



INSTITUT NANOSCIENCES
ET CRYOGÉNIE

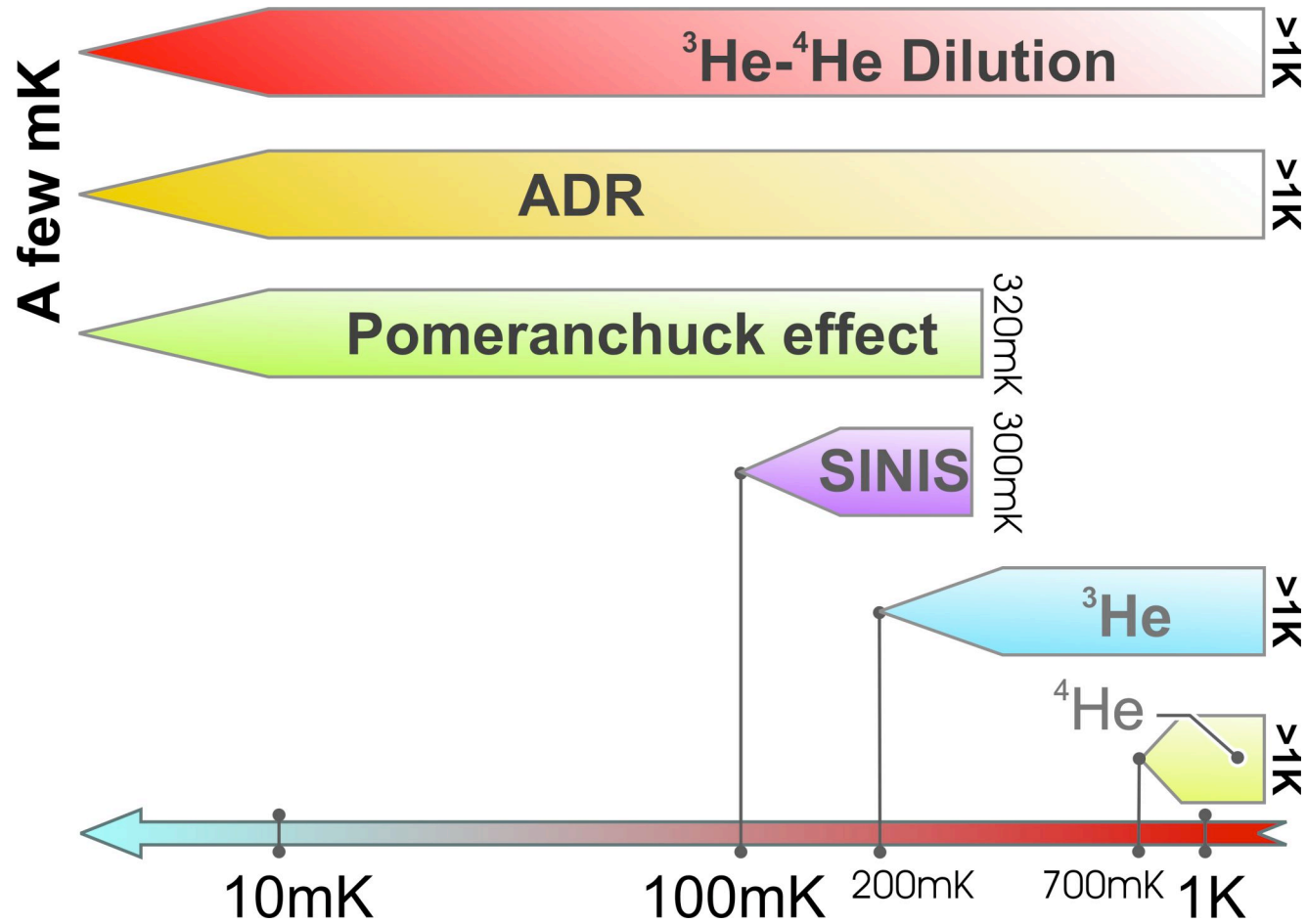
la recherche, ressource fondamentale
research - a fundamental resource

SBT | SCIB | SPINTEC | SPRAM | SPSMS | SP2M

inac.cea.fr

Réfrigération sub Kelvin

Technologies sub Kelvin



Déroulement de l'exposé

Réfrigération par évaporation

- Physique
- Principe
- Performances
- Systemes

Réfrigération magnétique

- Physique
- Principe
- Performances
- Spécificités du spatial

Réfrigération pour le spatial

Contraintes

- Résister au **lancement**
 - **Vibrations** générées par le lanceur (15 à 30g)
- **Fiabilité**
- **Masse et Puissance (énergie) à minimiser**
- **Fonctionnement en apesanteur (micro gravité)**
- **Longue durée de vie (>2 ans, typique 5 ans)**
- **Etc....**

Règle tacite

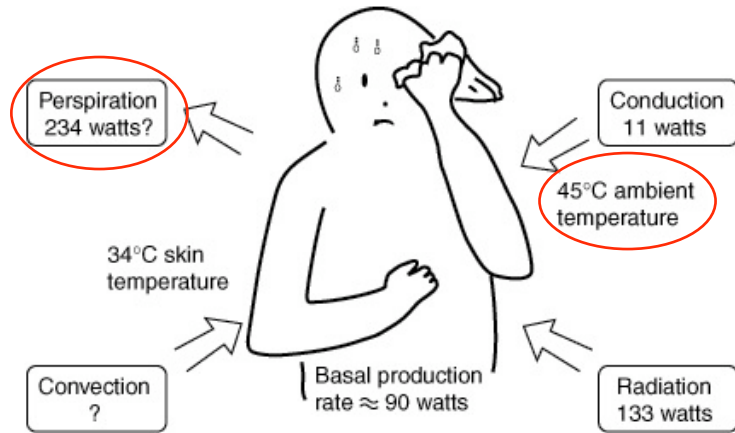
**Aucune pièce mobile
ou
Absence de frottements**



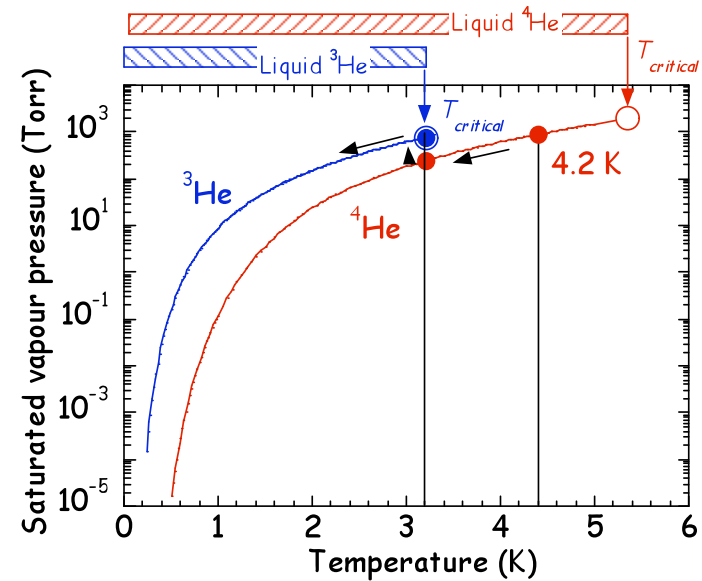
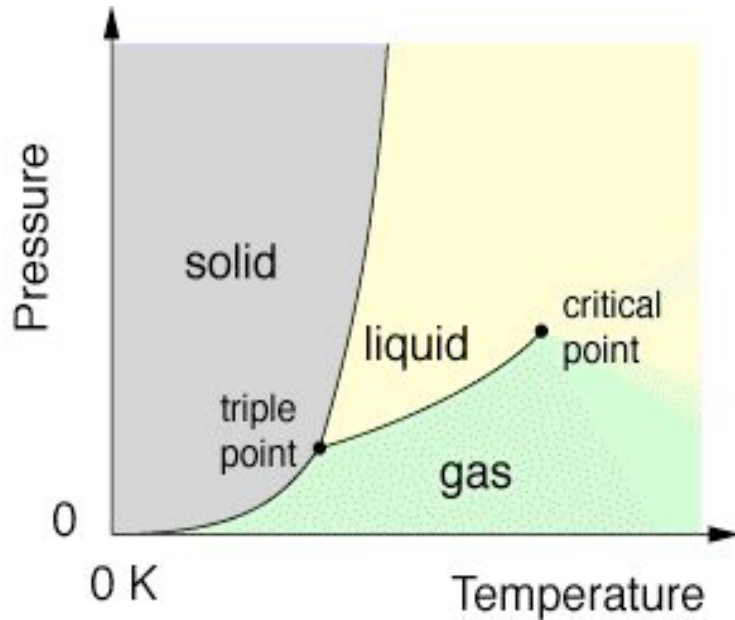
Réfrigération par évaporation

Principe
Performances
Systèmes

Physique



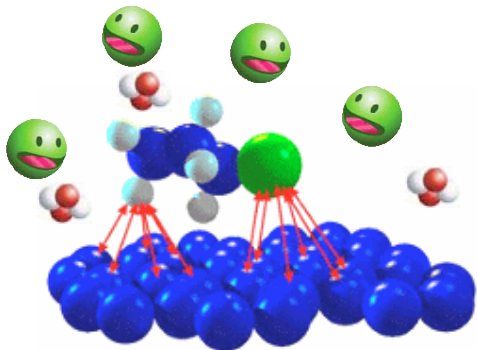
Plus de 6 milliards d'utilisateurs !



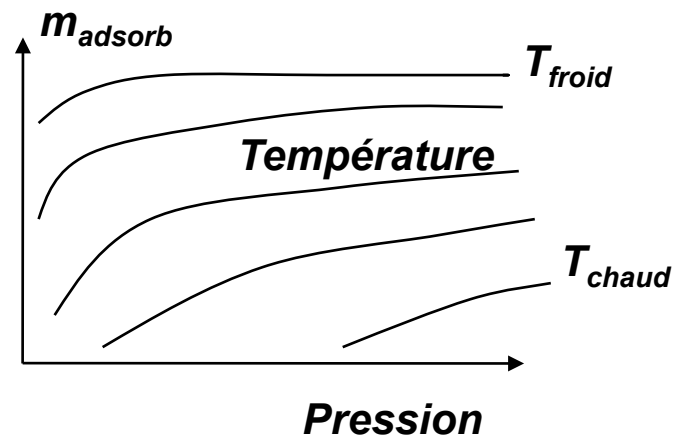
Besoin d'une pompe

Adsorption physique

Tire profit des forces de Van Der Waals



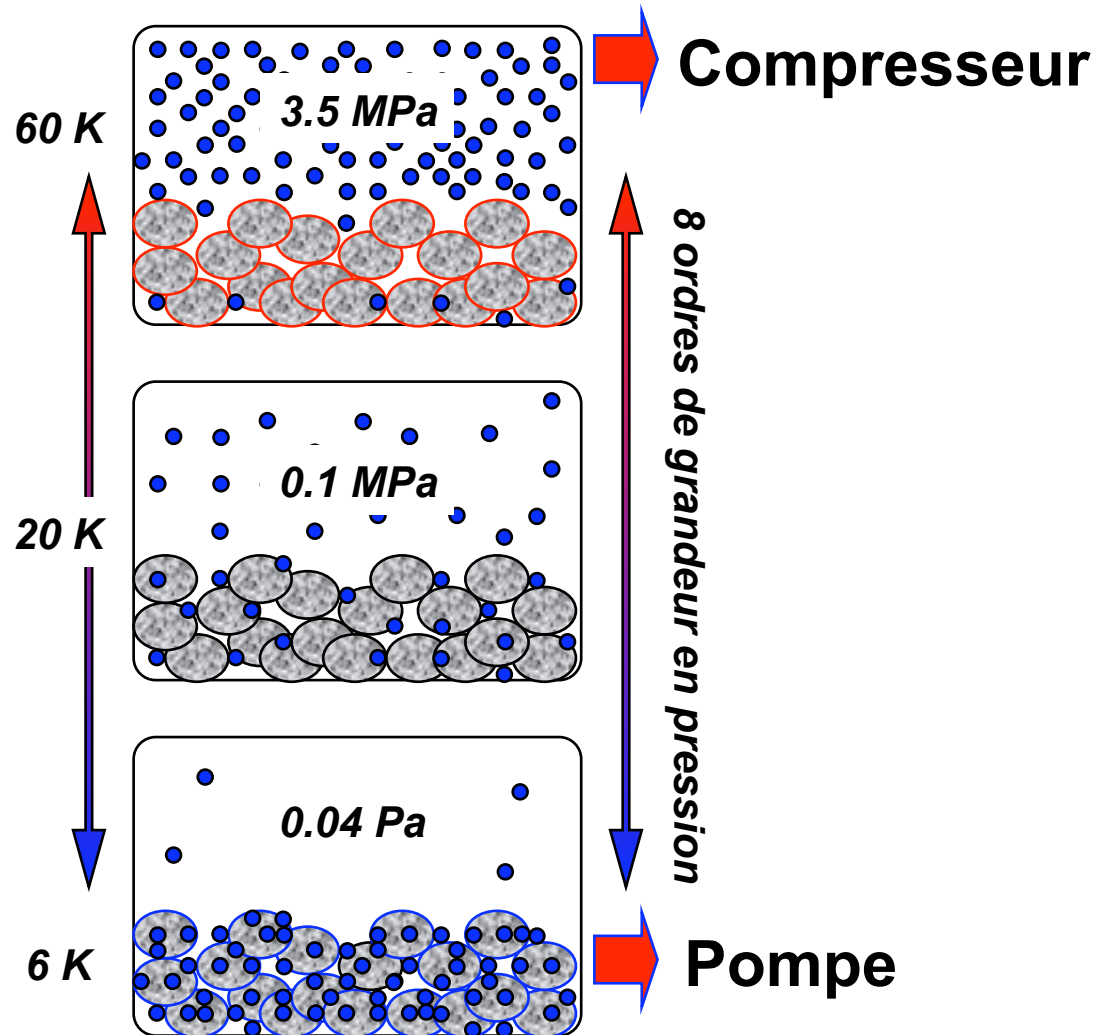
Besoin de matériaux avec grande surface spécifique (cm^2/gr)



