



Colloque PI Energie 2 – CNRS Nantes, Novembre 2009



VALOTHERM

Evaluation comparative des technologies de transport d'énergie
à longue distance pour la revalorisation de rejets thermiques

PR3.3-12

Nathalie MAZET
Driss STITOU
Pierre NEVEU

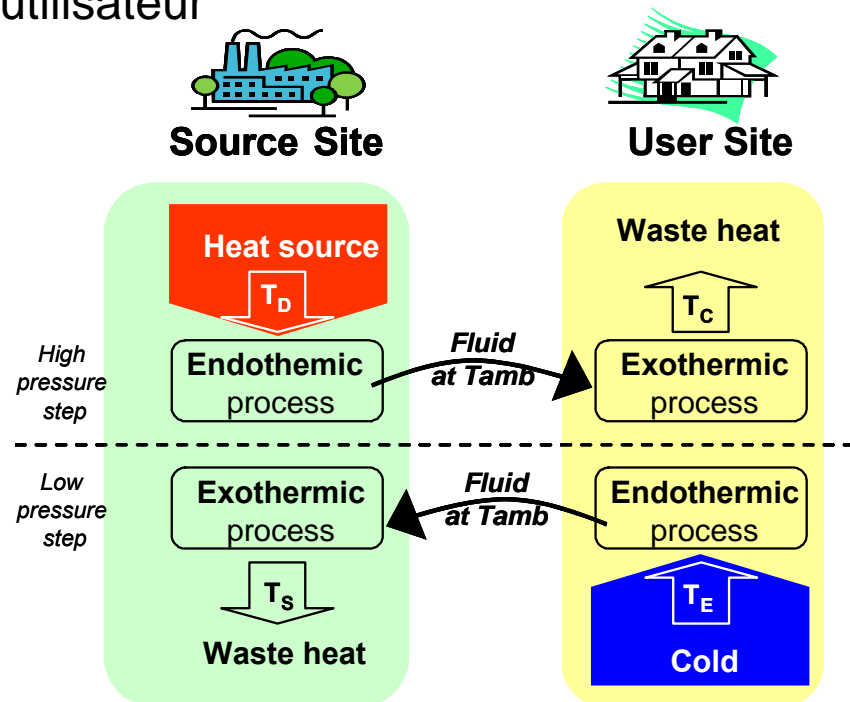


Lingai LUO
Nolwenn LE PIERRES



Valotherm : CONTEXTE

- ❖ **Valorisation de l'énorme gisement énergétique lié aux rejets thermiques**, mais dont les utilisateurs potentiels (chauffage urbain...) sont à une distance importante (> 10 kms) => Verrou : Transport de chaleur à longue distance
- ❖ **Solution envisagée** : Transport d'un fluide réactif, à T_{amb} , impliqué dans 2 processus thermochimiques **renversables** (sorption, changement d'état..), côtés source et utilisateur



- ❖ **Cascade de plusieurs procédés thermochimiques**
=> gamme élargie de T opératoires, amélioration des efficacités

Valotherm : OBJECTIFS

❖ **Affiner l'évaluation de ces procédés**

- en particulier des cascades
- à sorption solide/gaz et liquide/gaz

❖ **Comparer les performances**

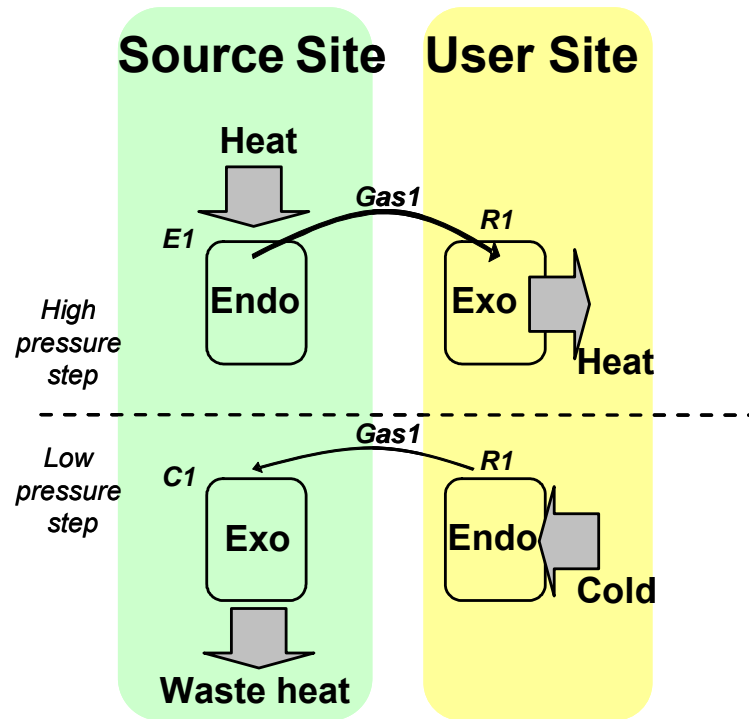
des procédés de transport d'énergie à longue distance
incluant procédés classiques par chaleur sensible, électricité+PAC

❖ **Définir la gamme de pertinence de chacun selon :**

- températures des utilités produites (froid, chaud)
- températures des sources requises
- densités énergétiques,
- configuration et distance de transport ...

