

# Analyse et remodelage pour l'amélioration énergétique des systèmes industriels : méthode couplée Exergie/Pincement

Raphaële Hétreux<sup>1</sup>, Pascal Floquet<sup>1</sup>, Gilles Hétreux<sup>1</sup>

Ali Ghannadzeh<sup>3</sup>, Stéphane Gourmelon<sup>2</sup>

Lucille Payet<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de Génie Chimique Toulouse

<sup>2</sup> Air Liquide

<sup>3</sup> Hamedan University of Technology

## financeurs



## Partenaires



ProSim  
Software & Services in Process Simulation



Université  
de Toulouse

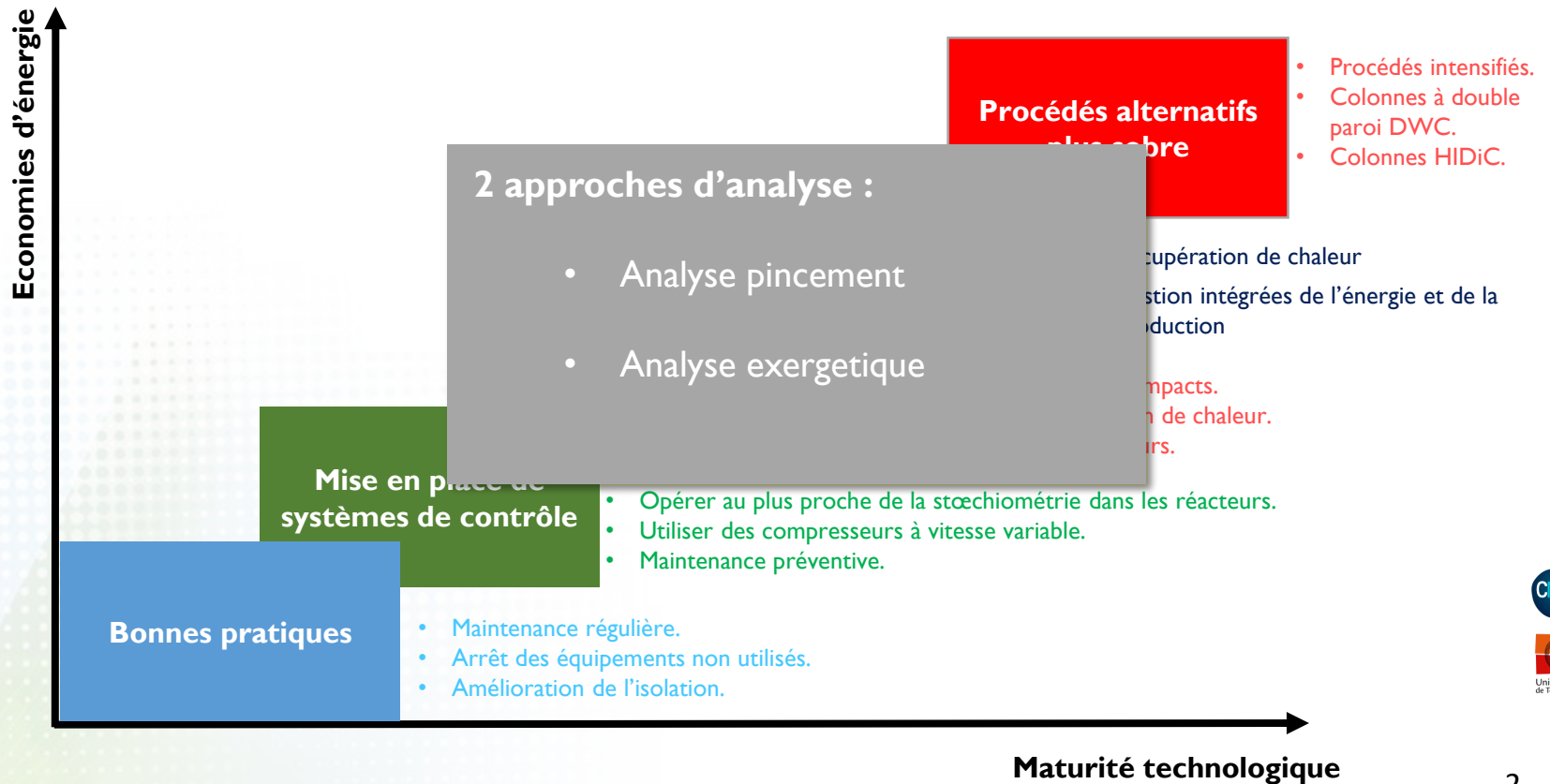


# Contexte

Introduction

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRe

- **Efficacité énergétique** : une réponse à l'urgence climatique
- L'industrie qui représente plus de 20% de la consommation énergétique dispose encore de nombreux gisements d'économie



# L'analyse pincement

Introduction

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRe

- **Approche thermodynamique**
- **But** : réduire les consommations énergétiques du procédé
  - En limitant les apports externes d'énergie (utilités)
  - Et favorisant les recyclages énergétiques (thermiques)
- **Procédé**
  - Courants **chauds** (devant être refroidis)
  - Courants **froids** (devant être réchauffés)



Indication sur le potentiel d'amélioration du procédé



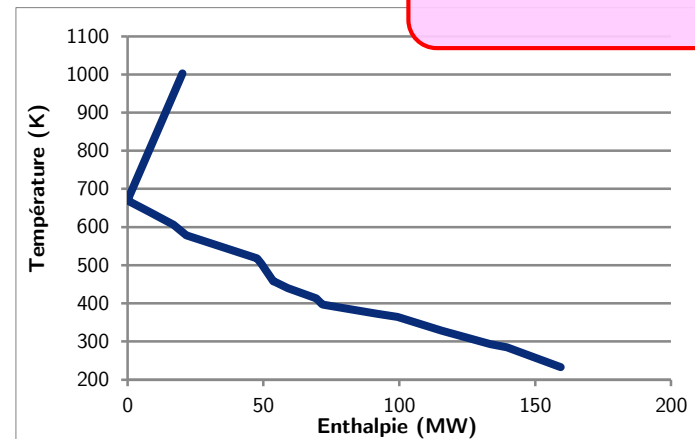
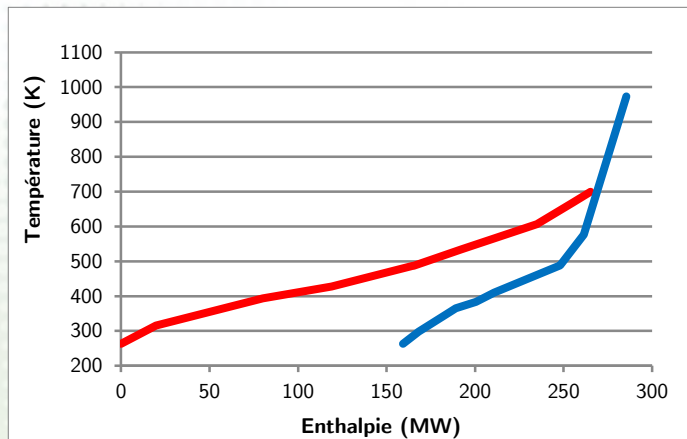
Générateur d'idées  
(construction de réseaux d'échangeurs de chaleur)



Algorithme PTA → Evaluer le Minimum d'Énergie Requise  
Courbes Composées & Grande Courbe Composée



Energie thermique seule



# L'analyse exergetique

## Introduction

Contexte

Pinch Vs Exergie

L'approche CoOPeRe

- Approche thermodynamique

L' exergie est définie comme le maximum théorique de travail récupérable lorsqu'un système est amené, par des opérations réversibles, depuis son état initial à l'état d'équilibre thermodynamique avec un environnement de référence.

[Szargut et al., 1988]



