

Application de la méthode du pincement pour l'optimisation d'un procédé de synthèse de l'hydrogène par le cycle Iode – Soufre

Yohann Dumont Françoise CHARBIT, Claude REY
M. Patrick AUJOLLET, Jean-Henry FERRASSE



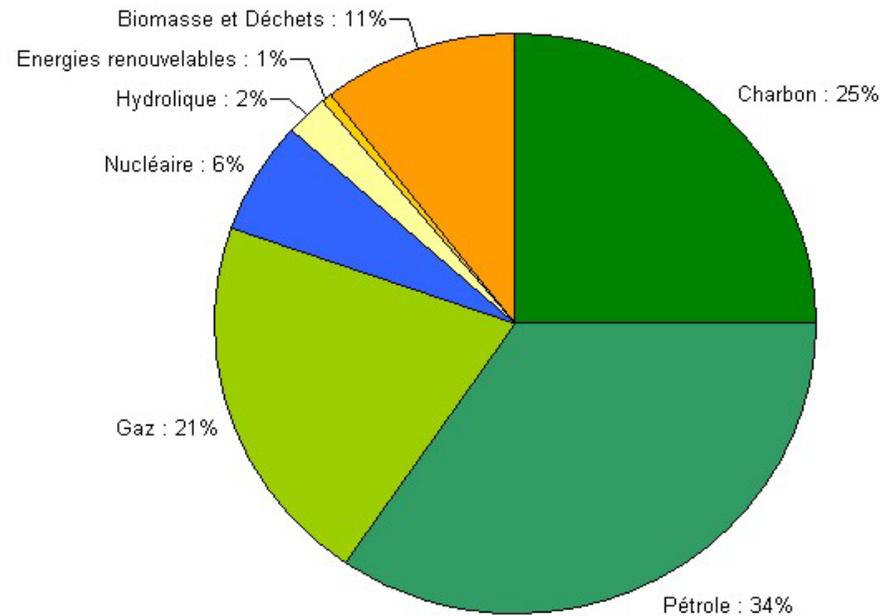
Laboratoire d'Etude des
Systèmes Avancés
DEN/DER/SESI/LESA



Laboratoire Modélisation,
Mécanique et Procédés Propres
CNRS UMR 6181

Une problématique énergétique

- ✓ Une problématique énergétique

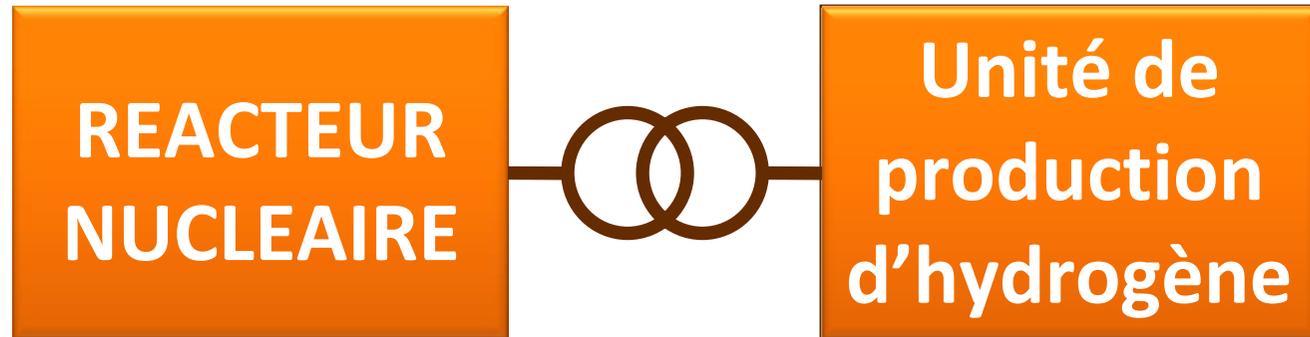


source : IEA Energy

- Une consommation énergétique mondiale de 12,6 Gtep
- Des réserves limitées
- Élément abondant dans l'univers (sous forme composée (H_2O , CH_4 ...))
- Forte densité énergétique (141 860 kJ/kg - 286 kJ/mol)
- ...

Sujet de l'étude

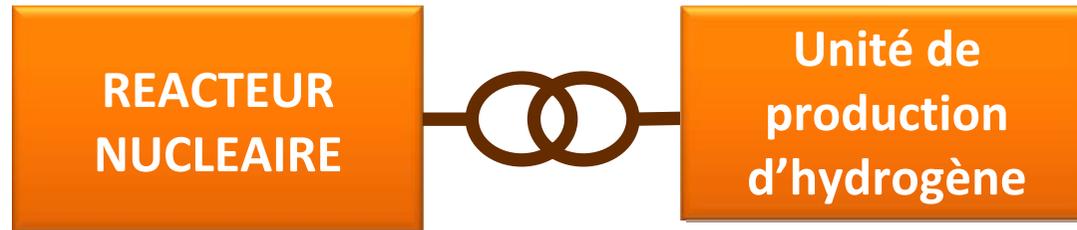
- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude



- Produire de l'hydrogène
- Utiliser un réacteur nucléaire comme source d'énergie

➤ **Etude d'un couplage entre le procédé de production et le réacteur nucléaire**

Le cadre de l'étude



- ✓ Une problématique énergétique
- ☐ Sujet de l'étude

- Le réacteur nucléaire
 - Réacteur nucléaire à haute température (HTR)
 - Source de chaleur disponible à 900°C
 - De l'énergie électrique produite à $\eta_{elec}=49\%$
- L'unité de production d'hydrogène
 - **le cycle thermochimique iode-soufre (cycle IS)**
 - Chimie : stœchiométries et conditions opératoires fixées
 - Simulation par le logiciel PROSIM

Le rendement énergétique

- Uniquement considéré dans le but de produire de l'hydrogène

$$\eta = \frac{PCS_{H_2, produit}}{Q_H}$$

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ **Etude préliminaire pour le couplage**
 - ✓ Rendement énergétique et exergétique
 - Remarques de sûreté du couplage
- Etude du couplage
- Conclusions et perspectives

Remarques de sûreté

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ **Etude préliminaire pour le couplage**
 - ✓ Rendement énergétique et exergétique
 - ✓ Remarques de sûreté du couplage
- Etude du couplage
- Conclusions et perspectives

- Coexistence du risque chimique et du risque nucléaire
 - Possibilité d'isoler et de rendre autonome les unités
 - Intégré la gestion existante du risque nucléaire

➤ **Spécialisation des circuits selon leur fonction**

- Coexistence avec le risque hydrogène
 - Risque d'inflammation et de détonation
 - Protection des Hommes et des autres structures

➤ **Localisation et isolation de la production d'hydrogène**

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - ❑ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ❑ Application au couplage du cycle IS
- ❑ Conclusions et perspectives

7

6 janvier 2011

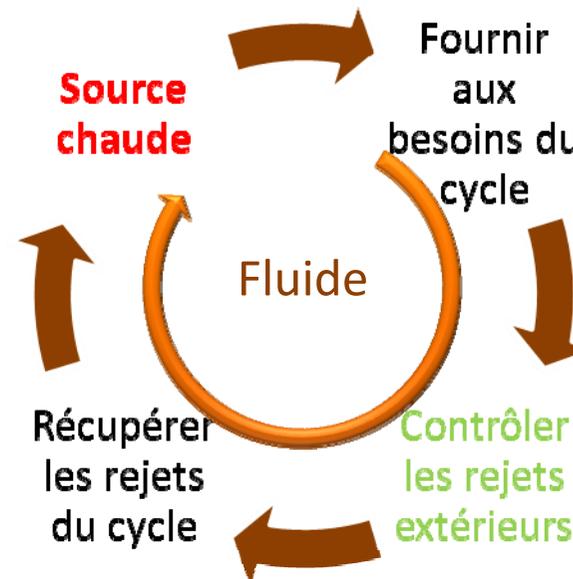
Nancy

Objectifs

Répondre à un besoin en énergie et utiliser les disponibilités

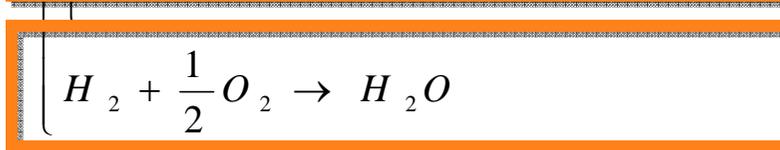
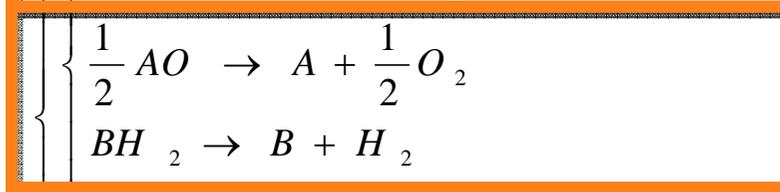
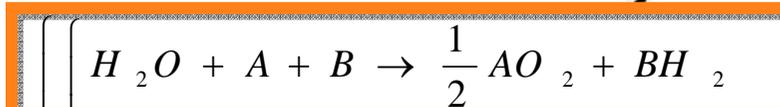
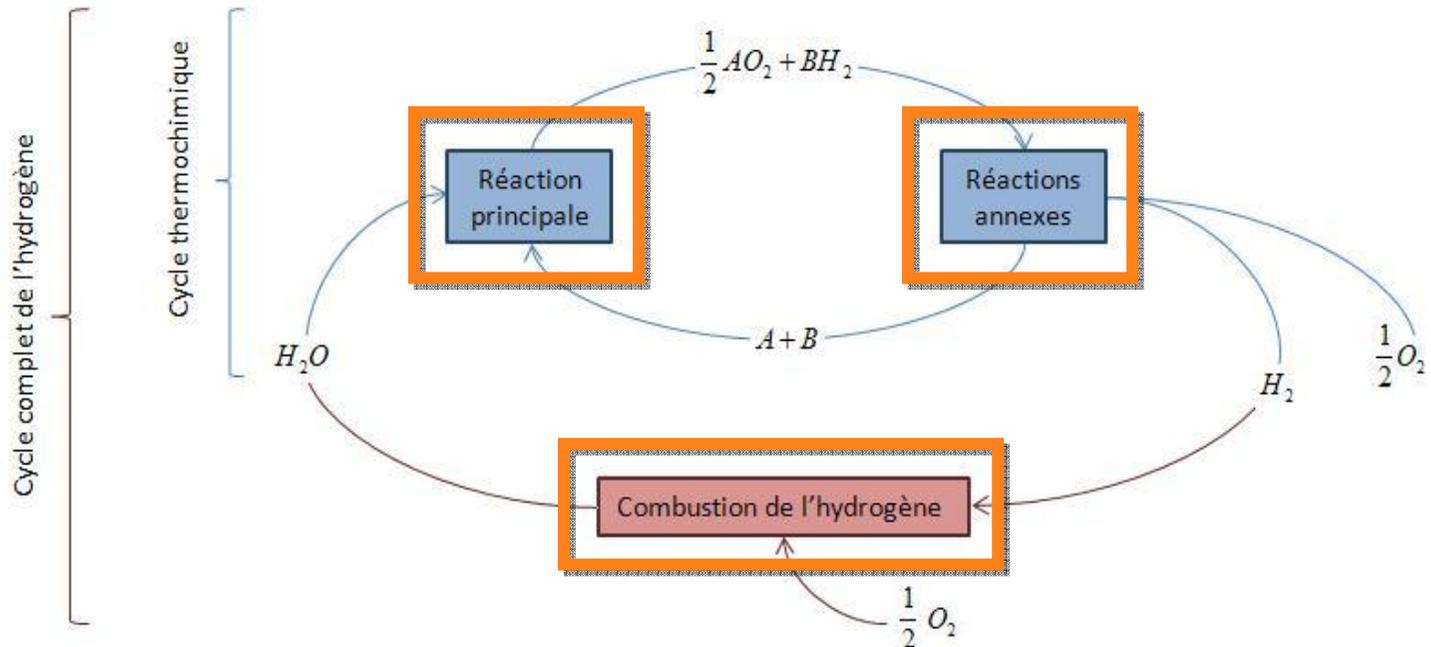
➤ Utilisation d'un réseau de distribution d'énergie (RDE)

