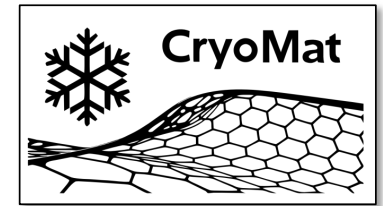


Plateforme dédiée aux mesures
Sub-Kelvin des propriétés des matériaux

C. Chailan, G. Deniel, P. Duthil, M. Gonzalez,
L. Grandsire, A. Ilioni, M.R. N'Sougan, M. Piat,
J.P. Thermeau, R. Thoër

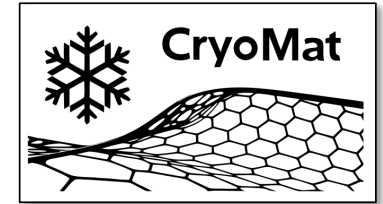
Projet soutenu par la Région Île-de-France





Contexte et motivations

- 1. Besoins grandissants dans le sub-K** en cosmologie & astrophysique, accélérateurs, imagerie médicale, informatique quantique
 - Amélioration sensibilité et/ou résolution
- 2. Absence ou disparité de données** sur les caractéristiques thermiques des matériaux aux températures sub-K ($T < 1\text{K}$)
 - Données existantes jusqu'à la température de l'hélium liquide superfluide (2 K)
 - Issues de grands projets scientifiques (spatial américain jusqu'à la navette, accélérateurs, etc.)
 - Assez anciennes pour des matériaux devenus depuis "d'usage courant" en cryogénie
 - Pour les matériaux plus récents (nouveaux alliages, composites, polymères, colles...)
 - Peu de données publiées, pas forcément raccordées au Système International d'unités (S.I.)
 - Données dépendant du formage, de l'usinage, de l'assemblage, de l'état de surface...



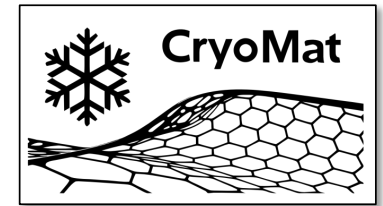
Contexte et motivations

➤ **Nécessité de produire nos propres données pour nos matériaux**

- Réalisation de bancs de caractérisation dédiés
- Possibilité d'exploiter ces bancs pour des usages extérieurs (par du personnel de la plateforme ou extérieur)
- Diffusion des données à la communauté

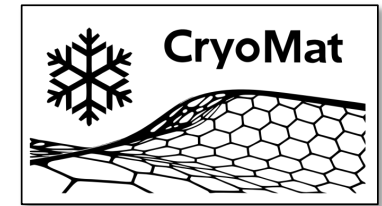
➤ **Opportunités :**

- DIM Origines (Domaines Intérêts Majeurs) labellisé et financé par la région Ile de France
- APC : volonté de créer une plateforme de caractérisation des matériaux aux températures cryogéniques, jusqu'au sub-Kelvin
- APC et IJCLab collaborant déjà dans le projet IN2P3 NGCryo → IJCLab s'est associé au développement de la plateforme



Objectifs

- **Mettre à la disposition de la communauté scientifique et industrielle des bancs de mesure dans le domaine cryogénique, plus particulièrement de 0.1K à 40K:**
 - Electricques : impédances réelles, complexes
 - Thermiques : conductivité, diffusivité, chaleur massique, émissivité
 - Mécaniques : module d'élasticité, limites élastique et à la rupture, allongements, coefficient de Poisson, coefficient de dilatation
- **Moyens à développer:**
 - Cryostats, systèmes de contrôle et de mesure
 - Procédures, assurance qualité
- **Science Ouverte:**
 - Base de données des propriétés de matériaux accessible
 - Ouverture de la plateforme aux industriels



Partenaires

- **Laboratoires en soutien: LNE-CNAM, LNE-Trappes**

- Conseils
- Evaluation des incertitudes de mesure



- **Entreprises partenaires: TOP Industrie, ACS, CryoDiffusion, Pasqal, Themacs Ingénierie**