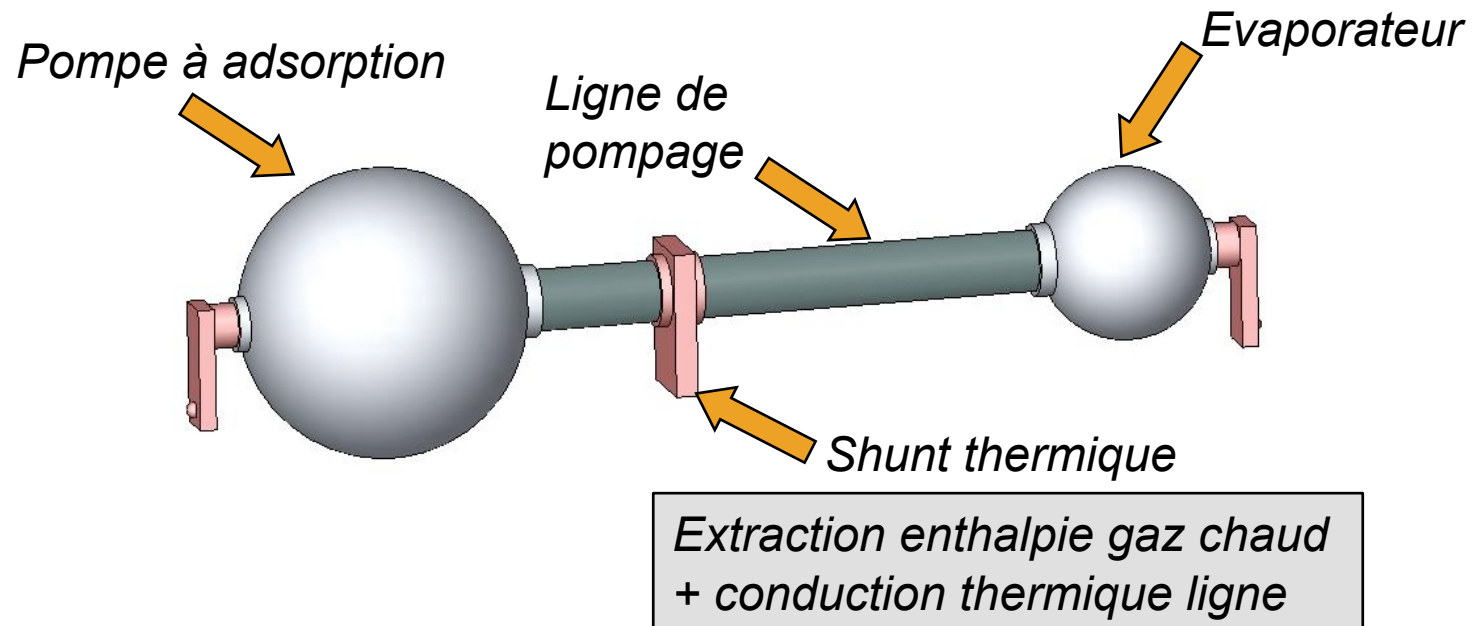
Choix : charbon actif



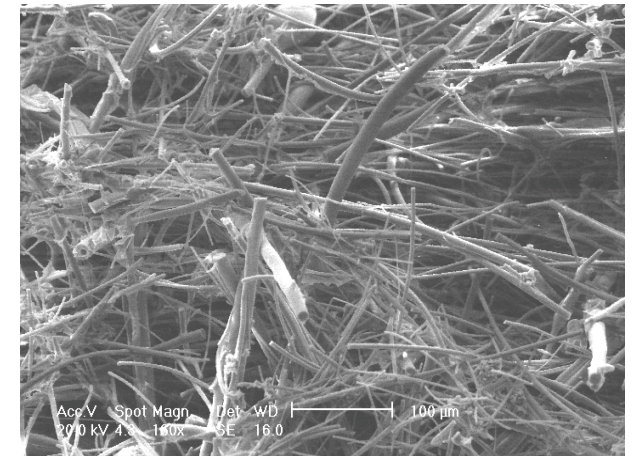
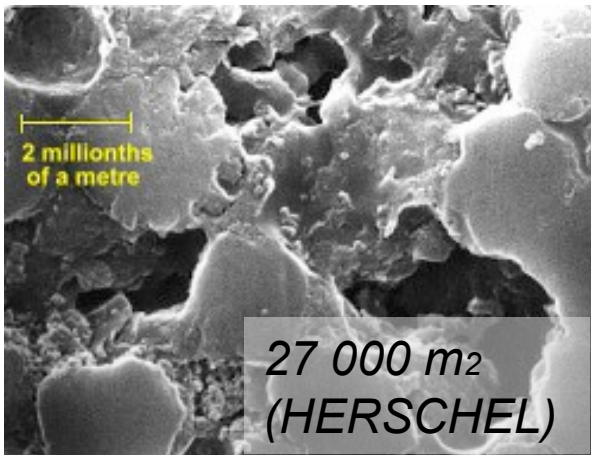
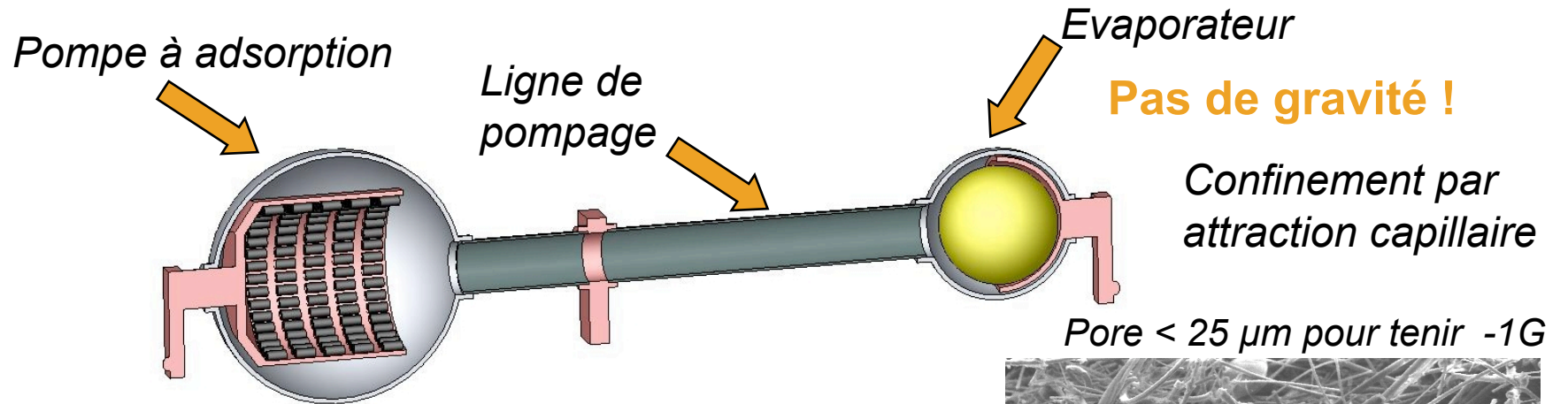
Adsorption physique



Principe

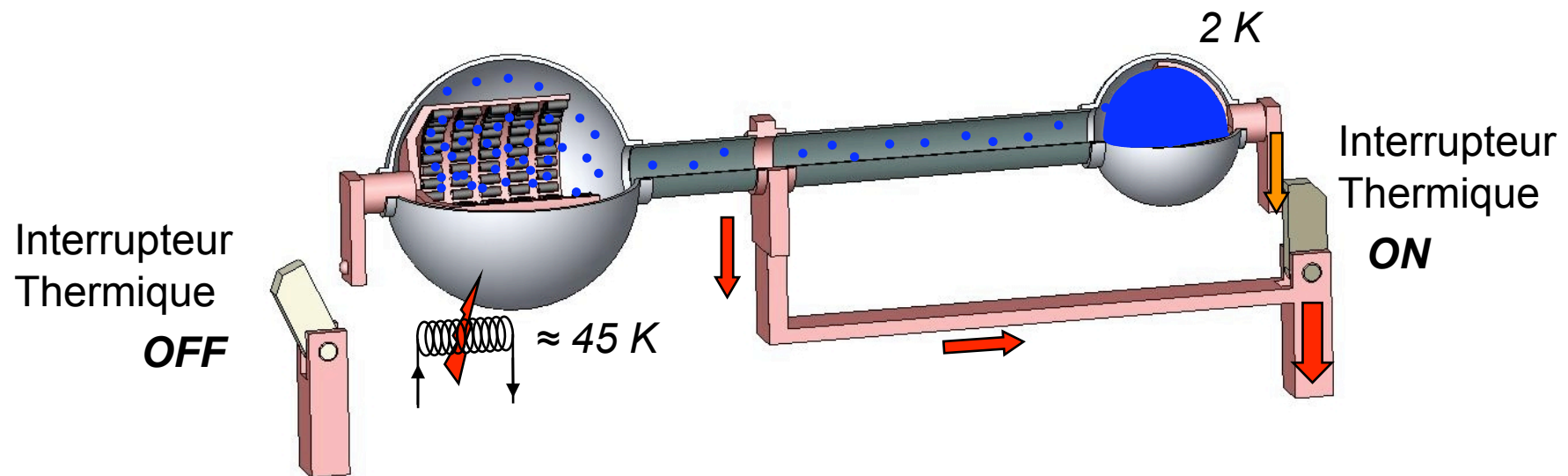


Principe



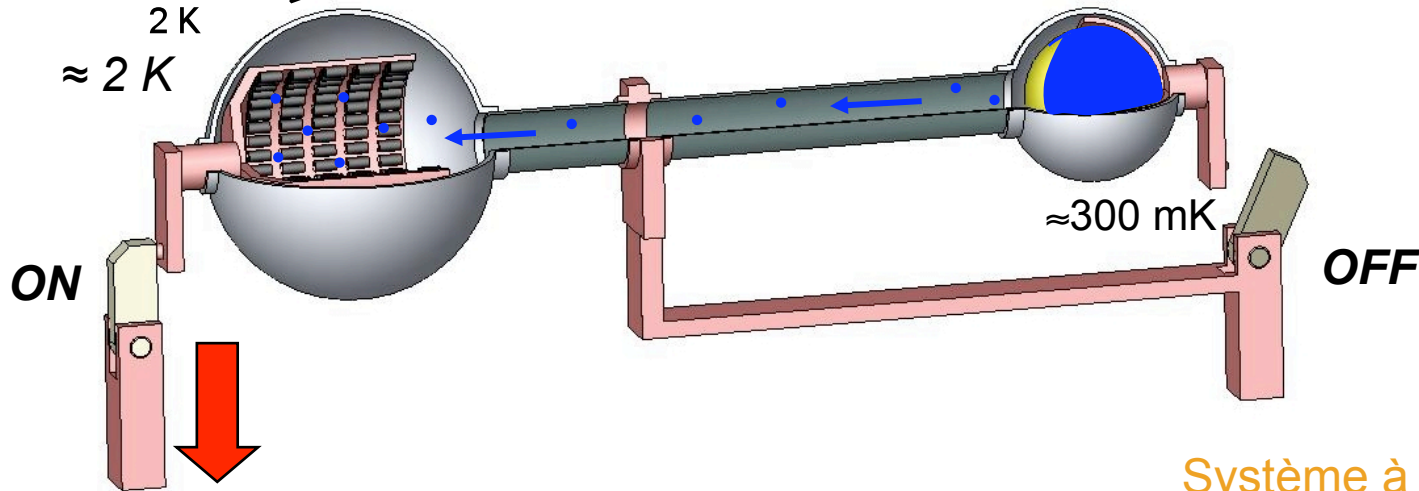
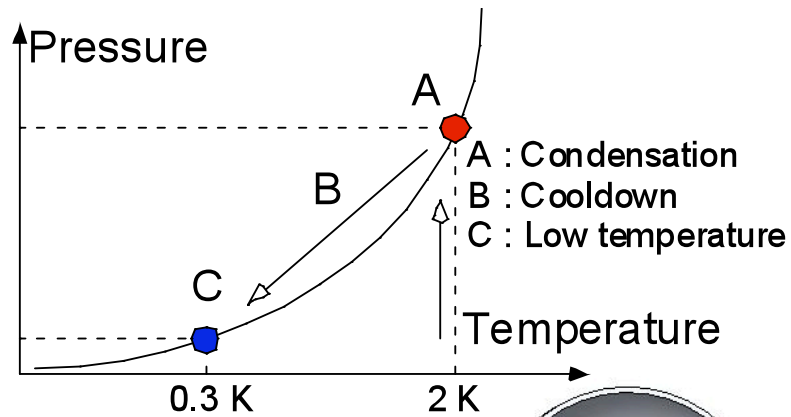
Principe

Conditions initiales : tout à 2 K



Phase de recyclage

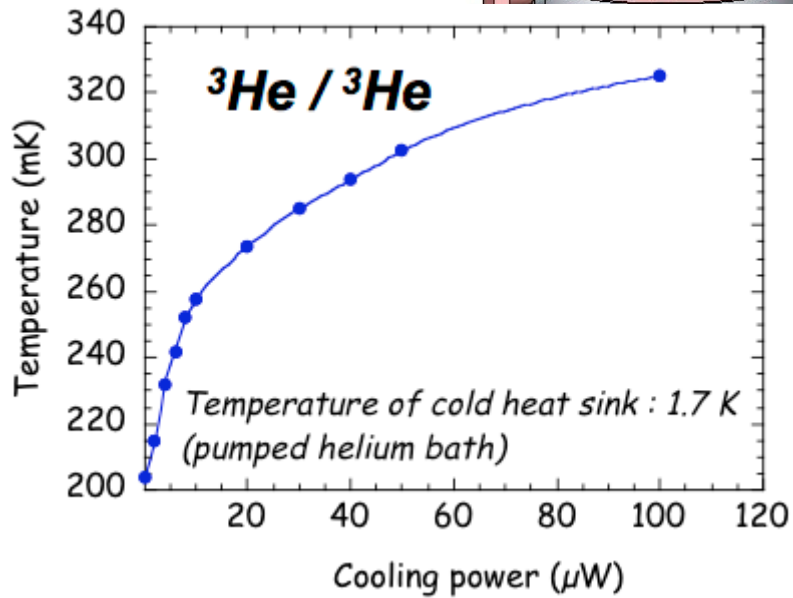
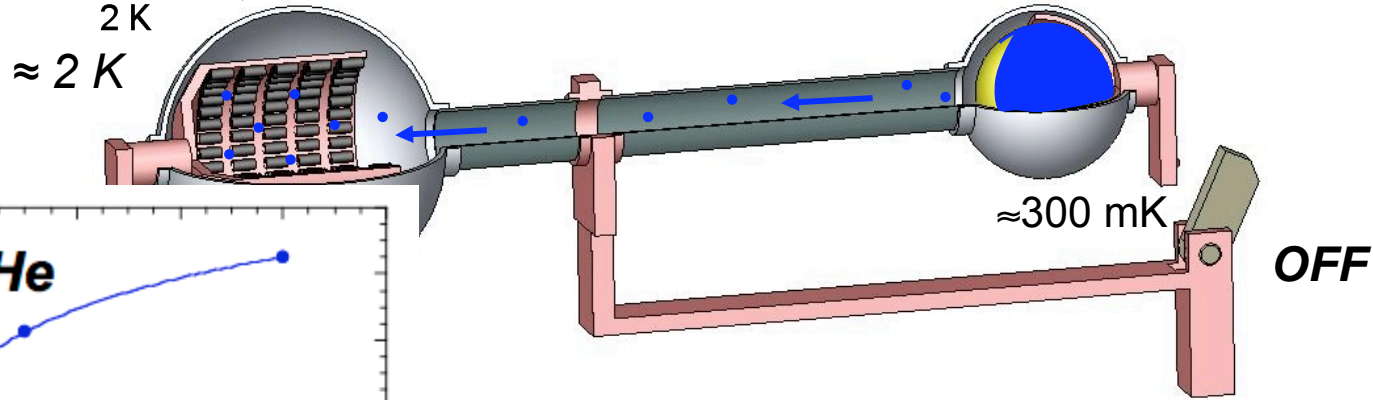
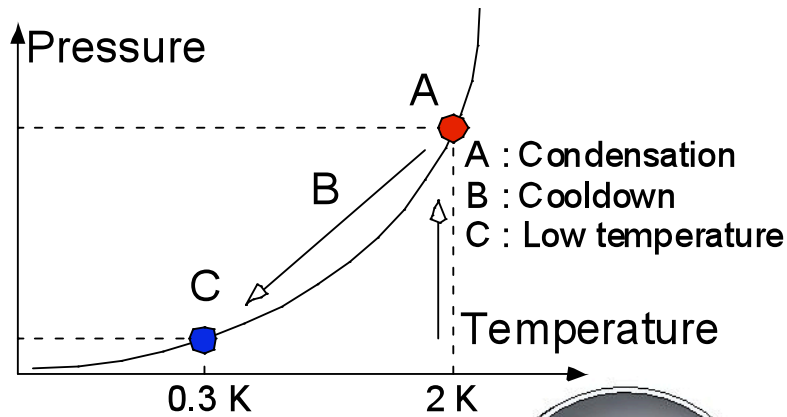
Principe



