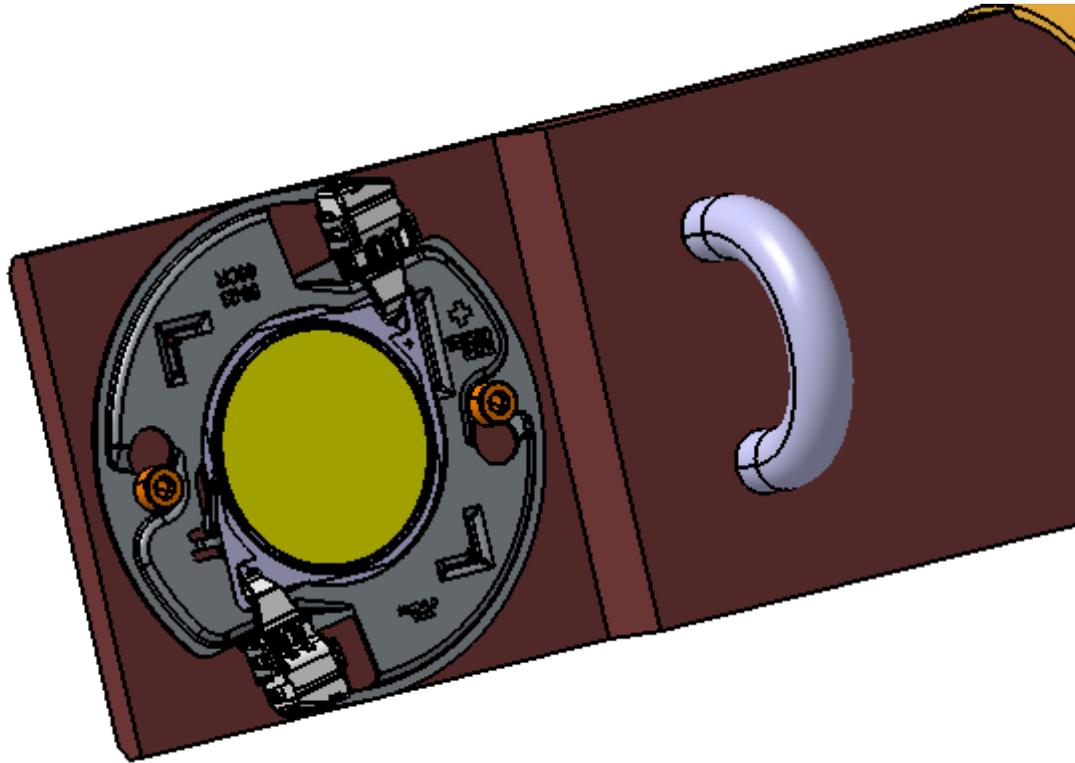
# Configuration mesure



Réservoir  
azote liquide



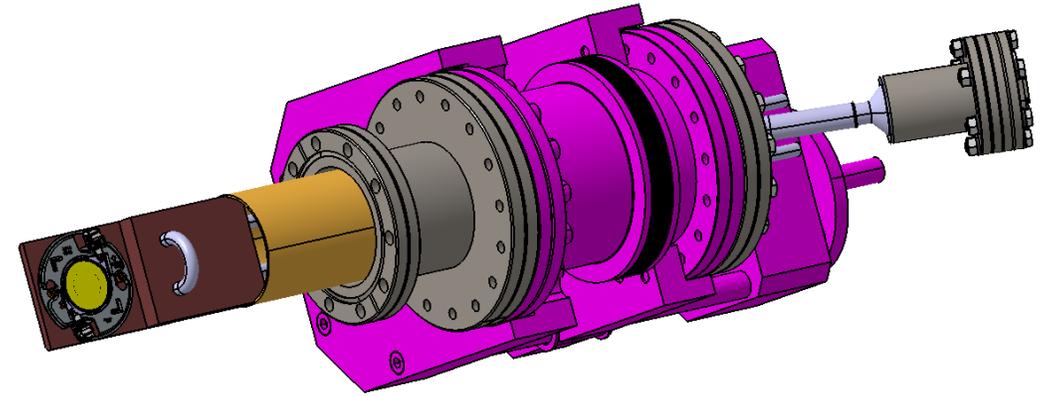
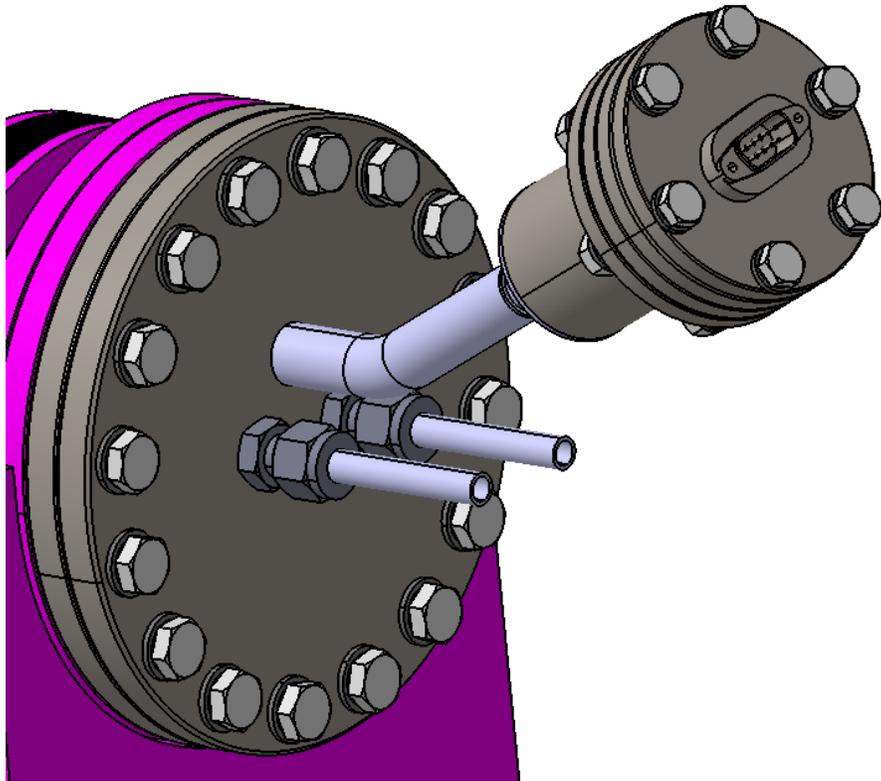
# Le bras manipulateur coté vide



Une LED de puissance (chauffage de l'échantillon)  
Circuit d'eau (refroidissement de la LED)

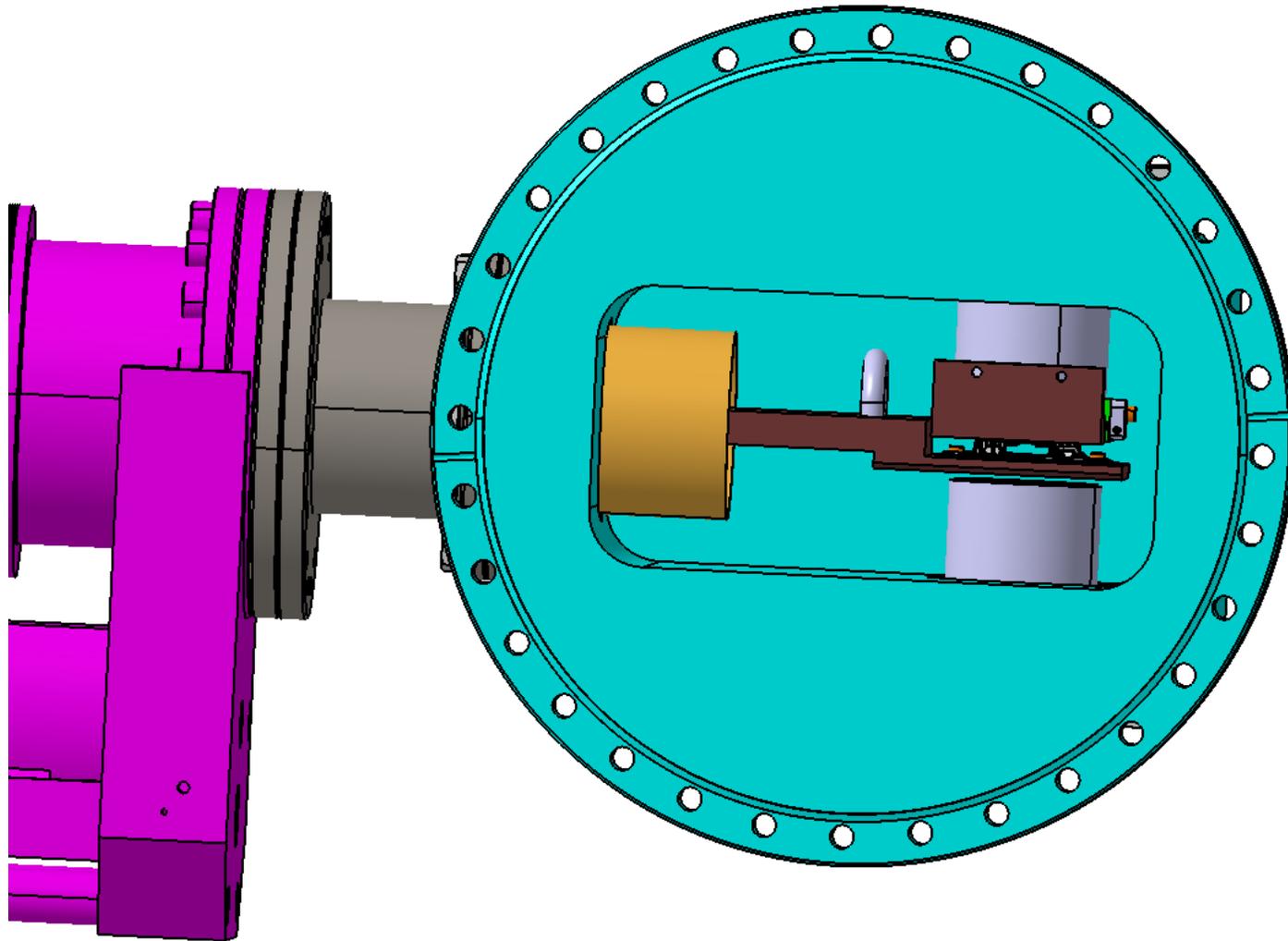
Tube de liaison  
entre l'arrivée et  
le retour d'eau

# Le bras manipulateur coté atmosphère



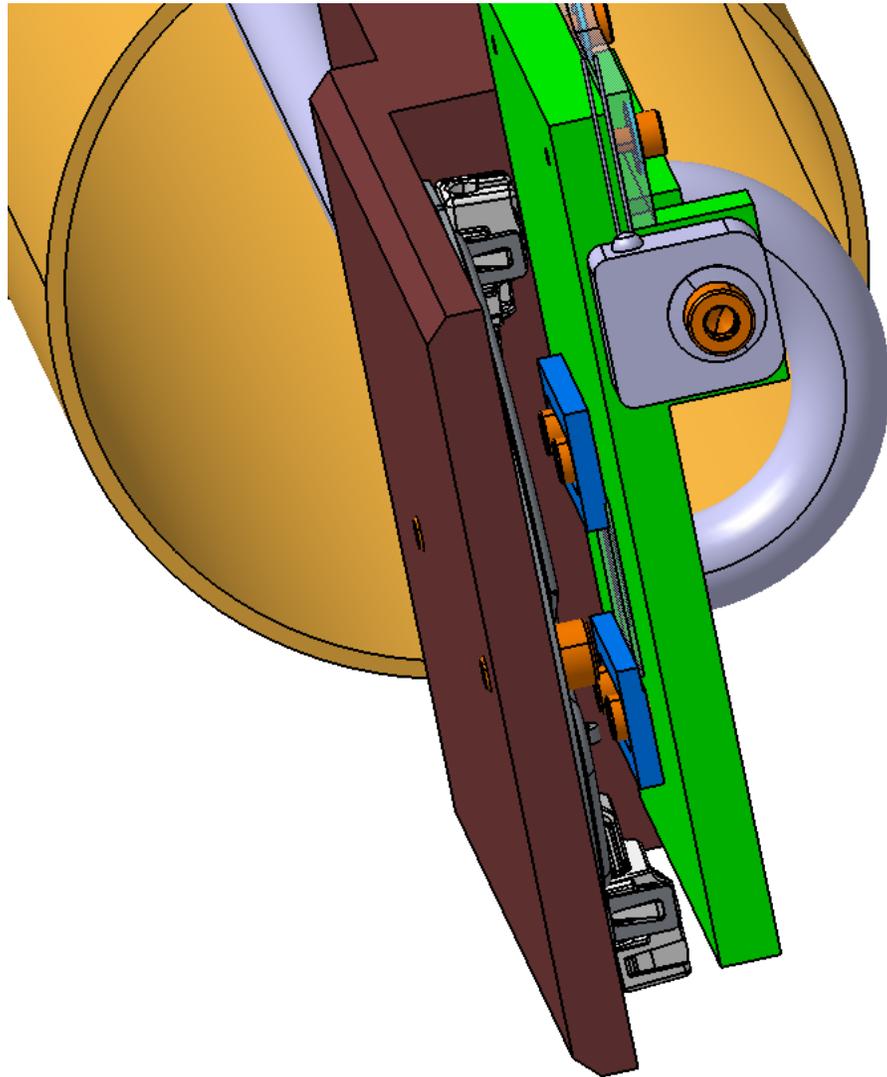
Un connecteur (LED)  
2 tubes (circuit d'eau)  
Etanchéité : raccord double bague

# Configuration chauffage

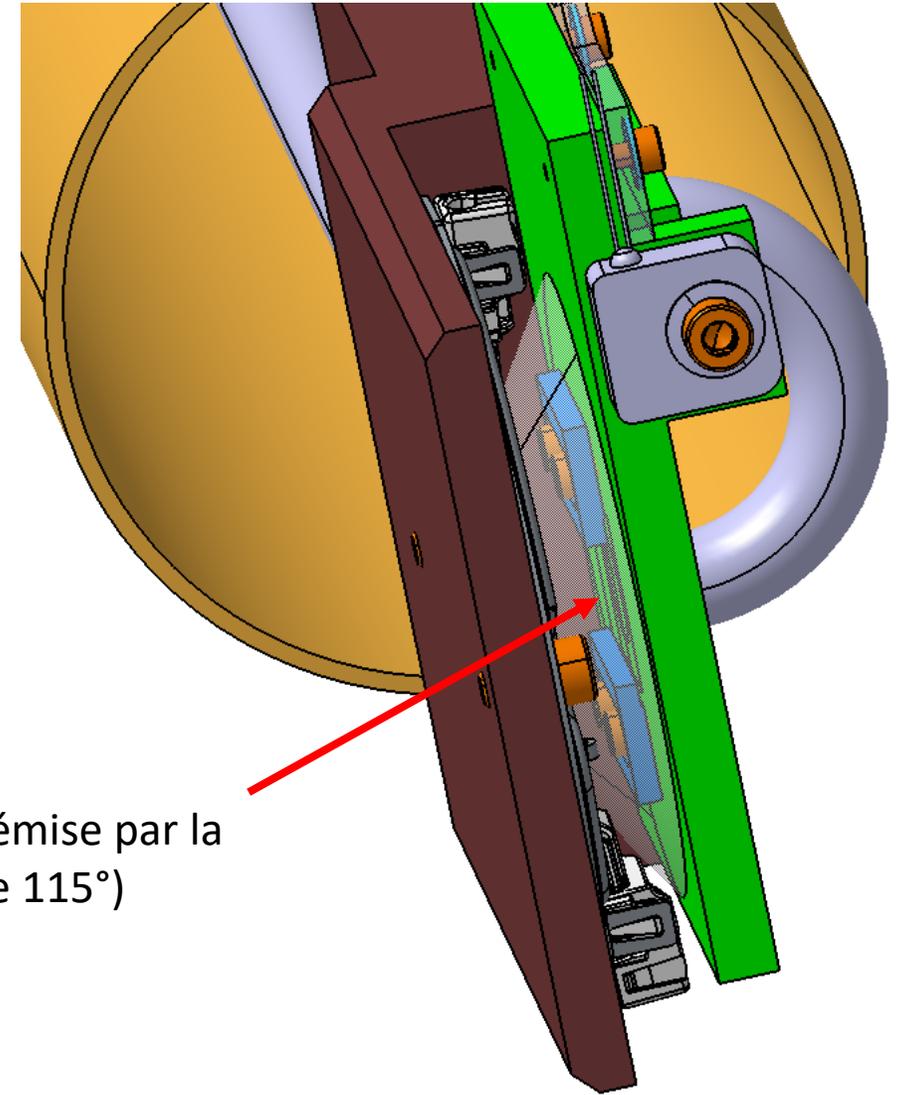


Bras avancé  
LED en face de l'échantillon  
LED allumée

# La LED : position



*LED éteinte*

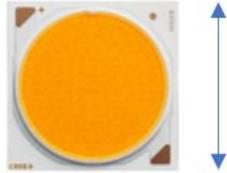


Lumière émise par la  
LED (cône 115°)

*LED allumée*

# La LED

Cree® XLamp® CXB3590 LED



35mm



Pour les calculs j'ai utilisé une LED  
**CXB3590-000-000N0BDB40E**

Point de fonctionnement

V=35,7V

I=2,4A

T<sub>j</sub>=85°C

Dans ces conditions, on a un **flux lumineux de 12350lm**

Selon Wikipédia : 1lm = >  $\frac{1}{683} W$



**Puissance lumineuse : 18W**



*Calcul approximatif car la  
longueur d'onde et la perception  
humaine interviennent*