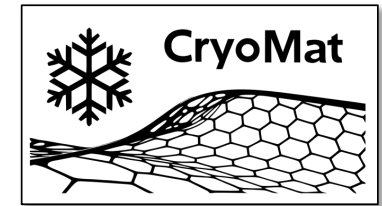
- Fourniture du cryostat mesures électriques
- Intérêt pour la commercialisation de cryostats pour essais mécaniques
- Intérêt pour l'exploitation des bancs de CryoMat



- **Utilisateurs/soutiens:**

- Laboratoires IdF: GEPI/Obs. Paris, IAS, CEA/Irfu/DIS
- Sociétés franciliennes : Chipiron, EQUIUM

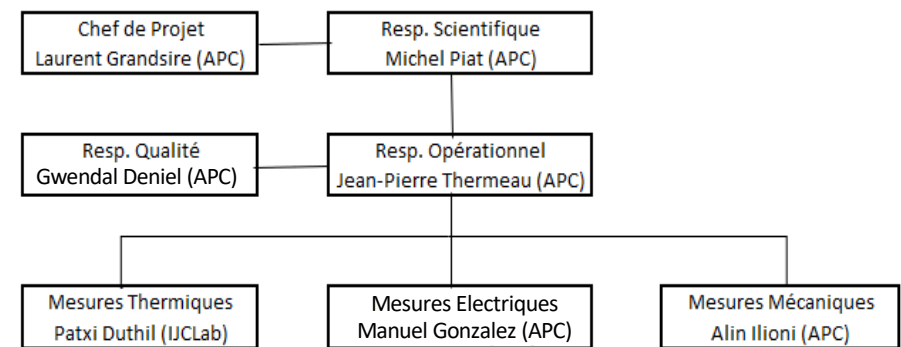




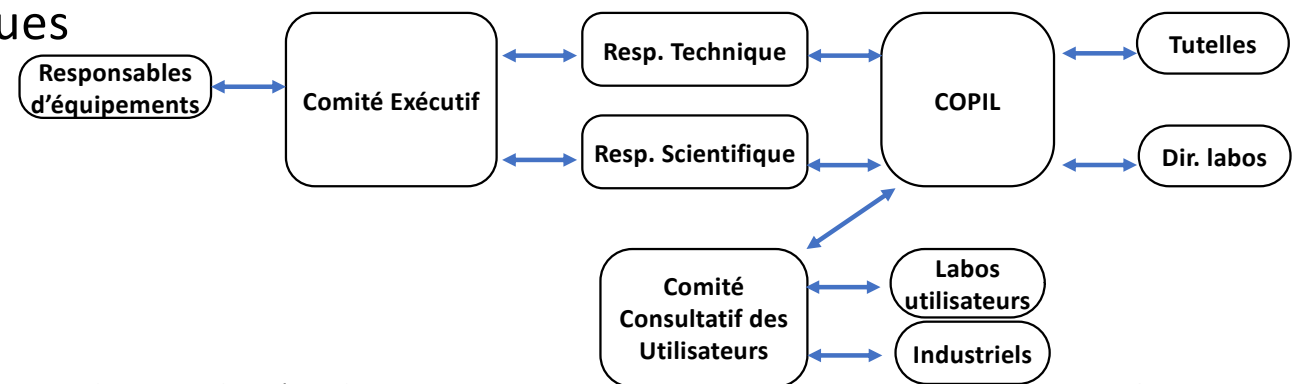
Ressources humaines et organisation

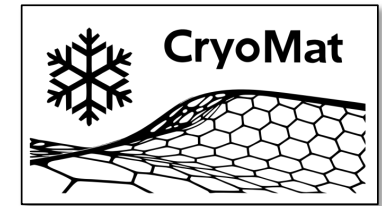
- APC (~3FTE en 2025) :
 - Service techniques Expérimentales
 - Fort soutien des Services Mécanique et Administratif
- IJClab (~1 FTE en 2025) :
 - Pôle ACC: Service Cryogénie
 - Pôle Ing: Réalisations mécaniques

Organigramme projet : développement de la plateforme



Organigramme : exploitation de la plateforme





Budget et planning

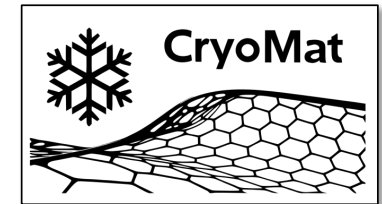
• Budget:

