



# Le stockage et la production de froid et de travail mécanique par un processus thermo-chimique hybride



Journées Nationales de l'Énergie Solaire

**Hasan GHAZALE, Nathalie MAZET, Pierre NEVEU, Maxime PERIER-MUZET**

*Projet ThermHyVal*

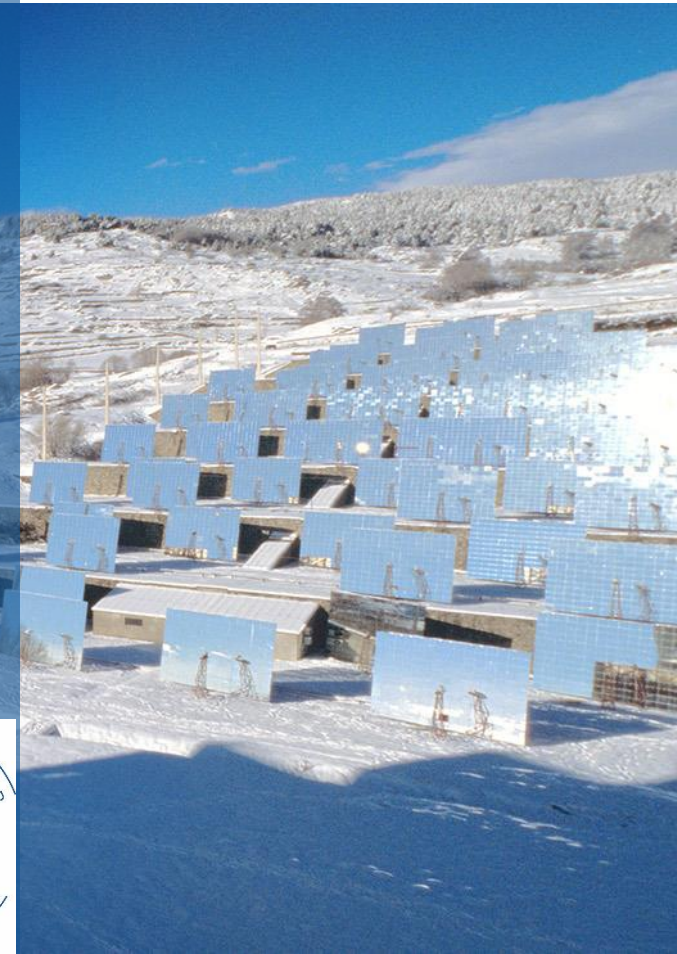
**Journées Nationales de l'Énergie Solaire**

*Institut National de l'Énergie Solaire*

*Le Bourget-du-Lac, France*

*05 – 07 Juillet*

Laboratoire PROcédés, Matériaux et Énergie Solaire



# Table des matières

1. Introduction
2. Procédé thermo-chimique hybride : concept et fonctionnalité
3. Prototype expérimental : validation du concept
4. Résultats et analyse du couplage dans différentes conditions de fonctionnement
5. Modélisation numérique
6. Conclusion



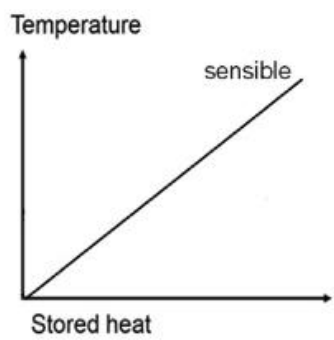
# Introduction

*Stockage thermique*



# Stockage thermique

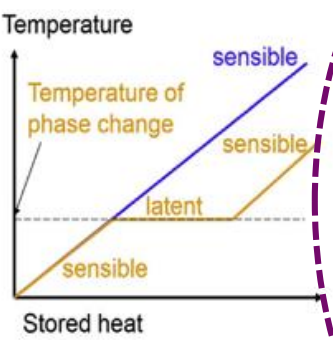
Sensible energy storage



$$Q_{sensible} = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

↓ Storage capacity

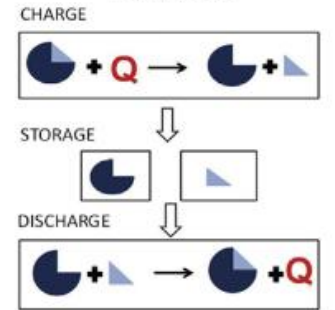
Latent energy storage



$$Q_{latent} = \int_{T_1}^{T_{pc}} C_{p,s} \cdot dT + \Delta H_{pc} + \int_{T_{pc}}^{T_2} C_{p,l} \cdot dT$$

↑ Storage capacity

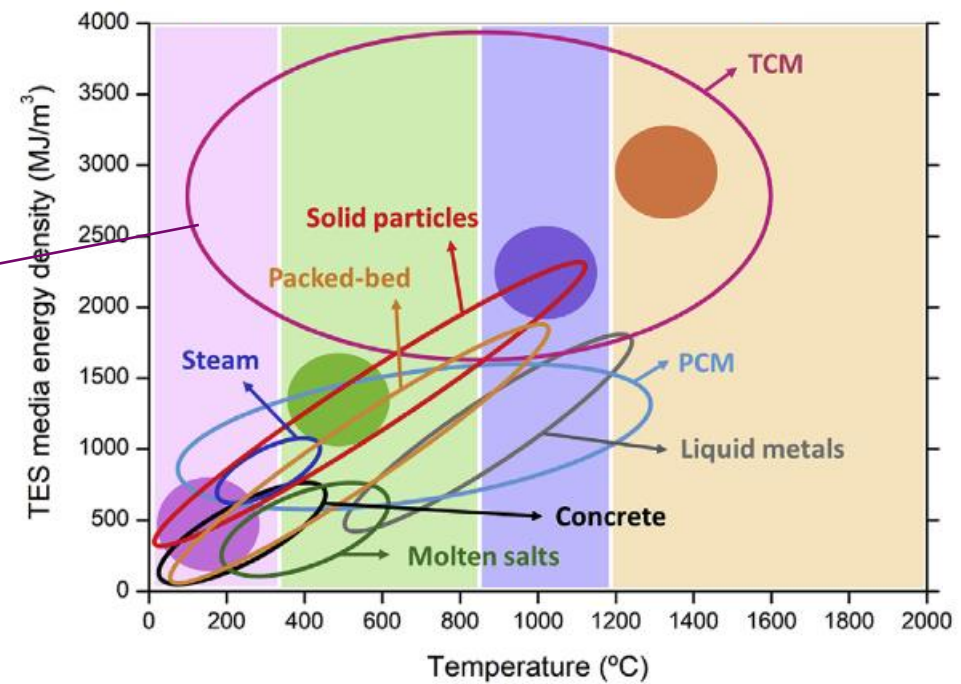
Sorption & Chemical reactions



$$Q = \int_{T_1}^{T_r} C_{p,s} \cdot dT + a_r \cdot m \cdot \Delta h$$

↑↑ Storage capacity


Adapté de ref-1



Adapté de ref-2

Le stockage thermochimique, par rapport aux stockages sensible et latent :

- ✓ Capacité et densité de stockage élevées
- ✓ Stockage à température ambiante
- ✓ Possibilité d'intégration avec des sources à basse, moyenne et haute température...



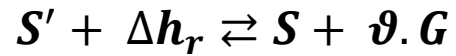
# Cycles thermochimiques

*Concept d'hybridation - fonctionnement*

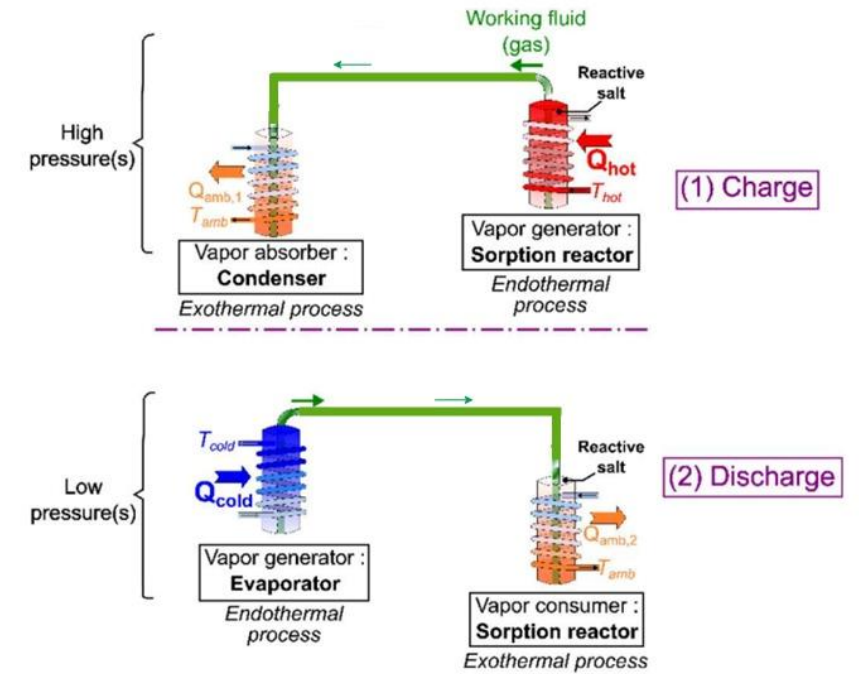


# Cycle thermochimique

- Basé sur une réaction chimique réversible : phases de décomposition et de synthèse.

