



# « Refroidissement CO<sub>2</sub> »

Journées R&T de l'IN2P3, 17 octobre 2022, Lyon

**Roman Kossakowski, LAPP**

pour la collaboration CPPM / LAPP/LEGI / LPNHE  
(nouveau R&T soumis à la direction de l'IN2P3)



## Plan de l'exposé :

1. **Contexte général du développement de refroidissement CO<sub>2</sub> micro-canaux en physique des hautes énergies**
2. **Projet « R&T IN2P3 micro-canaux »**
  - **CPPM – développement et fabrication des échangeurs**
  - **LPNHE - développement et fabrication des échangeurs**
  - **LAPP/LEGI - développement et fabrication des échangeurs**
    - **simulations numériques**
    - **banc de mesures / tests prototypes CPPM / LPNHE / LAPP-LEGI**
3. **Conclusions**

## Plan de l'exposé :

### 1. Contexte général du développement de refroidissement CO<sub>2</sub> micro-canaux en physique des hautes énergies

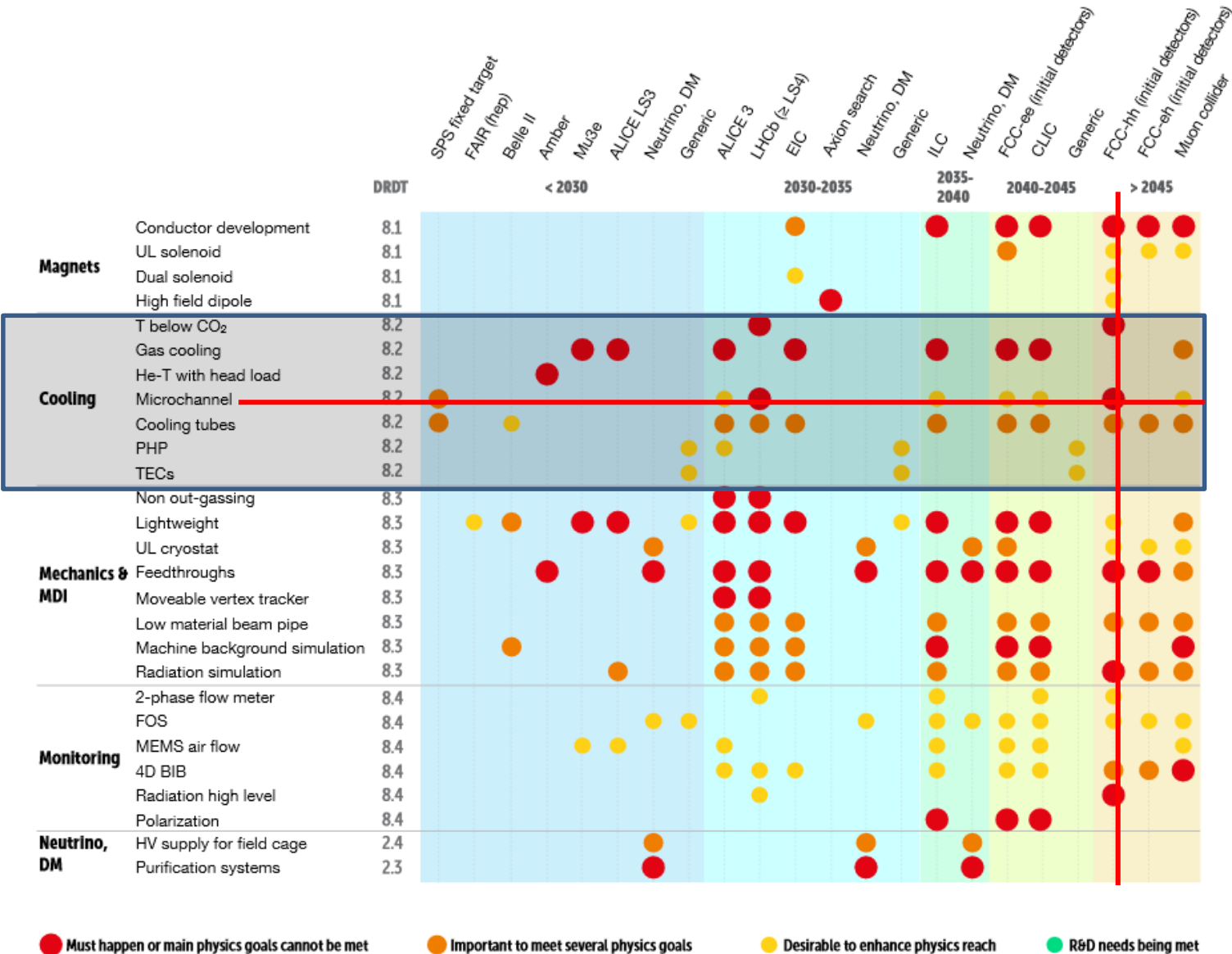
### 2. Projet « R&T IN2P3 micro-canaux »

- CPPM – développement et fabrication des échangeurs
- LPNHE - développement et fabrication des échangeurs
- LAPP/LEGI - développement et fabrication des échangeurs
  - simulations numériques
  - banc de mesures / tests prototypes CPPM / LPNHE / LAPP/LEGI ...

### 3. Conclusions

# THE 2021 ECFA DETECTOR RESEARCH AND DEVELOPMENT ROADMAP

The European Committee for Future Accelerators Detector R&D Roadmap Process Group

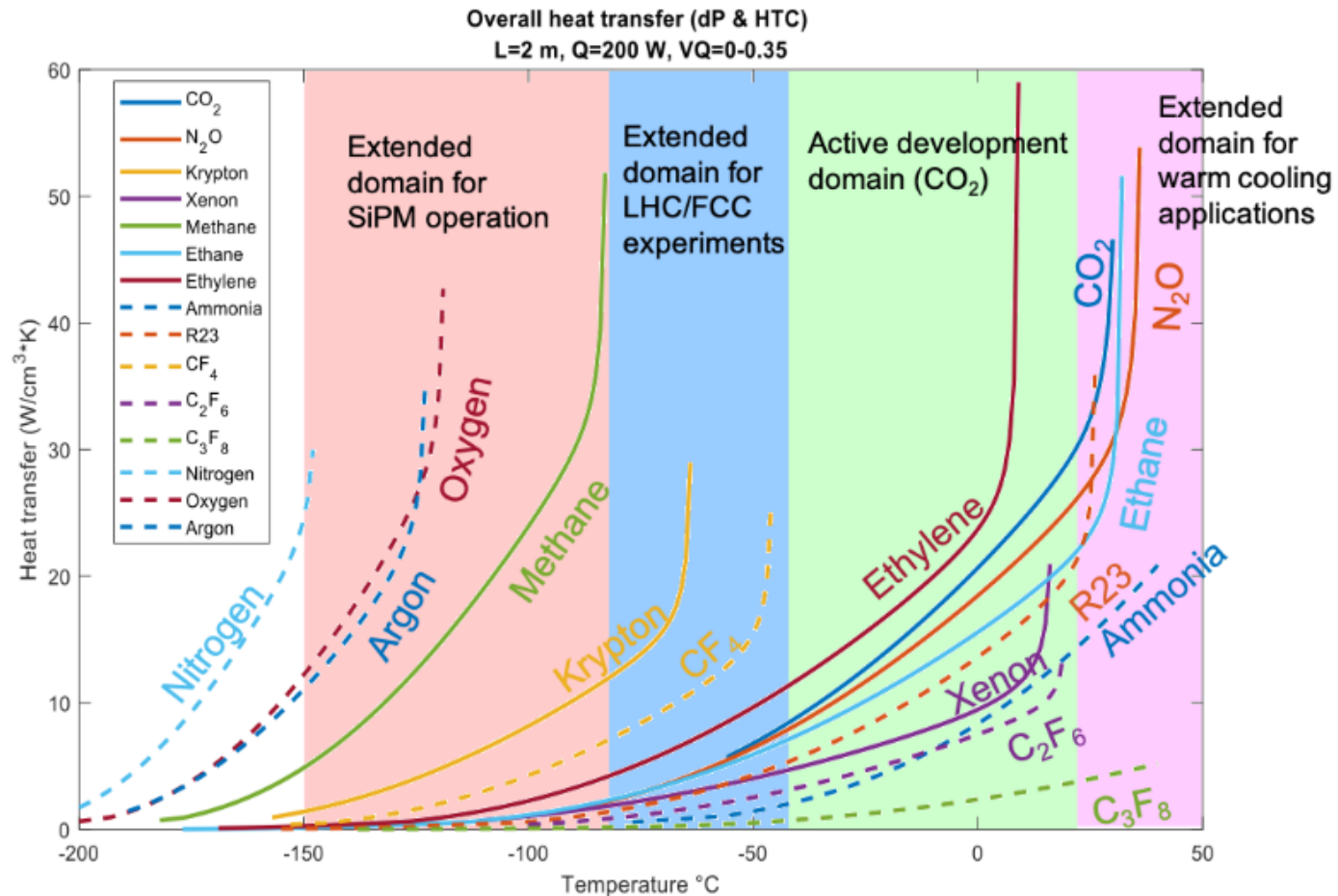


Le développement des techniques de refroidissement :