- Favoriser un rendement énergétique élevé
- Répondre aux exigences de sûreté



Le cycle thermochimique

- Un cycle de composés chimiques



- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

Le cycle thermochimique

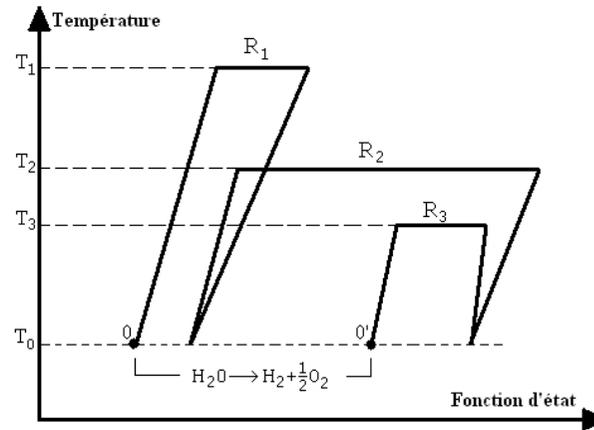
- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

9

6 janvier 2011

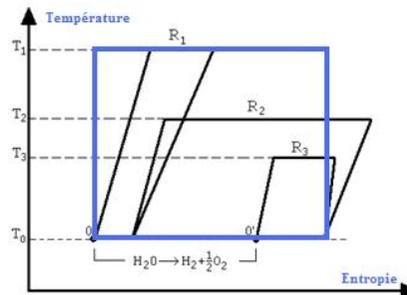
Nancy

- Un cycle thermodynamique



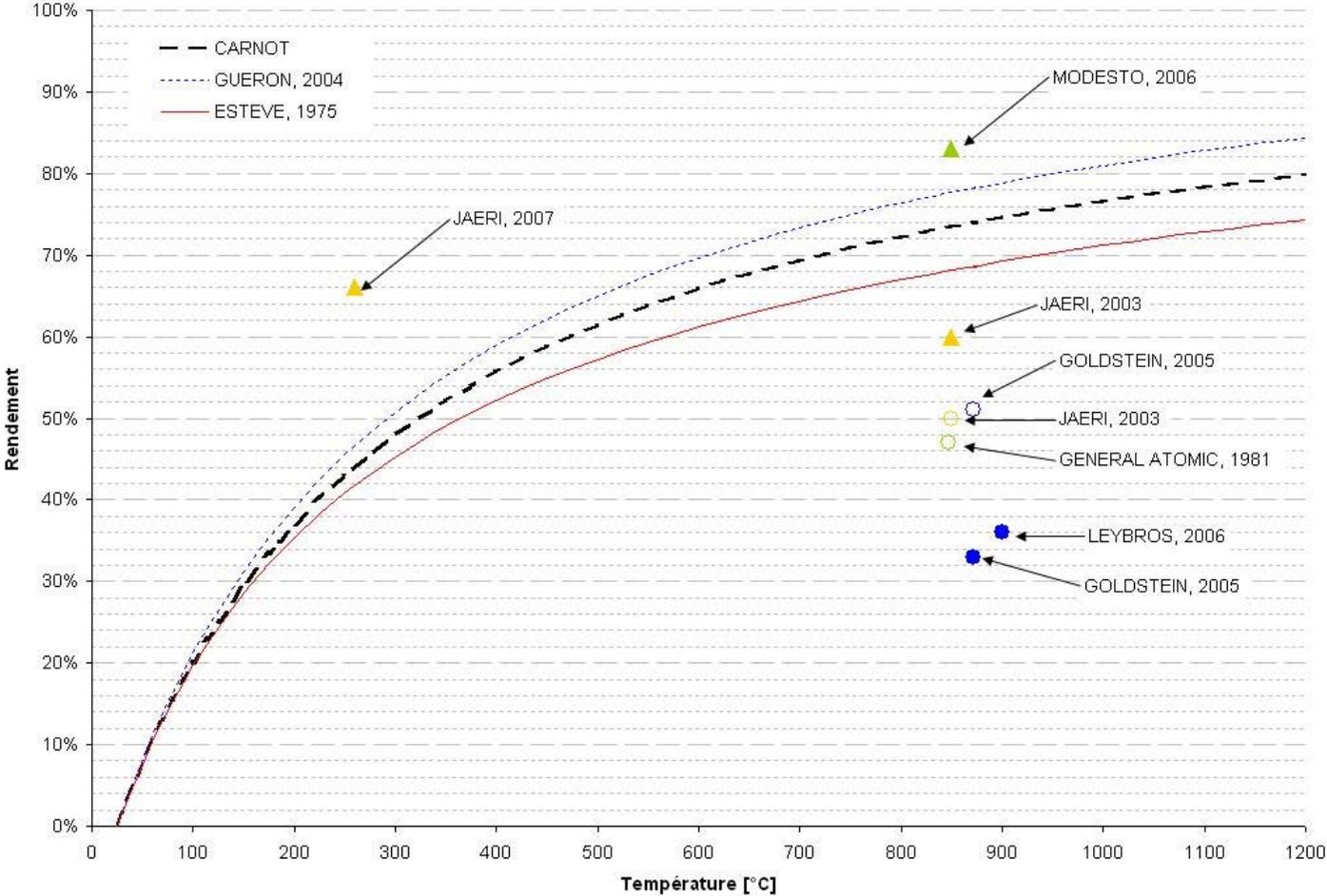
$$\oint \partial X = 0$$

- Une analogie avec les cycles thermodynamiques classiques



$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

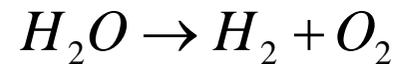
Le rendement dans la bibliographie



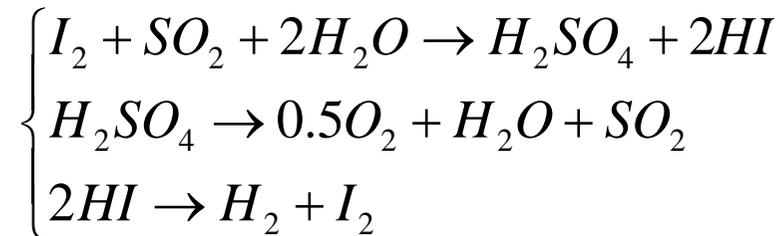
Les réactions chimiques

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ❑ Couplage classique du cycle IS
 - ❑ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ❑ Application au couplage du cycle IS
- ❑ Conclusions et perspectives