Equipements	Coûts
Mesures électriques	490 000
Mesures thermiques	435 000
Mesures mécaniques	285 000
Aménagement des espaces expérimentaux	90 000
Total	1 300 000

Appel d'offre/commande
BE : Conception
Fab: Fabrication
AIT : Assemblage, Intégration, Test
Exploitation

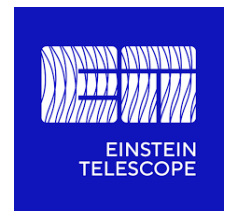
• Planning:

	2023				2024				2025				2026				2027				2028			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
NGCryo/NGCryo+	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT	AIT
Aménagement Halls																								
Propriétés électriques																								
Cryostat - APC																								
Mesures électriques 3K																								
Mesures électriques 0.05K																								
Propriétés thermiques																								
Cryostat - APC																								
Conductivité/Diffusivité 4K																								
Cryostat - IJCLab																								
Emissivité 4K																								
Propriétés mécaniques																								
Traction LN2 - IJCLab																								
Traction LHe - IJCLab																								
Fatigue 300K - APC																								
Fatigue 4K - APC																								



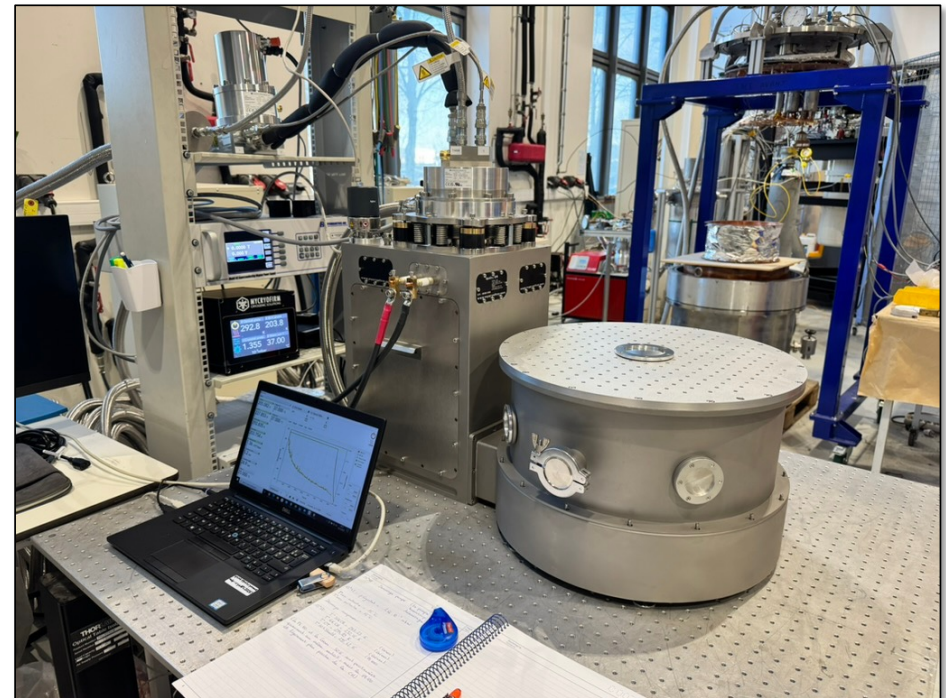
Projets scientifiques concernés

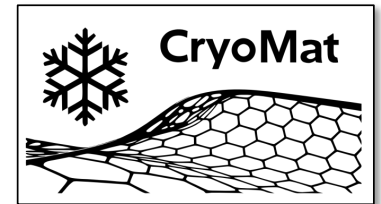
- **ERC SPIAKIDS** (Observatoire de Paris / APC) → **Colloquium APC 1^{er} juillet**
 - Spectro-imagerie dans le visible et proche IR avec des KIDS (*Kinetic inductance detectors*)
 - Matériaux supraconducteurs innovants → mesures de température critique, résistivité électrique et propriétés mécaniques
- **Missions spatiales internationales ATHENA** (APC / CEA / IRAP) et **LiteBird** (APC / IAS / IRAP / CEA / LETI)
 - Détecteurs supraconducteurs : TES (Transition Edge Sensors) → mesures électriques (faibles impédances)
 - Modélisation thermomécanique → mesures des propriétés mécaniques et thermiques
- **Projets accélérateurs de particules**
 - Mesures thermiques, mécaniques et électriques (2K à 300 K) : supraconducteurs, métaux et alliages, composites
- **Einstein Telescope (IJClab/APC)**
 - Mesures thermiques, mécaniques, émissivités (2K à 300 K)