- en utilisant les micro-canaux
- avec les températures inférieures au CO<sub>2</sub>

s'avèrent indispensables, sinon :

« **main physics goals cannot be reached** »  
pour FCC-hh et upgrade LHCb



“Above heat loads  $> 0.15 \text{ W/cm}^2$  bi-phase cooling is the preferred choice and in HEP, temperatures down to  $-45^\circ\text{C}$  are today’s standard with  $\text{CO}_2$  scaled to several hundreds of kilowatts ... and adapted industrial R744 systems ...

For  $\text{CO}_2$  additional R&D would be necessary to go above  $1 \text{ W/cm}^2$  or to higher temperatures (above  $20^\circ\text{C}$ ).

For temperatures lower than  $-45^\circ\text{C}$  different cooling media and cycling technologies needs to be explored.”

*extrait du “The 2021 ECFA Detector Research And Development Roadmap”*

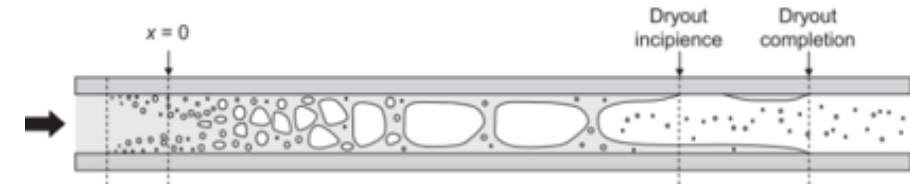
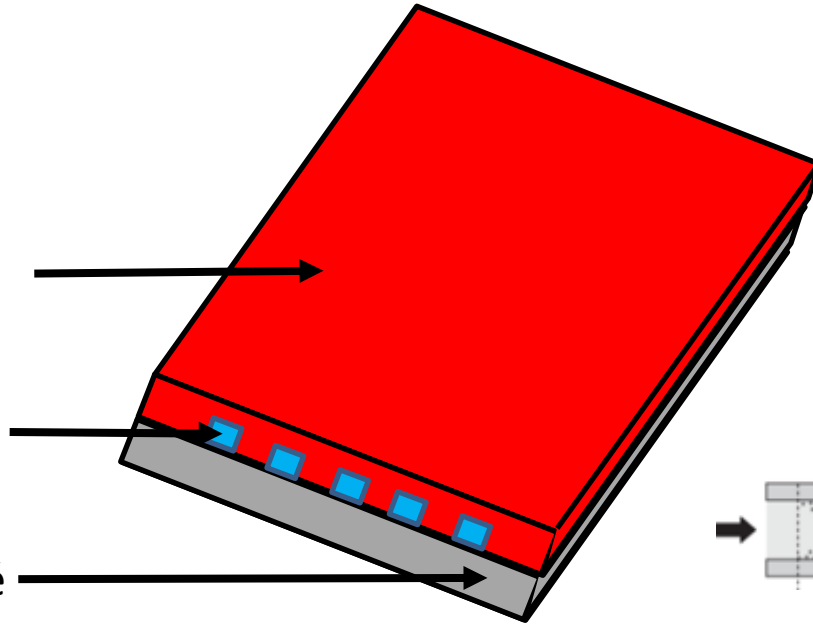
Figure 8.2: Potential liquids for the different temperature and power density regimes.

## Principe de refroidissement par la circulation du CO2 diphasique dans les micro-canaux

Couche « active » **Si** du détecteur qui **chauffe**

Micro-canaux gravés dans **Si** dans  
lesquels circule le **CO2 froid**

Couche « passive » assurant l'étanchéité



Evolution du rapport gaz/liquide du CO2  
qui capte la chaleur produit par le détecteur

Cette technologie de micro-canaux permet :

- d'optimiser le contact de la partie **Si chaude** à refroidir avec le **CO2 froid** (aucune couche intermédiaire, rapport surface de contact/volume du CO2 maximisé)
- de minimiser la présence de matière passive autour du détecteur

## Plan de l'exposé :

1. Contexte général du développement de refroidissement CO<sub>2</sub> micro-canaux en physique des hautes énergies
2. **Projet « R&T IN2P3 micro-canaux »**
  - CPPM – développement et fabrication des échangeurs
  - LPNHE - développement et fabrication des échangeurs
  - LAPP/LEGI - développement et fabrication des échangeurs
    - simulations numériques
    - banc de mesures / tests prototypes CPPM / LPNHE / LAPP/LEGI ...
3. Conclusions