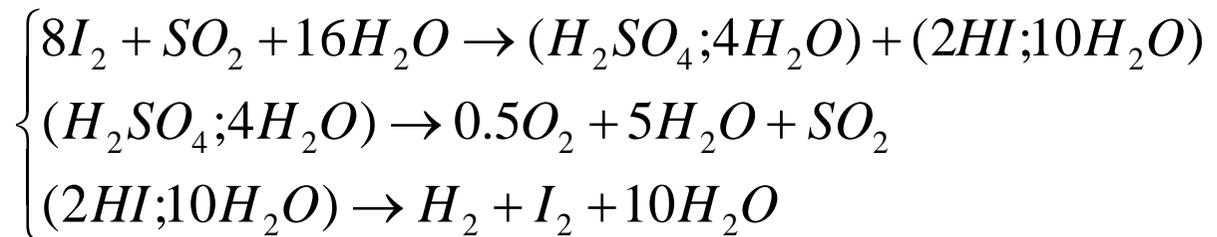
- Décomposition de l'eau



- Les intermédiaires réactionnels I_2 et SO_2



- Bilan final retenu



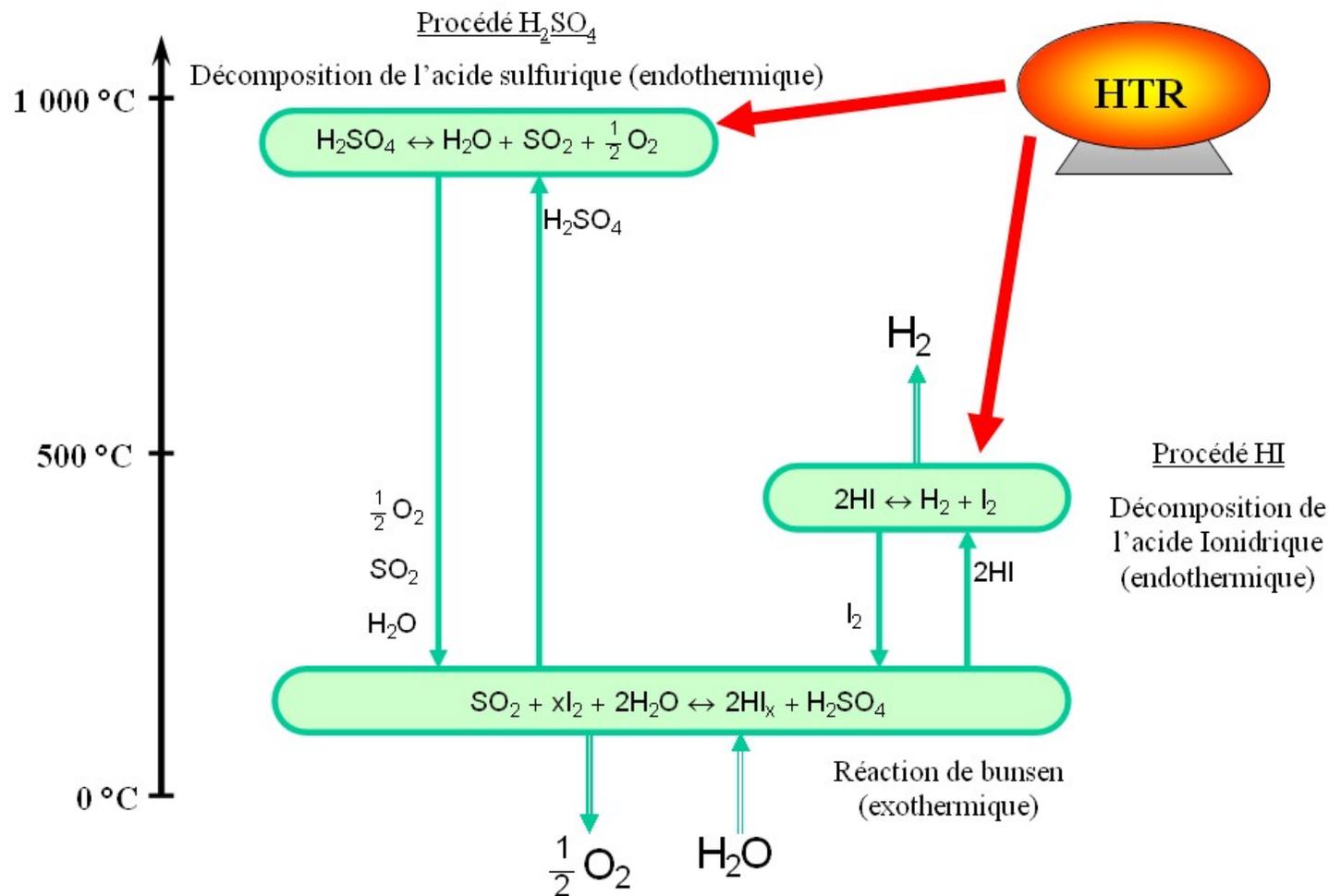
Les niveaux de température

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ❑ Couplage classique du cycle IS
 - ❑ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ❑ Application au couplage du cycle IS
- ❑ Conclusions et perspectives

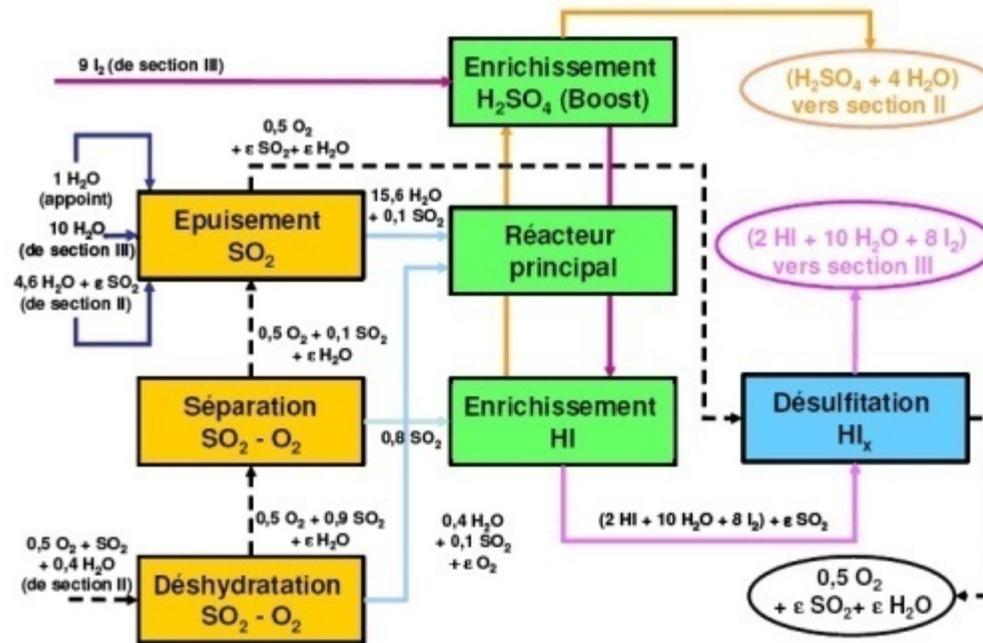
12

6 janvier 2011

Nancy



La section « Bunsen »



- Principale source d'énergie :

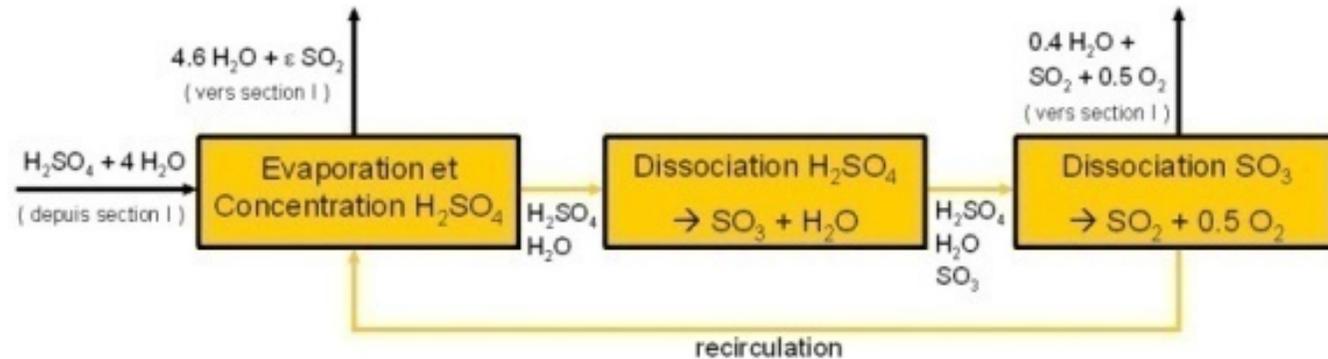
Réacteur de "Bunsen"

140°C -93,0 kW

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

La section « H₂SO₄ »

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

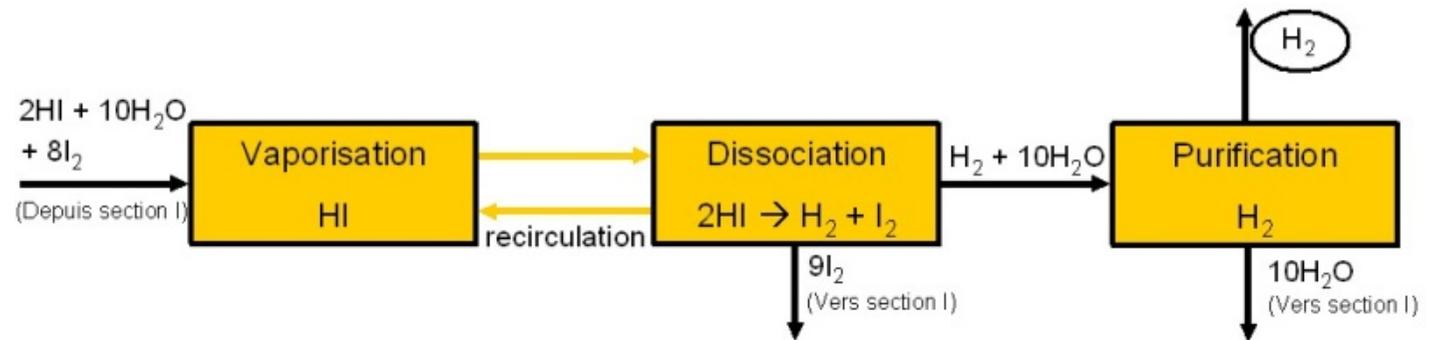


• Principales sources d'énergie :

Montée en température de H ₂ SO ₄	239°C à 850°C	109,4 kW
Réaction de dissociation H ₂ SO ₄	750°C et 850°C	365,4 kW
Descente en température SO ₂ /O ₂	890°C à 135°C	-136,0 kW

La section « HI »

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

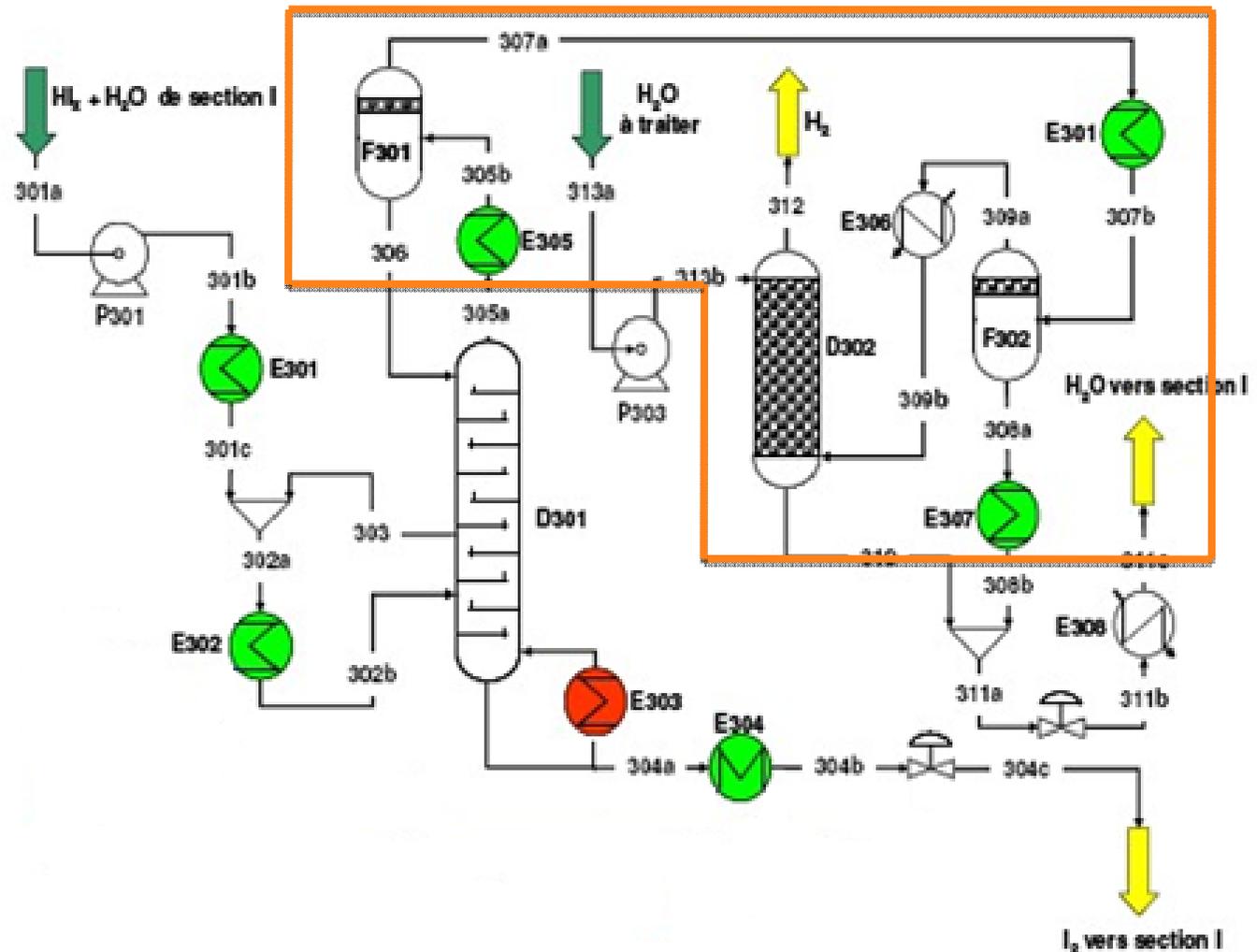


• Les principales sources d'énergie :

