

# Analyse comparative de cycles hybrides innovants impliquant des procédés à sorption, pour le stockage d'énergie thermique, la production de froid et/ou de travail mécanique

Alexis GODEFROY (1\*), Maxime PERIER-MUZET (1,2) & Nathalie MAZET (1)



Société Française de Thermique

## Etat de l'art : cycles thermodynamiques hybrides combinant sorption et cycle moteur

Une **machine à absorption** comporte un absorbeur et un générateur, où se produisent respectivement les phénomènes d'absorption et de désorption physique du fluide de travail ( $\text{NH}_3$ ) à l'état gazeux vis-à-vis d'une solution liquide. Celle-ci circule entre les 2 composants, tandis que l'ammoniac parcourt l'autre partie du cycle qui est constituée d'un condenseur et d'un évaporateur. Cela permet une production de froid en continu (à l'évaporateur), à partir d'une source chaude (appliquée au générateur).

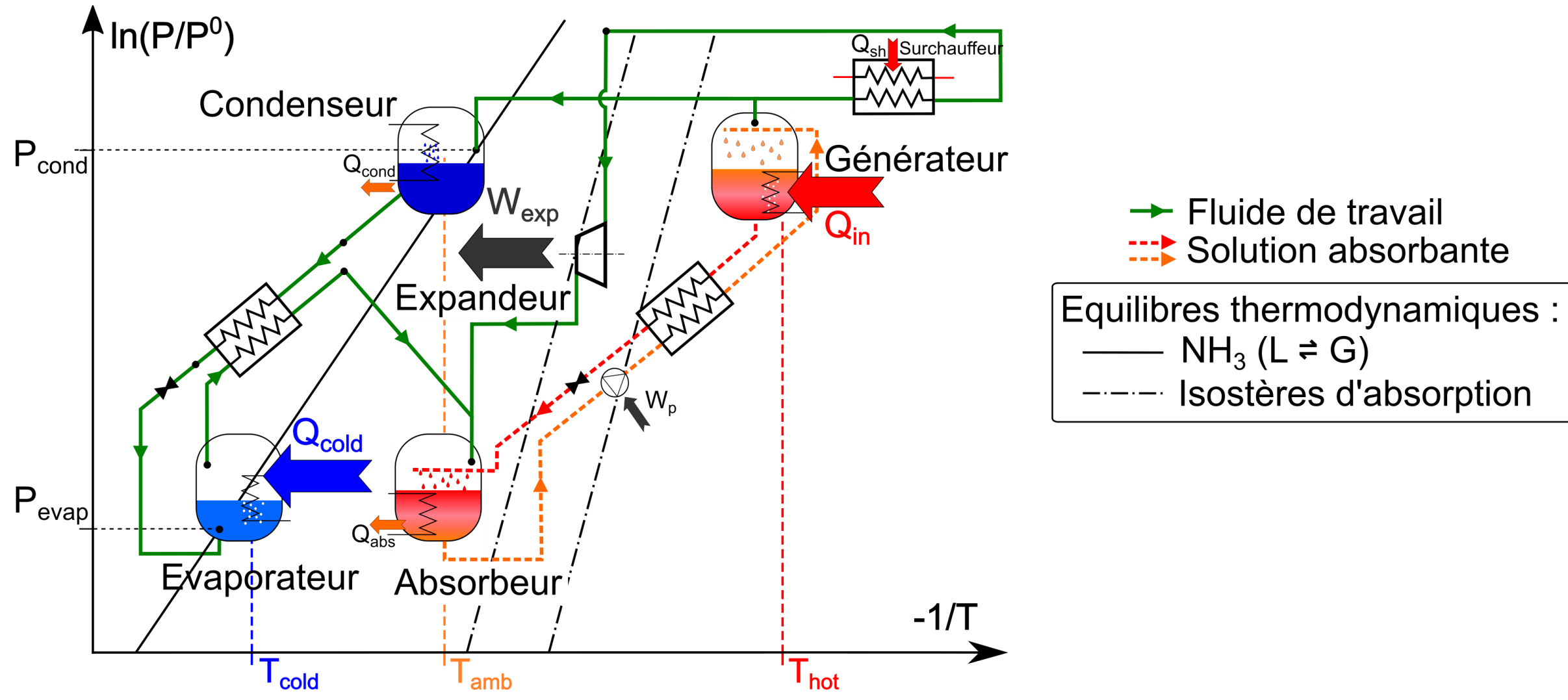
Une **machine thermochimique** est constituée d'un réacteur thermochimique, support de la réaction chimique réversible entre un solide réactif et un gaz ( $\text{NH}_3$ ), qui est le fluide de travail du cycle thermodynamique. Un ensemble (Condenseur – Evaporateur) ou un 2<sup>ème</sup> réacteur thermochimique (fonctionnant avec un sel différent du premier, à plus basse température) ferme le cycle, qui permet une production de froid (à l'évaporateur ou au réacteur basse température) et éventuellement un stockage (chimique) de l'énergie thermique entrante du fait de sa nature discontinue.