# R&T IN2P3 Micro-canaux

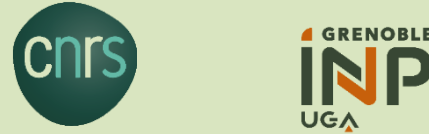


**Stéphan Beurthey**  
**Julien Cogan**  
**Mathieu Perrin-Terrin**



**Pierre Delebecque<sup>\*)</sup>**  
**Stéphane Jézéquel**  
**Roman Kossakowski**

**Maxime Vacher<sup>\*\*)</sup>**



**Frédéric Ayela**  
**Damien Colombet**



**Giovanni Calderini**  
**Francesco Crescioli**



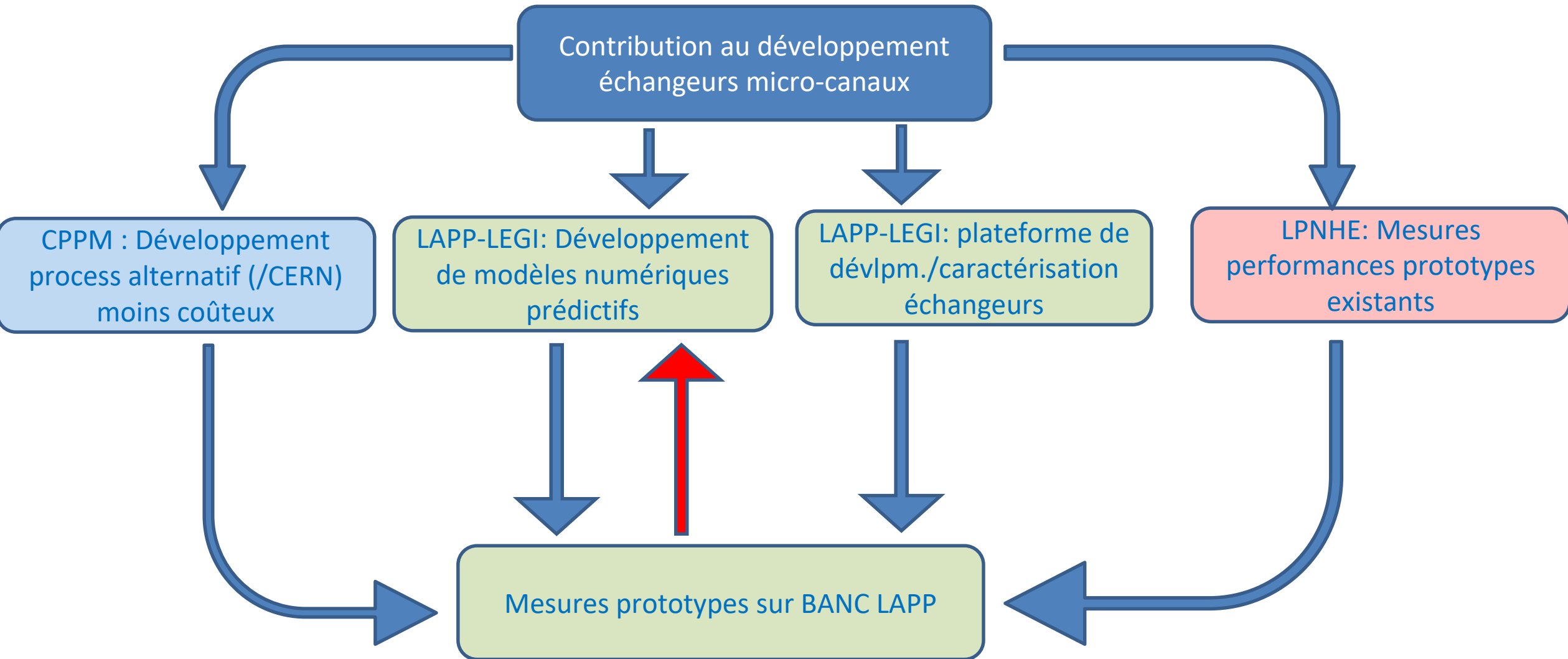
<sup>\*)</sup> porteur du projet

<sup>\*\*)</sup> doctorant LAPP/LEGI





# Objectifs scientifiques et techniques



## Plan de l'exposé :

1. Contexte général du développement de refroidissement CO<sub>2</sub> micro-canaux en physique des hautes énergies
2. Projet « R&T IN2P3 micro-canaux »
  - **CPPM – développement et fabrication des échangeurs**
  - LPNHE - développement et fabrication des échangeurs
  - LAPP/LEGI - développement et fabrication des échangeurs
    - simulations numériques
    - banc de mesures / tests prototypes CPPM / LPNHE / LAPP/LEGI ...
3. Conclusions

# CPPM :

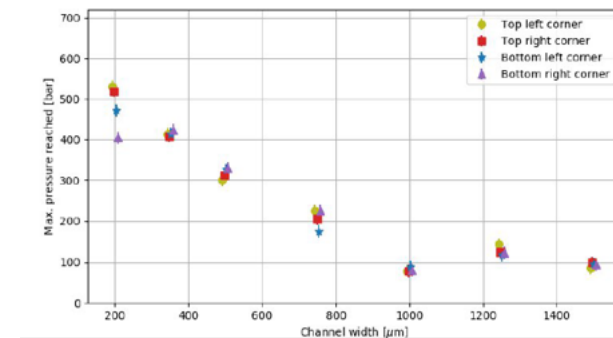
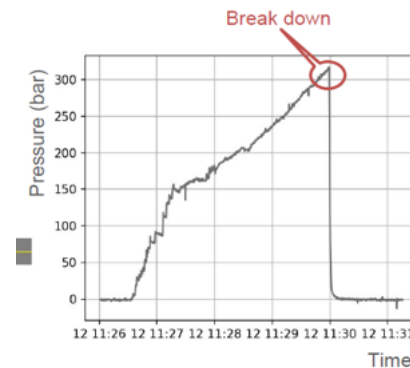
## Développer un processus de fabrication des micro-canaux dans un substrat en silicium en baissant significativement les coûts

Etape clé étudiée au CPPM :

- collage d'un couvercle en silicium sur un substrat dans lequel des micro-canaux sont gravés

Le CPPM (en collaboration avec FEMTO-ST) a identifié un procédé innovant :

- thermo-compression avec des couches minces d'or intermédiaires.
- réalisation des structures mono-canal de 500  $\mu\text{m}$  d'épaisseur résistant à des pressions jusqu'à 600 bars.



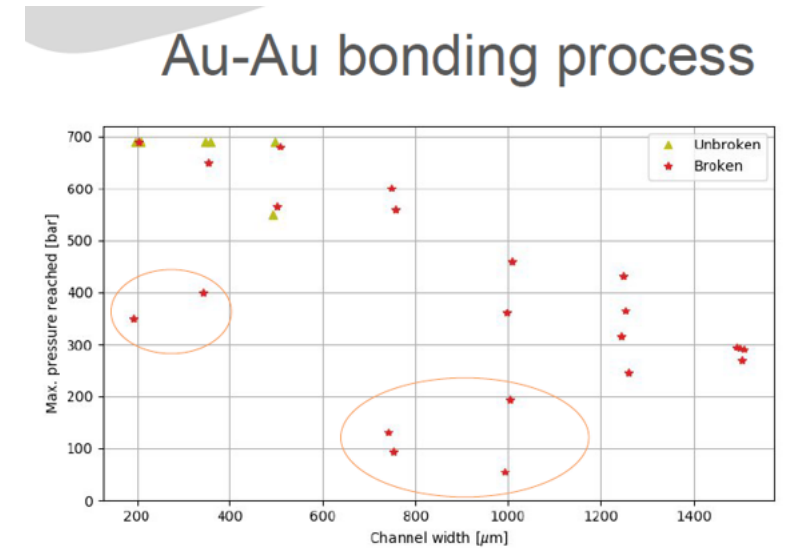
# CPPM :

## Perspectives de développement intéressants :

- collage silicium/Invar
- remplacement de la presse (40 bars) par une chambre hyperbare (400 bars) laquelle permettrait la compression à la température ambiante

## Prochaines étapes :

- réalisation des structures plus réalistes en chambre hyperbare (multi-canaux gravés sur des galettes amincies (250  $\mu\text{m}$ ) avec leur système de connexion.
- validation par l'imagerie acoustique et des tests en pression destructifs
- réalisation des systèmes complets (type celui utilisé dans l'upgrade de LHCb ou ceux fabriqué par le LEGI)
- procéder aux tests sur le banc du LAPP



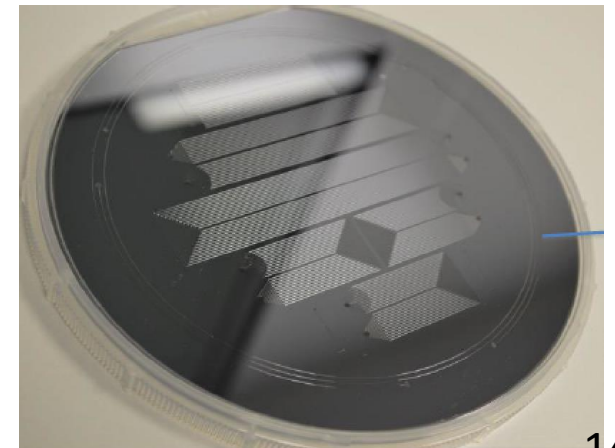
## Plan de l'exposé :

1. Contexte général du développement de refroidissement CO<sub>2</sub> micro-canaux en physique des hautes énergies
2. Projet « R&T IN2P3 micro-canaux »
  - CPPM – développement et fabrication des échangeurs
  - **LPNHE - développement et fabrication des échangeurs**
  - LAPP/LEGI - développement et fabrication des échangeurs
    - simulations numériques
    - banc de mesures / tests prototypes CPPM / LPNHE / LAPP/LEGI ...
3. Conclusions

## Développer des nouveaux micro-canaux et les tester au CERN et au LAPP

LPNHE impliqué depuis plusieurs années dans le développement des systèmes de refroidissement à micro-canaux :

- upgrade du détecteur de traces d'ATLAS (HL-LHC) puis un axe R&D spécifique
- plusieurs productions de prototypes réalisés en collaboration avec FBK Trento (Italie) dans le cadre des projets européens AIDA-2020 et AIDAInnova :
  - gravure de galettes de 500  $\mu\text{m}$  d'épaisseur, fermées par un couvercle en pyrex avec des canaux de 200  $\mu\text{m}$  de largeur et 120  $\mu\text{m}$  de profondeur, avec des blocs de tailles différentes
  - ces blocs sont en cours de caractérisation ou ont été caractérisés au banc de test du Projet Detector Cooling R&D de la Division EP-DT du CERN.
- implication dans le développement des blocs d'interconnexion, en collaboration avec l'INFN de Pise
- des prototypes réalisés dans le cadre du projet Européen AIDAInnova avec des techniques de fabrication additive.