**Tout type d'énergie**  
(thermique, mécanique, chimique)

**Cartographier « rapidement » les imperfections thermodynamiques d'un procédé**



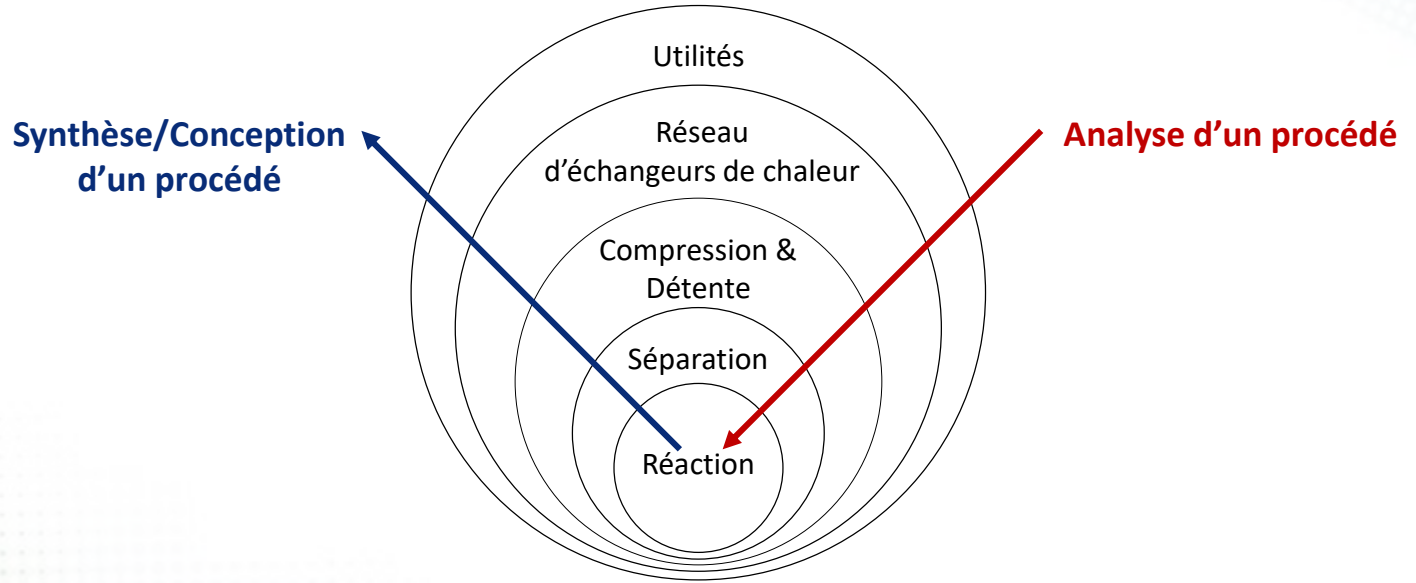
**Concept difficile à appréhender**

**Peu d'outils logiciel implémentant le calcul générique de l'exergie**

**Pas un générateur d'idées**

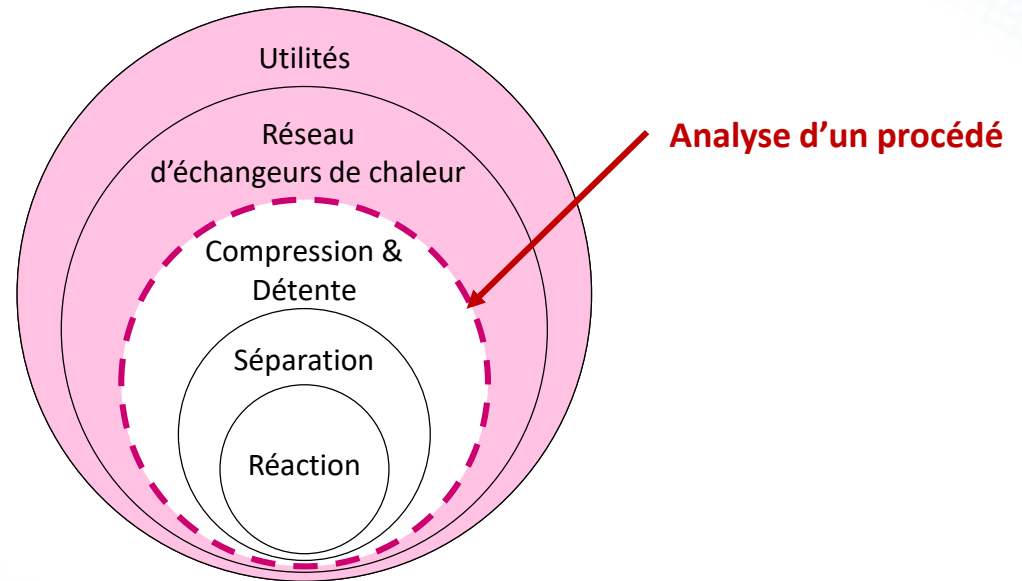
**Introduction**

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPERe



Introduction

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPERe



- Analyse des deux **couches externes** :



**Analyse Pincement**

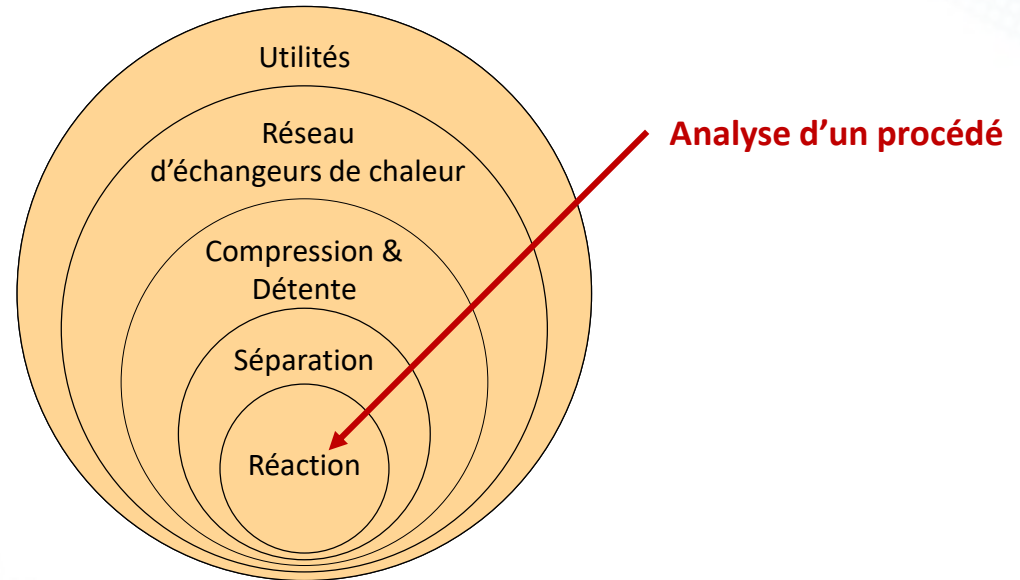


## Introduction

Contexte

● Pinch Vs Exergie

└ L'approche CoOPERe



- Analyse des deux **couches externes** :



**Analyse Pincement**

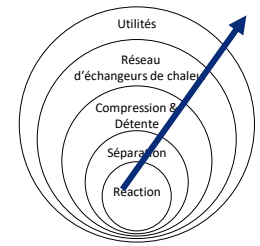
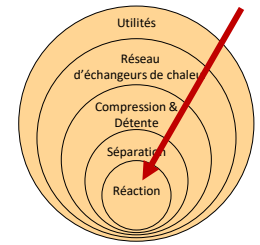
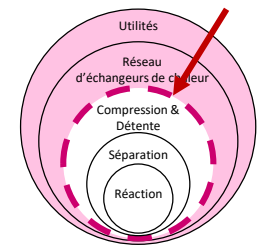
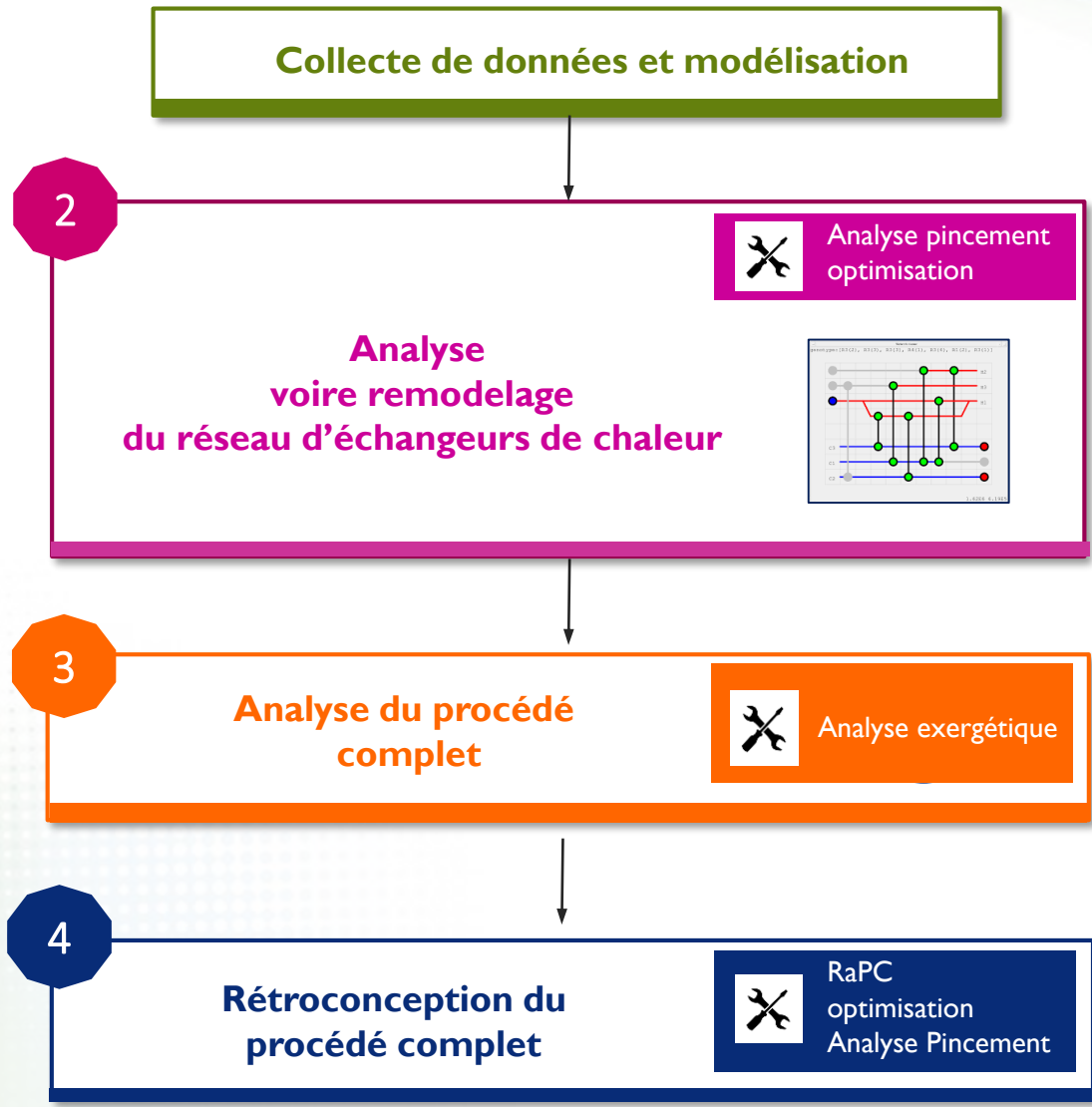
- Analyse du **procédé complet** :