# Bilan thermique lors du chauffage (300K -> 700K)

## Apport

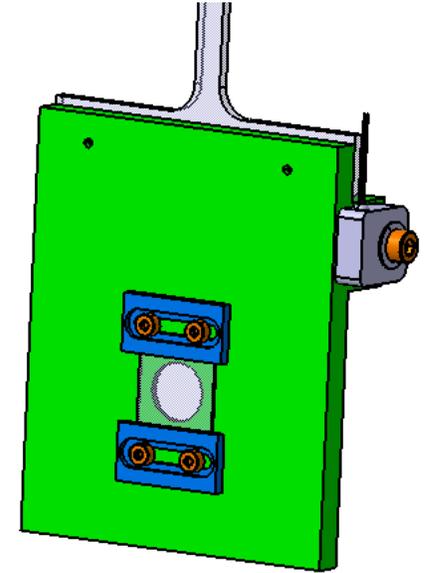
*Rayonnement* : LED 18W

## Pertes

*Convection* : 0W (on est dans le vide)

*Rayonnement* : la pièce (verte) est à 700K dans le pire des cas

*Conduction* : via la pièce en saphir



## La pièce

*matériau* : cuivre doré

*Surface* : 0,011 m<sup>2</sup>

*Volume* : 2,3.10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>

*Masse* : 0,206 kg

## Propriétés du cuivre doré

*Masse volumique* (cuivre) : 8,96 T/m<sup>3</sup>

*Emissivité* (Au @700K) : 0,03

# Bilan thermique : perte par rayonnement

## Loi de Stefan-Boltzmann

$$E_R = \sigma \cdot e \cdot S \cdot T^4$$

Avec

S : surface en m<sup>2</sup>

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

e : émissivité du matériau

T : température de la surface en K

## Dans notre cas :

$$E_R = \sigma \cdot e \cdot S \cdot T^4$$

Avec

$$S = 0,011 \text{ m}^2$$

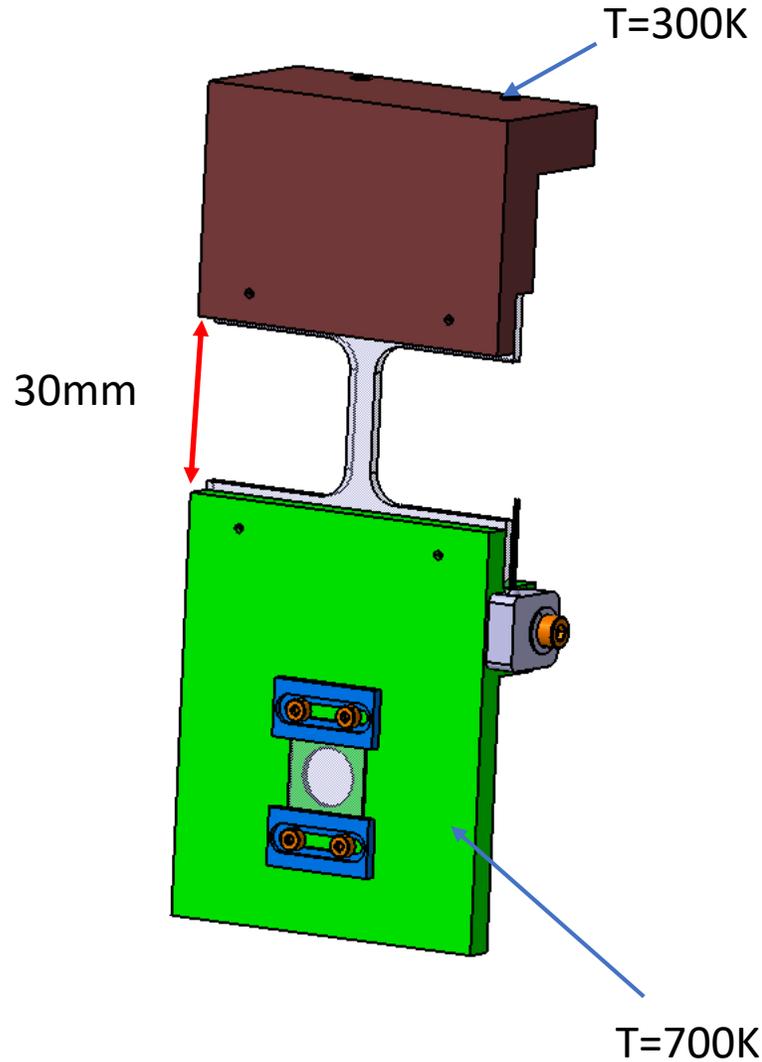
$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

$$e = 0,03$$

$$T = 700 \text{ K}$$

$$E_R = 4,5 \text{ W}$$

# Bilan thermique : perte par conduction



Matériau : saphir  
Section :  $2 \times 5 = 10 \text{ mm}^2$  ( $0,000010 \text{ m}^2$ )  
Longueur : 30mm (0,03m)  
Conductivité thermique saphir (@300K) :  $40 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$$\text{Flux thermique : } \Phi = \frac{\lambda \cdot S}{L} \cdot (T_c - T_f)$$

$$\text{Flux thermique : } \Phi = \frac{40 \times 0,000010}{0,03} \cdot (700 - 300) = 5,3 \text{ W}$$

# Bilan thermique lors du chauffage (300K -> 700K)

## Apport

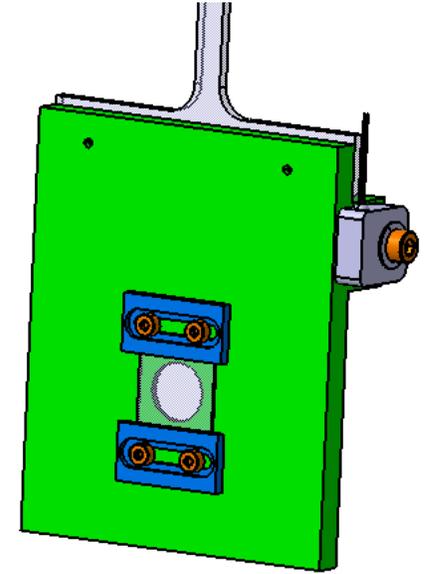
*Rayonnement* : LED 18W

## Pertes

*Convection* : 0W (on est dans le vide)  
*Rayonnement* (pièce verte à 700K) : 4,5W  
*Conduction* (via la pièce en saphir): 5,3 W

## Bilan

On a **8,2 W** de disponible pour chauffer



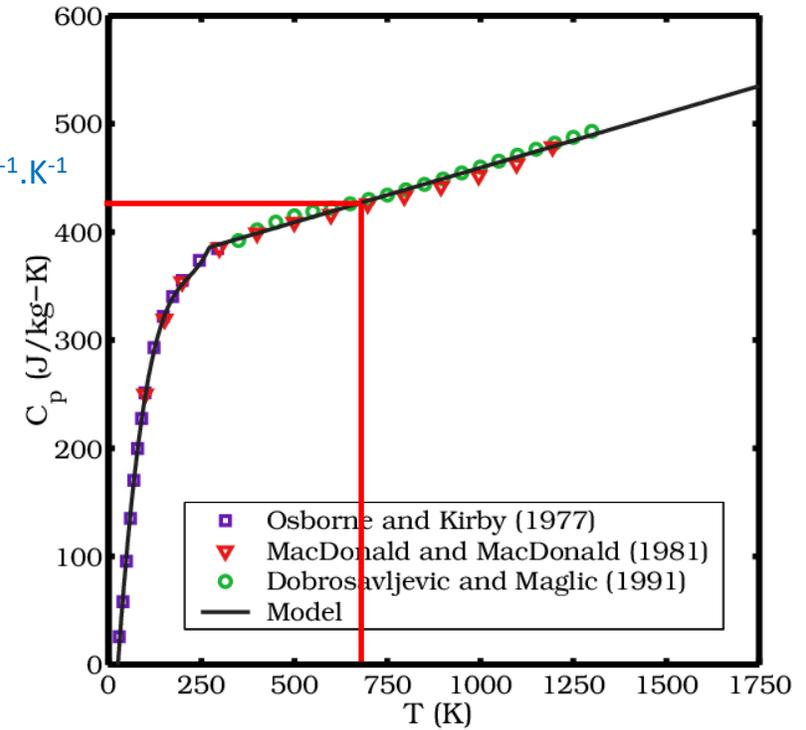
## La pièce

*matériau* : cuivre doré  
*Surface* : 0,011 m<sup>2</sup>  
*Volume* :  $2,3 \cdot 10^{-5}$  m<sup>3</sup>  
*Masse* : 0,206 kg

# Bilan chauffage (300K -> 700K) : estimation du temps

Masse de la pièce en cuivre : 0,2kg  
Variation de température : 400K

$C_p$  (@700K) = 410 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>



Capacité calorifique du cuivre vs température  
Source : [arXiv:cond-mat/0512466v1](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0512466v1)

On chauffe avec 8,2W

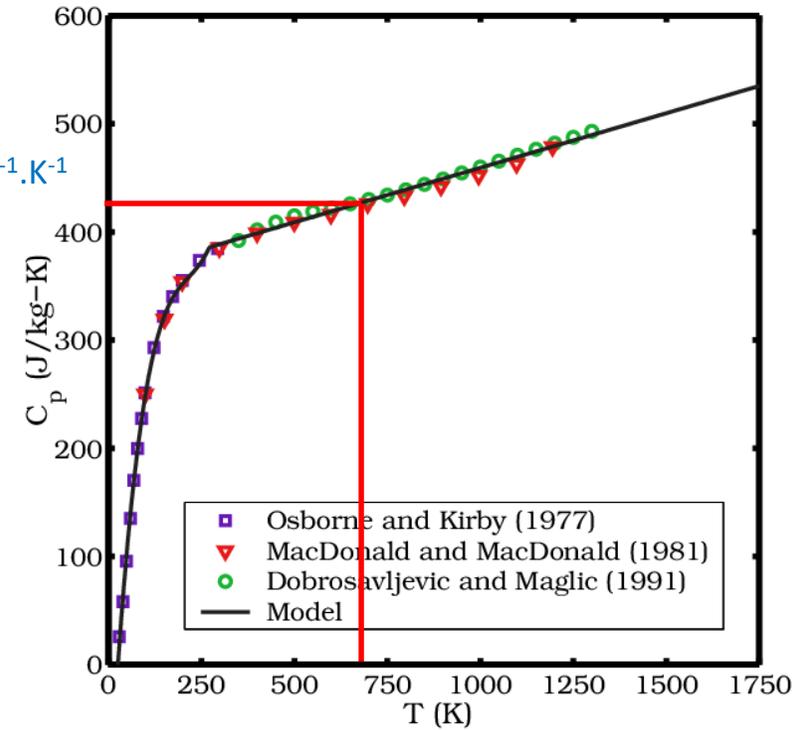
# Bilan chauffage (300K -> 700K) : estimation du temps

Masse de la pièce en cuivre : 0,2kg  
Variation de température : 400K

$C_p$  (@700K) = 410 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

Energie nécessaire pour chauffer la pièce :  
 $E = 410 \times 0,2 \times 400 = \mathbf{32800 \text{ Joules}}$

On chauffe avec 8,2W  
Et par def 1W=1 J.s<sup>-1</sup>



Capacité calorifique du cuivre vs température  
Source : [arXiv:cond-mat/0512466v1](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0512466v1)

# Bilan chauffage (300K -> 700K) : estimation du temps

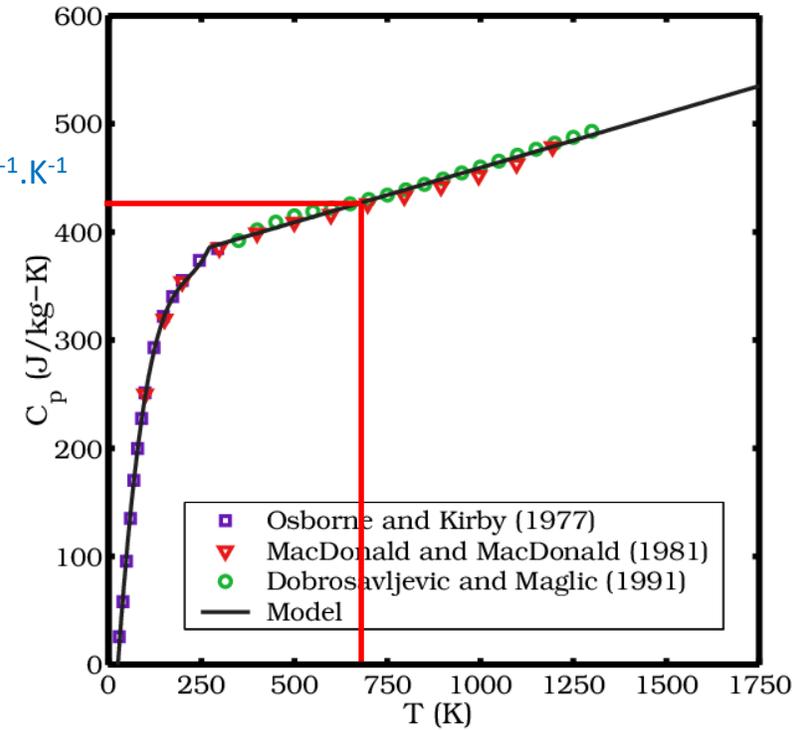
Masse de la pièce en cuivre : 0,2kg  
Variation de température : 400K

$C_p$  (@700K) = 410 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

**Energie** nécessaire pour chauffer la pièce :  
 $E = 410 \times 0,2 \times 400 = \mathbf{32800 \text{ Joules}}$

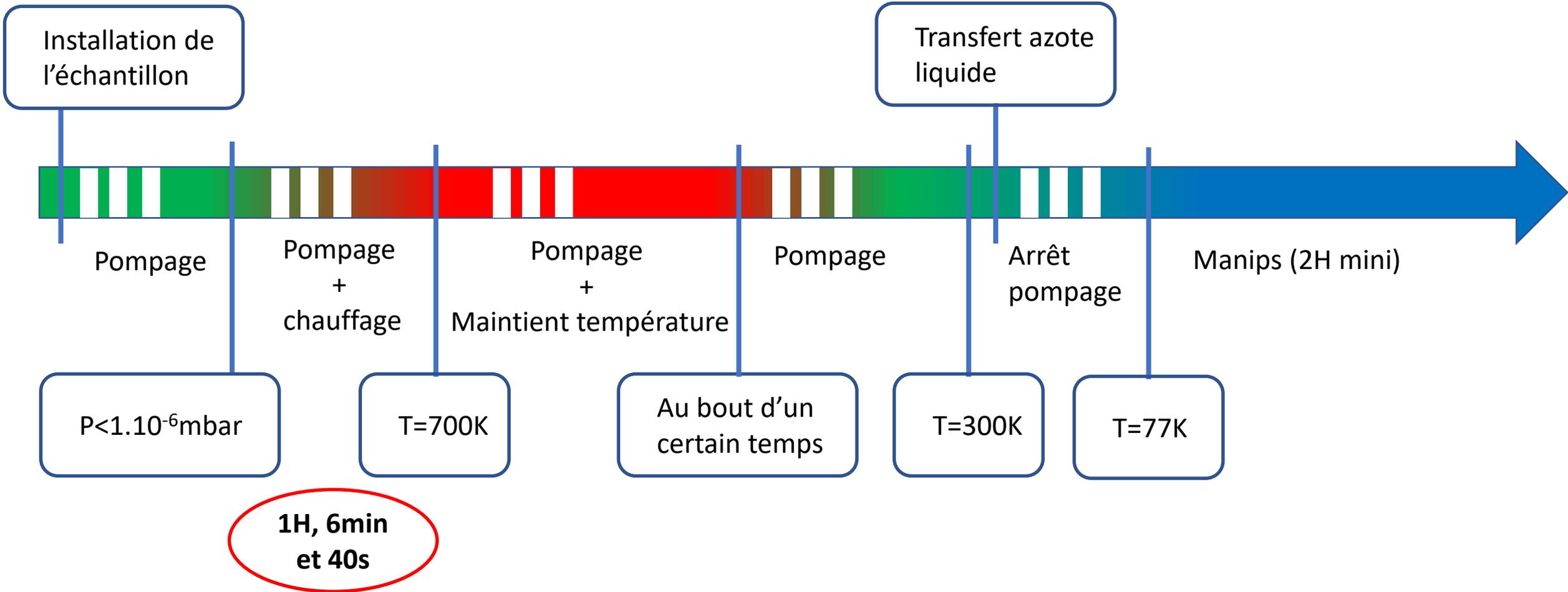
**On chauffe avec 8,2W**  
Et par def  $1W=1 \text{ J.s}^{-1}$

**Temps pour atteindre 700K**  
 $32800 / 8,2 = 4000 \text{ s}$  soit **1 H 6 min et 40 s**

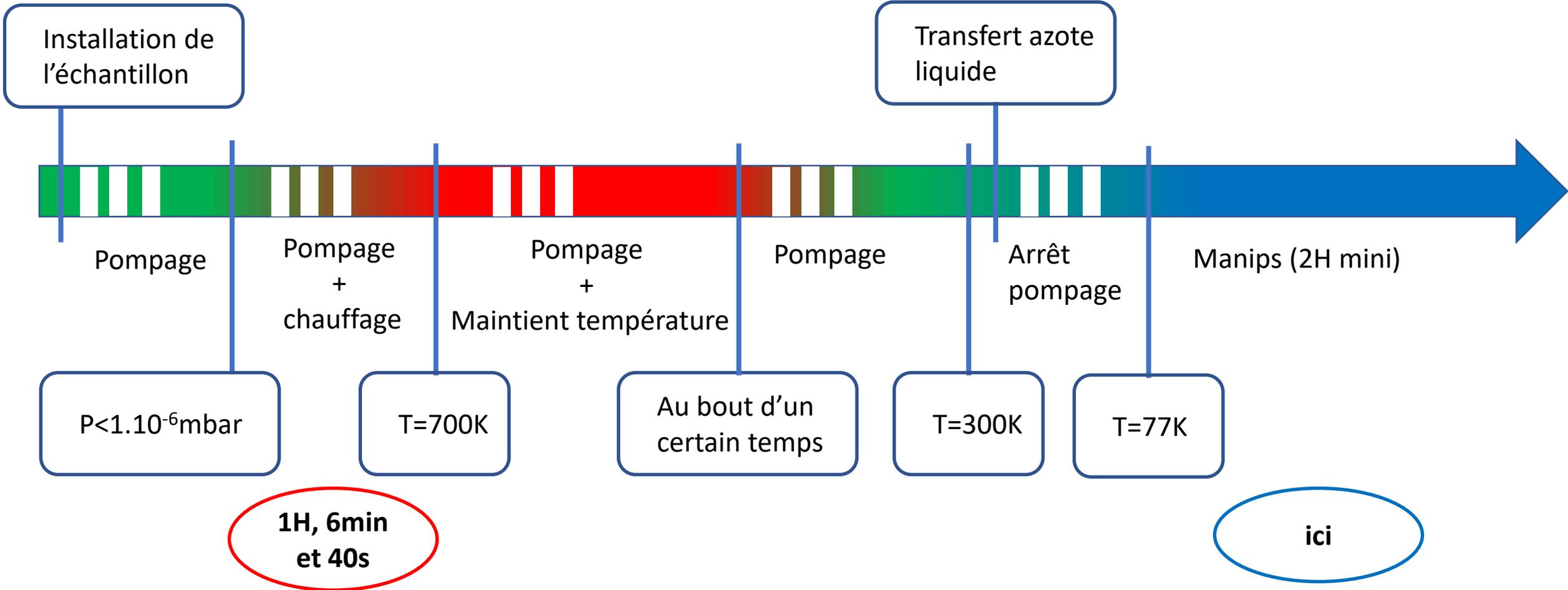


Capacité calorifique du cuivre vs température  
Source : [arXiv:cond-mat/0512466v1](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0512466v1)