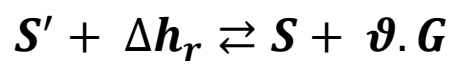


- Le procédé thermochimique vise à :
  - Récupérer la chaleur à basse et moyenne température (< 250 °C)
  - Offrir un stockage aux conditions ambiantes
  - Valoriser la chaleur en froid



# Cycle thermochimique hybride

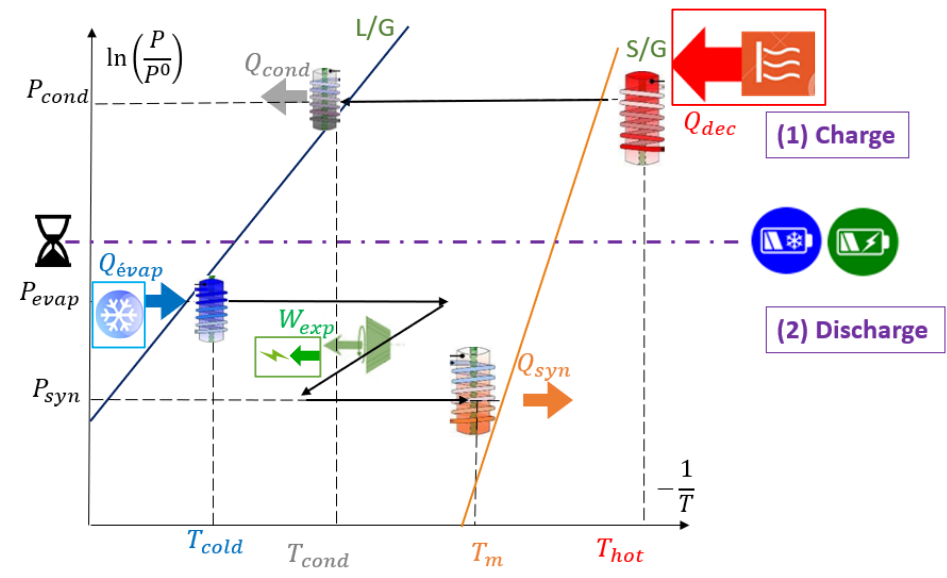
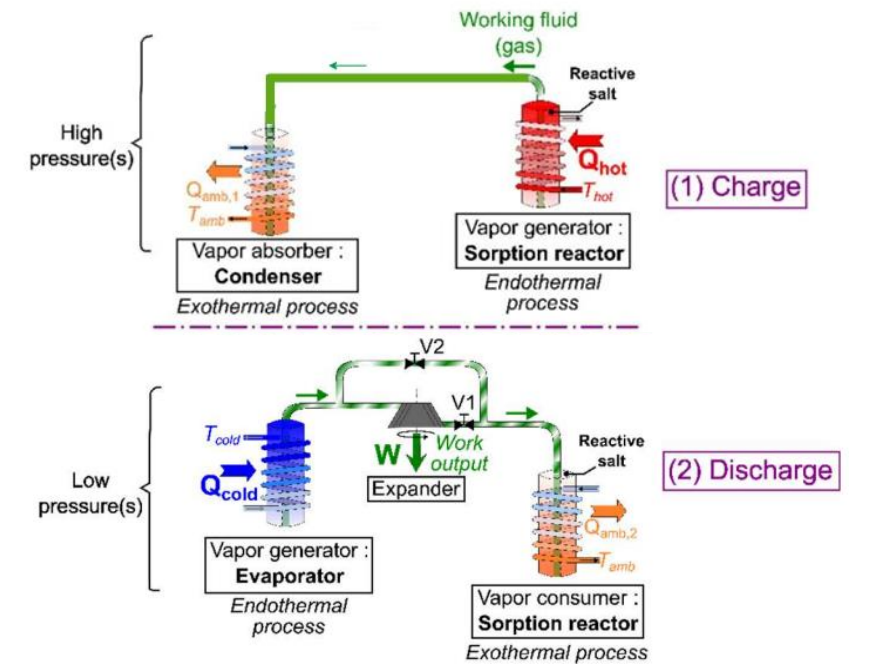
- Basé sur une réaction chimique réversible : phases de décomposition et de synthèse.



- Le procédé thermochimique hybride vise à :
  - Récupérer la chaleur à basse et moyenne température (< 250 °C)
  - Offrir un stockage aux conditions ambiantes
  - Valoriser la chaleur en froid
  - Valoriser le flux (enthalpique) du gaz en travail mécanique.

- Réactifs S et G possibles : sels ammoniacués (chlorures...)
  - Stables avec des propriétés thermodynamiques intéressantes
  - En variété abondante
  - Équilibre mono-variant (P-T) :

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = -\frac{\Delta h_r}{RT} + \frac{\Delta S_r}{R}$$