Montée en température de HI	135°C à 316°C	1457,5 kW
Réaction de dissociation HI	356°C	213,6 kW
Descente en température I ₂ /H ₂	287°C à 135°C	-1263,7 kW

La section « HI »

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ❑ Couplage classique du cycle IS
 - ❑ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ❑ Application au couplage du cycle IS
- ❑ Conclusions et perspectives



Analyse du risque hydrogène

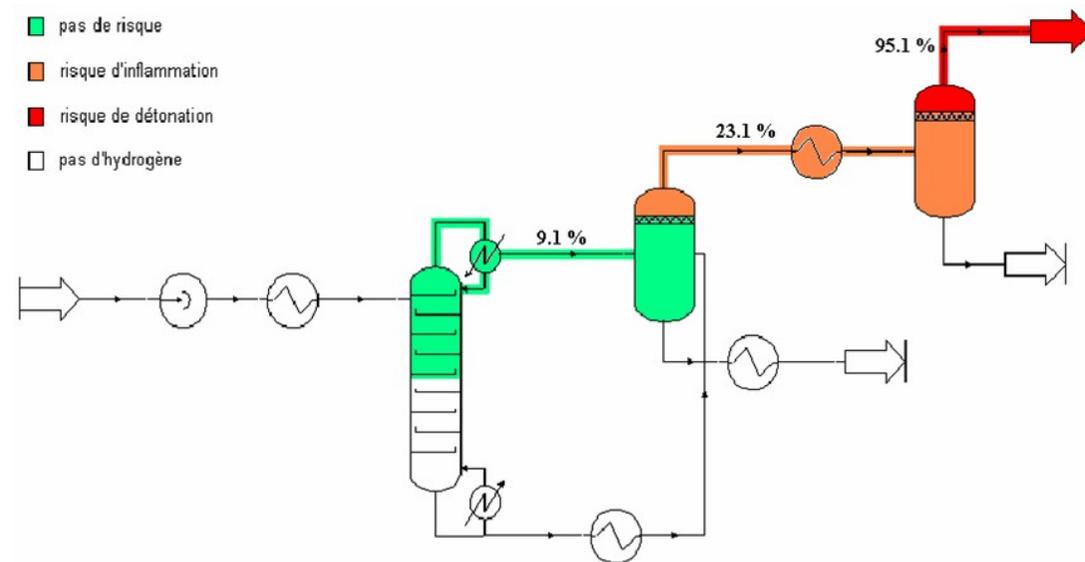
- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

17

6 janvier 2011

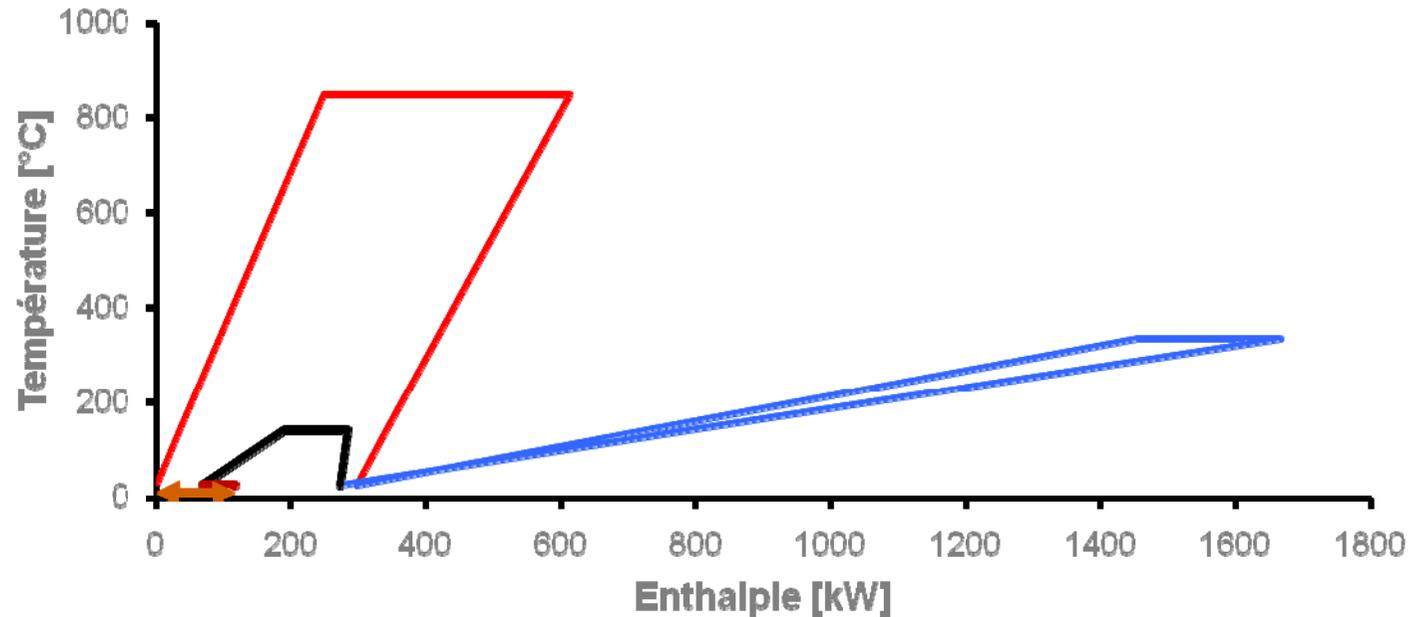
Nancy

- Section "HI" seule localisation de l'hydrogène
- Risque évoluant avec la concentration en H_2



➤ **Séparation à température ambiante sans apport d'énergie**

Le bilan énergétique



• Bilan énergétique du cycle :

- *Energie thermo-mécanique BESOINS* : 49,8 kW
- Chaleur nécessaire chauffage : 1994,1 kW
- Chaleur de refroidissement nécessaire: -1926,4 kW
- **Erreur de « bouclage » 8%**

➤ **Rendement brut :** **14,0 %**

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

18

6 janvier 2011

Nancy

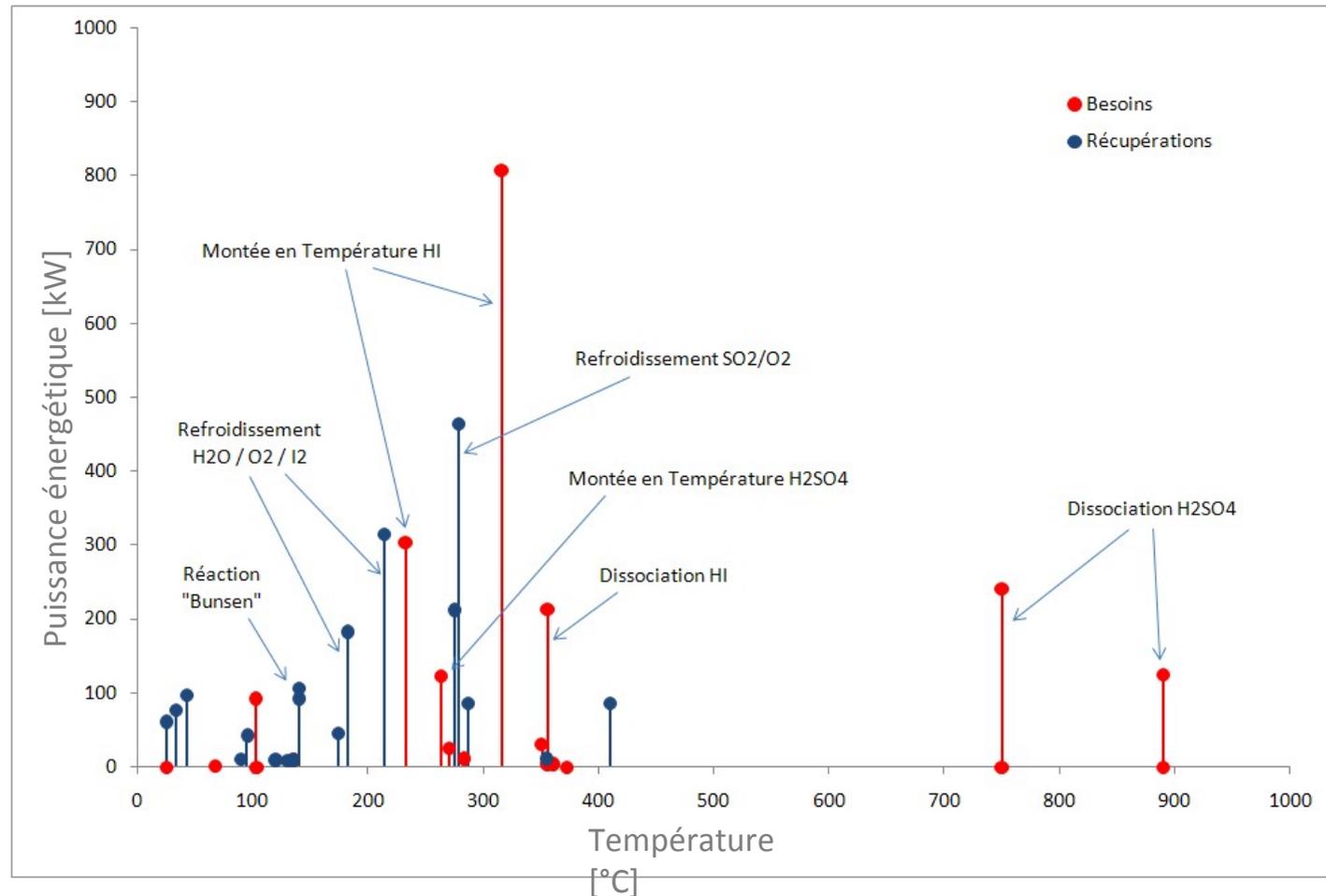
Répartition des puissances énergétiques

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ❑ Couplage classique du cycle IS
 - ❑ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ❑ Application au couplage du cycle IS
- ❑ Conclusions et perspectives