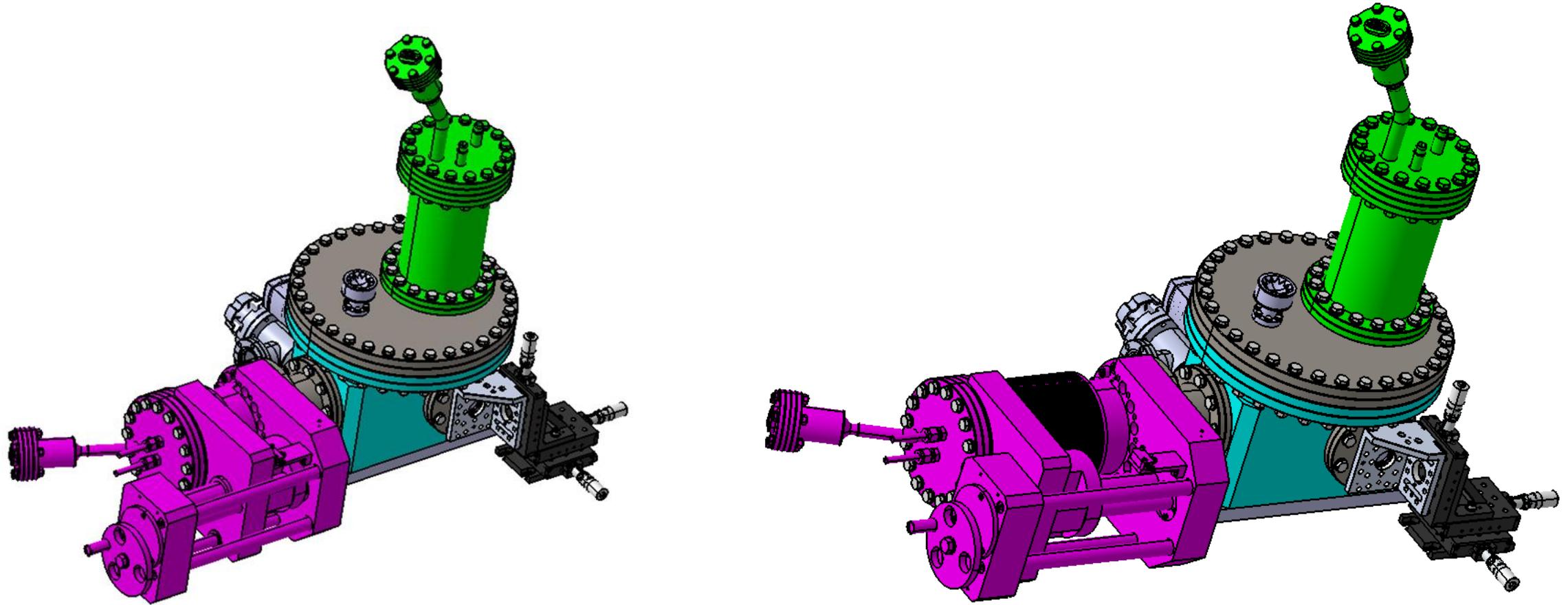
# Le déroulement de la manip



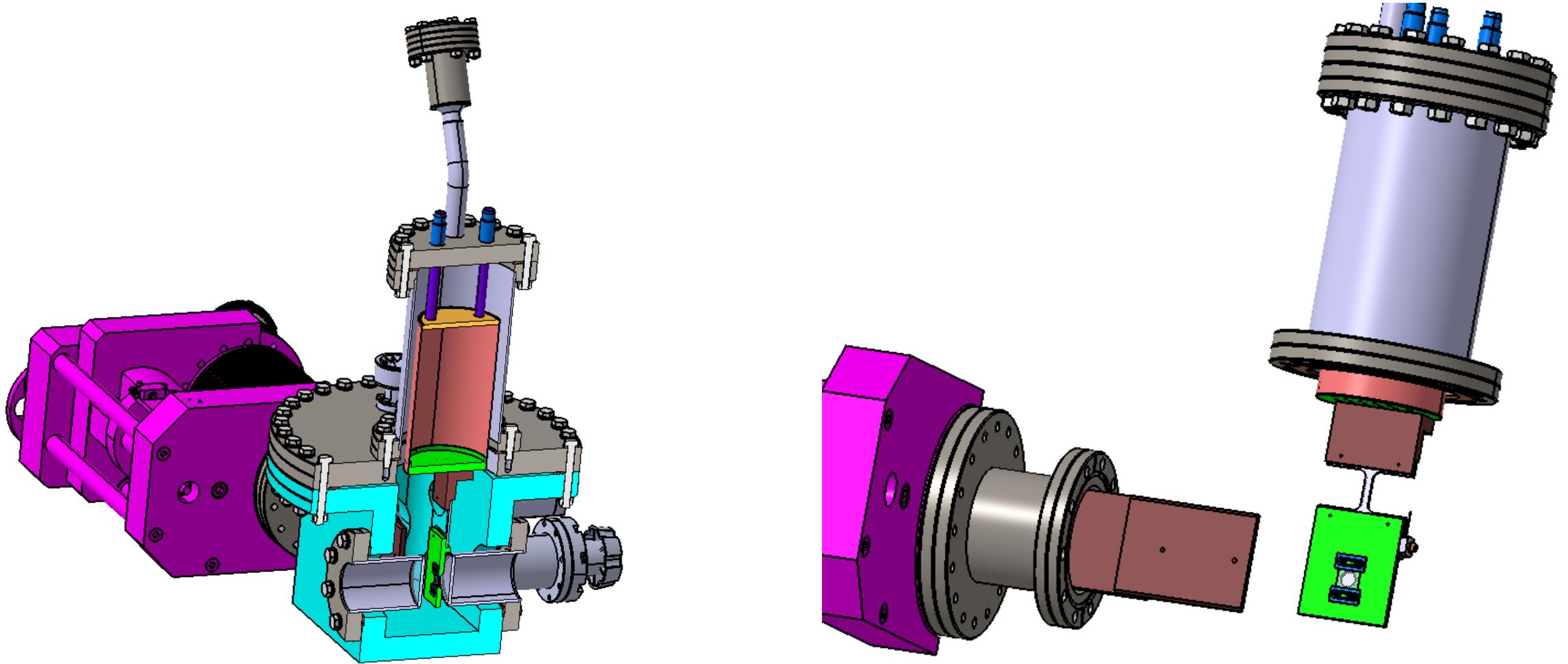
# Le déroulement de la manip



# Configuration mesure



# Configuration mesure



## Quand on est à 77K

### Données azote liquide

Chaleur latente de vaporisation :  $198,38 \text{ kJ.kg}^{-1}$  (T=77K et P=1atm)

Masse volumique :  $809 \text{ kg.m}^{-3}$  (0,8 kg.L<sup>-1</sup>)

### réservoir azote liquide

Cylindre : diamètre 82mm, hauteur 144,2mm

Volume : 0,76 L

Autonomie souhaitée 2H (7200s)

par def  $1W=1 \text{ J.s}^{-1}$

## Quand on est à 77K

### Données azote liquide

Chaleur latente de vaporisation :  $198,38 \text{ kJ.kg}^{-1}$  ( $T=77\text{K}$  et  $P=1\text{atm}$ )

Masse volumique :  $809 \text{ kg.m}^{-3}$  ( $0,8 \text{ kg.L}^{-1}$ )

### réservoir azote liquide

Cylindre : diamètre 82mm, hauteur 144,2mm

Volume : 0,76 L

### Masse azote liquide (réservoir plein)

$0,76 \times 0,8 = 0,61 \text{ kg}$

### Energie nécessaire pour évaporer tout l'azote

$198 \times 0,61 = 120,8 \text{ kJ}$

Autonomie souhaitée 2H (7200s)

par def  $1\text{W}=1 \text{ J.s}^{-1}$

# Quand on est à 77K

**Données azote liquide**  
Chaleur latente de vaporisation :  $198,38 \text{ kJ.kg}^{-1}$  (T=77K et P=1atm)  
Masse volumique :  $809 \text{ kg.m}^{-3}$  (0,8 kg.L<sup>-1</sup>)

**réservoir azote liquide**  
Cylindre : diamètre 82mm, hauteur 144,2mm  
Volume : 0,76 L

**Masse azote liquide (réservoir plein)**  
 $0,76 \times 0,8 = 0,61 \text{ kg}$

**Energie nécessaire pour évaporer tout l'azote**  
 $198 \times 0,61 = 120,8 \text{ kJ}$

**Autonomie souhaitée 2H (7200s)**

par def  $1W=1 \text{ J.s}^{-1}$

**Pour notre autonomie ça fait une puissance admissible**  
 $120800 / 7200 = 16,9W$

# Bilan thermique lorsque l'on est à 77K

## **Pertes**

*Convection* : 0W (on est dans le vide)

*Rayonnement* : sur le réservoir et sur le support échantillon

*Conduction* : via les tubes

# Bilan thermique : rayonnement sur le réservoir

L'énergie rayonnée entre deux surfaces de températures  $T_1$  et  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ) s'écrit :

$$W_R = \sigma E A_1 (T_2^4 - T_1^4) \quad (2-2)$$

$A_1$  : aire en  $\text{cm}^2$  de la surface qui reçoit l'énergie à la température  $T_1$ .

$E$  : facteur qui tient compte des pouvoirs émissifs  $e_1$  et  $e_2$  des surfaces aux températures  $T_1$  et  $T_2$ .

$W_R$  : énergie rayonnée exprimée en watts.

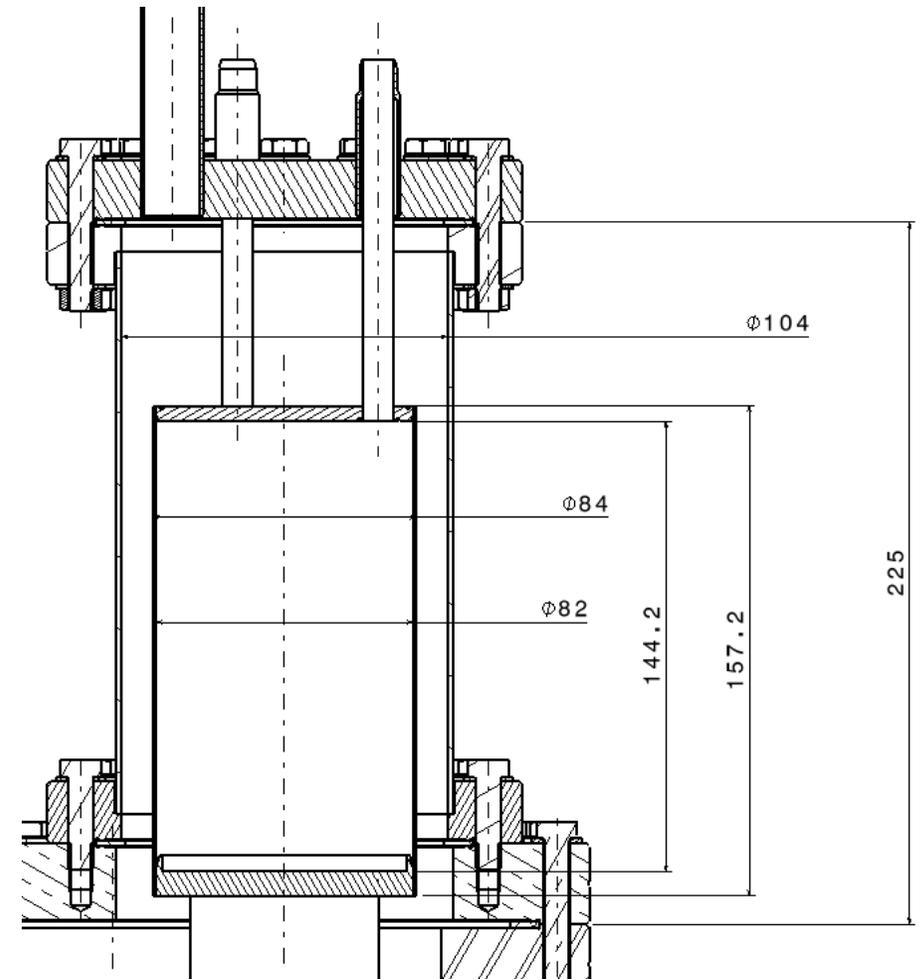
$e$  : pouvoir émissif de la surface  $A$ .

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann :  $5,67 \cdot 10^{-12} \text{W.cm}^{-2} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$ .

$T$  : température en  $^\circ\text{K}$ .

Tableau II-1. — VALEURS DE  $E$  EN FONCTION DES POUVOIRS ÉMISSIFS  $e_1$  ET  $e_2$  DES SURFACES  $A_1$  ET  $A_2$  AUX TEMPÉRATURES  $T_1$  ET  $T_2$  ( $T_1 < T_2$ ) <sup>(3)</sup>

	Réflexion spéculaire	Réflexion diffuse
Plaques parallèles. . . . .	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2)e_1}$	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2)e_1}$
Longs cylindres coaxiaux $L \gg R$ . . . . .	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2)e_1}$	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + \frac{A_1}{A_2}(1 - e_2)e_1}$
Sphères concentriques. . . . .	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2)e_1}$	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + \frac{A_1}{A_2}(1 - e_2)e_1}$



Source :  
éléments de cryogénie (R. R. conte)



# Bilan thermique : rayonnement sur le support échantillon

L'énergie rayonnée entre deux surfaces de températures  $T_1$  et  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ ) s'écrit :

$$W_R = \sigma E A_1 (T_2^4 - T_1^4) \quad (2-2)$$

$A_1$  : aire en  $\text{cm}^2$  de la surface qui reçoit l'énergie à la température  $T_1$ .

$E$  : facteur qui tient compte des pouvoirs émissifs  $e_1$  et  $e_2$  des surfaces aux températures  $T_1$  et  $T_2$ .

$W_R$  : énergie rayonnée exprimée en watts.

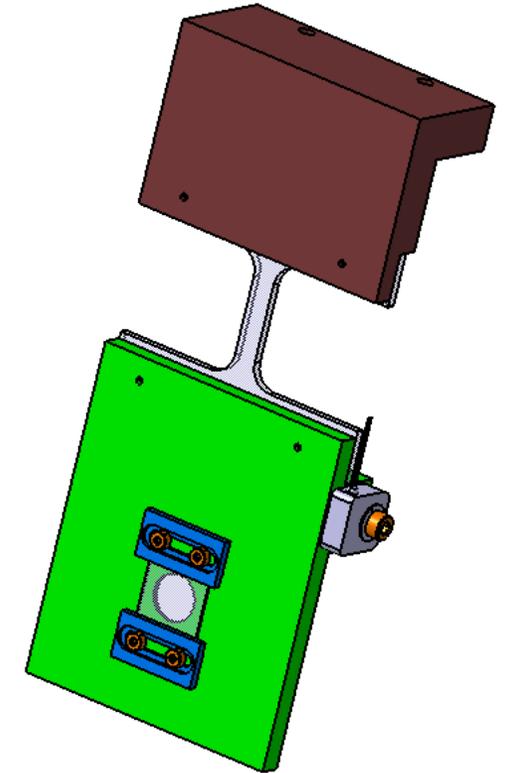
$e$  : pouvoir émissif de la surface  $A$ .

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann :  $5,67 \cdot 10^{-12} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ .

$T$  : température en  $^\circ\text{K}$ .