### Hybridation avec un cycle thermodynamique moteur

En mettant en commun les composants des 2 cycles à sorption précédents avec ceux d'un cycle moteur (de type Rankine), on réalise des cycles dits « hybrides » dont l'intérêt majeur est de combiner les fonctionnalités des cycles de base (production de froid, stockage, production de travail mécanique). Concrètement, cette hybridation consiste à insérer un organe de détente (noté ici « **expandeur** ») entre deux étages de pression dans les cycles à sorption (cf. schémas ci-dessous).

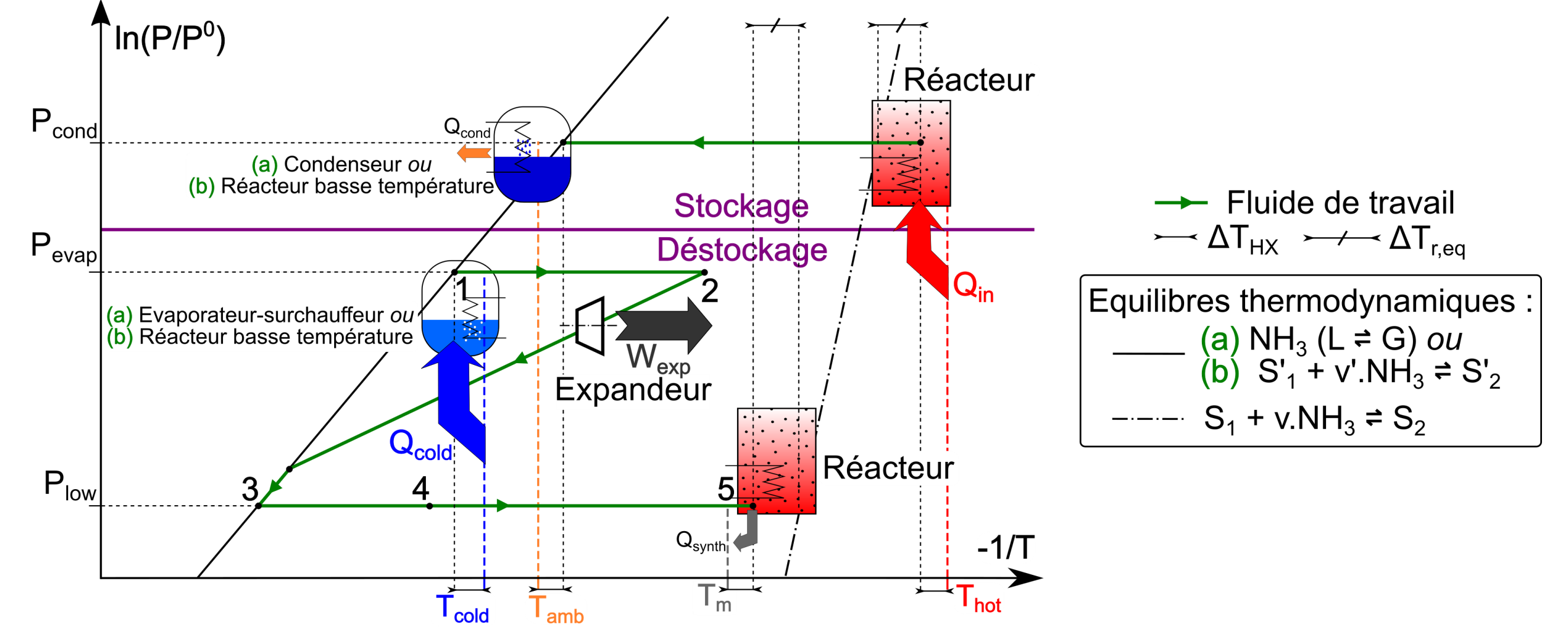
#### Hybride à absorption (Ha)