19

6 janvier 2011

Nancy



➤ Une répartition inégale de l'énergie

➤ En température

– de 25°C à 890°C

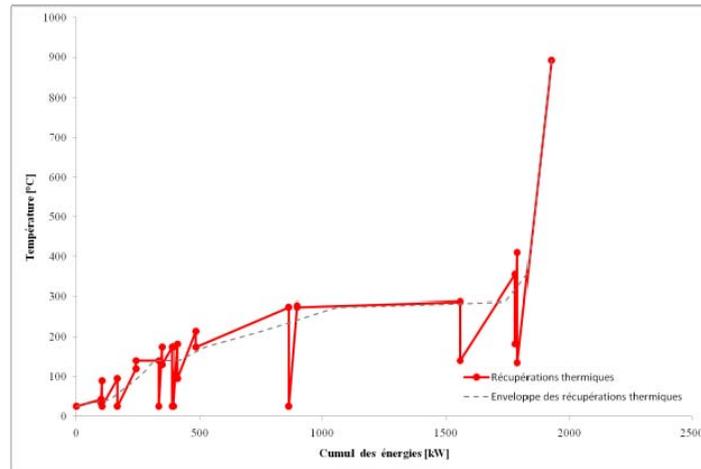
➤ En puissance

– jusqu'à 778kW à 316°C

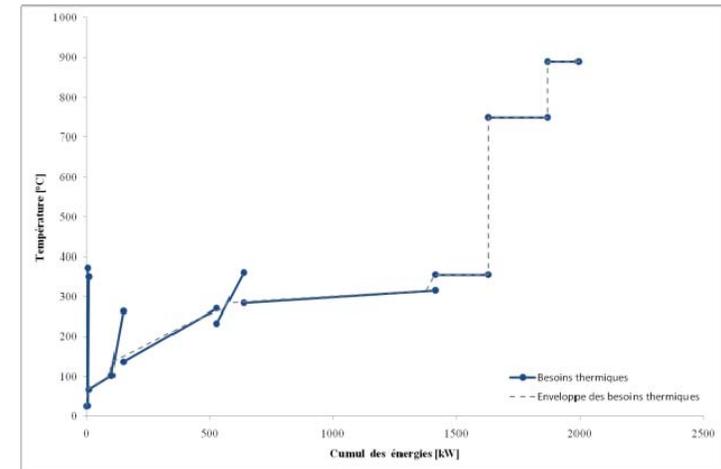
Démarche de calcul

Basée sur la méthode des pincements

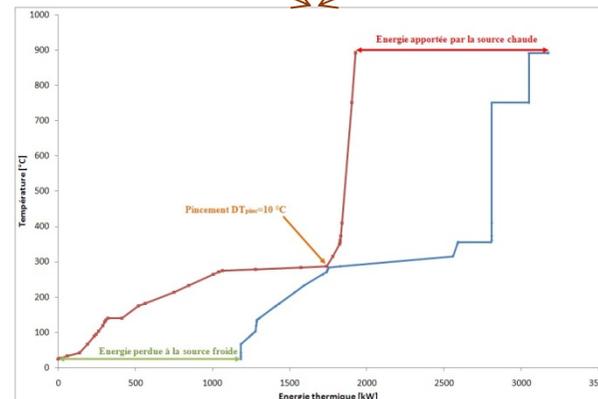
Courbe des disponibilités



Courbe des besoins



Pincement choisi de 10°C



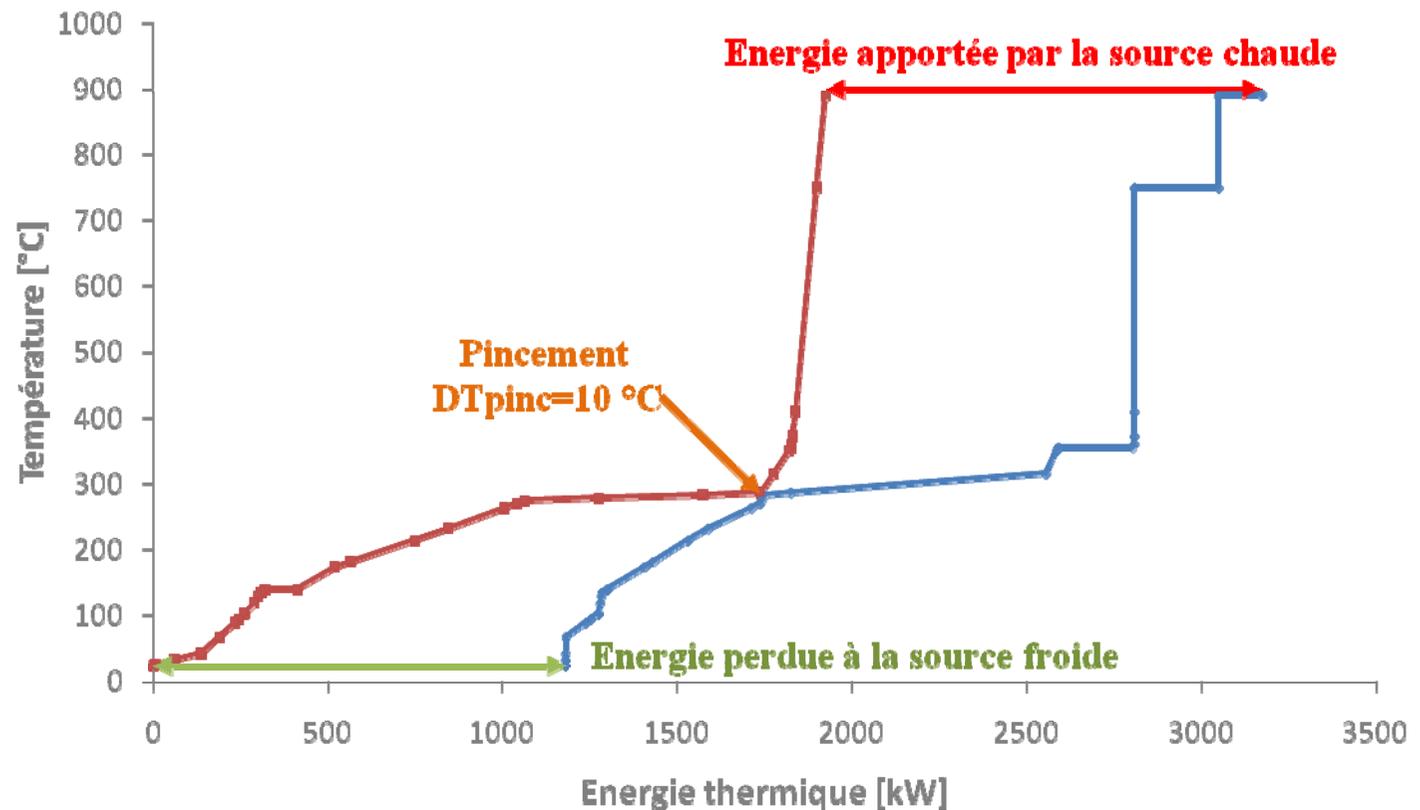
- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique de moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

20

6 janvier 2011

Nancy

Bilan énergétique et rendement



- *Energie thermo-mécanique :* 49,8 kW
- *Energie thermique distribuée :* 1249,2 kW

➤ **Rendement de production d'hydrogène : 22,0 %**

- Augmentation de 33% grâce à récupération de l'énergie
- Limité par les paliers de température autour du Pincement

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermo-chimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

21

6 janvier 2011

Nancy

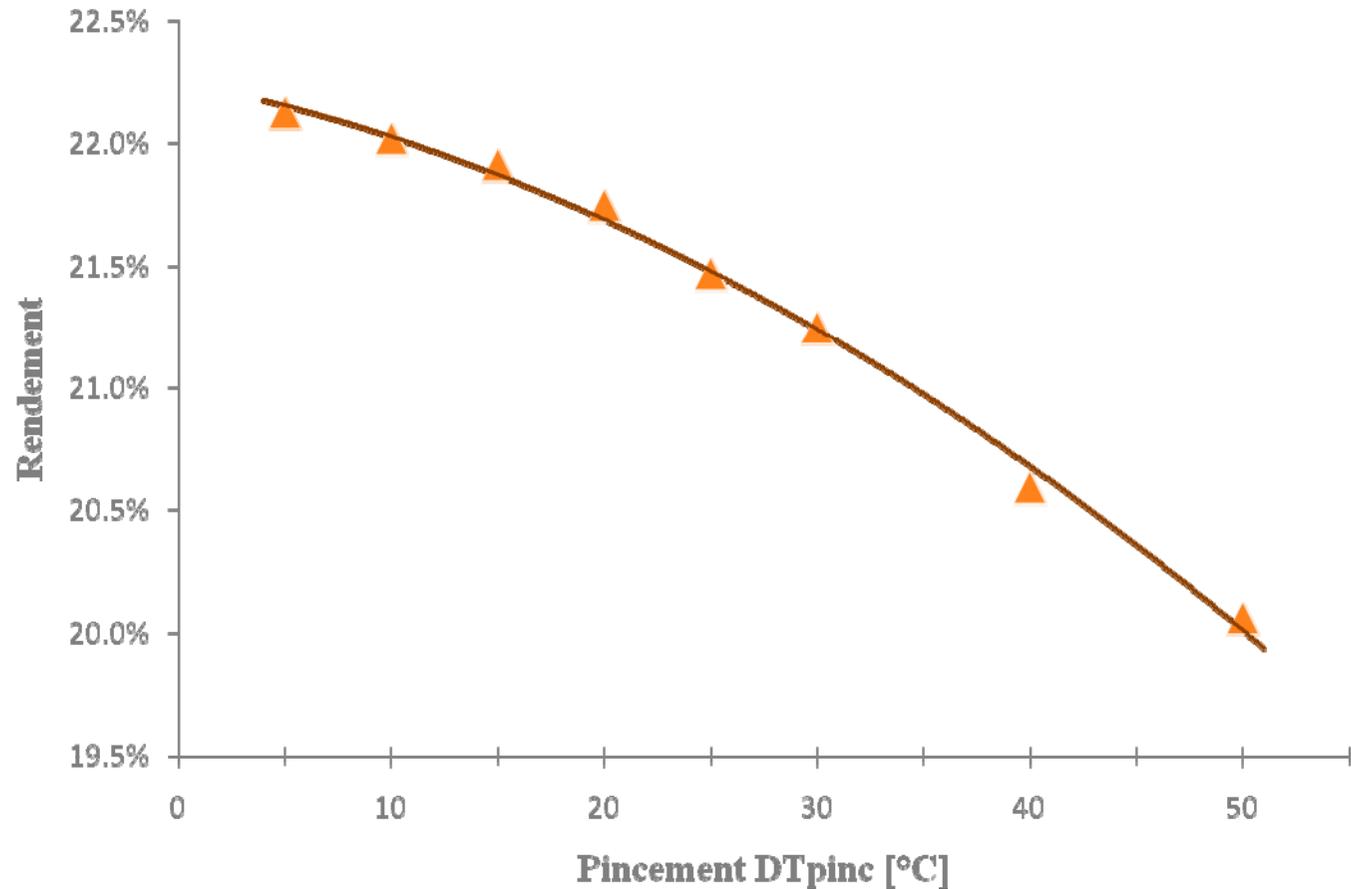
- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