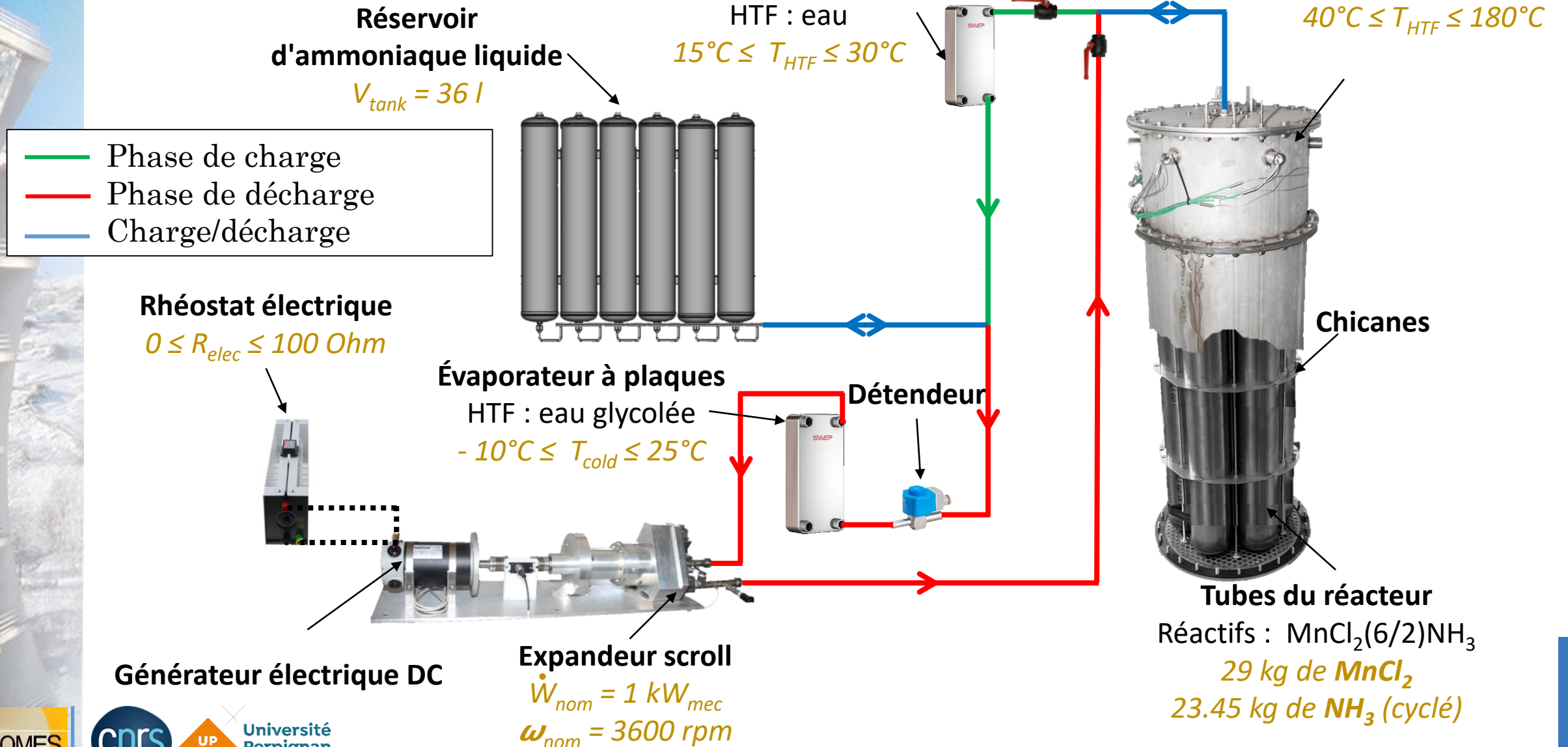
# Validation du concept

*Prototype développé - Preuve expérimentale de concept*

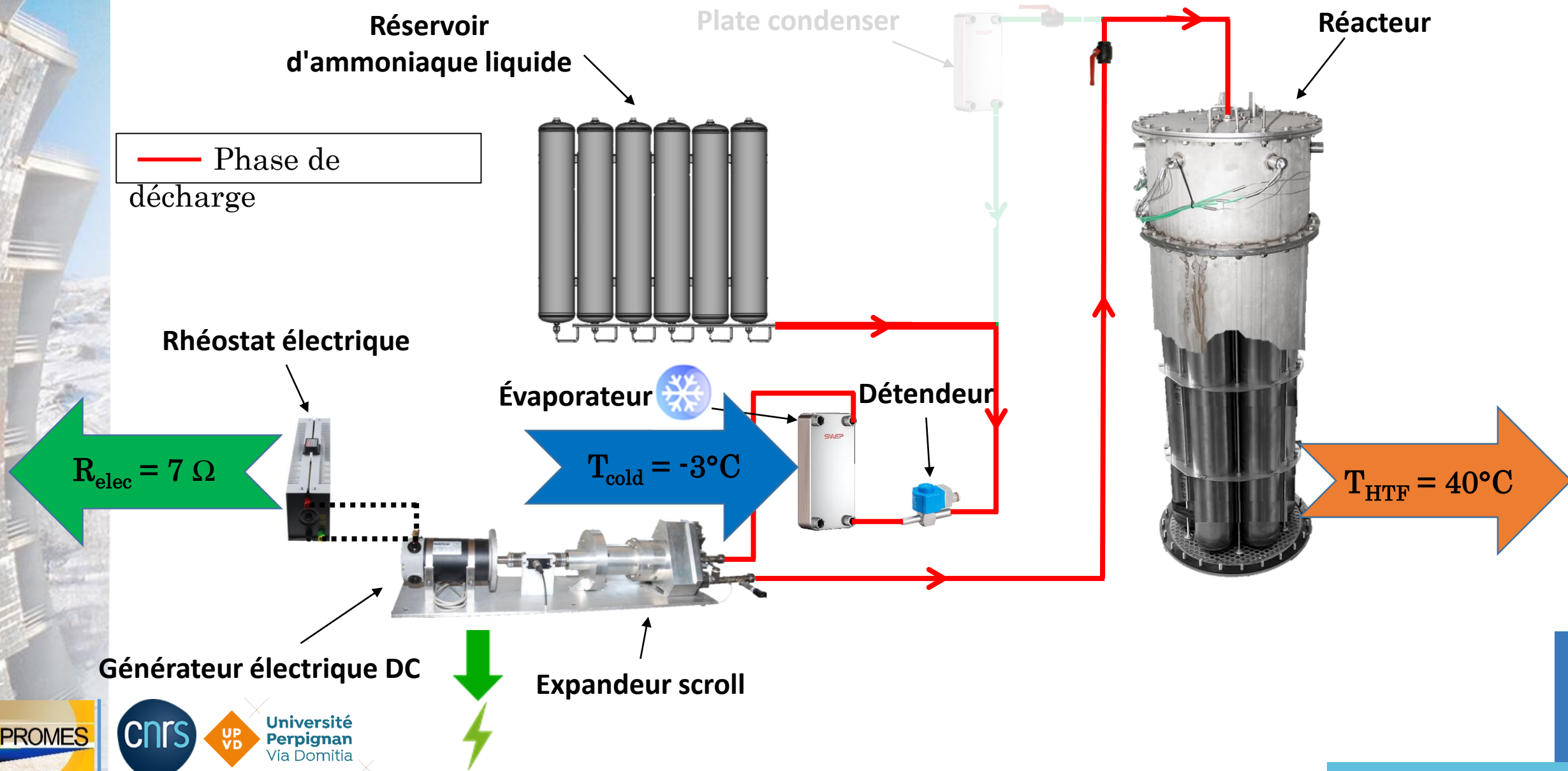




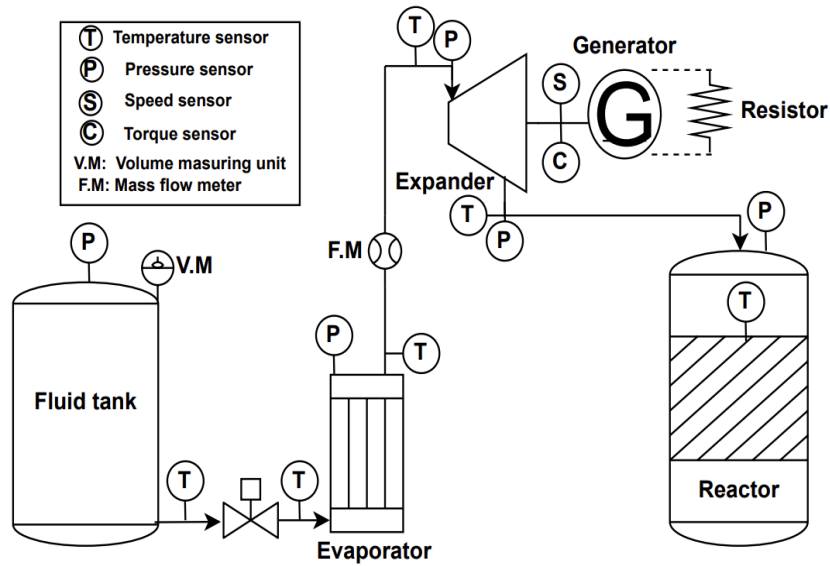
# Prototype expérimental



# Paramètres de fonctionnement expérimentaux nominaux



# Preuve de concept

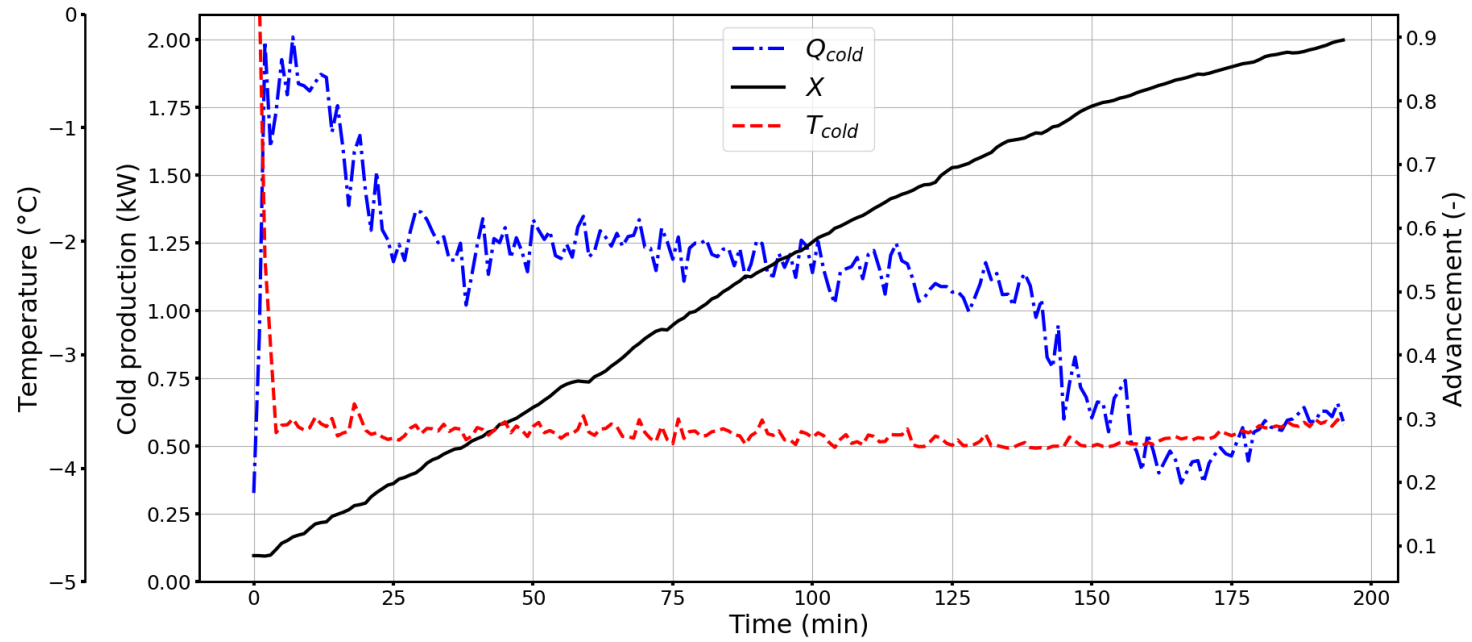


Puissance de production de froid de 1,25 kW à -3 °C pendant la réaction de synthèse

