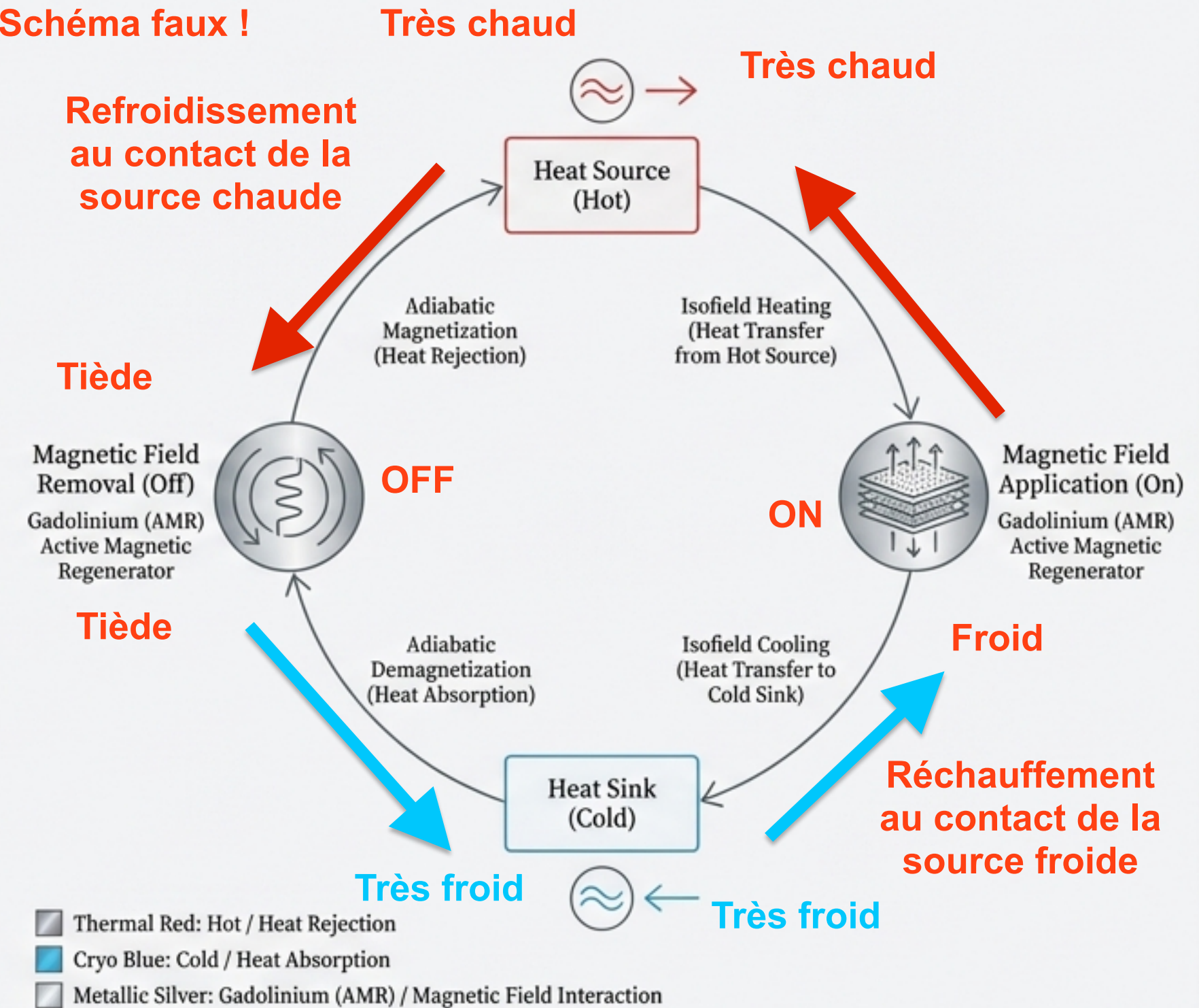


Réfrigération Magnétique : La Révolution du Froid Vert

De l'effet magnétocalorique aux régénérateurs actifs (AMR)



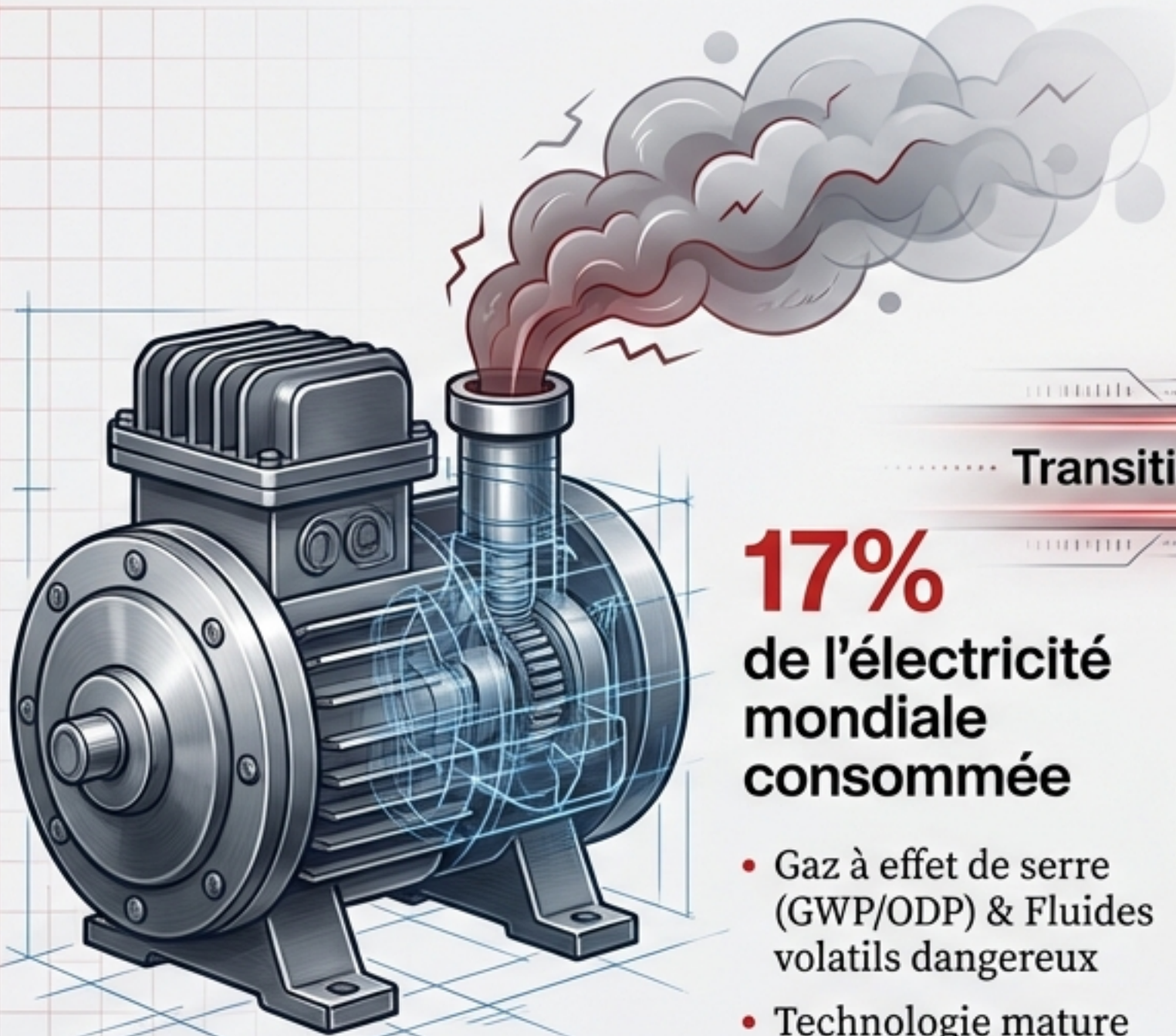
Schéma faux !



Une rupture technologique : Remplacer la compression de vapeur par la thermodynamique du spin.
Objectif : Efficacité énergétique et suppression des gaz à effet de serre.

