

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

Simulation des grands réfrigérateurs/cryodistribution au DBST avec Simcryogenics

François Bonne - CEA DSBT

12/05/2022



1. Qu'est ce que Simcryogenics ?
2. Comment ça fonctionne ?
3. Validation de l'outil : un exemple
4. Quelques réalisations
5. Conclusion

12/05/2022

QU'EST CE QUE SIMCRYOGENICS ?

Simcryogenics est une bibliothèque de **simulation multi-usages** développée par le CEA/DSBT et basée sur MATLAB/Simulink/Simscape

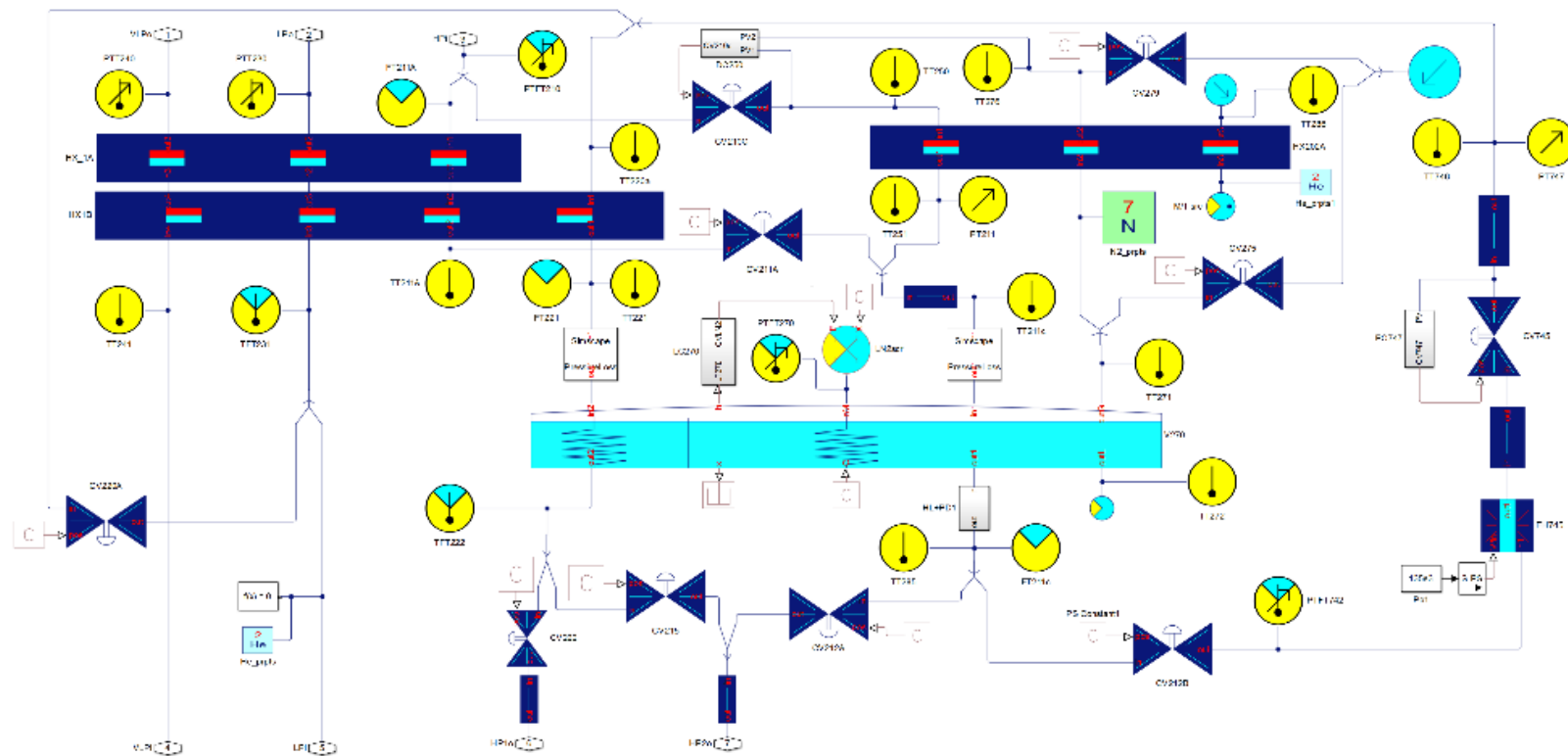
- Simulation stationnaire et dynamique des systèmes cryogéniques, de leur cryodistribution et de leur utilisateurs
- Optimisation paramétrique (températures, débits, ...)
- Contrôle à base de modèles (PI / PID, ou contrôle avancé)
- Débogage de code PLC et mise au point de capteurs virtuels
- Formation des opérateurs sur simulateur

Simcryogenics permet de simuler l'opération de n'importe quel système cryogénique, avec son système de contrôle commande si besoin

Exemple : Modèle d'une partie du réfrigérateur JT-60SA

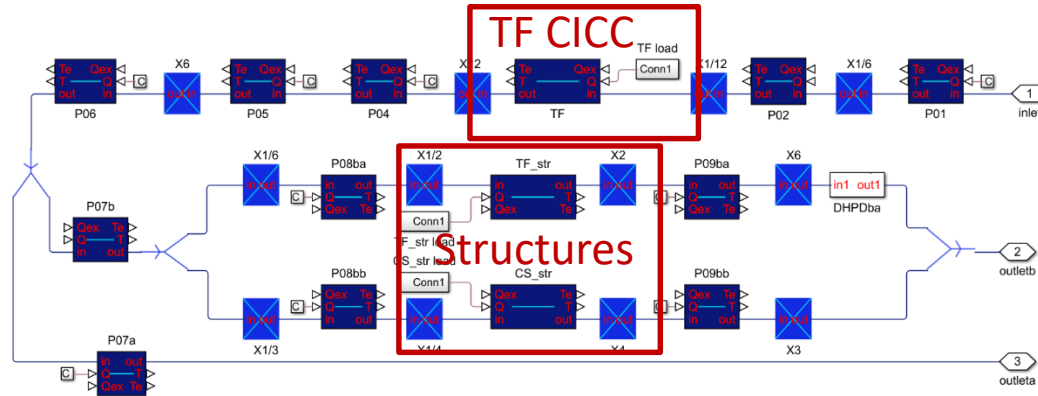
Composants disponibles:

- Echangeurs de chaleur (2 à 4 branches)
- Séparateur de phase
- Vannes
- Tuyaux OD, 1D
- Capteurs
- Sources
- Pertes de charges
- Compresseurs à vis
- Compresseurs froids
- Masses et contacts thermiques
- Etc...