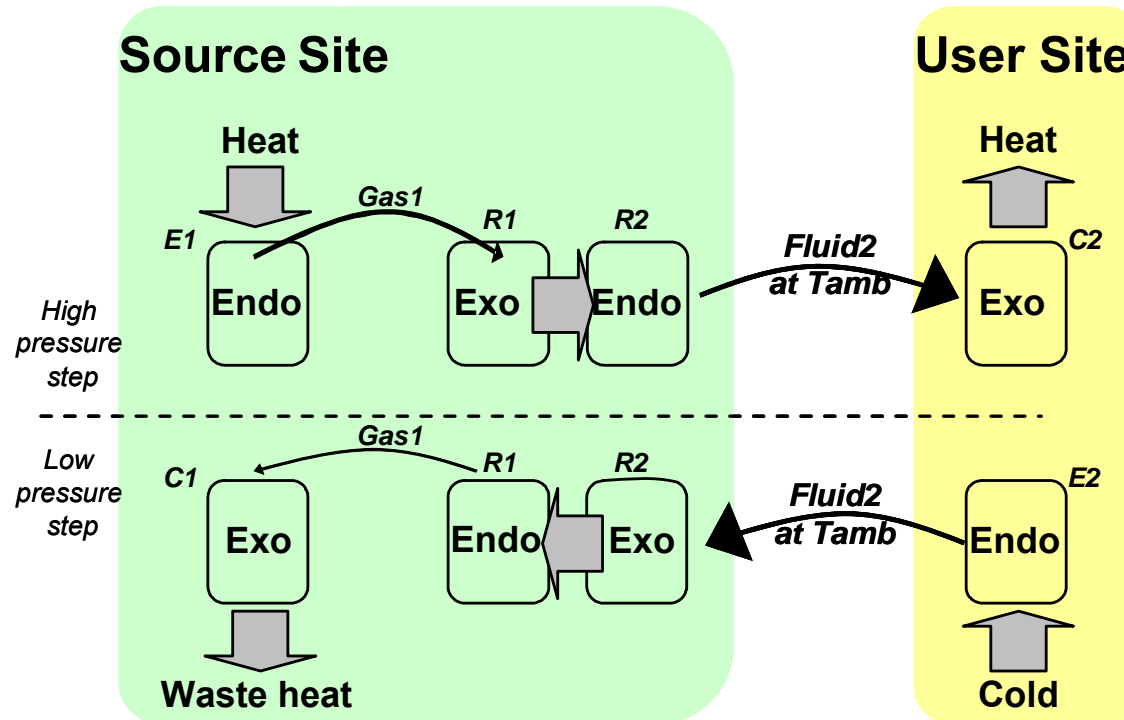
CASCADES de systèmes à SORPTION

=> permet d'adapter les températures de sources chaudes et froides



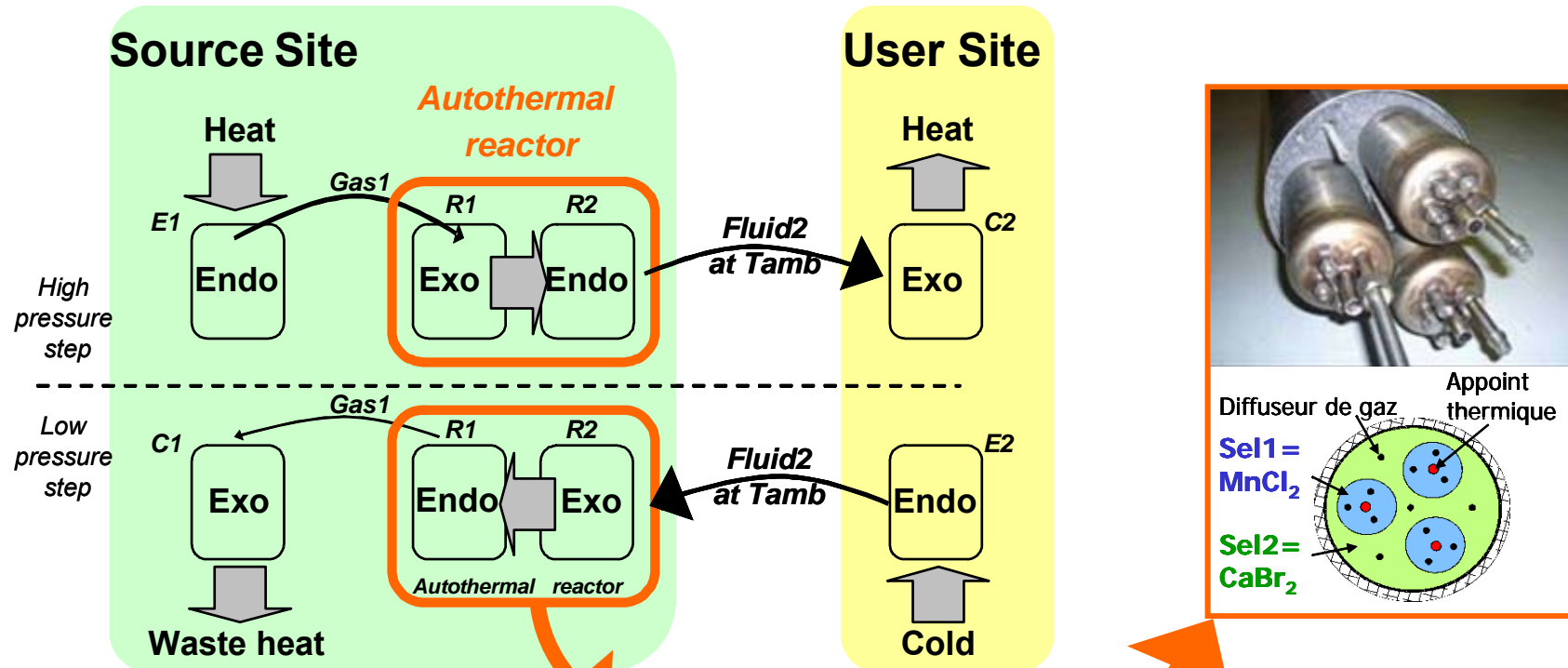
Cascades de systèmes à sorption

=> permet d'adapter les températures de sources chaudes et froides



CASCADE à SORPTION SOLIDE/GAZ

=> permet d'adapter les températures de sources chaudes et froides

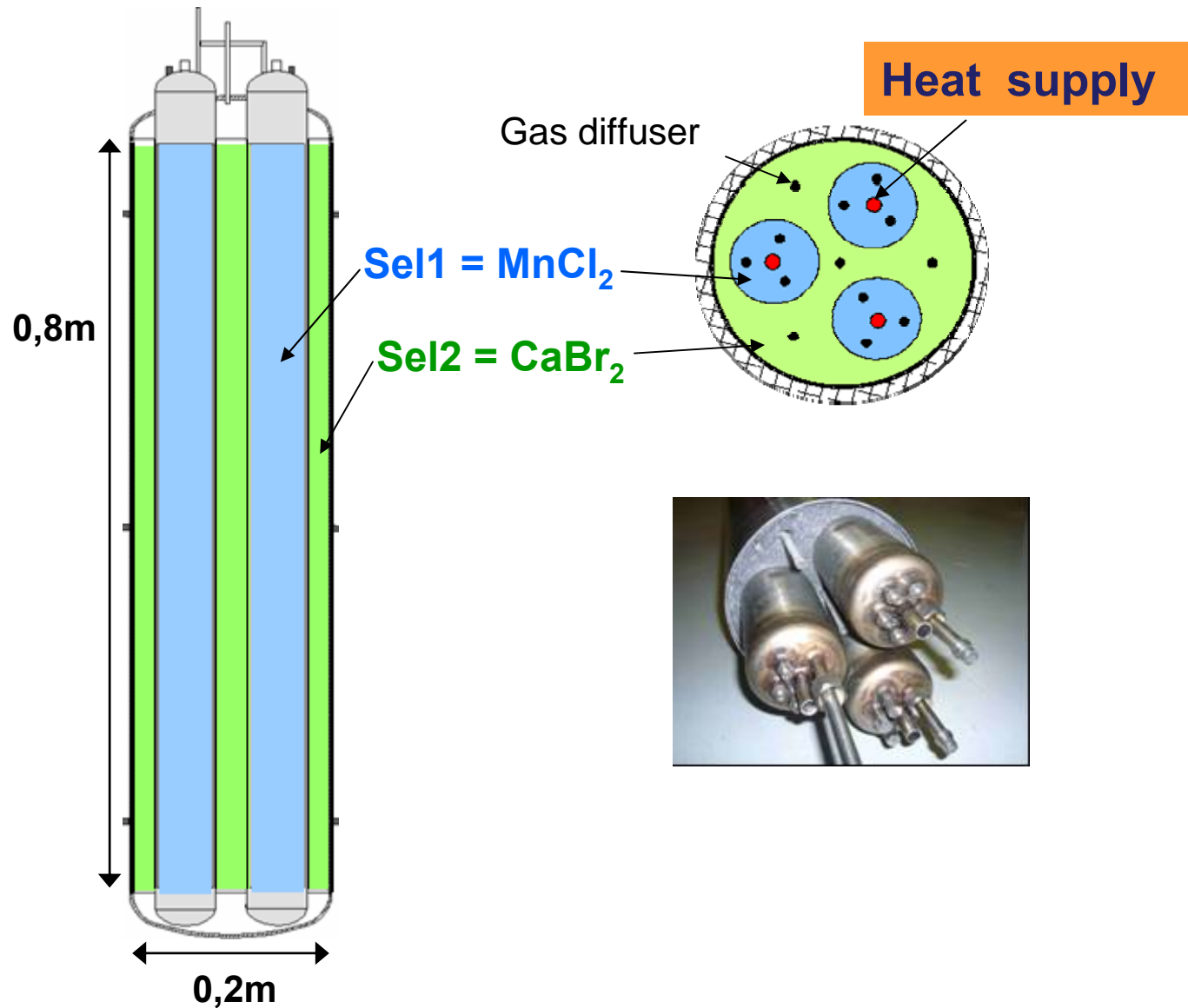


**Élément clé =
Co-réacteur S/G**

Co-réacteur solide -gaz :

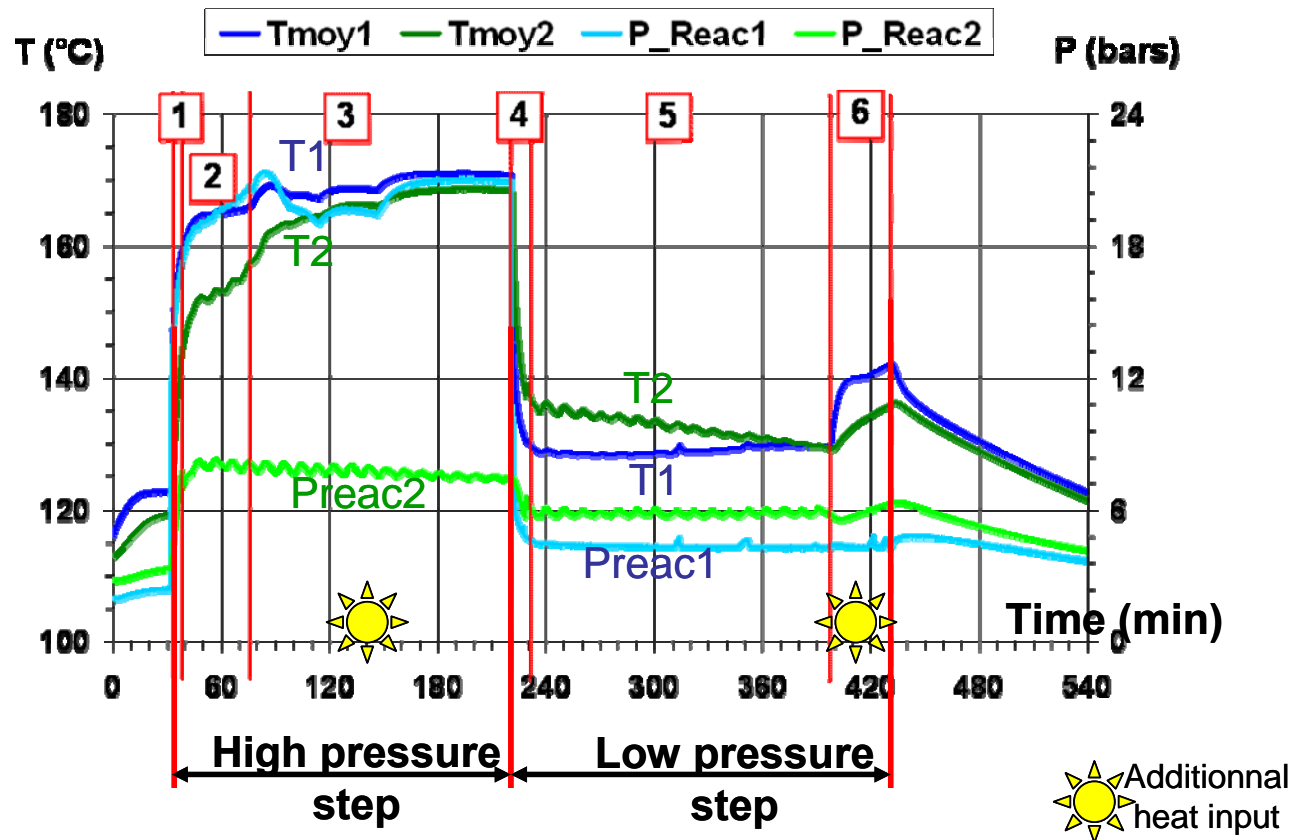
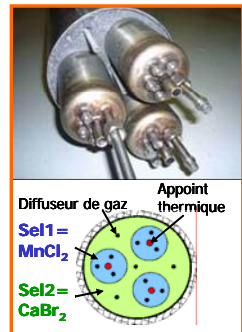
- **Fonctionnement idéal** : autotherme
- **Théorique** : écart à l'autothermicité ~ 7 à 10%
(dû à la dissymétrie des chaleurs sensibles en jeu dans le cycle)

Co-réacteur autotherme expérimental



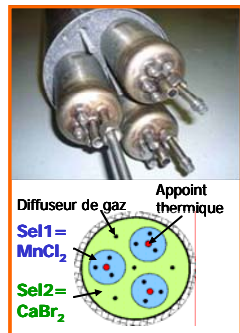
Fonctionnement cyclique expérimental

Temperature/Pressure of each reactant during a working cycle

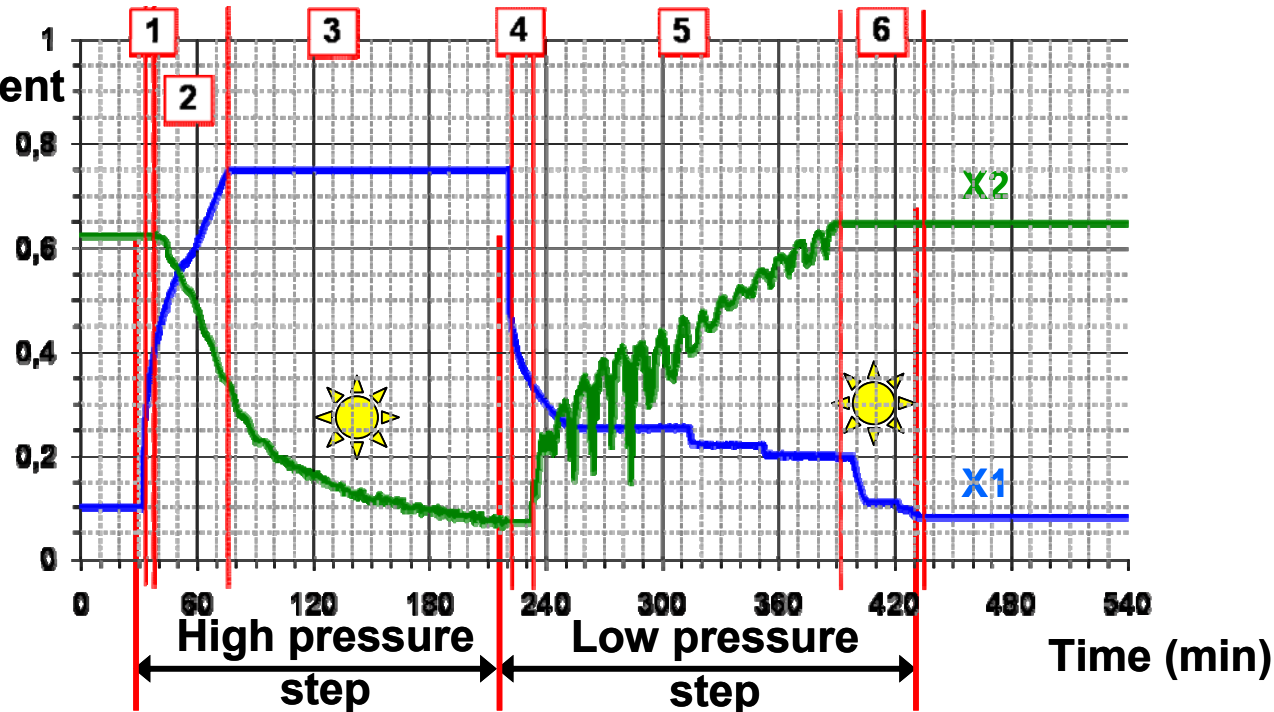


Cyclage très satisfaisant des 2 éléments du co-réacteur (sel1 moteur pour les 2 phases du cycle)