Le Froid Traditionnel : Une Impasse Énergétique

❗ Problème : Compression de Vapeur

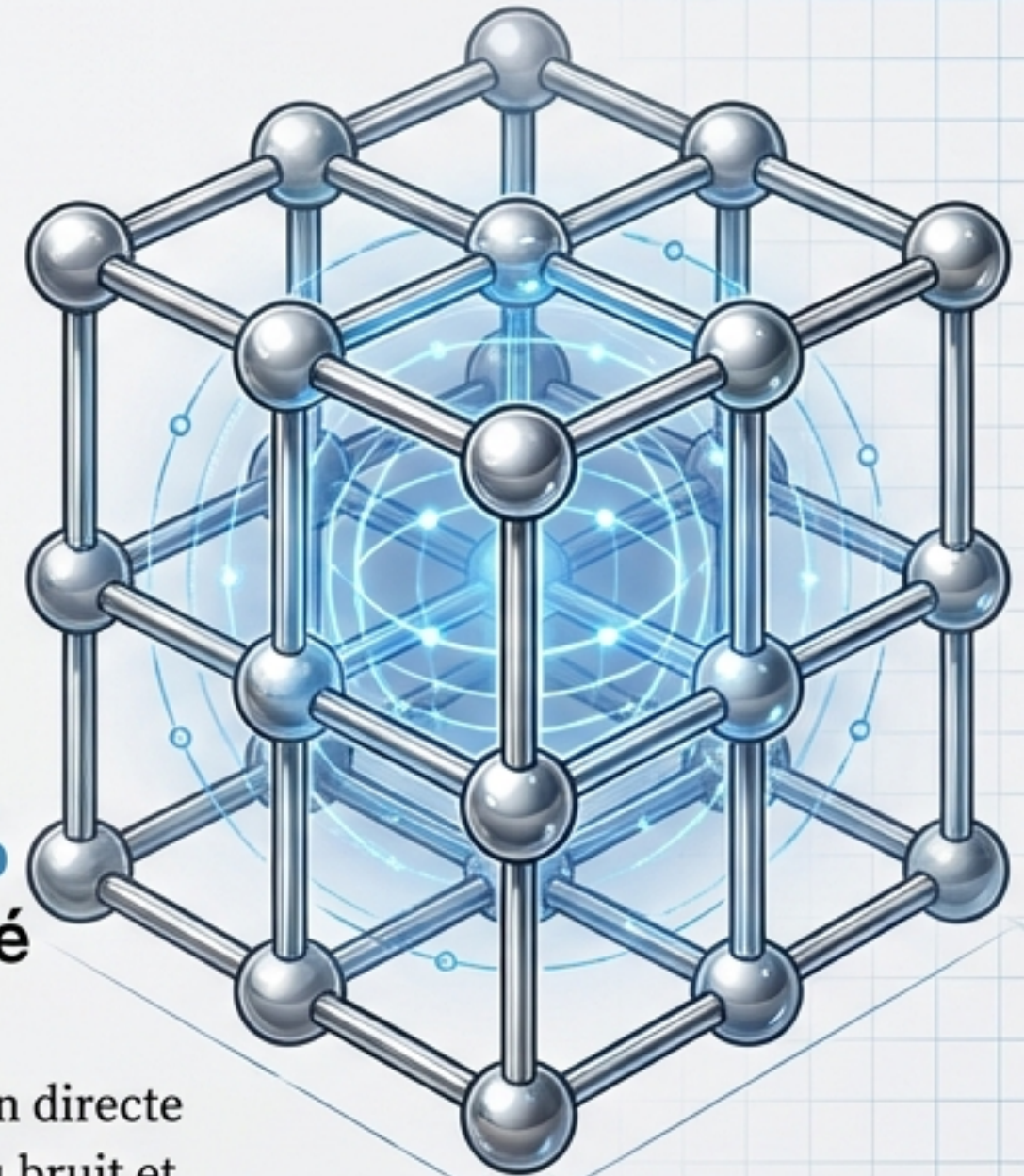


17%
de l'électricité
mondiale
consommée

- Gaz à effet de serre (GWP/ODP) & Fluides volatils dangereux
- Technologie mature mais saturée

Transition Nécessaire

❗ Solution : Réfrigération Magnétique

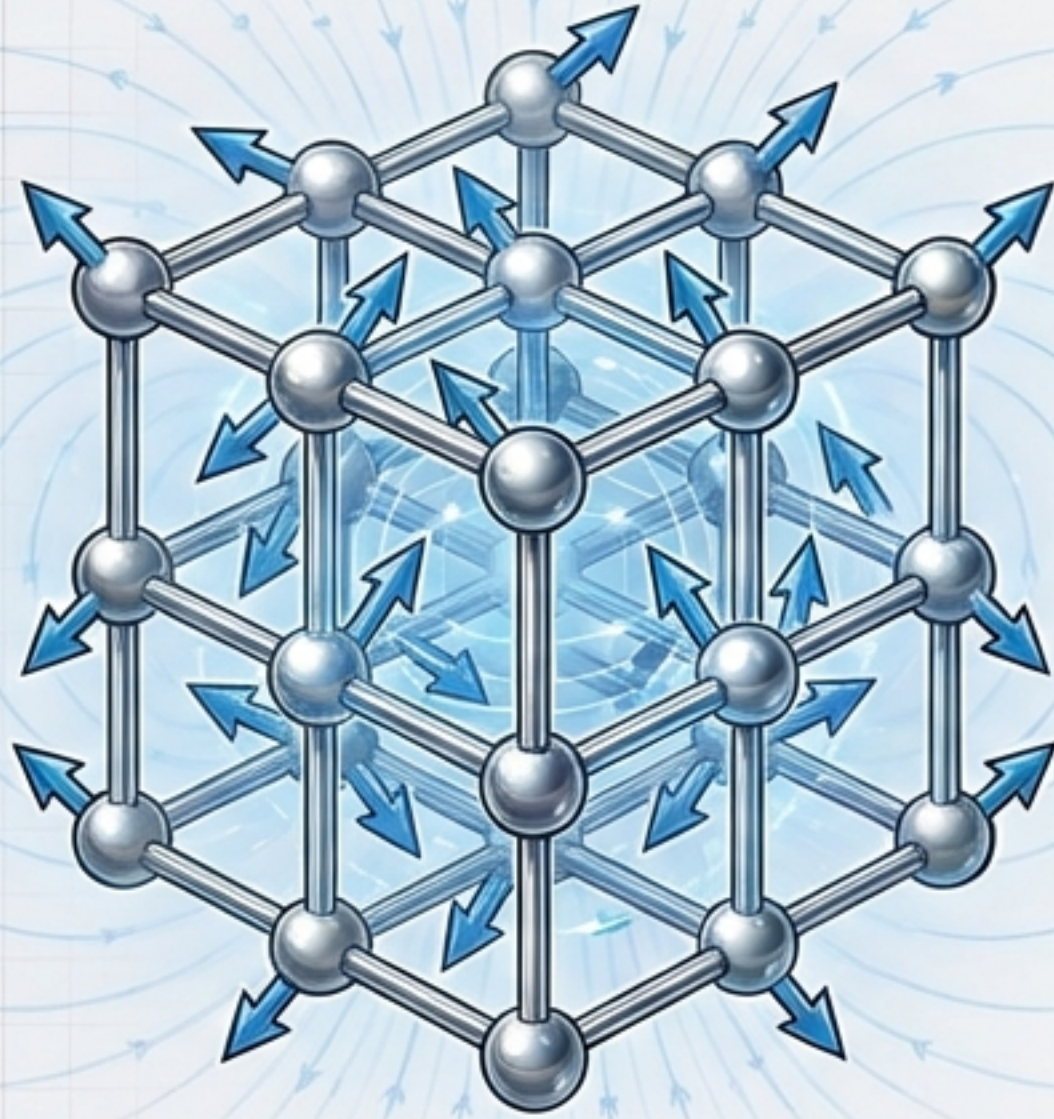


30-60%
d'efficacité
Carnot

- Zéro émission directe
- Réduction du bruit et des vibrations

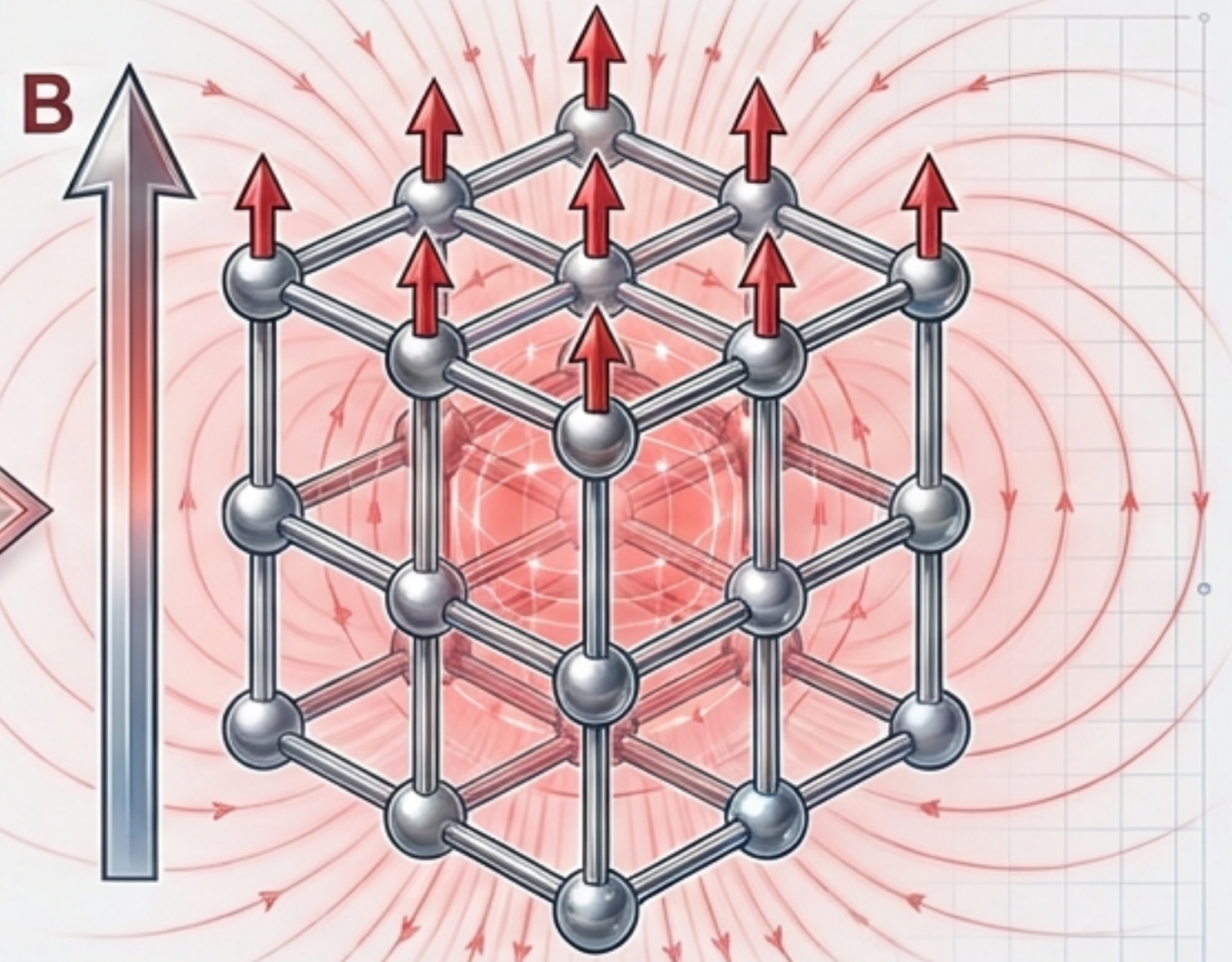
L'Effet Magnétocalorique (MCE) : Ordonner pour Refroidir