Banc de mesures électriques

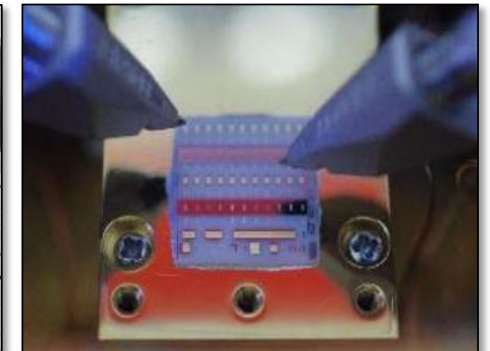
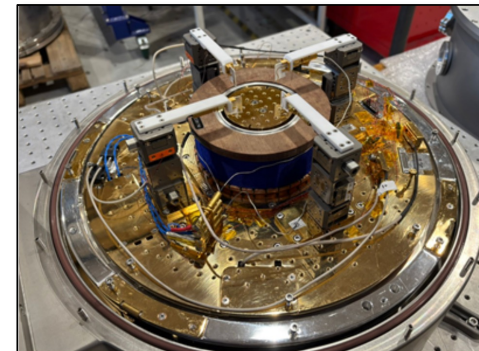
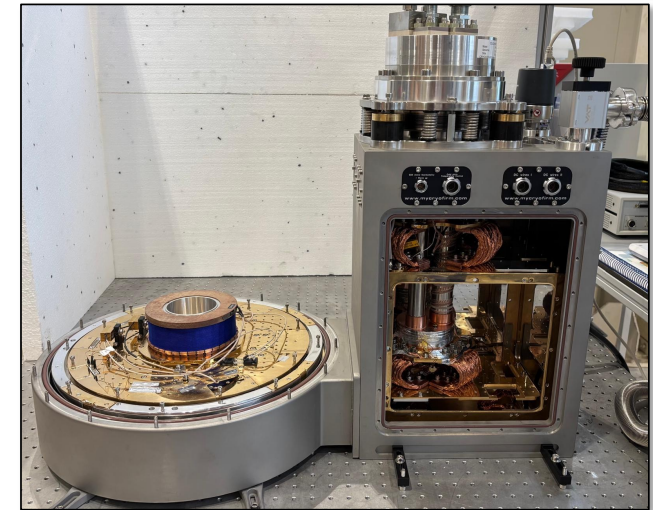
- **Cryostat polyvalent dédié à la mesure d'impédance électrique de composants**
 - Matériaux obtenus par formage (fils) ou par dépôt (couches minces)
 - Résistance électrique jusqu'à la dizaine de $n\Omega$ (mesure courant ou pont alternatif)
 - Impédances électriques : excitées au GHz (voire 150GHz)
- Demande équipement DIM Origines 2026: Lock-in RF
- Planning de réalisation :
 - Appel d'offre : avril 2024
 - Marché attribué à PASQAL : juillet 2024
 - Mise en service : décembre 2025
 - **Opérationnel depuis février 2026**

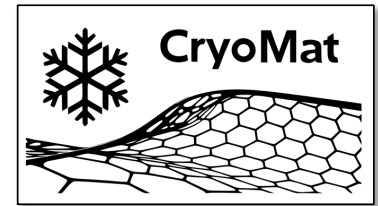




Banc de mesures électriques

- **Cryostat en deux parties découplées mécaniquement du cryogénérateur (source froide)**
 - Faibles vibrations dans la cellule de mesure : 80 nm de 0.1 à 10 kHz
 - Température limite de 2.8 K
 - Avec ou sans champ magnétique : 3.5 T maxi
- **Mesure sous 4 pointes pilotables**
 - Actionneurs piézo-électriques
 - Amplitude de déplacements x, y et z : 20 mm
 - Résolution : 0.1 μm
- **Modification cryostat pour sub-K**
 - Ajout d'un mini-réfrigérateur à dilution: 2027
 - Mesure jusqu'à 50 mK (sans pointe): 2028