Tableau II-1. — VALEURS DE  $E$  EN FONCTION DES POUVOIRS ÉMISSIFS  $e_1$  ET  $e_2$  DES SURFACES  $A_1$  ET  $A_2$  AUX TEMPÉRATURES  $T_1$  ET  $T_2$  ( $T_1 < T_2$ ) <sup>(3)</sup>

	Réflexion spéculaire	Réflexion diffuse
Plaques parallèles. . . . .	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2)e_1}$	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2)e_1}$
Longs cylindres coaxiaux $L \gg R$ . . . . .	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2)e_1}$	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + \frac{A_1}{A_2}(1 - e_2)e_1}$
Sphères concentriques. . . . .	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + (1 - e_2)e_1}$	$\frac{e_1 e_2}{e_2 + \frac{A_1}{A_2}(1 - e_2)e_1}$

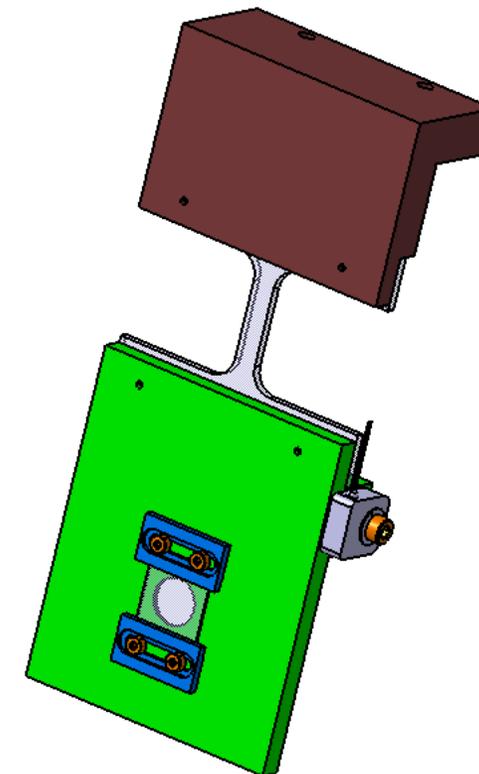


Source :  
éléments de cryogénie (R. R. conte)

# Bilan thermique : rayonnement sur le support échantillon

4	emissivite cuivre dore (a 1 (K))	0,029		e l				
5	constante de Stefan-Boltzmann	5,67E-12	W/cm2K					
6								
L'	<b>pour la pièce verte</b>							
8	hauteur	72 mm	7,2 cm	0,072 m				
9	largeur	60 mm	6 cm	0,06 m				
10	épaisseur	5 mm	0,5 cm	0,005 m				
11	surface pour fenetre	4320 mm2	43,2 cm2	0,00432 m2				
12	surface pour coté	360 mm2	3,6 cm2	0,00036 m2				
Ai								
E								
15	<b>rayonnement avec les fenetres</b>				<b>rayonnement avec les cotés</b>			
16	<b>datas doigt froid</b>				<b>datas doigt froid</b>			
17	surface	4320 mm2	43,2 cm2	0,00432 m2	surface	360 mm2	3,6 cm2	0,00036 m2
18	température (T1)	77 K			température (T1)	77 K		
19								
20	<b>data fenetre</b>				<b>data enceinte extérieure</b>			
21	diamètre	0,0508 m	50,8 mm	5,08 cm	largeur	0,1 m	100 mm	10 cm
22	surface	0,002027 m2	2026,83 mm2	20,2683 cm2	hauteur	0,16 m	160 mm	16 cm
23	température (T2)	300 K			surface	0,016 m2	16000 mm2	160 cm2
24					température (T2)	300 K		
25	Calcul de E (cas plaques parallèles)	0,025			Calcul de E (cas plaques parallèles)	0,021898		
27	énergie reçue	0,049386 W			énergie reçue	0,003605 W		
28					il y a 2 cotés	0,00721 W		
29	il y a 2 faces en regard des fenetres	0,098772 W						
30								
31								
32								
33								
34	<b>total rayonnement sur la pièce verte</b>		<b>0,10598 W</b>					
35								
36								
37	<b>pour la pièce en saphir</b>							
38	hauteur visible	30 mm	3 cm	0,03 m				
39	largeur	5 mm	0,5 cm	0,005 m				
40	épaisseur	2 mm	0,2 cm	0,002 m				
41	surface coté fenetre	150 mm2	1,5 cm2	0,00015 m2				
42	surface pour coté	60 mm2	0,6 cm2	0,00006 m2				
43								
44								
45	<b>rayonnement grandes faces</b>				<b>rayonnement avec les cotés</b>			
46	<b>datas doigt froid</b>				<b>datas doigt froid</b>			
47	surface	150 mm2	1,5 cm2	0,00015 m2	surface	60 mm2	0,6 cm2	0,00006 m2
48	température (T1)	77 K			température (T1)	77 K		
49								
50	<b>data enceinte extérieure</b>				<b>data enceinte extérieure</b>			
51	largeur	0,2 m	200 mm	20 cm	largeur	0,1 m	100 mm	10 cm
52	hauteur	0,16 m	160 mm	16 cm				
53	surface	0,032 m2	32000 mm2	3200 cm2				
54	température (T2)	300 K						
55	Calcul de E (cas plaques parallèles)	0,15						
56								

**Pertes rayonnement sur le support échantillon : 0,18 W**



source :  
Thermogénie (R. R. conte)

# Bilan thermique : conduction via les tubes

La puissance thermique transportée le long d'un conducteur de section  $A$ , de longueur  $L$ , soumis à une différence de température ( $T_2 - T_1$ ) est donnée par la relation de Fourier (équation 2-20) :

$$W_{ex} = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} K_{(T)} dT \quad (2-20)$$

- $W$  : puissance transmise en watts.
- $A$  : section droite en  $\text{cm}^2$ .
- $L$  : longueur en cm.

Source : éléments de cryogénie (R. R. conte)

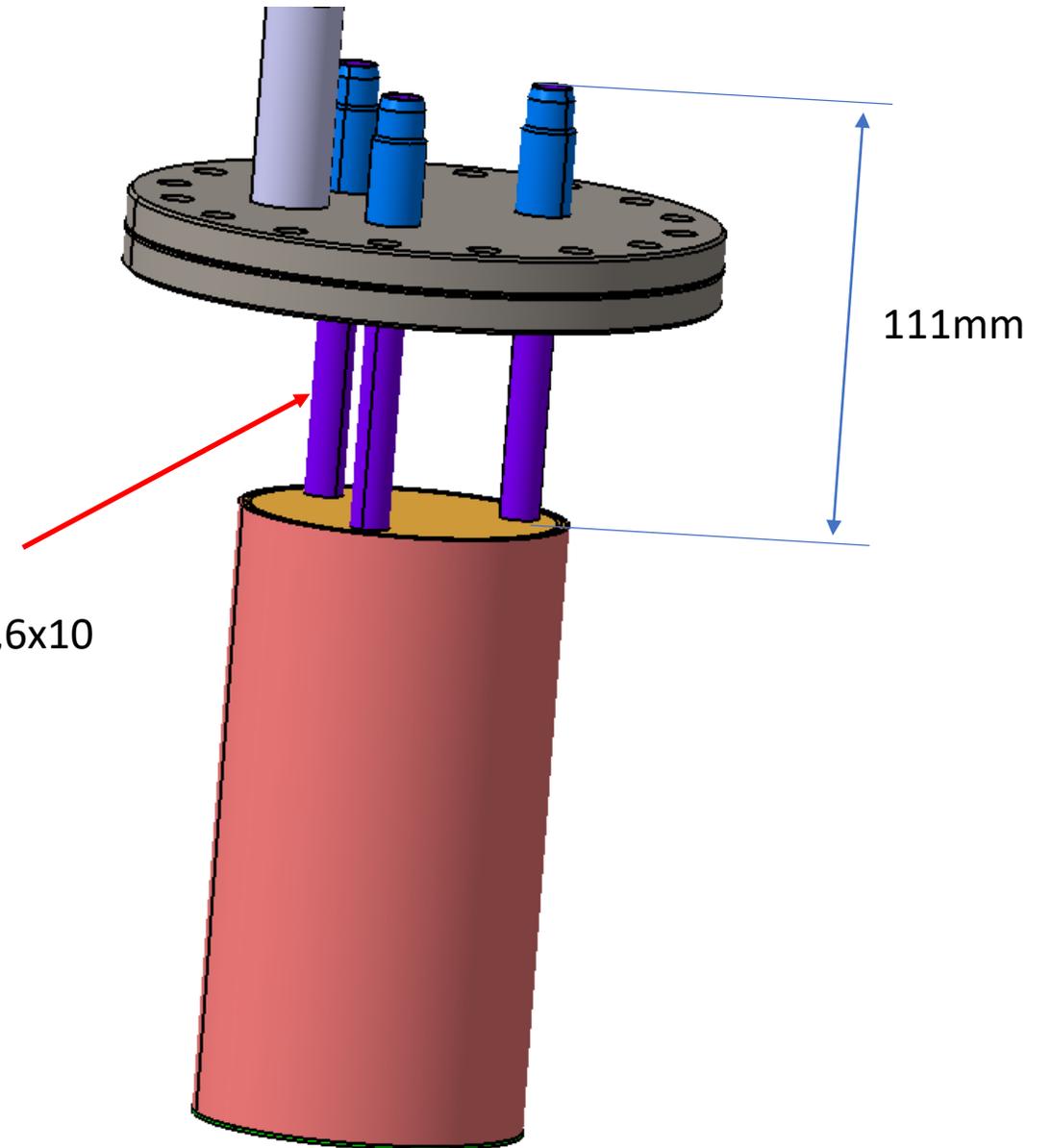
*Intégrales de la conductibilité thermique*  
 $\int_{T_1}^{T_2} K_{(T)} dT \quad (T_1 = 4^\circ\text{K})$

T. (°K)	Watts /cm							Milliwatts /cm			T. (°K)
	Monel (recuit)	Monel (écroui)	Inconel (recuit)	Inconel (écroui)	Cui- vre OFHC	Laiton	ZrCN 18.10	Ver- re	Te- flon	Ny- lon	
6	0,0235	0,0123	0,0133	0,00712	6,1	0,053	0,0063	2,11	1,13	0,321	6
8	0,0605	0,0329	0,0348	0,0185	14,5	0,129	0,0159	4,43	2,62	0,807	8
10	0,112	0,0629	0,0653	0,0345	25,2	0,229	0,0293	6,81	4,4	1,48	10
15	0,315	0,181	0,182	0,0975	61,4	0,594	0,0816	13,1	9,85	4,10	15
20	0,618	0,364	0,336	0,195	110	1,12	0,163	20,0	16,4	8,23	20
25	1,01	0,614	0,592	0,325	168	1,81	0,277	27,9	23,9	13,9	25
30	1,48	0,929	0,882	0,488	228	2,65	0,424	36,8	32,2	20,8	30
35	2,01	1,30	1,22	0,685	285	3,63	0,607	47,1	41,3	29,0	35
40	2,58	1,73	1,60	0,918	338	4,76	0,824	58,6	50,8	38,5	40
50	3,85	2,73	2,47	1,48	426	7,36	1,35	84,6	71,6	60,4	50
60	5,23	3,88	3,45	2,15	496	10,4	1,98	115	93,6	85,9	60
70	6,69	5,13	4,52	2,94	554	13,9	2,70	151	116	113	70
76	7,61	5,92	5,19	3,47	586	16,2	3,17	175	130	131	76
80	8,24	6,47	5,66	3,84	606	17,7	3,49	194	139	142	80
90	9,86	7,91	6,85	4,84	654	22,0	4,36	240	163	173	90
100	11,5	9,40	8,06	5,93	700	26,5	5,28	292	187	204	100
120	15,0	12,6	10,6	8,33	788	36,5	7,26	408	237	269	120
140	18,7	15,9	13,1	11,0	874	47,8	9,39	542	287	336	140
160	22,5	19,5	15,7	13,8	956	60,3	11,7	694	338	405	160
180	26,4	23,2	18,3	16,8	1040	73,8	14,1	858	390	475	180
200	30,5	27,1	21,0	19,9	1120	88,3	16,6	1 030	442	545	200
250	41,2	37,3	28,0	28,1	1320	128	23,4	1 500	572	720	250
300	52,5	48,0	35,4	36,9	1520	172	30,6	1 990	702	895	300

# Bilan thermique : conduction via les tubes

	A	B	C	D	E
pour l'inox					
integrale4-300		30,6 W/cm			
integrale4-76		3,17 W/cm			
diamètre interne tube		9,6 mm		0,96 cm	
diamètre externe tube		10 mm		1 cm	
longueur		111 mm		11,1 cm	
section droite		6,1575216 mm <sup>2</sup>		0,06157522 cm <sup>2</sup>	
puissance transmise		0,1521629 W		pour 1 tube	
puissance transmise		0,4564887 W		pour 3 tubes	

3 tubes inox 9,6x10



**Pertes conduction via les tubes : 0,5W**

# Bilan thermique lorsque l'on est à 77K

## Pertes

*Convection* : 0W (on est dans le vide)  
*Rayonnement sur le réservoir* : 1,2 W  
*Rayonnement sur le support échantillon* : 0,18 W  
*Conduction via les tubes* : 0,5 W

## Bilan

On a **1,9 W** de perte lorsque l'on est thermalisé à 77K

**Energie nécessaire pour évaporer tout l'azote**

120,8 kJ (voir slide 35)

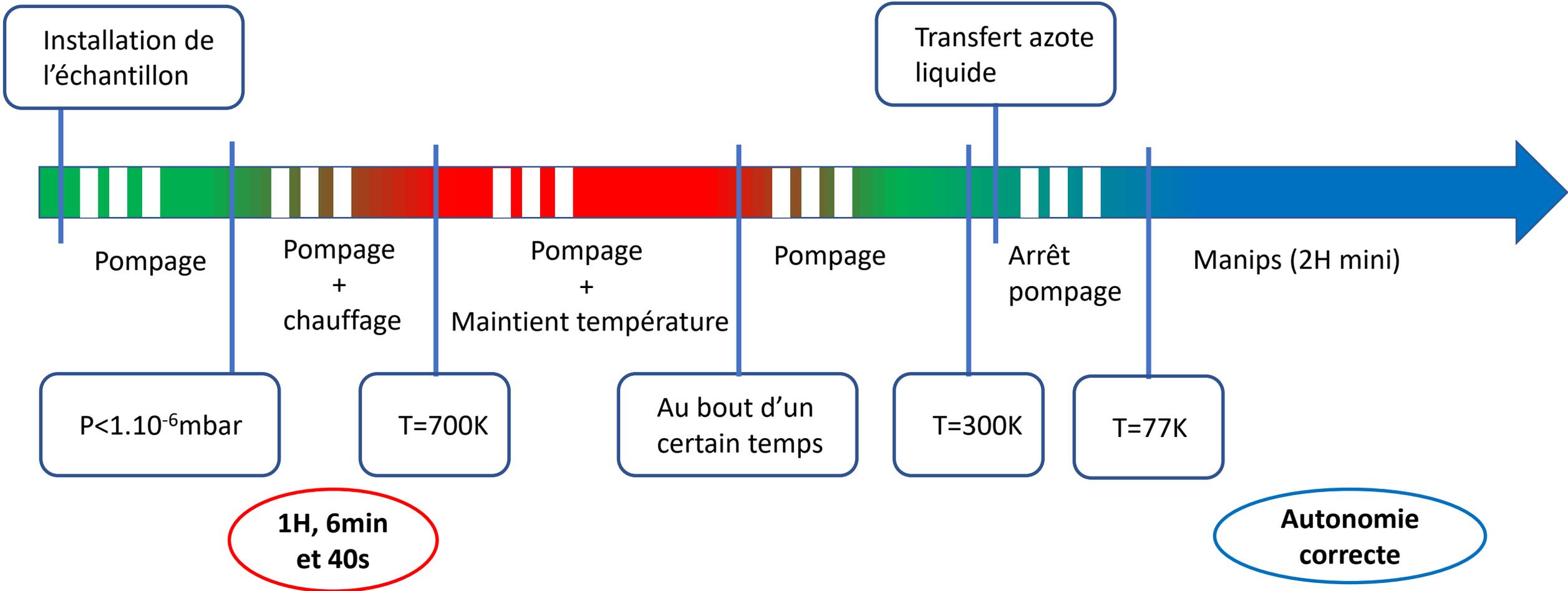
**Pour notre autonomie ça fait :**

$120800 / 1,9 = 63579$  s soit **17 H, 39 min et 39 s**

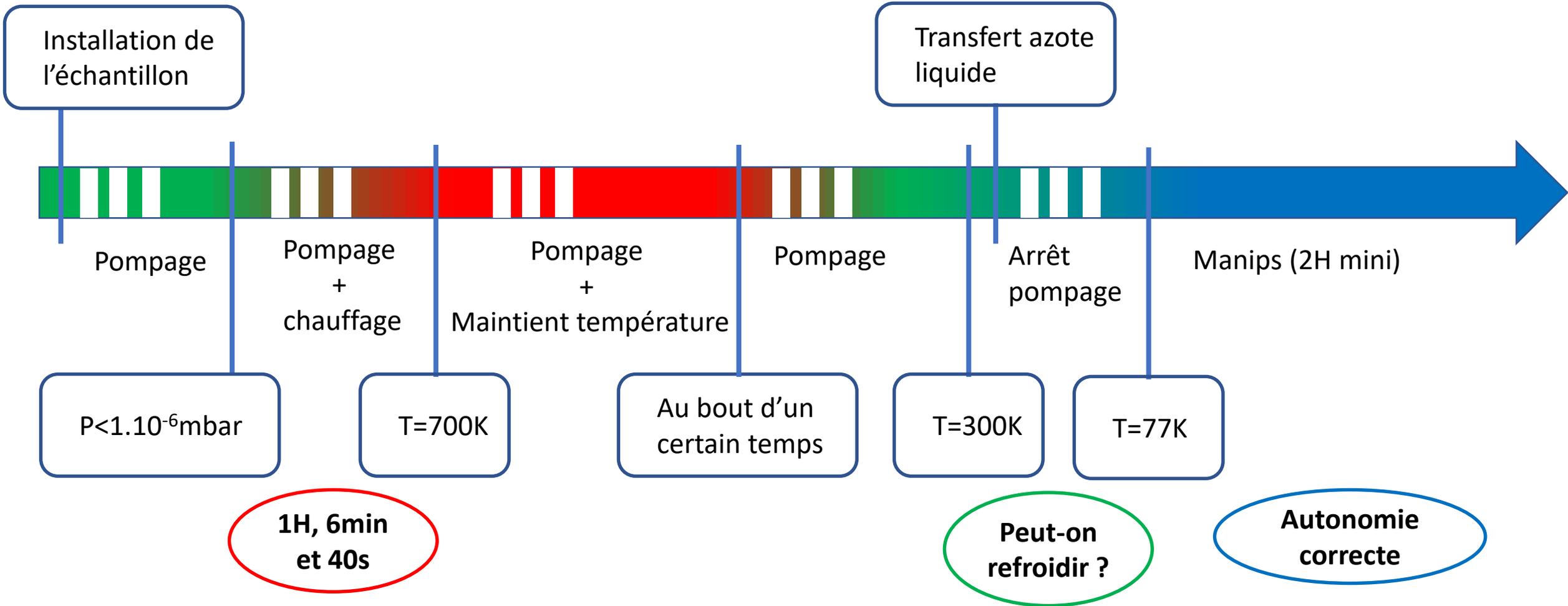


Ça ne tient pas compte de l'énergie apportée pour les mesures (laser par exemple)