Systeme à energie finie

Phase basse temperature

Principe



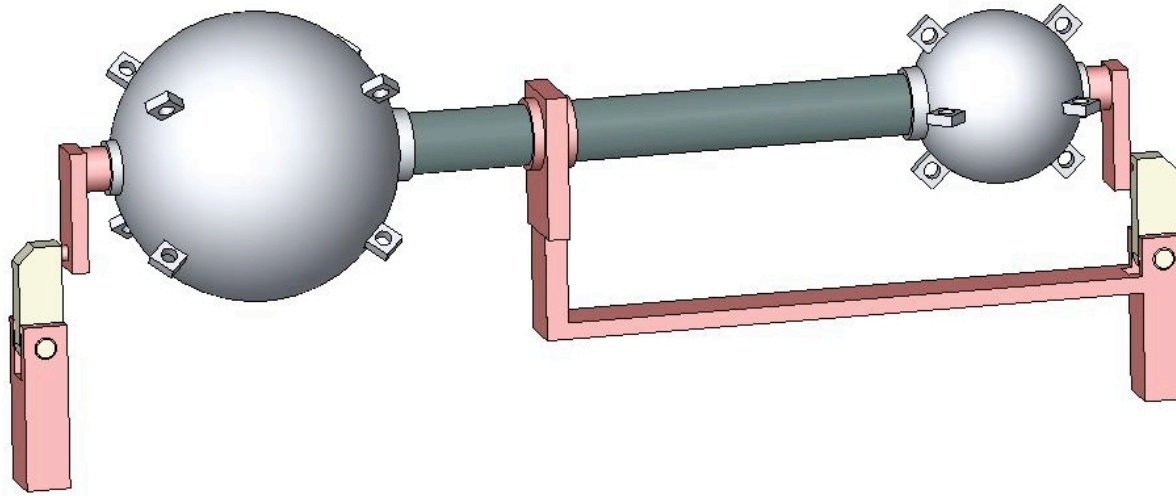
Systeme à energie finie

Phase basse temperature

Spécificités spatiales



©CNES-septembre 2002 / illustr. D. Ducros



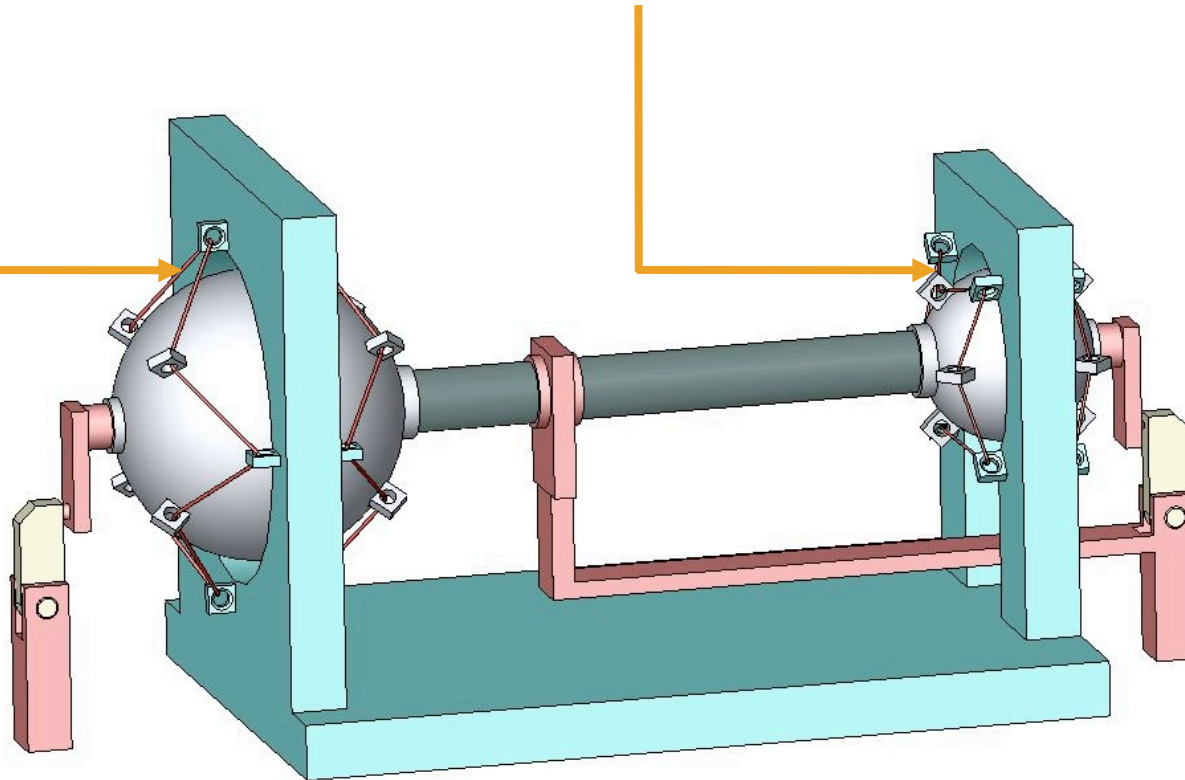
Mise en orbite



**Tenue mécanique tout en
minimisant fuites conductives**

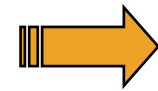
Tenue mécanique

Solution : Système de suspension en Kevlar

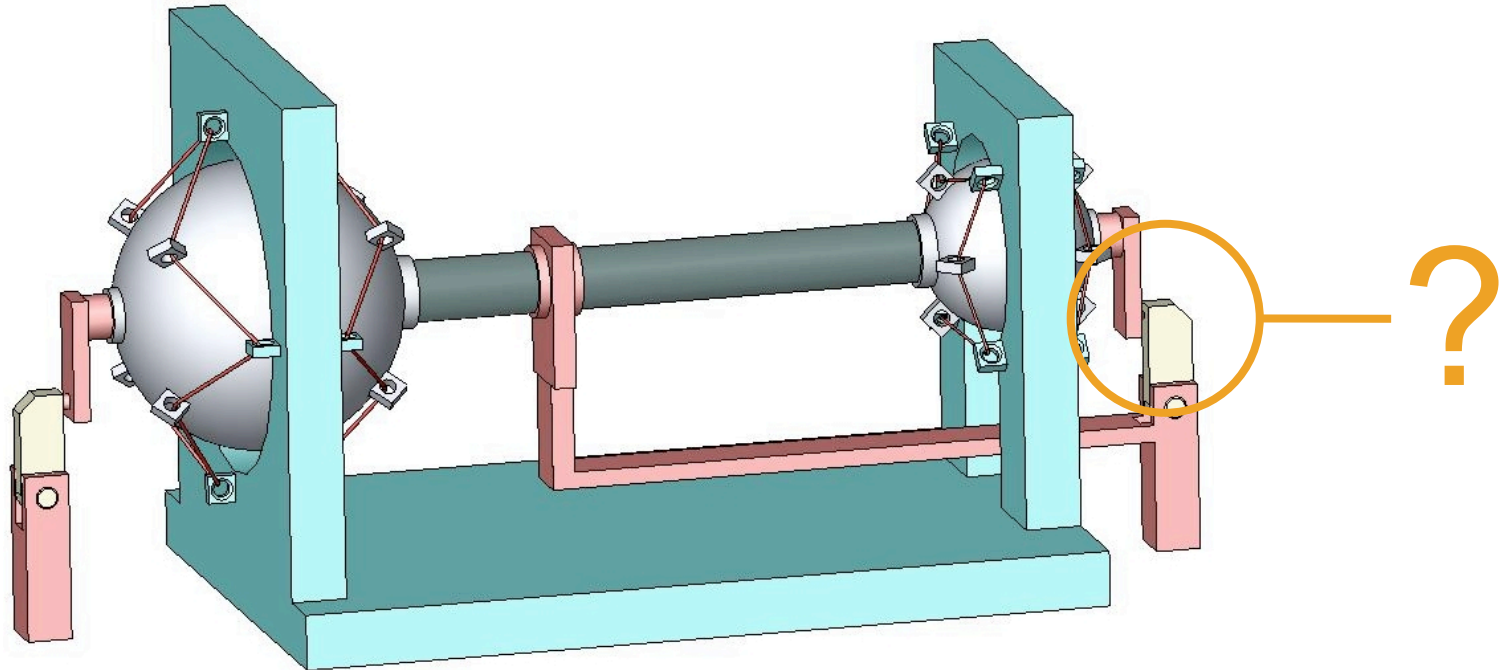


Gestion des contacts thermiques

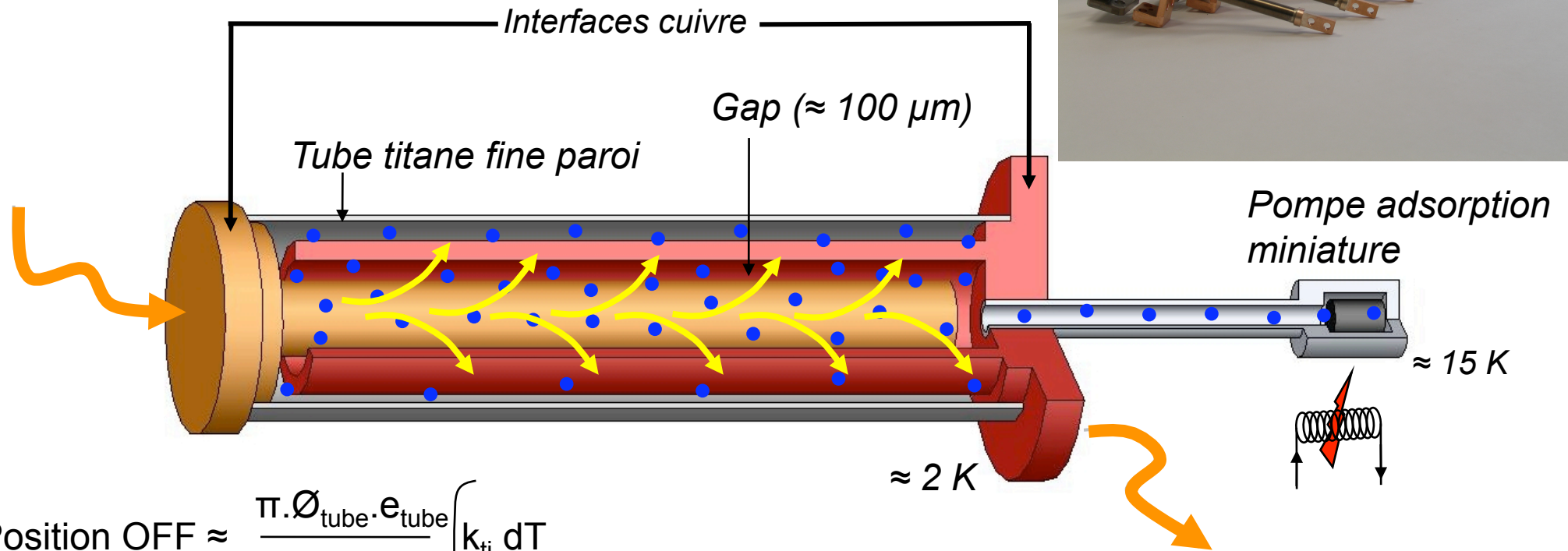
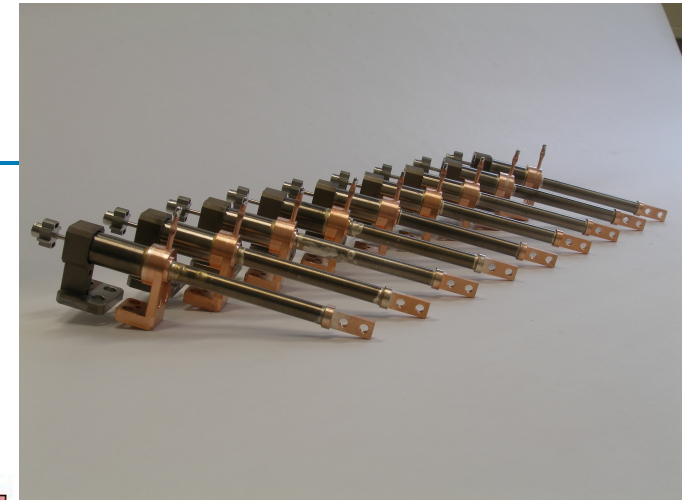
Connexion ↔ **Isolation thermique**



Interrupteur thermique



Interrupteur thermique à gaz



$$\text{Position OFF} \approx \frac{\pi \cdot \varnothing_{\text{tube}} \cdot e_{\text{tube}}}{L_{\text{tube}}} \int k_{\text{ti}} dT$$

Ratio ≥ 6000

$$\text{Position ON} \approx \frac{\pi \cdot \varnothing_{\text{cu}} \cdot L_{\text{cu}}}{\text{Gap}} \int k_{\text{gaz}} dT$$

Interrupteur thermique à gaz - limite

Contrôlé par un seul chauffage

- Simple
- Compact
- Léger
- Statique
- Fiable
- Absence de vibration
- Pas d'électromagnét.
- \approx indépt. gravité

Excellente solution jusque ≈ 300 mK

$$l_{pm} = 8,6 \frac{\eta}{P} \sqrt{\frac{T}{M}}$$

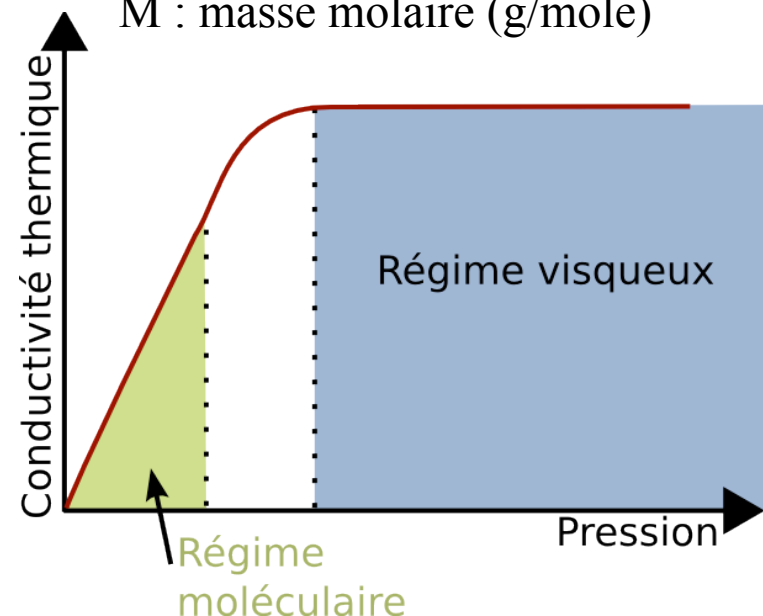
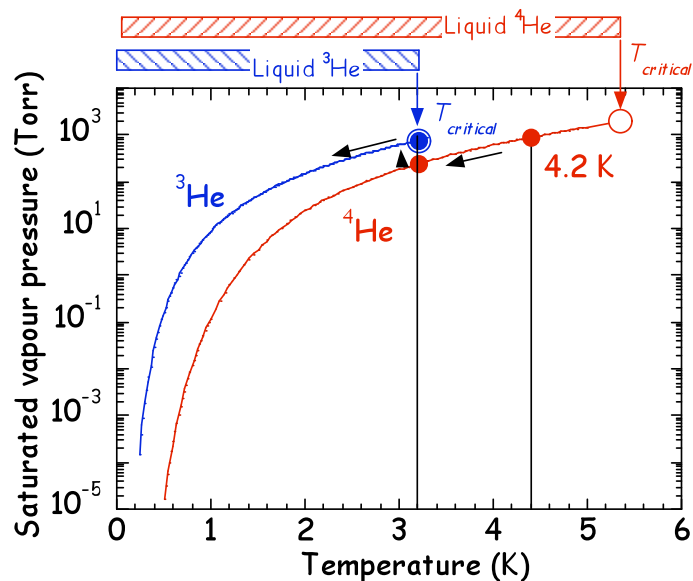
l_{pm} : libre parcours moyen (cm)

η : viscosité du gaz (exprimé en poises)

P : pression (Torr)

T : température (K)

M : masse molaire (g/mole)



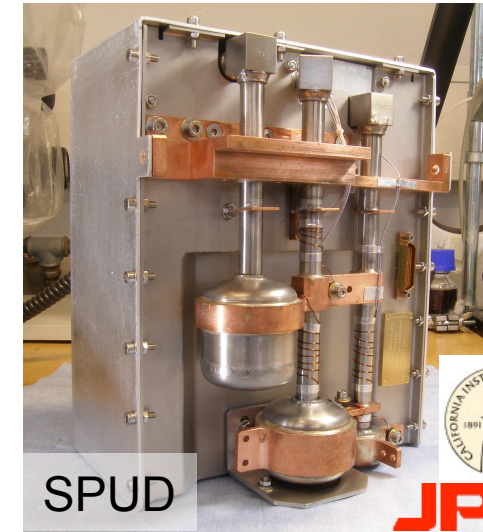
Interrupteur à gaz en position OFF si $T < 250$ mK

Quelques systèmes

Solution	T _{bain} (K)	T _{limite} (mK)	Exemple
Mono étagé ⁴ He	4,2	800-1000	GROMO
Bi étagé ⁴ He/ ³ He	4,2	300-350	ARTEMIS
Tri étagé ⁴ He/ ³ He/ ³ He	4,2	200-250	SPUD
Mono étagé ³ He	<2,5	250-300	Herschel



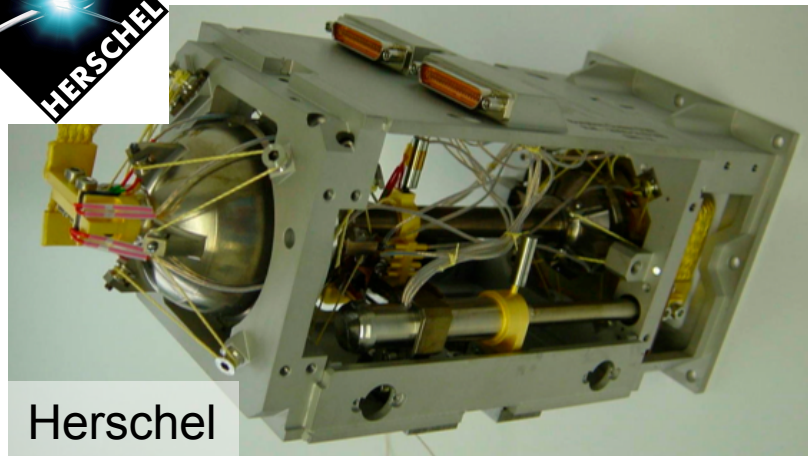
GROMO



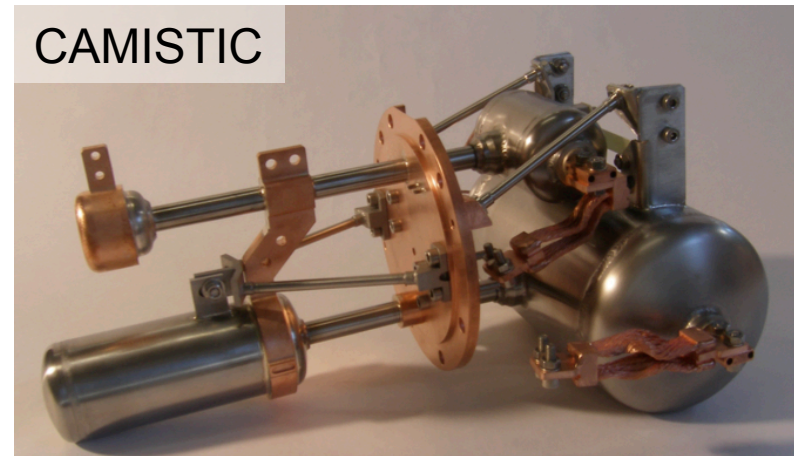
SPUD



JPL



Herschel



CAMISTIC

Service d'Astrophysique, CEA/IRFU

>50h à 300mK avec 10 μ W de perte, 2h recyclage



Réfrigération magnétique

Physique
Principe
Performances
Spécificités du spatial


Effet magnéto calorique

Effet Magnéto calorique : changement de température d'un corps induit par une variation de champ magnétique $\left(\frac{\partial T}{\partial B}\right)_S$

 **Matériau magnétique (paramagnétique)**

Formulation thermodynamique du problème magnétique

Travail d'un moment magnétique M dans un champ B : BdM

U : énergie interne	$dU=TdS+BdM$		$dU=TdS-PdV$
H : Enthalpie	$dH=TdS-MdB$		
F : énergie libre	$dF=BdM-SdT$		
G : énergie de Gibbs	$dG=-MdB-SdT$		

Définition de la chaleur spécifique à champ magnétique constant

$\left(\frac{\partial T}{\partial B}\right)_S = - \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_S \left(\frac{\partial T}{\partial S}\right)_B$  $C_B = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_B$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial B}\right)_S = - \frac{T}{C_B} \left(\frac{\partial M}{\partial T}\right)_S$$

Aimantation de moments magnétiques sans interaction

Hypothèses de calcul

Champ magnétique dans le composé = le champ magnétique appliqué B
 Les moments magnétiques ne sont pas en interaction

Energie d'un moment dans le champ : $E = -\vec{m} \cdot \vec{B} = -m_z B = -m_{J_z} g \mu_B B$

Probabilité que ce niveau d'énergie soit peuplé $P_{J_z} = \frac{e^{\frac{m_{J_z} g \mu_B B}{k_B T}}}{\sum_{J_z=-J}^J e^{\frac{m_{J_z} g \mu_B B}{k_B T}}}$

Aimantation moyenne d'un moment $m_z = \frac{\sum_{J_z=-J}^J -m_{J_z} g \mu_B e^{\frac{m_{J_z} g \mu_B B}{k_B T}}}{\sum_{J_z=-J}^J e^{\frac{m_{J_z} g \mu_B B}{k_B T}}}$

$$M = n \cdot m_z = n g \mu_B \left[\frac{2J+1}{2} \coth \frac{2J+1}{2} x - \frac{1}{2} \coth \frac{x}{2} \right] \quad x = \frac{J g \mu_B B}{k_B T}$$

M : aimantation moyenne macroscopique (moments magnétiques par unité de volume)

N : nombre d'ions magnétiques par unité de volume

Entropie et approximation du champ interne

$$\frac{1}{R}S(B, T) = \ln \left[\frac{\sinh \frac{2J+1}{2}x}{\sinh \frac{x}{2}} \right] + \frac{x}{2} \coth \frac{x}{2} - \frac{2J+1}{2} \coth \frac{2J+1}{2}x$$