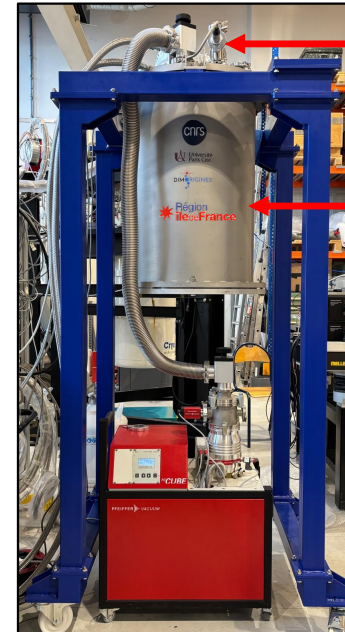
Cryostats de mesures thermiques

1. Cryostat vertical polyvalent – BE APC

- Température limite : 2.8 K
 - Volume utile à 4 K : $\varnothing 350 \times 350$ mm³
 - Peut fonctionner avec réfrigérateur 1 K ou 0.3 K
 - **Opérationnel depuis octobre 2025**
- ⇒ **Caractérisation thermique de composants**
(conductance d'interrupteurs thermiques...)

2. Cryostat horizontal polyvalent – BE APC et IJCLab

- EquipEX+ PACIFICS
 - Système cryogénique similaire
 - Volume utile à 4 K : $\varnothing 400 \times 800$ mm³
 - Opérationnel : 4^{ème} trimestre 2026
- ⇒ **Caractérisation thermique de composants**



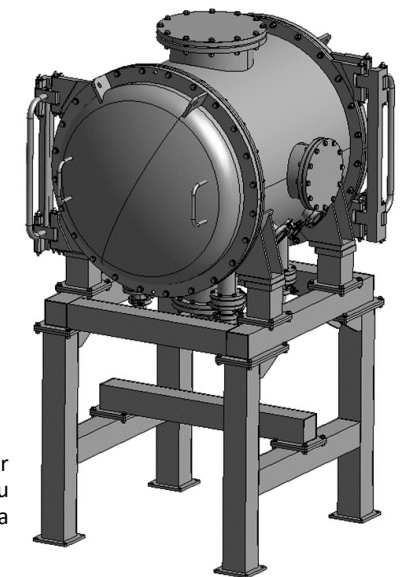
Gifford McMahon
1,8W @ 4,2K

Enceinte
à vide

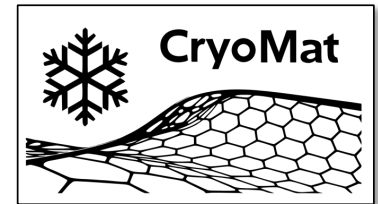
Conception : APC/IJCLab



PACIFICS a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du **Programme d'Investissements d'Avenir** portant la référence **ANR-21-ESRE-0049**



Conception : APC/IJCLab



Bancs de mesures thermiques

- Banc de mesure de **conductivité thermique et de diffusivité thermique**

1. Méthode statique : chauffage constant

- ⇒ évaluation de l'intégrale de **conductivité thermique k** sur ΔT (faible)
- ⇒ détermination de la conductivité thermique moyenne sur ΔT

2. Méthode en transitoire : impulsion d'énergie

- Évaluation de la **diffusivité** $D = k / \rho C_p$ $\left\{ \begin{array}{l} k: \text{conductivité thermique} \\ C_p: \text{capacité thermique massique} \\ \rho: \text{masse volumique} \end{array} \right.$