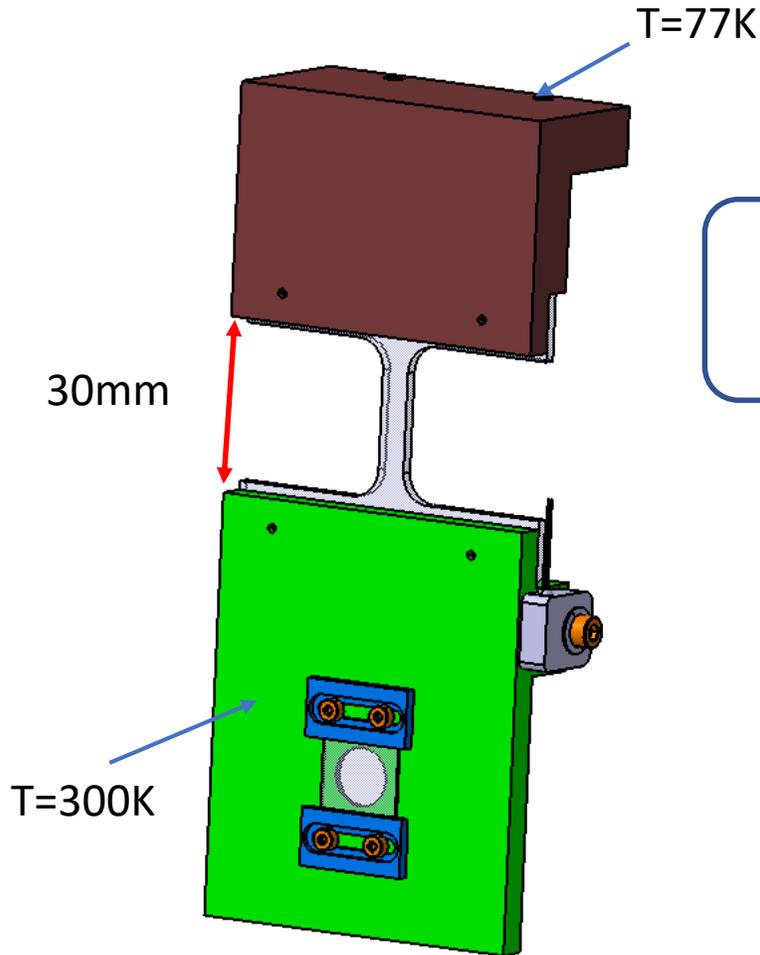
# Le déroulement de la manip



# Le déroulement de la manip



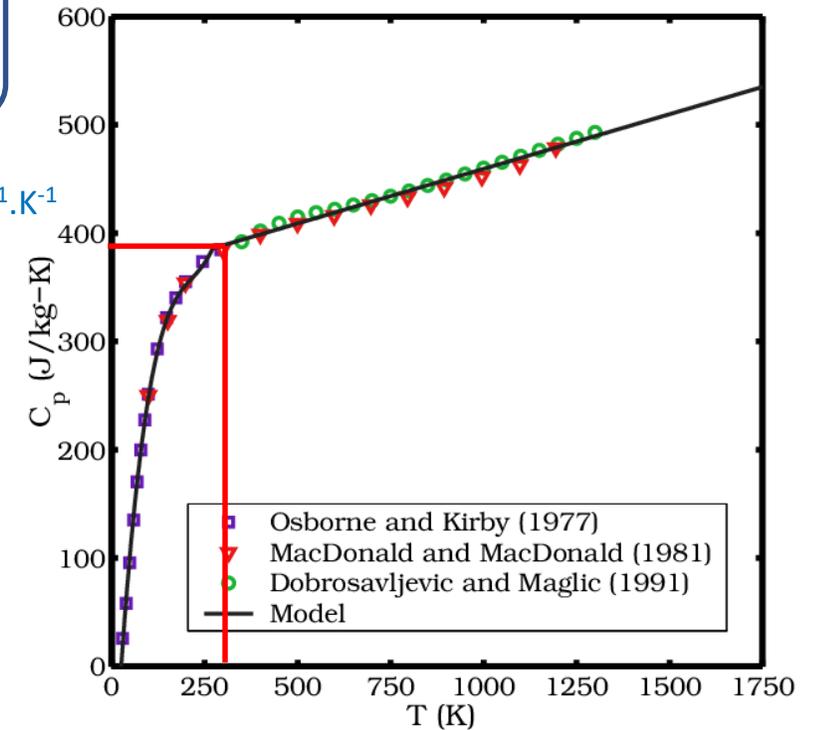
# Peut-on refroidir de 300K->77K ?



Energie à évacuer pour refroidir la pièce :  
 $E = 385 \times 0,2 \times (300 - 77) = 17171 \text{ Joules}$

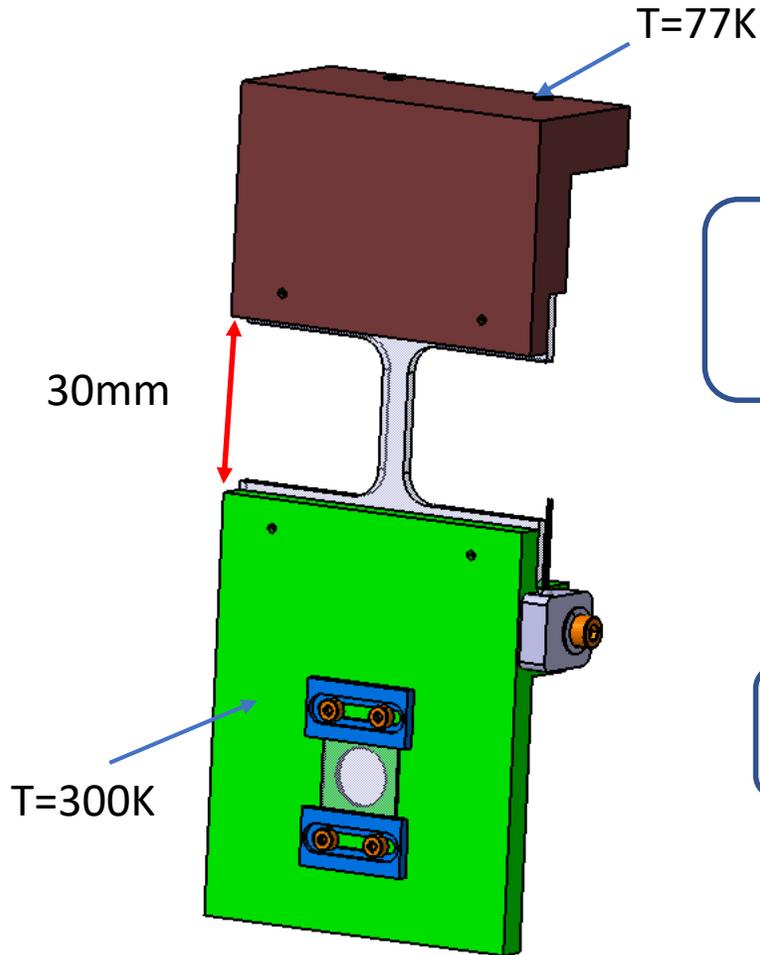
$$C_p (@300K) = 385 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

**La pièce verte**  
matériau : cuivre doré  
Surface :  $0,011 \text{ m}^2$   
Volume :  $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$   
Masse :  $0,206 \text{ kg}$



Capacité calorifique du cuivre vs température  
Source : [arXiv:cond-mat/0512466v1](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0512466v1)

# Peut-on refroidir de 300K->77K ?



Energie à évacuer pour refroidir la pièce :  
 $E = 385 \times 0,2 \times (300 - 77) = 17171 \text{ Joules}$



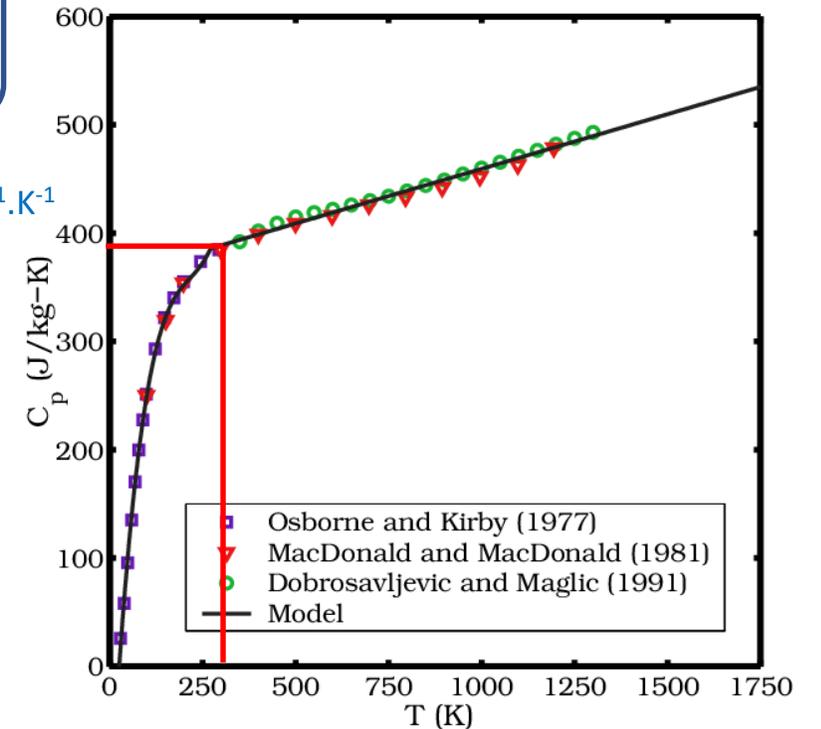
$C_p$  (@300K) = 385 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

Pour le cuivre  $C_p$  varie beaucoup en fonction de T lorsque que T diminue



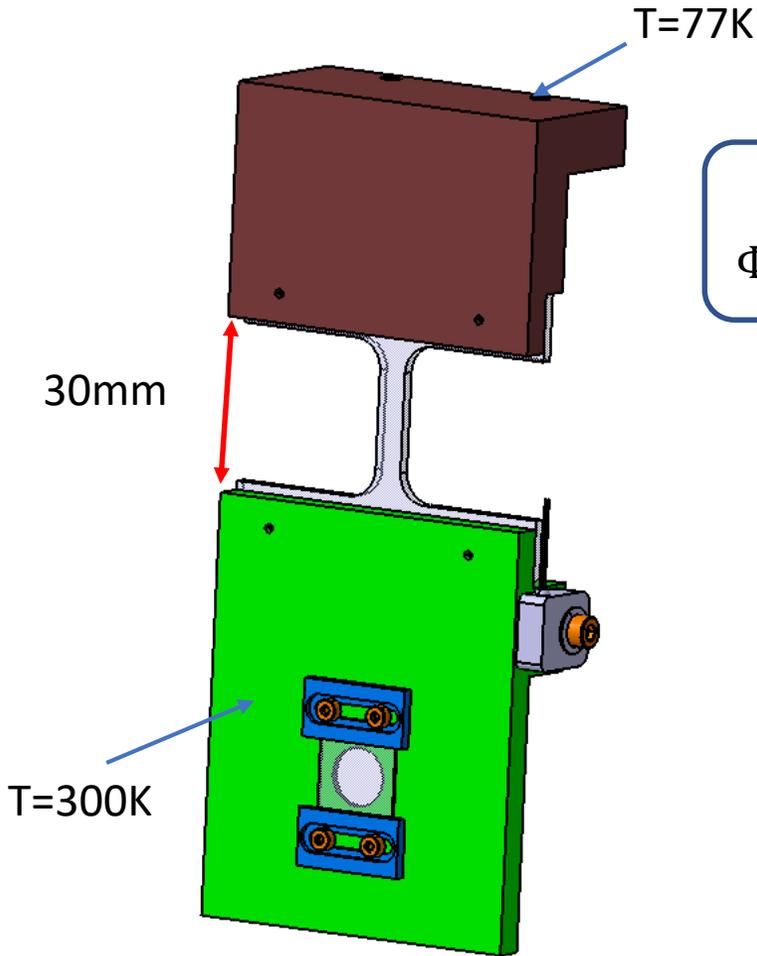
On découpe en plusieurs tronçons

**La pièce verte**  
matériau : cuivre doré  
Surface : 0,011 m<sup>2</sup>  
Volume : 2,3.10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>  
Masse : 0,206 kg



Capacité calorifique du cuivre vs température  
Source : [arXiv:cond-mat/0512466v1](https://arxiv.org/abs/cond-mat/0512466v1)

# Peut-on refroidir de 300K->77K ?

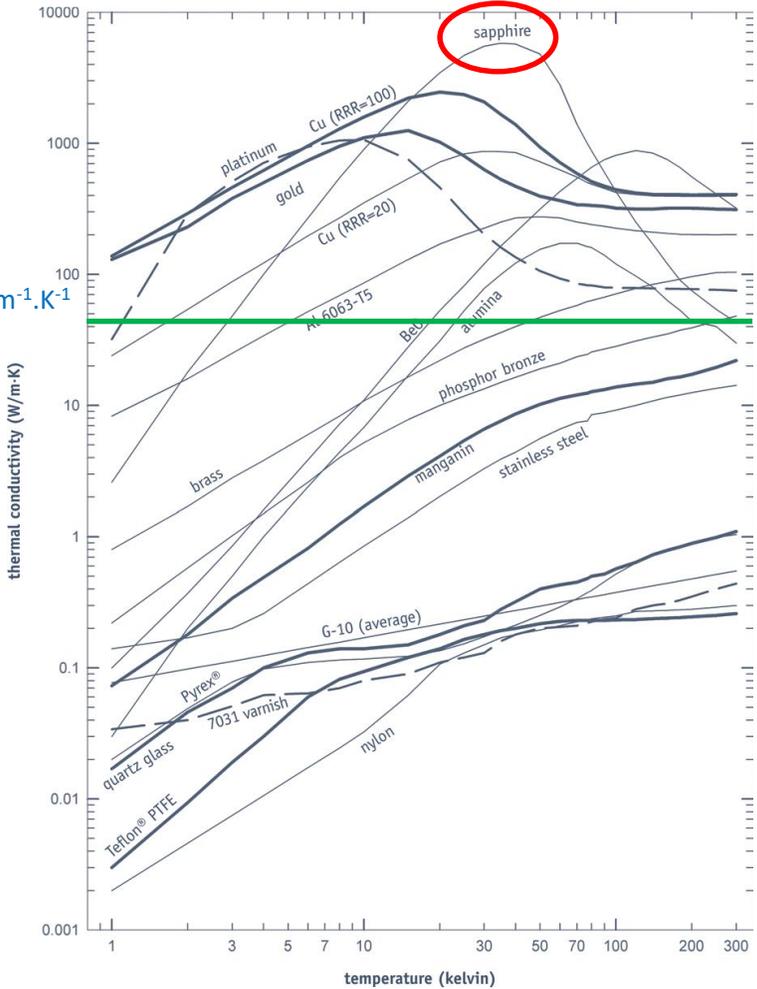


Flux thermique

$$\Phi = \frac{42 \times 0,000010}{0,03} \cdot (300 - 77) = 3,12 \text{ W}$$

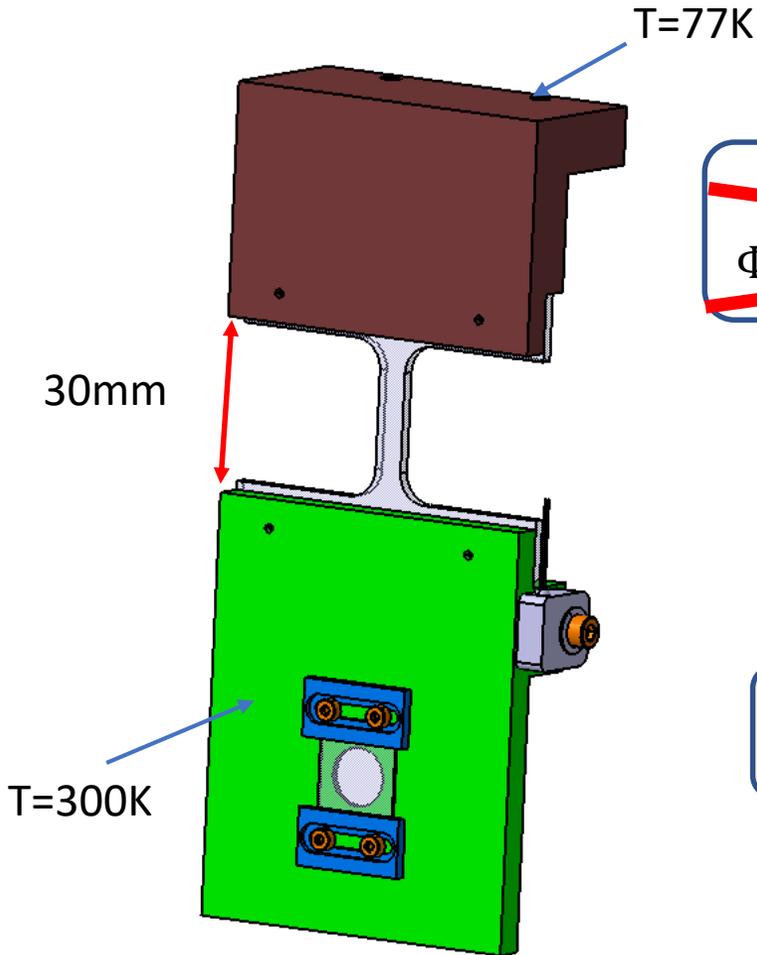
Matériau : saphir  
 Section :  $5 \times 2 = 10 \text{ mm}^2$  ( $0,000010 \text{ m}^2$ )  
 Longueur : 30mm ( $0,03 \text{ m}$ )  
 Conductivité thermique saphir (@300K) :  $42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Saphir (@300K) :  $42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$



# Peut-on refroidir de 300K->77K ?

Matériau : saphir  
 Section :  $5 \times 2 = 10 \text{ mm}^2$  ( $0,000010 \text{ m}^2$ )  
 Longueur : 30mm ( $0,03 \text{ m}$ )  
 Conductivité thermique saphir (@300K) :  $42 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$



