

FROM RESEARCH TO INDUSTRY

cea

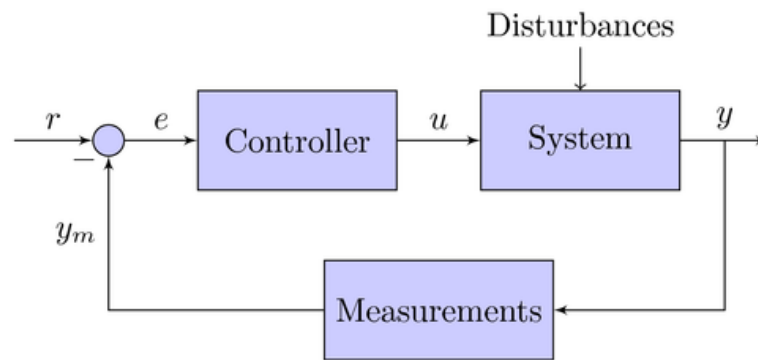
INAC

INSTITUT NANOSCIENCES  
ET CRYOGÉNIE

SBT

www.cea.fr

# SYSTÈMES CRYOGÉNIQUES : QUAND LA SIMULATION DEVIENT INCONTOURNABLE



François BONNE, PhD

30/05/2017

Le Service des Basses Températures

La grande réfrigération : les enjeux

La simulation, pourquoi faire ?

La bibliothèque Simcryogenics pour Simulink

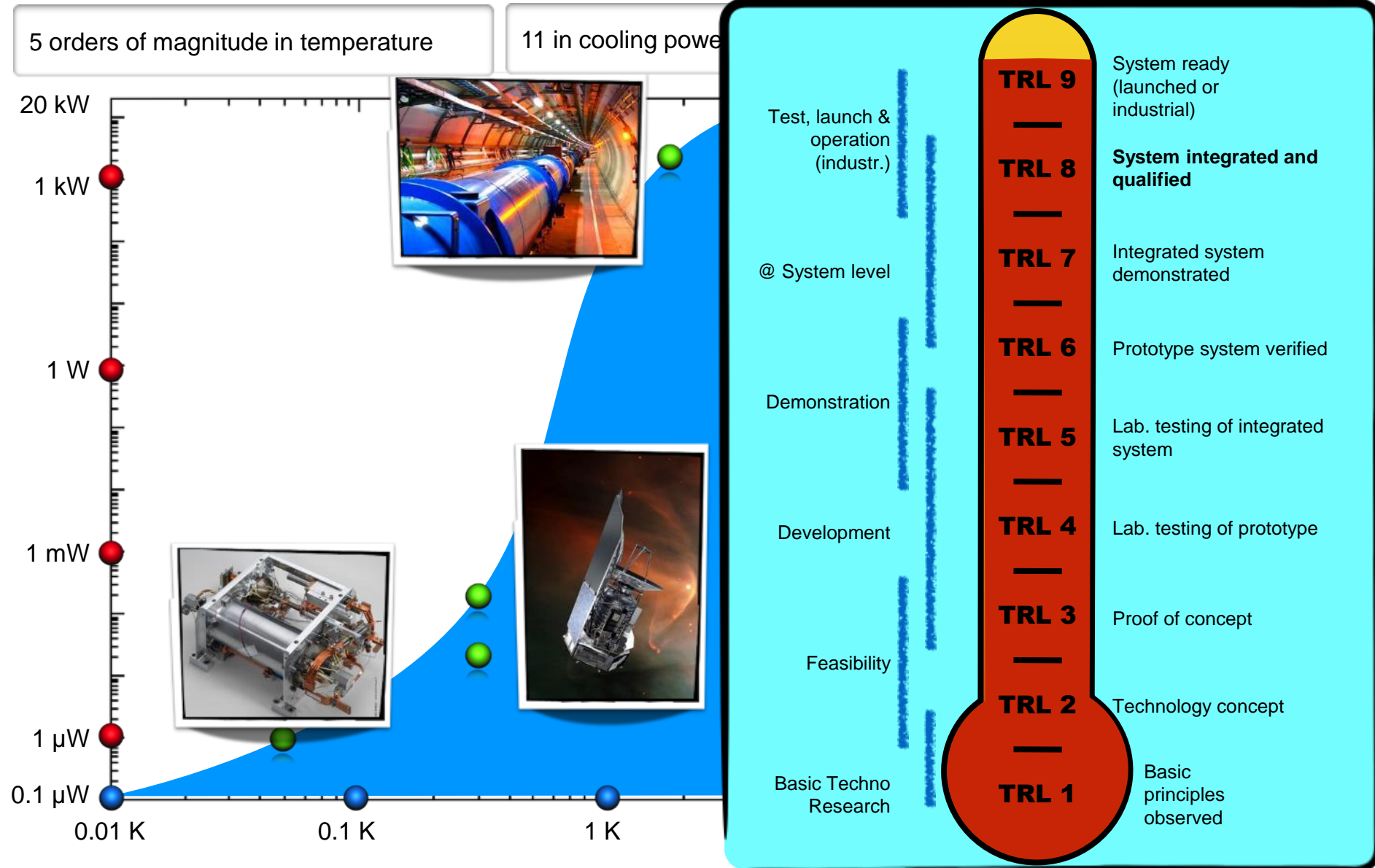
Exemples de réalisations

Conclusions et Perspectives

# LE SERVICE DES BASSES TEMPÉRATURES



# SBT: BROAD SPECTRUM OF ACHIEVEMENTS

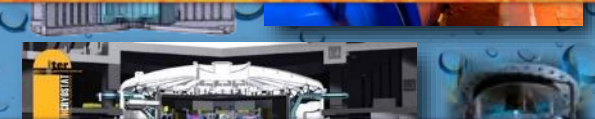


# SEMI-MATRIX ORGANISATION

**RÉFRIGÉRATION & THERMOHYDRAULIQUE**



**CALCULS & CONCEPTION CRYOGÉNIQUE**



**CRYOGÉNIE POUR LA FUSION**

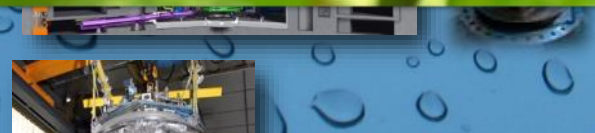


**CRYORÉFRIGÉRATEURS & CRYOGÉNIE SPATIALE**



Staff: 9  
L3C

**ELECTRONIQUE & AUTOMATISME**



LEA

Staff: 12

**LIQUÉFACTION, REFRIGÉRATION & CARACTÉRISATION**



Staff: 10  
LRTH



Staff: 14  
LCP



Staff: 7  
LLRC

# IN SUMMARY



Staff ≈ 70  
 30% Technician  
 50% Engineer - Researcher  
 20% Trainee (PhD, etc..)  
 Budget ≈ 9.5 M€ total. Sub.: 2.2 M€.  
 Resources excl. Fluids ≈ 3.2 M€