Fonctionnement cyclique expérimental



Reaction advancement



1 intermediate phase
2 reactive phase
3 Additional heat input phase

4 intermediate phase
5 reactive phase
6 Additional heat input phase

= Additional heat input



Durées de réaction expérimentales bcp plus importantes que prévu (temps de cycle : 7h vs 2h) amplifiant l'impact des pertes thermiques .

Co-réacteur solide-gaz expérimental

❖ Ecart à l'autothermicité expérimental notable :

~ 20%

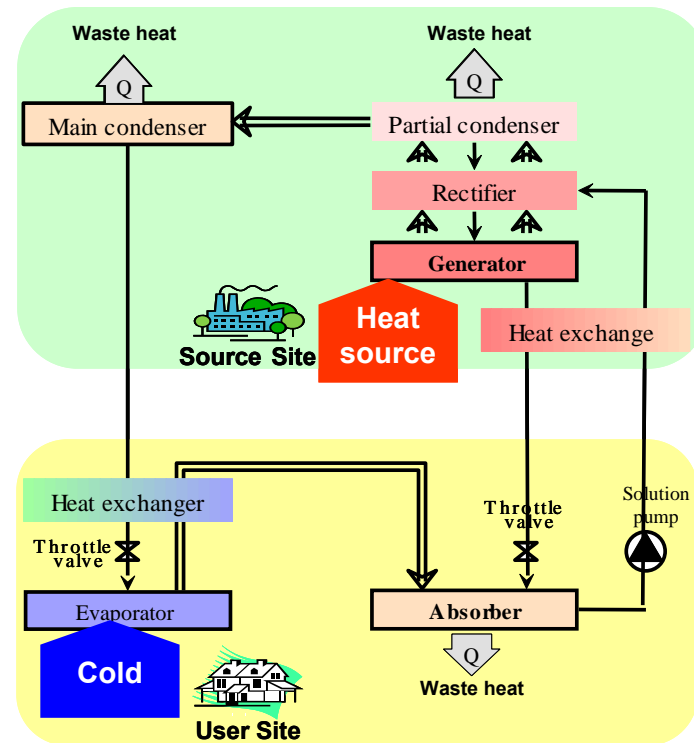
< 10% théoriquement

❖ Solutions :

- Conception à améliorer pour réduire l'écart à l'autothermicité (constructale?)
- Apport externe
- Récupération de chaleur entre gaz entrant et sortant.
- Utilisation de la source Haute T pour le co-réacteur en phase basse pression (qd $T_{\text{autotherme}} < T_{\text{source}}$)

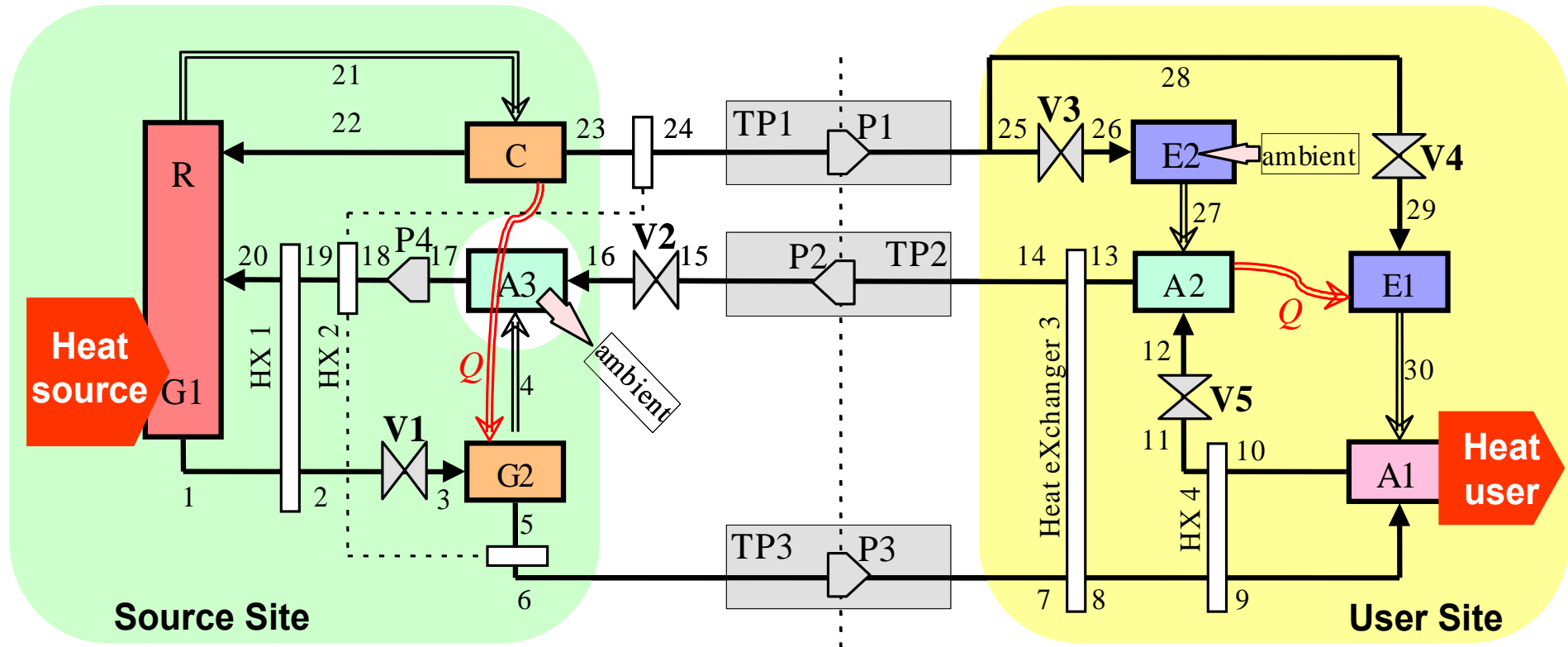
ABSORPTION LIQUIDE / GAZ

- ❖ **Cycle simple–effet adapté au transport d'énergie thermique à longue distance :**
Transport de 3 fluides,
sous forme de liquide et non de gaz

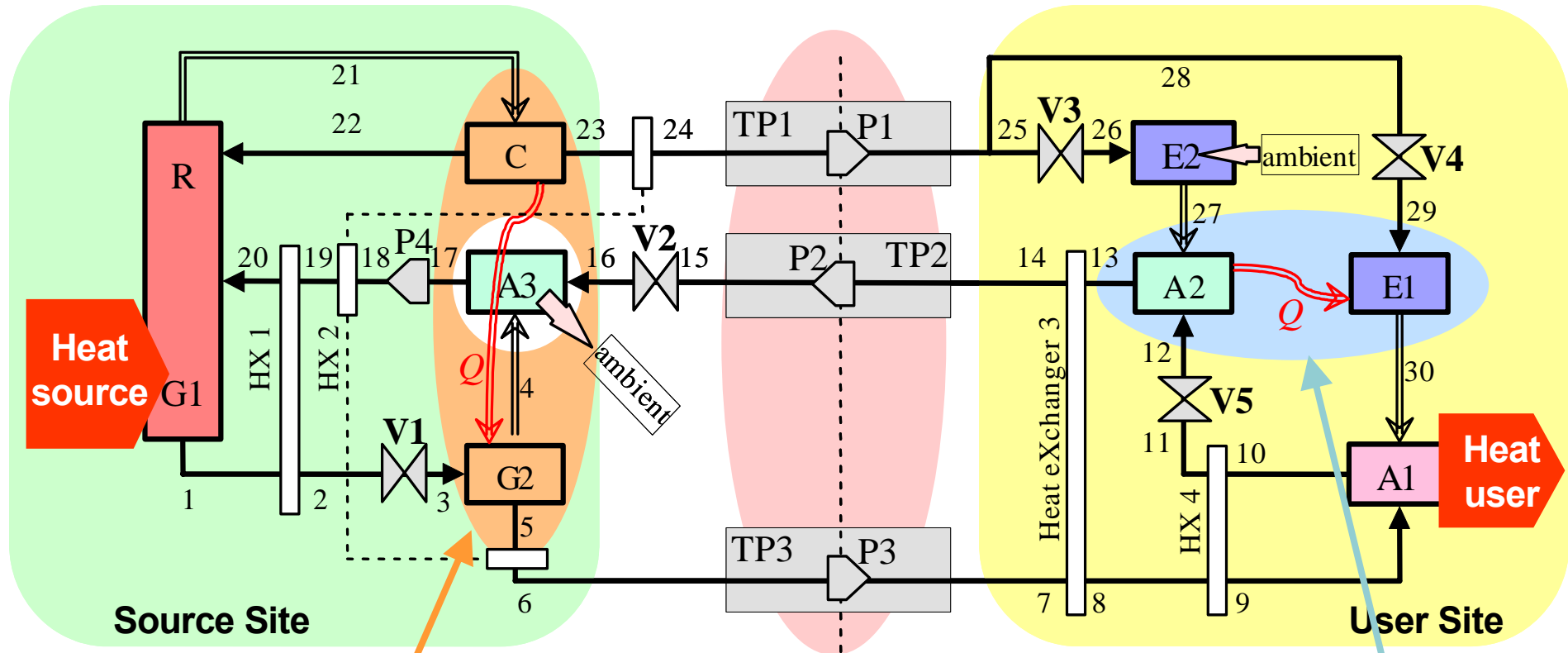


- ❖ **Analyse de 9 cycles** , du cycle simple effet au cycle hybride
-> déterminer la faisabilité d'un transport de chaleur basse température à longue distance par ces systèmes
- ❖ **Critères**
 - Fluides transportés sous forme liquide
 - Couple: $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$
 - Fonctionnement possible en chauffage et rafraîchissement
 - Pas de source secondaire