Sans Champ Magnétique (0 T)



Désordre (Entropie Haute) = **Froid**

Avec Champ Magnétique (> 1 T)



Ordre (Entropie Basse) = **Chaleur Rejetée**

Transition

Application d'un champ = Baisse d'entropie magnétique ($\Delta S_m < 0$)
→ Hausse de température adiabatique ($\Delta T_{ad} > 0$)

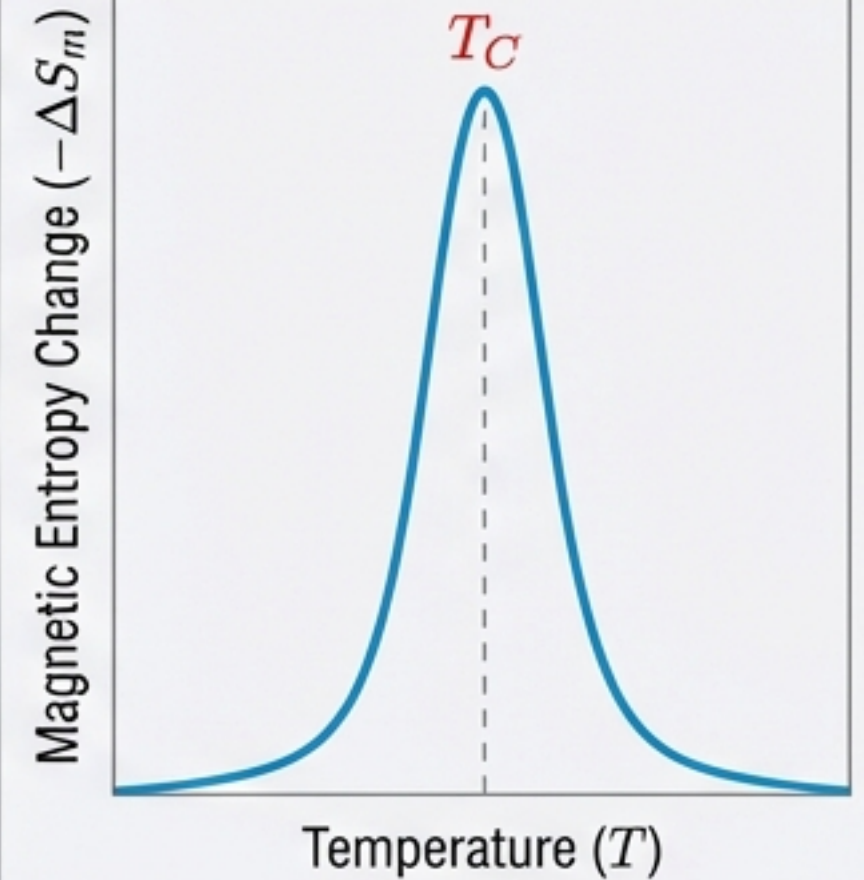
La Bataille de l'Entropie : Une Approche Thermodynamique

Proche de T_C , une petite variation de champ (B) provoque un changement massif d'entropie. C'est la source de la puissance frigorifique.

Proche de T_C , une petite variation de champ (B) provoque un changement massif d'entropie. C'est la source de source de la puissance frigorifique.

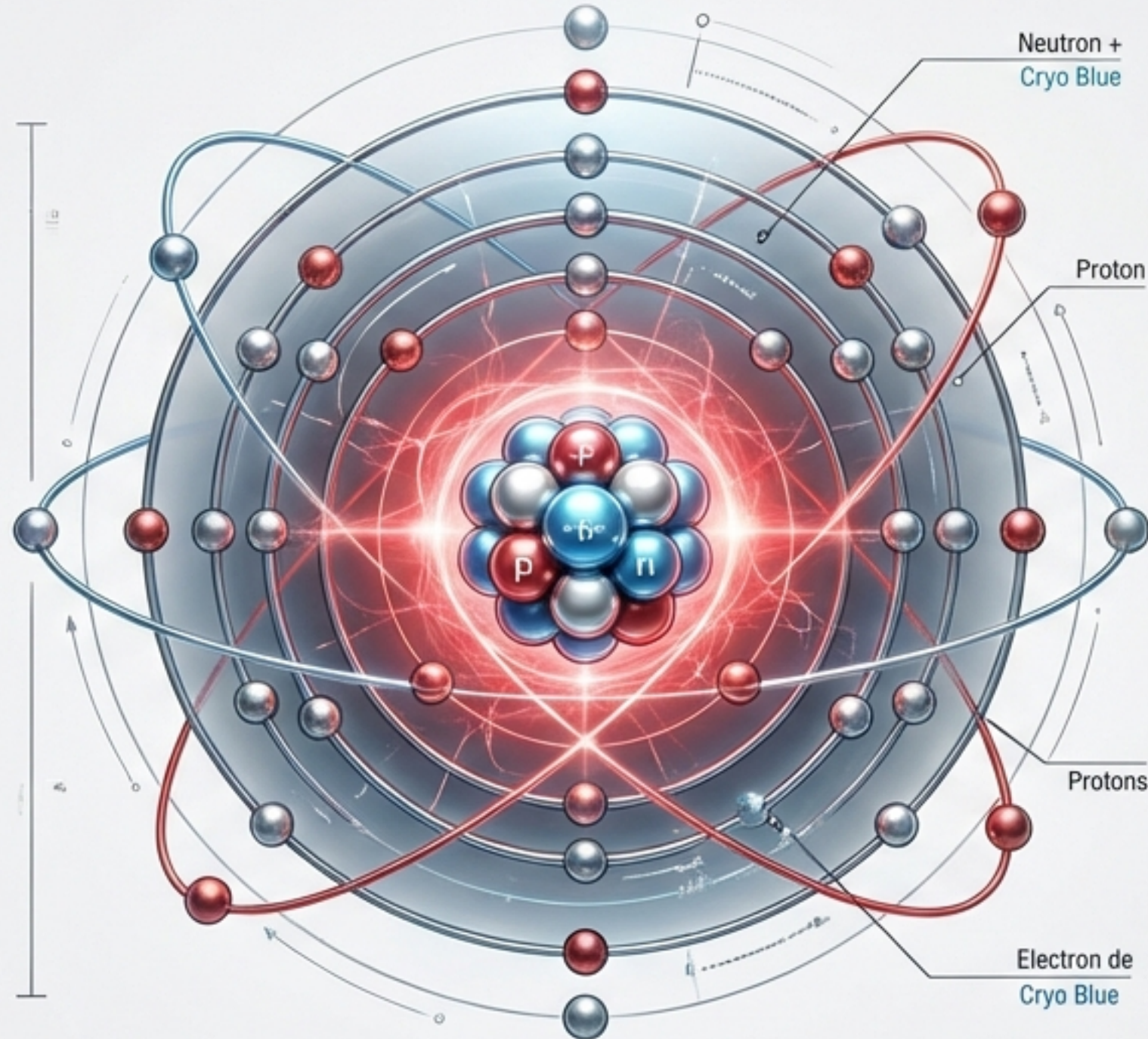
$$\left(\frac{\partial S}{\partial B} \right)_T = \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_B$$

Lien fondamental entre Magnétisme (M, B) et Thermodynamique (S, T).



Pic de variation d'entropie à la température de Curie (T_C).

Le Protagoniste : Gadolinium (Gd)



Technical Specifications

Matériau de référence
(‘Benchmark Material’)

Point de Curie (T_C) $\approx 293\text{ K}$ (20°C) :
Idéal pour la température ambiante.

Transition du second ordre :
Pas d’hystérésis magnétique majeure.