Refrigeration  
& Helium  
Thermohydraulics



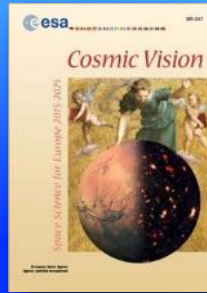
JT60SA



ITER



Turbulence



SPICA



50 mK



Cryocoolers &  
Space Cryogenics



ATHENA



LMJ

Lasers  
H2 Targets



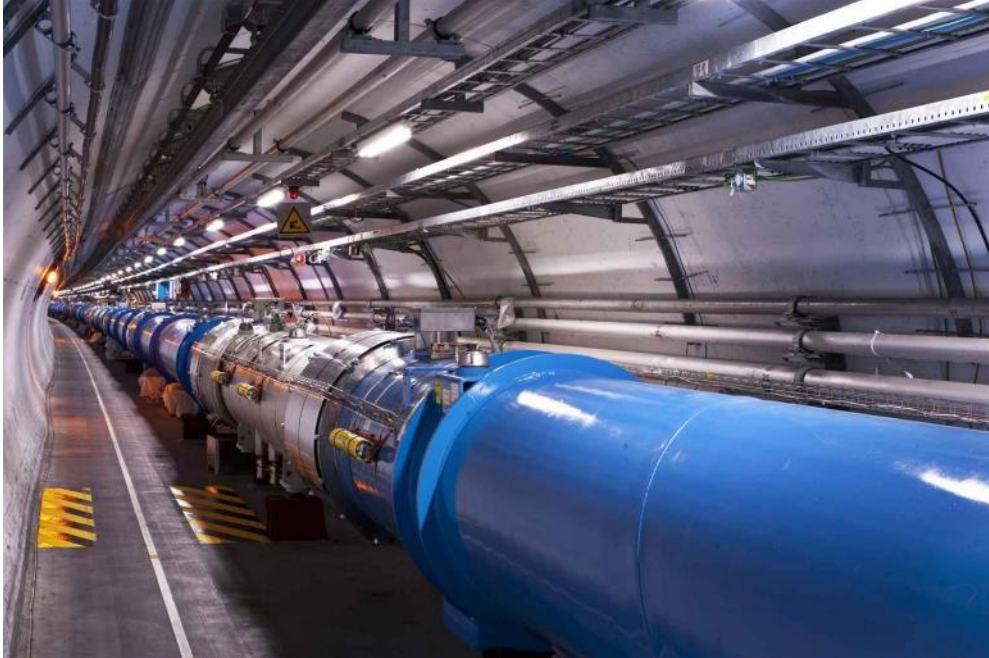
μG experiment

Cryogenics for fusion



# LA GRANDE RÉFRIGÉRATION : LES ENJEUX





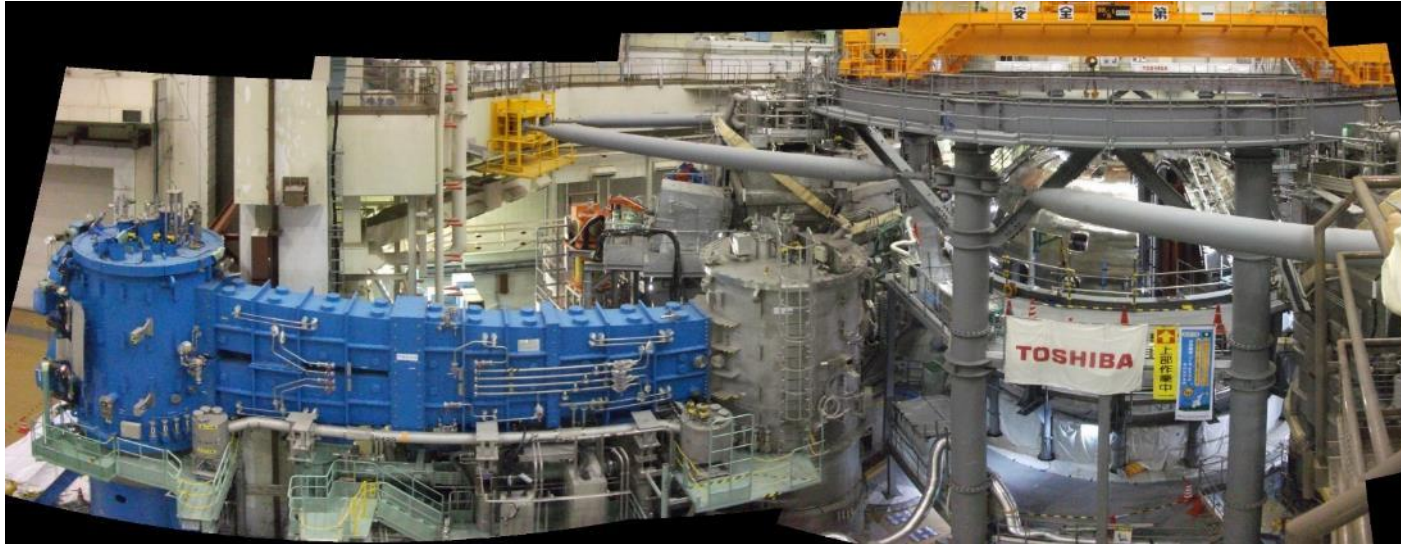
FCC - > bientôt plusieurs centaines de mégawatts frigo

Le CERN, à Genève

- > Plusieurs dizaines de kilowatts de puissance frigo
- > Plusieurs dizaine de mégawatts électrique

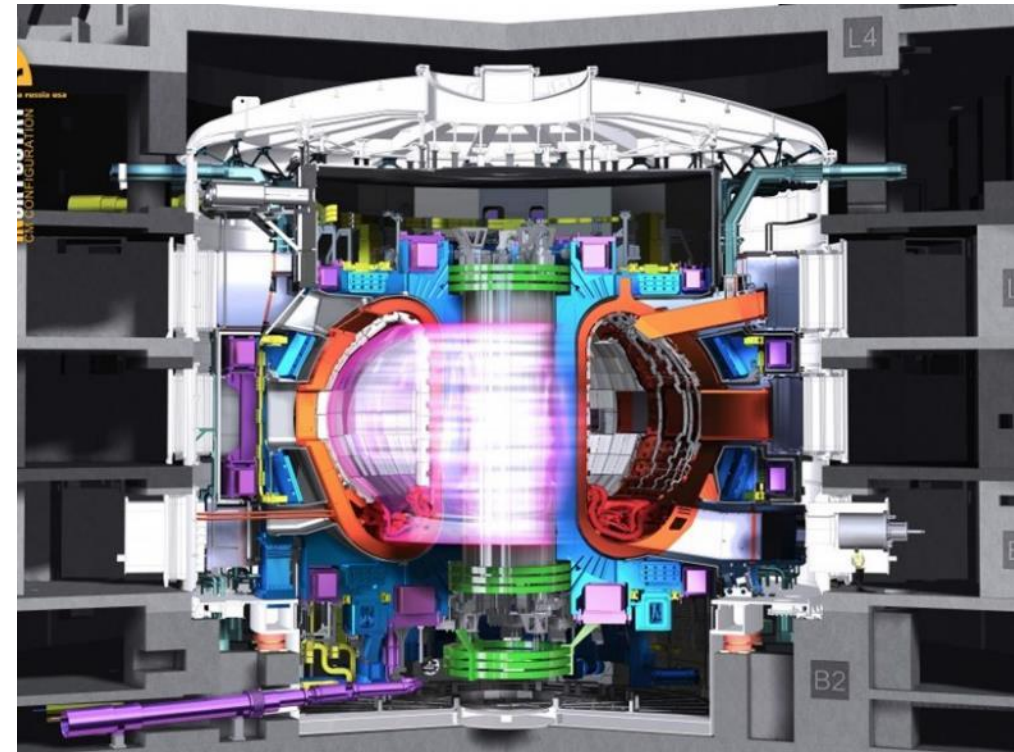






JT60SA à Naka, Japon (2016)  
-> 10 kilowatts de puissance frigo

Iter -> 100 kilowatts de  
puissance frigo (2020...)