**Analyse Exergétique**

**Introduction**

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRE





**Introduction**

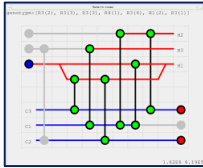
- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRE

**Collecte de données et modélisation**

**2**

**Analyse  
voire remodelage  
du réseau d'échangeurs de chaleur**

**Analyse pincement  
optimisation**



**3**

**Analyse du procédé  
complet**

**Analyse exergetique**

**4**

**Rétroconception du  
procédé complet**

**RaPC  
optimisation  
Analyse Pincement**

**PROJET ANR  
COOPERE**

## Introduction

Contexte

Pinch Vs Exergie

L'approche CoOPeRE

### ○ **Projet CoOPeRE-2 (2012-2015)**

**C**ombiner **O**ptimisation des **P**rocédés, **R**écupération énergétique et analyse **E**xergétique pour une meilleure efficacité énergétique des sites industriels

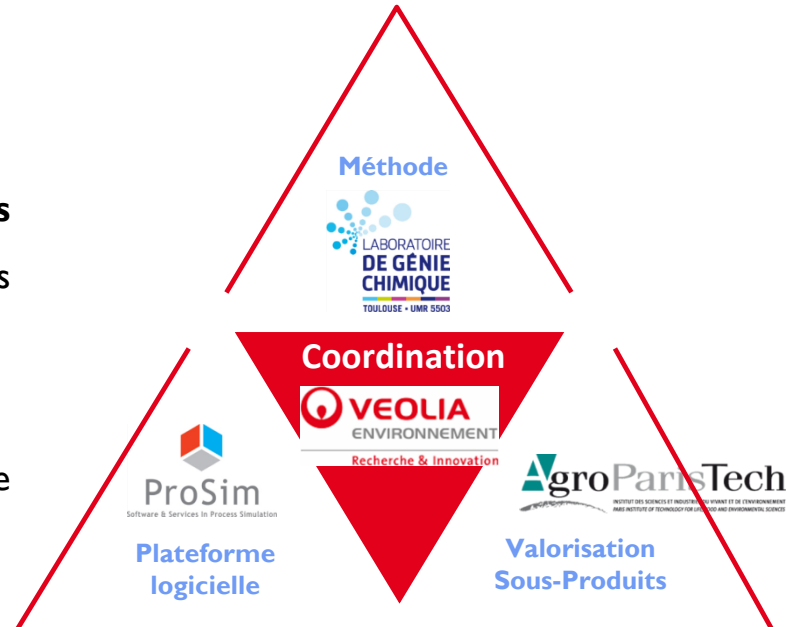
### ○ **Financement : Agence Nationale de la Recherche**



## Objectif

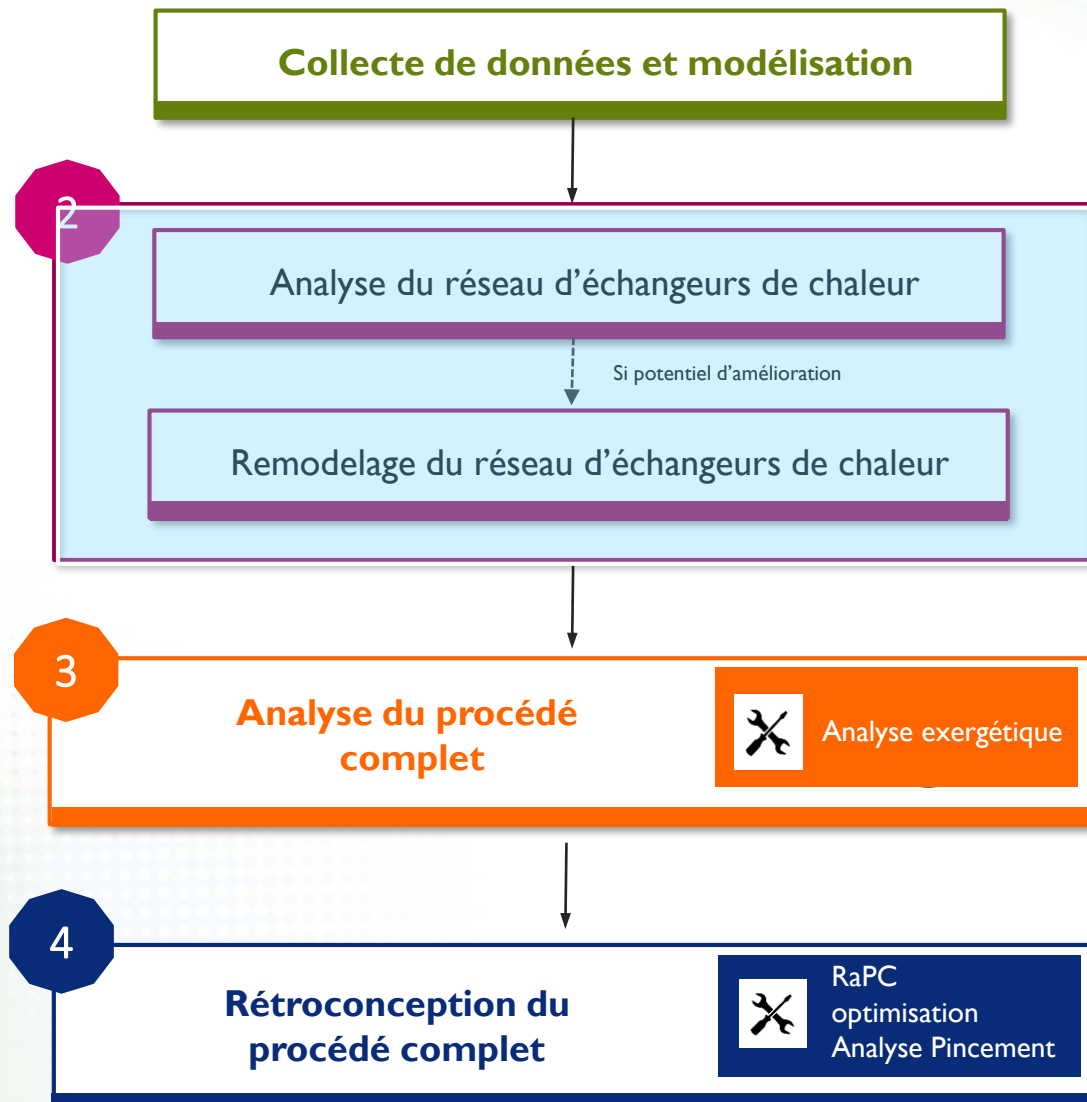
Développer des **outils méthodologiques et logiciels** dédiés à la définition de solution d'efficacité énergétique des procédés industriels

Basé sur le couplage des analyses pincement et analyse exergétique.



**Introduction**

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPERe



**PROJET RREFlex  
(AMI TOTAL-ADEME)**

**Introduction**

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPERe

- **Projet RREFlex (2015-2018)**

Outil **R**obuste pour la synthèse de **R**éseaux d'**E**changeurs de chaleur **F**lexibles

- **Financement : 8ème AMI TOTAL-ADEME**



## Objectif

- Développer une méthodologie et des modèles visant à proposer des **solutions alternatives de récupération énergétique** à la fois **robustes** et **adaptables** via le remodelage des réseaux d'échangeurs de chaleur déjà installés
- Développer un **prototype logiciel**
  - Noyau de calcul et IHM entrée/sortie : développé au LGC
  - 2 IHM de sortie (développée par ProSim)



**Introduction**

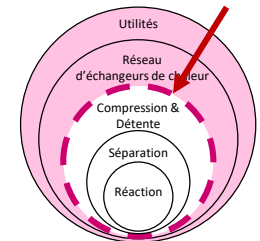
- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRE**

**Collecte de données et modélisation**

**2**

**Analyse pincement optimisation**

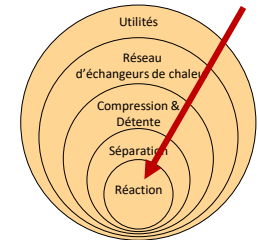
**Analyse voire remodelage du réseau d'échangeurs de chaleur**



**3**

**Analyse du procédé complet**

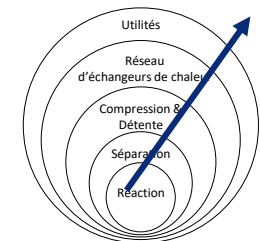
**Analyse exergetique**



**4**

**Rétroconception du procédé complet**

**RaPC optimisation Analyse Pincement**



**Cas d'étude**  
Procédé Ammoniac



La méthodologie COOPeRE

**Création du support d'analyse**

- Collecte des données
- Modélisation du procédé
- Simulation du procédé
- Application