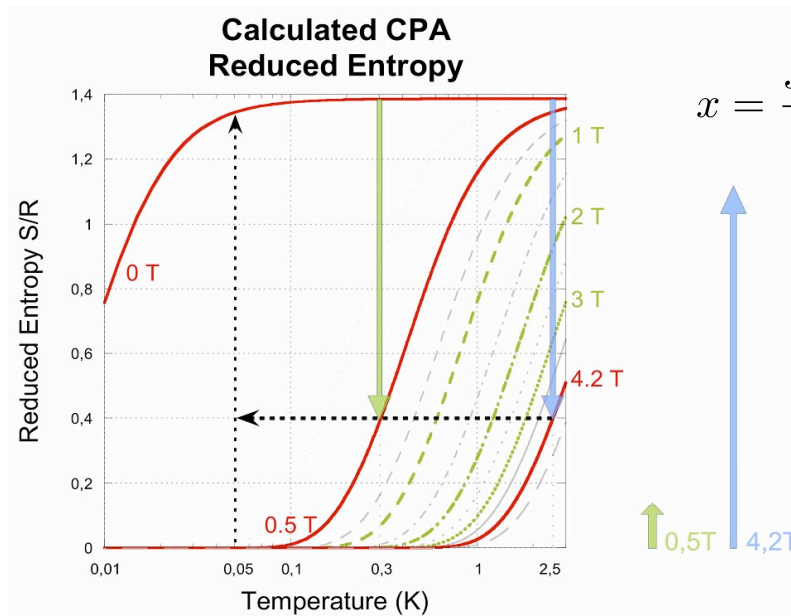
Pour B=0 : S = R ln(2J+1) quelque soit la température

Vérifié à haute température mais faux à très basse température

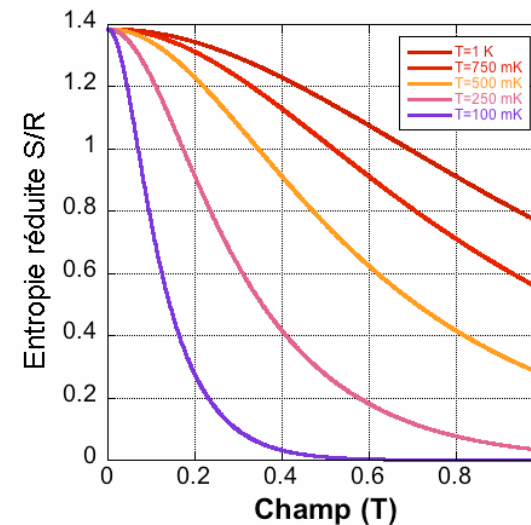


Il faut « brancher » des interactions

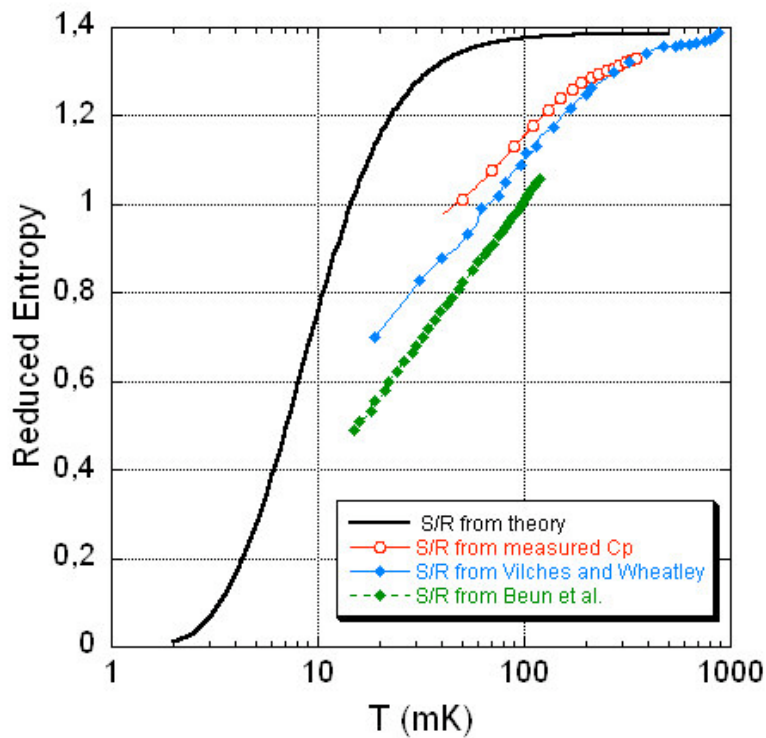
On considère que les moments magnétiques créent un champ local b_i : $B_{total} = \sqrt{B^2 + b_i^2}$



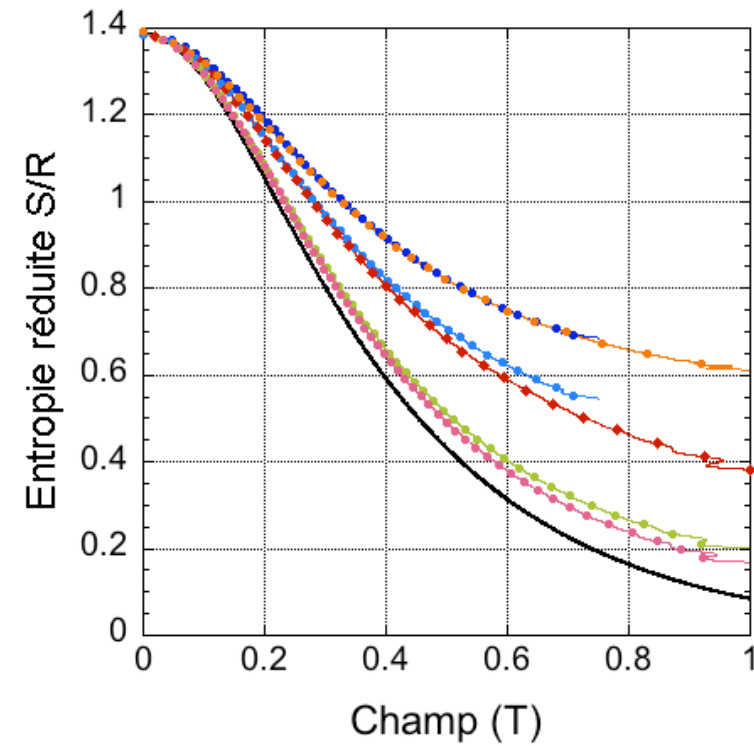
$$x = \frac{Jg\mu_B\sqrt{B^2 + b_i^2}}{k_B T}$$



Comparaison à la mesure



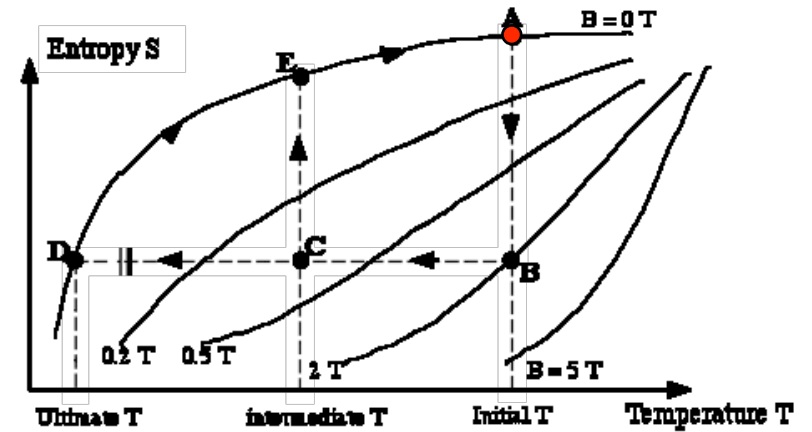
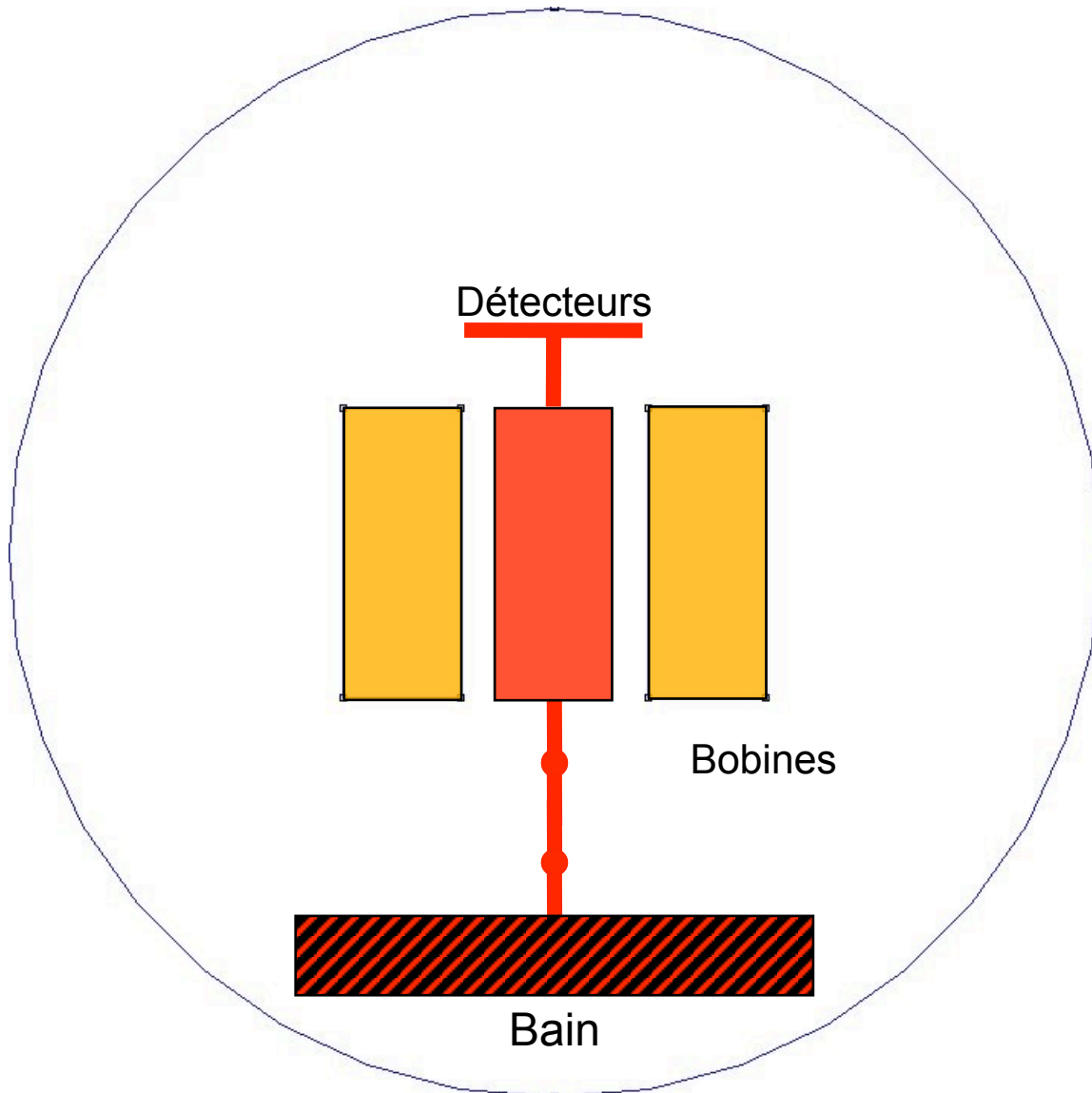
Comparaison entropie à champ nul



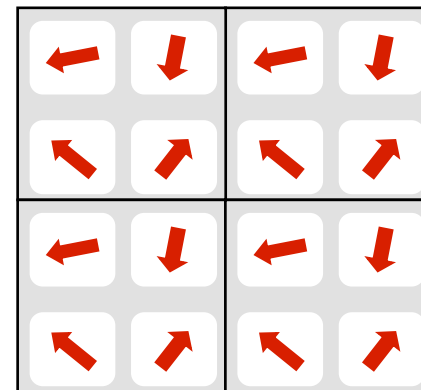
Entropie du CPA en fonction du champ à 320 mK

La théorie permet de faire un premier dimensionnement correct mais attention à l'application

Principe d'une désaimantation adiabatique

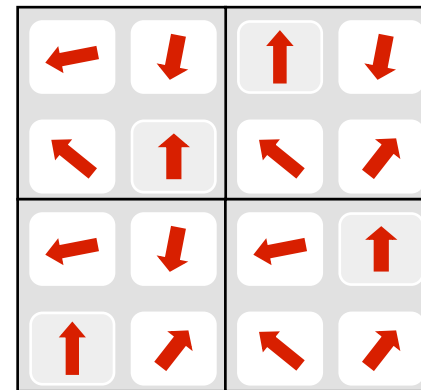
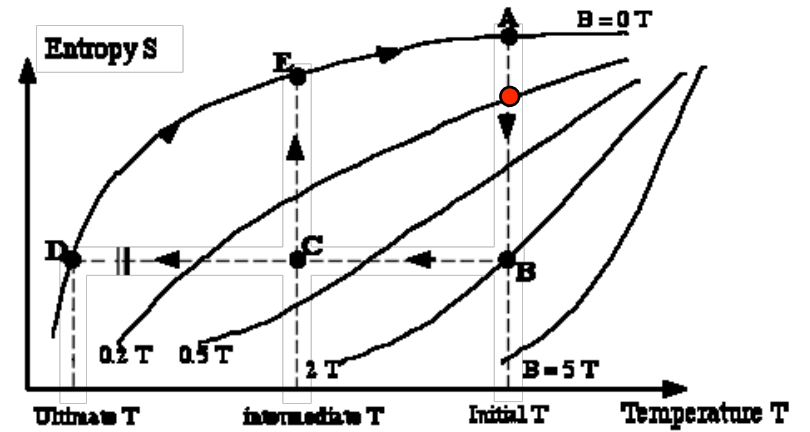
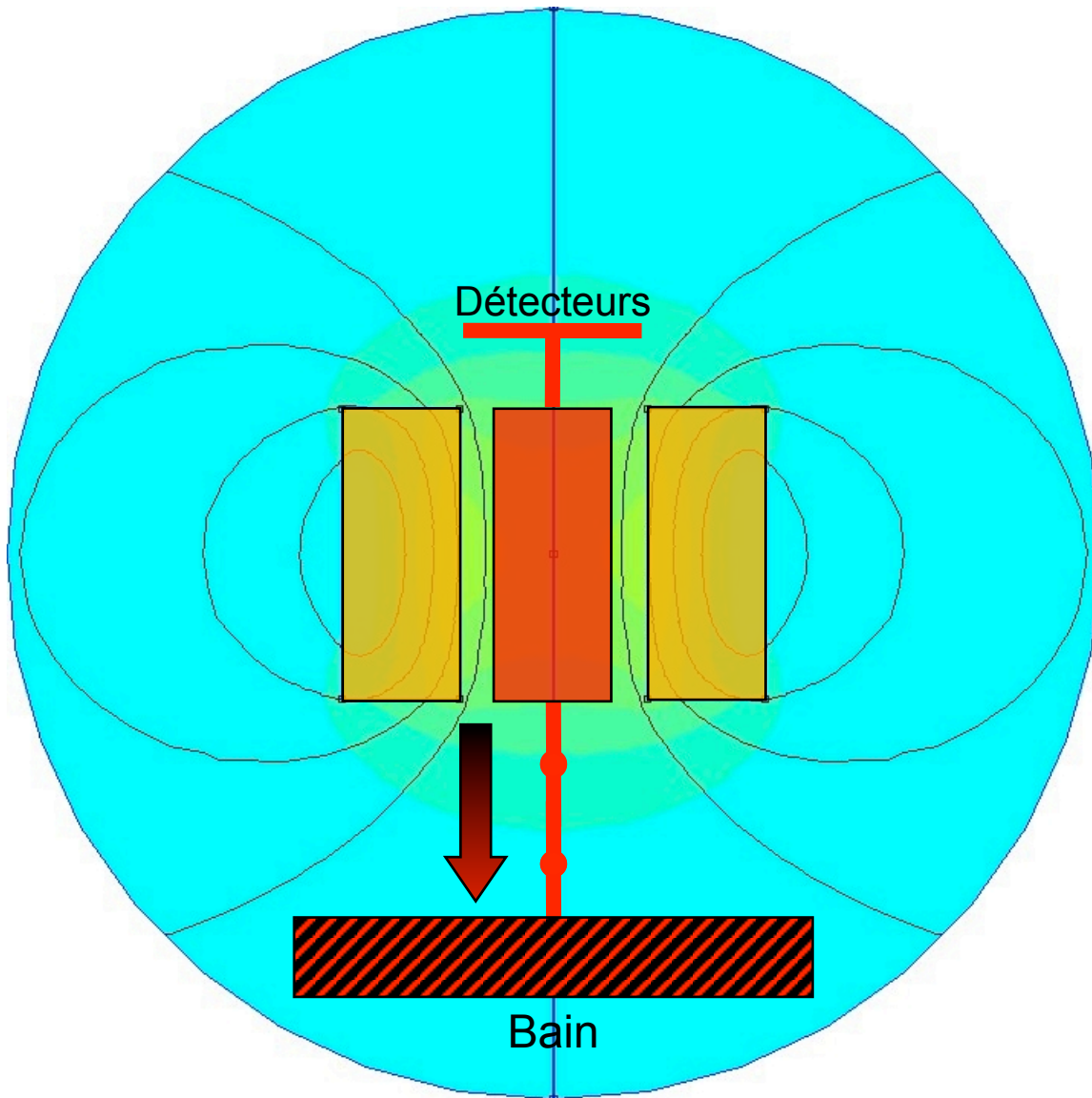