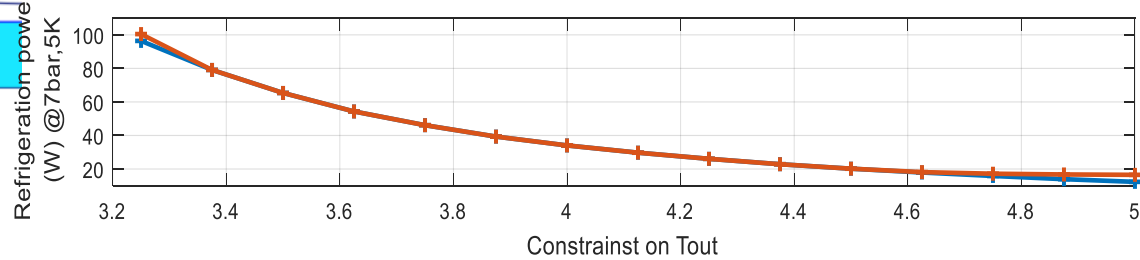
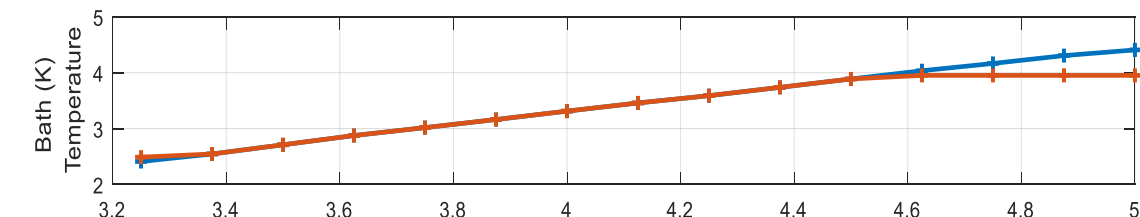
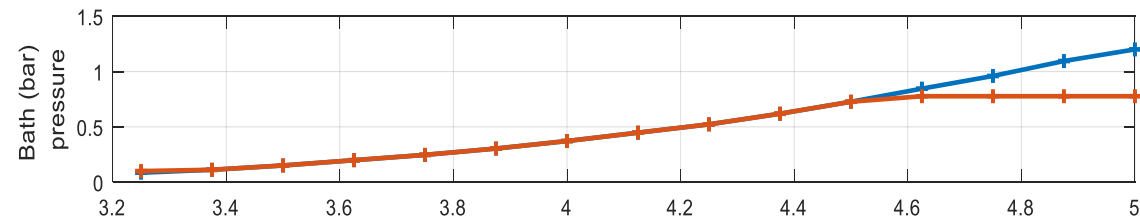
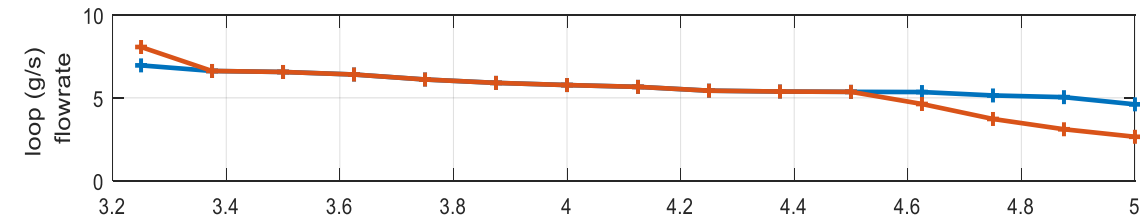
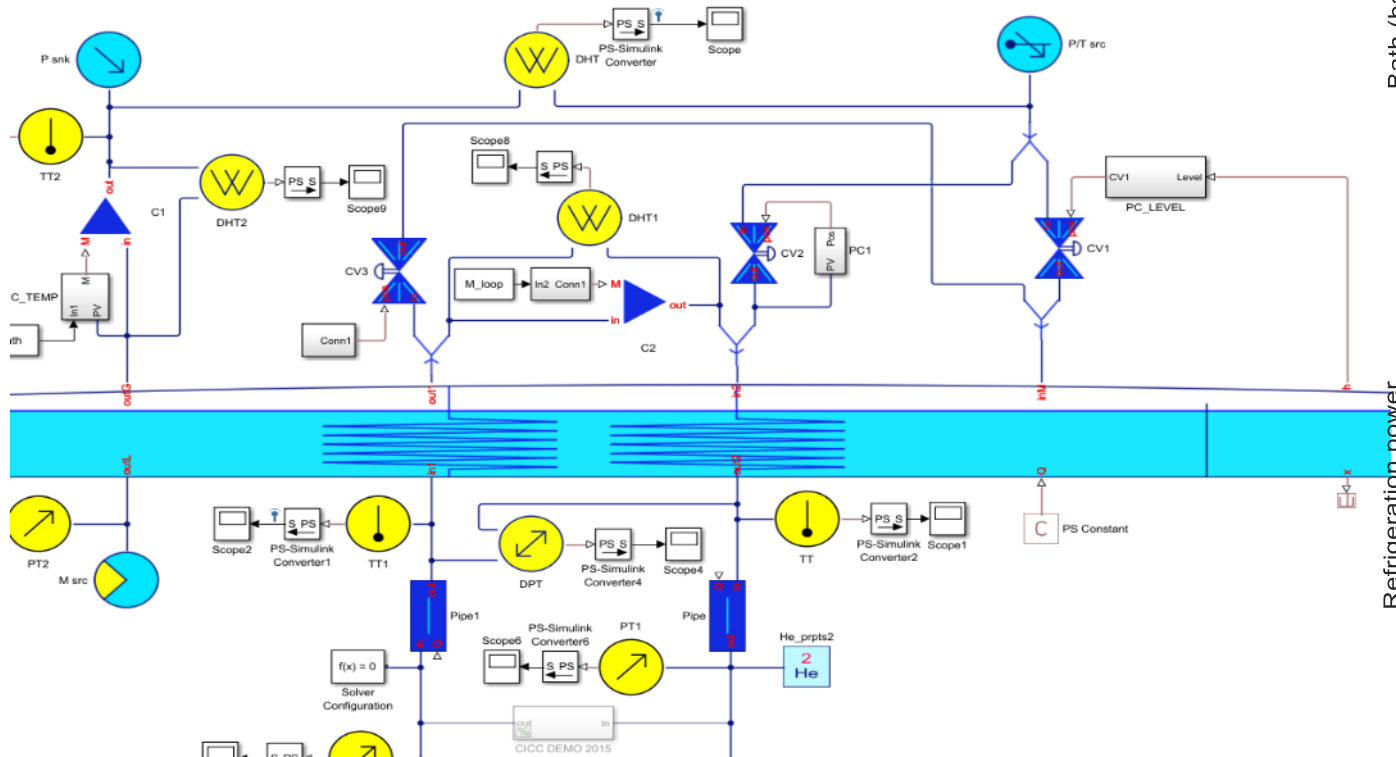
- Les réfrigérateurs sont de plus en plus grands
  - Consommation : 220 Watt par Watt @4,4K
  - Plusieurs dizaines de kW : plusieurs dizaines de MW
  
- Les réfrigérateurs sont de plus en plus complexes
  - Difficulté de mise en œuvre / démarrage
  - Cout d'exploitation très élevés