## **LPNHE :**

### **Perspectives de développement concernant les échangeurs :**

- **Nouveaux prototypes :**
  - **Formes différentes**
  - **Dimensions canaux**
  - **Différentes rugosités**
- **Mesures futurs échangeurs au CERN et au LAPP**

### **Perspectives de développement concernant les connecteurs :**

- **Test nouvelles connectiques**

## Plan de l'exposé :

1. Contexte général du développement de refroidissement CO<sub>2</sub> micro-canaux en physique des hautes énergies
2. Projet « R&T IN2P3 micro-canaux »
  - CPPM – développement et fabrication des échangeurs
  - LPNHE - développement et fabrication des échangeurs
  - **LAPP/LEGI** - développement et fabrication des échangeurs
    - simulations numériques
    - banc de mesures / tests prototypes CPPM / LPNHE / LAPP/LEGI ...
3. Conclusions



# LAPP/LEGI :

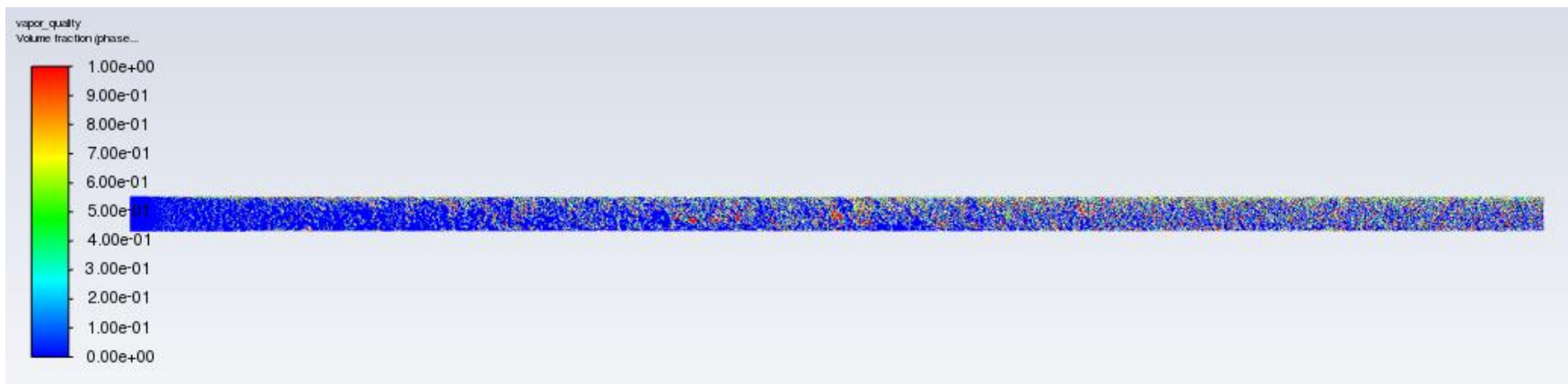
**Développer des modèles numériques capables de prédire le comportement du CO2 diphasique en micro-canaux.**

**Mutualisation des compétences entre le LAPP et le LEGI (depuis 2020) :**

- LAPP : instrumentation, physique des hautes énergies
- LEGI : fabrication micro-canaux, mécanique des fluides

**Identification des modèles numériques potentiels utilisables avec ANSYS-Fluent et des paramètres à ajuster en fonction de mesures empiriques :**

- fréquence de nucléation des bulles
- densité en sites de nucléation
- taux de croissance de bulles
- cartographie d'écoulement selon les conditions opératoires



## **LAPP/LEGI :**

**Développer des modèles numériques capables de prédire le comportement du CO2 diphasique en micro-canaux.**

**Ces outils numériques seront mis à disposition de la communauté, la mise en place de licences pourra être envisagée.**

**Ils permettront aux concepteurs d'échangeurs de chaleur avec micro-canaux de faire des designs proches de la cible, limitant le recours à des longues et coûteuses phases de mesures sur prototypes.**

# LAPP/LEGI :

## Développer des micro-canaux et les tester au LAPP

Des échangeurs simplifiés semi transparents permettant une visualisation des écoulements (silicium/pyrex) sont en cours de production à Nanofab (Institut Néel - Grenoble).



Ils seront caractérisés sur le banc du LAPP pour produire un jeu de données qui sera réinjecté dans les modèles de simulation numérique.

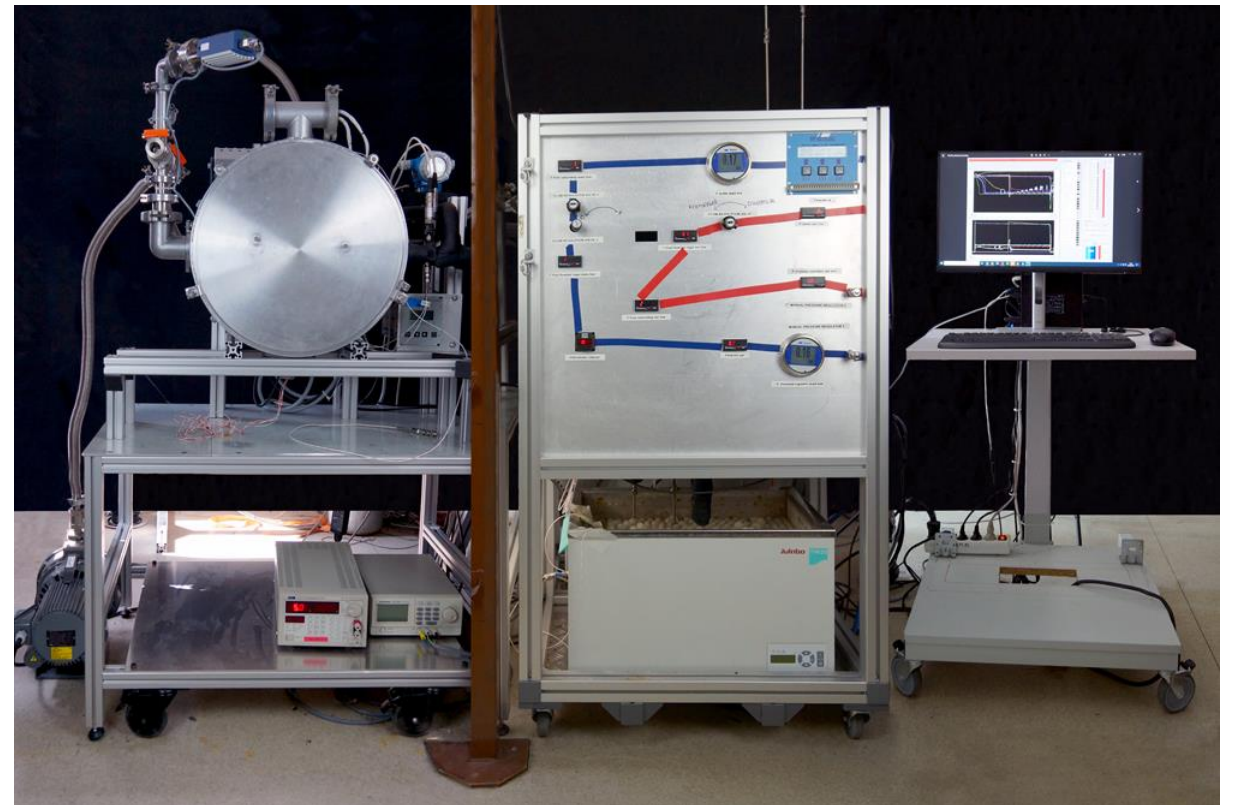
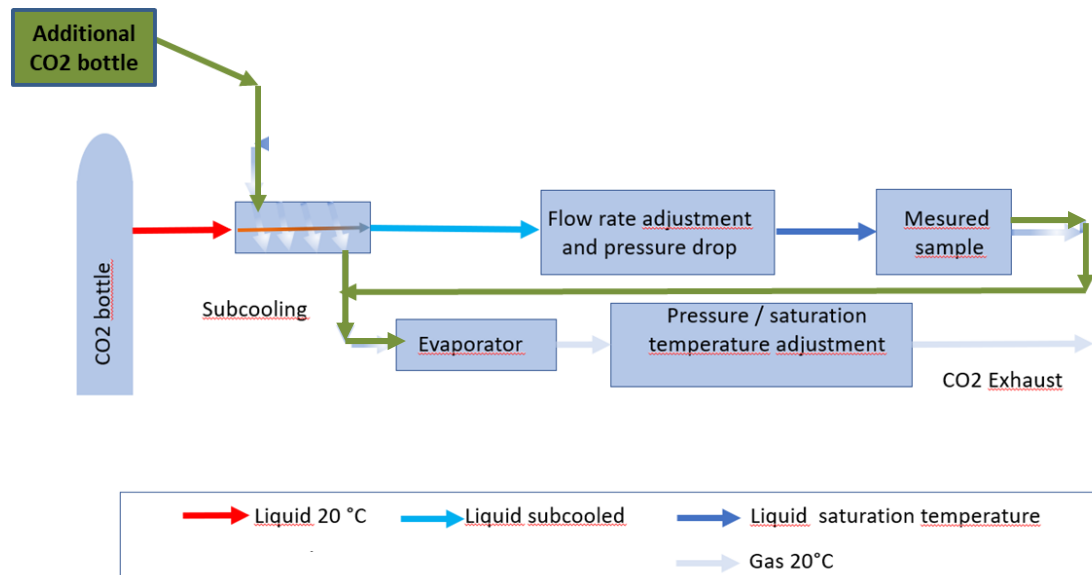
# LAPP/LEGI :