Analyse du réseau d'échangeurs

Analyse du procédé complet

Rétro-conception du procédé

Conclusions et perspectives

## Collecte de données et modélisation

**Collecte des données**  
 Salle de contrôle, mesure sur site ...

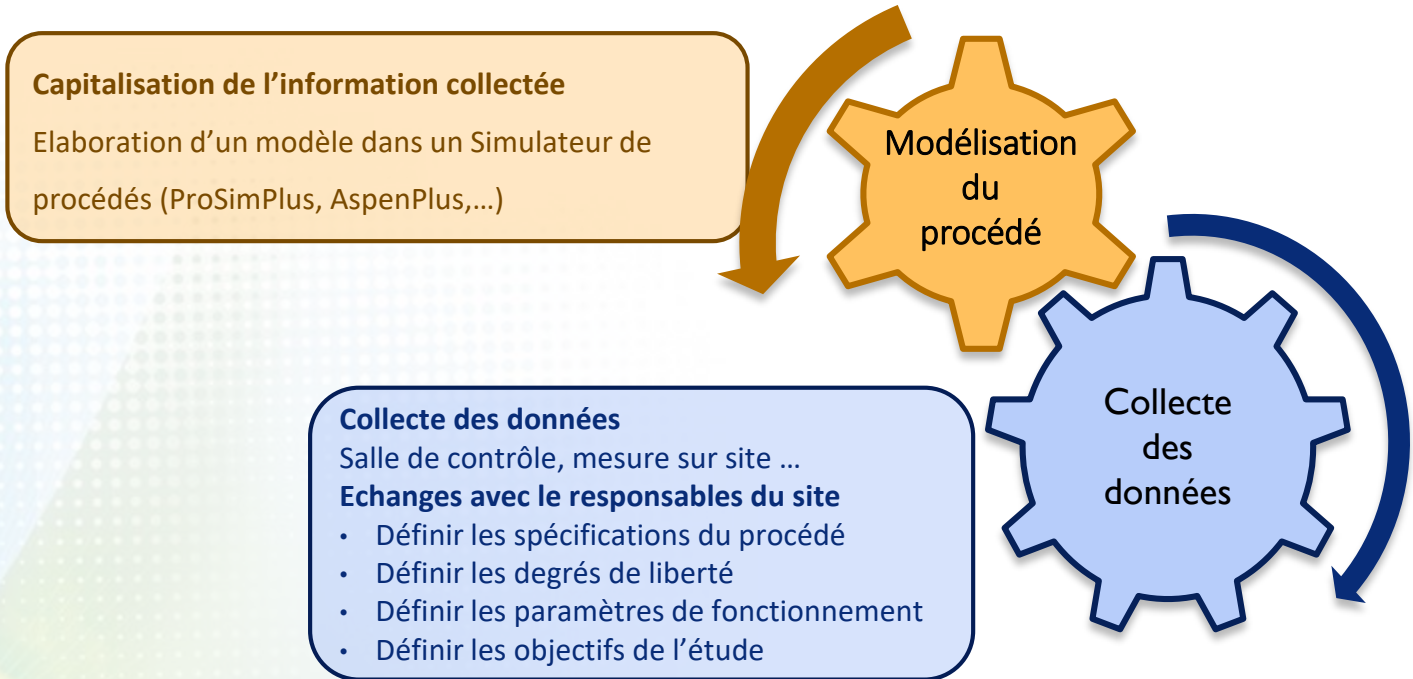
**Echanges avec le responsables du site**

- Définir les spécifications du procédé
- Définir les degrés de liberté
- Définir les paramètres de fonctionnement
- Définir les objectifs de l'étude



La méthodologie COoPERE
<b>Création du support d'analyse</b>
--- Collecte des données
● Modélisation du procédé
--- Simulation du procédé
--- Application
Analyse du réseau d'échangeurs
Analyse du procédé complet
Rétro-conception du procédé
Conclusions et perspectives

## Collecte de données et modélisation



La méthodologie COoPERE

**Création du support d'analyse**

- Collecte des données
- Modélisation du procédé
- Simulation du procédé
- Application