# LA SIMULATION, POURQUOI FAIRE ?

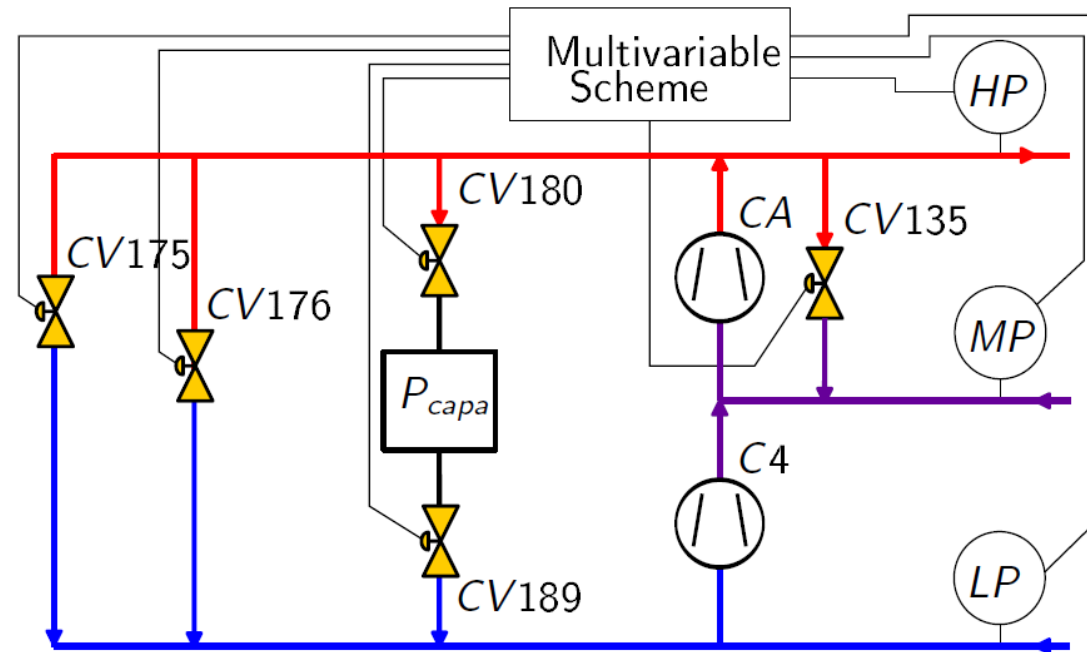
- Conception de l'architecture d'un réfrigérateur
- Etude du comportement dynamique
- **Etudes paramétriques**
- **Synthèse de loi de commande à base de modèle**
- Validation de codes automates
- **Formation des opérateurs**
- ...

## Etudes paramétriques

- Balayer des séries de paramètres
- Minimiser la consommation

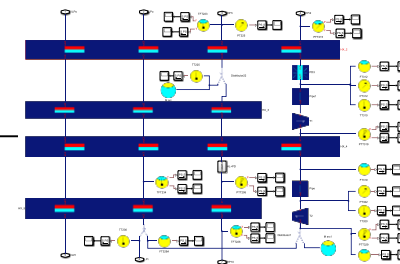
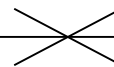
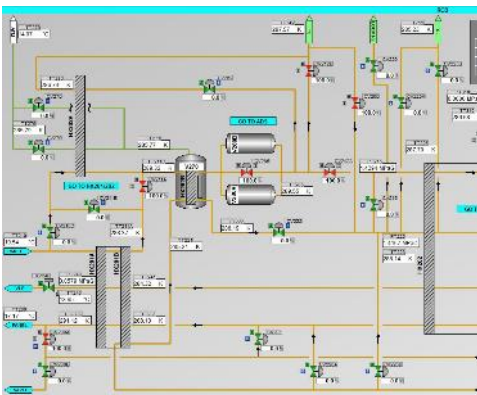


- Synthèse de loi de commande à base de modèle
  - Les lois de commande sont réglées à partir du modèle
  - Lois de commande mono ou multi variables



## ■ Formation des opérateurs

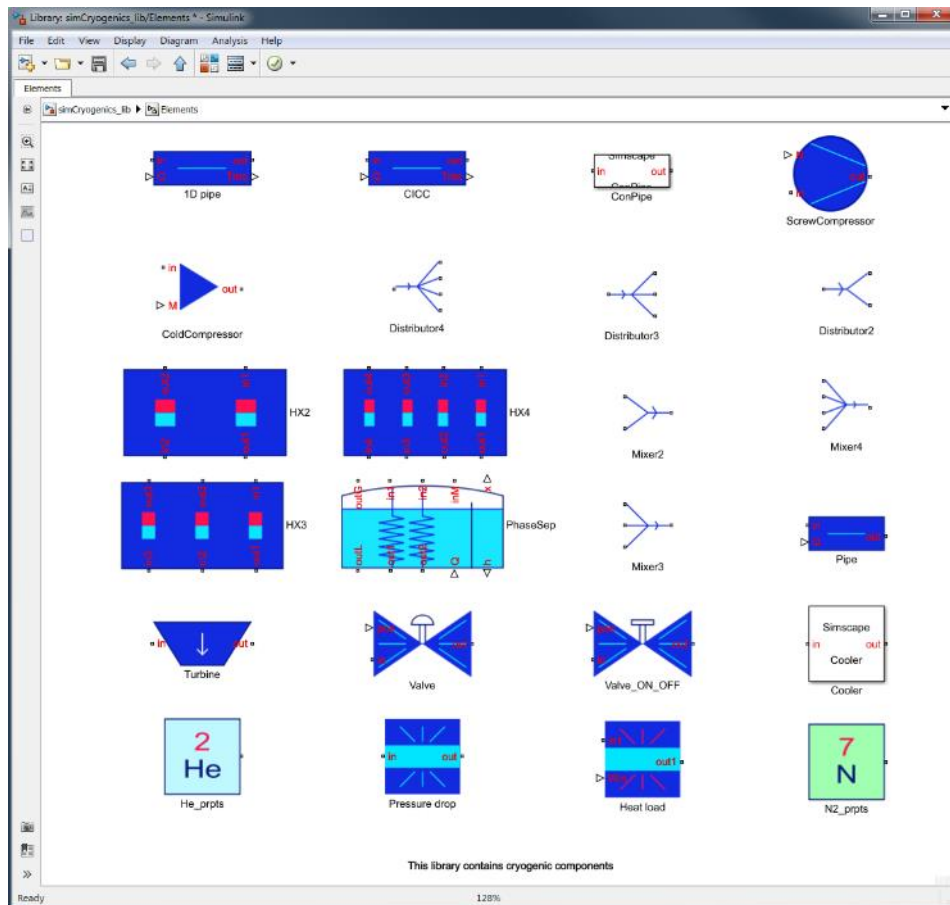
- permet la formation « de base »
- permet de travailler sur des cas « difficiles »
- économie d'électricité, de fluides
- aucun risque de casse...