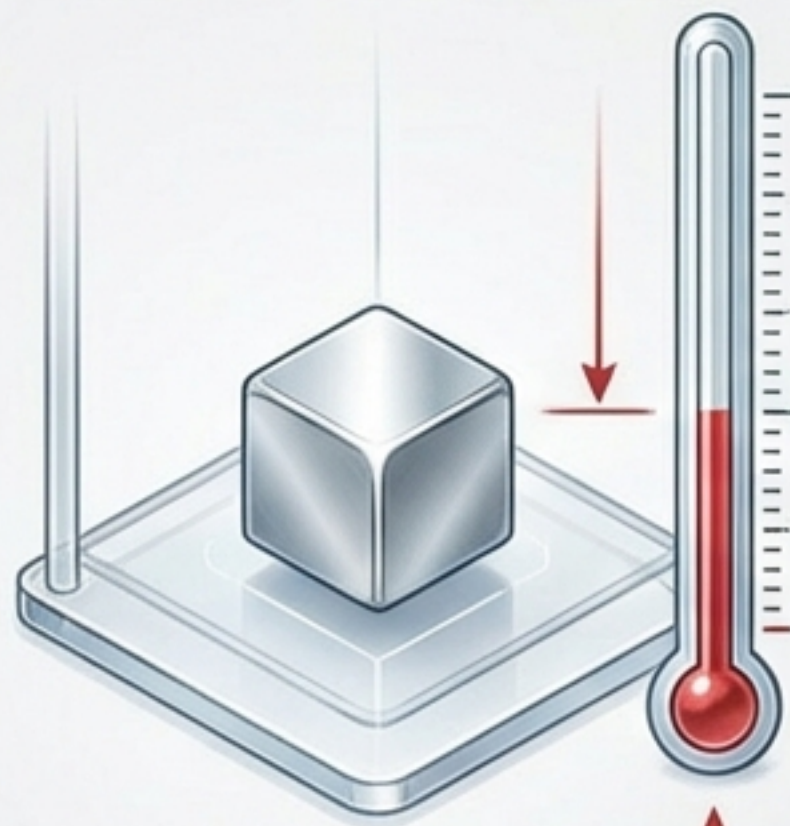
Capacité calorifique (C_p) $\approx 240\text{ J/kg}\cdot\text{K}$

Performance : Sous 2 Tesla, $\Delta T_{ad} \approx 6\text{ K}$



Du Matériau au Système : Le Défi de l'Amplification

Effet Direct : Limite du Matériau



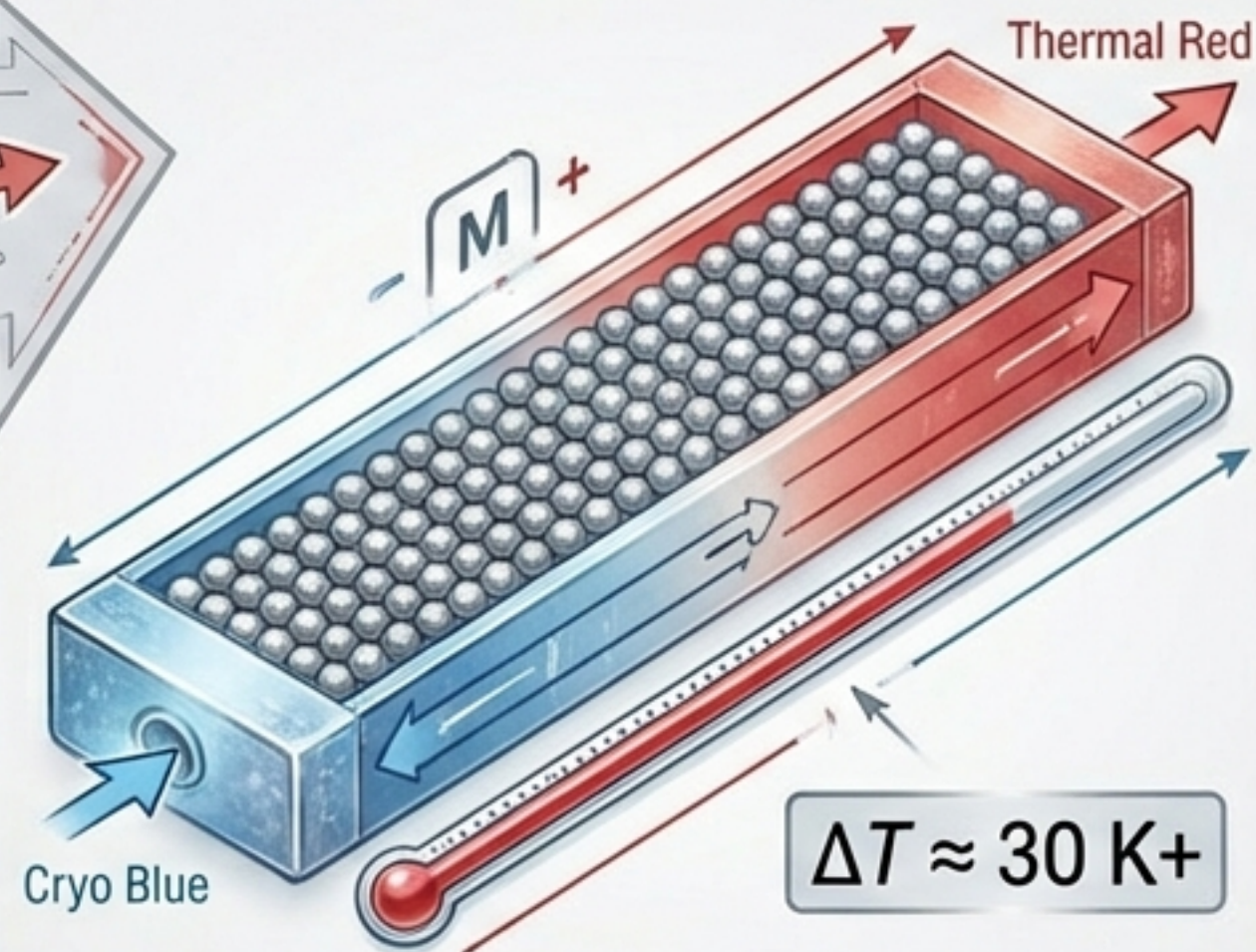
$$\Delta T \approx 3-5 \text{ K}$$

Insuffisant pour un réfrigérateur.

Le cycle AMR permet d'amplifier l'écart de température en "empilant" les cycles le long du lit régénérateur.

Le cycle AMR permet d'amplifier température en "empilant" les le long du lit régénérateur.

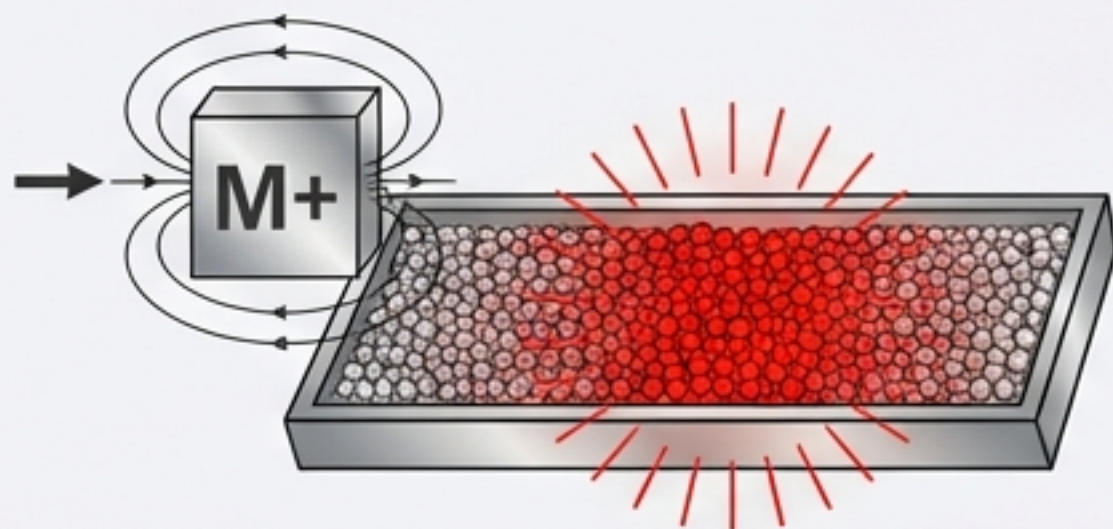
Régénérateur Magnétique Actif (AMR) : La Solution Système



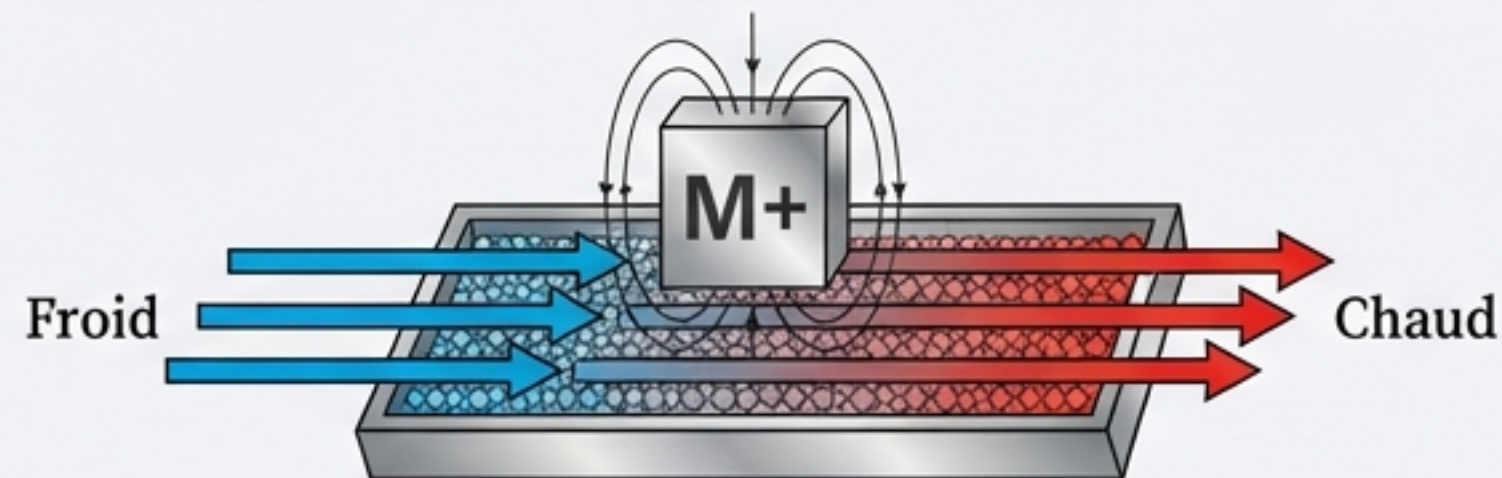
Régénérateur Magnétique Actif (AMR) : $\Delta T \approx 30 \text{ K+}$.