## Optimiser le banc de mesures de caractérisation au LAPP

L'équipe du LAPP a déjà construit en 2011 et opéré un banc de mesure permettant d'obtenir les données expérimentales pour le projet Pixel d'ATLAS dans le cadre de la thèse de Pierre Barroca<sup>\*)</sup>.

En 2022 le banc a subi une première transformation pour caractériser des prototypes de micro-canaux fonctionnant avec des petits débits ( $< 1 \text{ g/s}$ ) :

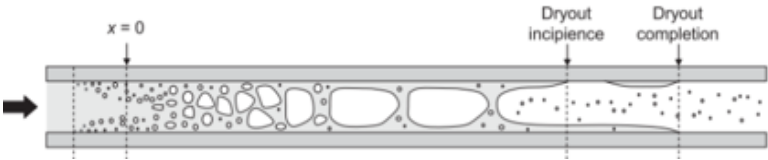
- Optimisation/isolation thermique du circuit CO<sub>2</sub>
- Circuit de sous-refroidissement indépendant du circuit principal du CO<sub>2</sub>



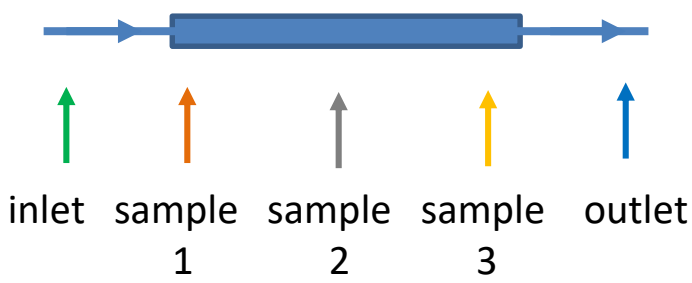
<sup>\*)</sup> Modelling of CO<sub>2</sub> cooling of the ATLAS ITk Pixel Detector', <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02956226>

# Premières mesures effectués avec le nouveau banc (juillet 2022)

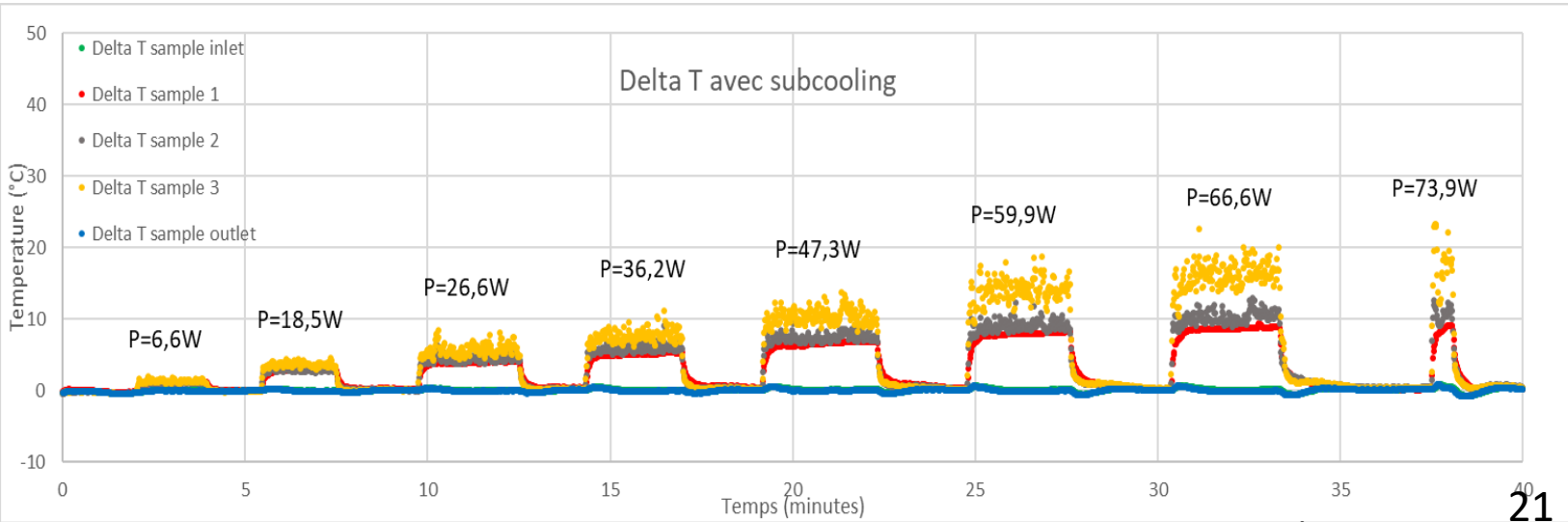
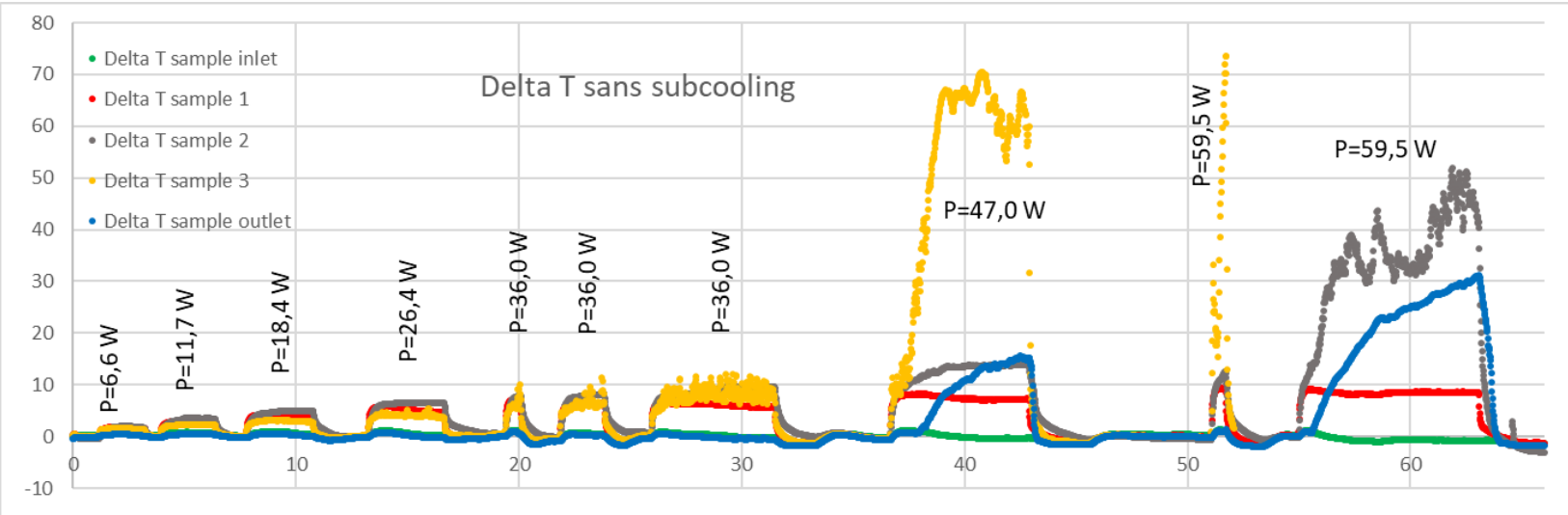
Elévation des températures en amont, au niveau de et à l'aval de l'échantillon pour divers puissances de chauffe appliquées à l'échantillon (1mm de diamètre, 10 cm de longueur), débit 0,4 g/s