Absorption L/G: nouveau cycle innovant

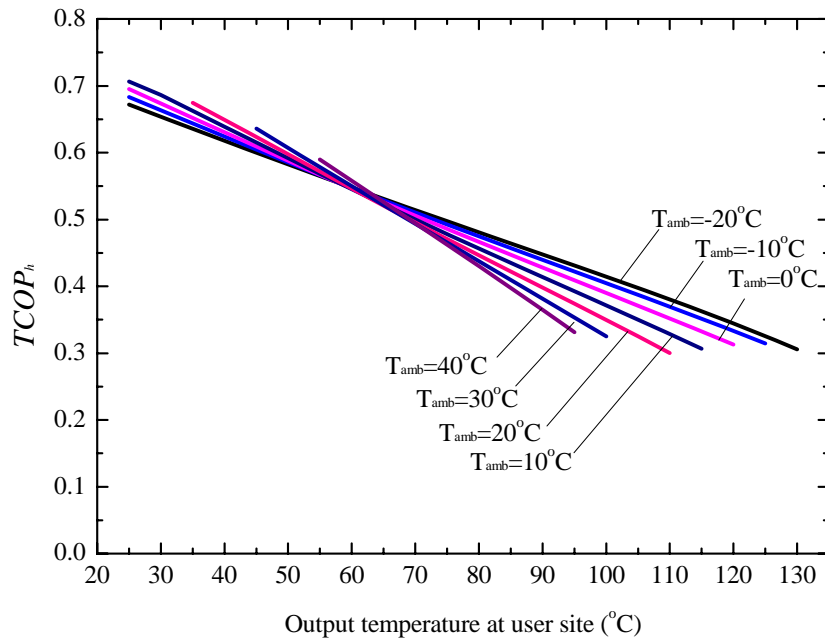


Absorption L/G: nouveau cycle innovant



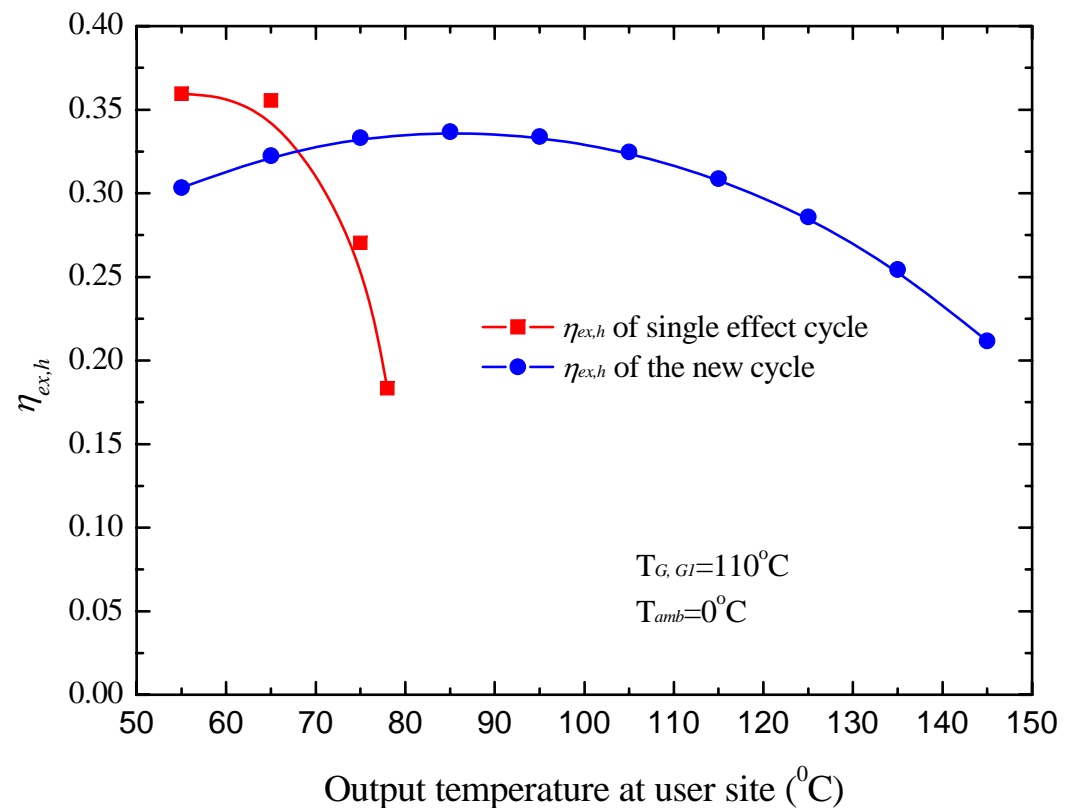
1. Récupération interne de chaleur et expansion de la solution pauvre sortant du générateur.
 2. Auto-ajustement de la concentration permettant d'éviter des problèmes de cristallisation.
 3. Pression d'absorption augmentée par une récupération interne de chaleur.
 4. 3 transports de fluides nécessaires (pas de consommation électrique supplémentaire).
- Mais... plus grande complexité que le cycle simple effet!!

Analyse du cycle innovant NH₃/H₂O et comparaison exergetique au cycle simple effet



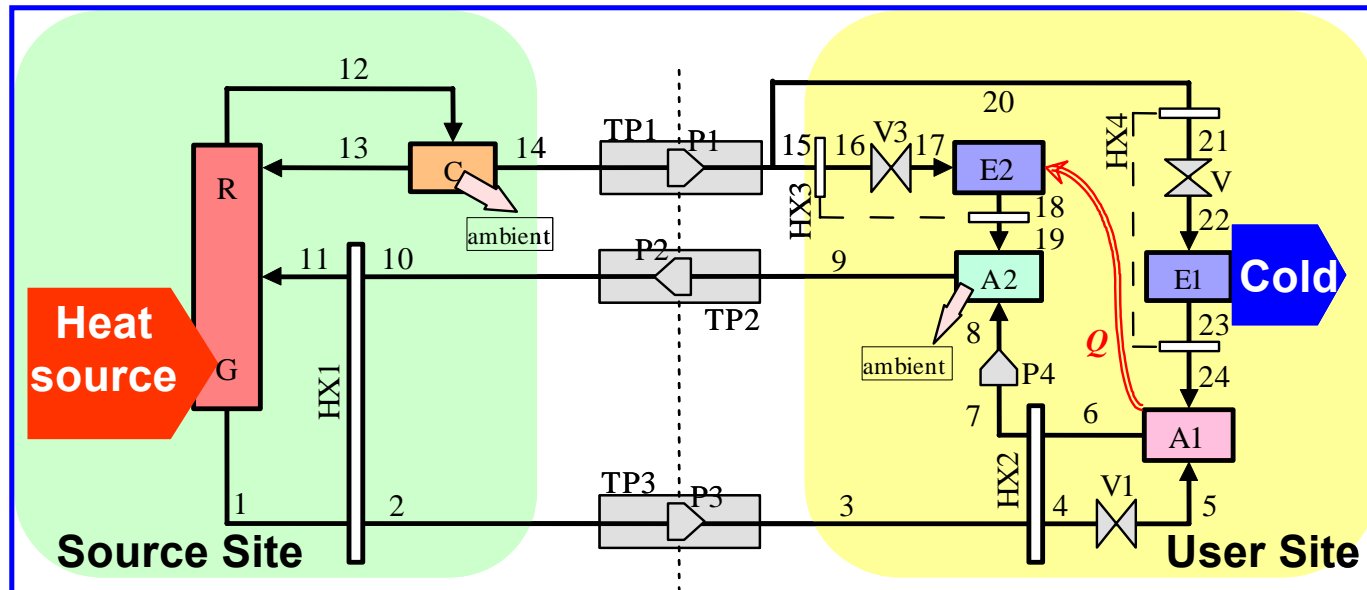
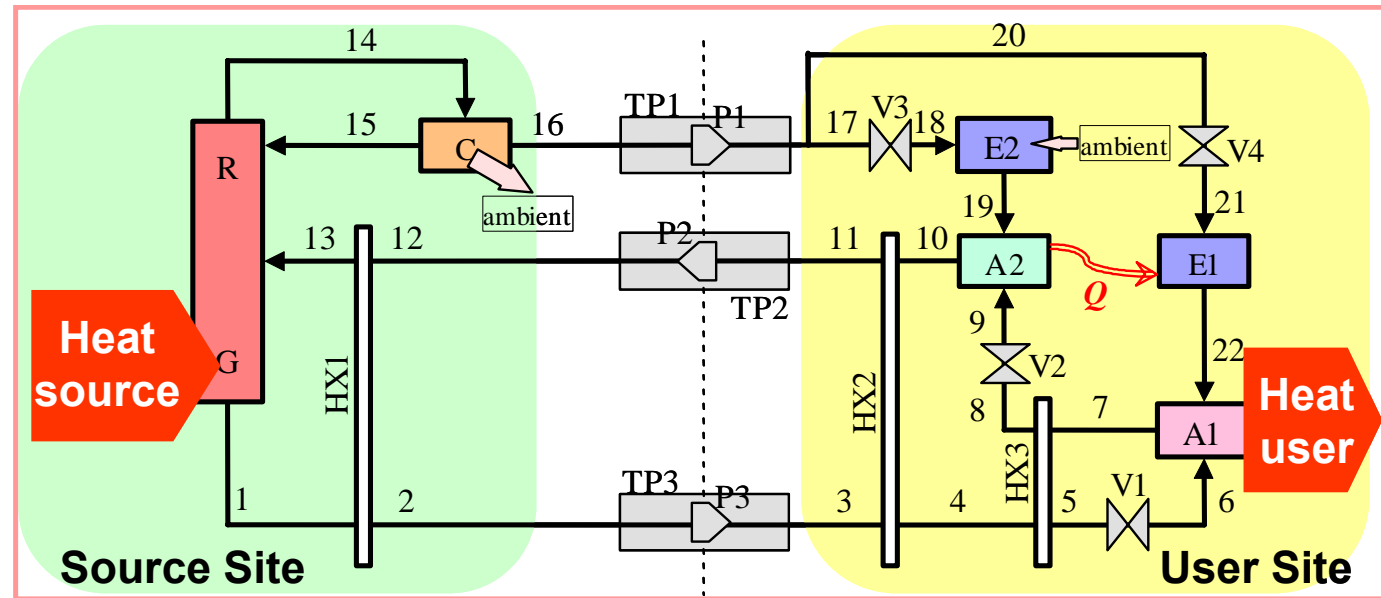
$$TCOP_h = \frac{Q_A}{Q_G}$$

$$\eta_{ex,h} = \frac{EX_A}{EX_G + W_P}$$



Formes simplifiées du cycle innovant :