22

6 janvier 2011

Nancy

Etude de l'influence du pincement sur le rendement énergétique



➤ Le pincement a peu d'influence sur le rendement de production d'hydrogène

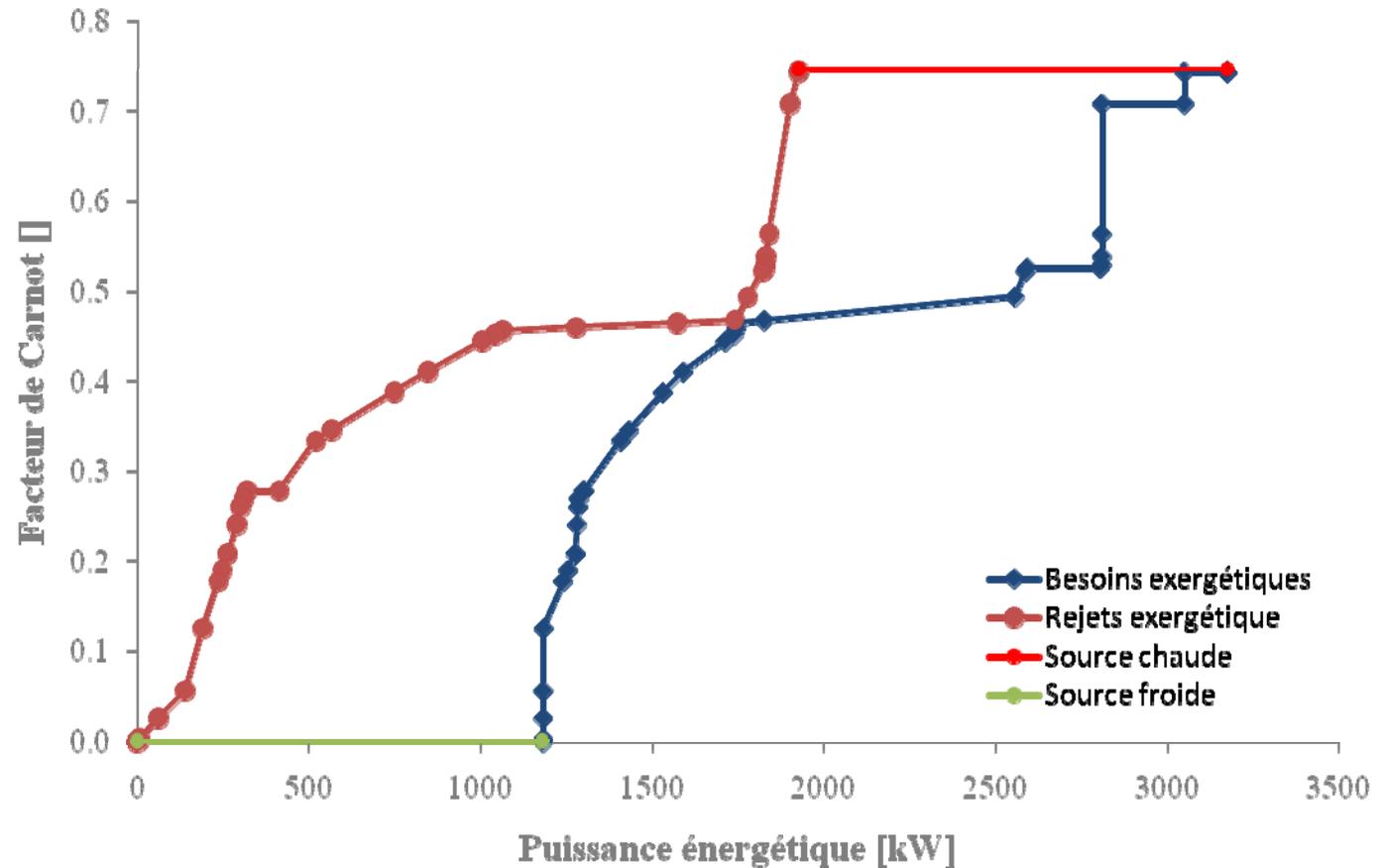
- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - ☐ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ☐ Application au couplage du cycle IS
- ☐ Conclusions et perspectives

23

6 janvier 2011

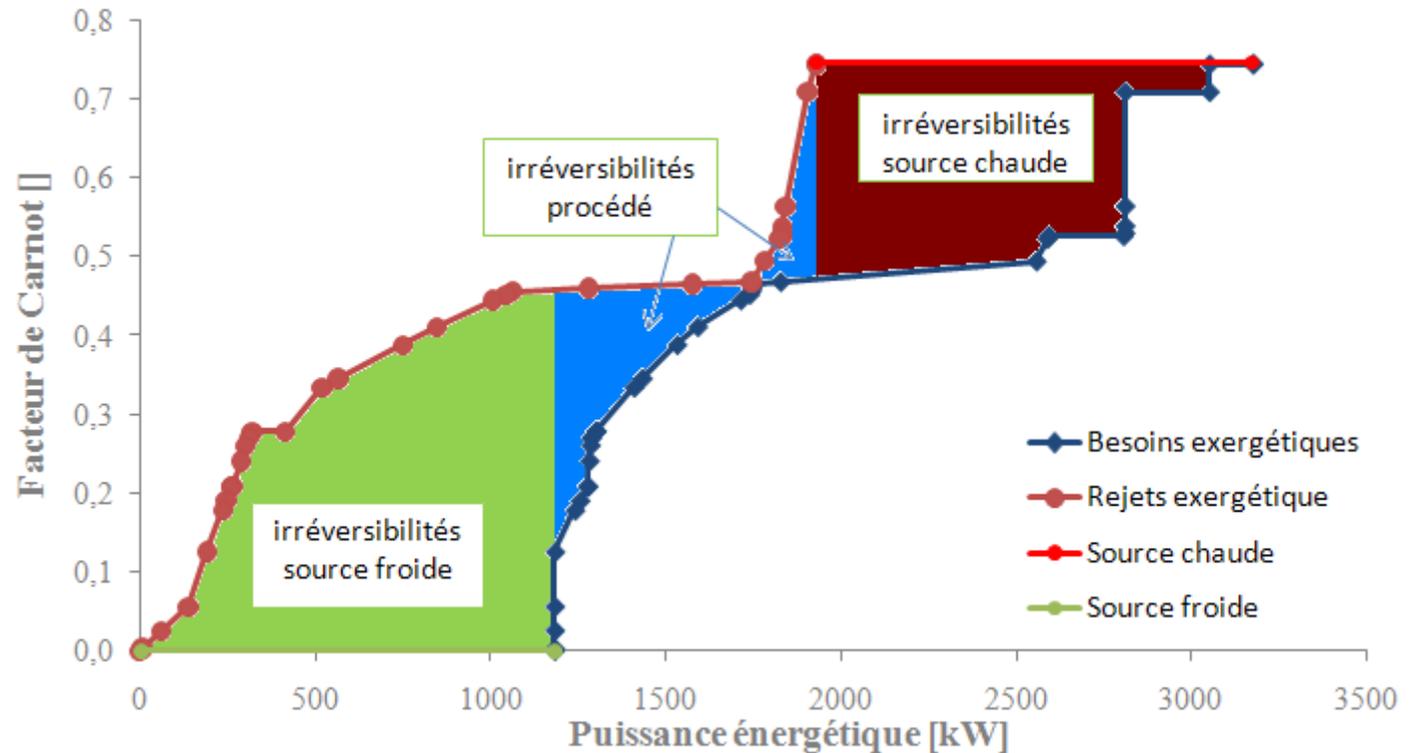
Nancy

Détermination des irréversibilités



- Exergie :
 - Aire sous la courbe
- Irréversibilité = pertes exergétiques :
 - Différences entre les courbes

Bilan irréversibilités

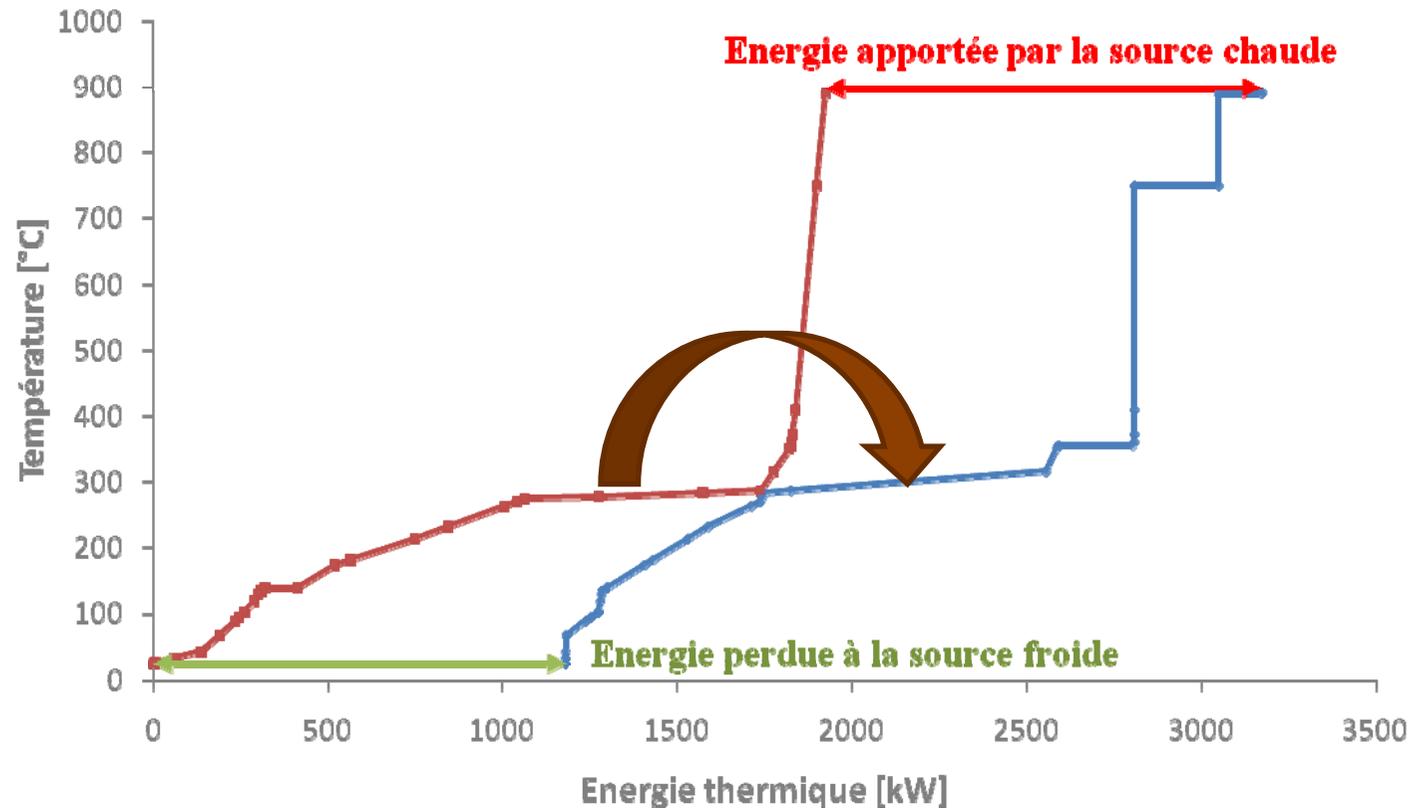


Irréversibilité à la source chaude	230,9 kW
Irréversibilité à la source froide	309,6 kW
Irréversibilité des échanges avec le procédé IS	144,7 kW