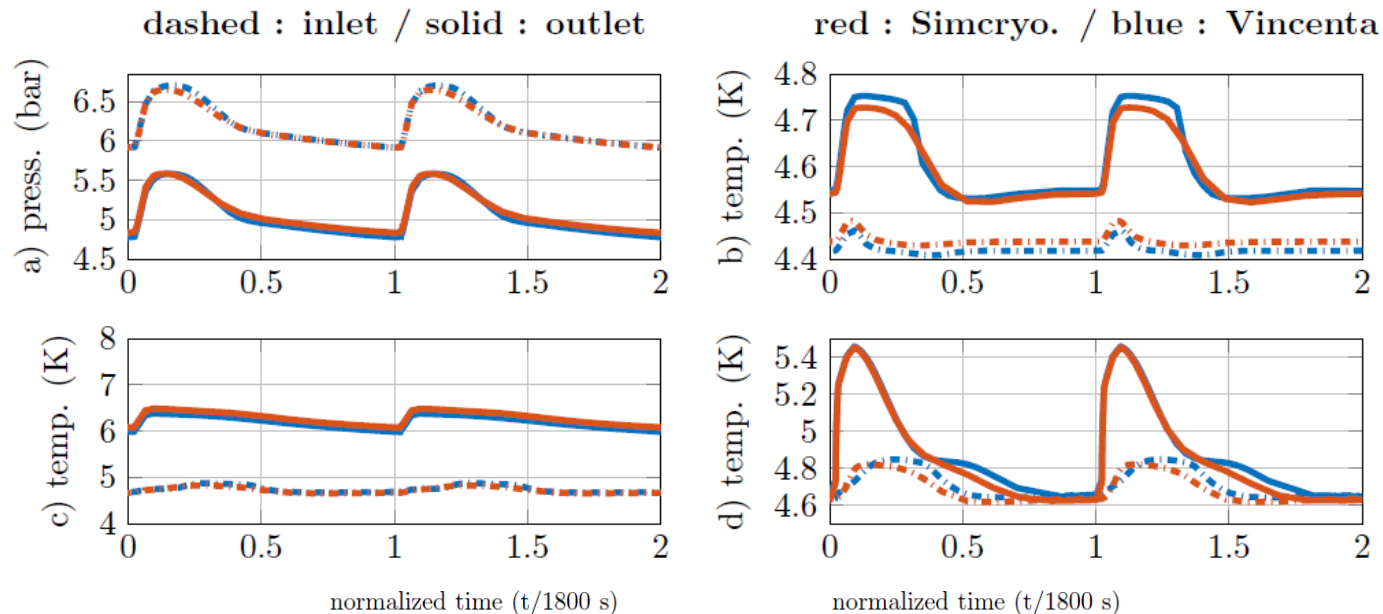


Simulation de systèmes cryogéniques

Exemple : Modèle d'un boucle d'alimentation en hélium supercritique des aimants de JT60SA

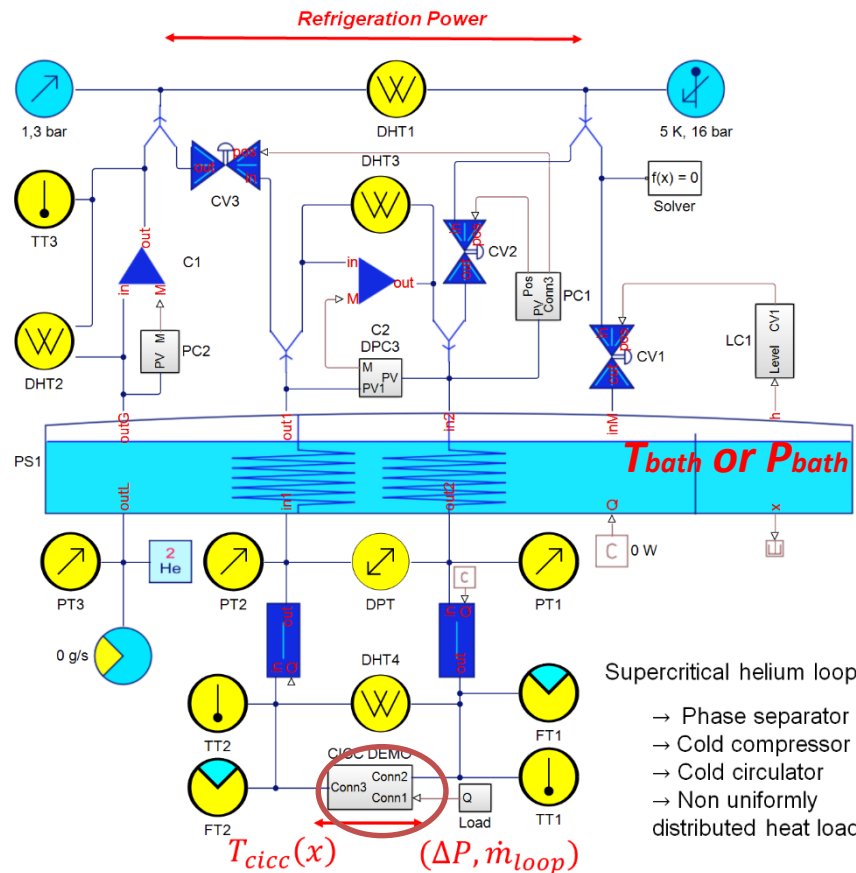


Les résultats sont comparables aux résultats obtenus précédemment avec Vincenta (mais avec temps de simulation moindre)



Simcryogenics est compatible avec les toolboxes d'optimisation MATLAB pour réaliser des optimisations paramétrique à base de modèles

Exemple : modèle d'alimentation d'un aimant supra



T_{bath} et \dot{m}_{loop} sont des variables d'optimisation

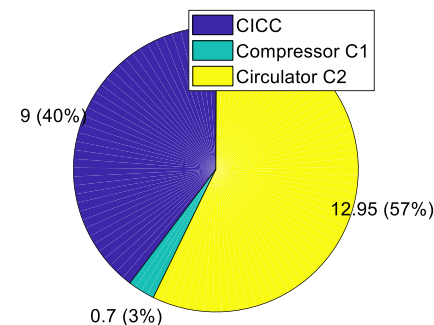
Des contraintes peuvent être ajoutées, Ici la température $T_{cicc}(x)$ présente un contrainte : être en dessous de $T_{CS}(x) - 1.5 K$