Sels paramagnétiques

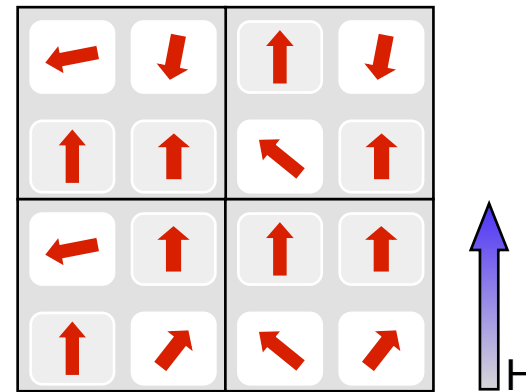
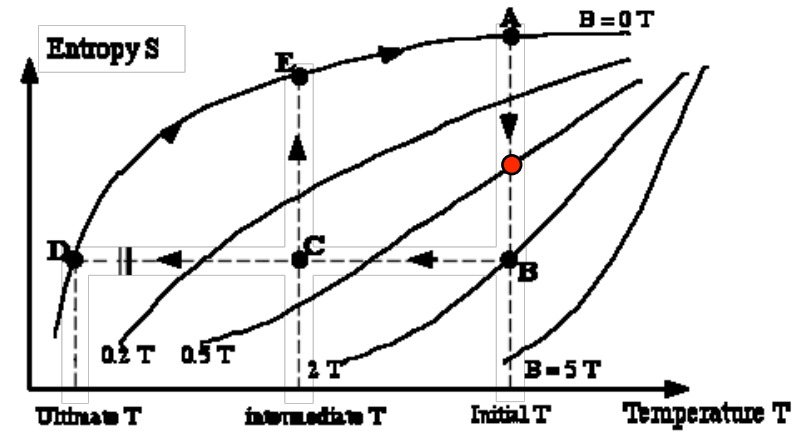
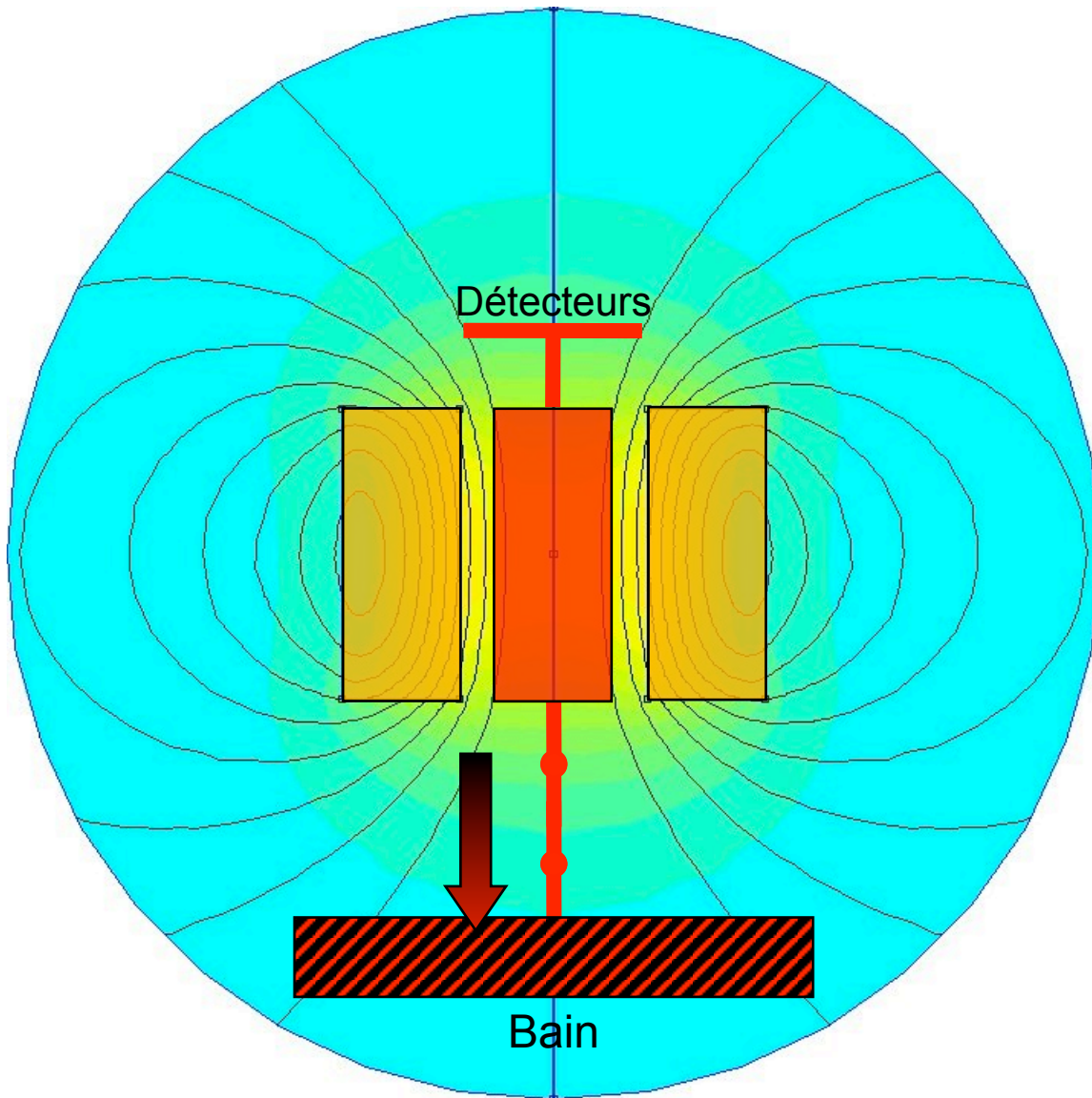


H=0 T

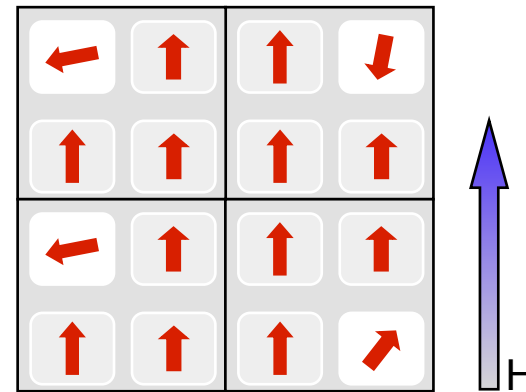
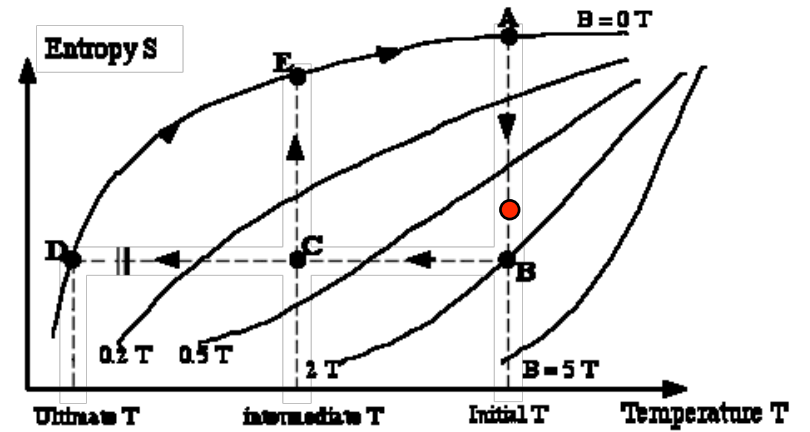
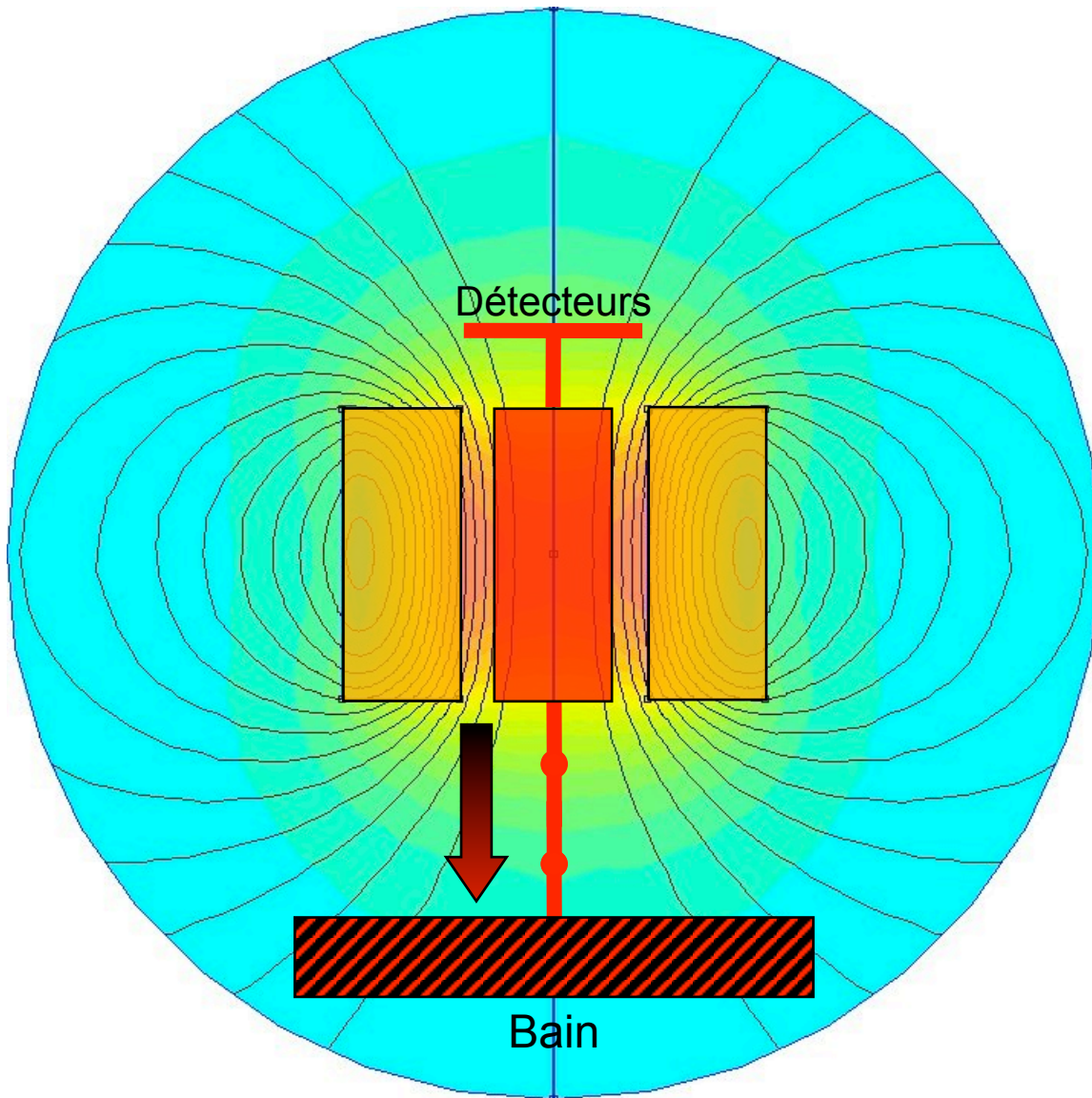
Principe d'une désaimantation adiabatique



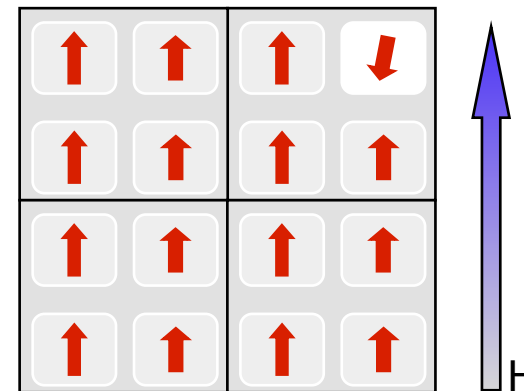
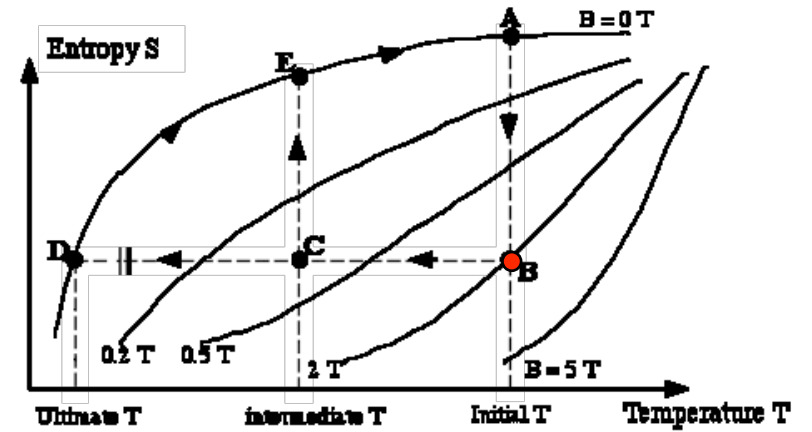
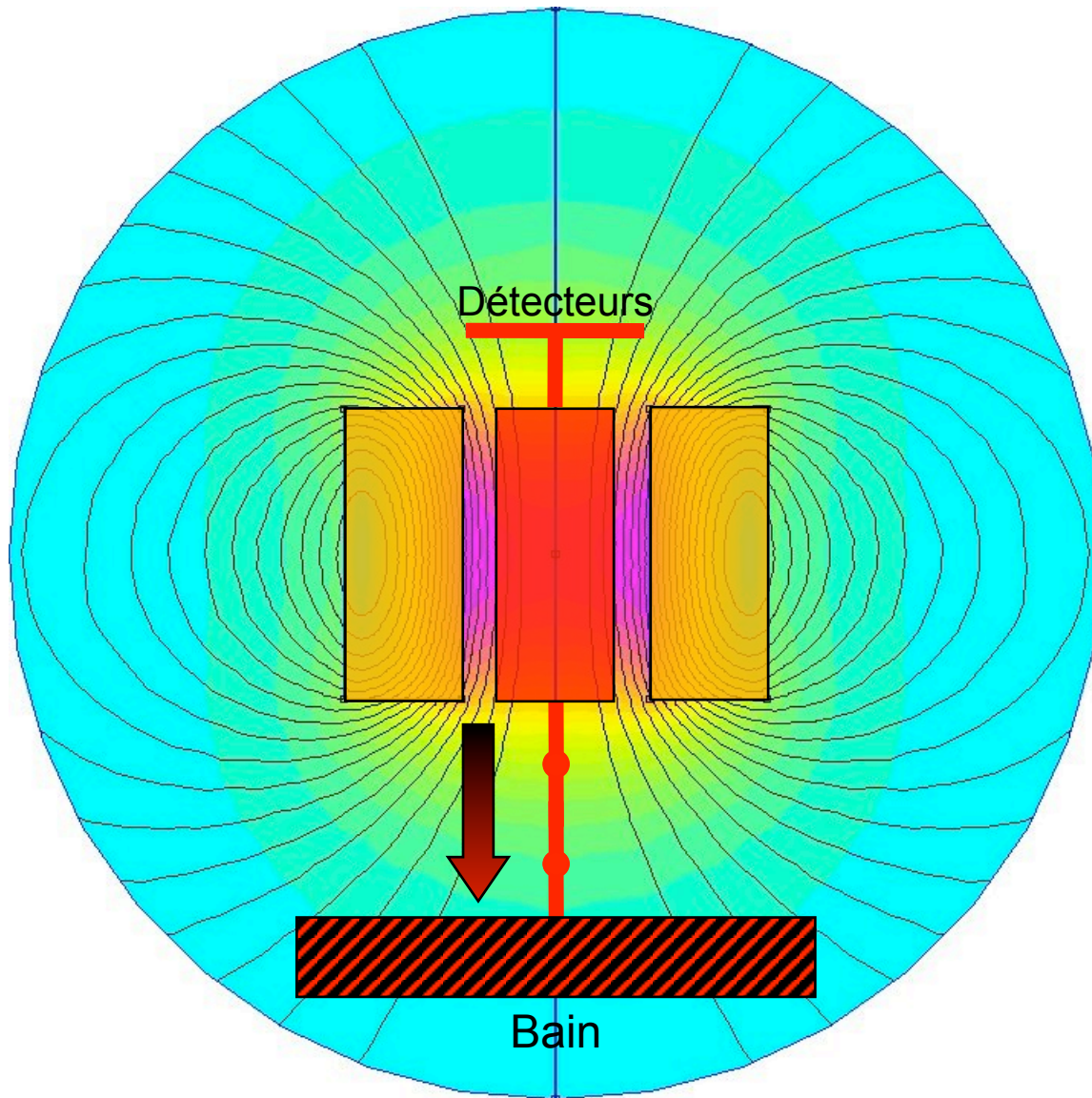
Principe d'une désaimantation adiabatique