Rendement exergétique : 58,7%

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

Placement et intégration d'une « utilité »



• Les caractéristiques choisies :

Température des besoins énergétiques	316°C
Besoins énergétiques	766,3 kW
Température des disponibilités énergétiques	275°C
Energie disponible	653,0 kW

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - ✓ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ✓ Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

25

6 janvier 2011

Nancy

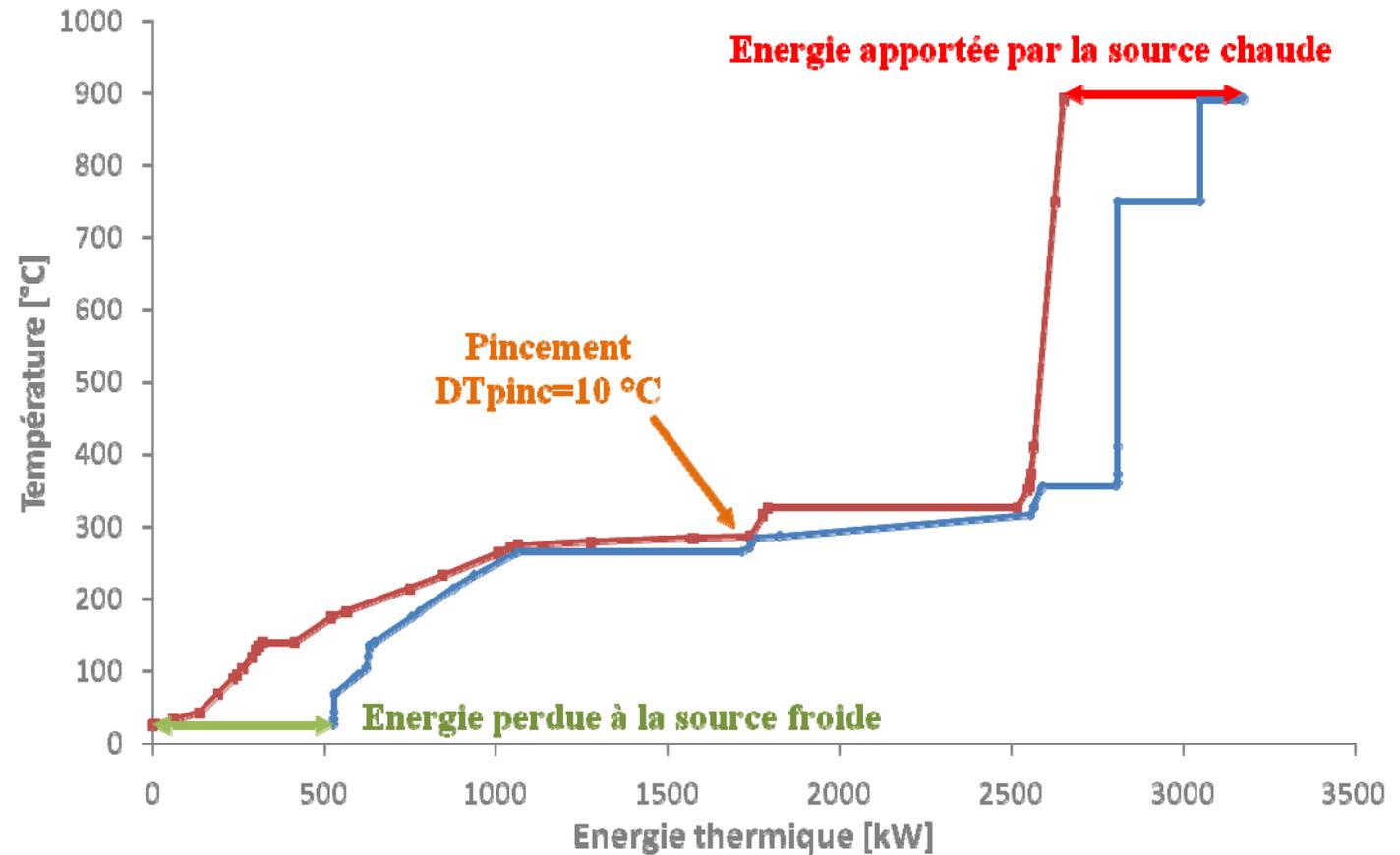
Bilan énergétique et rendement

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermo-chimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - ✓ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ✓ Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

26

6 janvier 2011

Nancy



- *Energie thermo-mécanique :* 49,8 kW
- *Energie thermique distribuée :* 522,1 kW
- *Energie thermique pour le CM-PAC :* 99,3 kW
- **Rendement de production d'hydrogène :** **42,6 %**

Le rendement exergetique

- Evaluation qualitative de l'efficacité d'un système

$$\eta_{ex} = \frac{Ex_S}{Ex_E}$$

η_{ex} : **85,35 %** +45%

➤ Evaluation des irréversibilités :

Calcul et graphique donnent des valeurs quasi identiques.

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ **Etude préliminaire pour le couplage**
 - ✓ Rendement énergétique et exergetique
 - Remarques de sûreté du couplage
- Etude du couplage
- Conclusions et perspectives

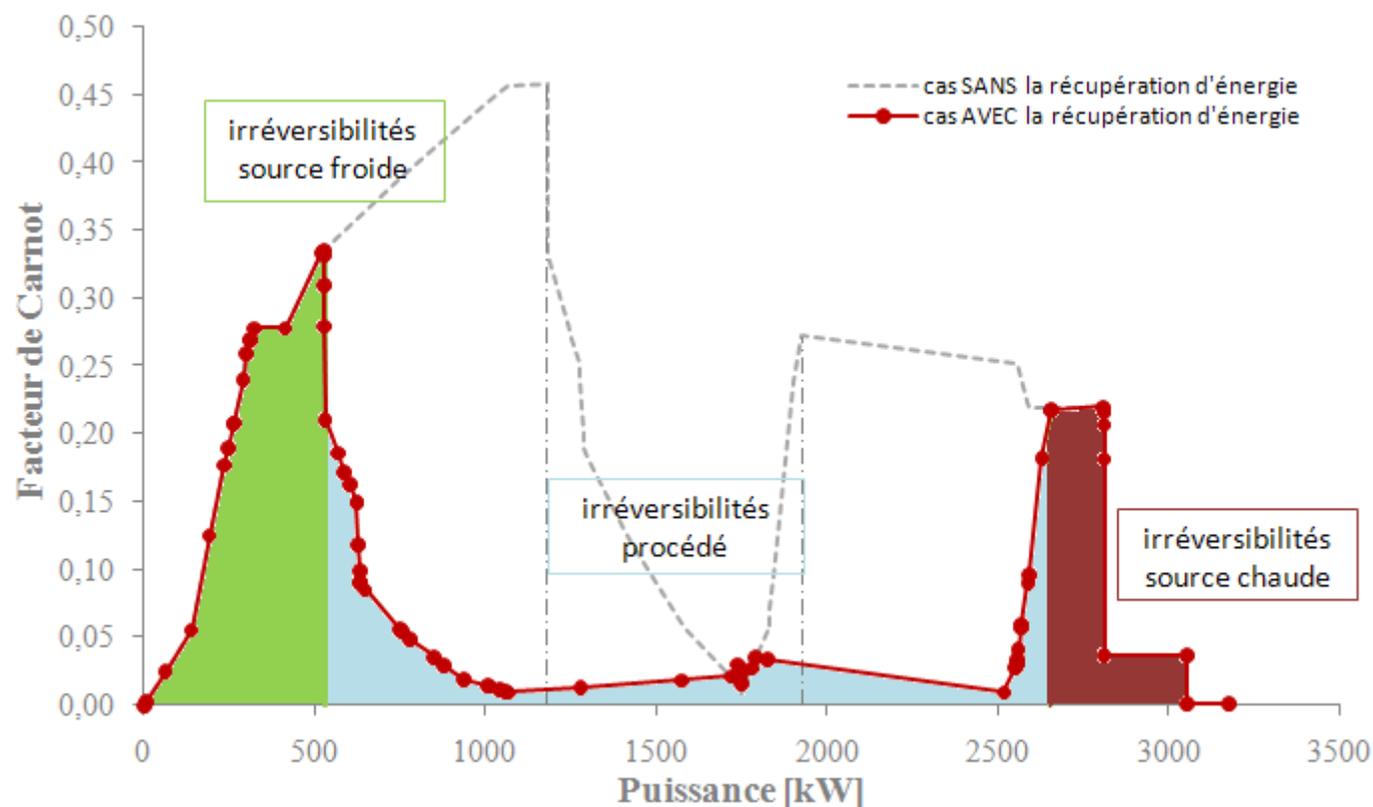
Bilan exergétique

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - ✓ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ✓ Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

28

6 janvier 2011

Nancy



Irréversibilité à la source chaude	43,6 kW	-81,1 %
Irréversibilité à la source froide	93,4 kW	-68,8 %
Irréversibilité avec le procédé IS	80,6 kW	-44,3 %
TOTAL DES IRREVERSIBILITES	217,6 kW	-68,3 %