Sans sub-cooling :  
Plus de CO2 diphasique dans l'échantillon à partir de 40 W



Avec sub-cooling :  
CO2 diphasique présent dans l'échantillon jusqu'à 74 W



Remarque : Transformer 100% du CO2 liquide en 100% du CO2 gazeux à -20°C nécessite environ 112 W pour le débit de 0,4 g/s

# **LAPP/LEGI :**

## **Optimiser le banc de mesures de caractérisation au LAPP**

**Une optimisation du fonctionnement du banc est encore nécessaire :**

- redondance pour la mesure du débit**
- remplacement de l'actuel sous-refroidisseur**
- amélioration de l'isolation thermique dans quelques points**
- adaptation de l'enceinte qui accueillera les échantillons à mesurer**
- optimisation de l'interface utilisateur du système d'acquisition**
- amélioration de la précision/stabilité des débits et ajustement au plus proche du minimum ciblé à 10mg/s**
- mise en place du dispositif pour la caméra haute précision et vitesse**
- ...**

## Plan de l'exposé :

1. Contexte général du développement de refroidissement CO<sub>2</sub> micro-canaux en physique des hautes énergies
2. Projet « R&T IN2P3 micro-canaux »
  - CPPM – développement et fabrication des échangeurs
  - LPNHE - développement et fabrication des échangeurs
  - LAPP/LEGI - développement et fabrication des échangeurs
    - simulations numériques
    - banc de mesures / tests prototypes CPPM / LPNHE / LAPP/LEGI ...
3. Conclusions

## Conclusions :

- Le rapport « The 2021 ECFA Detector Research And Development Roadmap” souligne l’importance du développement des technologies de refroidissement par le **CO2 diphasique** (voir N2O diphasique) dans les **micro-canaux**, notamment pour le FCC-hh (sinon « **main physics goals cannot be reached** »)
- Le projet R&T IN2P3 Micro-canaux (**CPPM / LAPP/LEGI / LPNHE**) propose de :
  - s’appuyer sur l’expérience du **LPNHE**, du **CPPM** et du **LEGI** pour continuer de développer les technologies de production des micro-canaux
  - s’appuyer sur les compétences complémentaires du **LAPP** et du **LEGI** pour développer les simulations numériques permettant de guider le choix de concepteurs des micro-canaux et limiter à l’avenir les longs et coûteux essais expérimentaux
  - optimiser le banc de caractérisation du **LAPP** pour permettre les tests des échantillons et fournir les données pour les simulations numériques



# Ressources humaines prévues pour le projet R&T « Refroidissement CO2 »

Chercheurs, ens-cherch.  
et doctorants IN2P3

Nom des personnes	Statut	2023	2024	2025	Total (FTE)
<b>CPPM</b>		<b>45%</b>	<b>45%</b>	<b>20%</b>	<b>1,10</b>
Julien Cogan	CR	25%	25%	10%	
Mathieu Perrin-Terrin	CR	20%	20%	10%	
<b>LAPP</b>		<b>150%</b>	<b>175%</b>	<b>150%</b>	<b>4,75</b>
Stéphane Jézéquel	DR	10%	10%	10%	
Roman Kossakowski	PR	40%	40%	40%	
Maxime Vacher	Doctorant	100%	75%	0%	
Doctorant X	Doctorant	0%	50%	100%	
<b>LPNHE</b>		<b>60%</b>	<b>60%</b>	<b>5%</b>	<b>1,25</b>
Giovanni Calderini	DR	10%	10%	5%	
CDD AIDAInnova	Post-doctorant	50%	50%	0%	
<b>TOTAL (FTE)</b>		<b>2,55</b>	<b>2,8</b>	<b>1,75</b>	<b>7,1</b>

**Total FTE :**

**2023 : 5,15**

**2024 : 4,9**

**2025 : 3,65**

Ingénieurs et  
techniciens IN2P3

Nom des personnes	Statut	2023	2024	2025	Total (FTE)
<b>CPPM</b>		<b>20%</b>	<b>20%</b>	<b>10%</b>	<b>0,50</b>
Stéphan Beurthey	IRHC	20%	20%	10%	
<b>LAPP</b>		<b>280%</b>	<b>205%</b>	<b>130%</b>	<b>6,15</b>
Pierre Delebecque	IRHC	60%	60%	60%	
Maxime Vacher (étudiant)	Doctorant	100%	75%	0%	
Stagiaire ingénieur	Etudiant	50%	0%	0%	
Gaël Balik	IR2	40%	40%	40%	
Thibaut Rambure	AI	20%	20%	20%	
Fabrice Peltier	AI	10%	10%	10%	
<b>LPNHE</b>		<b>10%</b>	<b>10%</b>	<b>0%</b>	<b>0,20</b>
Francesco Crescioli	IR1	10%	10%	0%	
<b>TOTAL (FTE)</b>		<b>3,10</b>	<b>2,35</b>	<b>1,40</b>	<b>6,85</b>

Personnels  
autres  
qu'IN2P3

Nom des personnes	Statut	2023	2024	2025	Total (FTE)
<b>LEGI</b>		<b>50%</b>	<b>50%</b>	<b>50%</b>	<b>1,50</b>
Damien Colombet	MCF	50%	50%	50%	
<b>TOTAL (FTE)</b>		<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>0,50</b>	<b>1,50</b>

# Ressources financières prévues pour le projet R&T « Refroidissement CO2 »

Ressources financières IN2P3

	WP	Laboratoire	2023	2024	2025	Total
<b>Equipements</b>			<b>79 500 €</b>	<b>14 500 €</b>	<b>4 000 €</b>	<b>98 000 €</b>
Matériel informatique	WP1.1	LAPP-LEGI	5 000 €			
Eléments à assembler	WP2.1	CPPM	10 000 €			
Eléments à assembler	WP2.3	CPPM		5 000 €		
Pompe HP robotisée WP2.1 & 2.2	WP2.1 & 2.2	CPPM	30 000 €			
Fourniture et travaux (galettes ,gravure, découpe)	WP3.1	LPNHE	10 000 €			
Fabrication additive	WP3.2	LPNHE	10 000 €			
Fournitures et réalisation échangeurs	WP1.2	LAPP-LEGI	7 000 €	8 000 €		
Système éclairage	WP4.1	LAPP-LEGI	1 000 €			
Alimentation chaufferettes	WP4.1	LAPP-LEGI	1 000 €			
Composants fluide pour upgrade	WP4.1 & 3.2	LAPP-LEGI	1 500 €	1 500 €		
Déverseur	WP4.1 & 3.2	LAPP-LEGI	4 000 €			
Vanne régulation débit	WP4.1 & 3.2	LAPP-LEGI	5 000 €			
Adaptation autres fluides que CO2	WP4.3	LAPP-LEGI			4 000 €	
<b>Fonctionnement</b>			<b>5 700 €</b>	<b>5 700 €</b>	<b>5 700 €</b>	<b>17 100 €</b>
Contribution licences ANSYS	WP1.1	LAPP-LEGI	1 000 €	2 000 €	2 000 €	
Bouteilles CO2	WP5.1, 5.2 & 5.3	LAPP-LEGI	1 200 €	1 200 €	1 200 €	
Composants banc remplacement	WP5.1, 5.2 & 5.3	LAPP-LEGI	2 000 €	2 000 €	2 000 €	
Location camera	WP5.1, 5.2 & 5.3	LAPP-LEGI	2 500 €	2 500 €	2 500 €	
<b>Missions</b>			<b>2 000 €</b>	<b>2 000 €</b>	<b>2 000 €</b>	<b>6 000 €</b>
Missions / conférences	Tous		2 000 €	2 000 €	2 000 €	
<b>Personnels</b>			<b>4 000 €</b>	<b>4 000 €</b>	<b>- €</b>	<b>8 000 €</b>
Stages	WP1.1, 5.1, 5.2 & 5.3		4 000 €	4 000 €		
<b>TOTAL</b>			<b>91 200 €</b>	<b>26 200 €</b>	<b>11 700 €</b>	<b>129 100 €</b>