Sorption physique liquide / gaz



#### Hybride thermochimique (Ht(a) et Ht(b))

Sorption chimique solide / gaz



### Conclusions de l'état de l'art des cycles hybrides à sorption :

- Configurations les plus courantes : hybrides du type **Ha** (à absorption).
- Hybrides thermochimiques globalement peu abordés :
  - 5 publications relevées sur **Ht(b)**, dont une seule étude expérimentale.
  - Seulement 2 publications sur l'hybride **Ht(a)** (études théoriques).
- Rendements énergétiques moyens de ces hybrides :
  - $\eta_I \approx 0,32$  pour les machines de type **Ha**.
  - $\eta_I \approx 0,44$  pour les machines de type **Ht (a) et (b)** confondus.
- Pour **Ha** : production de travail dominante devant la production de froid.
- pour **Ht(a) et Ht(b)** : production de froid prépondérante.

## Analyse thermodynamique des hybrides thermochimiques

- **Focus sur l'hybride Ht(a)**, avec une configuration à 1 ou 2 détente selon le sel testé afin de limiter les rapports de pression atteints.
- **Analyse thermodynamique** pour un panel de 103 sels réactifs (conditions opératoires :  $T_{cold} = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_{amb} = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{hot} < 250^\circ\text{C}$ )
- Sélection des sels les plus performants sur la base de **3 critères** : **rendements** (énergétique et exergetique) et **densité exergetique** (critère pertinent pour évaluer le potentiel de stockage d'énergie inhérent au caractère discontinu du cycle)

### Algorithme de l'étude

Hypothèses thermo. et valeurs limites

$\Delta T_{HX} = 5 \text{ K (L/V)}, 10 \text{ K (V/V)}$ ;  $\Delta T_{r,eq} = 20 \text{ K}$ ;  $\eta_{is} = 0,8$ .

$T_{hot,max} = 250^\circ\text{C}$ ;  $P_{low,min} = 0,1 \text{ bar}$ ;  $R_{p,max} = 10$ ;  $x_{3,min} = 0,8$ .

#### Données du sel réactif

$$P_{cond} = P_{sat}(T_{amb} + \Delta T_{HX});$$

$$T_{hot} = T_{r,eq}(P_{cond}) + \Delta T_{r,eq} + \Delta T_{HX}$$

$T_{hot} > T_{hot,max}$  ?

OUI → **ARRET**  
Sel trop « haute température »

NON

$$P_{evap} = P_{sat}(T_{cold} - \Delta T_{HX});$$

$$P_{low,test} = P_{r,eq}(T_{amb} + \Delta T_{HX} + \Delta T_{r,eq});$$

Calcul des états thermodynamiques en phase de stockage

$P_{low,test} < P_{evap}$  ?

NON → **ARRET**  
Sel trop « basse température » : cogénération de froid et travail impossible

OUI

$P_{low,test} > P_{low,min}$  ?

OUI

$$P_{low} = P_{low,test};$$

$$T_m = T_{amb}$$

NON

$P_{low,test} > P_{low,min}$  ?

OUI

$$P_{low} = P_{low,min};$$

$$T_m = T_{r,eq}(P_{low}) - \Delta T_{r,eq} - \Delta T_{HX}$$

NON

$P_{evap}/P_{low} < R_{p,max}$  ?

OUI

Rapport de pression trop élevé → Ajout d'une détente

NON

$x_3 > x_{3,min}$  ?

OUI

NON

Résolution en  $P_{low}$  de  $x_3 = x_{3,min} = x(P_{low})$ ; Calcul des états thermodynamiques en phase de déstockage