Avant optimisation :

$$\Delta P = 1 \text{ bar}$$

$$T_{bath} = 4.45 \text{ K}$$

Total refrigeration power : 22.6 W

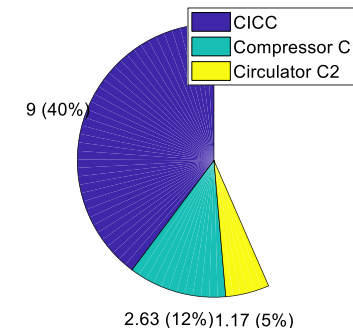


Après optimisation :

$$\Delta P = 0,22 \text{ bar}$$

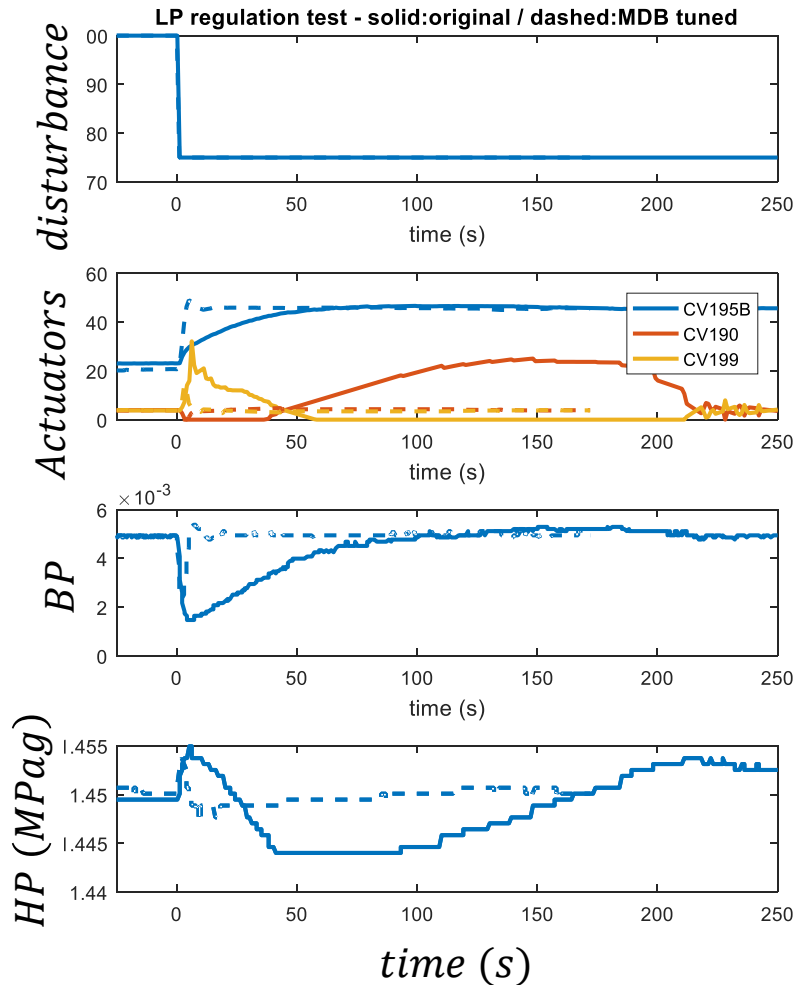
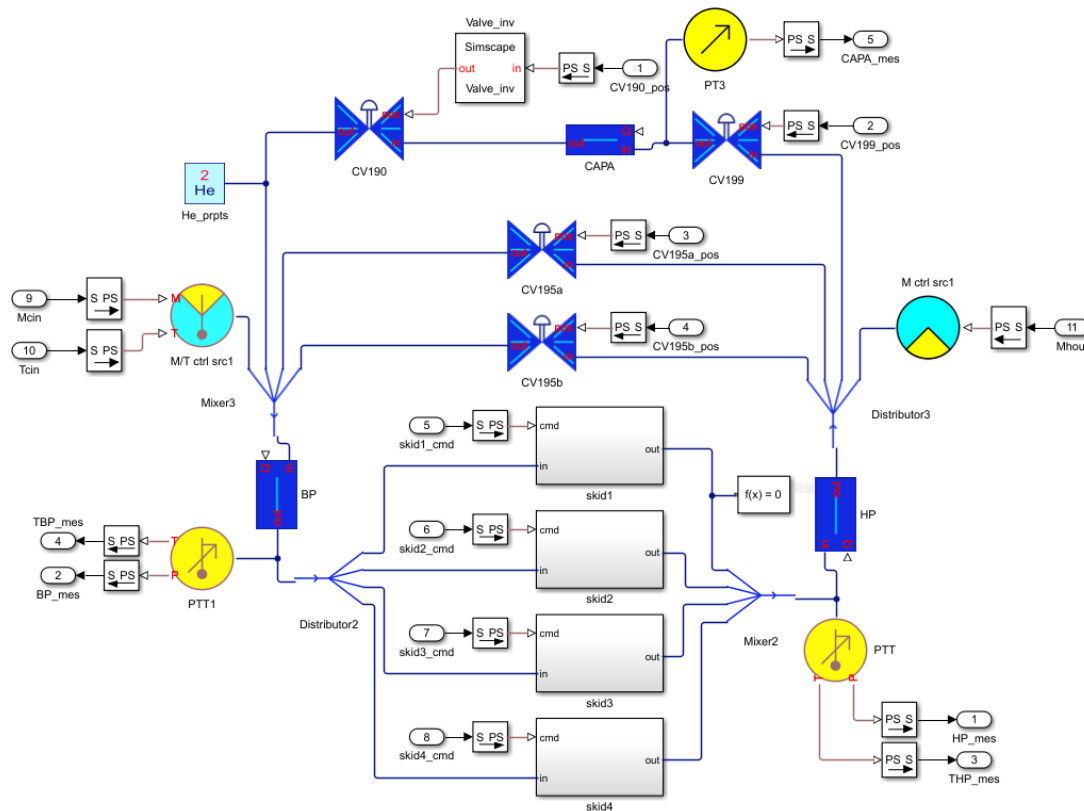
$$T_{bath} = 4.15 \text{ K}$$