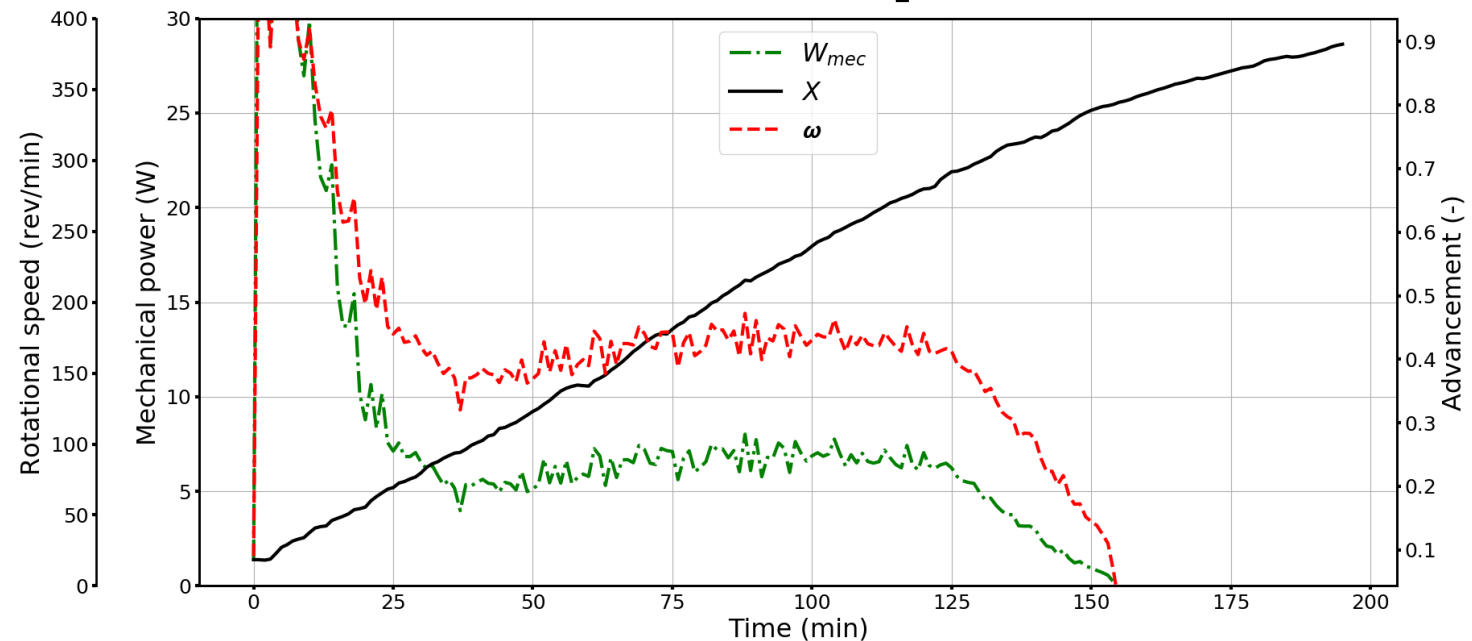
<< Validation du concept hybride >>

Production continue de l'expandeur, puissance mécanique de 8 W à 200 tr/min

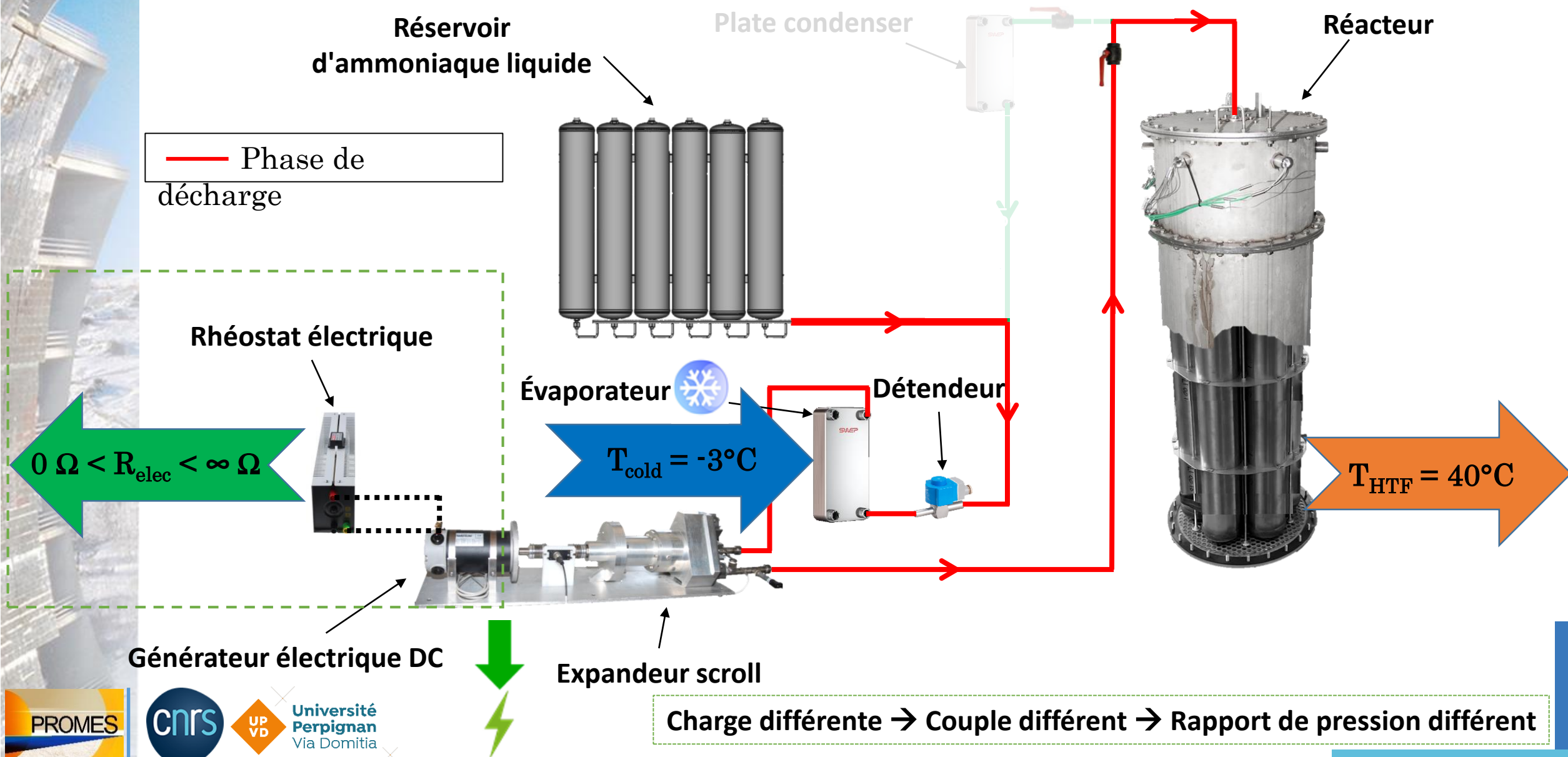
## Production de l'évaporateur



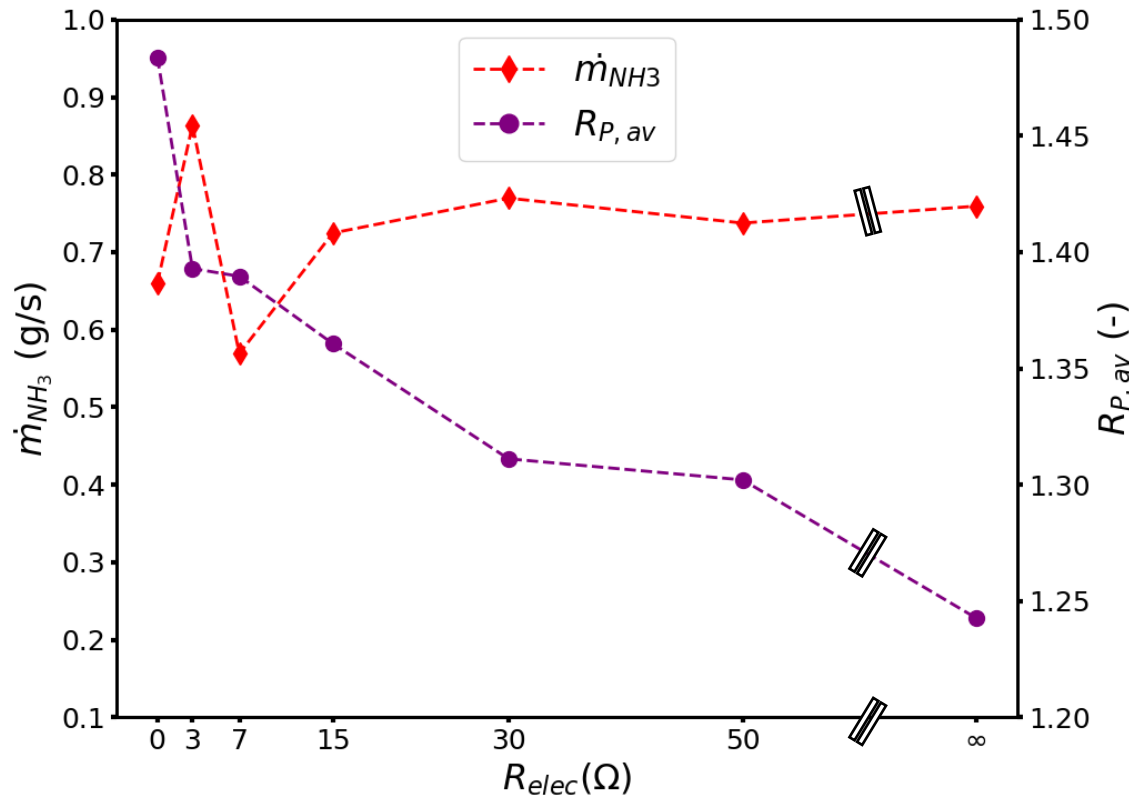
## Production de l'expandeur



# Sensibilité à la charge électrique - $R_{elec}$

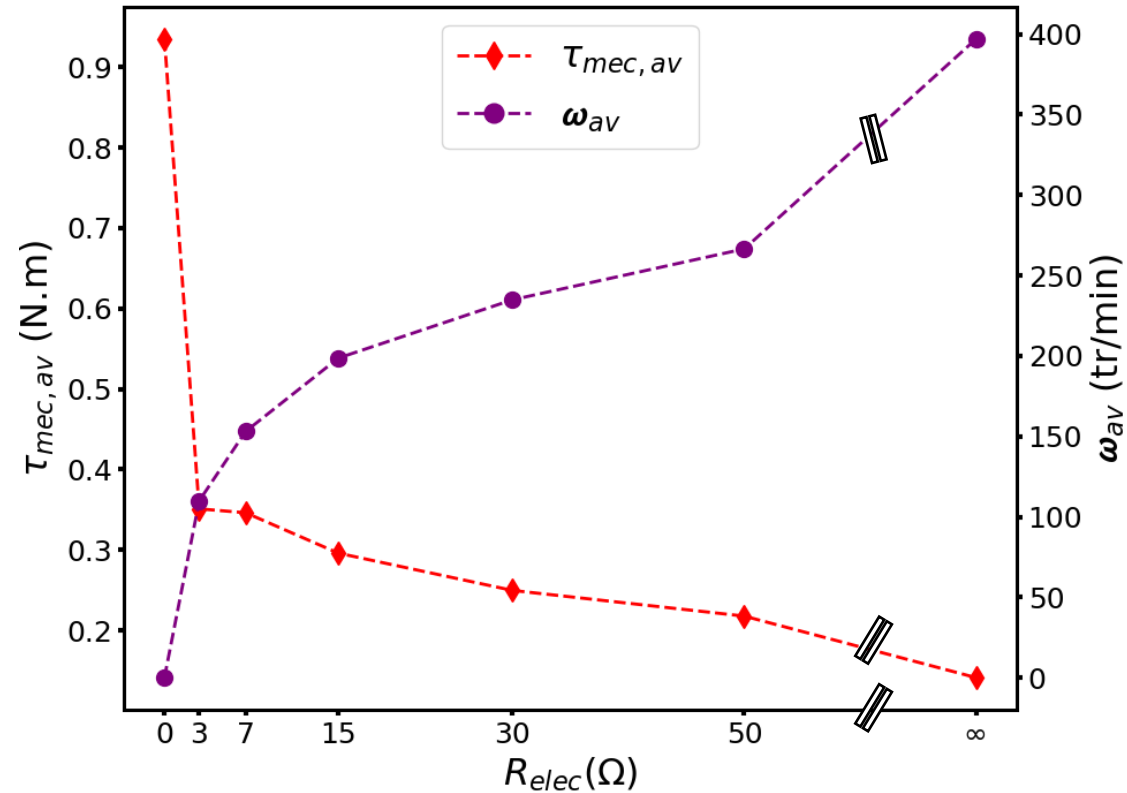