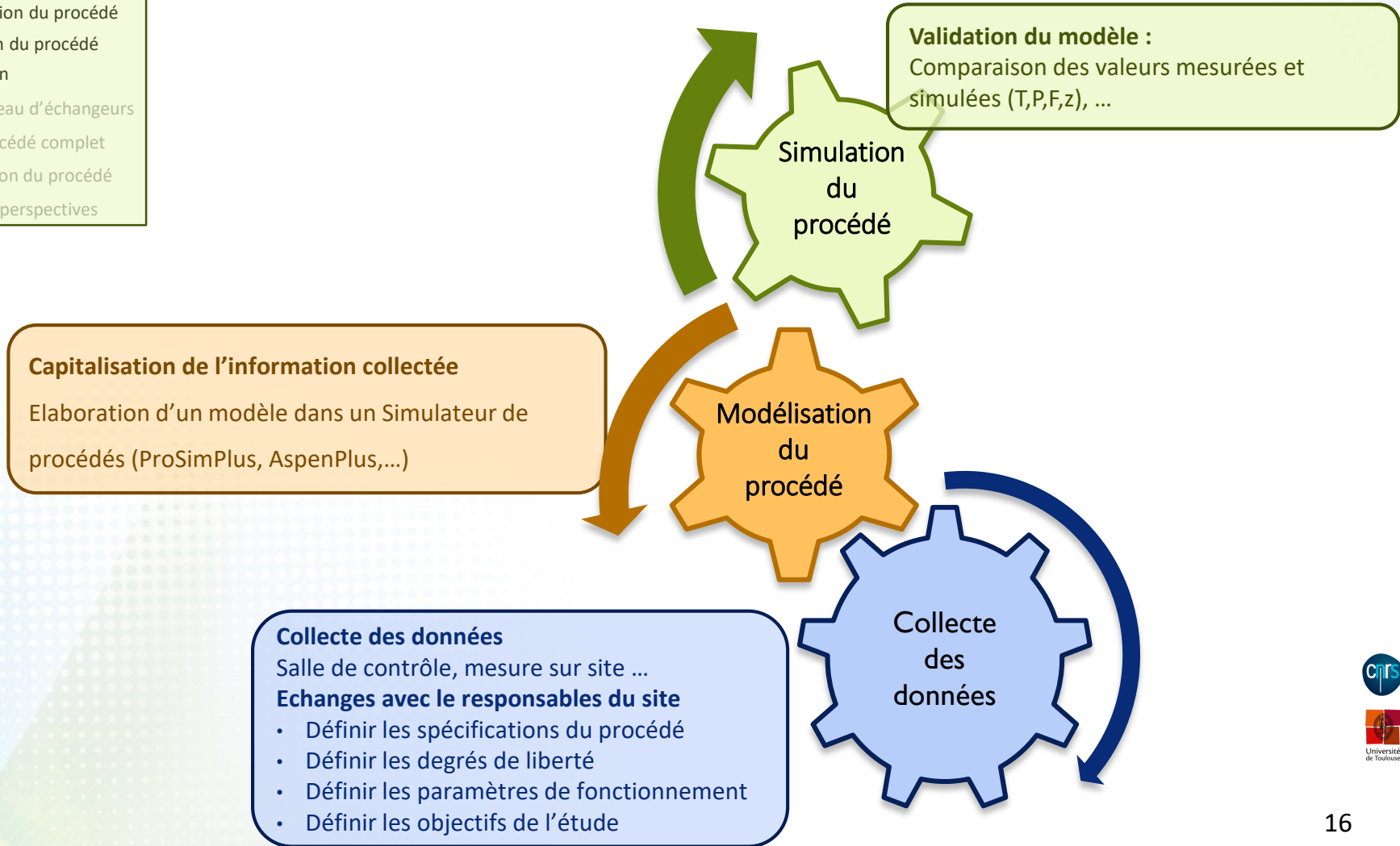
Analyse du réseau d'échangeurs

Analyse du procédé complet

Rétro-conception du procédé

Conclusions et perspectives

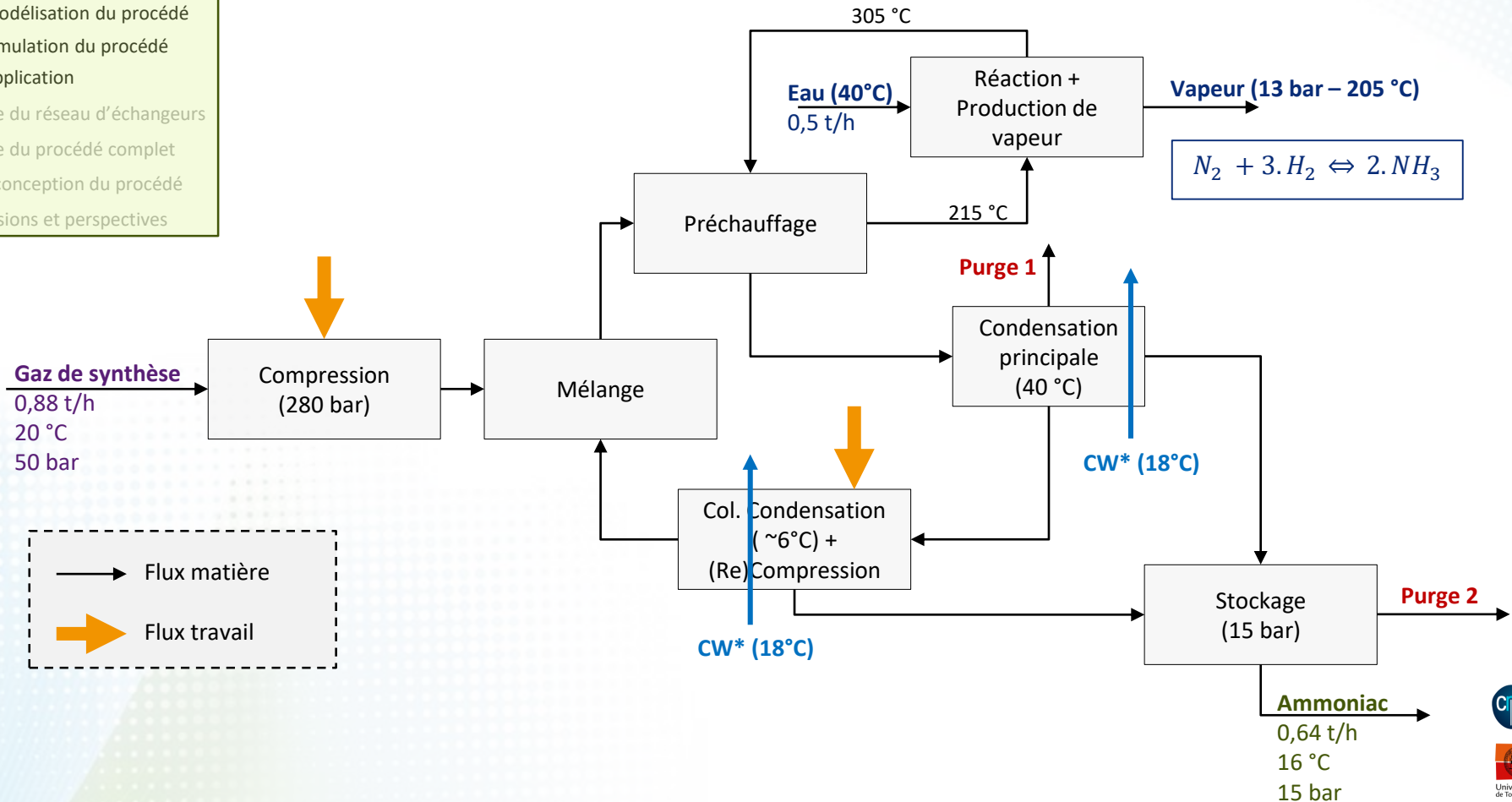
## Collecte de données et modélisation





La méthodologie COoPERE	
Création du support d'analyse	
—	Collecte des données
—	Modélisation du procédé
—	Simulation du procédé
●	Application
■	Analyse du réseau d'échangeurs
■	Analyse du procédé complet
■	Rétro-conception du procédé
■	Conclusions et perspectives

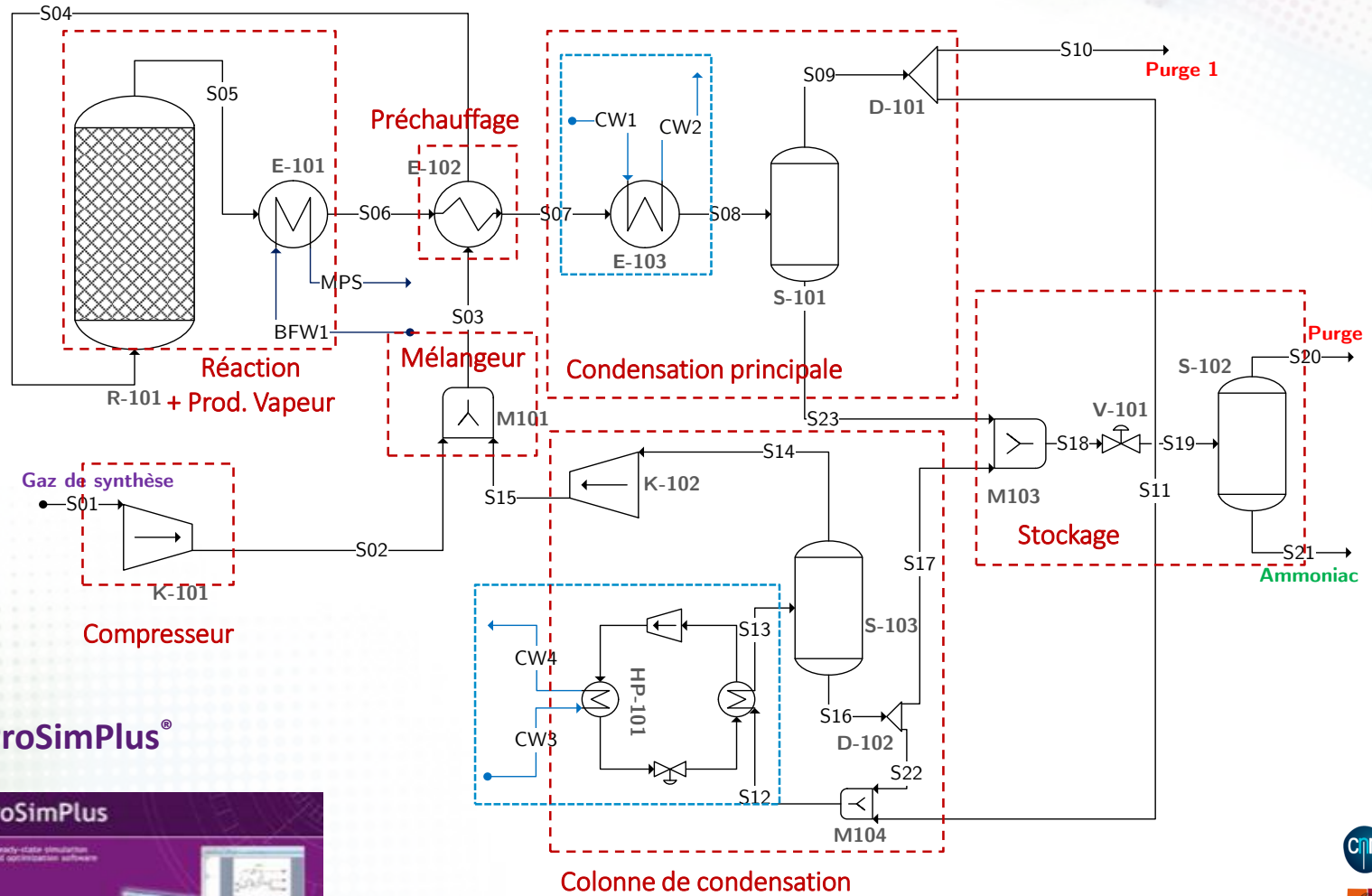
- Procédé « ammoniac » [Brodyansky et al., 1994][Seider et al., 2003]



\* Eau de rivière (cold water)



- La méthodologie COoPERE
- Création du support d'analyse**
- Collecte des données
  - Modélisation du procédé
  - Simulation du procédé
  - Application
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives



ProSimPlus®





**Introduction**

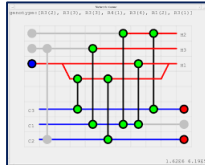
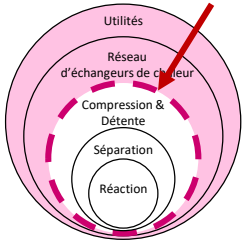
- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRE

**Collecte de données et modélisation**

2

**Analyse  
voire remodelage  
du réseau d'échangeurs de chaleur**

**Analyse pincement  
optimisation**



- Réseau adaptables
- Ajout de nouveaux échangeurs ou repositionnement des échangeurs existants

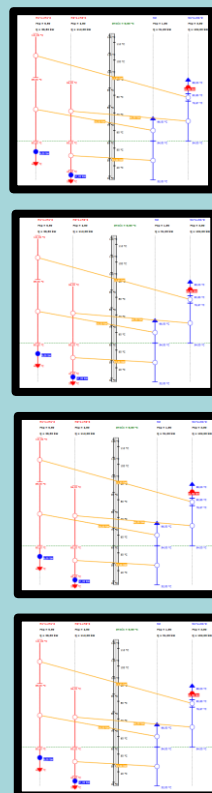
**EDiFy**

**Collecte de données avancée**

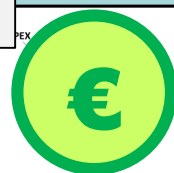
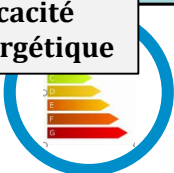
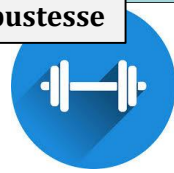
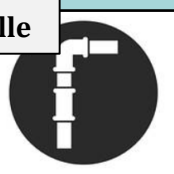
**Diagnostic Energétique**