Total refrigeration power : 12.8 W



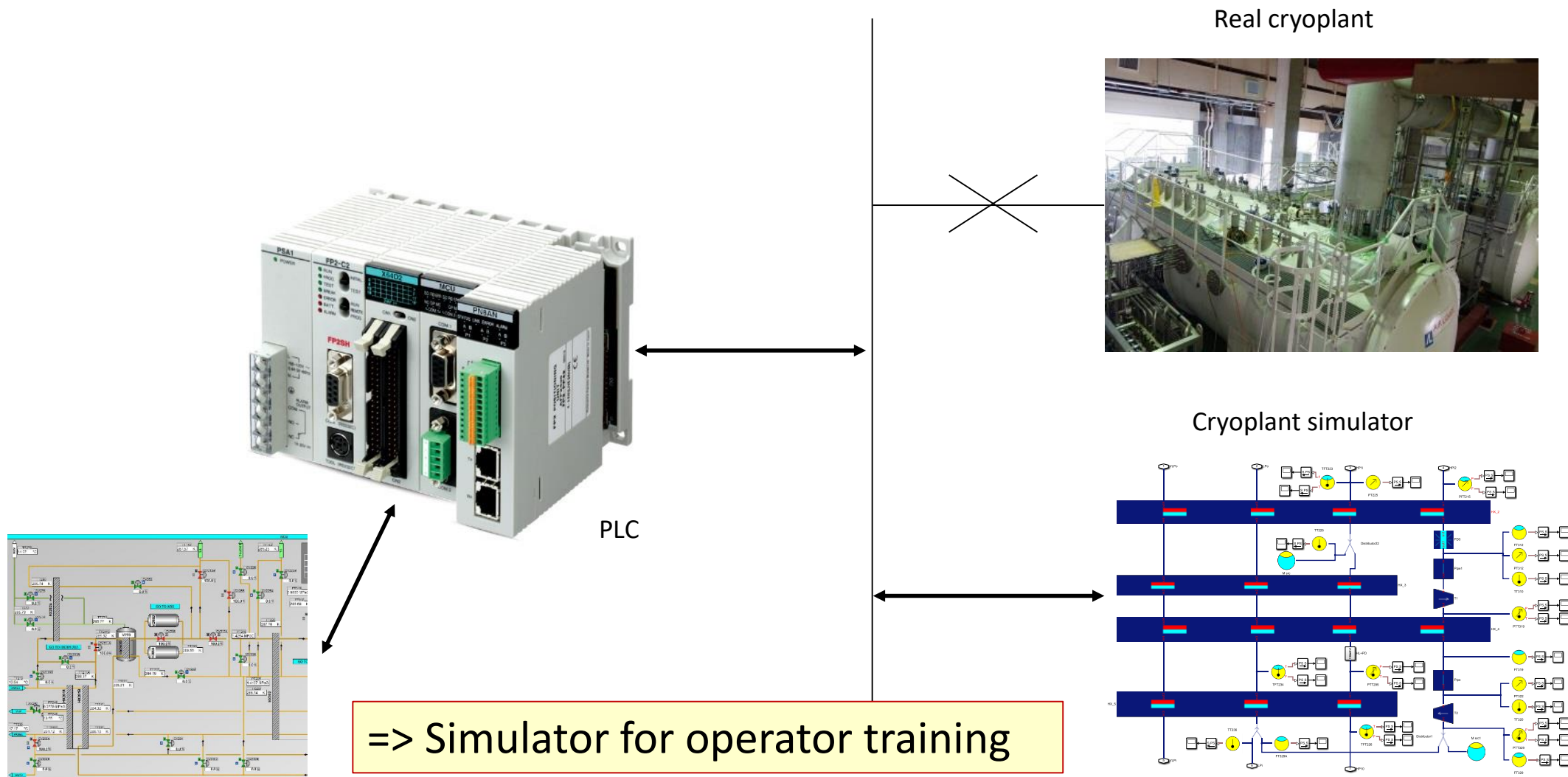
Simcryogenics peut être utilisé pour obtenir la fonction de transfert d'un système pour régler des paramètres PID ou LQ ou MPC

Exemple : Modèle de la station de compression de JT-60SA



Results of model-based PI controller

Simcryogenics peut être connecté à un API (PLC) au via OPC

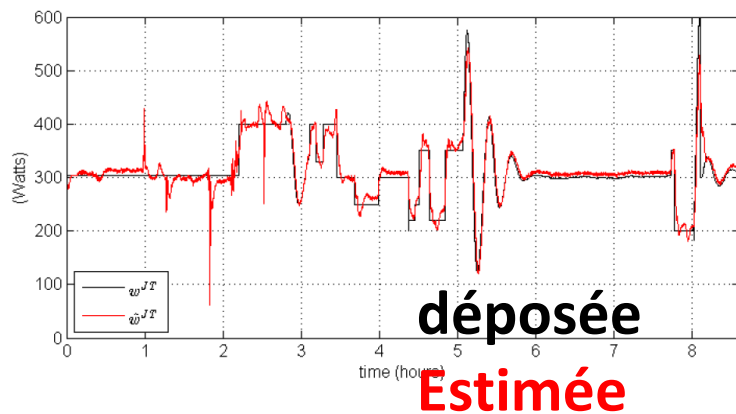


Simcryogenics peut être utilisé:

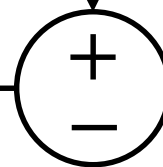
- Pour surveiller un système (analyse de résidu)
- Création de capteurs virtuel