Etats thermodynamiques en tout point du cycle

### Performances énergétique et exergetique

$$\eta_I = \frac{W_{exp} + Q_{cold}}{Q_{in}}$$

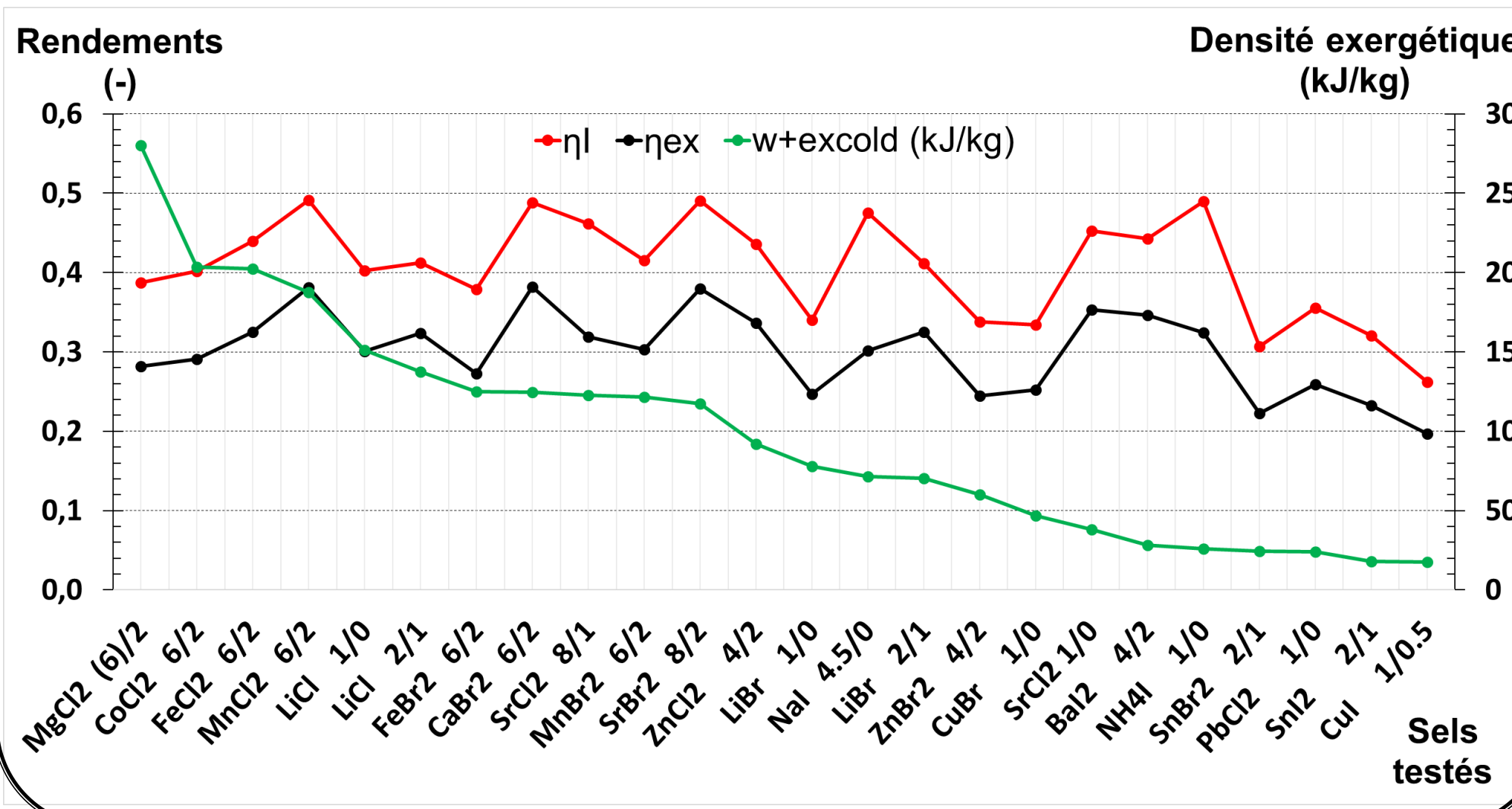
Rendement énergétique (-)

$$\eta_{ex} = \frac{W_{exp} + Q_{cold} \cdot (T^0/T_{cold} - 1)}{Q_{in} \cdot (1 - T^0/T_{hot})}$$