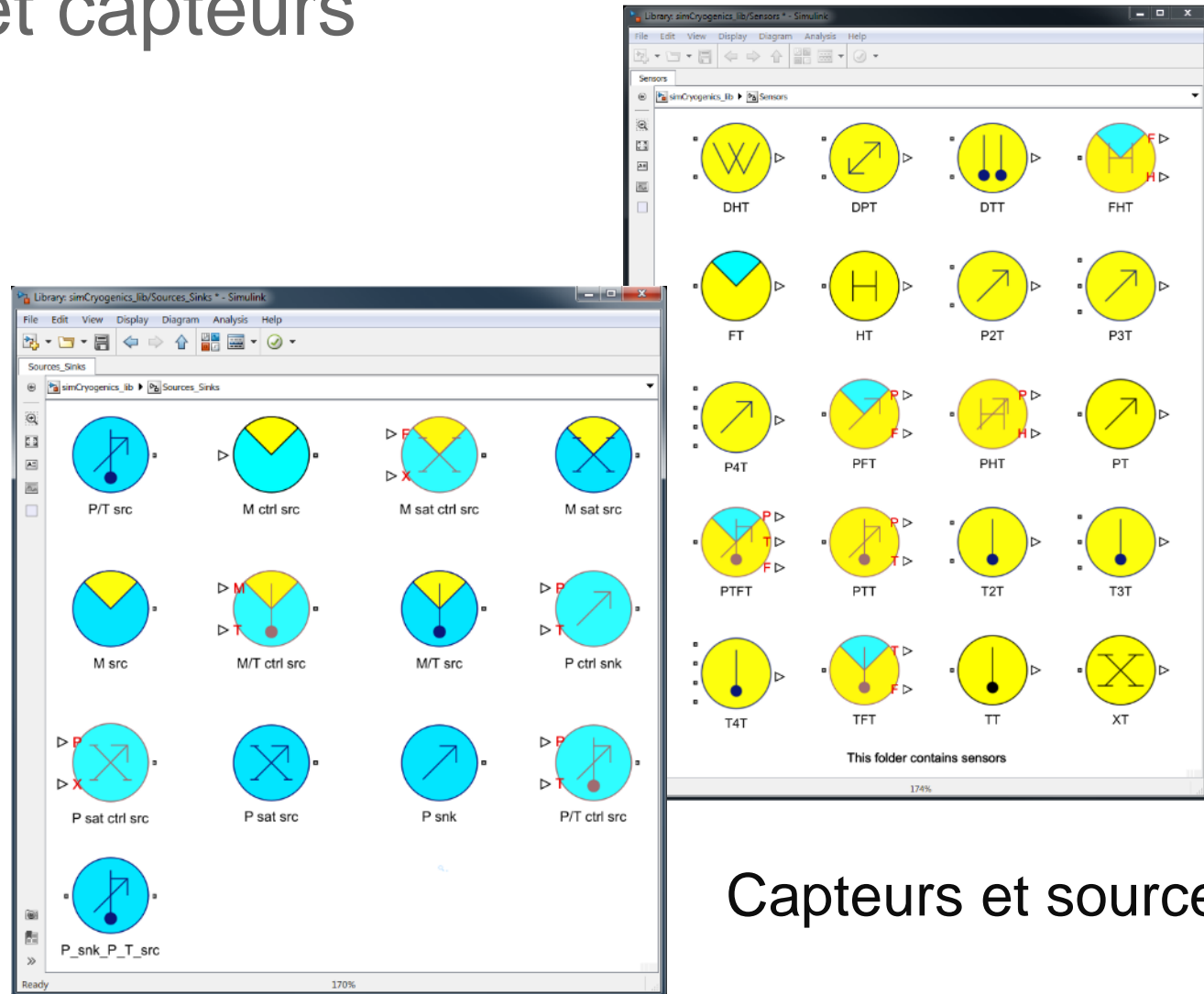
**LA BIBLIOTHÈQUE SIMCRYOGENICS  
POUR MATLAB/SIMULINK**



## Composants, sources et capteurs



Palette de composants disponibles dans Simcryogenics



Capteurs et sources

## ■ Exemple de code d'un composant (pipe0D)

```

equations
  if act == 1
    Hin == in1.H;
    out1.H == Hout;
  else
    in1.H == out1.H;
    Hin == Hout;
  end

  % rhoH properties for the calculation of H hot
  rhoH_H == tablelookup(in1.P_P_H, in1.H_P_H, in1.rho_P_H , in1.P, (Hin + Hout)/2, interpolation=linear);

  % THout properties for the calculation of Q
  THout(1) == tablelookup(in1.P_P_H, in1.H_P_H, in1.T_P_H, in1.P, Hin, interpolation = linear);
  THout(2) == tablelookup(in1.P_P_H, in1.H_P_H, in1.T_P_H, in1.P, Hout, interpolation = linear);

  % CpH properties for calculation of H hot
  CpH == tablelookup(in1.T_T_P, in1.P_T_P, in1.Cp_T_P , (THout(1) + THout(2))/2, in1.P, interpolation=linear);

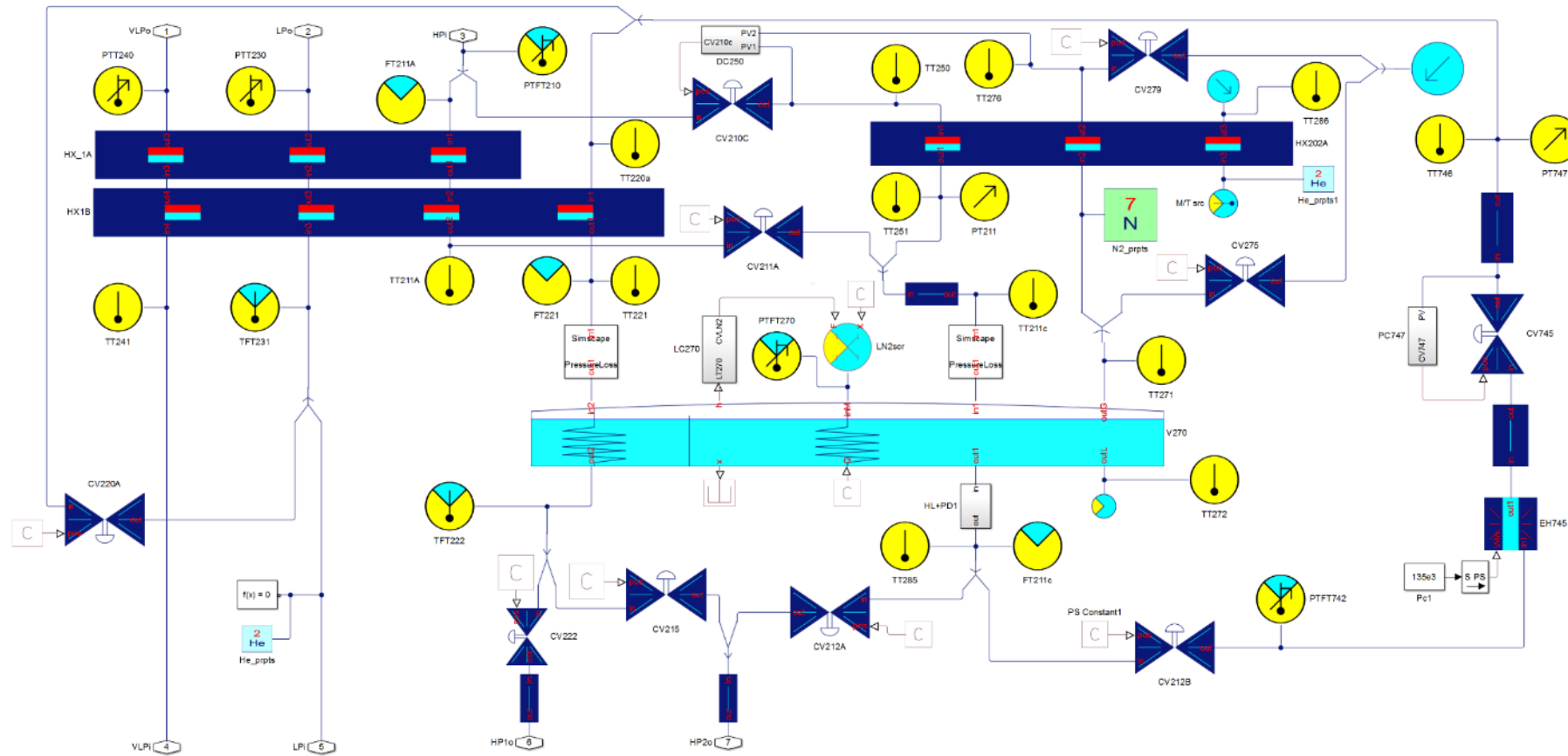
  Cpalu == tablelookup(in1.Th_Tc, in1.Cpalu_Th_Tc, (THout(1) + THout(2))/2, interpolation=cubic);
  if act == 1
    Hout.der == (in1.M*(Hin - Hout) + Q)/(rhoH_H*V + M*Cpalu/CpH);
    out1.P == in1.P - K*in1.M;
  else
    Hout.der == 0;
    out1.P == in1.P;
  end

  out1.M == in1.M;

  T == (THout(1) + THout(2))/2;
end