Le Cœur du Réacteur : Cycle AMR en 4 Temps

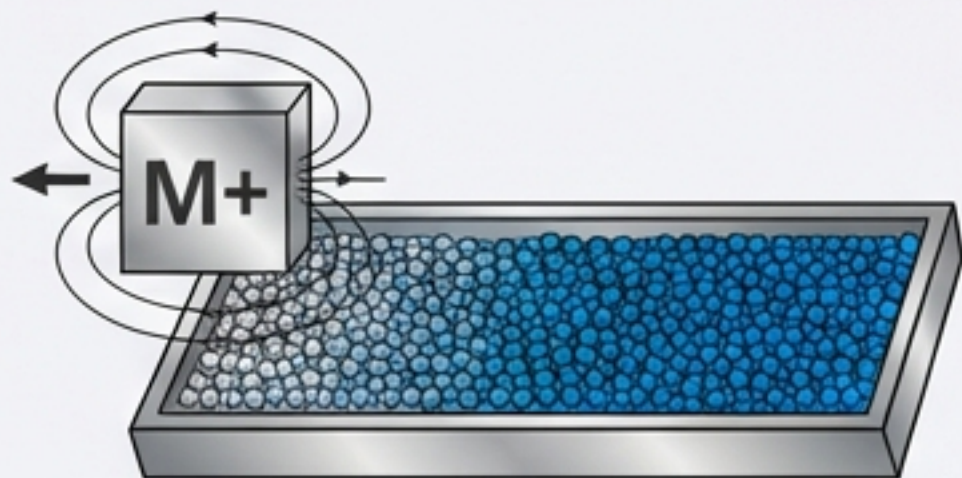
1. Aimantation Adiabatique



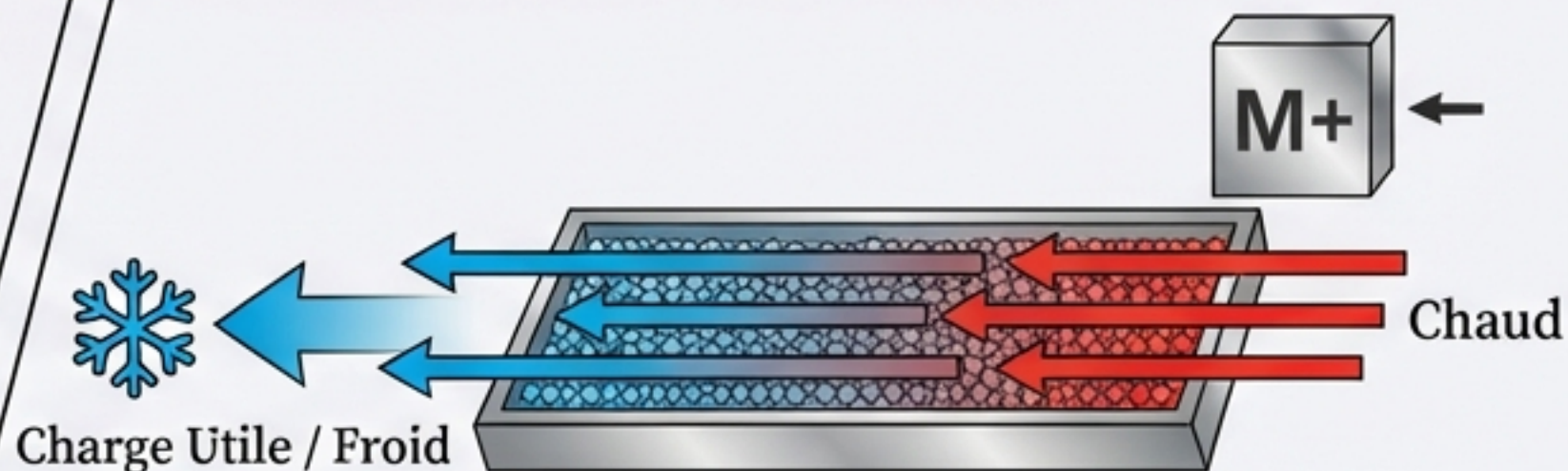
2. Transfert Isomagnétique (Coup Froid)