Flux thermique

$$\Phi = \frac{42 \times 0,000010}{0,03} \cdot (300 - 77) = 3,12 \text{ W}$$

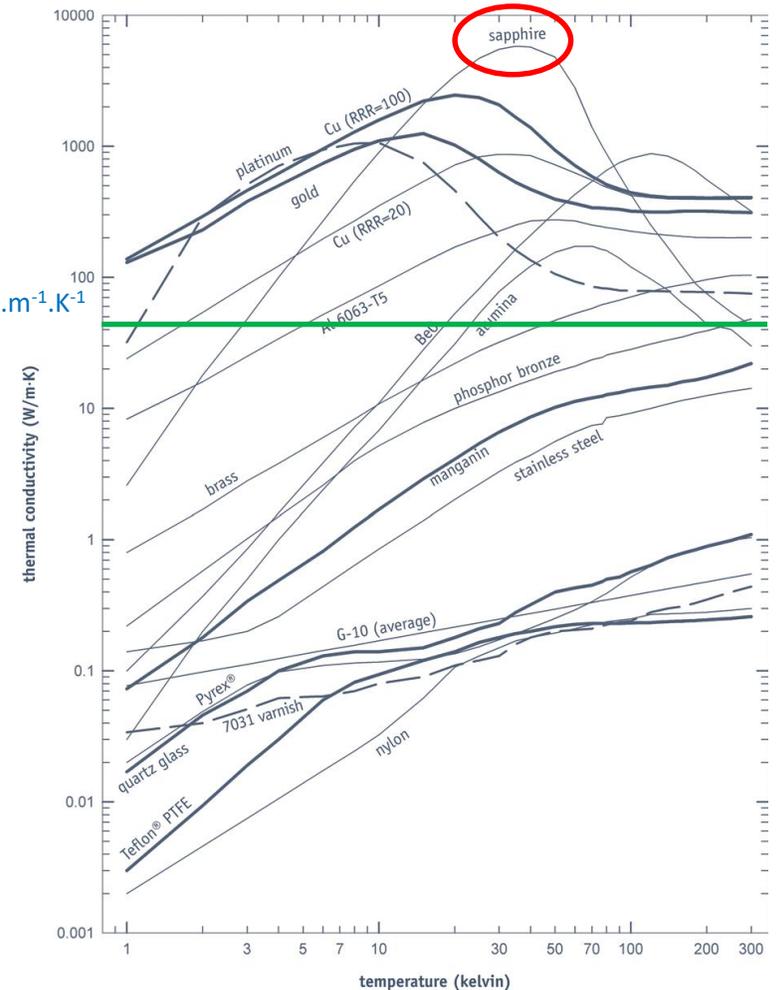


Saphir (@300K) :  $42 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

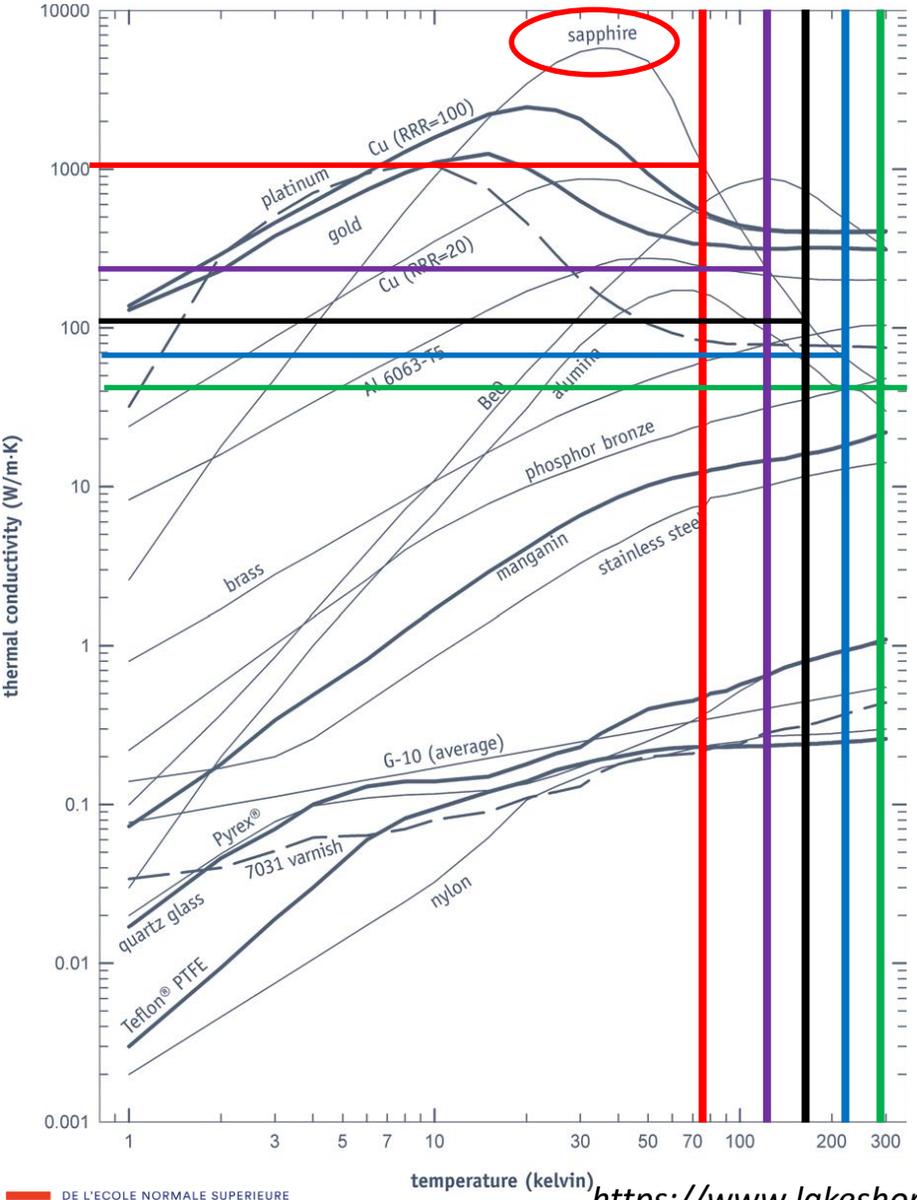
$\lambda$  varie beaucoup en fonction de T lorsque que T diminue



On découpe en plusieurs tronçons



# Les différents tronçons



- Saphir@80K : 1000 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>
- Saphir@120K : 250 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>
- Saphir@180K : 120 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>
- Saphir@240K : 65 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>
- Saphir@300K : 42 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

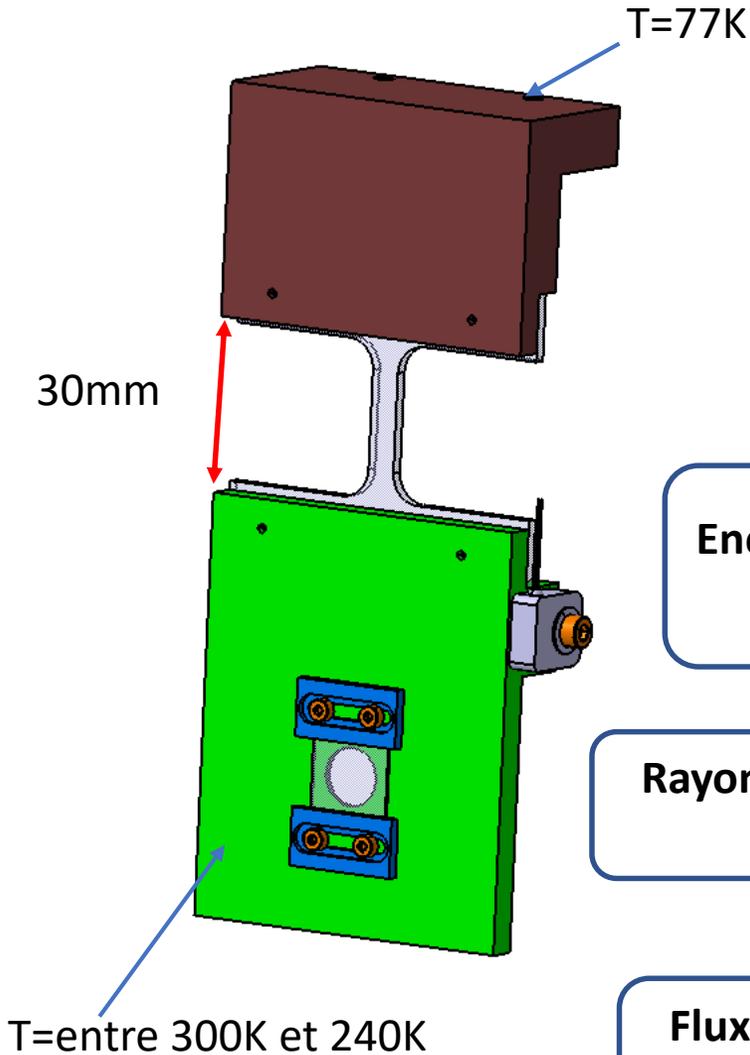
Temp. °K)	Cuivre	
	C <sub>p</sub> (j/g °K)	H (j/g)
1	0,000 012	0,000 006
2	0,000 028	0,000 025
3	0,000 053	0,000 064
4	0,000 091	0,000 13
6	0,000 23	0,000 44
8	0,000 47	0,001 12
10	0,000 86	0,002 4
15	0,002 7	0,010 7
20	0,007 7	0,034
25	0,016	0,090
30	0,027	0,195
40	0,060	0,61
50	0,099	1,40
60	0,137	2,58
70	0,173	4,13
80	0,205	6,02
90	0,232	8,22
100	0,254	10,6
120	0,288	16,1
140	0,315	22,1
160	0,337	28,5
180	0,346	35,3
200	0,355	42,4
220	0,364	49,6
240	0,371	56,9
260	0,376	64,4
280	0,381	72,0
300	0,386	79,6

Source : éléments de cryogénie (R. R. conte)

Conductivité thermique

[https://www.lakeshore.com/docs/default-source/product-downloads/literature/lstc\\_appendix\\_i.pdf](https://www.lakeshore.com/docs/default-source/product-downloads/literature/lstc_appendix_i.pdf)

# 1<sup>er</sup> tronçon : 300K -> 240 K



**La pièce verte (cuivre doré)**  
Surface : 0,011 m<sup>2</sup>  
Volume : 2,3.10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>  
Masse : 0,206 kg  
capacité calorifique cuivre @300K : **386** J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

**La pièce en saphir**  
Section : 5x2 = 10 mm<sup>2</sup> (0,000010m<sup>2</sup>)  
Longueur : 30mm (0,03m)  
Conductivité thermique saphir (@300K) : **42** W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

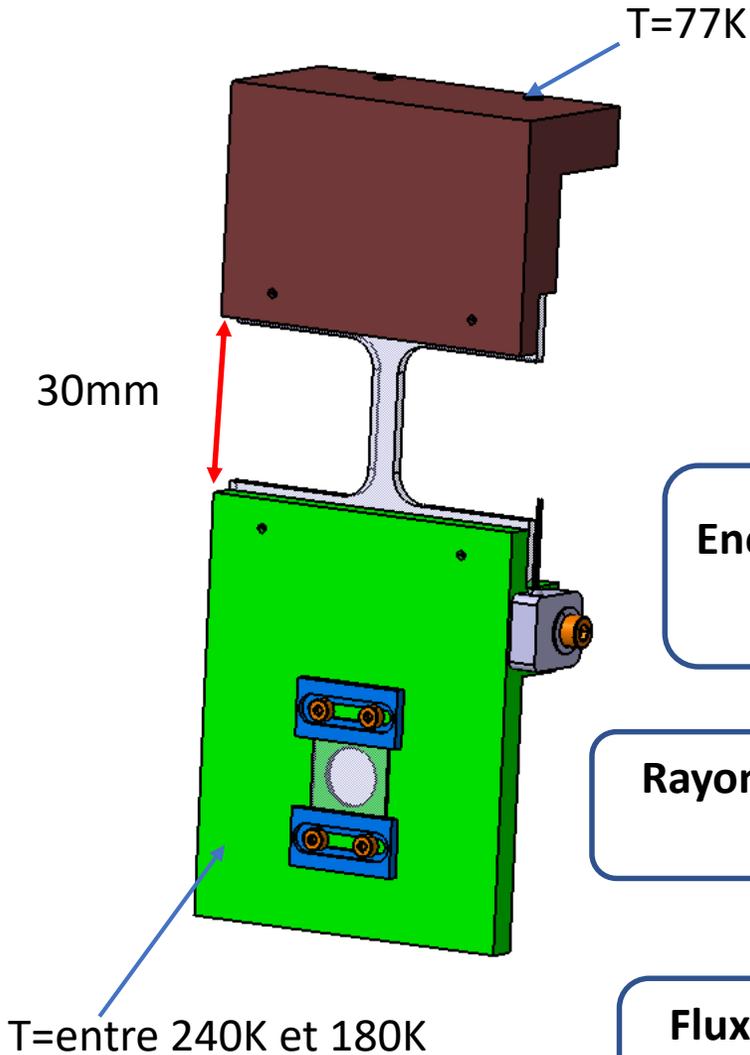
**Energie à évacuer pour refroidir la pièce verte :**  
 $E = 386 * 0,206 * (300 - 240) = 4771$  Joules

**Rayonnement reçu par la pièce verte @240K :**  
0,06 W

**Temps pour refroidir de 300K à 240 K**  
 $4771 / (3,12 - 0,06) = 1558$  s  
soit 25min et 58s

**Flux thermique à travers la pièce en saphir :**  
 $\Phi = \frac{42 * 0,000010}{0,03} * (300 - 77) = 3,12$  W

## 2<sup>ème</sup> tronçon : 240K -> 180 K



### La pièce verte (cuivre doré)

Surface : 0,011 m<sup>2</sup>

Volume : 2,3.10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>

Masse : 0,206 kg

capacité calorifique cuivre @240K : **371** J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

### La pièce en saphir

Section : 5x2 = 10 mm<sup>2</sup> (0,000010m<sup>2</sup>)

Longueur : 30mm (0,03m)

Conductivité thermique saphir (@240K) : **65** W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

Energie à évacuer pour refroidir la pièce verte :

$$E = 371 * 0,206 * (240 - 180) = 4586 \text{ Joules}$$

Rayonnement reçu par la pièce verte @180K :

0,09 W

Temps pour refroidir de 240K à 180 K

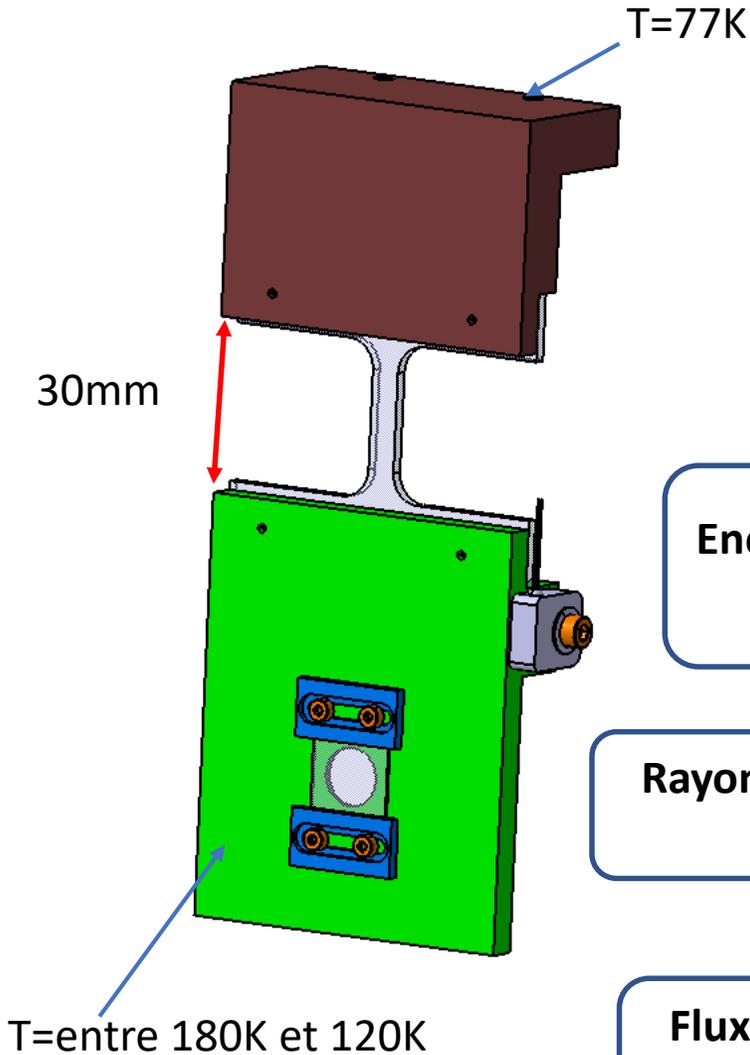
$$4586 / (3,53 - 0,09) = 1332 \text{ s}$$

soit 22min et 12s

Flux thermique à travers la pièce en saphir :

$$\Phi = \frac{65 \times 0,000010}{0,03} \cdot (240 - 77) = 3,53 \text{ W}$$

### 3<sup>ème</sup> tronçon : 180K -> 120 K



**La pièce verte (cuivre doré)**  
Surface : 0,011 m<sup>2</sup>  
Volume : 2,3.10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>  
Masse : 0,206 kg  
capacité calorifique cuivre @180K : **346** J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

**La pièce en saphir**  
Section : 5x2 = 10 mm<sup>2</sup> (0,000010m<sup>2</sup>)  
Longueur : 30mm (0,03m)  
Conductivité thermique saphir (@180K) : **120** W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