Exemple : estimation en temps réel de charge thermique

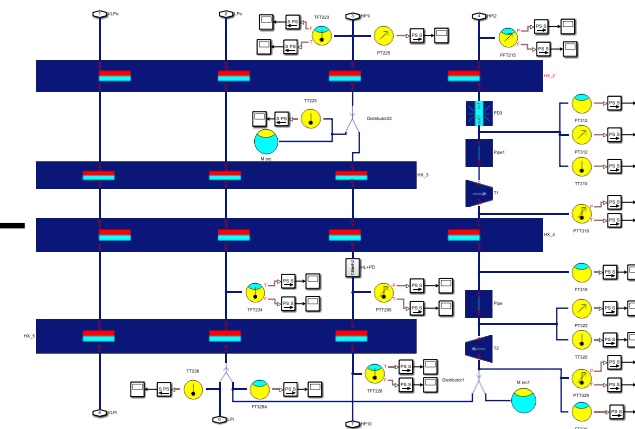
Real cryoplant



residue



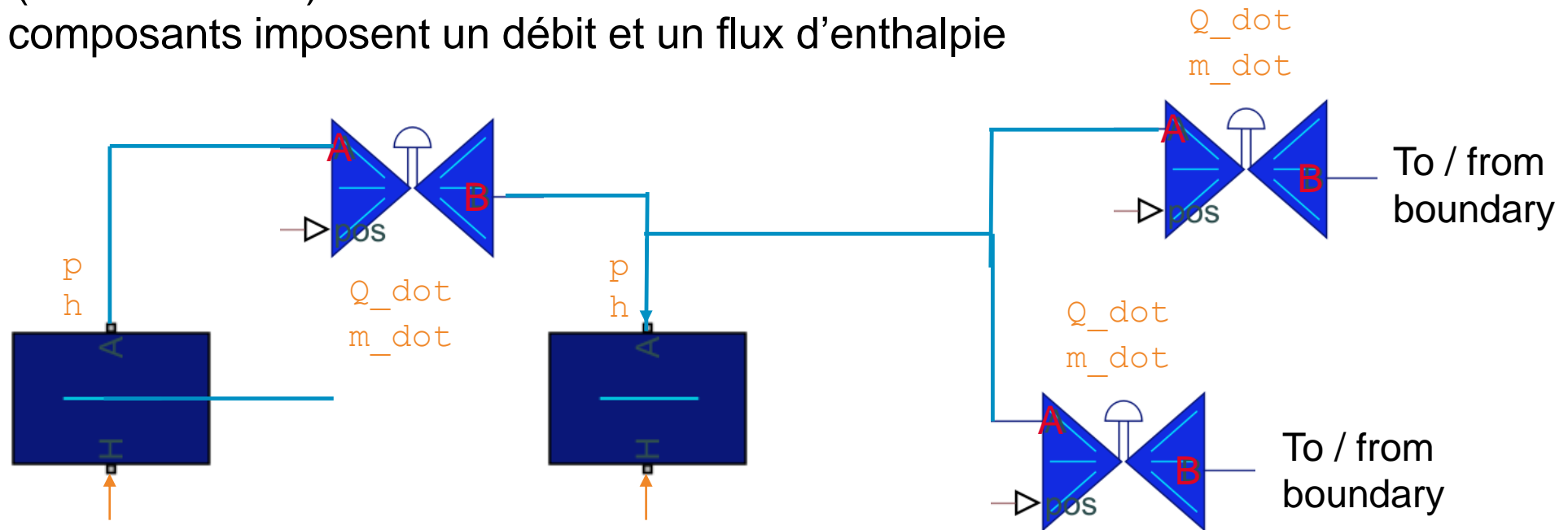
Cryoplant simulator



COMMENT ÇA FONCTIONNE ?

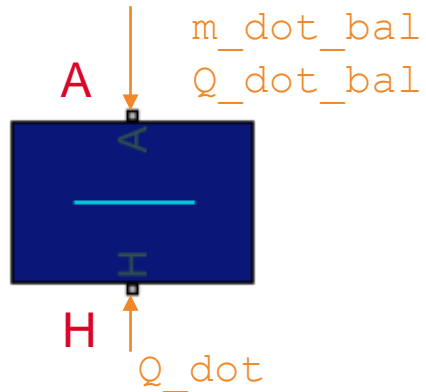
Simcryogenics fonctionne en faisant des bilans de masse et d'énergie

- Chaque nœud possède un composant faisant ce bilan (ici un volume de fluide)
 - ce composant impose la pression et l'enthalpie spécifique au nœud
- On peut connecter autant de composant qui imposent le débit que l'on souhaite sur le même nœud (ici des vannes)
 - Ces composants imposent un débit et un flux d'enthalpie



Simcryogenics possède aussi un domaine thermique pour calculer des puissances transmises dans des matériaux

Composants « fluid_volume »

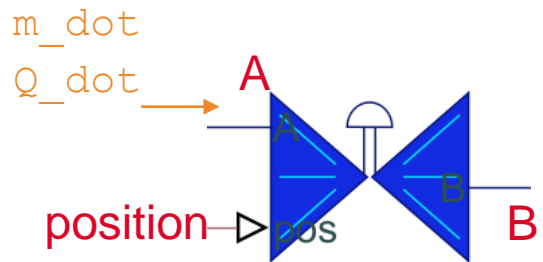


```
% mass balance
rho.der*Vol == m_dot_bal
% energy balance
(m_dot_bal)*u + rho*Vol*u.der == Q_dot + Q_dot_bal
```

```
% pressure calculation
A.p == TL(p_table,u,rho)
% enthalpy calculation
A.h == TL(h_table,u,rho)
```

Ce composant impose la pression et l'enthalpie spécifique

Composants « valve » (équivalent à une perte de charge)



→ Equation qui calcule le flux d'enthalpie

```
m_dot_abs == sqrt(m_dot^2 + epsilon^2);
alpha == m_dot/m_dot_abs;
Q_dot/m_dot_abs == (1 + alpha)/2 * h_A - (1 - alpha)/2 * h_B;
```

→ Les propriétés des fluides sont obtenus en sélectionnant le fluide entrant

```
rho = (1 + alpha)/2 * rho_A + (1 - alpha)/2 * rho_B;
```