**Total :**

**2023 : 101 200 €**

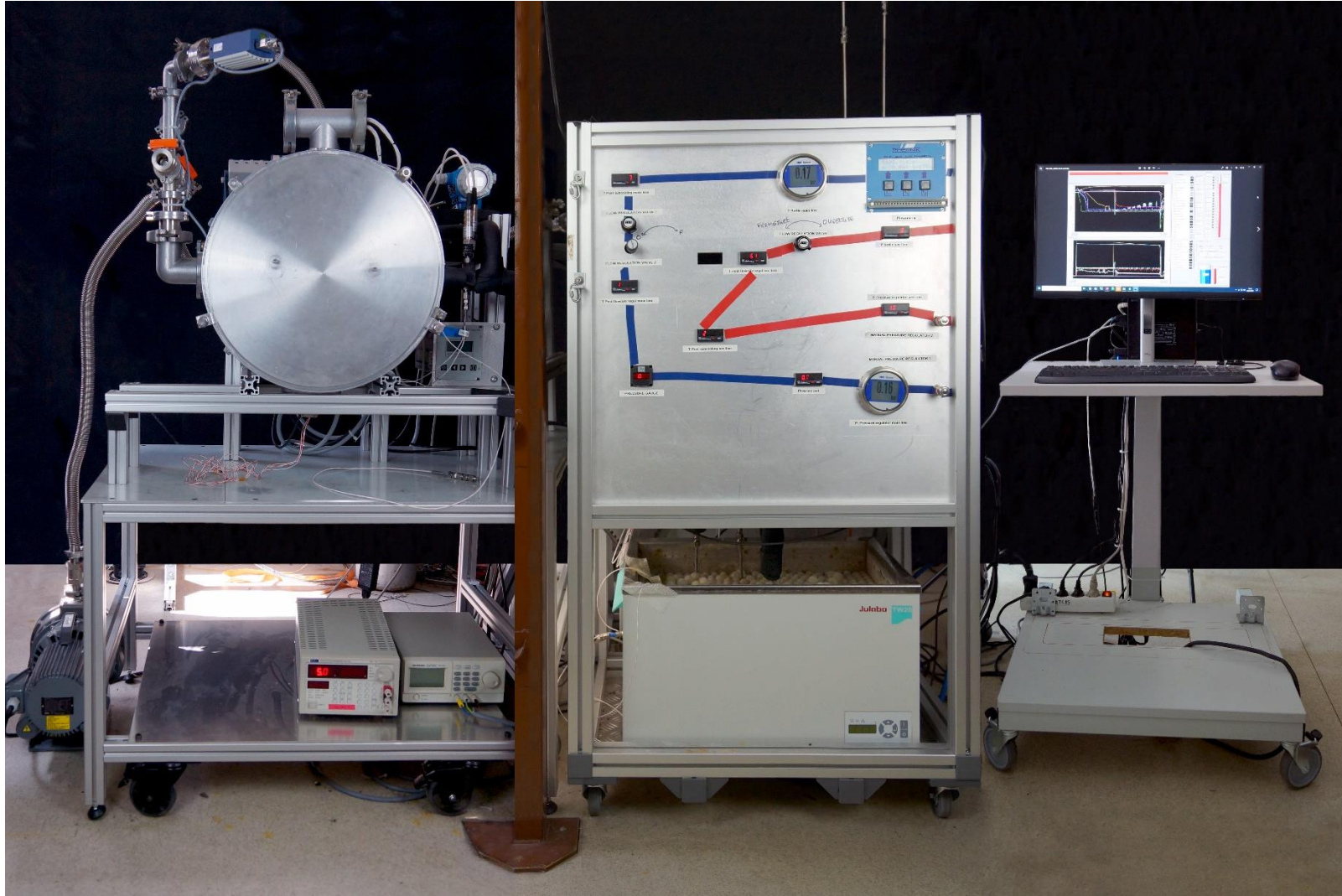
**2024 : 26 200 €**

**2025 : 11 700 €**

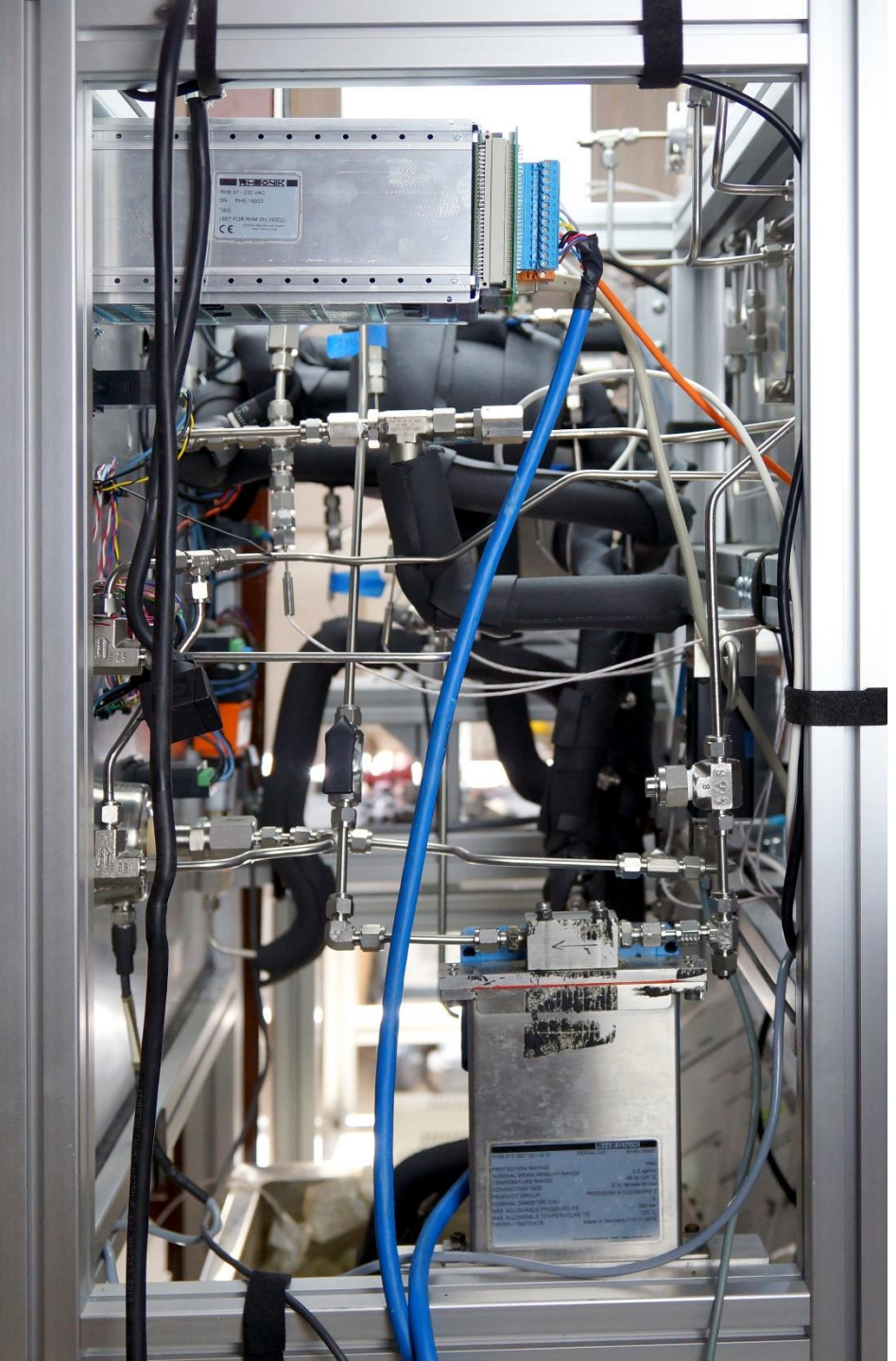
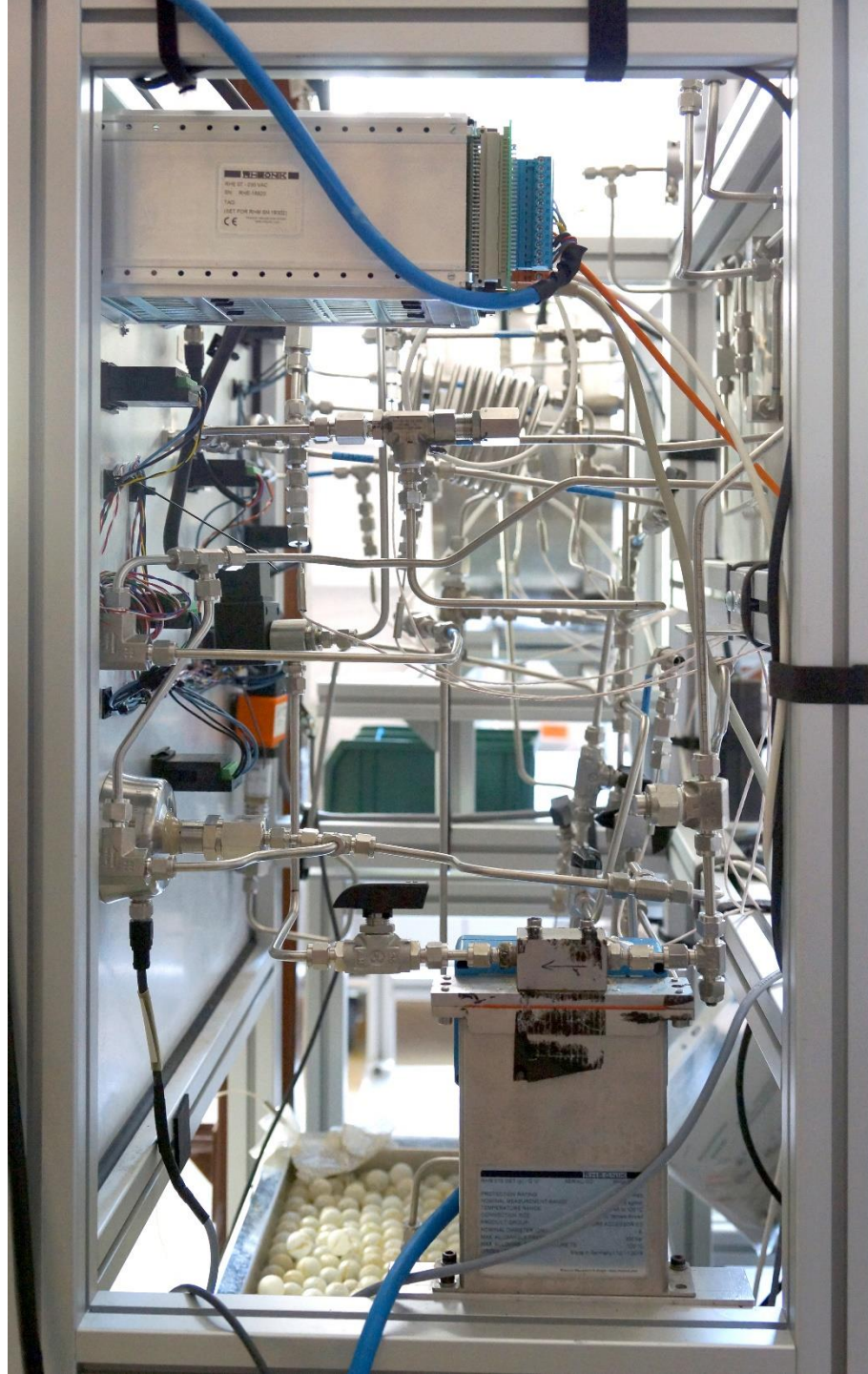
Ressources financières  
autres qu'IN2P3