- k mesurée en statique → **capacité thermique massique**

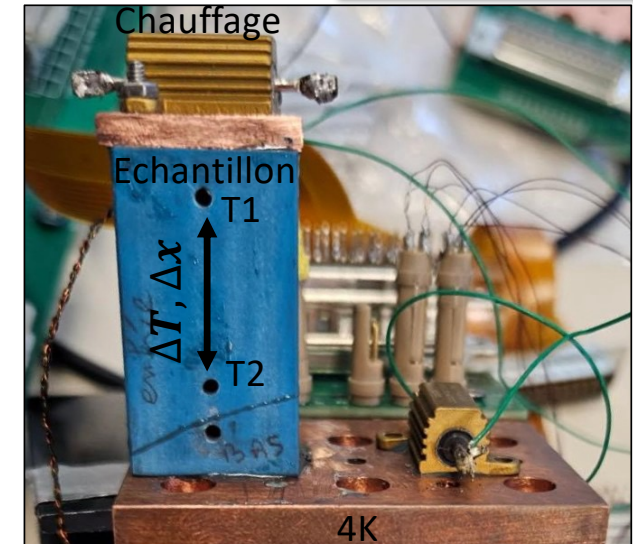
- **Limites** : fortes variations de D entre 300 K et 4 K

- ⇒ Mesures dans la plage 40 K à 300 K pour les hautes diffusivités (métaux purs)

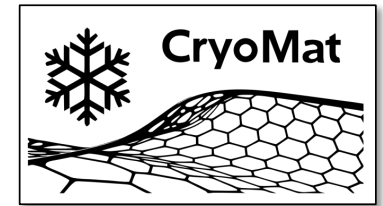
- ⇒ Sinon de 3 K à 300 K



CryoMat - Biennale APC

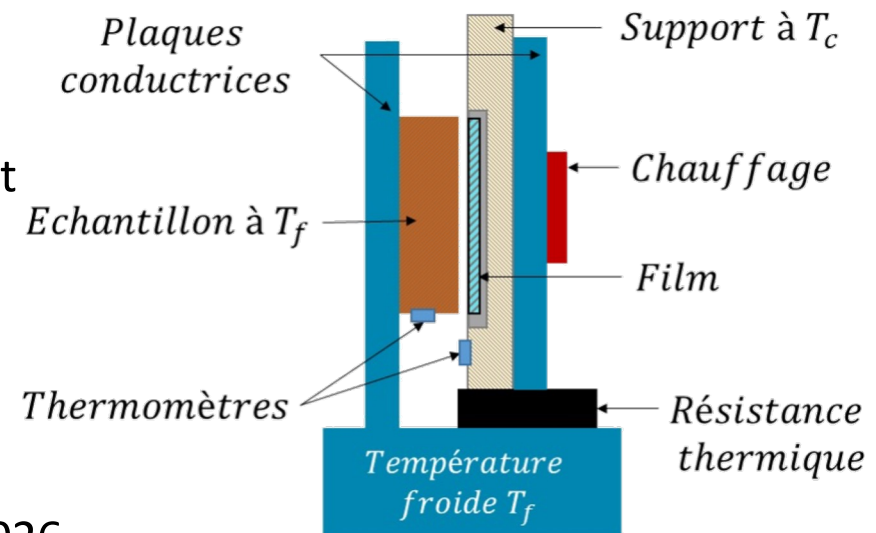


- **Planning de réalisation :**
 - Appel d'offre : octobre 2024
 - Marché Themacs : décembre 2024
 - Livraison banc diffusivité : janvier 2026
 - **Mise en service : en cours à l'APC**
 - Opérationnel pour l'été 2026
- Extension jusqu'à 4 K : été 2027 »

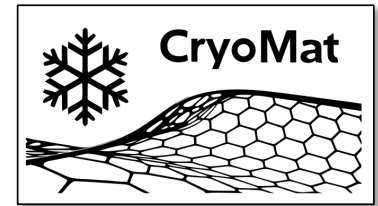


Bancs de mesures thermiques

- Mesure **d'émissivité thermique**
- Méthode de la plaque chaude gardée: double mesure de flux reçu par le film ($\varepsilon \approx 1$) :
 1. Même revêtement émissif appliqué sur échantillon et sur film \Rightarrow permet d'étalonner ε film
 2. Mesure sur échantillon $\Rightarrow \varepsilon$ de l'échantillon
- Planning de réalisation:
 - Appel d'offre: octobre 2024
 - Marché attribué à Themacs: décembre 2024
 - Livraison du banc émissivité: prévue à l'IJCLab à l'été 2026
 - Opérationnel: avant fin 2026
- Banc actuel conçu pour la plage 300 K à 80 K
 \rightarrow extension jusqu'à 4 K prévue pour fin 2027