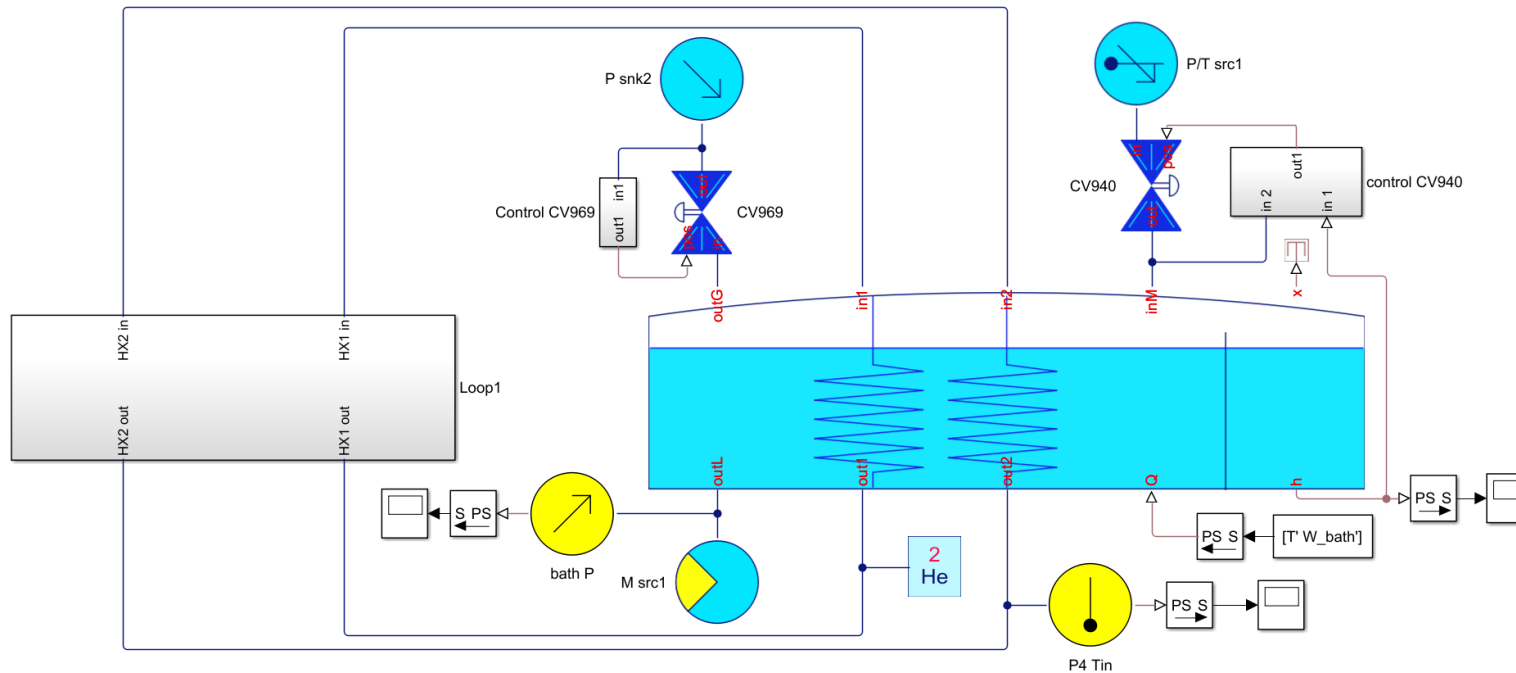
```
rho_A  
rho_B → From tables
```

→ Le débit est calculé par des formules disponibles dans la littérature

La pression et l'enthalpie spécifique sont imposées aux bornes A et B

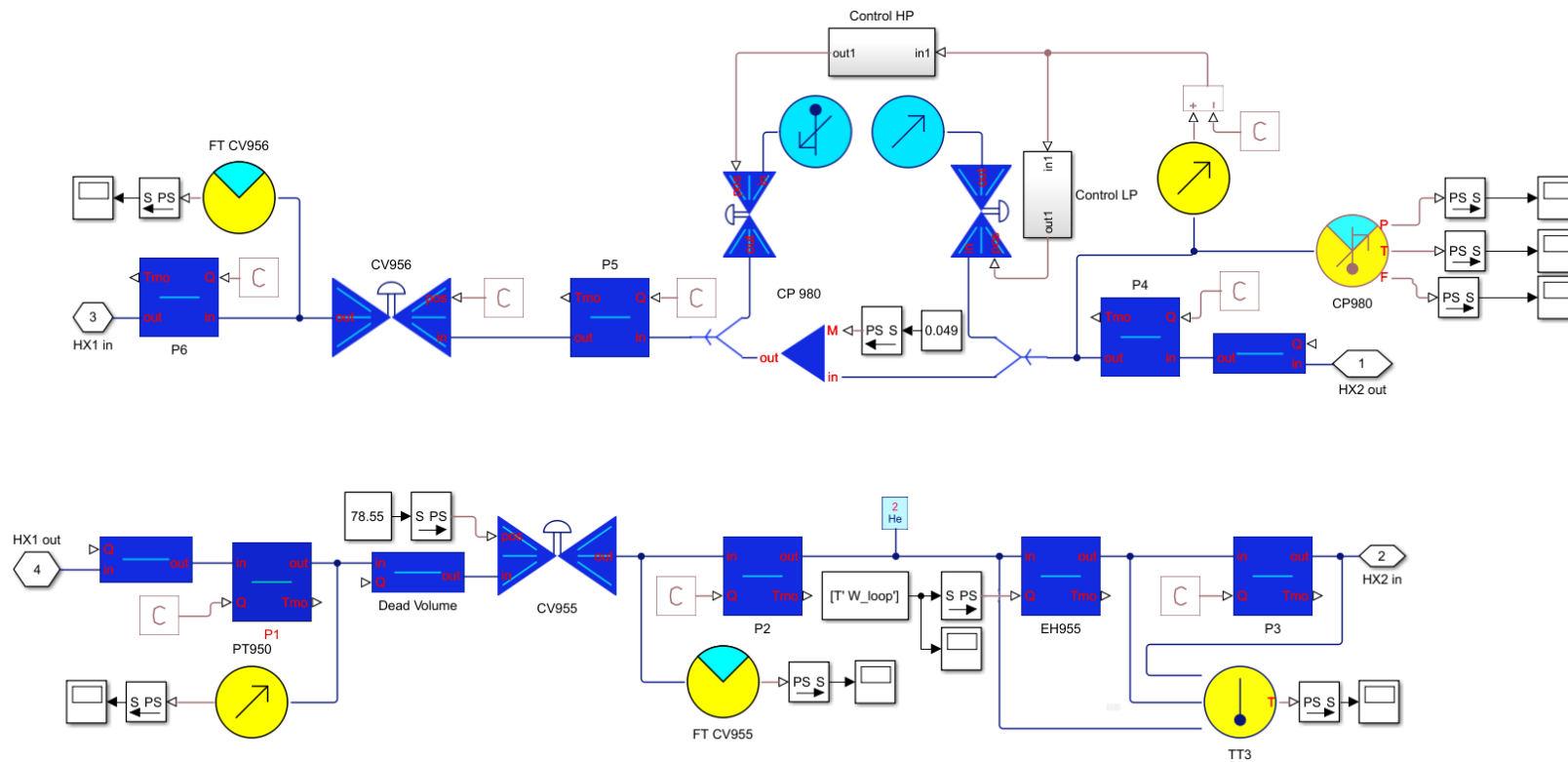
VALIDATION DE L'OUTIL : UN EXEMPLE

Validation par comparaison avec des données de l'expérience helios



Helios experiment : loop, phase separator and valves

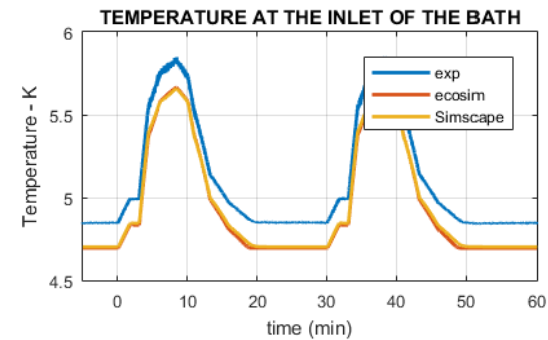