**Multiples configurations**

**Synthèse de réseaux**



**Indicateurs de performance**

- ROI 
- Efficacité énergétique 
- robustesse 
- Taille 

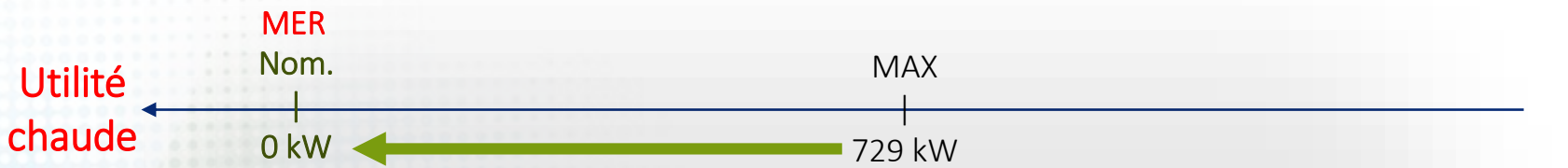
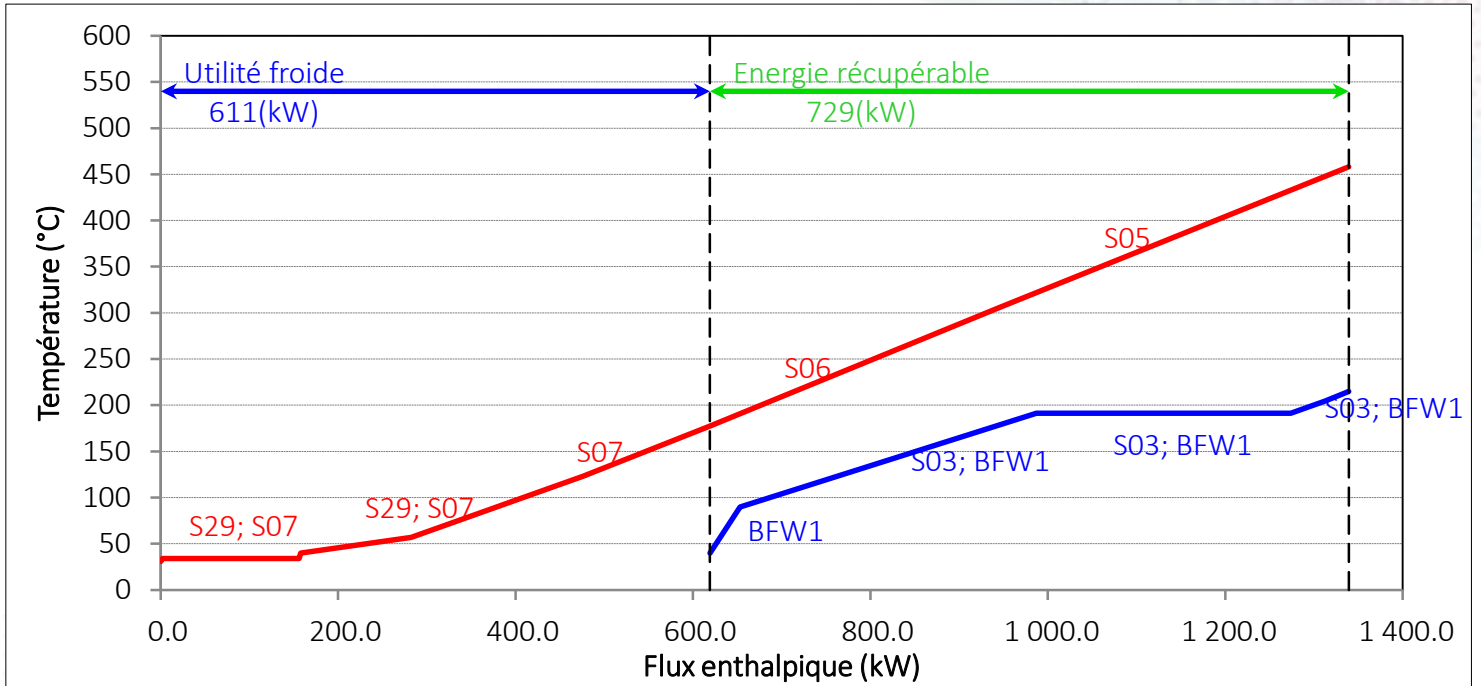
- Localiser et caractériser les différents cas de marche
- Simulation

- Evaluer la marge de progression atteignable par remodelage du réseau
- Définir et classifier des scénarios prometteurs

Reformulation du problème  
(ajout de nouvelles contraintes)

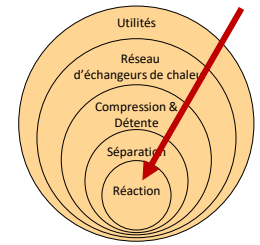
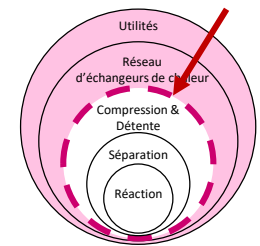
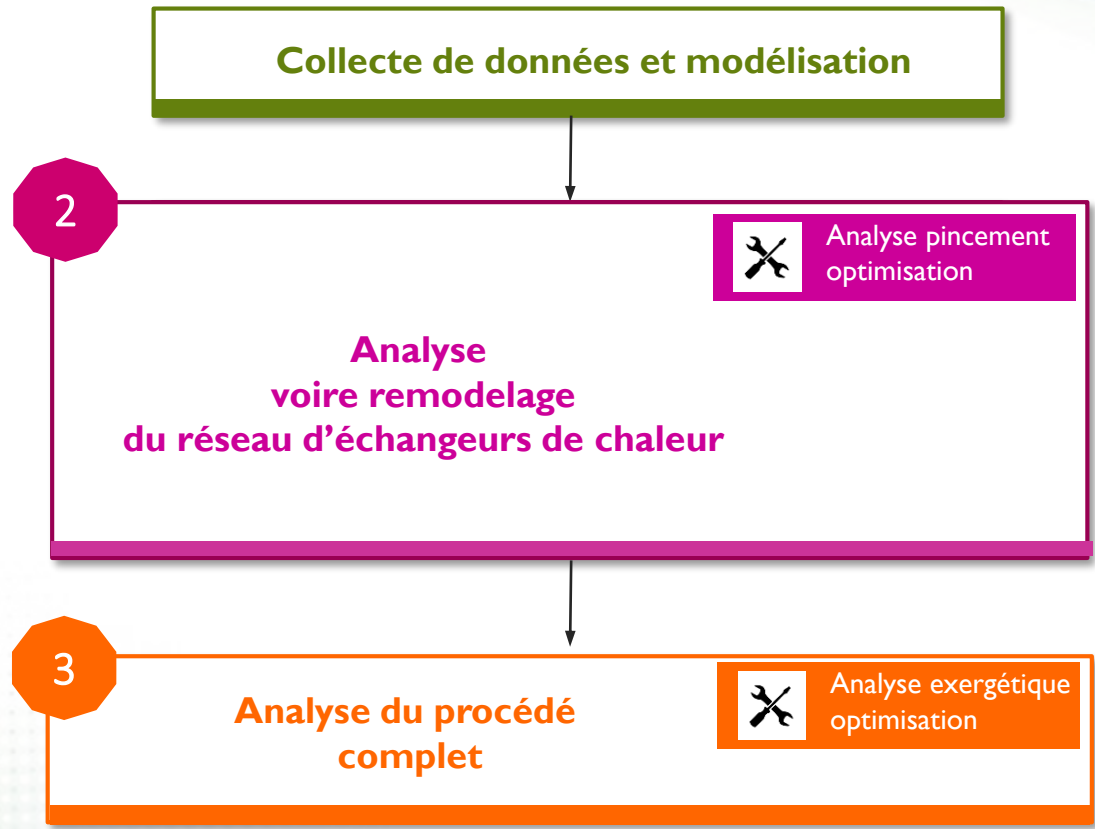


- La méthodologie COOPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse globale
- Analyse détaillée
- Application
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives



Pas de marge d'amélioration du procédé ammoniac par intégration thermique

- La méthodologie COoPERE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
- Bilans exergétiques
- Efficacités exergétiques
- Le ternaire exergétique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives



# CoOPeRE 3. Analyse du procédé complet

- La méthodologie COoPERE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
  - Bilans exergetiques**
  - Efficacités exergetiques
  - Le ternaire exergetique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