Type 1
pour
production
de chaleur



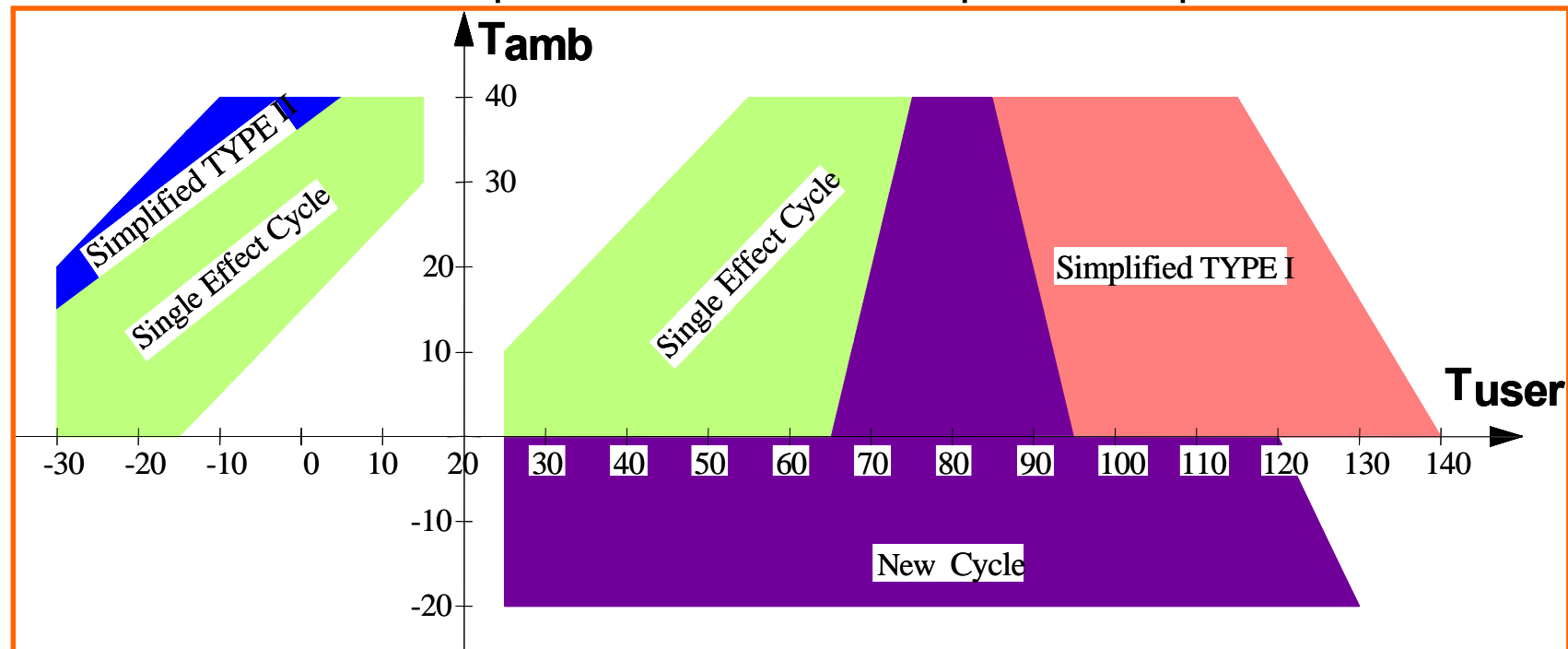
Type II
pour
production
de froid

Différents cycles possibles en fonction de l'application visée

Exemple de combinaison de cycles pour :

- une source à une température de 120°C ,
- une ambiance de -20° à 40°C ,
- une utilisation entre -30° et 140°C

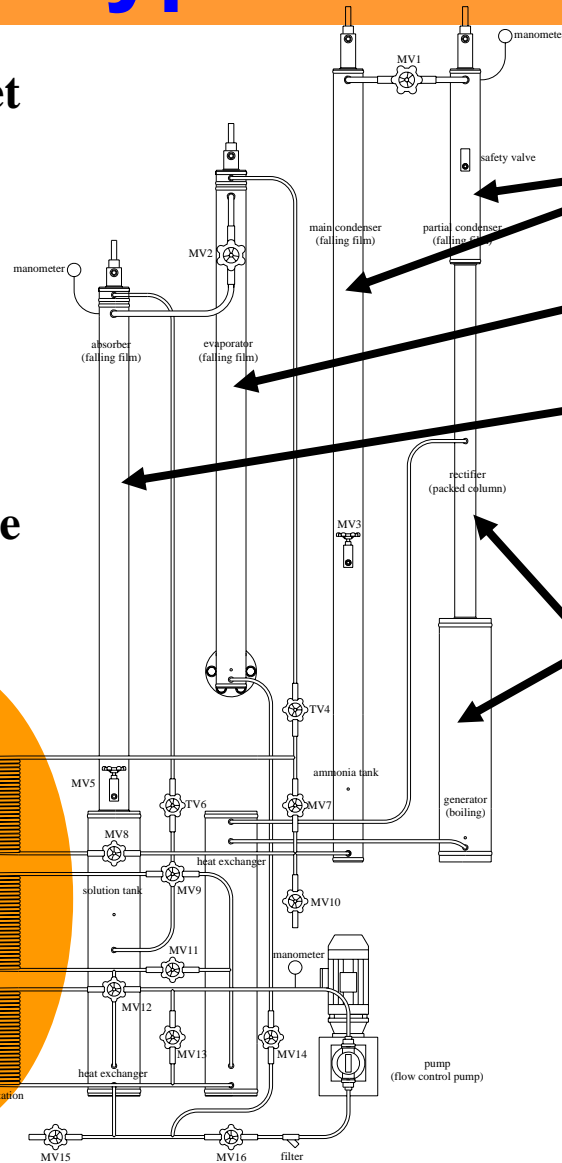
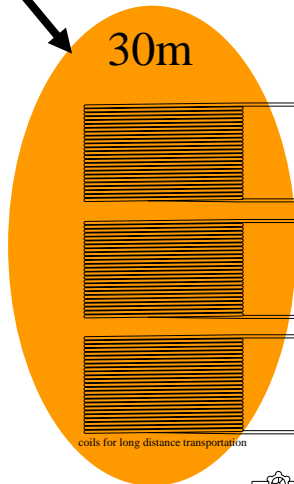
→ aire colorée pour un COP thermique théorique > 0.3 :



Perspectives: prototype en cours d'essai

Cycle simple effet
 $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, de
démonstration

Simulation du
transport à longue
distance



condenseurs

évaporateur

absorbeur (film tombant)

Générateur: 2 kW électrique

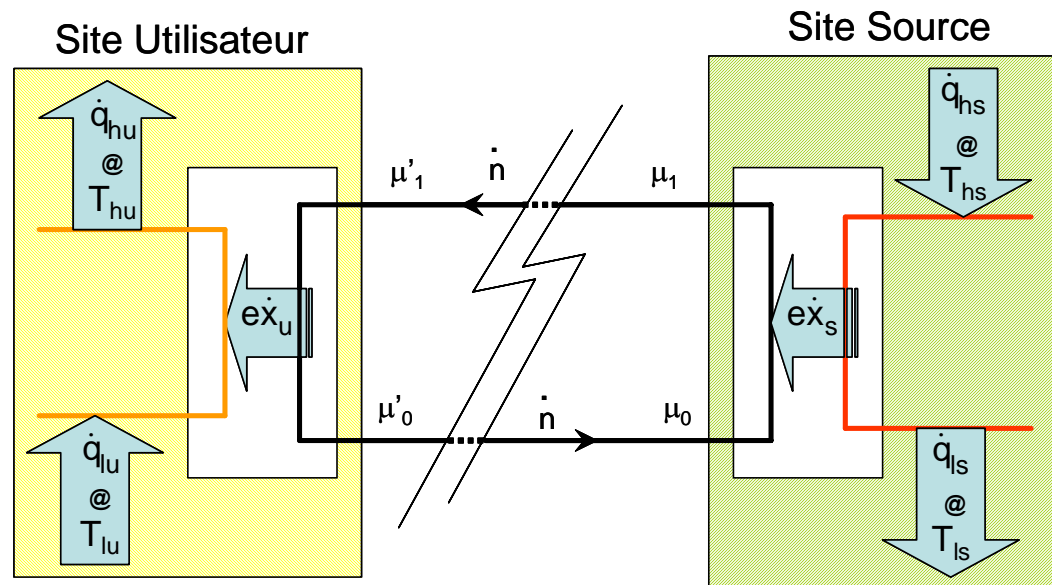
récupérateur de chaleur



rectifieur



EVALUATION COMPARÉE DES PROCÉDÉS : méthodologie générale



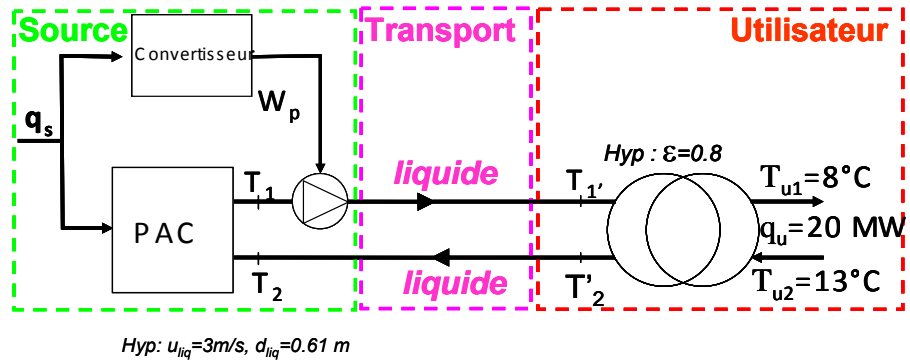
Analyse exergetique

- Site Source: $\eta_s = \dot{n} \cdot (\mu_1 - \mu_0) / \dot{q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{hs}}\right)$.
- Transport : $ex_d = \dot{n} \cdot [(\mu_1 - \mu'_1) + (\mu'_0 - \mu_0)]$
- Site Utilisateur: $\eta_u = \dot{q}_u \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_u}\right) / \dot{n} \cdot (\mu'_1 - \mu'_0)$