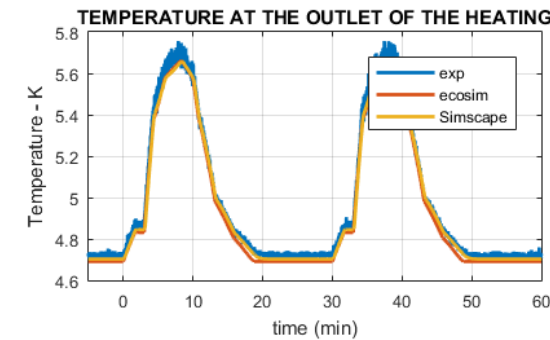
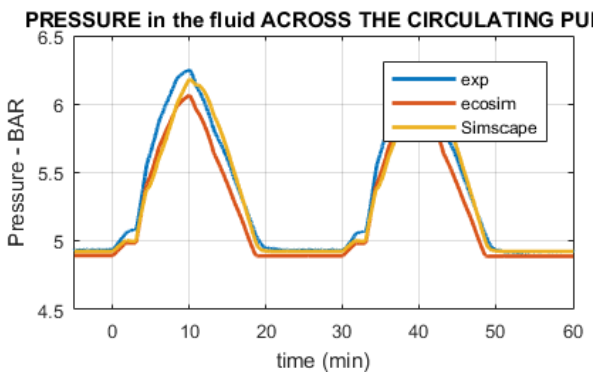
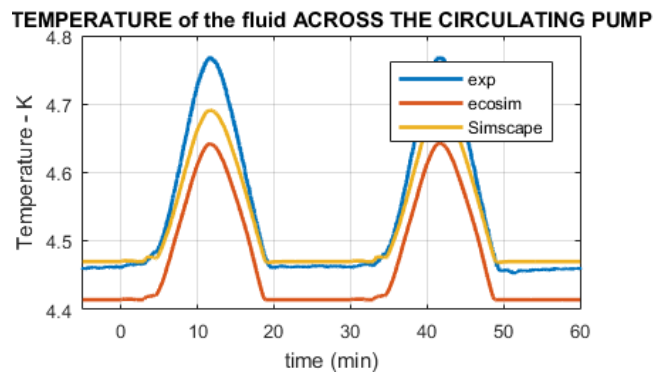
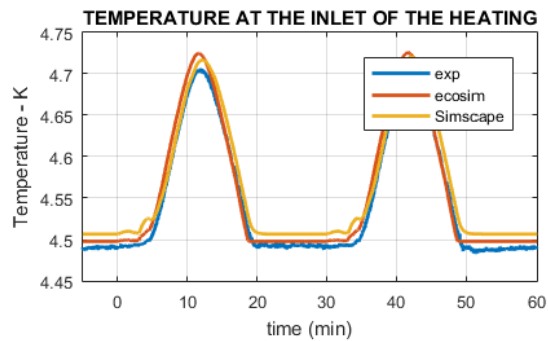
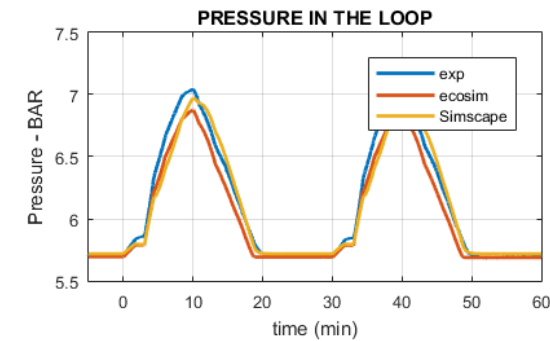
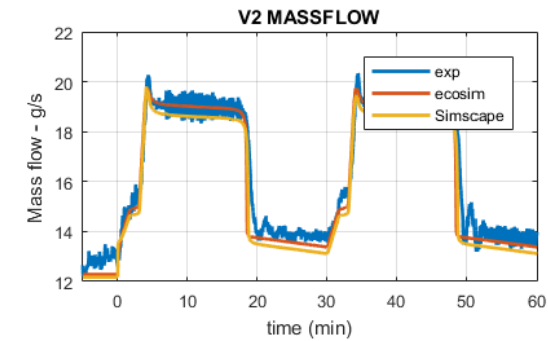
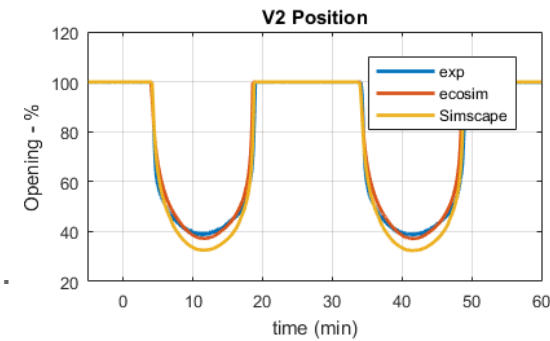
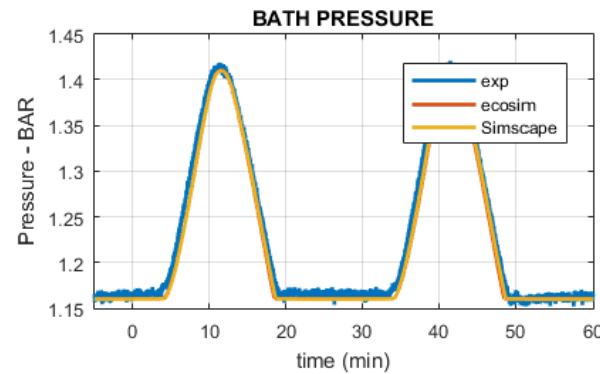
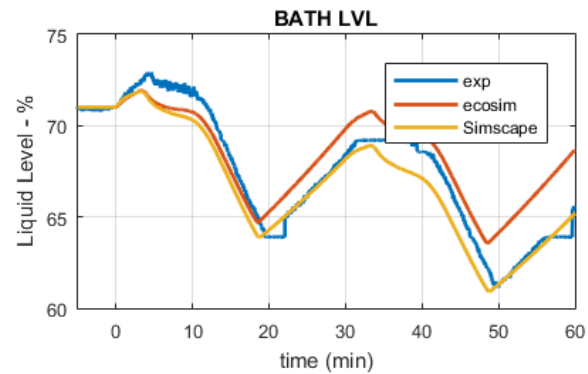
Validation par comparaison avec des données de l'expérience helios