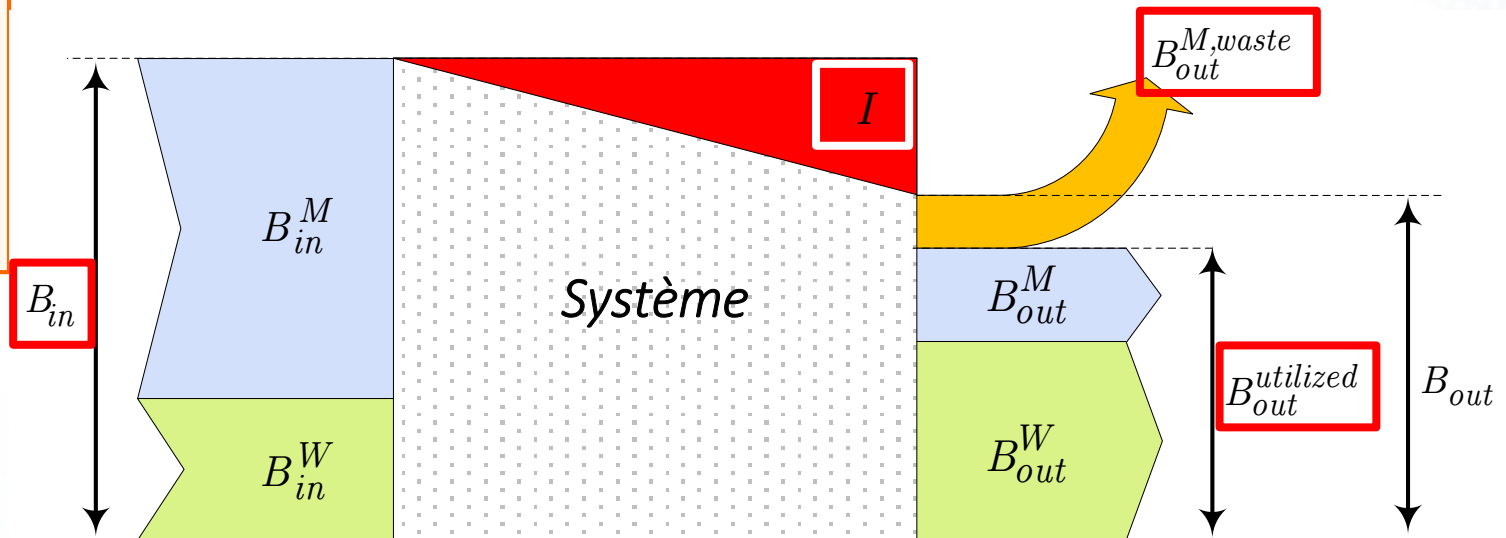
- Analyse exergetique
  - **Bilans exergetiques**
  - Efficacités exergetiques



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
  - Bilans exergetiques
  - Efficacités exergetiques
  - Le ternaire exergetique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

- Analyse exergetique
  - Bilans exergetiques
  - Efficacités exergetiques

↓ Diagramme de Grassmann



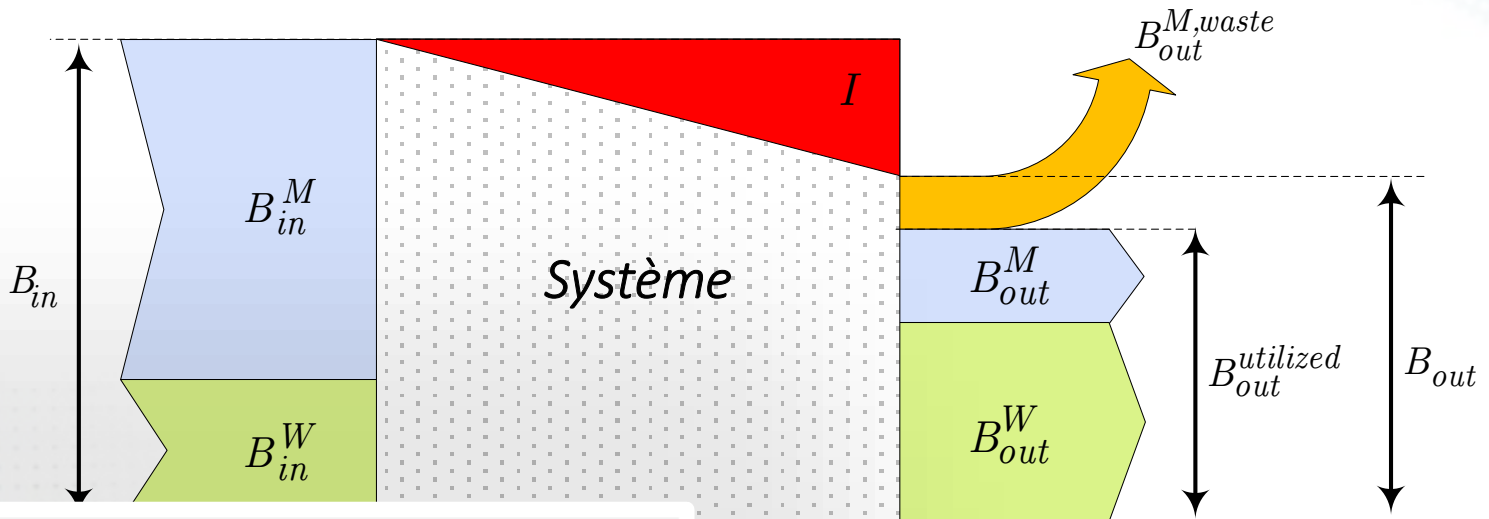
Exergie entrante = Exergie sortante « utile » + Exergie perdue + Exergie détruite

$$B_{in}^M + B_{in}^W = B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W + B_{out}^{M,waste} + I$$

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
  - Bilans exergétiques
  - Efficacités exergétiques
  - Le ternaire exergétique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

- Analyse exergétique
  - Bilans exergétiques
  - Efficacités exergétiques

↓ Diagramme de Grassmann



- Non-homogénéités (mélangeurs)
- Ecart de température (échangeurs de chaleur)
- Pertes de charge,
- Réactions chimiques, ...

Exergie perdue + Exergie détruite

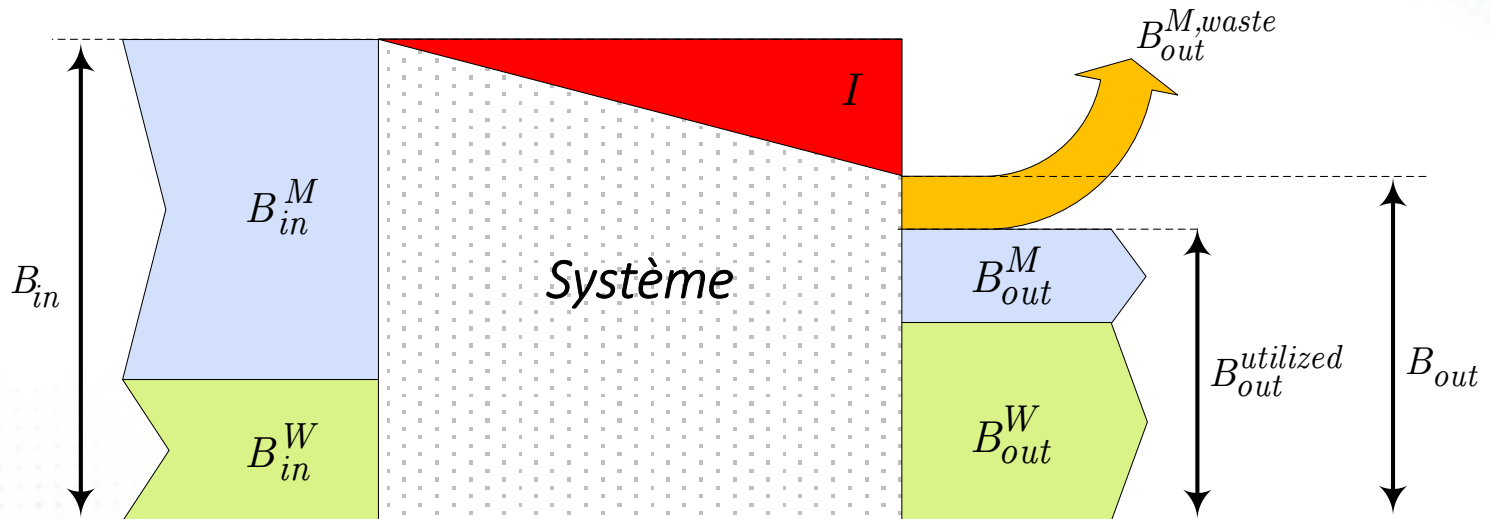
Irréversibilité  
= exergie détruite

$$B_{in}^M + B_{in}^W = B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W + B_{out}^{M,waste} + I$$

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
  - Bilans exergétiques
  - Efficacités exergétiques
  - Le ternaire exergétique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

- Analyse exergétique
  - Bilans exergétiques
  - Efficacités exergétiques

↓ Diagramme de Grassmann



Exergie entrante = Exergie sortante « utile » + Exergie perdue + Exergie détruite

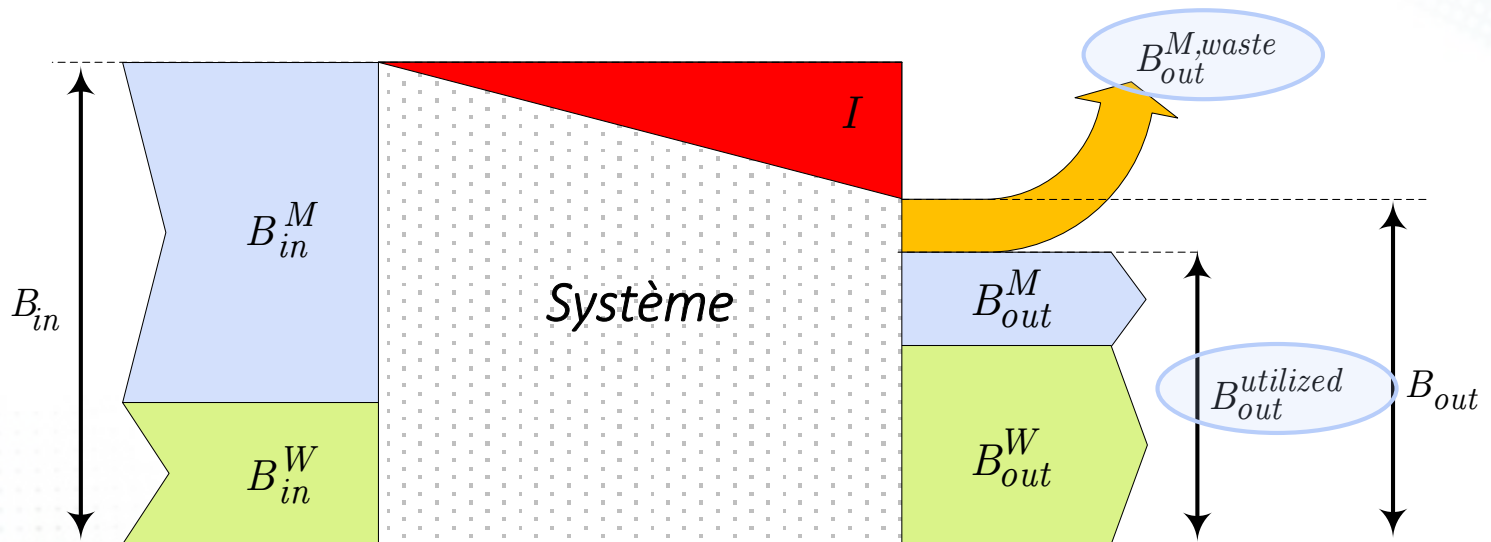
Irréversibilité = exergie détruite

$$B_{in}^M + B_{in}^W = B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W + B_{out}^{M,waste} + I$$