3. Désaimantation Adiabatique

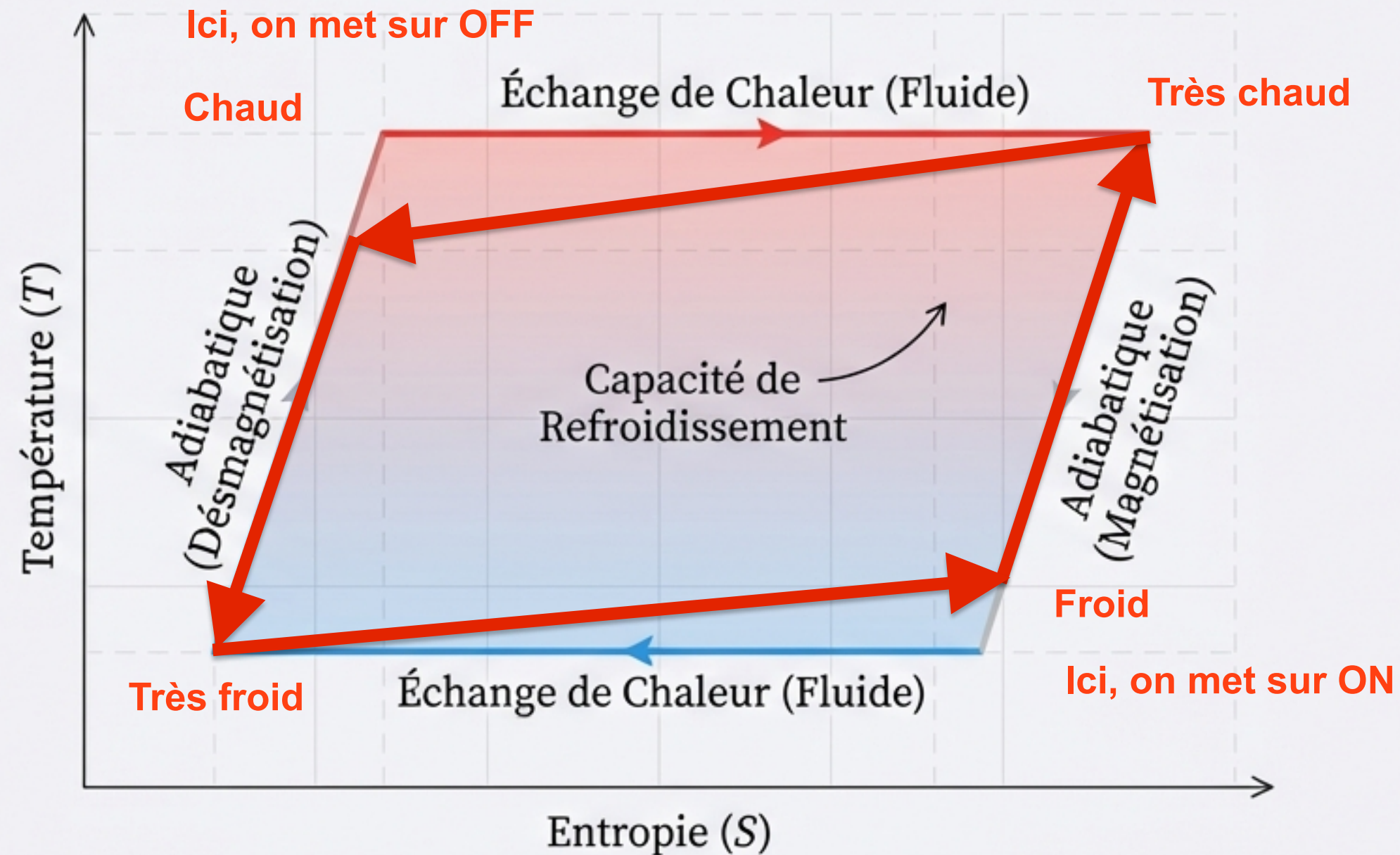


4. Transfert Isomagnétique (Coup Chaud)



Visualisation Thermodynamique : Le Cycle de Brayton Magnétique

Inverser les flèches

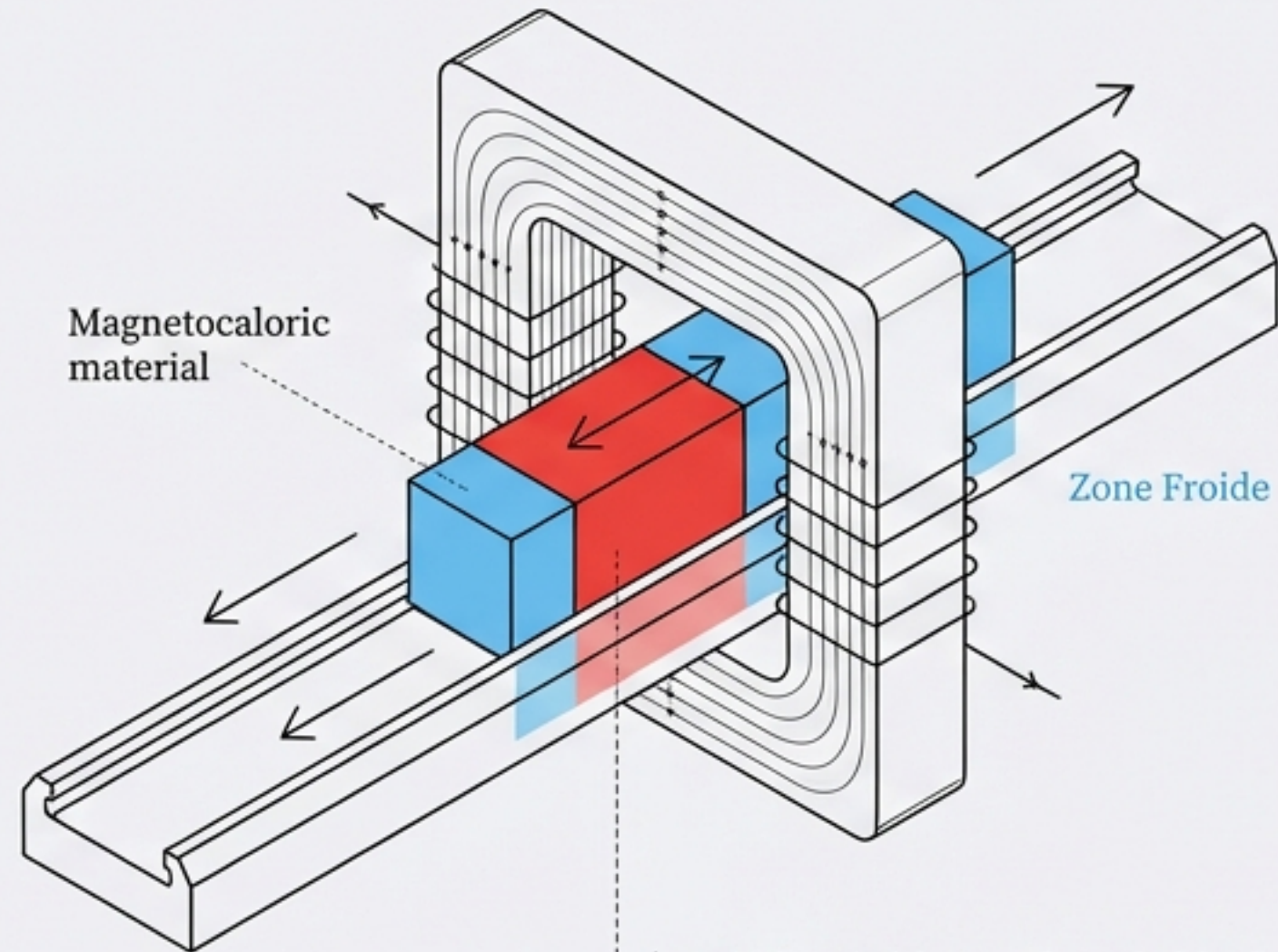


Analogie magnétique du cycle de Brayton utilisé dans les turbines à gaz, mais inversé pour le froid.

Architectures Mécaniques : Rotatif vs Réciproque

Architecture Réciproque (Mouvement linéaire)

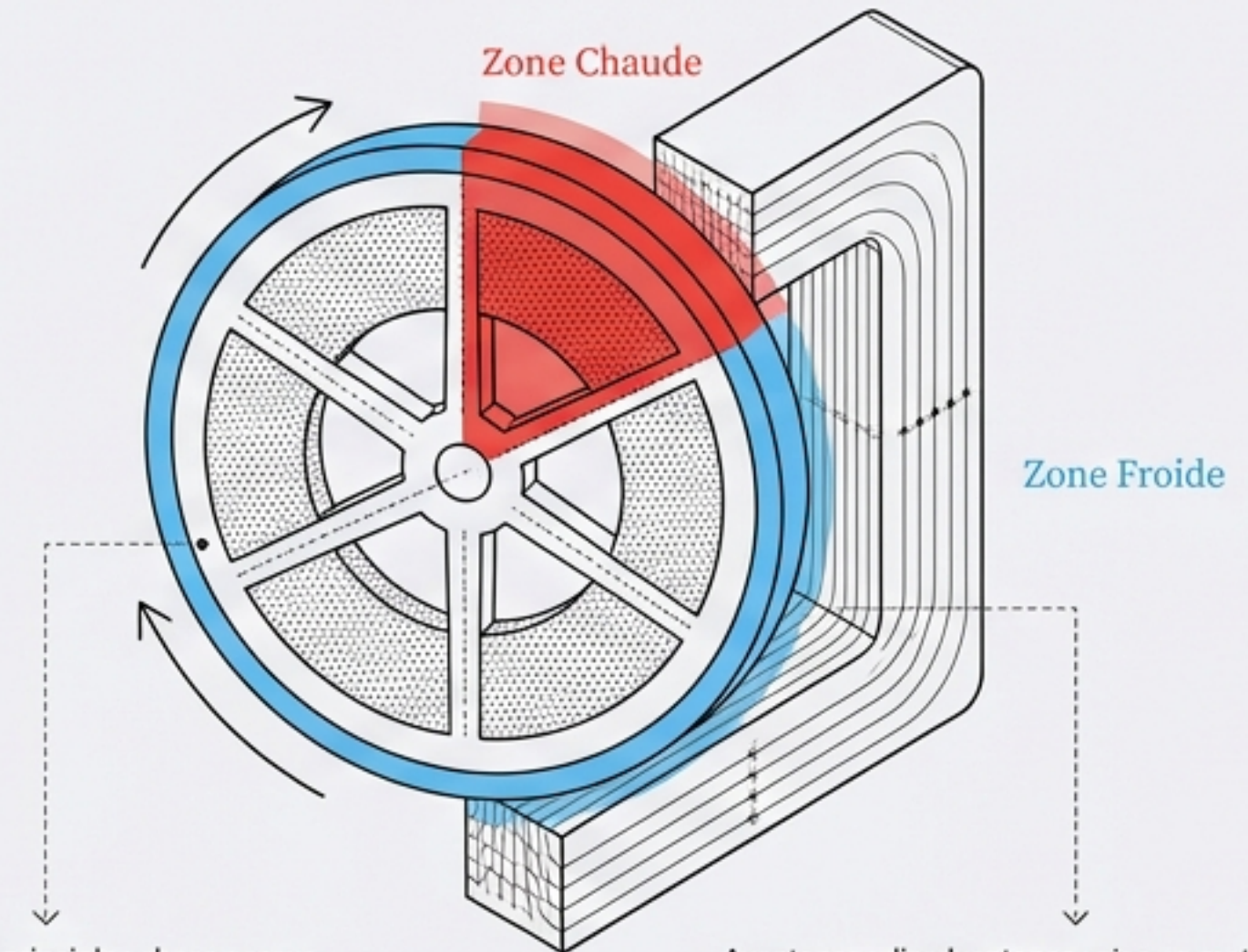
Simple mais fréquence limitée



Opération principe : on maintient les principes de magnétocalorification en utilisant de ces structures un magnétique de manière linéaire pour éviter les pertes d'énergie. À savoir : magnétique linéairement à la position du matériau à la fréquence de conversion par induction.

Architecture Rotative (Mouvement continu)

Compact, haute fréquence, rendement supérieur (ex: Prototypes Zimm)

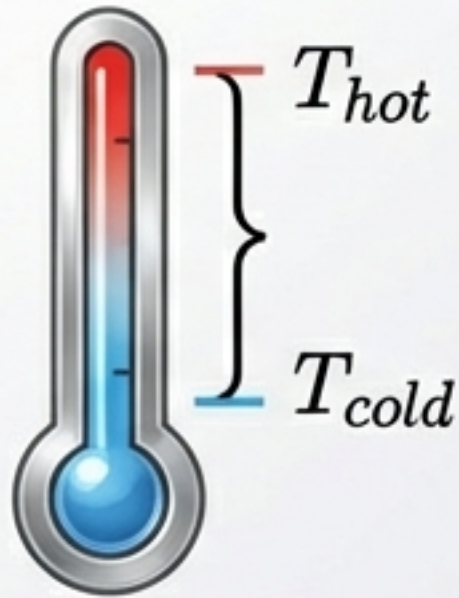


Opération principe : choisir des matériaux magnétocaloriques poreux vs matériaux magnétocaloriques non poreux pour leur capacité de la rotation de magnétique d'être linéaire pour éviter les pertes d'énergie comparant les fréquences de magnétique.

Avantages : désavantages : pour un moteur pour même magnétocalorifique, simple installation pour noter la porosité et sa au moteur.

Avantages : désavantages : les dimensions est toujours au contraire à minimiser les secteurs poreux magnétocalorifique situant.

Mesurer la Performance : Au-delà du Froid



Écart de Température (ΔT_{span})

Différence maximale entre la source chaude et froide sans charge thermique.



Capacité de Refroidissement (Q_c)

Quantité de chaleur extraite à l'échangeur froid (Watts).