```

## Exemple de schéma de réfrigérateur

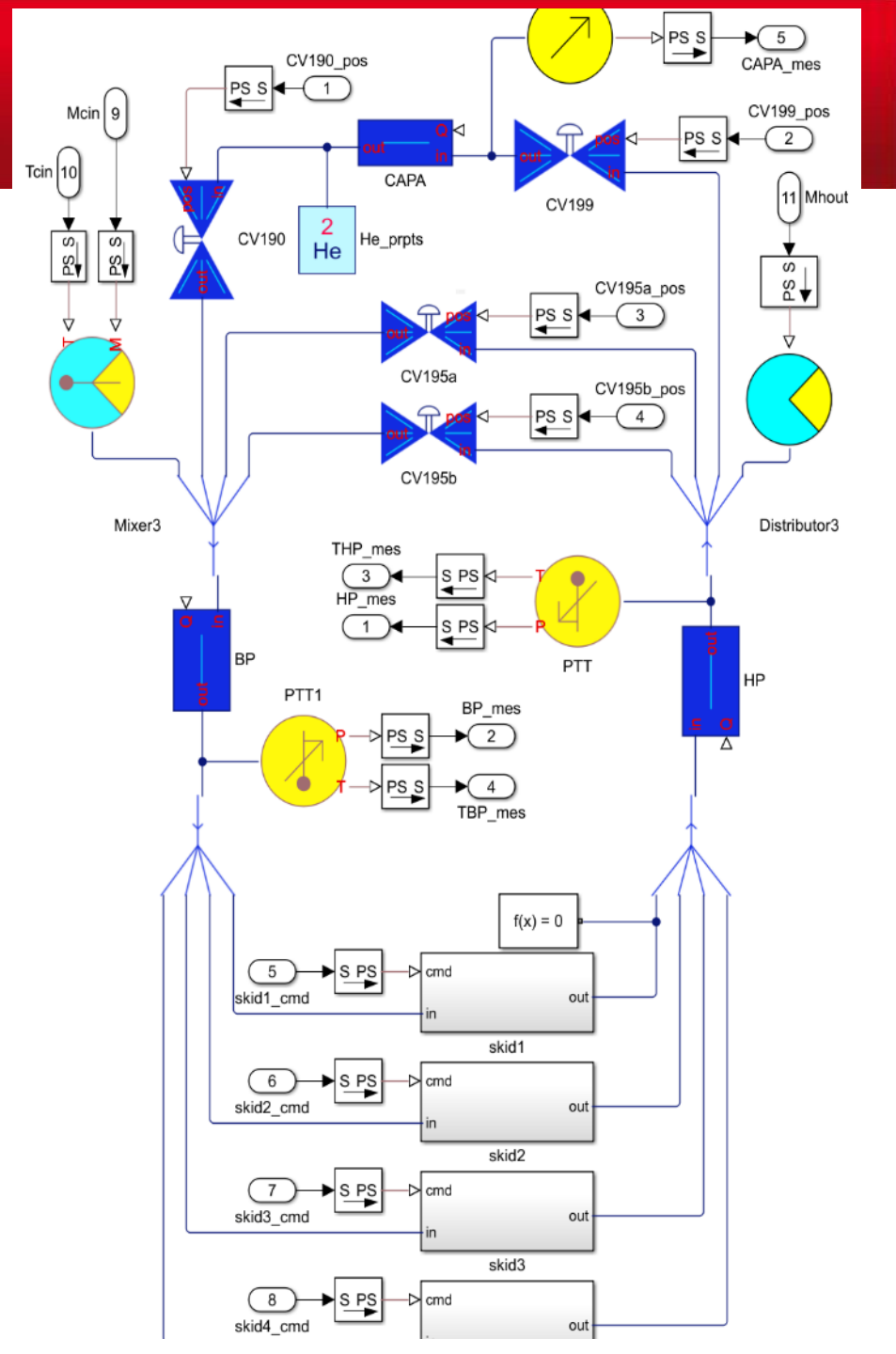


Systemes cryogénique JT60SA (300K->80K)