# Résultats – avec l'augmentation de $R_{elec}$



Pas de différence claire dans le débit massique mesuré de  $NH_3$

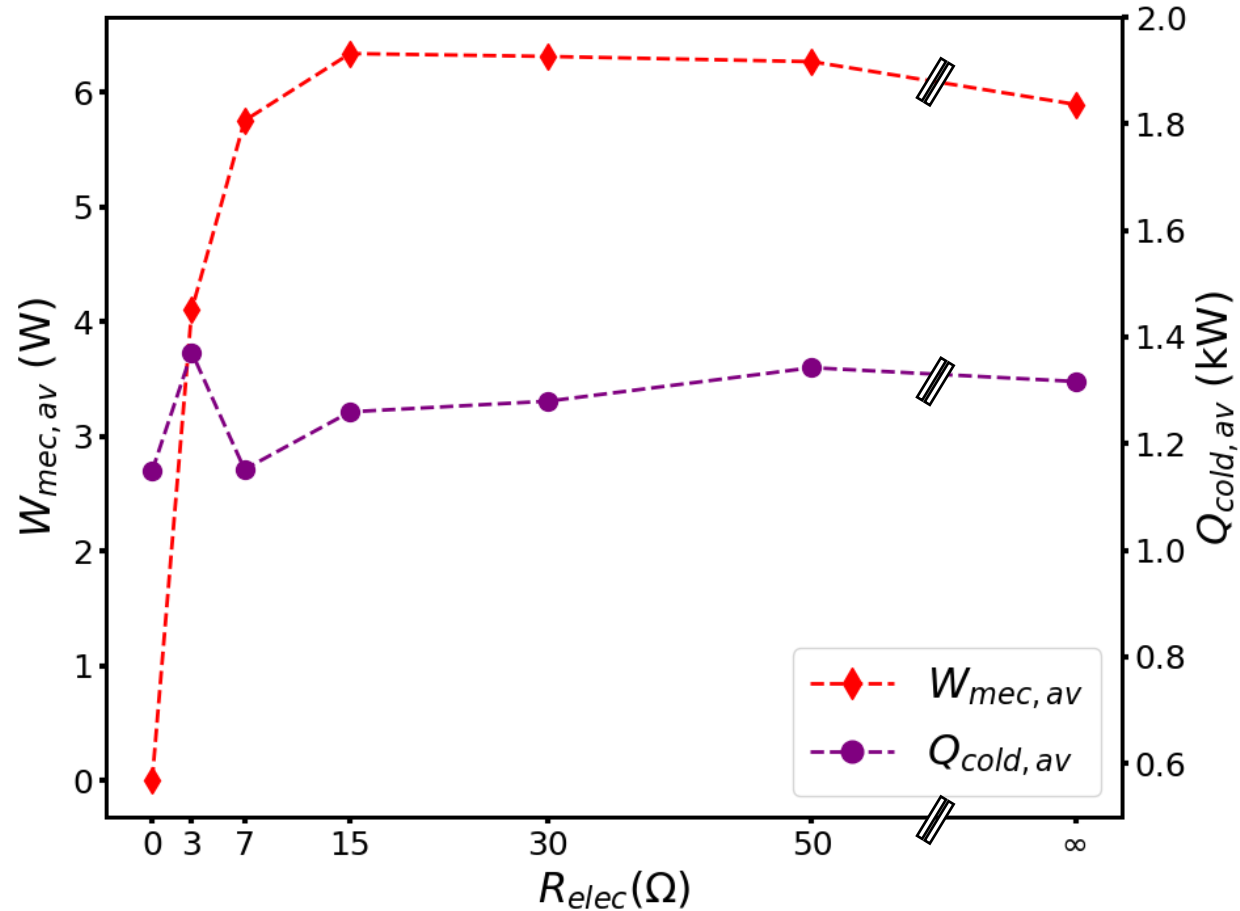
Diminution du rapport de pression  $R_p = \frac{P_{su}}{P_{exh}}$



Augmentation de la vitesse de rotation

Diminution du couple

# Résultats – avec l'augmentation de $R_{elec}$

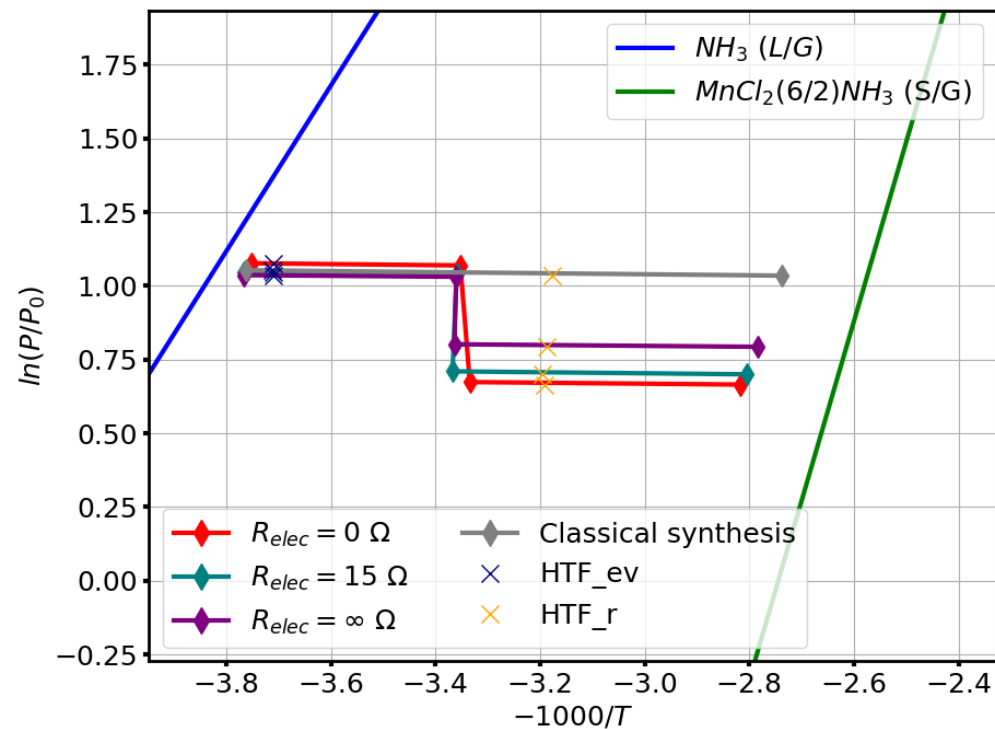
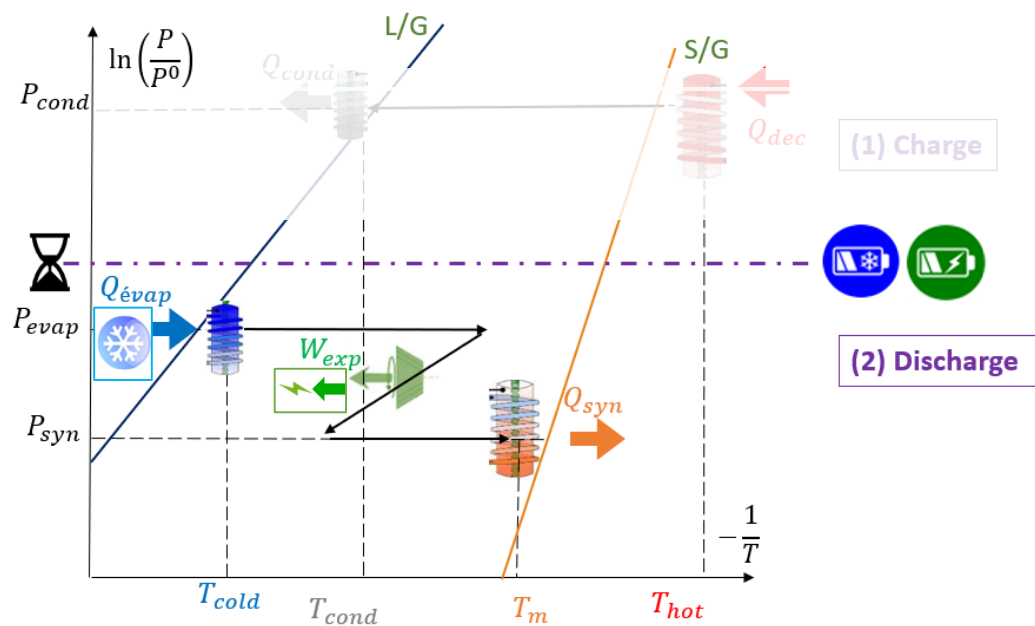