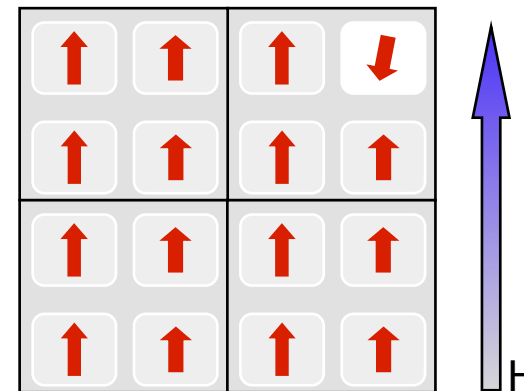
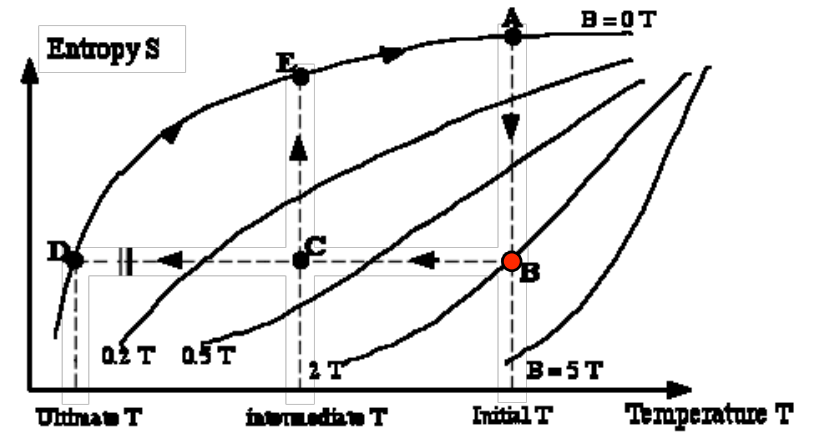
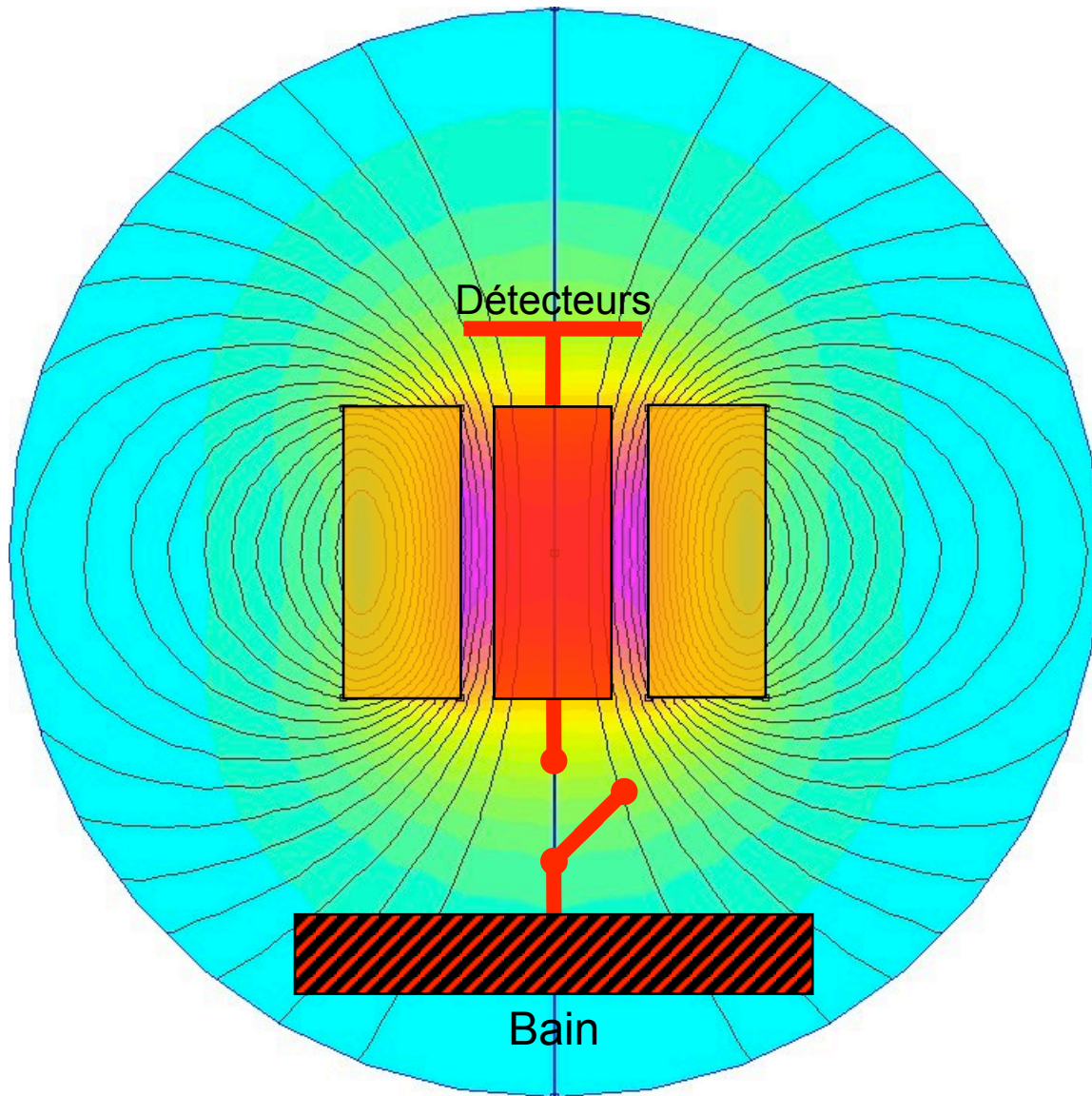
Principe d'une désaimantation adiabatique



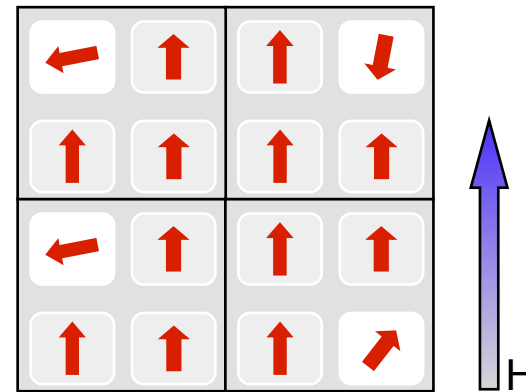
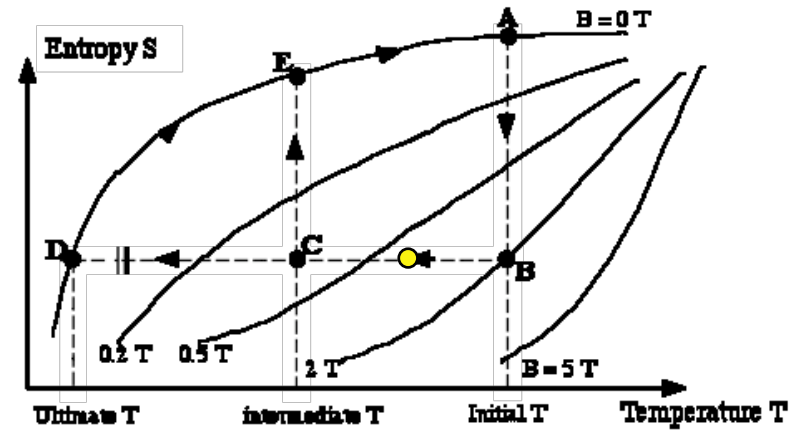
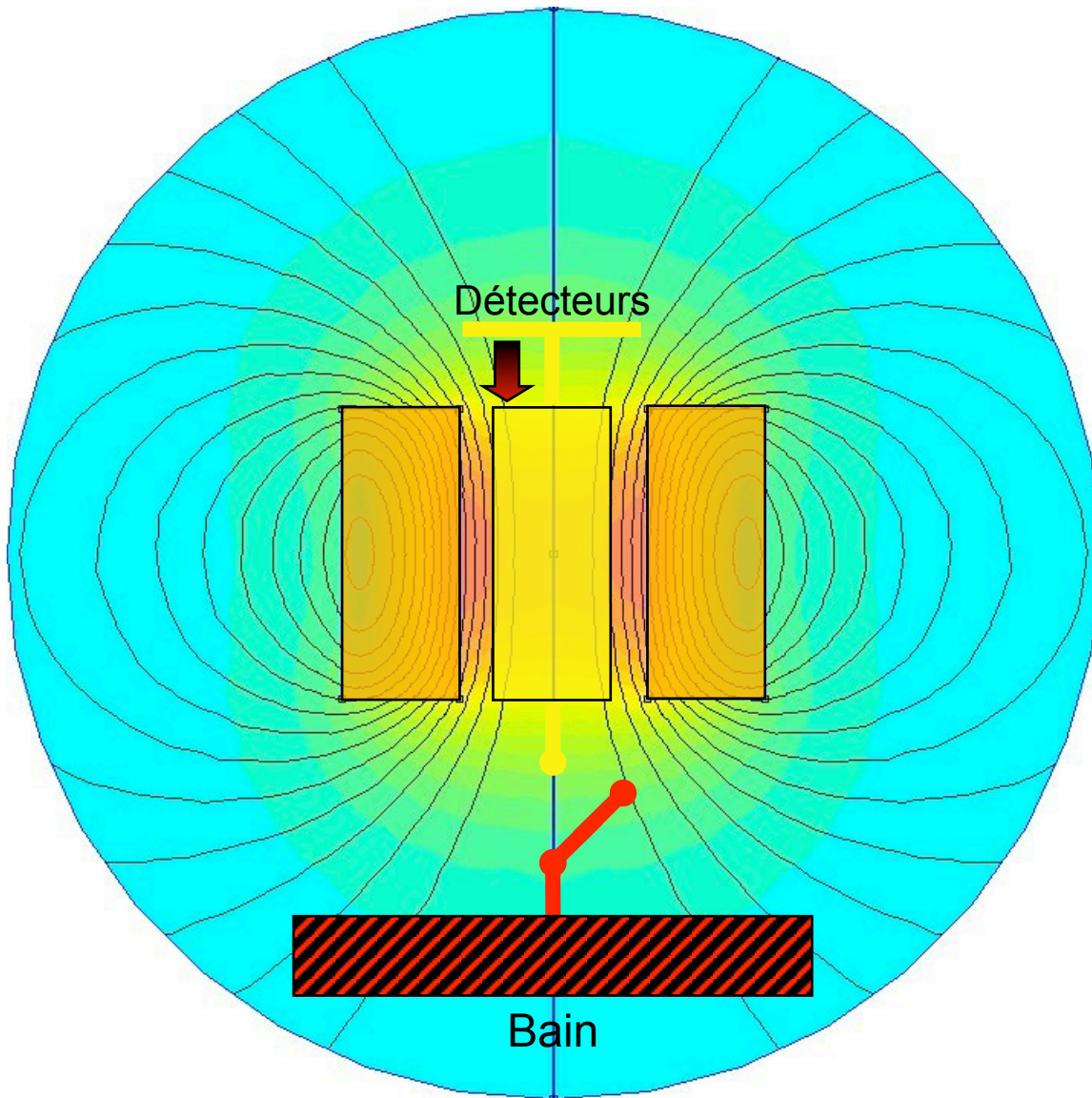
Principe d'une désaimantation adiabatique



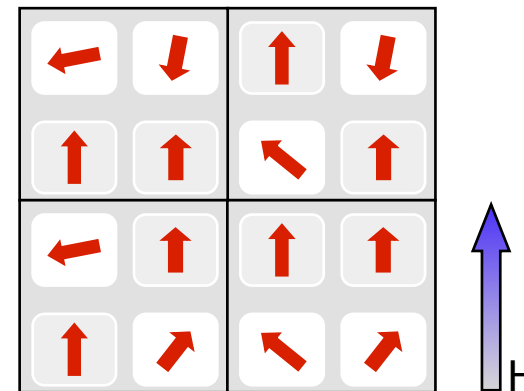
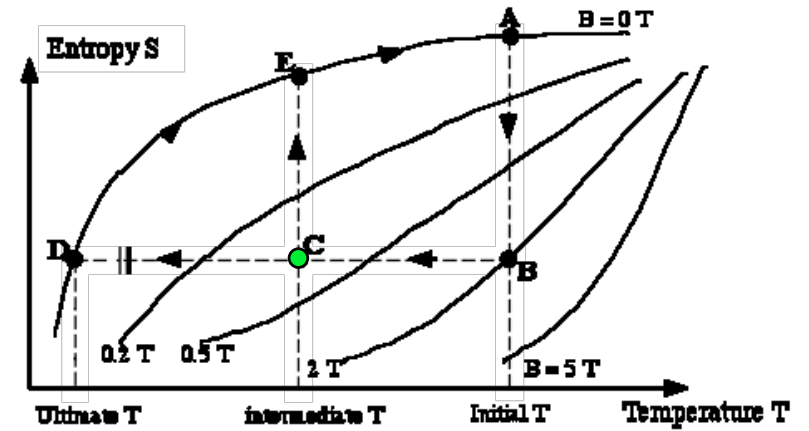
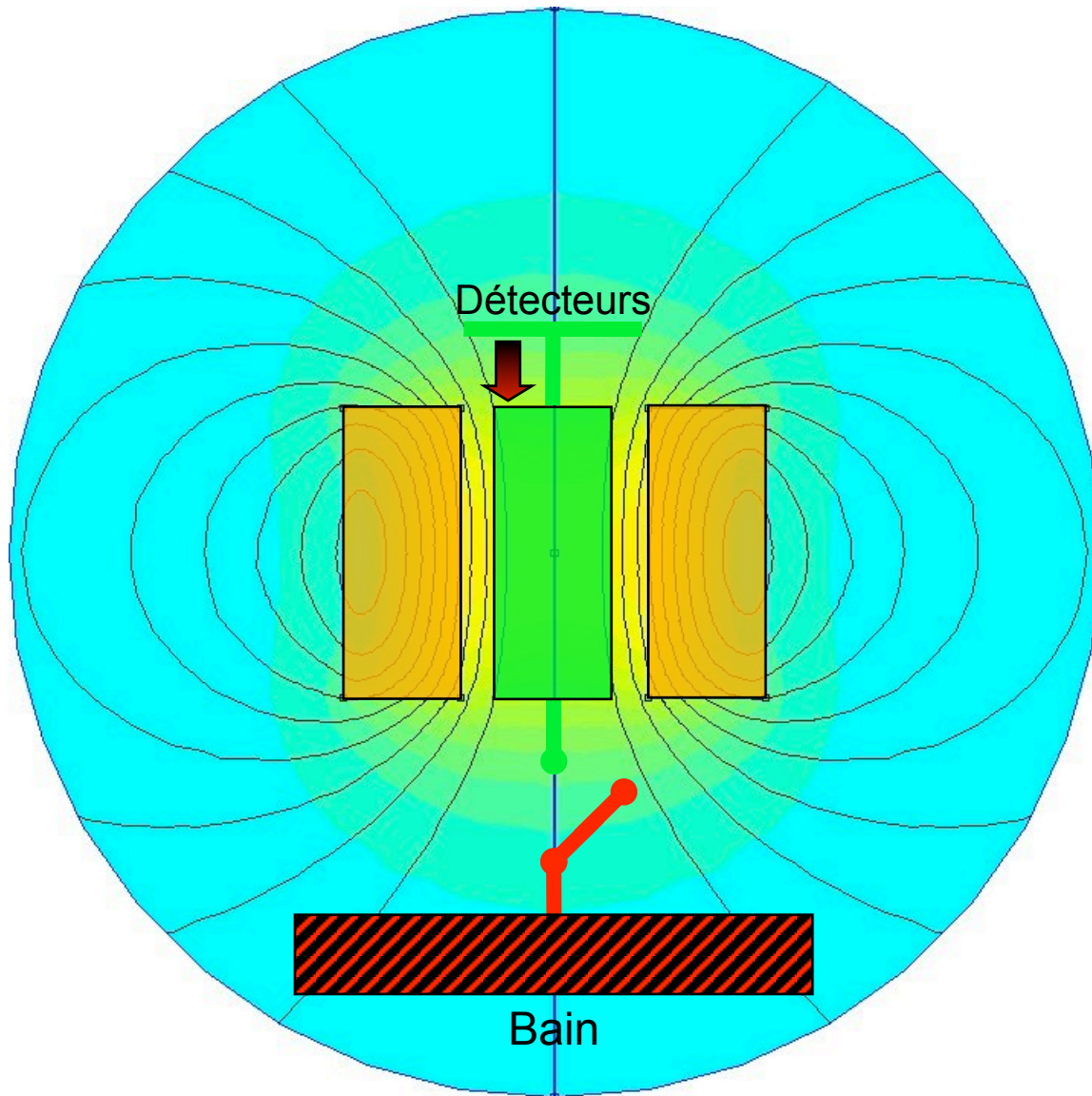
Principe d'une désaimantation adiabatique



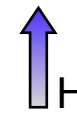
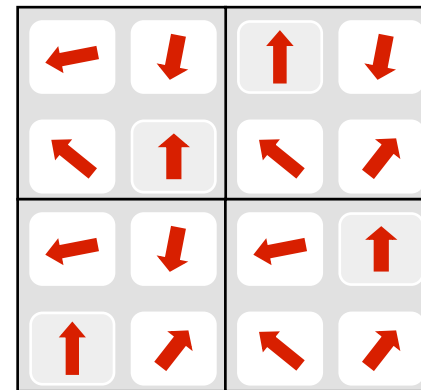
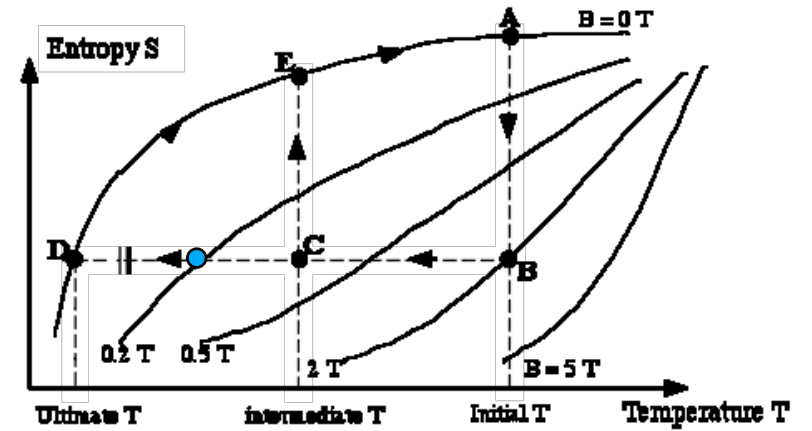
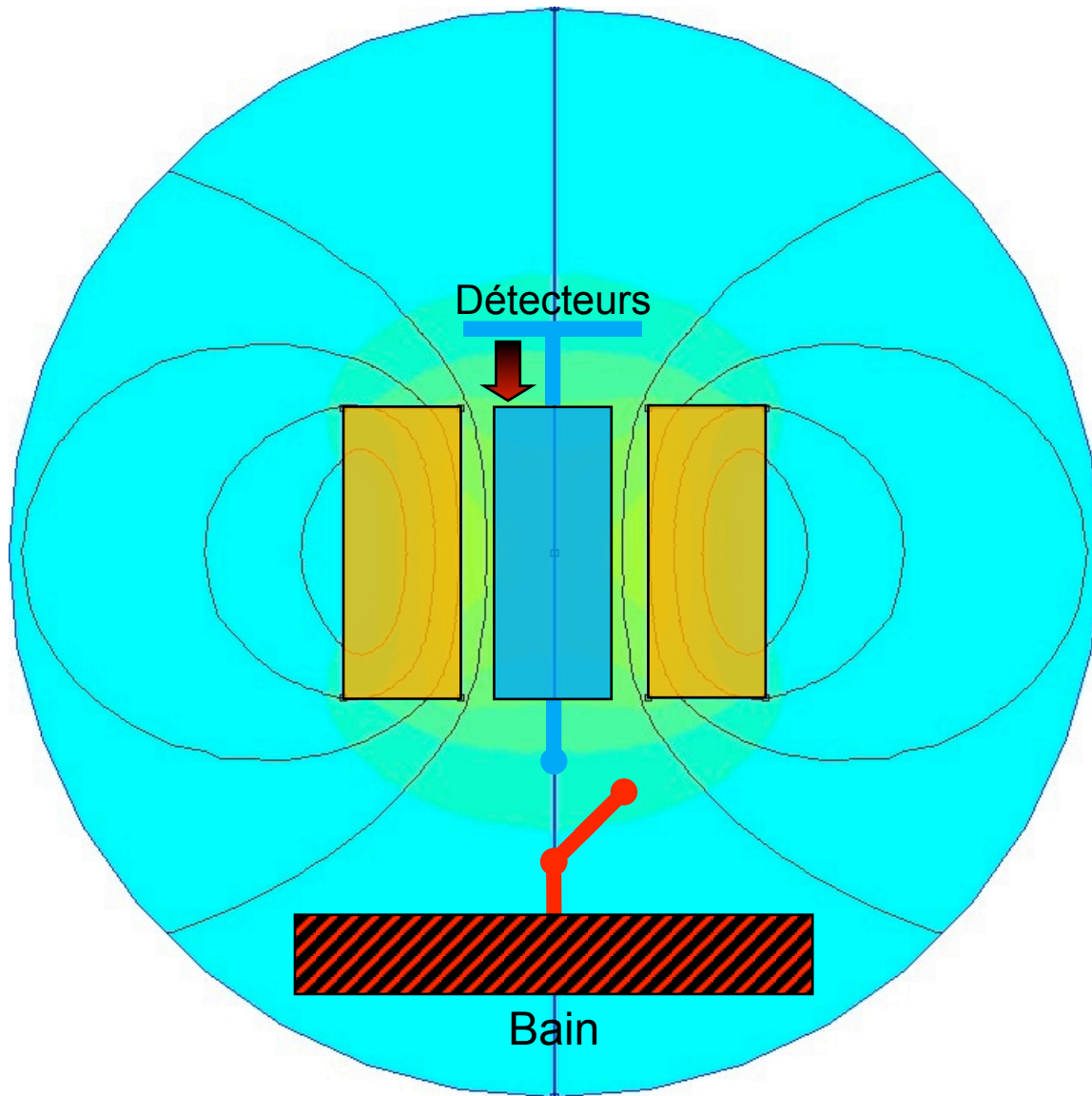
Principe d'une désaimantation adiabatique