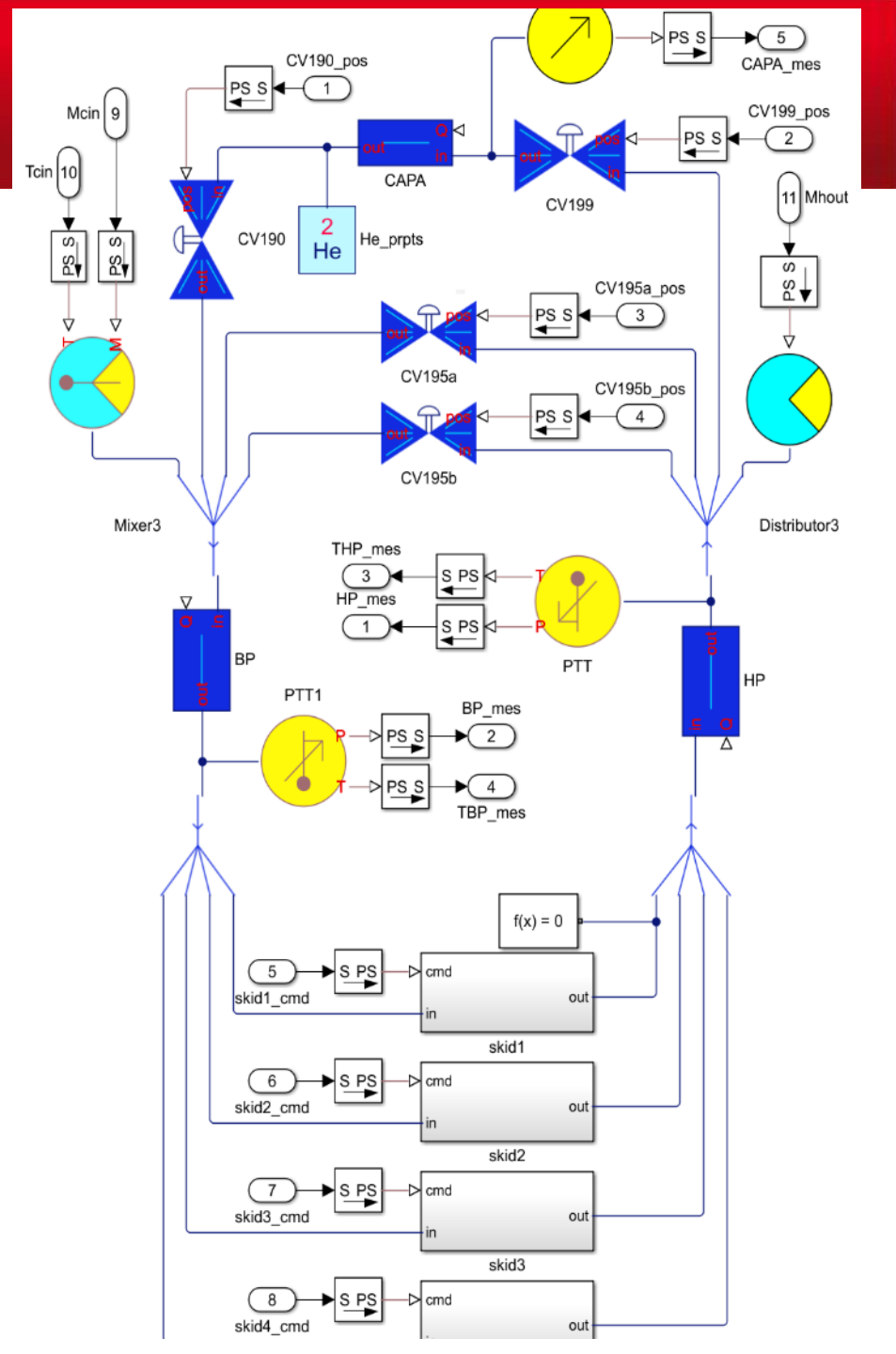
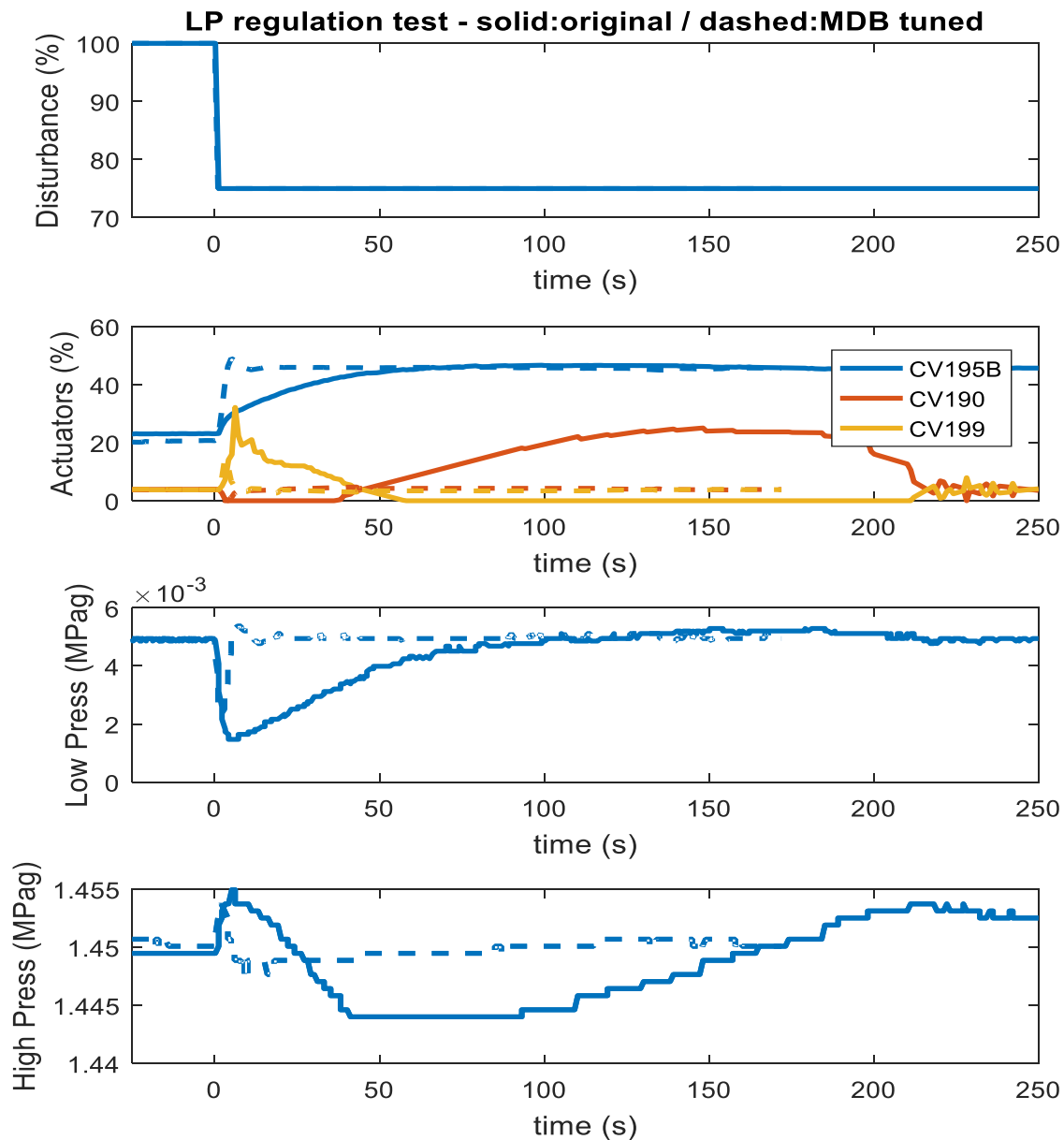
# EXEMPLE DE RÉALISATION

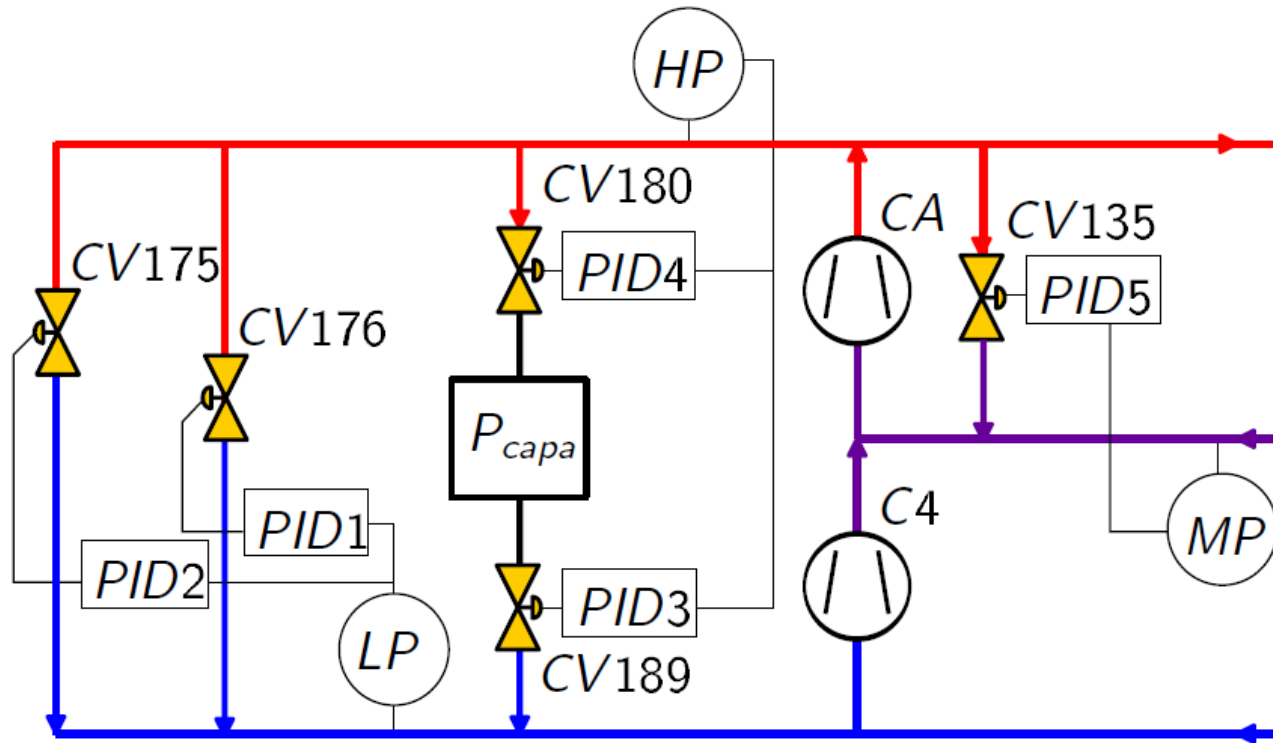
- **Contrôle WCS JT-60SA**
- **Contrôle WCS CERN** pour le LHC
- **Modèle système cryogénique JT60-SA**
- **Modèle système cryogénique CERN** pour le LHC
- **Contrôle MPC sous contrainte station 400W**
- **Observation de conditions aux limites**
- **Optimisation de systèmes**
- ...