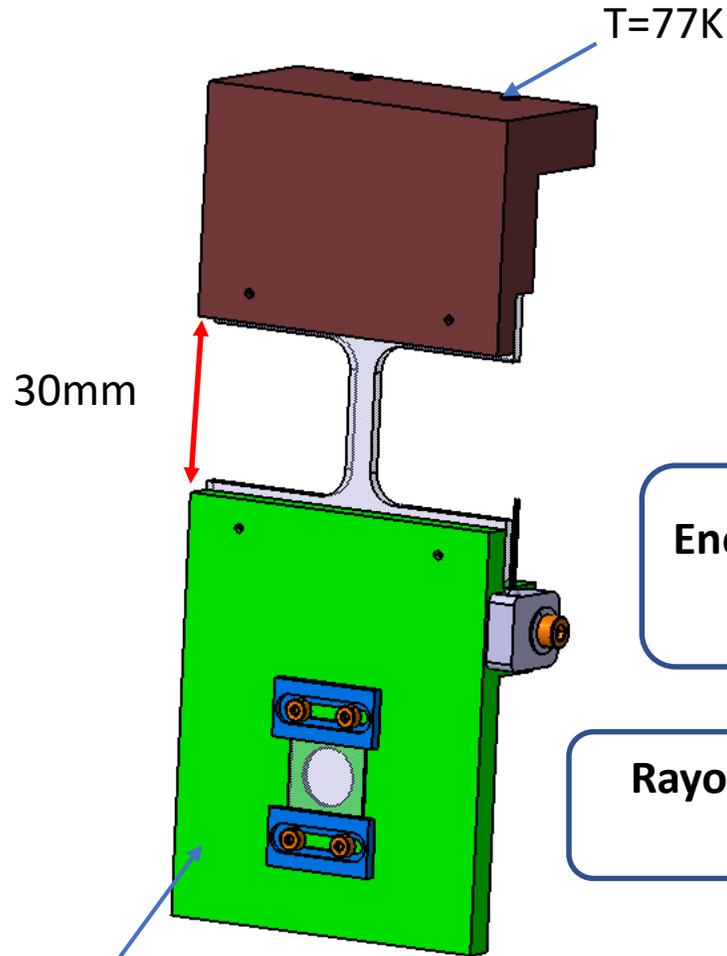
**Energie à évacuer pour refroidir la pièce verte :**  
 $E = 346 * 0,206 * (180 - 120) = 4277$  Joules

**Rayonnement reçu par la pièce verte @120K :**  
**0,1 W**

**Temps pour refroidir de 180K à 120 K**  
 $4277 / (4,12 - 0,1) = 1064$  s  
**soit 17min et 44s**

**Flux thermique à travers la pièce en saphir :**  
 $\Phi = \frac{120 * 0,000010}{0,03} * (180 - 77) = 4,12$  W

## 4<sup>ème</sup> tronçon : 120K -> 80 K



**La pièce verte (cuivre doré)**  
Surface : 0,011 m<sup>2</sup>  
Volume : 2,3.10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>  
Masse : 0,206 kg  
capacité calorifique cuivre @120K : **288** J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

**La pièce en saphir**  
Section : 5x2 = 10 mm<sup>2</sup> (0,000010m<sup>2</sup>)  
Longueur : 30mm (0,03m)  
Conductivité thermique saphir (@180K) : **250** W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>

**Energie à évacuer pour refroidir la pièce verte :**  
 $E = 288 * 0,206 * (120 - 80) = 2551$  Joules

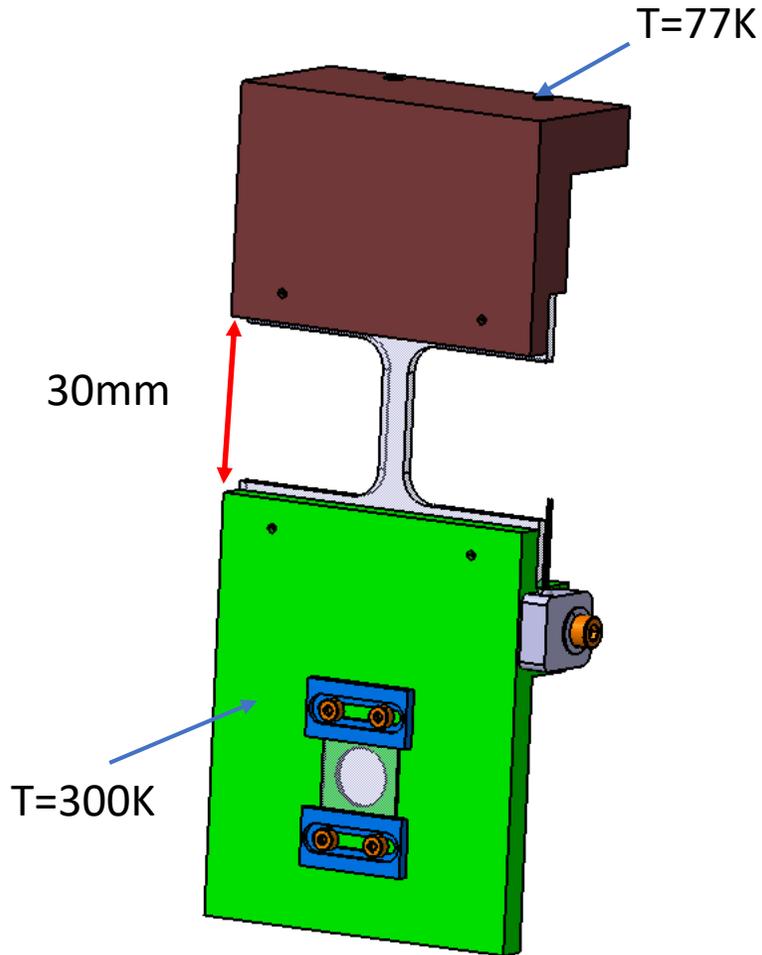
**Rayonnement reçu par la pièce verte @80K :**  
**0,11 W**

**Temps pour refroidir de 120K à 80 K**  
 $2551 / (3,58 - 0,11) = 734$  s  
**soit 12min et 14s**

**Flux thermique à travers la pièce en saphir :**  
 $\Phi = \frac{250 * 0,000010}{0,03} * (120 - 77) = 3,58$  W

T=entre 180K et 120K

# Peut-on refroidir de 300K->77K ?



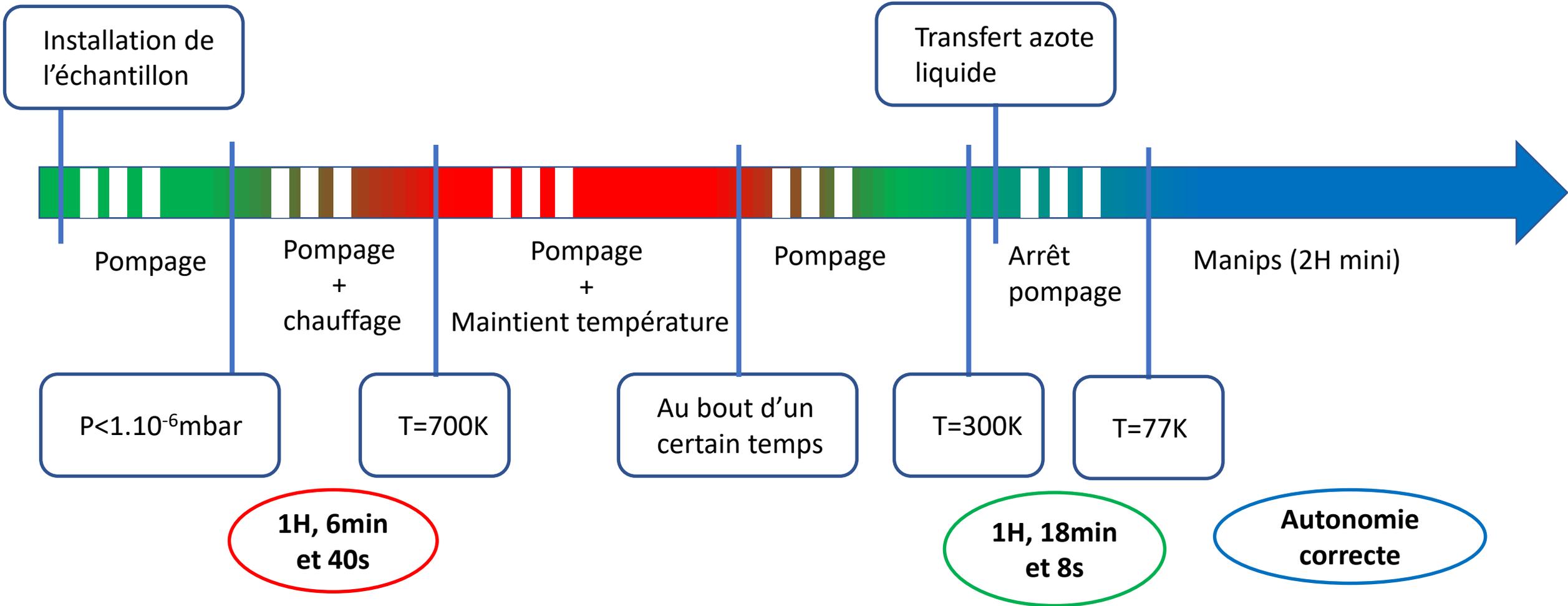
Temps pour refroidir de 300K à 80 K  
1H, 18min et 8s

***On va dire oui, c'est acceptable !!!***

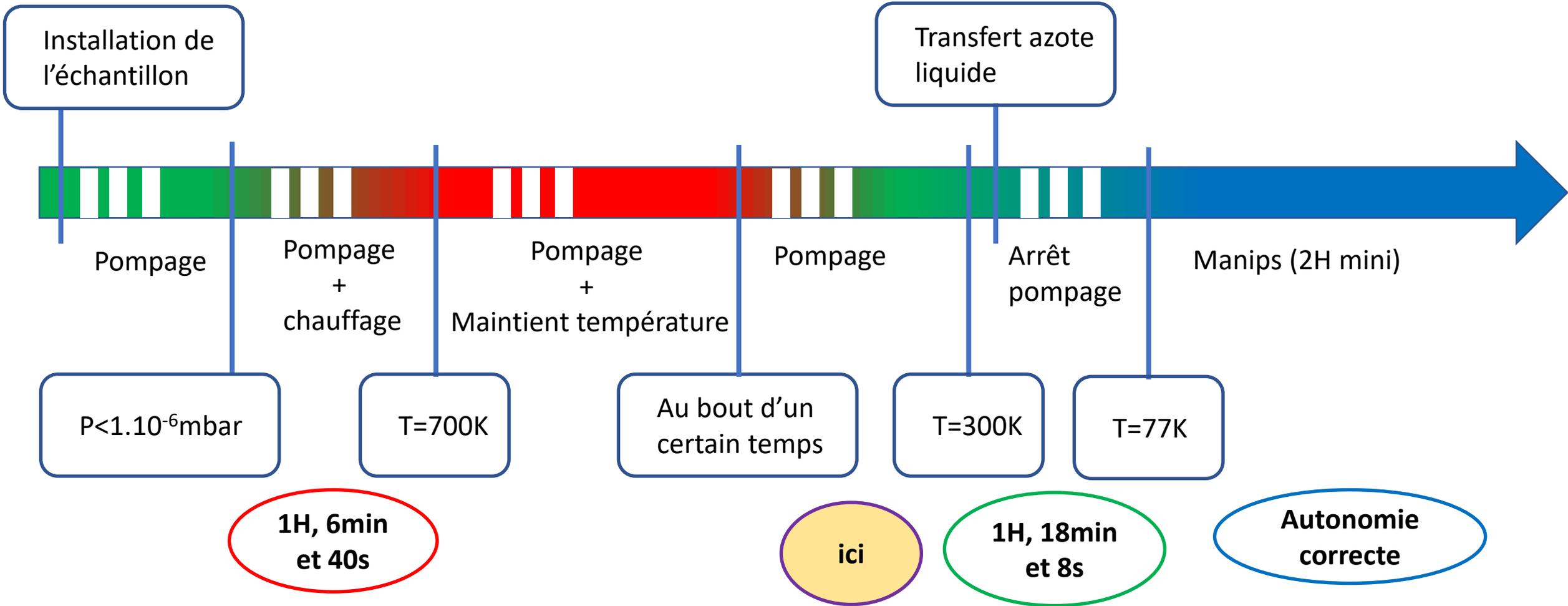


On n'a pas tenu compte de toutes les pièces,  
seulement de la pièce verte

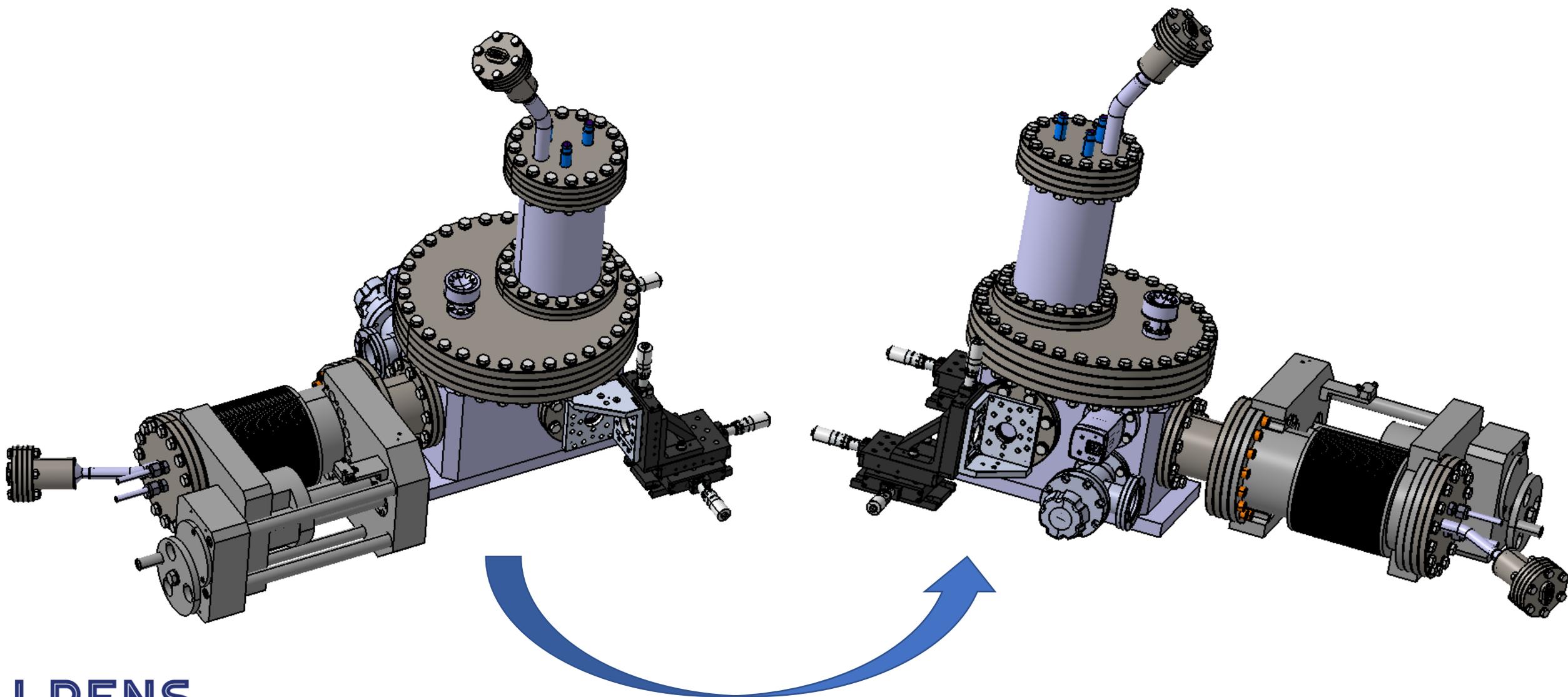
# Le déroulement de la manip



# Le déroulement de la manip



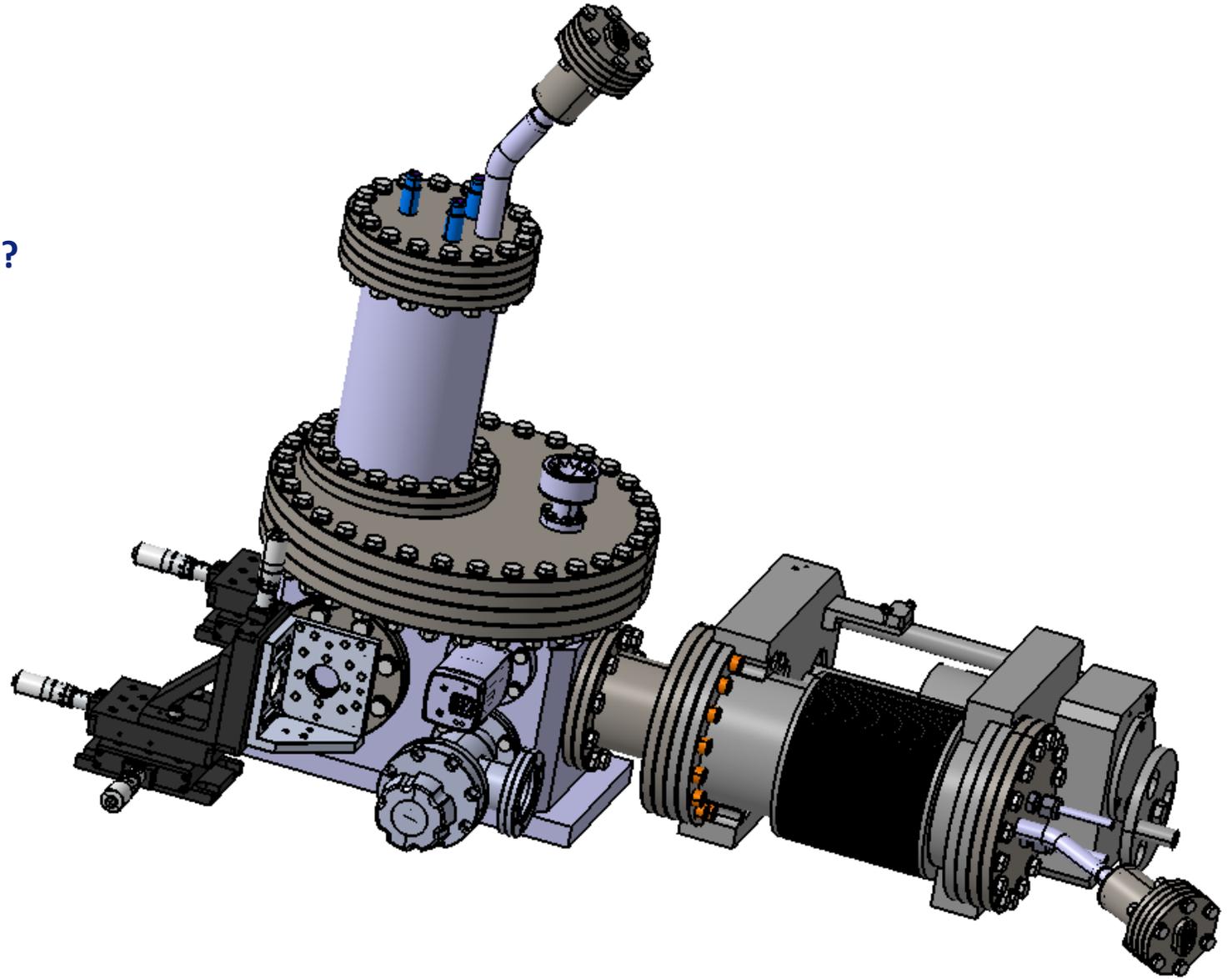
## Revenons à nos moutons : Et si c'était vous ?