Helios experiment : cryoloop

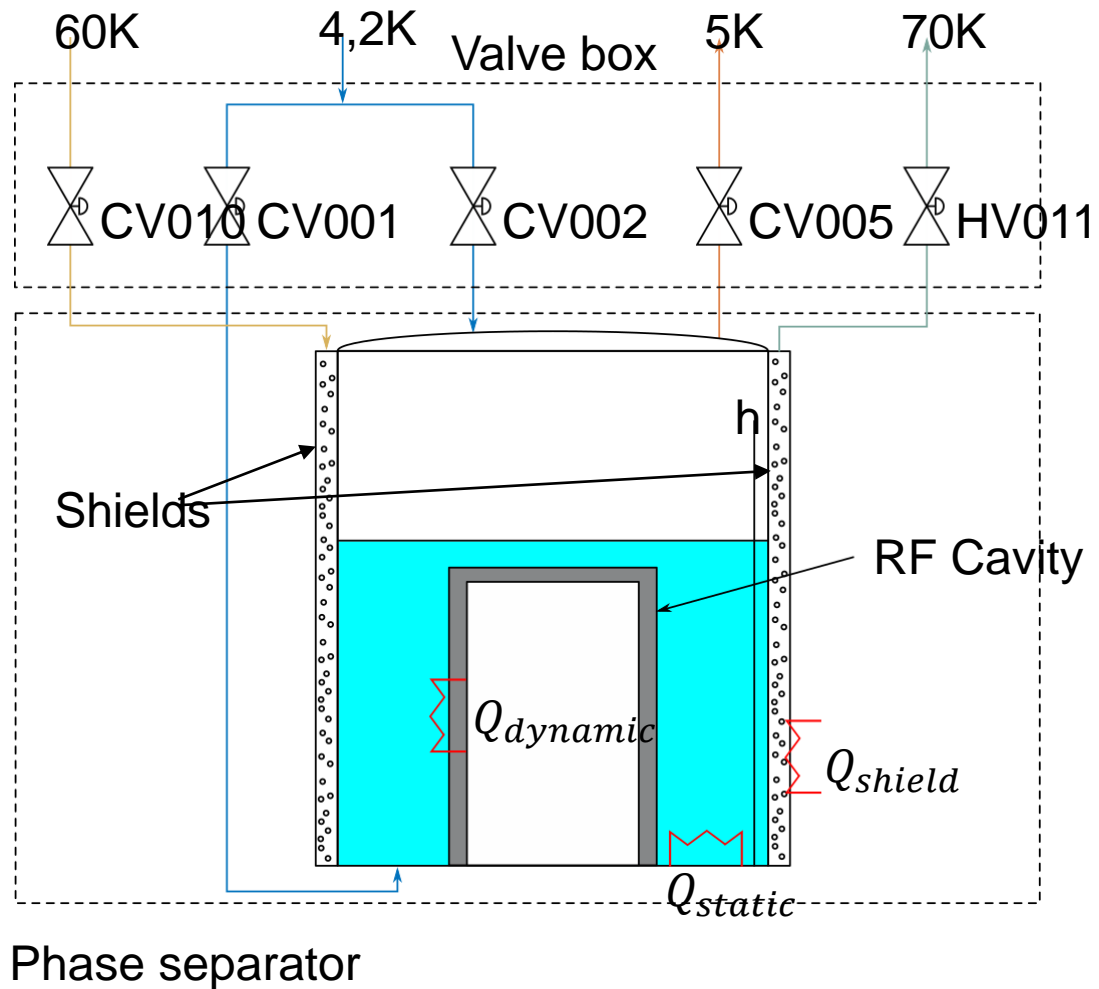
Validation par comparaison avec des données de l'expérience helios

Simcryogenics est capable de reproduire le comportement d'une boucle d'hélium supercritique refroidie par des échangeurs plongé dans un bain d'hélium, et en particulier des phénomènes de transport.

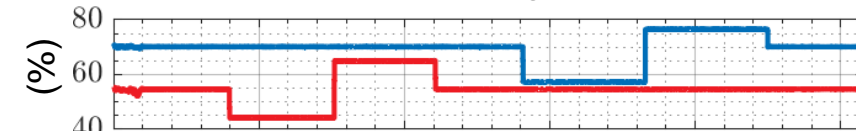


QUELQUES RÉALISATIONS

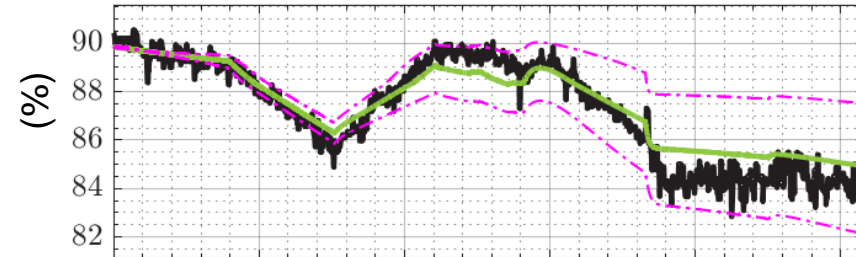
Cryomodule modeling



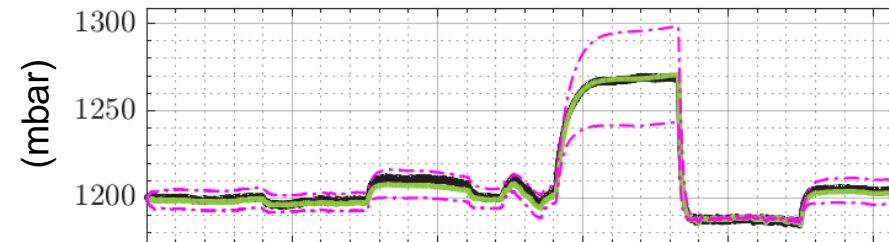
Experimental vs predicted
Valves opening



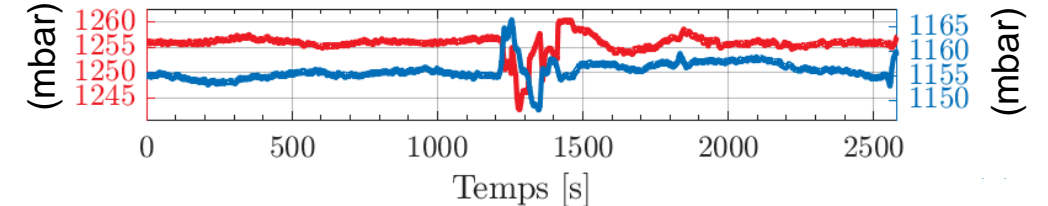
Liquid level in the bath



Bath pressure



Boundary conditions



Conclusion : Simcryogenics peut être utilisé tout au long d'un projet

- Lors de la conception, grâce aux études paramétrique et au prototypage rapide
- Avant que la machine ne soit construite : débogage du code automate et réglage des contrôleurs PID a base de modèle
- Durant la durée de vie de la machine : formation des opérateurs, réglage, études...
- Simcryogenics est disponible gratuitement sous licence, à la demande (!)