Themacs
Ingénierie



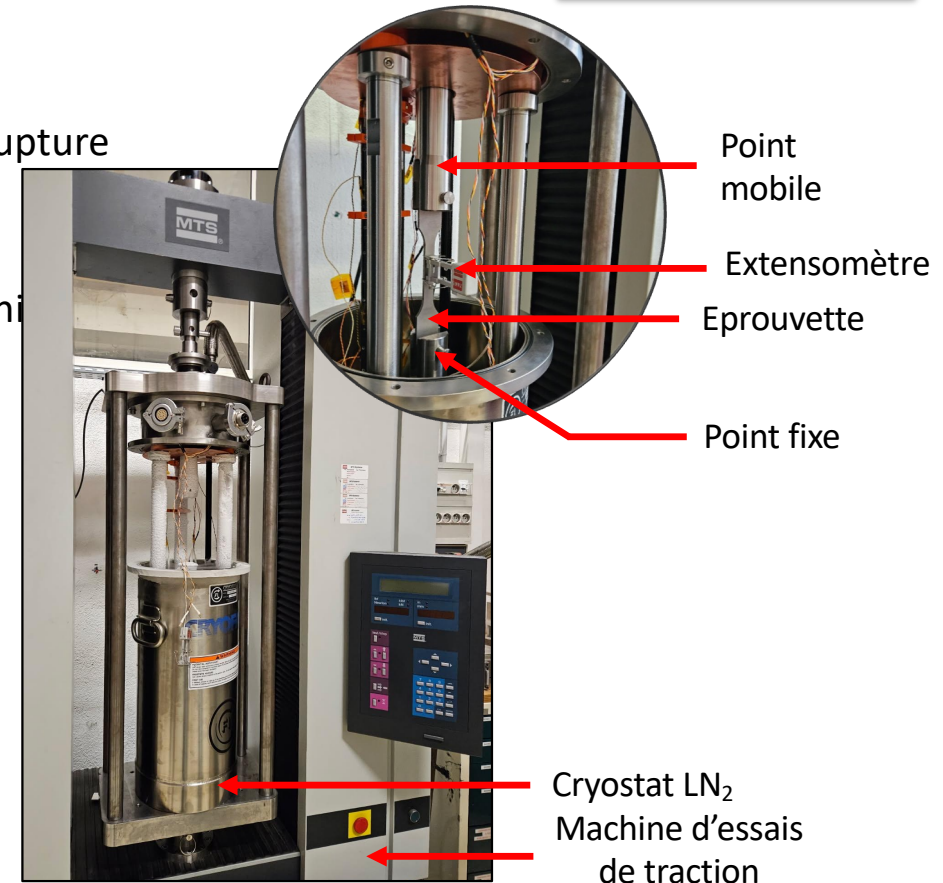
Cryostats et bancs de mesures mécaniques

- Banc de mesures de **propriétés élasto-plastiques**



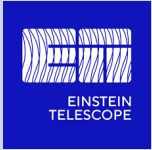
- Statique: modules d'élasticité, limite élastique, limite à la rupture et allongements
- Machine de traction MTS disponible à IJClab: 150 kN en traction/compression
- Conception et réalisation de cryostats adaptés à cette machine
- Caractérisation d'éprouvettes plates ou cylindriques
- Cryostat LN₂ : **opérationnel**
- Cryostat LHe : 4^{ème} trimestre 2026

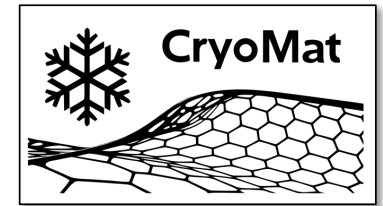
- Banc d'essais de **fatigue** :

- Essais dynamiques de résistance à la fatigue
 - Cycles de traction-compression : ± 40 kN ; 1 Hz max
 - Différentes formes de cycles (sinusoïdale, triangulaire...)
- Planning de réalisation :
 - Appel d'offre de la machine de traction : juin 2026
 - Attribution marché : 2^{ème} trimestre 2026
 - Fourniture : été 2027
 - Cryostat de test : pour 2028