Pas d'effet significatif de la charge électrique sur la puissance du froid.

Un optimum de puissance mécanique de l'expandeur de 6,4 W est constaté à 15 ohms.

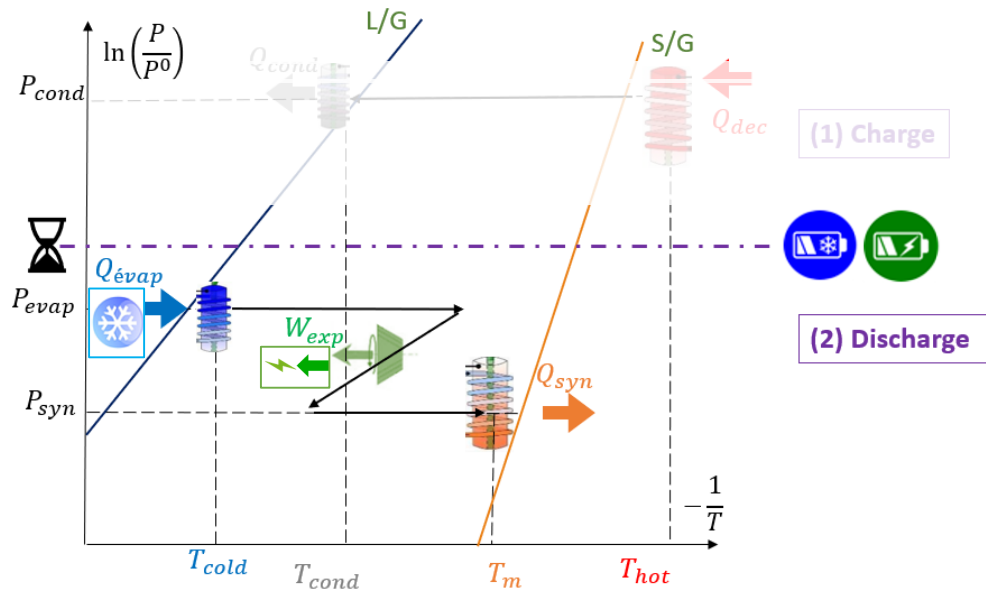
# Analyse du couplage

## Evaporateur – Expandeur - Réacteur



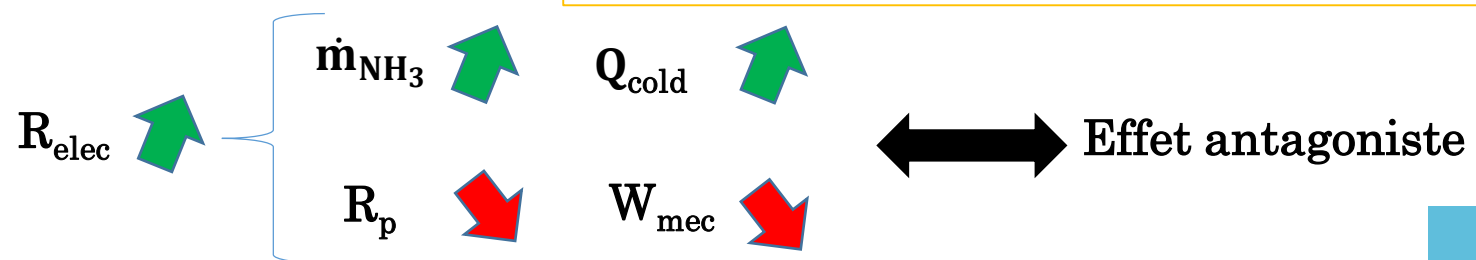
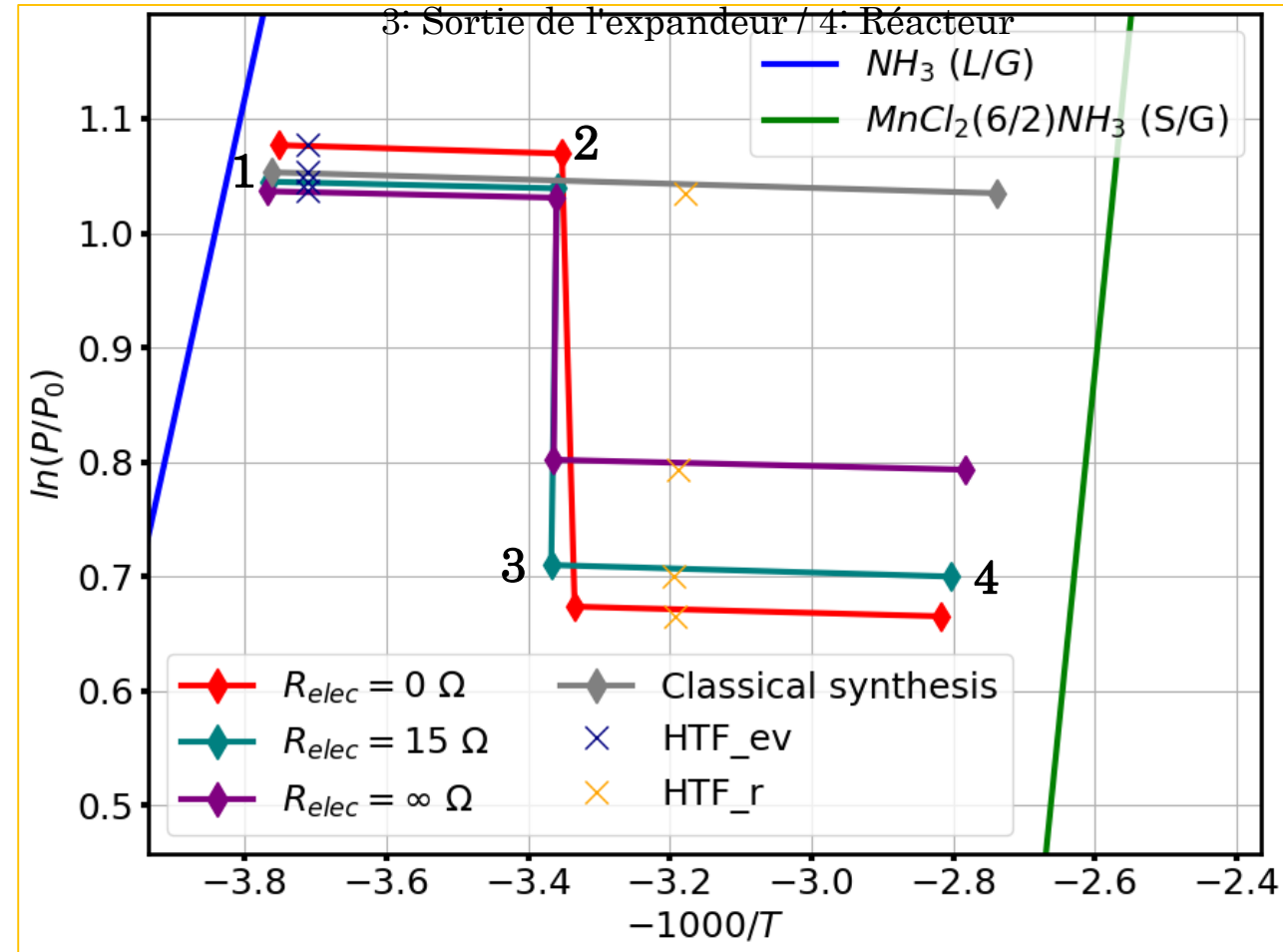
# Analyse du couplage