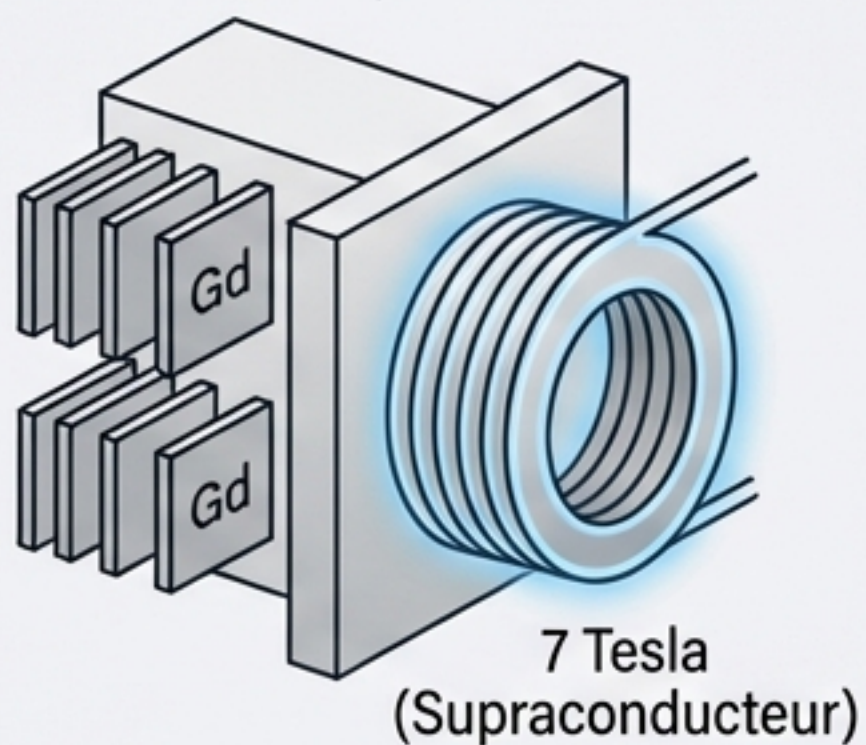
COP (Coefficient de Performance)

Ratio : Q_c / Travail fourni (Magnétique + Pompage).

Paramètres influents : Fréquence (f), Géométrie du lit, Nature du fluide.

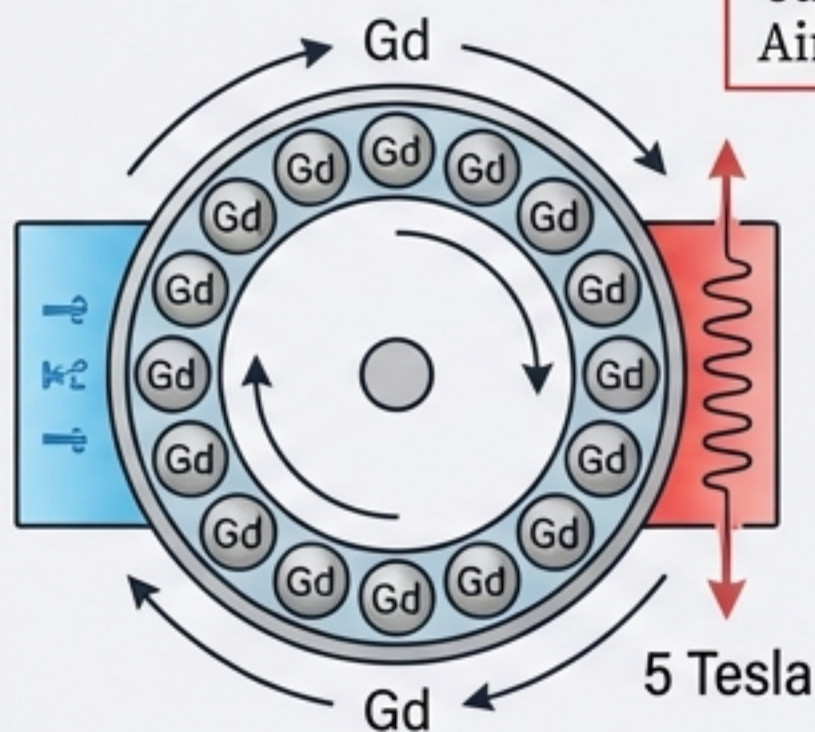
L'Évolution des Prototypes : De la Preuve de Concept à la Machine

1976 - Brown



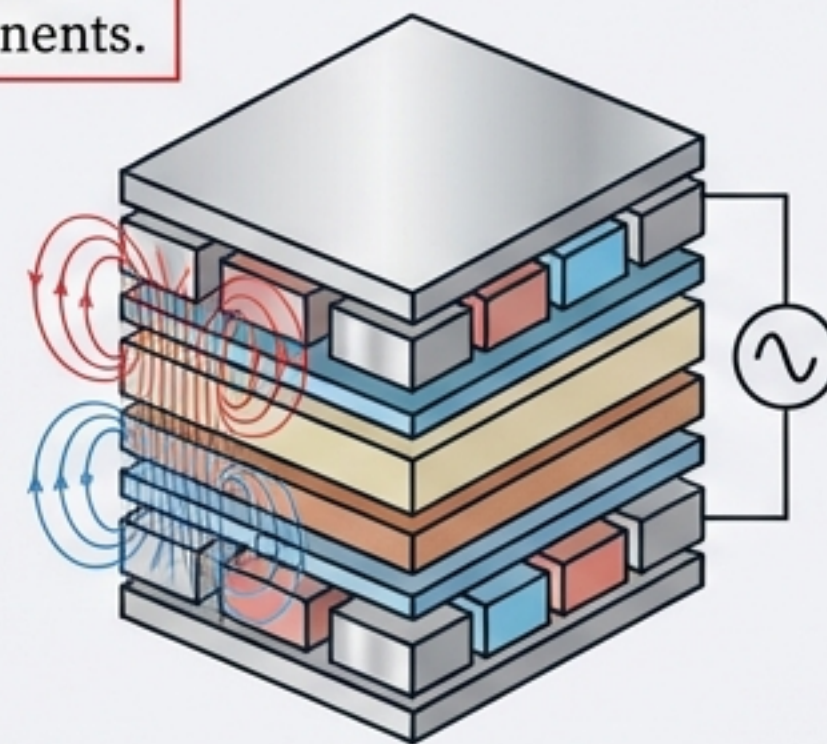
Premier prototype fonctionnel.
Plaques de Gd, 7 Tesla
(Supraconducteur).

1997 - Zimm



Preuve de concept rotative.
Sphères de Gd, 5 Tesla.
Refroidissement significatif (500-600W).

2010+ - Ère Moderne

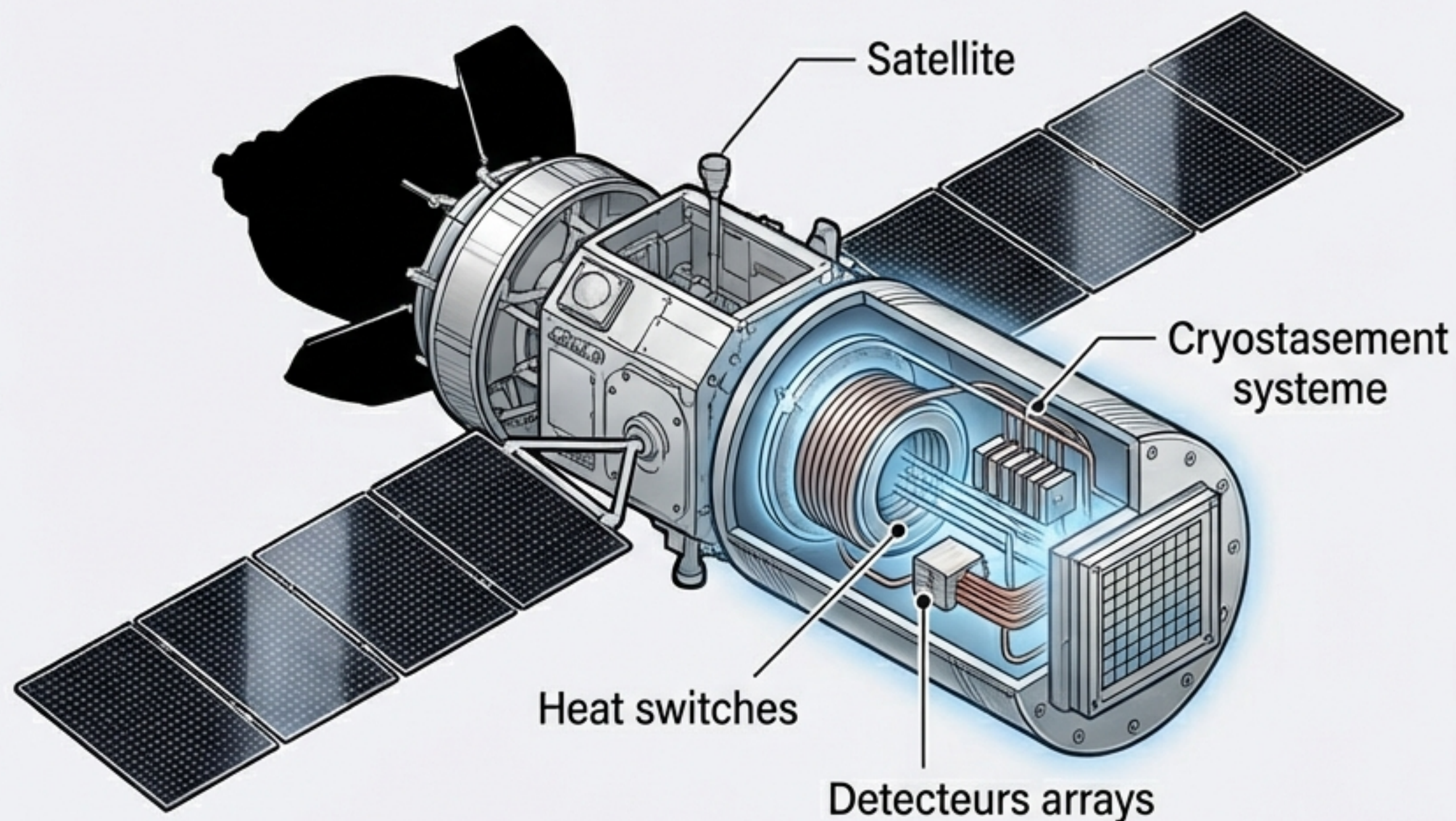


Aimants permanents,
Fréquences élevées,
Matériaux multicouches

Transition : Aimants
supraconducteurs →
Aimants permanents.