# CONTRÔLE BP JT60-SA



# CONTRÔLE BP JT60-SA





Contrôle multi-PID

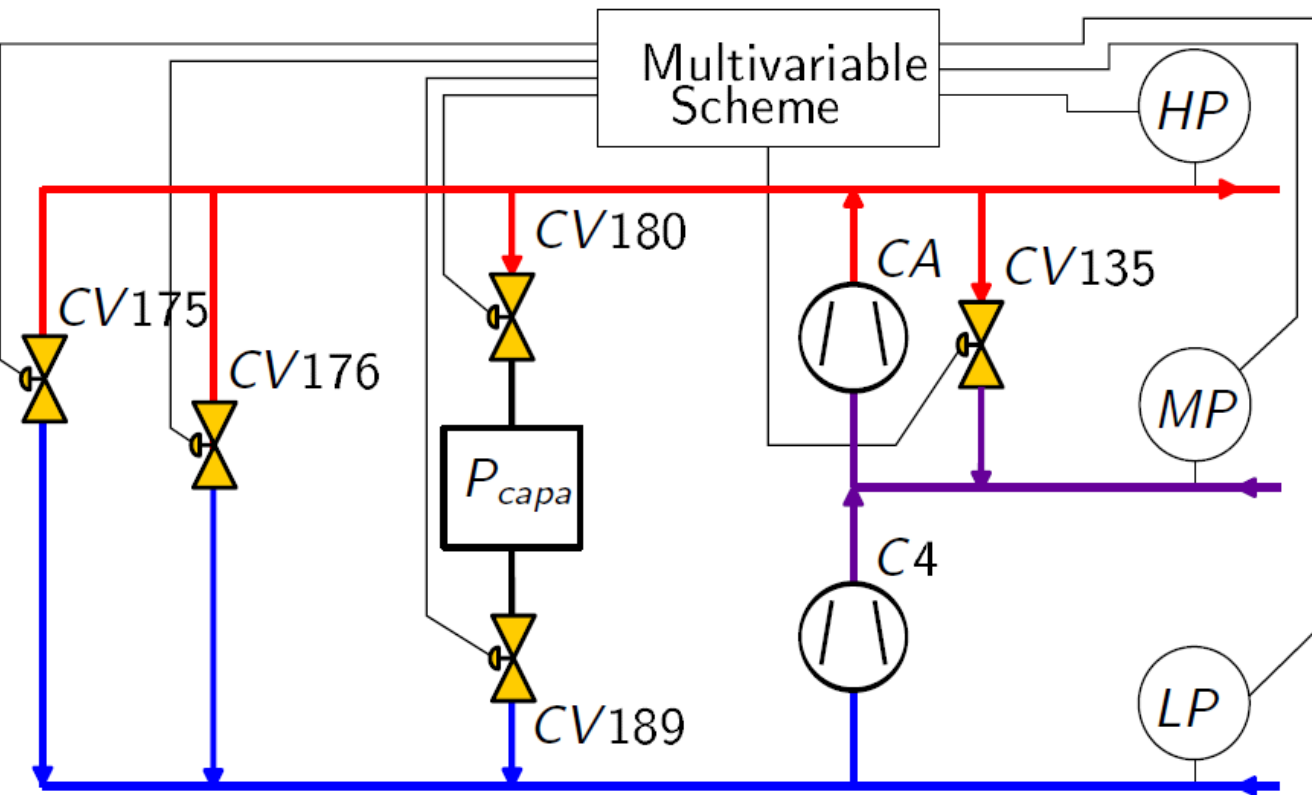
Station de compression  
CERN pour le LHC





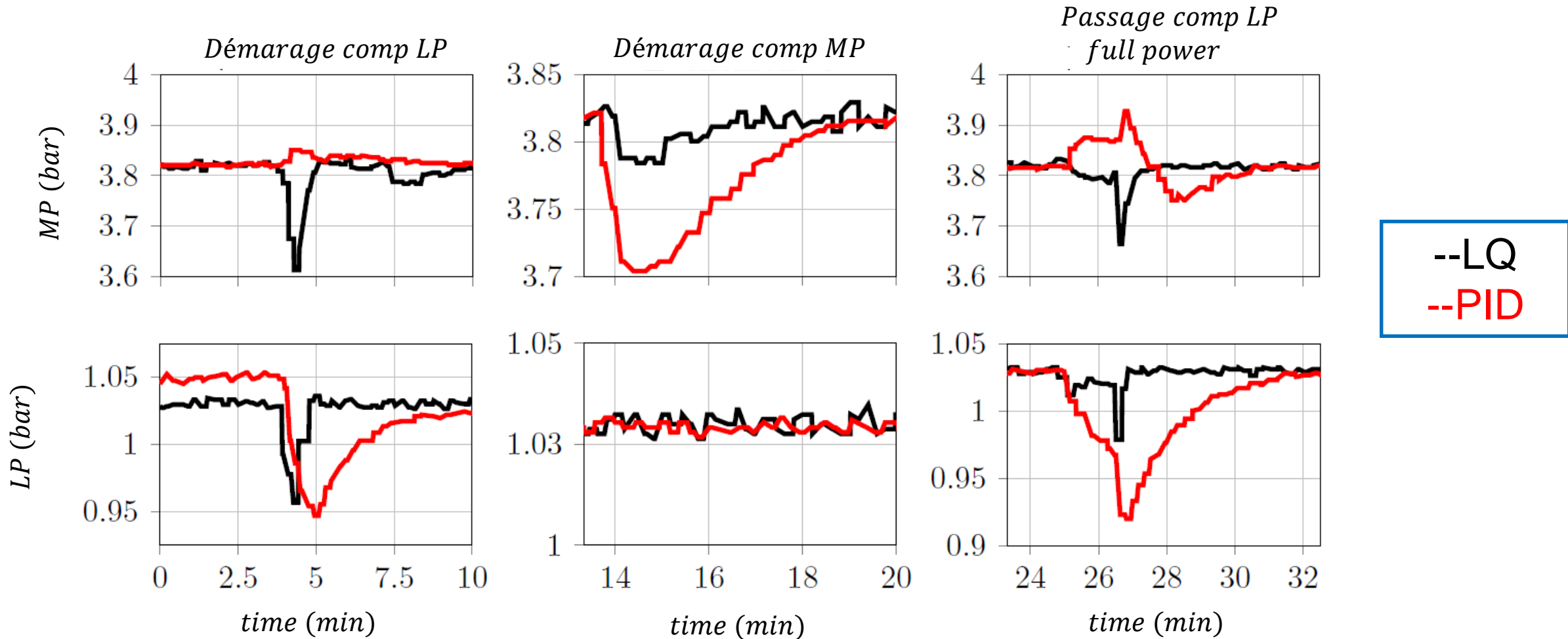
# CONTRÔLE WCS CERN POUR LE LHC

Station de compression  
CERN pour le LHC



Contrôle multivariables

## Résultats de contrôle PID/LQ



# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

- Bibliothèque Simcryogenics disponible
- De nombreuses applications
  - Modélisation
  - Contrôle
- Possibilité d'extension à d'autres fluides pour simuler la réfrigération industrielle classique

# Merci pour votre attention

---

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  
Centre de Grenoble | 38054 Grenoble Cedex 09  
T. +33 (0)4 38 78 48 85 | M. +33 (0)1 06 38 65 71 06

Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris B 775 685 019

Direction de la Recherche Fondamentale  
Institut Nanosciences et Cryogénie  
Service des Basses Températures  
Laboratoire d'Électronique et d'Automatismes