## Évaporateur – Expandeur - Réacteur



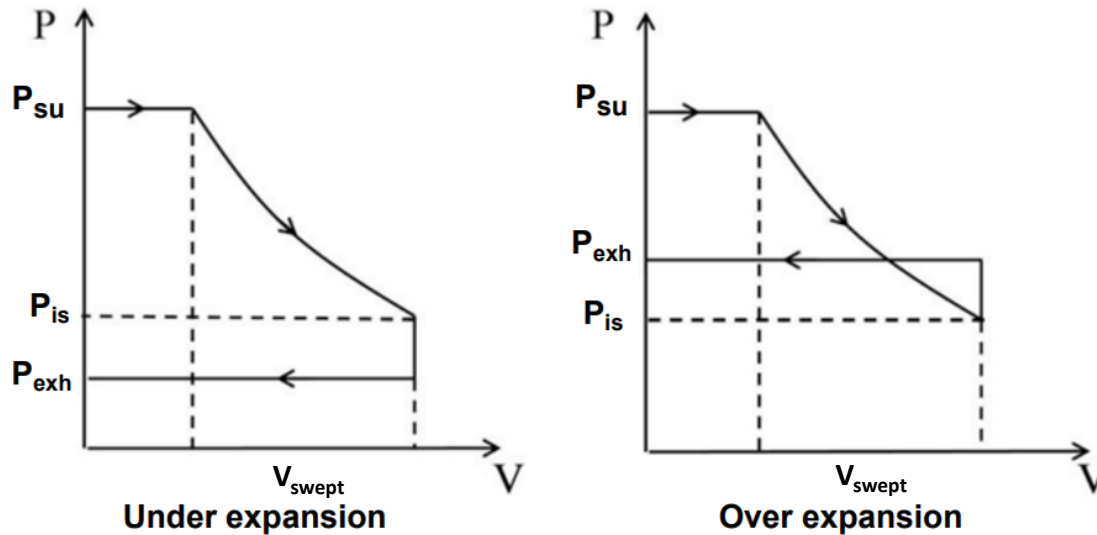
1: Évaporateur / 2: Entrée de l'expandeur

3: Sortie de l'expandeur / 4: Réacteur





# Performance de l'expandeur



Pour une expansion isentropique, avec un rapport volumétrique  $R_v =$

$$\left(\frac{P_{is}}{P_{su}}\right)^{\frac{3.5}{\gamma}} = \frac{1}{R_v}$$


$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{swept}}{\dot{m}_{meas}} = \frac{\rho * \omega * V_{swept}}{\dot{m}_{meas}}$$

$R_{elec} = 0 \Omega$		$R_{elec} = 15 \Omega$		$R_{elec} = inf \Omega$	
$P_{exh} = 1.98$ bar	$P_{is} = 0.3$ bar	$P_{exh} = 2.08$ bar	$P_{is} = 0.3$ bar	$P_{exh} = 2.26$ bar	$P_{is} = 0.3$ bar

$R_p$  maximum ←————→  $R_p$  minimum

→ Phénomène de sur-expansion dans l'expandeur → Faible rendement volumétrique  $\eta_v \sim 15 \%$

→ Pour contrôler  $P_{exh}$  : Le refroidissement du réacteur est un point clé



# Analyse numérique du couplage

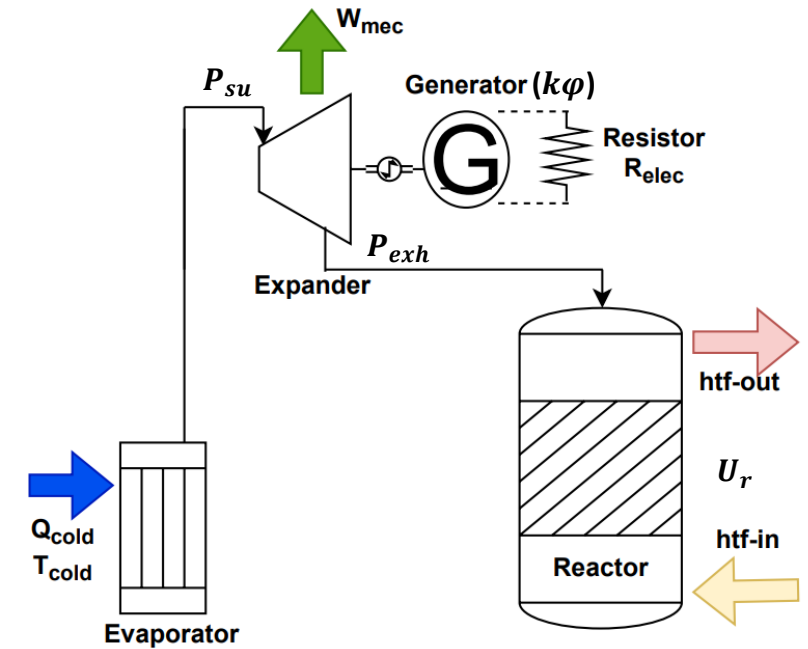
Evaporateur - Expandeur - Générateur - Réacteur



# Equations de couplage

Hypothèses :

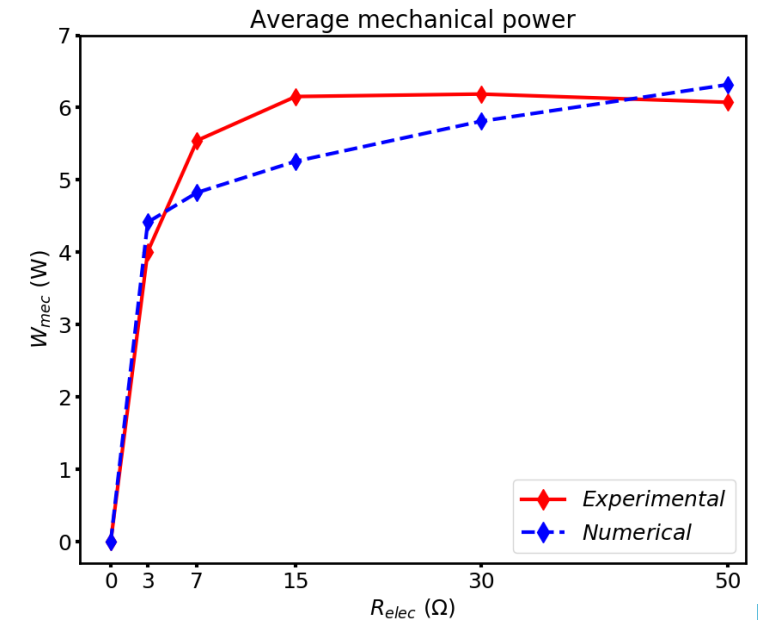
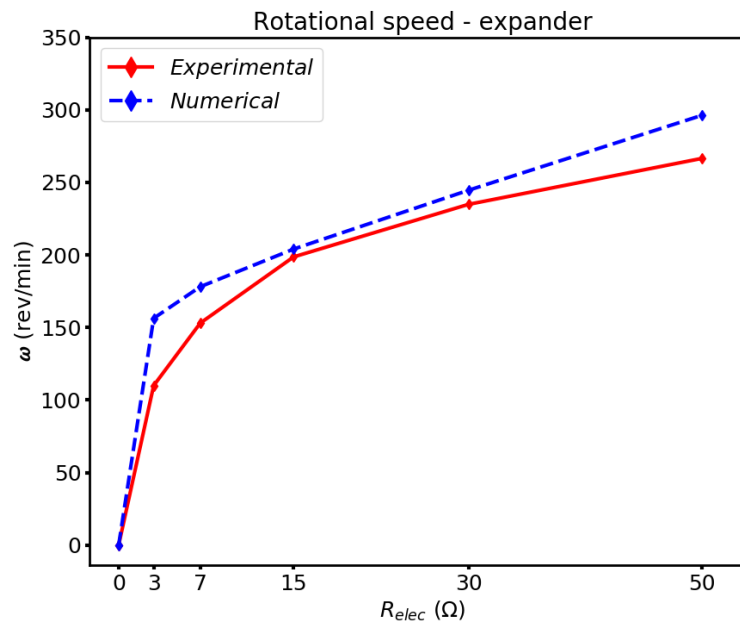
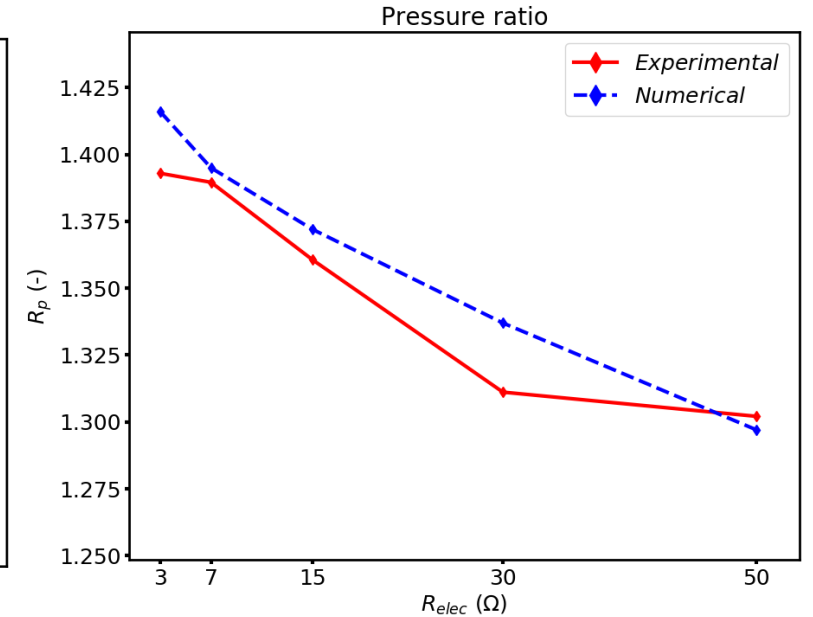
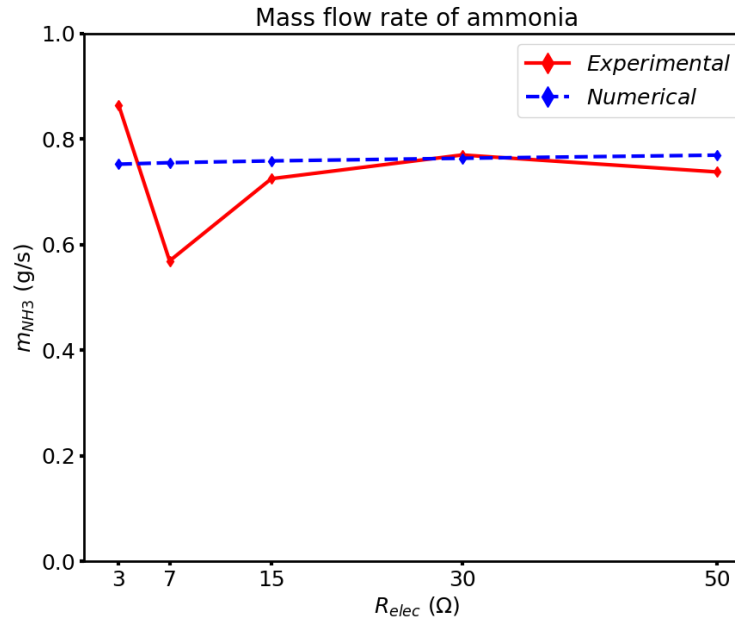
- Régime stationnaire
- Avancement de la réaction : 50%
- Température et pression homogènes dans le réacteur
- Rendement isentropique constant de l'expandeur
  - Coefficient d'expansion adiabatique constant