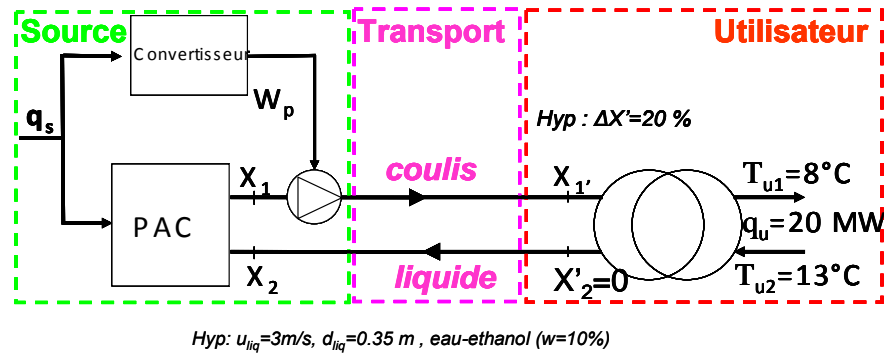
Procédés comparés :

Utilisation :
 $Q_u = 20\text{ MW}$
 $T_u = 8/13^\circ \text{ C}$

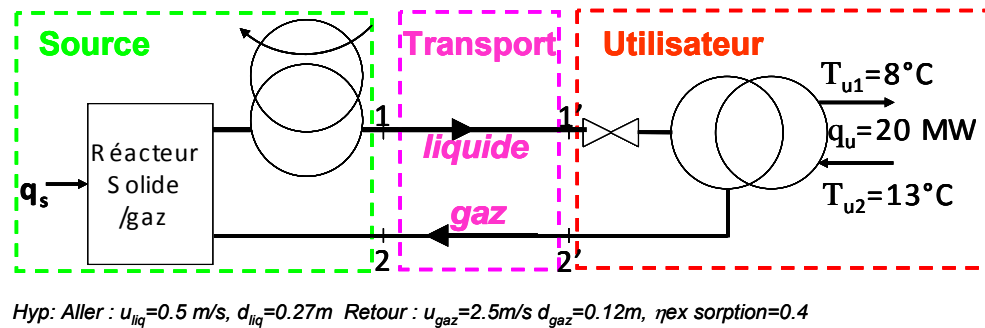
Transport de froid par chaleur sensible



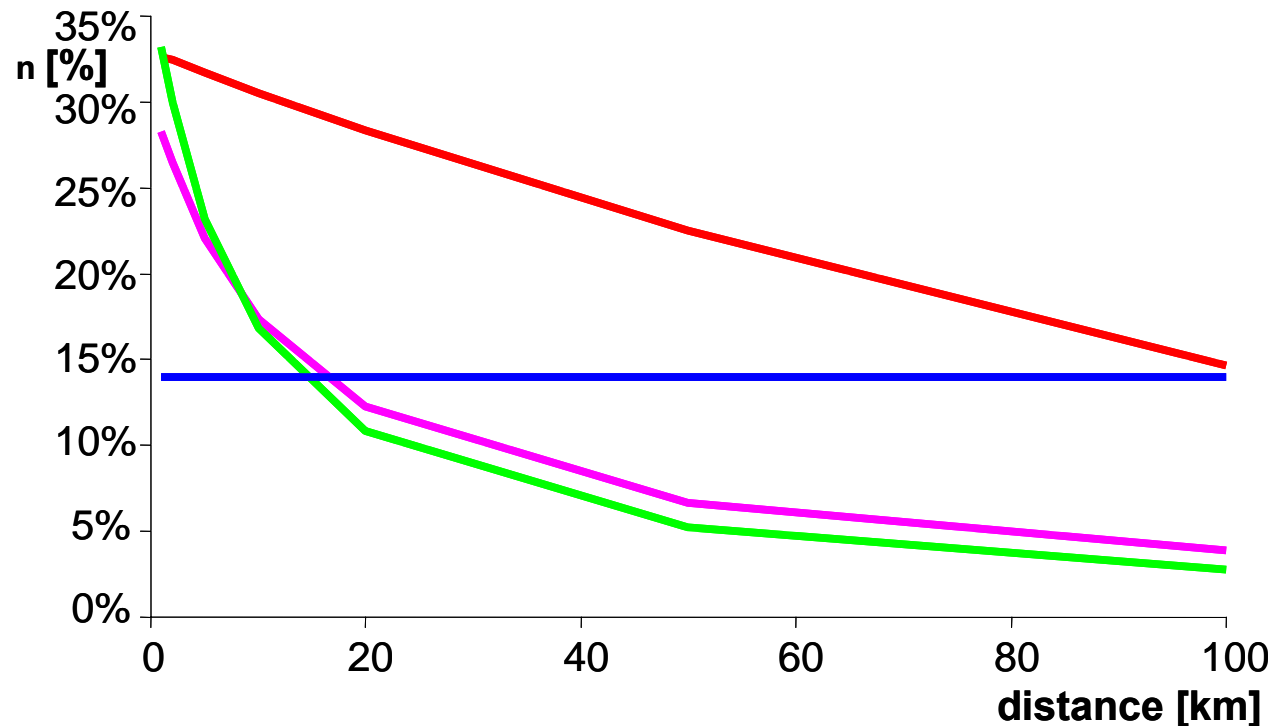
Transport de froid par chaleur latente



Transport de froid par procédé thermochimique solide/gaz



Efficacité exergétique des modes de transport de froid selon la distance source-utilisateur



- Transport de froid produit par réaction solidegaz
- Transport de froid sous forme latente
- Transport de froid sous forme sensible
- Transport d'électricité (et utilisation d'une PAC)

Valotherm : PERSPECTIVES

❖ Procédé à absorption liquide/gaz :

- performances expérimentales

❖ Procédé solide/gaz :

- simulation du coréacteur autotherme, pour identifier ses limitations
- simulation et évaluation des performances du procédé cascade complet.

❖ Evaluation comparée :

- inclure les performances expérimentales ou simulées des procédés à sorption (liq/gaz et sol/gaz)
- études de cas



Colloque PI Energie 2 – CNRS Nantes, Novembre 2009



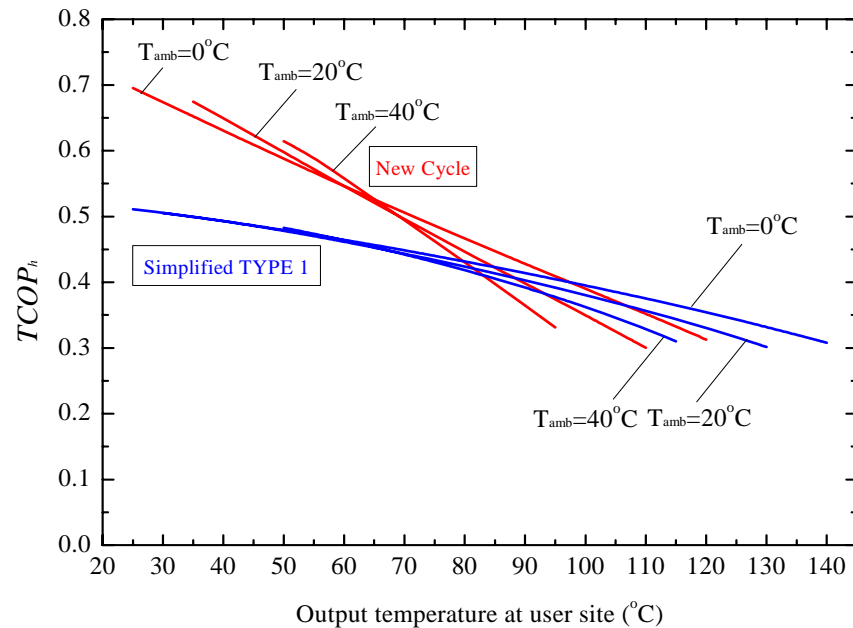
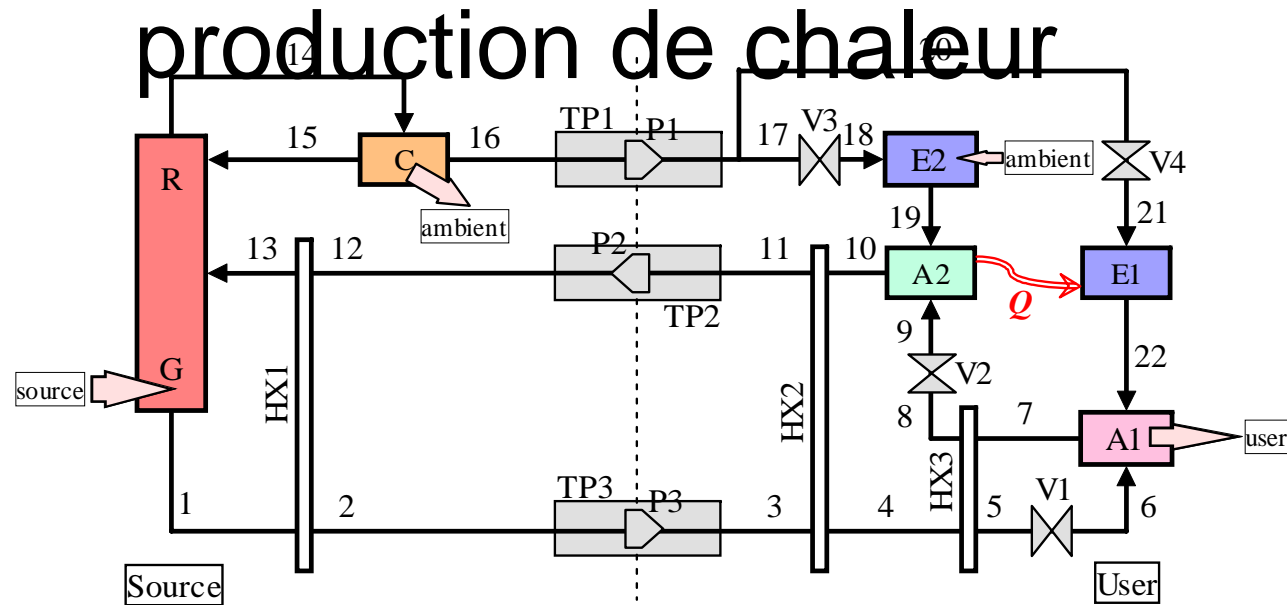
Merci !