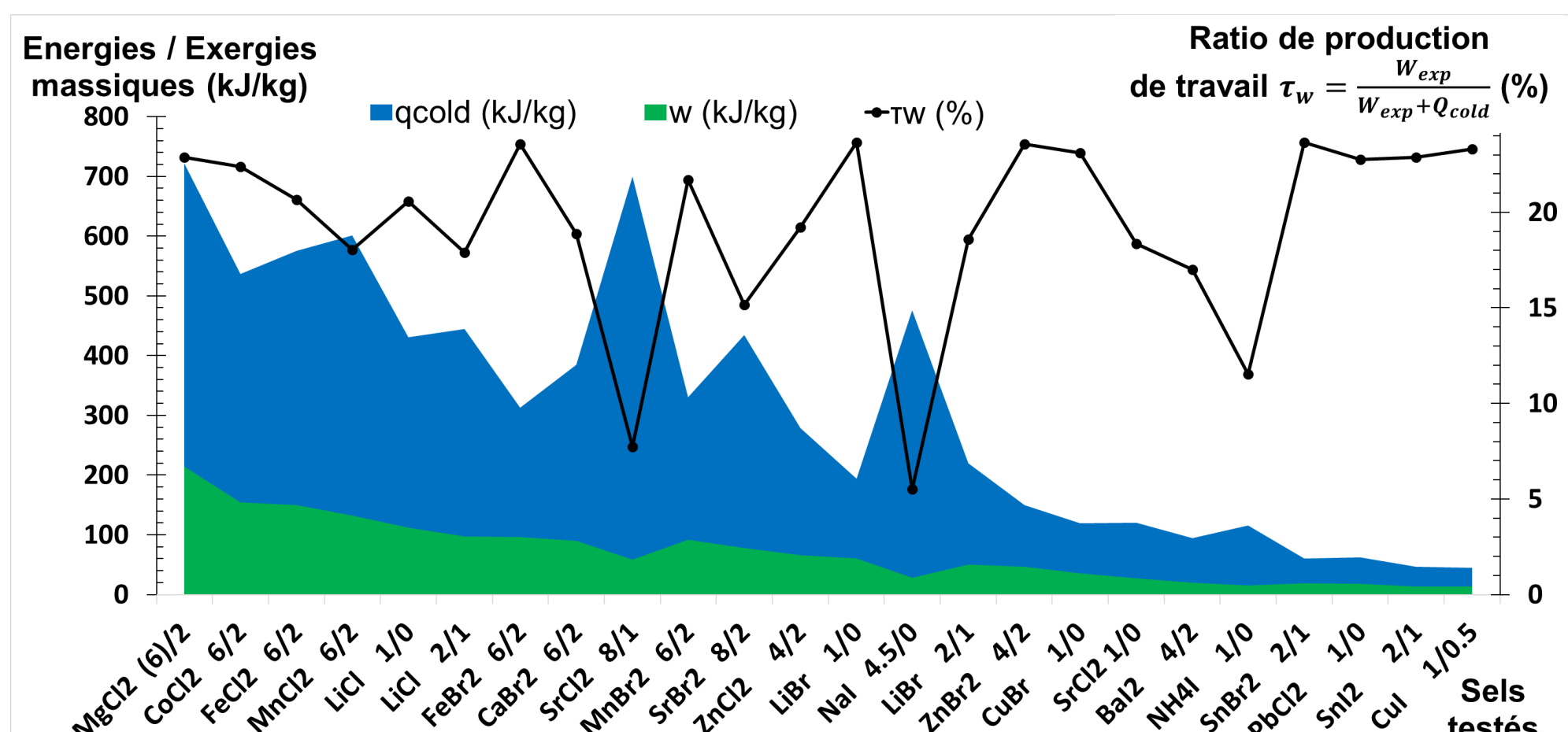
Rendement exergetique (-)

$$w + ex_{cold} = \frac{W_{exp} + Q_{cold} \cdot (T^0/T_{cold} - 1)}{m_{sel,an}}$$

Densité exergetique (J/kg)



### Effets utiles produits : froid, travail



### Discussion et perspectives

- Ces résultats ont été obtenus pour 2 étages de détente, afin de respecter la limite technologique imposée aux rapports de pression ( $R_p < 10$ ).
- Malgré les contraintes techniques intégrées à l'algorithme, certains sels devront probablement être éliminés en raison d'autres contraintes qui seront à analyser : coût, réactivité du sel, sécurité notamment.
- Par ailleurs, pour une production d'électricité seule, on peut lever la contrainte  $P_{evap}$  liée à la production de froid et ainsi réaliser une configuration autotherme (en phase de déstockage), la chaleur rejetée par le réacteur (en synthèse) étant utilisée pour l'évaporation et la surchauffe.

### Conclusions

Des sels déjà connus et utilisés tels que  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CoCl}_2$ ,  $\text{FeCl}_2$  et  $\text{MnCl}_2$ , conduisent à des rendements de l'ordre de  $\eta_I \approx 0,43$  et  $\eta_{ex} \approx 0,32$ , semblables à ceux de la littérature sur les hybrides thermochimiques. A titre d'exemple, une masse d'environ 27 kg de  $\text{MnCl}_2$  anhydre permettrait d'obtenir 1 kWh de travail et 4,5 kWh en production de froid.