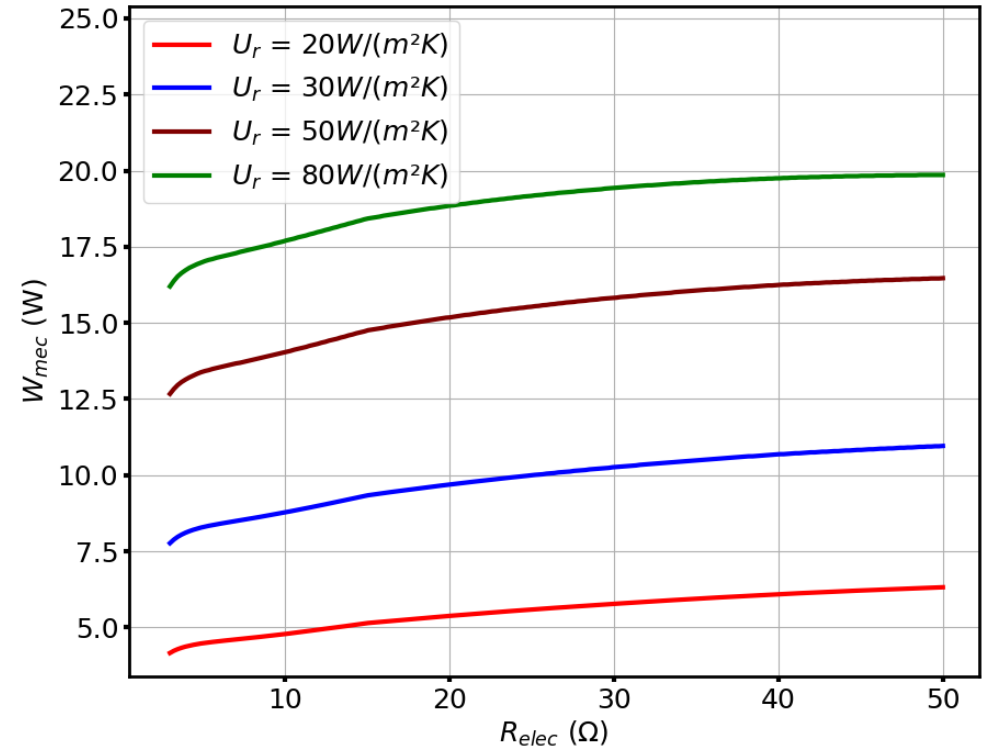
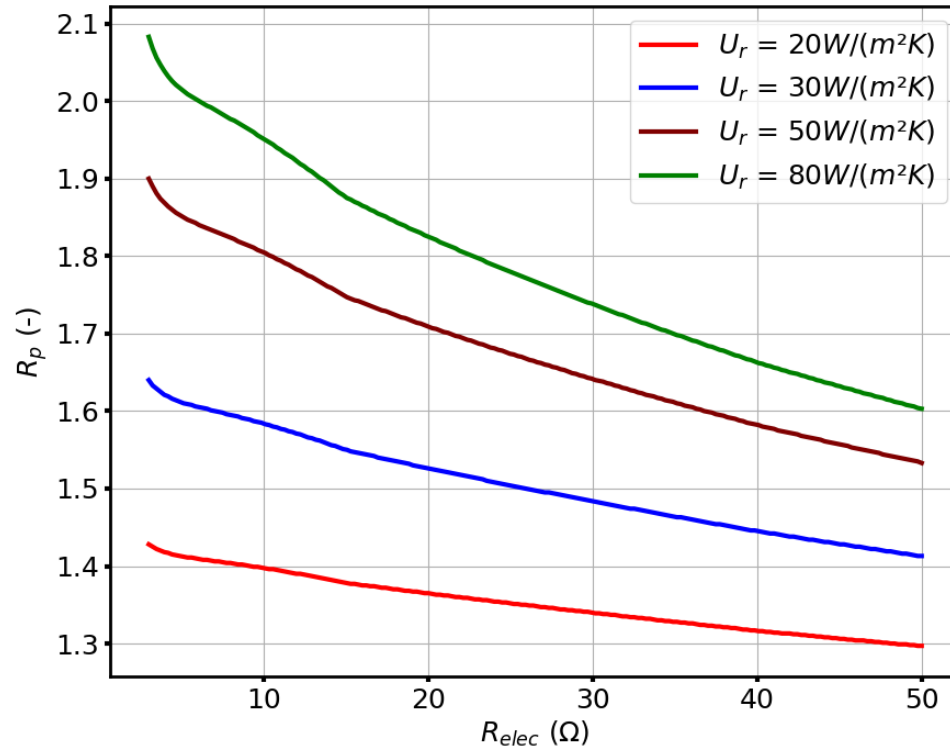
Variables	Equations
Pression d'admission	$P_{su} = P_{sat}(T_{cold})$
Pression d'échappement	$P_{exh} = f_1(T_{htf,r}^{in}, \dot{m}_g, U_r)$
Puissance mécanique	$W_{mec} = f_2(\dot{m}_g, P_{su}, P_{exh})$
Vitesse de rotation	$\omega = f_3(W_{mec}, k\varphi, R_{elec})$
Couple	$\tau_{mec} = f_4(W_{mec}, k\varphi, R_{elec})$

# Validation des résultats numériques

Paramètres identifiés	Valeur
$K_{cin}$	<b>0,00015</b> (s <sup>-1</sup> )
$U_r$	<b>20</b> (W/m <sup>2</sup> K)
$T_{cold}$	<b>-3°C</b>
$T_{htf,r}^{in}$	<b>40°C</b>
$k\phi$	$f(R_{elec})$
$K_{leak}$	<b>1,11 * 10<sup>-6</sup></b> m <sup>3</sup> /s.Pa <sup>0,5</sup>



# Analyse paramétrique: sensibilité à $U_r$



Un meilleur coefficient de transfert de chaleur au niveau du réacteur conduit à

:

- Rapport de pression plus élevé au niveau de l'expandeur
- Puissance mécanique plus élevée.

# Conclusion



# Conclusion

- Le concept d'hybridation des cycles thermo-chimiques est prouvé expérimentalement : productions simultanées de froid et de mécanique.
- Le cycle est analysé dans différentes conditions de fonctionnement : sensibilité à la charge électrique.
- La variation de  $R_{elec}$ , fixant  $T_{cold}$ , montre un optimum dans la production mécanique.
- Une fuite interne importante est détectée dans l'expandeur, d'où le rendement volumétrique atteint est d'environ 15 %.
- Un modèle numérique en régime permanent est développé. Les validations avec les résultats expérimentaux conduisent à une analyse paramétrique du couplage.
- Un meilleur coefficient de transfert de chaleur au niveau du réacteur améliore la production mécanique.



***Merci pour votre attention***



***Questions ?***