Contacts :

mazet@univ-perp.fr
lingai.luo@univ-savoie.fr

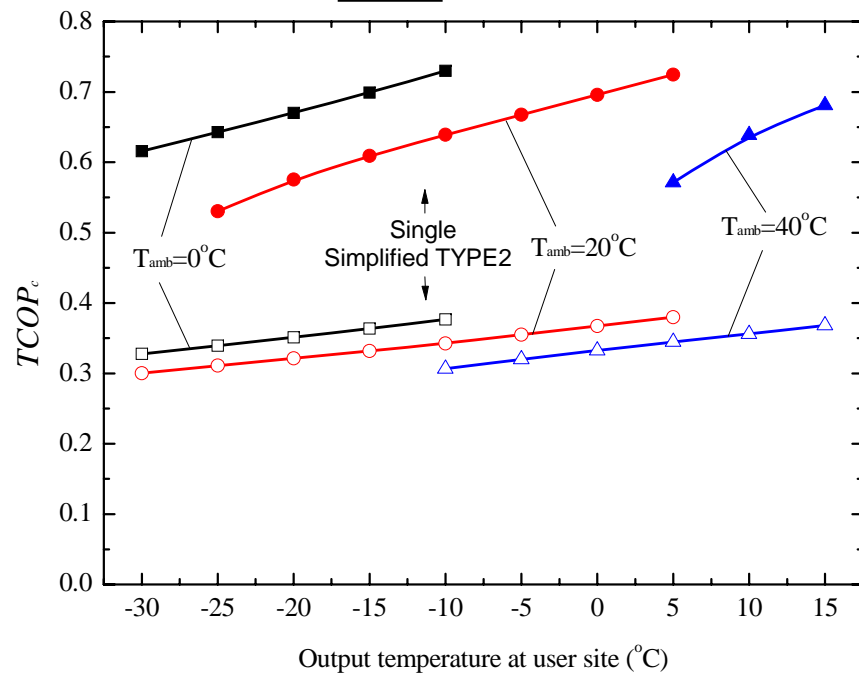
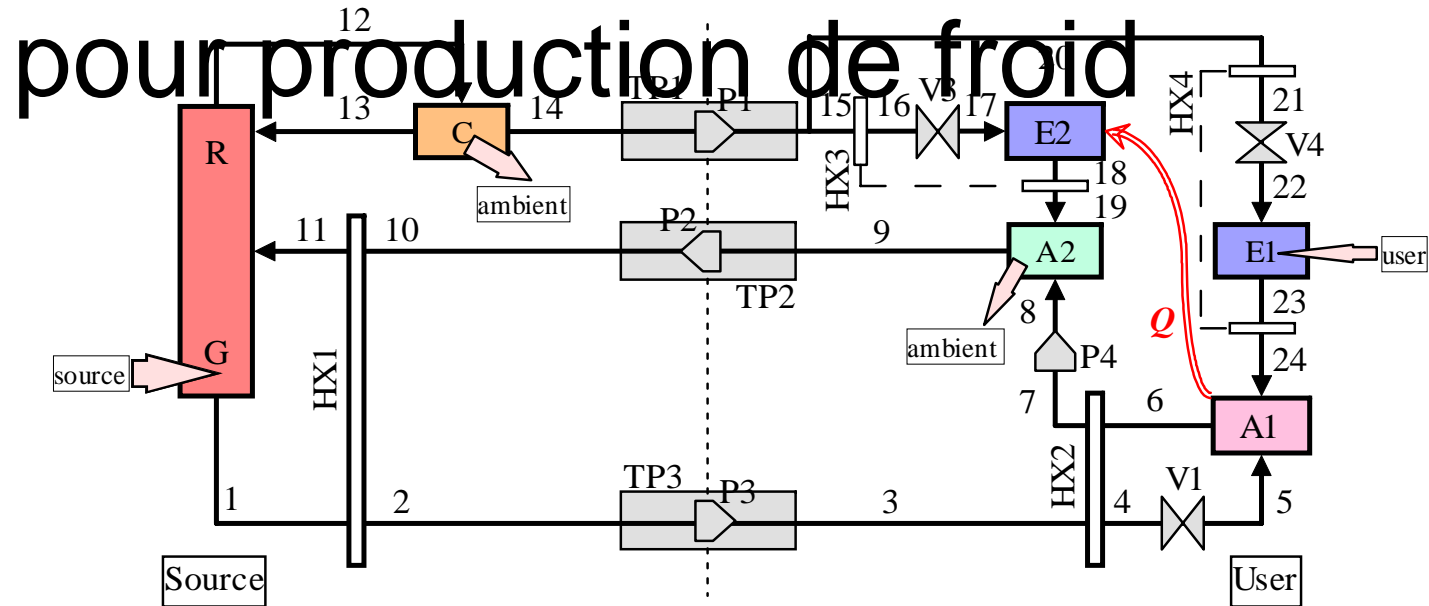


Forme simplifiée I du cycle: pour production de chaleur



Cycle simplifié (analyse entropique)
 → Forme intéressante pour produire de la chaleur à haute température

Forme simplifiée II du cycle:

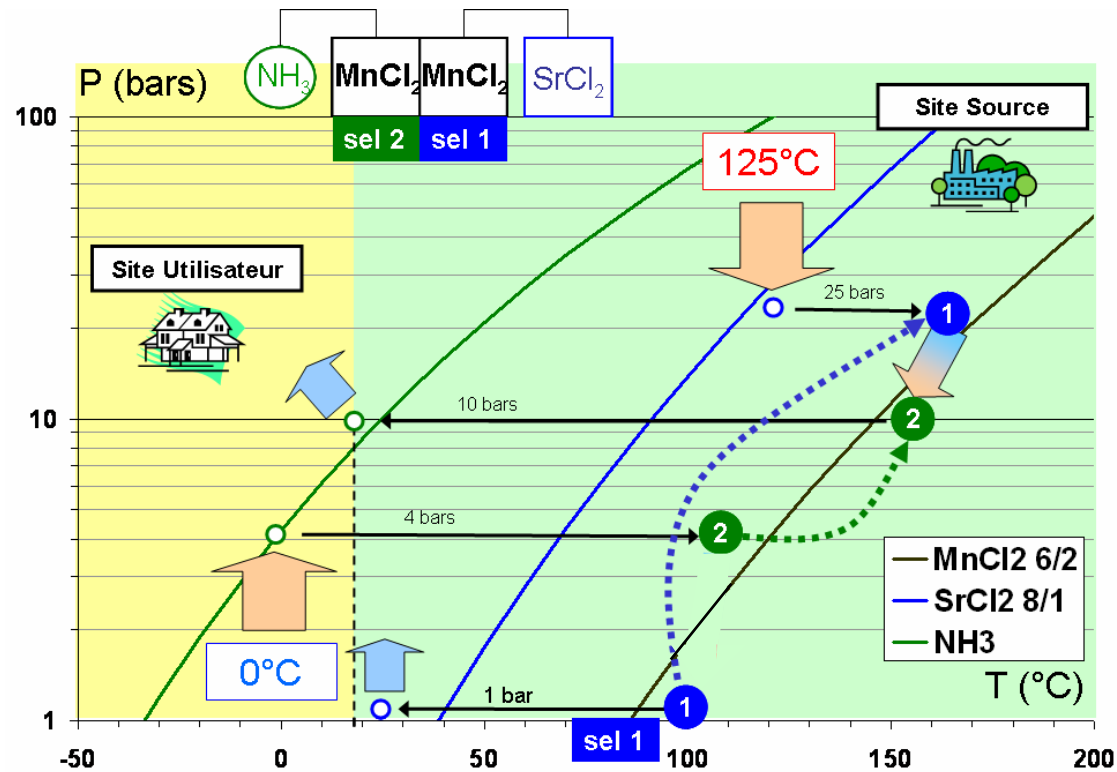


Autre cycle simplifié

→ Forme intéressante pour produire de du froid à basse température, notamment à température ambiante relativement élevée ($T > 30^\circ \text{C}$)

Autothermal co-reactor : working mode

Ideal autothermal working:
without any external heat input during the 2 phases of the cycle



Real working ?

Autothermal reactor : energy balances

Heating + high pressure phase

$$Q_{\text{réaction1}} > 0 = Q_{\text{réaction2}} + Q_{\text{sensible sel1}} + Q_{\text{gaz1}} + Q_{\text{sensible sel2(gaz2)}} + Q_{\text{losses}} \Rightarrow \frac{m_{\text{sel1}}}{m_{\text{sel2}}} = 1,46$$

Cooling+ low P phase

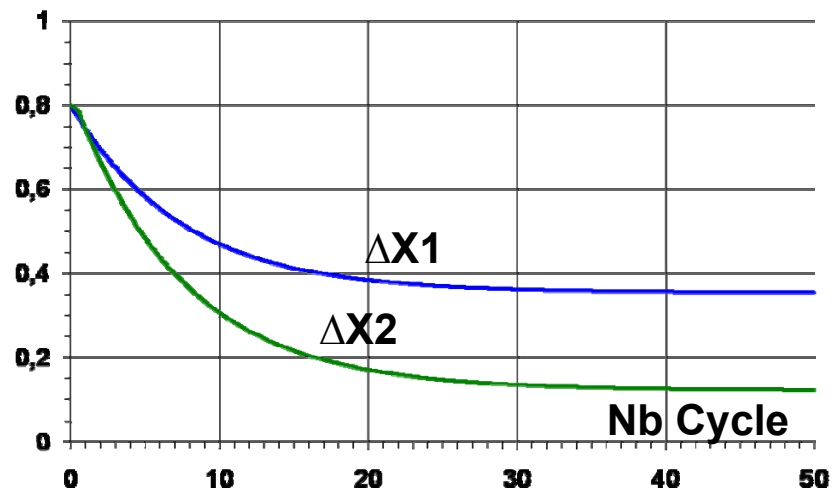
$$Q_{\text{réaction1}} < 0 = Q_{\text{réaction2}} + Q_{\text{sensible sel1(gaz1)}} + Q_{\text{sensible sel2}} - Q_{\text{gaz2}} - Q_{\text{losses}} \Rightarrow \frac{m_{\text{sel1}}}{m_{\text{sel2}}} = 1,56$$



The co-reactor cannot be dimensionned for the two phases working without external heat input.