Paramètres influents : Matériaux, Architecture, Intégration

Application Extrême : Le Cas NASA (ADR)



Technologie :
Adiabatic Demagnetization Refrigerator (ADR).

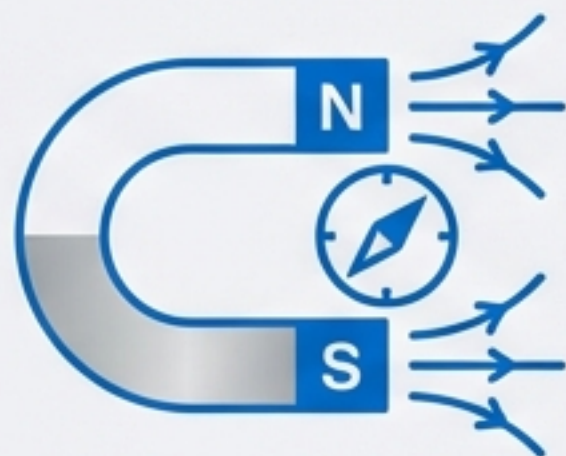
Matériau :
Sels paramagnétiques
(Ferric Ammonium Sulfate).

Performance :
Températures proches du
zéro absolu (< 1 mK).

Fiabilité prouvée pour le refroidissement des détecteurs de rayons X dans l'espace.

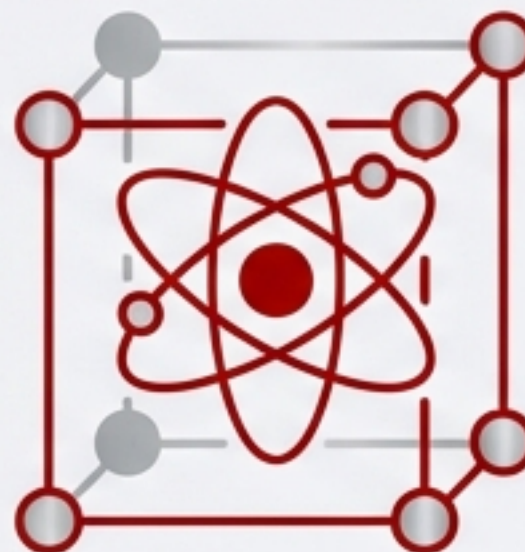
Les Défis de l'Industrialisation

L'Aimant



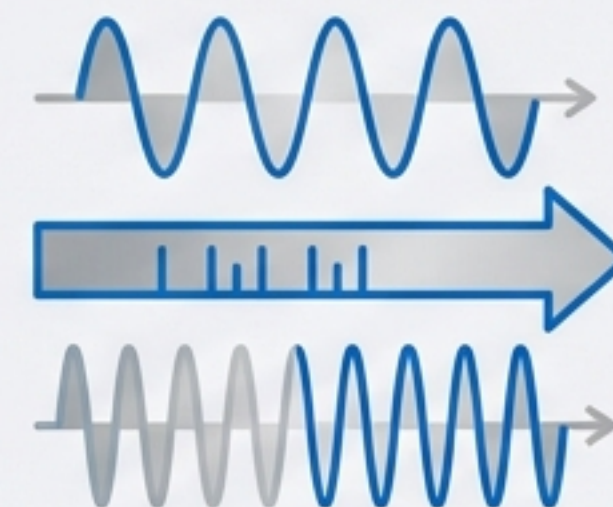
Besoin de champs forts (>1.5 Tesla) avec des aimants permanents. Problème de coût (NdFeB) et de poids.

Le Matériau



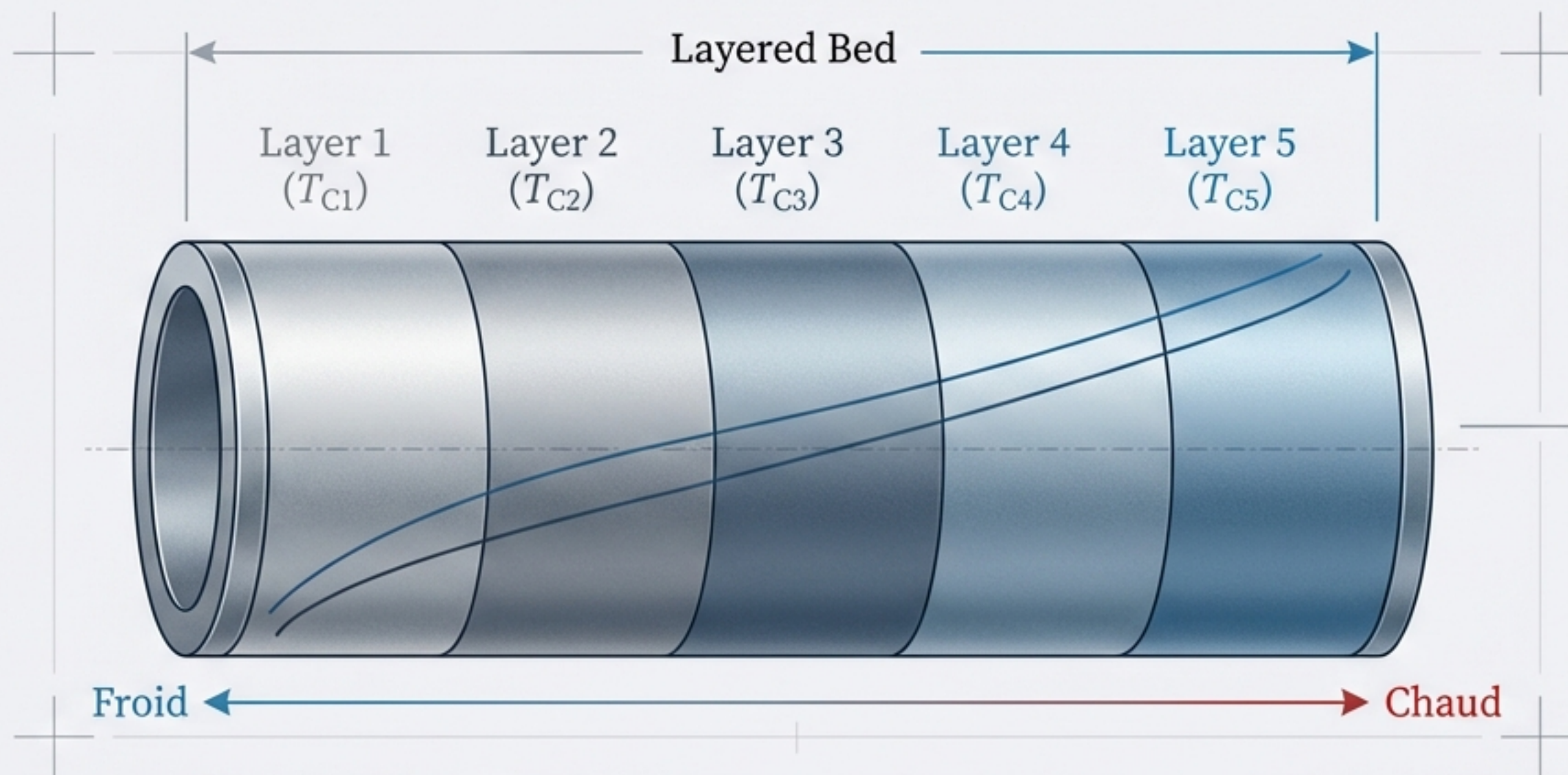
Coût et géopolitique des Terres Rares (Gd). Problèmes de corrosion et d'hystérésis thermique.

La Fréquence



Compromis : Cycler vite pour la puissance vs Limites du transfert thermique fluides-solides.

Le Futur des Matériaux : Au-delà du Gadolinium



Nouvelles Familles d'Alliages :

- La-Fe-Si (Lanthane-Fer-Silicium)
- Mn-Fe-P-As

Avantages :

Abondance, 'Giant MCE', T_C ajustable.

Lits Régénérateurs Multi-couches :
Gradient de température de Curie pour maximiser
l'effet sur toute la longueur.

Vers un Froid Durable et Silencieux



- ✓ **Écologique** : Zéro GWP/ODP (Fluides à base d'eau).
- ✓ **Efficace** : Potentiel thermodynamique supérieur à la compression.
- ✓ **Silencieux** : Basses pressions et peu de vibrations.

**Une technologie mature scientifiquement,
prête pour le saut industriel.**