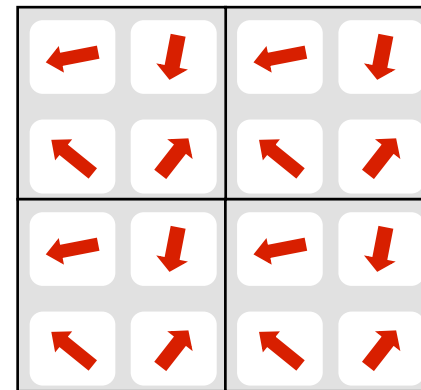
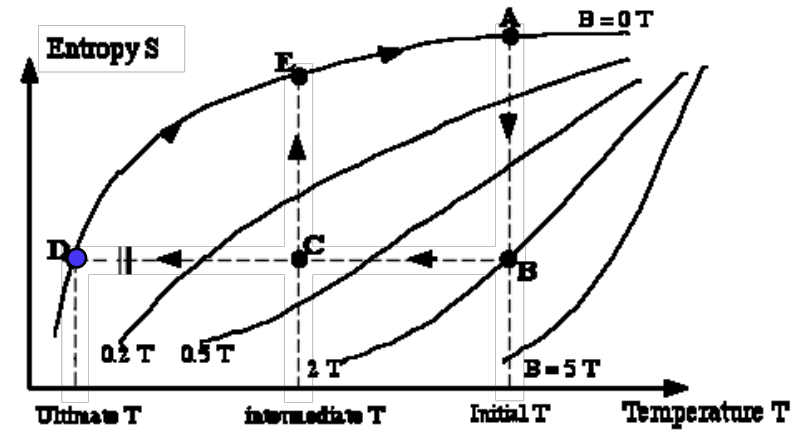
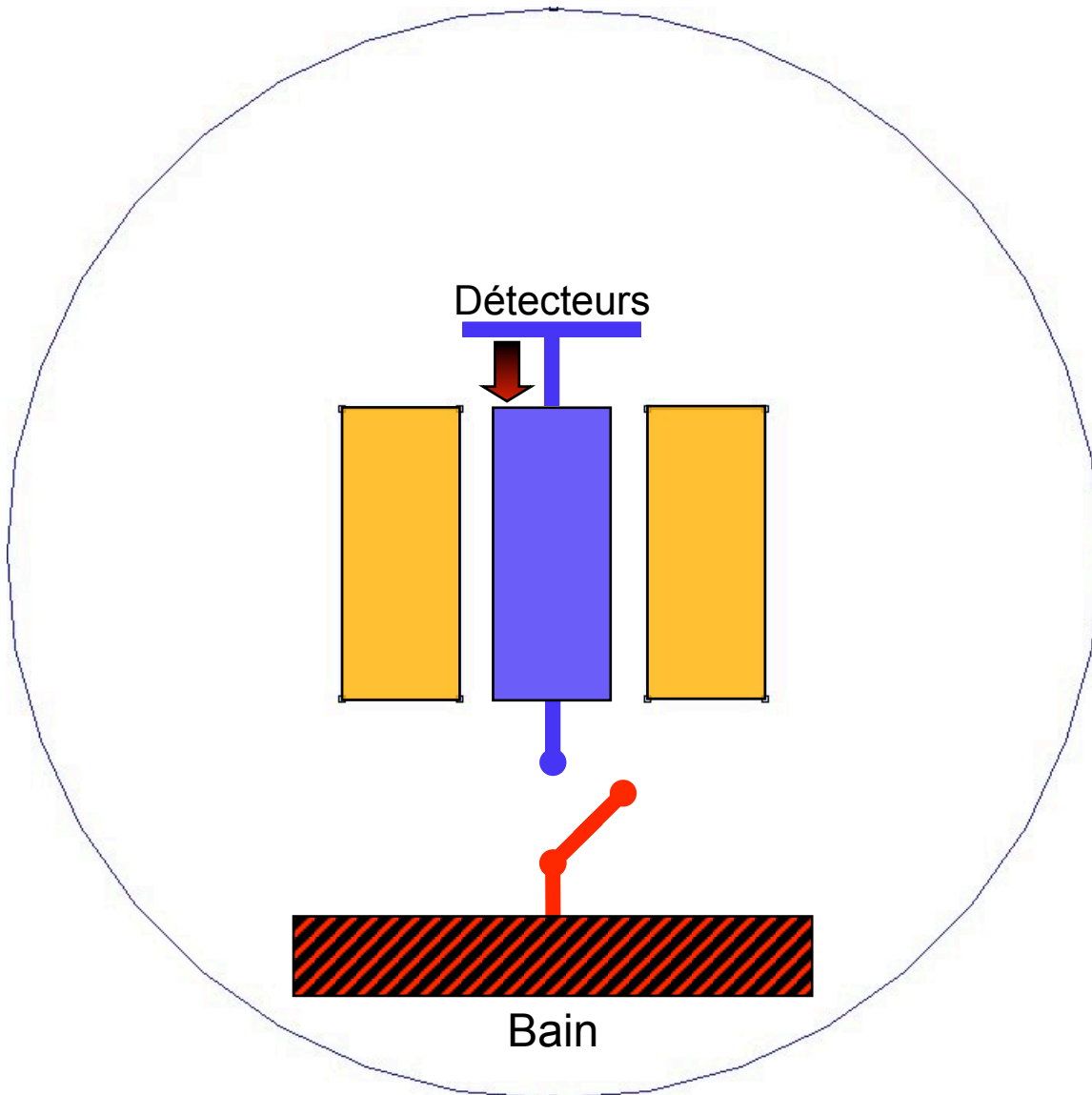
Principe d'une désaimantation adiabatique



Principe d'une désaimantation adiabatique



Principe d'une désaimantation adiabatique



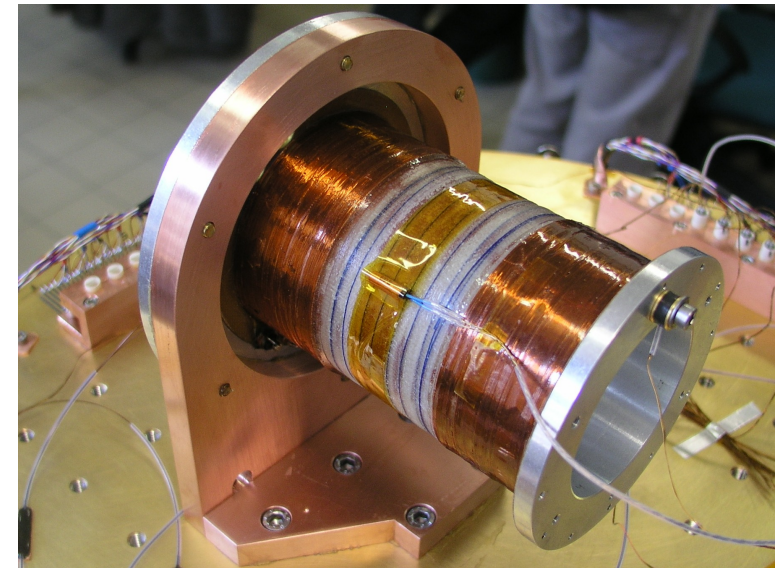
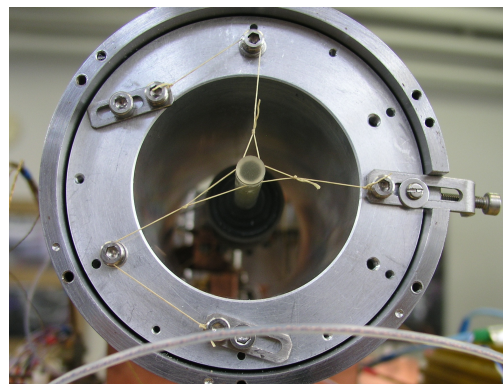
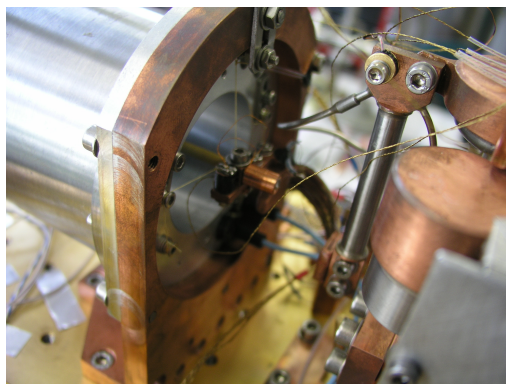
H=0T

Dimensionnement d'un étage de désaimantation

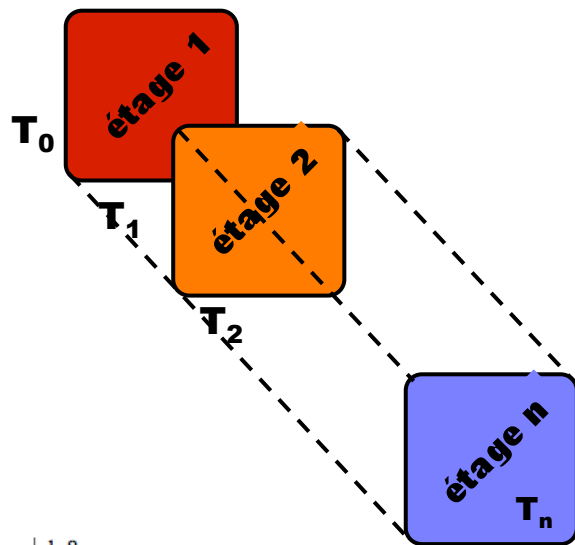
$$Q = \Delta t_{\text{autonomie}} \cdot P_{\text{parasite}} = nT\Delta S$$

N : nombre de mole d'ions magnétiques
Jouer sur la quantité de sels

Dépend du champ

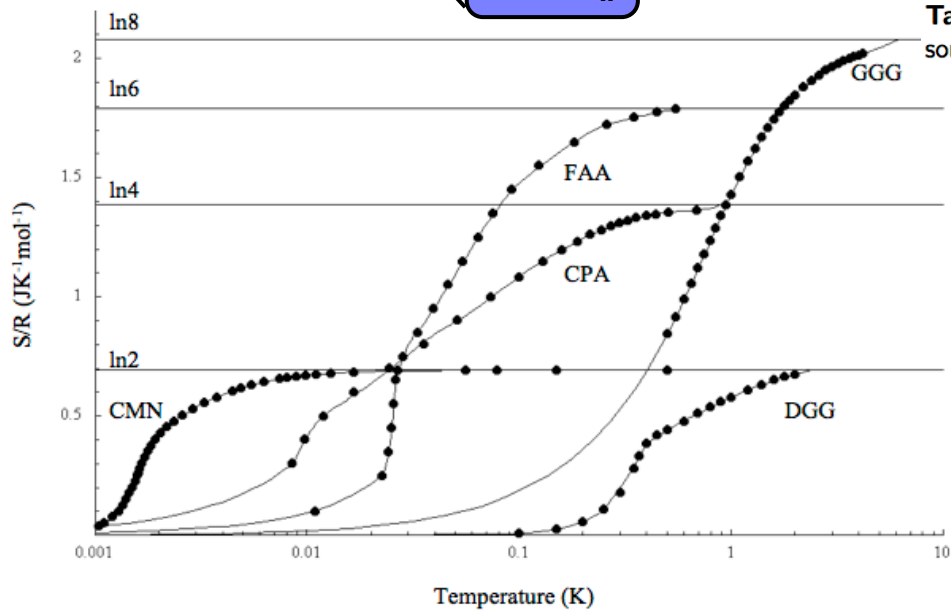


Multi étage

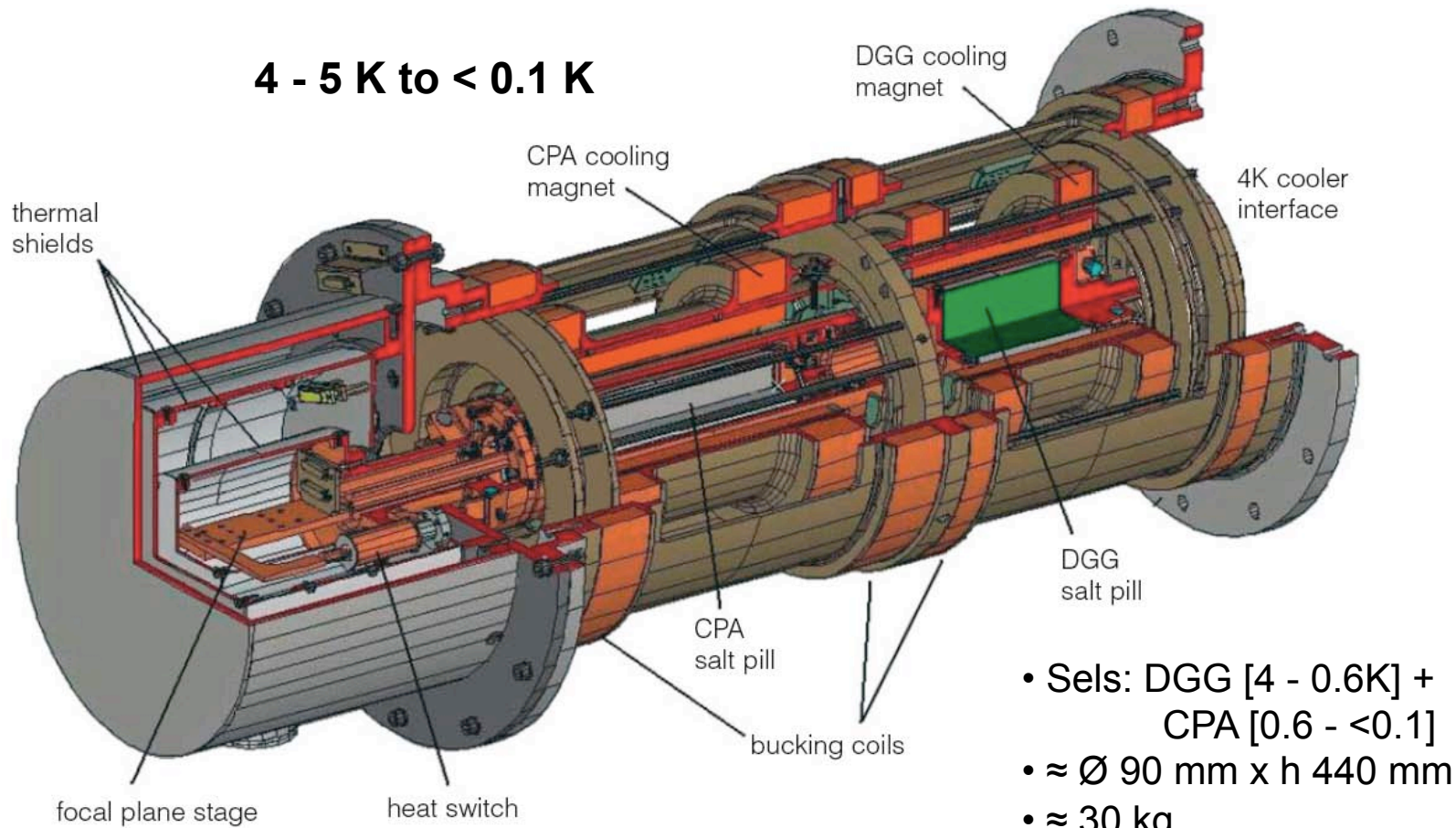


Sel	Formule	ρ g/cm ³	T _{dest.} (K)	M (g/mol)	g	J	T _N	b _i (T)
GGG	Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂	7.14	2023	1012	g ₁₀₀ =1,998 g ₁₁₀ =1,993 g ₁₁₁ = 1,994	7/2	0.8	-
DGG	Dy ₃ Ga ₅ O ₁₂	7.31	>1500	1028	g ₁₀₀ =8,4 g ₁₁₀ =8,5 g ₁₁₁ = 8,0	1/2	0.373	0.16
CPA	CrK(SO ₄) ₂ .12H ₂ O	1.86	362	499	1,98	3/2	0.009	0.01
FAA	Fe(NH ₄)(SO ₄) ₂ .6H ₂ O	1.71	312	482	1.97	5/2	0.026	0.05
CMN	Ce ₂ Mg ₃ (NO ₃) ₁₂ .24H ₂ O	2,09	-	1530	g=1,98 g=0,03	1/2	0.009	-

Tableau 2 Principaux sels et grenats utilisés pour la réfrigération magnétique en dessous de 4 K. Ces valeurs sont tirées de [7]