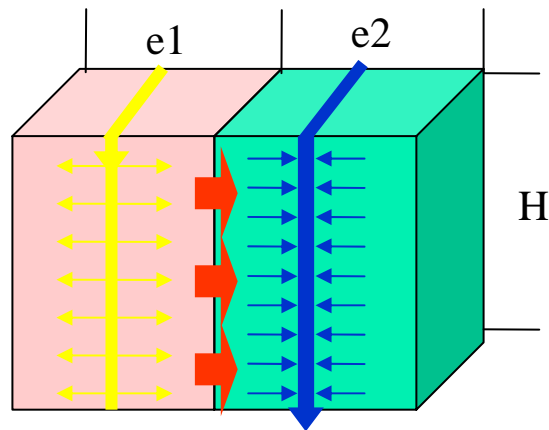


Decreasing amount of reactant working in successive cycles



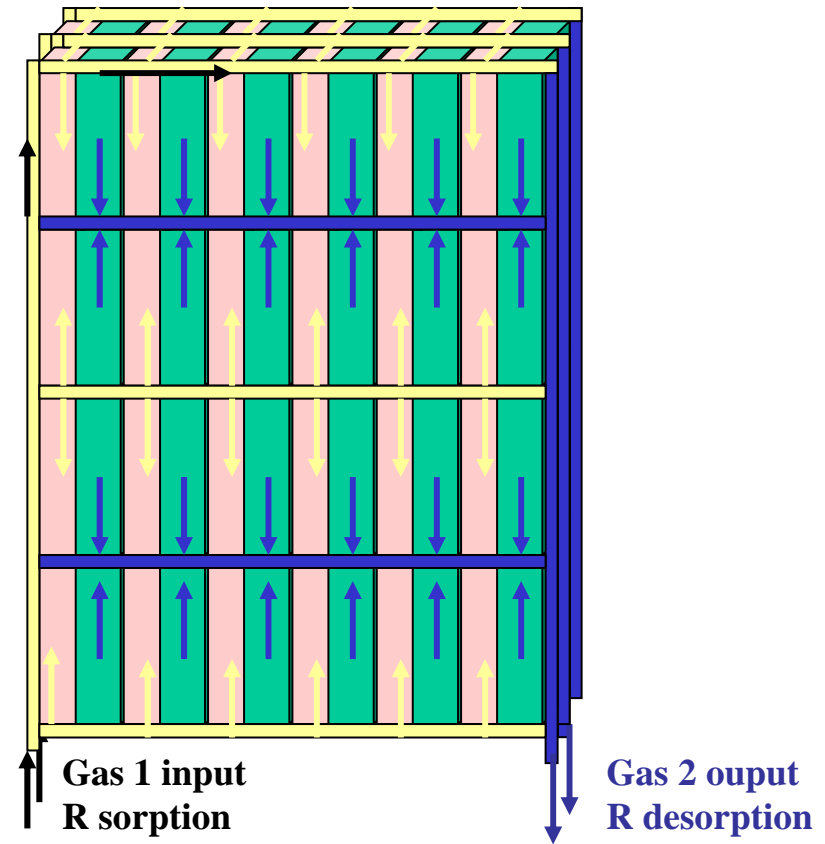
Constructal autothermal co-reactor

Elementary module:



=> duration of cycle fixed
by the elementary volume

Constructal co-reactor



Modular system
=> Total thermal power

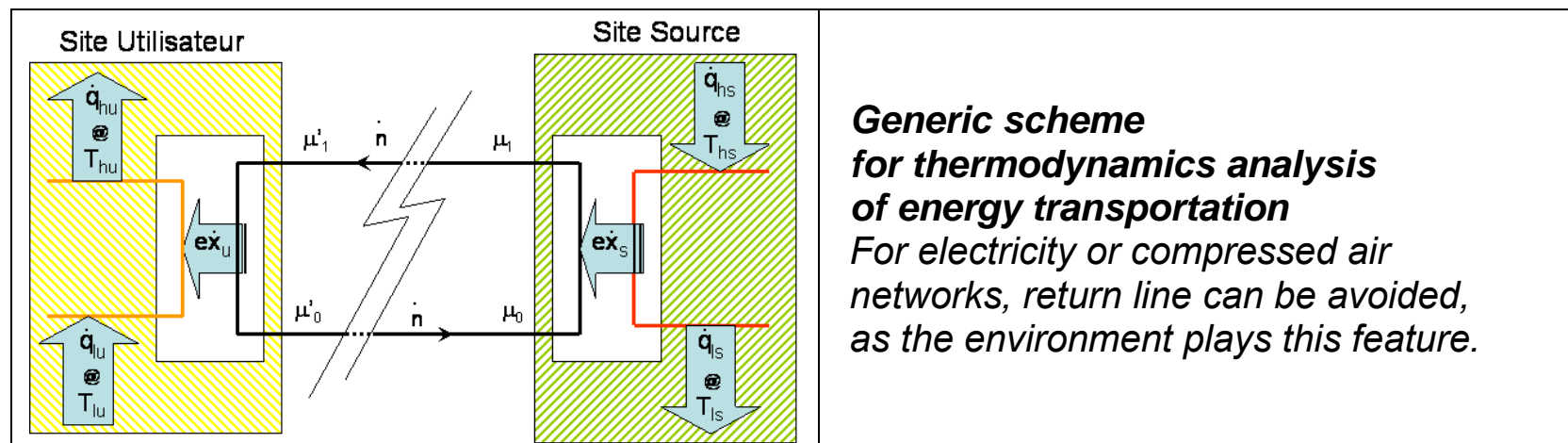
The concept of 'generalized' or 'total' chemical potential, introduced by I. Prigogine, will allow treating the global problem of energy transportation in a single way, whatever the process is. The generalised chemical potential is equal to the chemical potential defined by Gibbs equation, at which all other potentials can be added. As an example, for electrical charged liquid, it takes the form of :

$$\mu = \underbrace{\bar{h} - T \cdot \bar{s}}_{\text{chemical}} + \underbrace{\bar{M} \frac{U^2}{2}}_{\text{kinetics}} + \underbrace{\bar{M} g \cdot z}_{\text{gravific}} + \underbrace{\bar{Z} \cdot \phi}_{\text{electric}} + \dots \text{ (J/mole)}$$

displaying all kinds of energy.

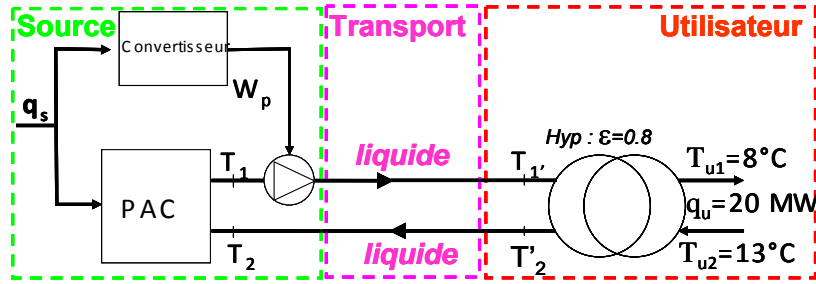
It is worth noting that, assuming transportation at ambient temperature, the generalised potential is equal to the specific exergy of the transported matter.

We then get **the very general scheme for energy transportation** represented in the following figure:

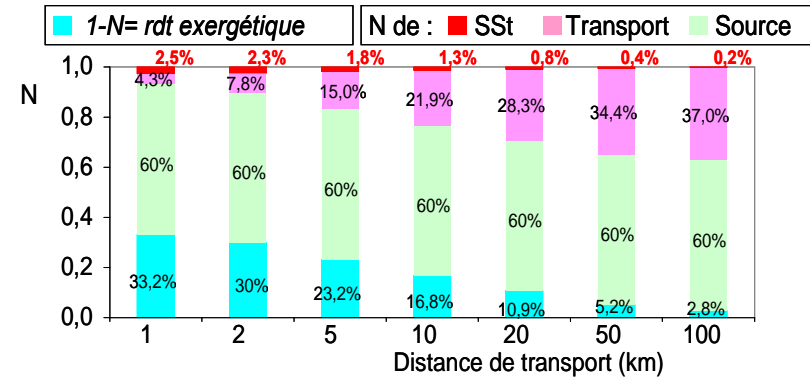


Cascade Sorption solide/gaz

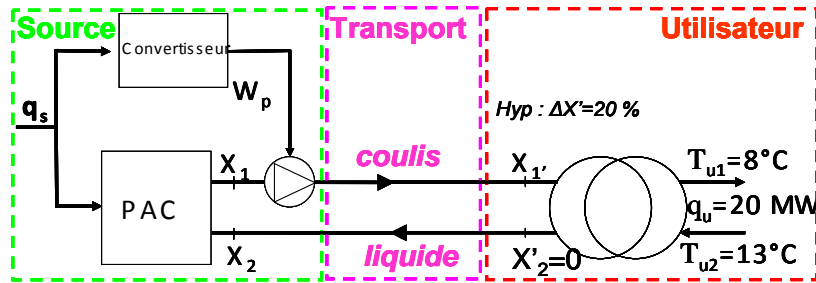
Transport de froid par chaleur sensible



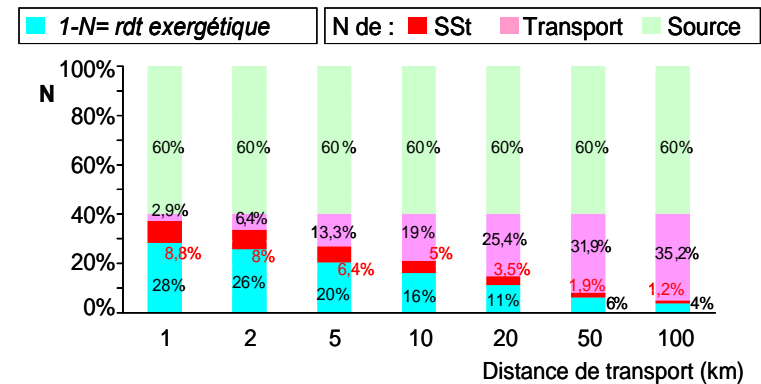
Hyp: $u_{liq}=3\text{m/s}$, $d_{liq}=0.61\text{ m}$



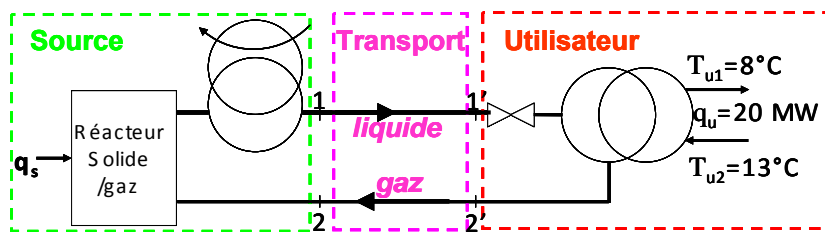
Transport de froid par chaleur latente



Hyp: $u_{liq}=3\text{m/s}$, $d_{liq}=0.35\text{ m}$, eau-ethanol ($w=10\%$)



Transport de froid par procédé thermochimique solide/gaz



Hyp: Aller : $u_{liq}=0.5\text{ m/s}$, $d_{liq}=0.27\text{ m}$ Retour : $u_{gaz}=2.5\text{m/s}$ $d_{gaz}=0.12\text{ m}$, $\eta_{ex\ sorption}=0.4$