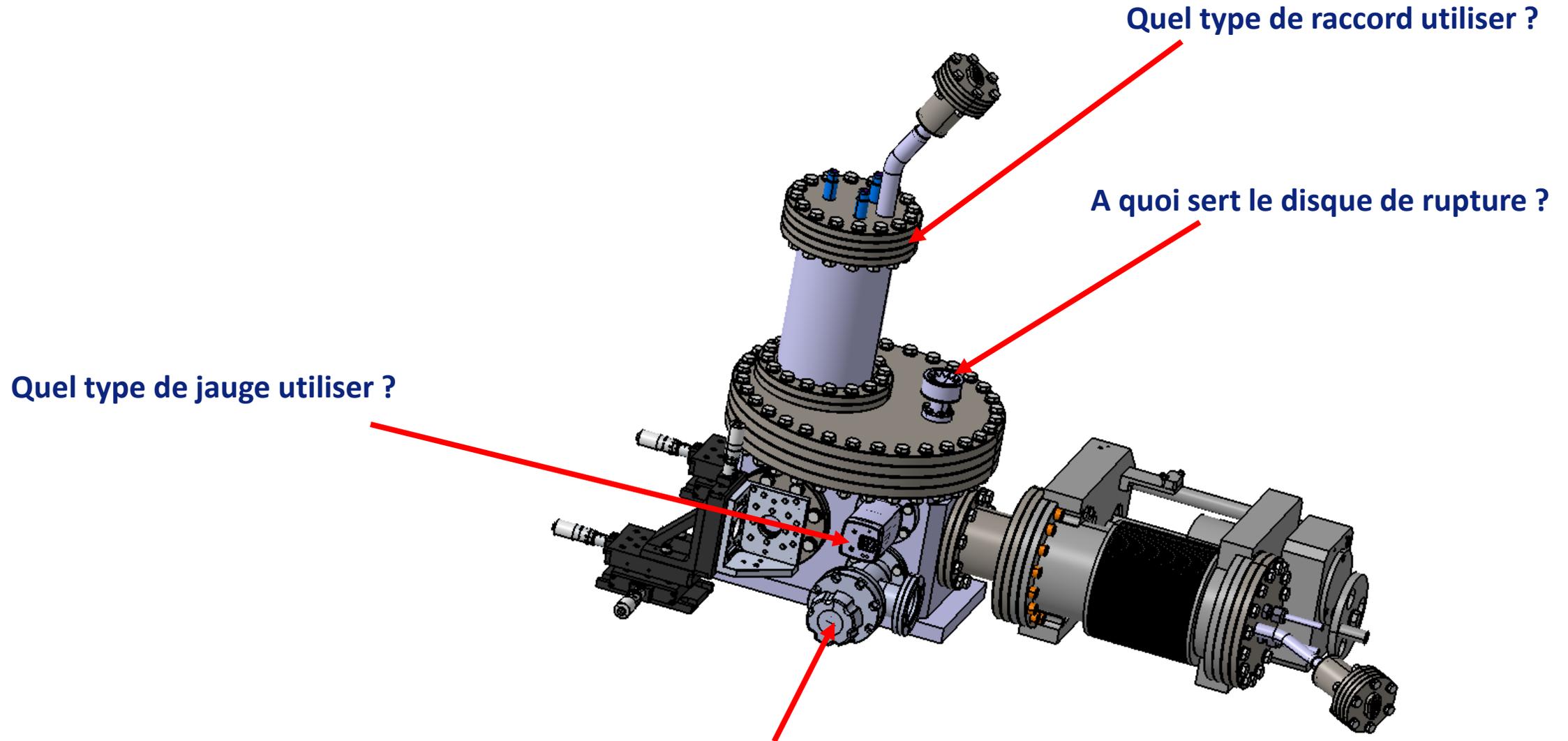
# Et si c'était vous ?

Comment auriez-vous chauffé l'échantillon ?  
Comment l'auriez-vous refroidi ?

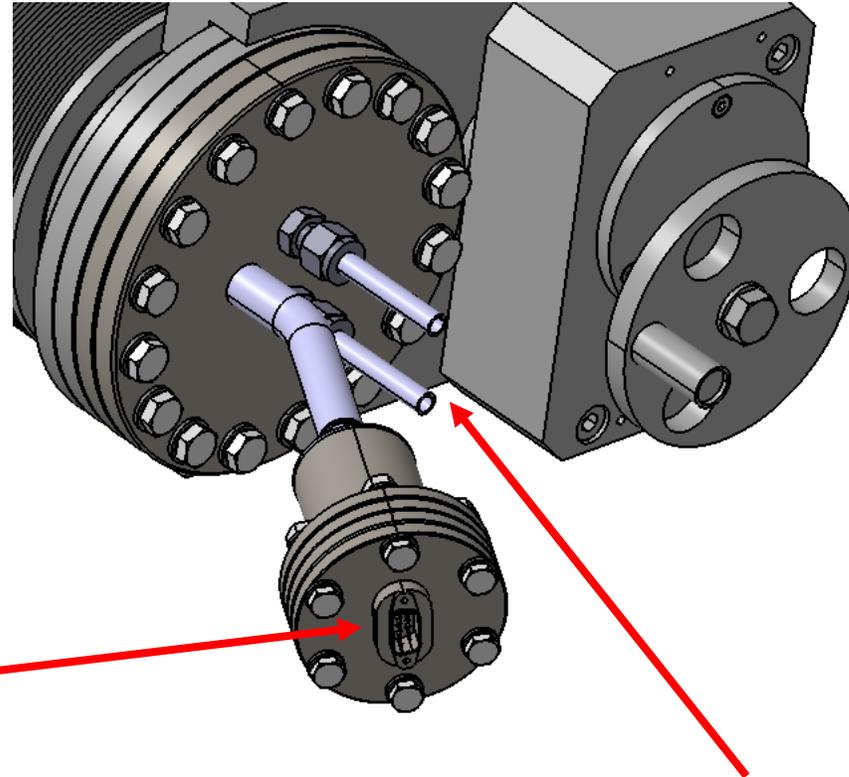
Que changeriez-vous ?



# Et si c'était vous ?



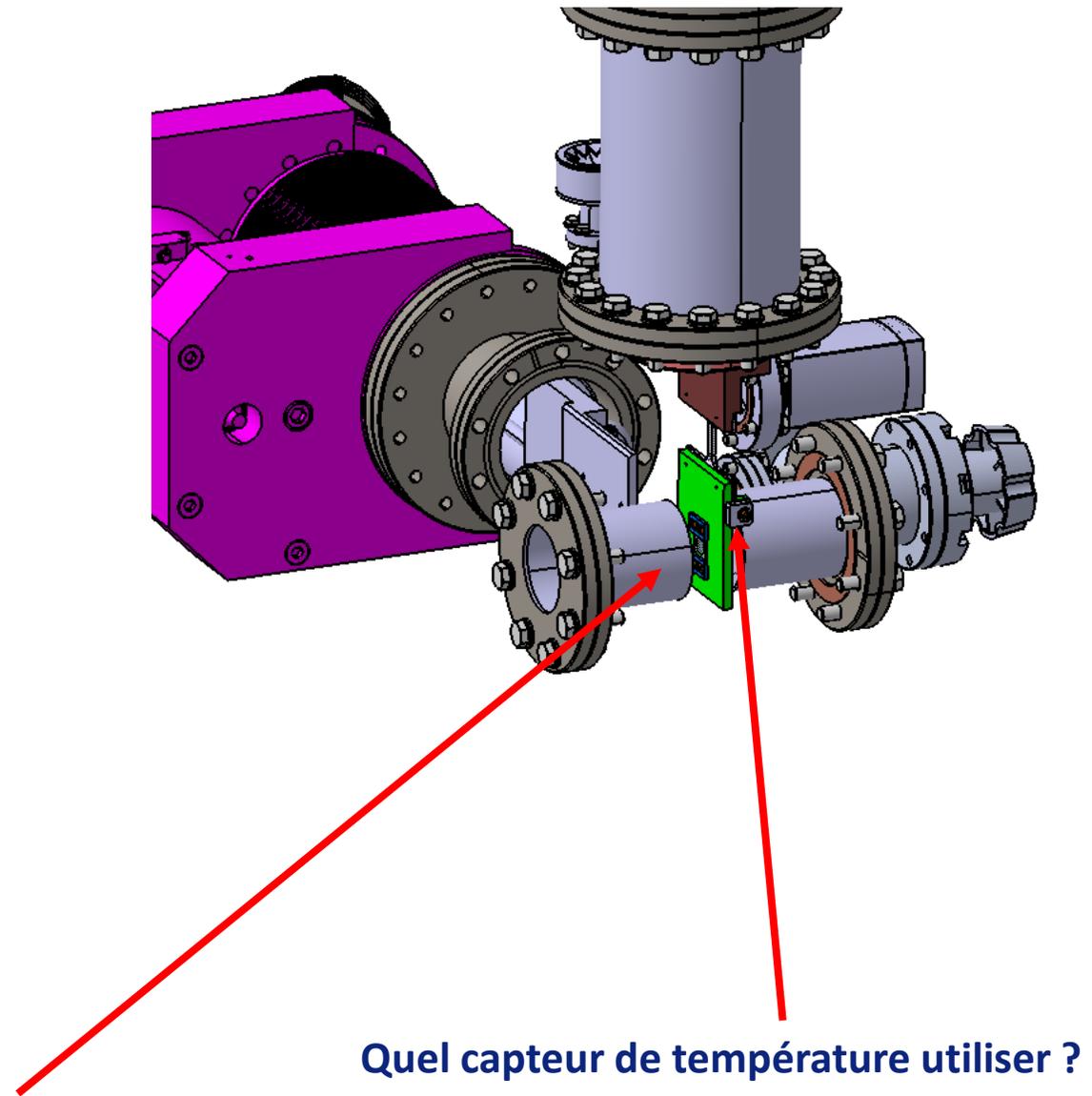
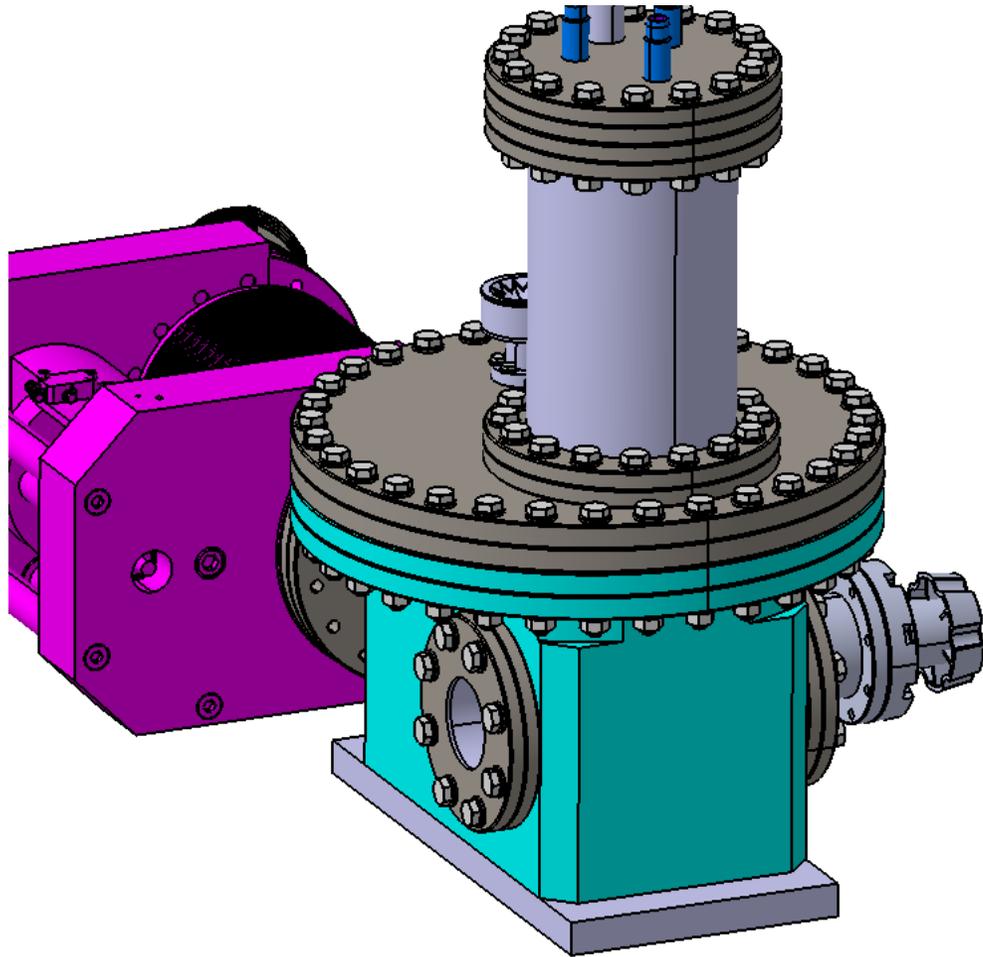
## Et si c'était vous ?



Comment faire des accès électrique ?  
Quels fils utiliser dans l'enceinte ?

Comment faire la circulation d'eau de refroidissement ?

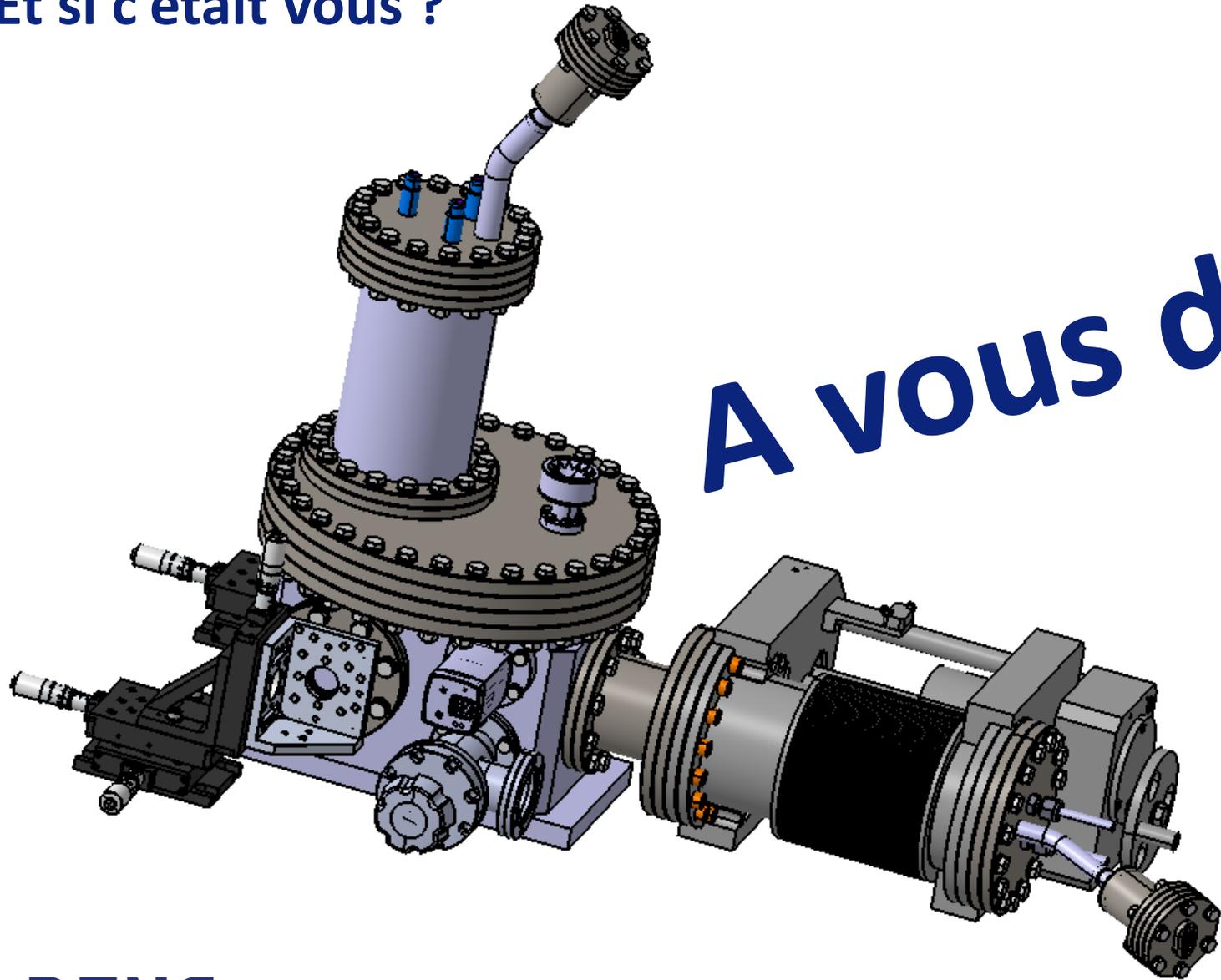
Et si c'était vous ?



Quel capteur de température utiliser ?

Pour les accès optique, comment fixer les fenêtres ?  
Expérience de collage pour le vide ?

Et si c'était vous ?



**A vous de jouer !!!**

**Et merci !!!**