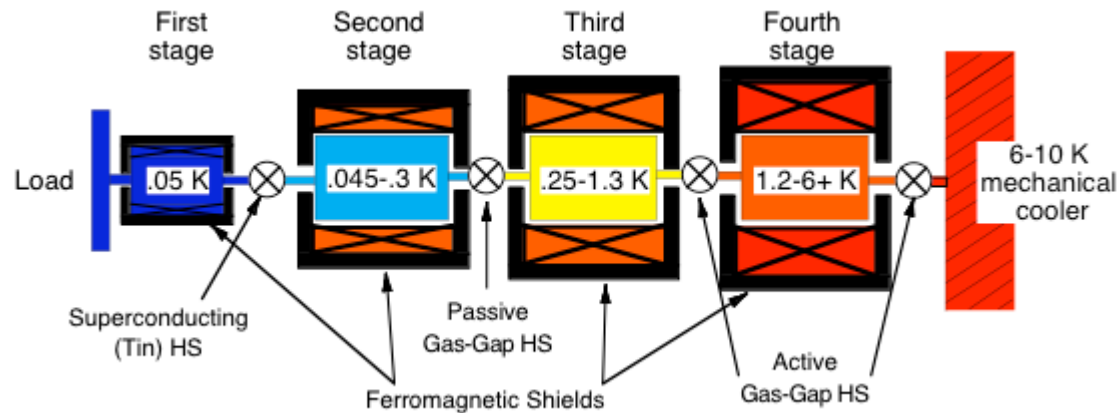
Double désaimantation



(courtesy of Ian Hepburn)

- Sels: DGG [4 - 0.6K] + CPA [0.6 - <0.1]
- $\approx \varnothing 90 \text{ mm} \times h 440 \text{ mm}$
- $\approx 30 \text{ kg}$
- $\approx 3 \text{ Tesla}$
- Opération $T < 100 \text{ mK}$

Solution 1 : froid magnétique continu



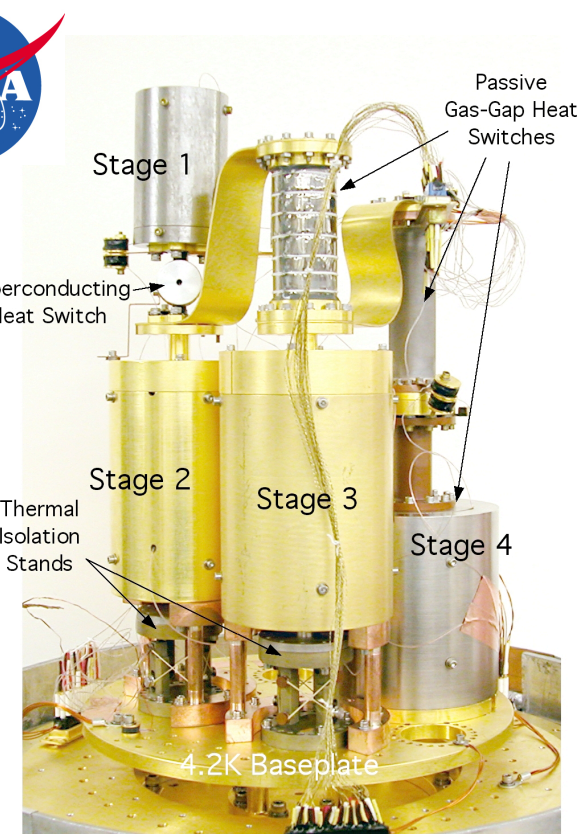
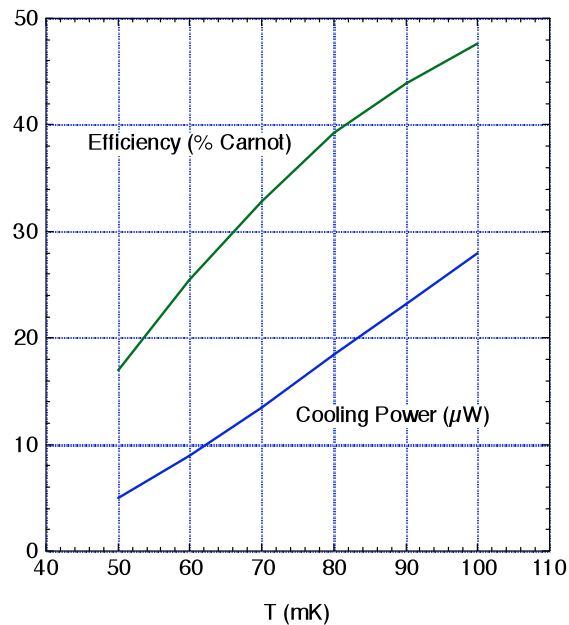
4-stage ADR

Froid continu avec stabilité de $8 \mu\text{K rms}$
(à 100 mK)

50% efficacité thermodynamique (à 100 mK)

Puissance froide disponible importante

Pas de puissance intermédiaire, pas de
température stable intermédiaire



Interrupteur supraconducteur

Conduction dans les métaux

Conduction électronique : $\kappa \propto T$

Conduction phonons : $\kappa \propto T^3$

Interaction électrons-phonons : $\kappa \propto T^2$

Conduction dans les supraconducteur

Electrons => paires de Cooper

Excitations électroniques baissent
de façon exponentielle



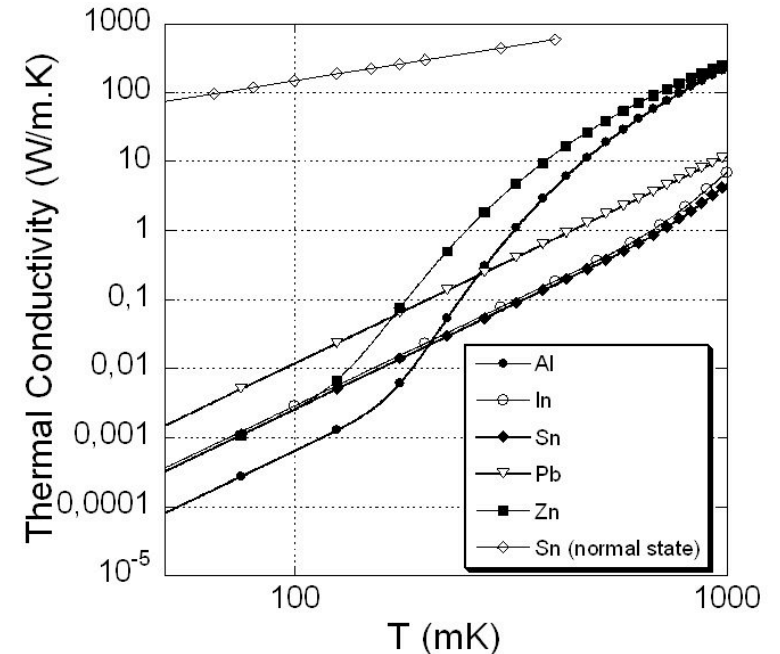
Plus de conduction électronique lorsque
suffisamment loin de T_c

Conduction phonons : $\kappa \propto T^3$

Etat **ON** : état métallique

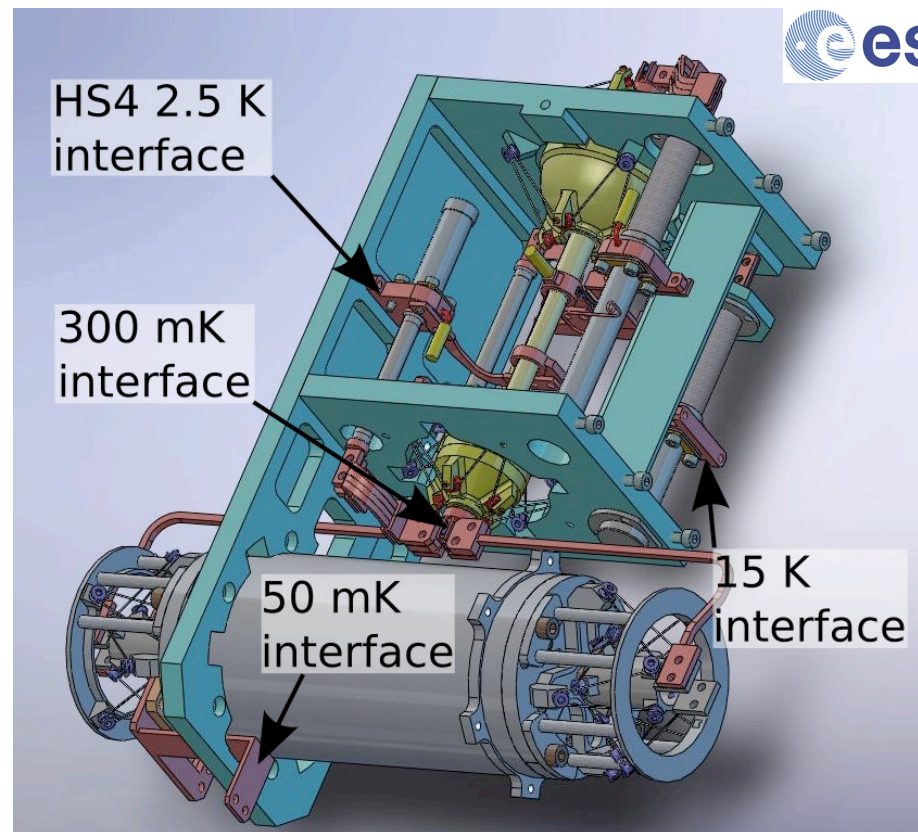
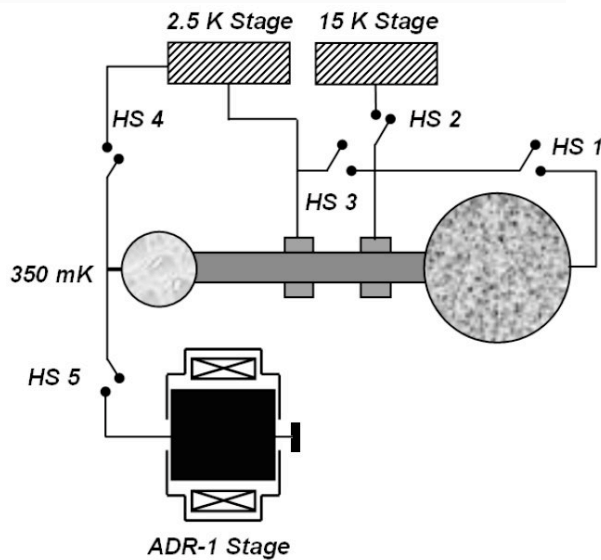
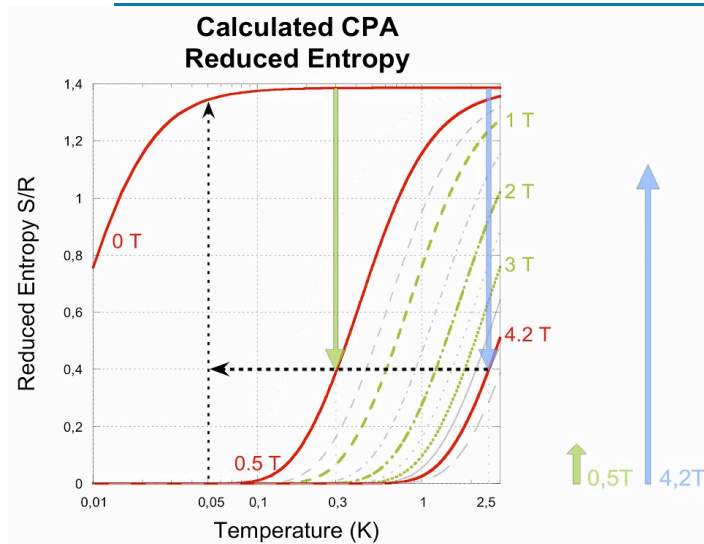
Etat **OFF** : état supraconducteur

Bascule : champ magnétique (dizaines de mT)



Supraconducteur	T_c (K)
Aluminium	1.2
Zinc	0.8
Etain	3.7
Plomb	7.2
Indium	3.4

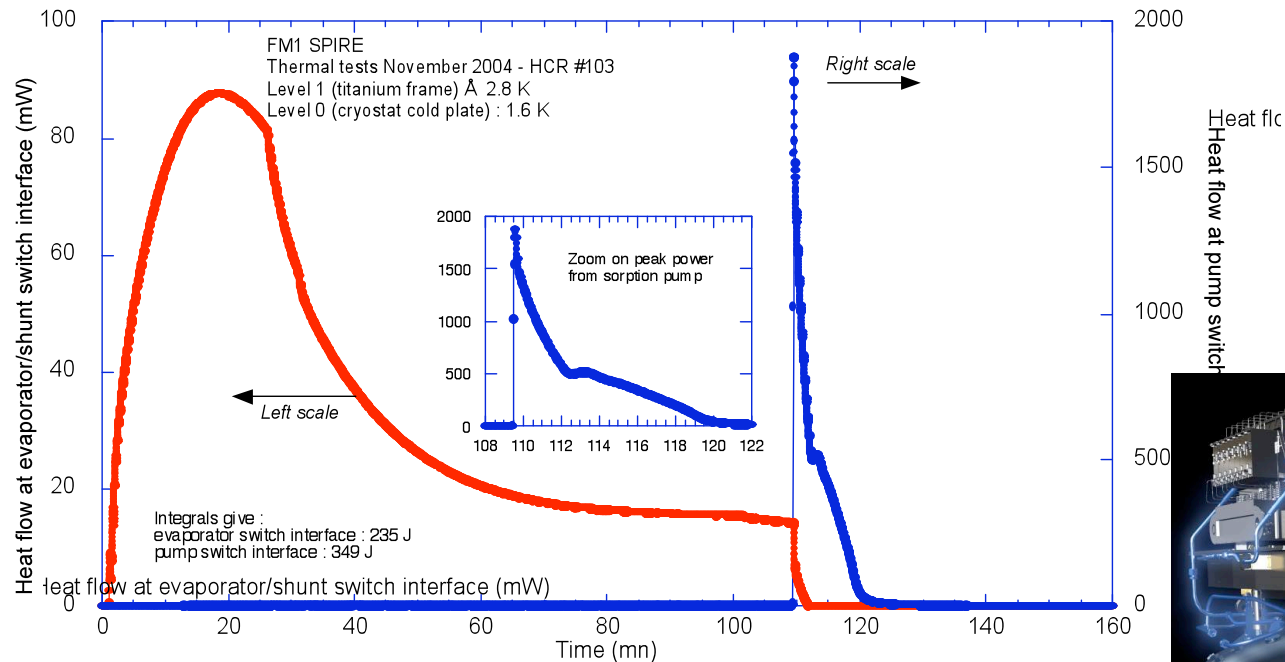
Solution 2 : Pré refroidir désaimantation



1 μ W de puissance froide utile à 50 mK
 10 μ W de puissance utile à 300 mK
 30 heures d'autonomie
 8 heures de recyclage

Poids du sorption : 300 g (sans structure)

Gestion des pics de puissance



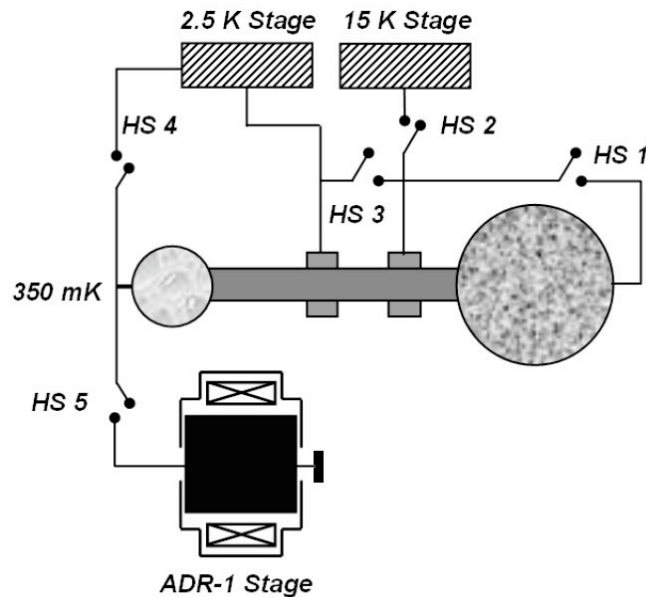
Herschel : refroidissement de la pompe : ≈ 2 W dissipé

missions \rightarrow Impossible dans le cadre des futures (SPICA/SAFARI, IXO)

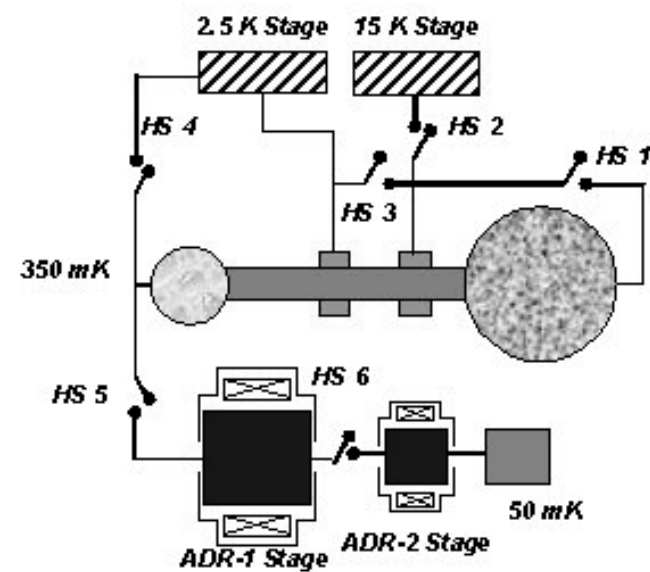
\rightarrow Gestion soigneuse des flux de puissance



Association sorption + désaimantation



Version « one shot »



Version continu

Moins efficace mais plus
léger que l'option
désaimantation multi étage

Conclusion

Réfrigération par évaporation

- Température limite : ≈ 250 mK
- Dizaine de μW disponibles
- Système one-shot
- Autonomie importante pour encombrement réduit
- Pas de champ magnétique

Réfrigération magnétique

- Température limite : dizaine mK
- Puissance et autonomie dépend du champ/quantité de sel
- Système one shot mais possibilité de multiplier les étages
- Potentiellement masse importante (étages haute température)
- Présence de champ magnétique (à écranter)