	WP	Financements	2023	2024	2025	Total
<b>Equipements</b>			<b>20 000 €</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>	<b>20 000 €</b>
Appareils fluide, mesure et régulation	WP3.1	LABEX ENIGMASS	20 000 €			
<b>Fonctionnement</b>			<b>- €</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>
<b>Missions</b>			<b>- €</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>
<b>Personnels</b>			<b>- €</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>
<b>TOTAL</b>			<b>20 000 €</b>	<b>- €</b>	<b>- €</b>	<b>20 000 €</b>

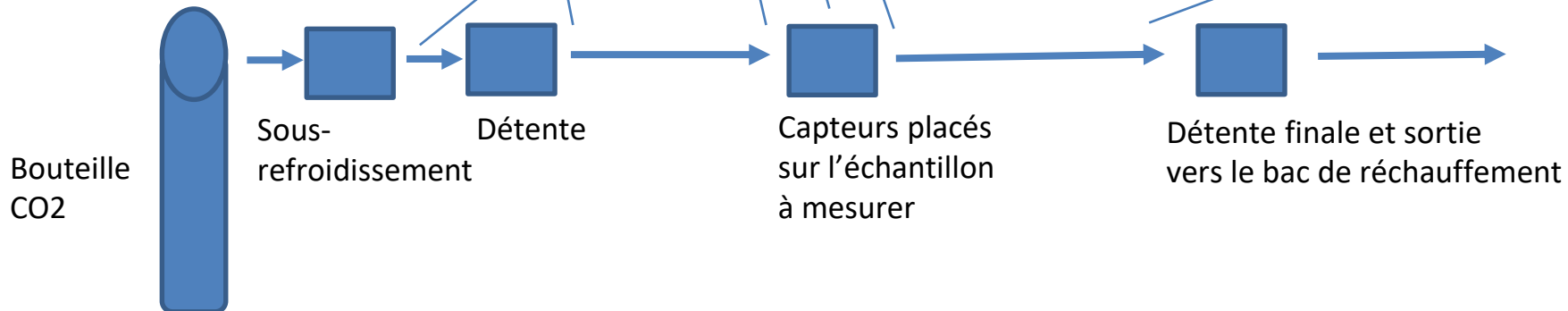
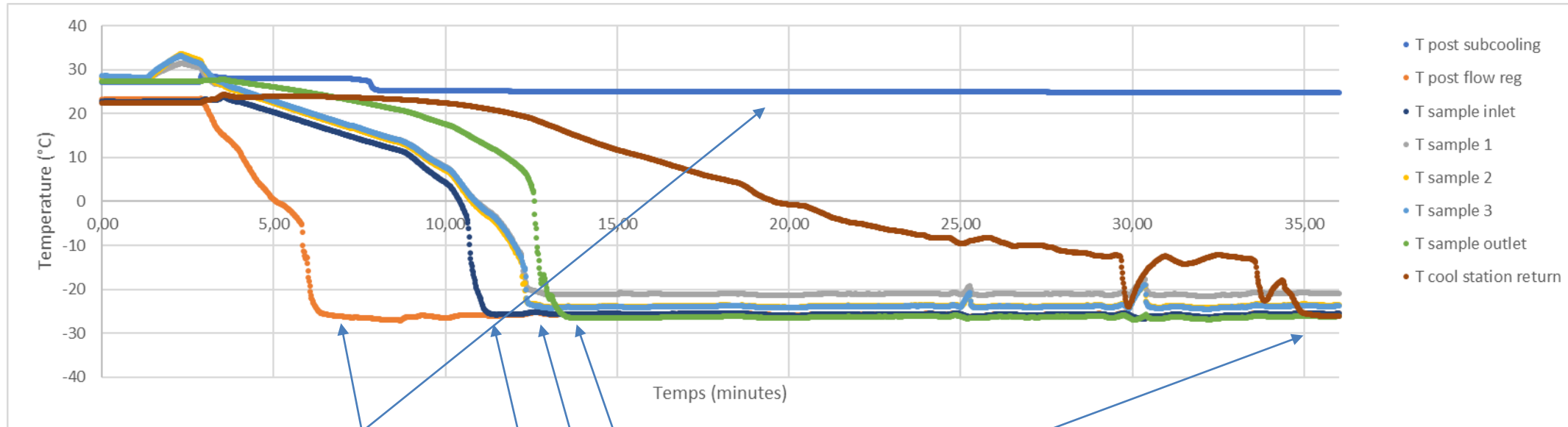








## Evolution des températures dans divers points du circuit CO2 lors de sa mise en fonctionnement et en absence de sous-refroidissement (débit CO2 environ 0,4 g/s).



Les baisses rapides des températures sur divers points du circuit correspondent aux arrivées du front du mélange diphasique du CO2 qui avance au fil du temps. Ce régime transitoire dure typiquement une trentaine de minutes. On observe l'arrivée tardive du mélange à la fin du circuit.