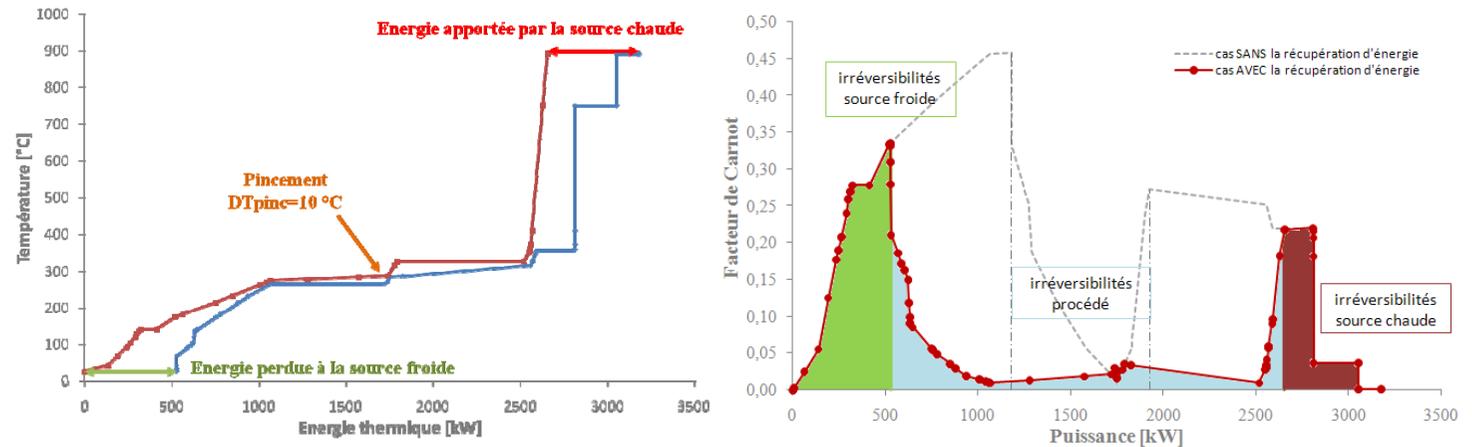
Discussion

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - ✓ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ✓ Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

29

6 janvier 2011

Nancy



- Un rendement énergétique augmenté de 93%
- Un rendement exergétique augmenté de 45%
- **Récupération de l'énergie efficace mais il reste encore de l'énergie à revaloriser**

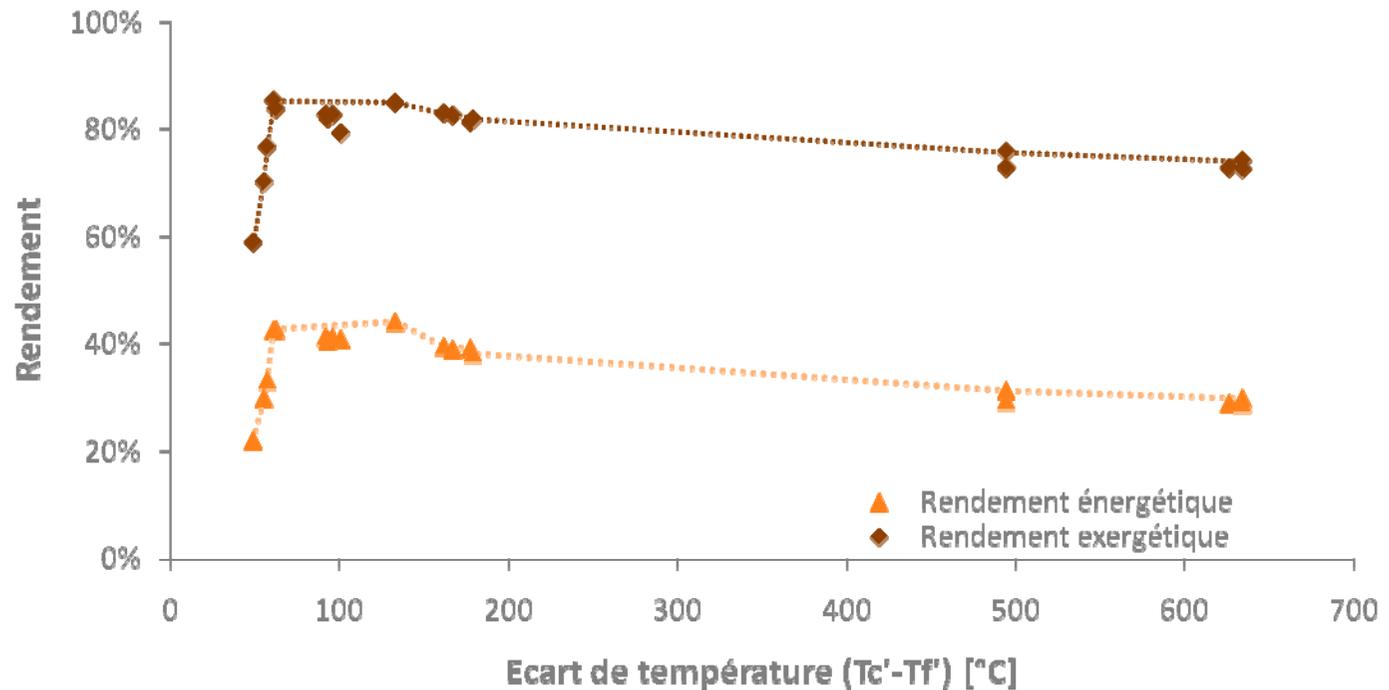
- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - ✓ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ✓ Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives

30

6 janvier 2011

Nancy

Influence du niveau de température de la PAC

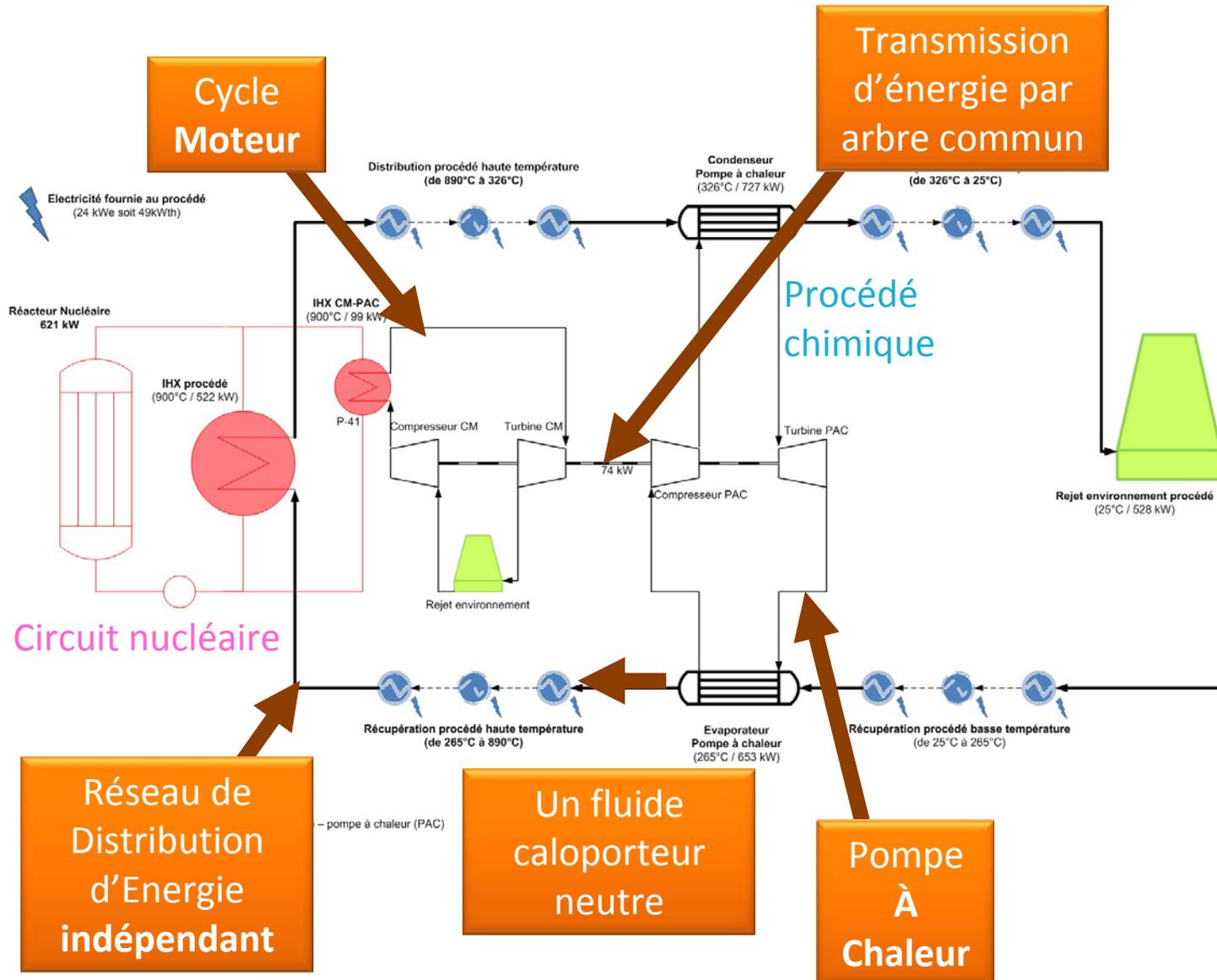


- Deux effets en concurrence :
 - La quantité d'énergie récupérée
 - Le rendement de l'association de cycle CM-PAC

➤ **L'association CM-PAC a un intérêt sur le rendement maximisé**

Schéma final du couplage

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ **Etude du couplage**
 - ✓ Présentation du cycle thermochimique IS
 - ✓ Couplage classique du cycle IS
 - ✓ Association d'un cycle thermodynamique moteur et d'une pompe à chaleur
 - ✓ Application au couplage du cycle IS
- Conclusions et perspectives



Conclusions

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
- ✓ **Conclusions et perspectives**

➤ Sur le couplage proposé

- Cycle thermochimique iode-soufre inégal en température et en énergie échangée : $\eta_{\text{brut}} = 14\%$
- **Mise en place un réseau de distribution d'énergie**
 $\eta_{\text{en}} = 22\%$ $\eta_{\text{ex}} = 58\%$
- **Mise en place de l'association de cycle CM-PAC**
 $\eta_{\text{en}} = 42\%$ $\eta_{\text{ex}} = 87\%$
- Amélioration du rendement de production d' H_2
- Récupération de l'énergie optimisée
- Diminution des irréversibilités

Conclusions

- ✓ Une problématique énergétique
- ✓ Sujet de l'étude
- ✓ Etude préliminaire pour le couplage
- ✓ Etude du couplage
- ✓ **Conclusions et perspectives**

- **Équilibre et enthalpie des réactions "iode-soufre"**
 - Un modèle thermodynamique à développer
- **Sur les remarques de sûreté**
 - Utilisation d'un réseau de distribution d'énergie spécifique
 - Un fluide caloporteur neutre
 - Une production d'H₂ localisée dans une partie du procédé à température ambiante