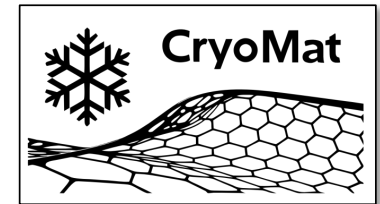
CryoMat et projets émergents à l'APC

	Propriétés électriques	Propriétés thermiques	Propriétés mécaniques
	Impédances supra		
	<ul style="list-style-type: none"> - Impédances supra - Caractérisation RF 	Conductivité supports composites et matériaux plan focal	Limite élastique + fatigue supports composites
		<ul style="list-style-type: none"> - Emissivité - Conductivité thermique 	Limite élastique + fatigue supports
R&D instrumentation cryo, CryoSIGMA	<ul style="list-style-type: none"> - Impédances supra - Caractérisation ampli RF cryogéniques 		



Dissémination et formation

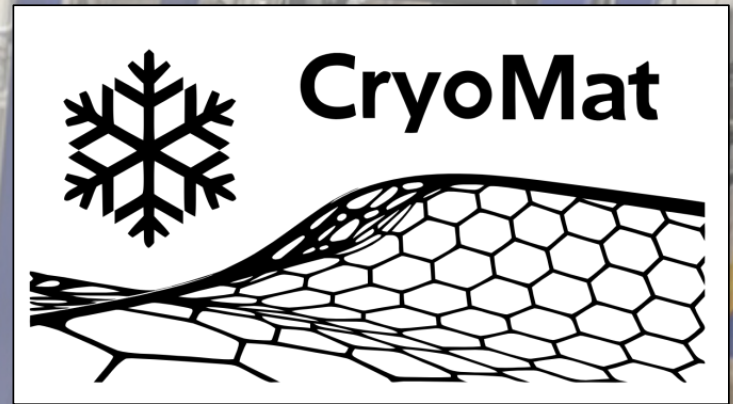
- Diffusion des résultats de campagnes de mesures pour les **projets scientifiques**:
 - Diffusion au travers d'articles scientifiques
 - Base de données ouverte à la communauté scientifique et aux industriels
- Diffusion des résultats de campagnes de mesures dans le cadre de **contrat industriel**:
 - Période de confidentialité limitée dans le temps avant diffusion
- CryoMat pour la **Formation** :
 - **Deux formations qualifiantes en cryogénie rattachées à l'UFR UPCité** en association avec IJCLab : 8 à 16 participants/an
 - Marie-Reine N'Sougan: apprentie ingénieure (2023-2026) rattachée à l'APC, mise au point du banc de mesure des propriétés thermiques
 - Javier Correa Laorden: thèse en co-tutelle avec l'université Polytechnique de Madrid et l'APC, réfrigération de gros instrument sans cryofluide (2024-2027)
 - Etudiants de l'EIDD et du M2 OSAE : formés aux techniques expérimentales cryos (projets tutorés à l'APC)
 - Démonstrations lors de l'accueil d'enseignants du secondaire



Conclusions

- **CryoMat: plateforme unique**
 - Propriétés électriques, thermiques, mécaniques
 - Gamme de température jusqu'au sub-K
- Plateforme installée sur deux sites : APC et IJCLab ; ouverte aux projets académiques et industriels
- Budget: 1.3 M€ (dont 62% DIM Origines)
- Soutien fort des tutelles CNRS et Université (postes, financements)
- Plateforme structurante en termes de stratégie scientifique & technique (contributions à des projets scientifiques, R&T)
- Données ouvertes
- Valorisation par l'exploitation de certains bancs de mesure par un industriel

Mesures	Statut
Electriques	Opérationnel jusqu'à 2.8K 0.1K pour 2028
Conductivité et diffusivité	En cours de mise en service jusqu'à 3K 0.3K pour 2028
Emissivité	80K fin 2026 4K fin 2027
Propriétés élasto-plastiques	Opérationnel jusqu'à 77K 4K pour fin 2026
Fatigue	Pour 2028



Merci