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
  - Bilans exergétiques
  - Efficacités exergétiques
  - Le ternaire exergétique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

- Analyse exergétique
  - Bilans exergétiques
  - Efficacités exergétiques

↓ Diagramme de Grassmann



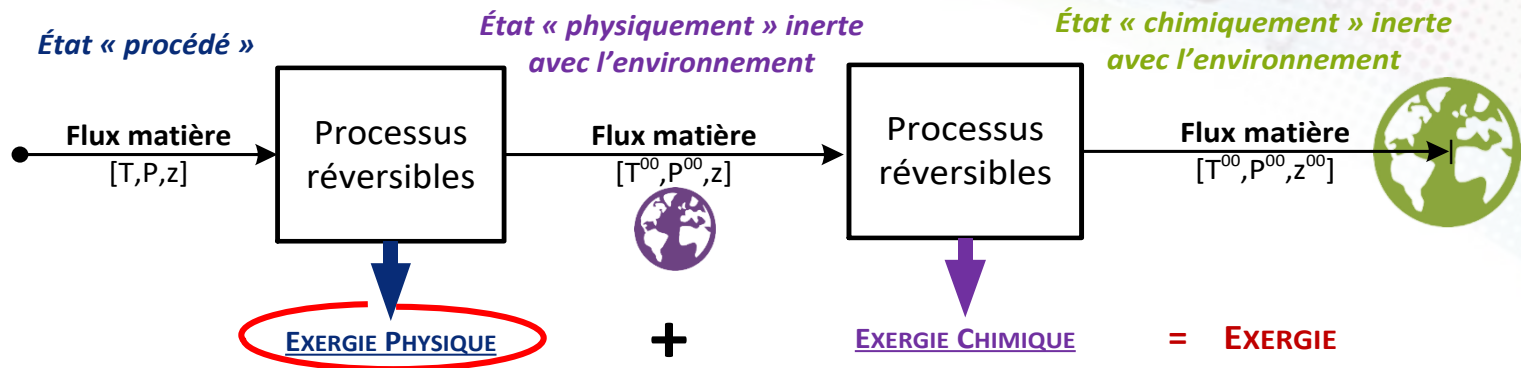
$$B_{in}^M + B_{in}^W = B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W + B_{out}^{M,waste} + I$$



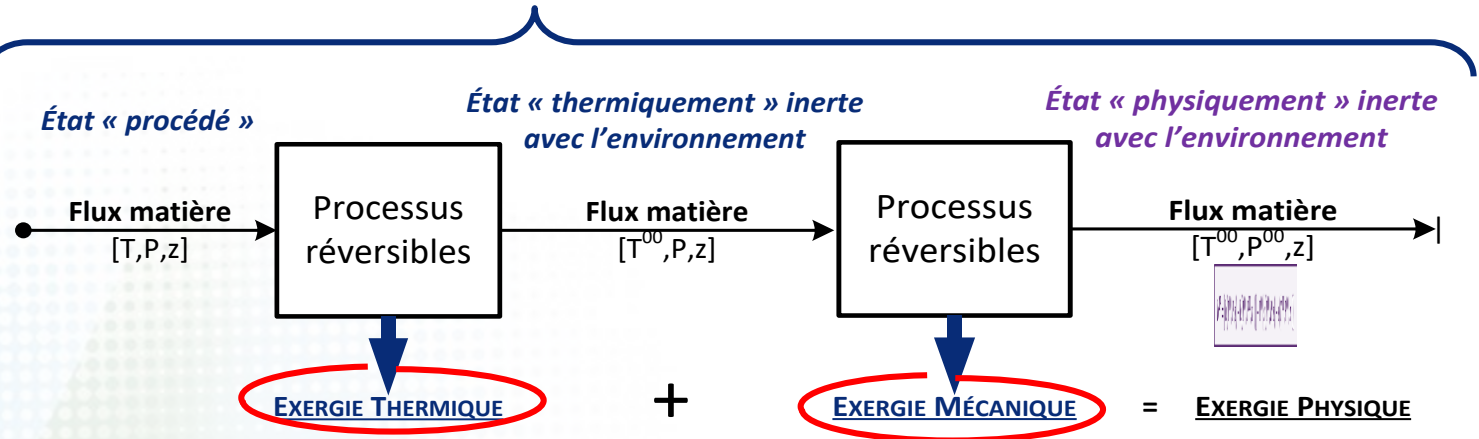
- Distinguer les courants de pertes et les courants « utiles »
- Calculer l'exergie d'un flux matière

# COoPeRE 3. Exergie d'un flux matière

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Bilans exergétiques
- Efficacités exergétiques
- Le ternaire exergétique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives



$$b^{ph} = [h(T, P, z) - h(T^{00}, P^{00}, z)] - T^{00}[s(T, P, z) - s(T^{00}, P^{00}, z)]$$

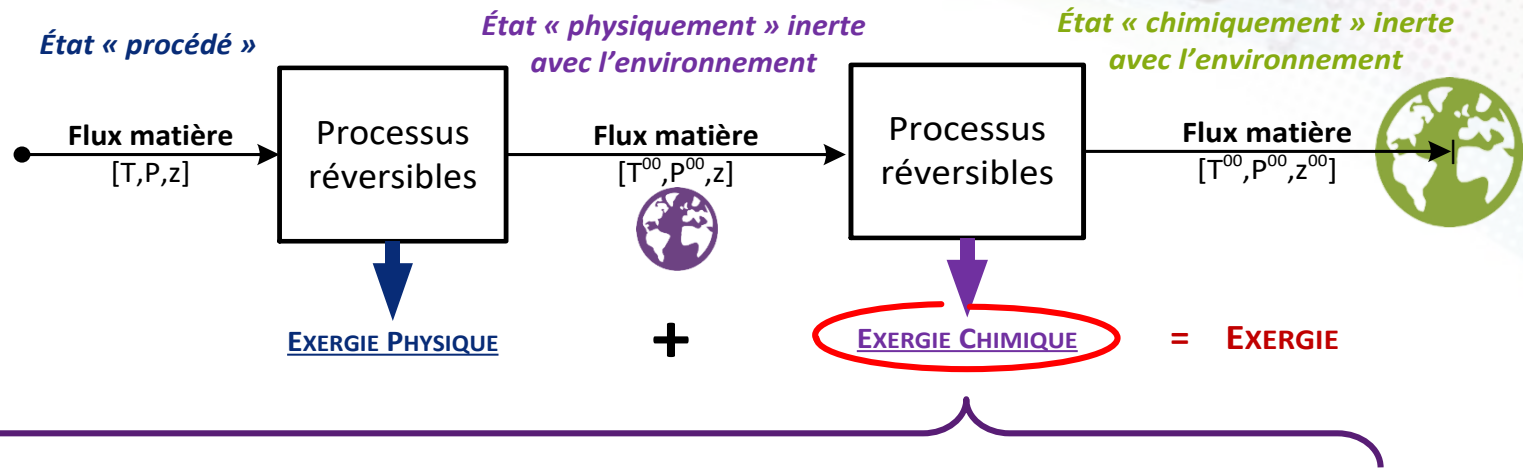


$$b^{dT} = [h(T, P, z) - h(T^{00}, P, z)] - T^{00}[s(T, P, z) - s(T^{00}, P, z)]$$

$$b^{dP} = [h(T^{00}, P, z) - h(T^{00}, P^{00}, z)] - T^{00}[s(T^{00}, P, z) - s(T^{00}, P^{00}, z)]$$



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
  - Bilans exergetiques
  - Efficacités exergetiques
  - Le ternaire exergetique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives



$$b^{ch}(T, P, z) = h(T^{00}, P^{00}, z) - T^{00} \cdot s(T^{00}, P^{00}, z) - \sum_{i=1}^{N_C} z_i \cdot \left[ \sum_{j=1}^{N_{ref}} v_{ij} (h_j(T^{00}, P^{00}) - T^{00} \cdot s_j(T^{00}, P^{00})) \right]$$

- Approches thermodynamiques homogènes (par équations d'état)

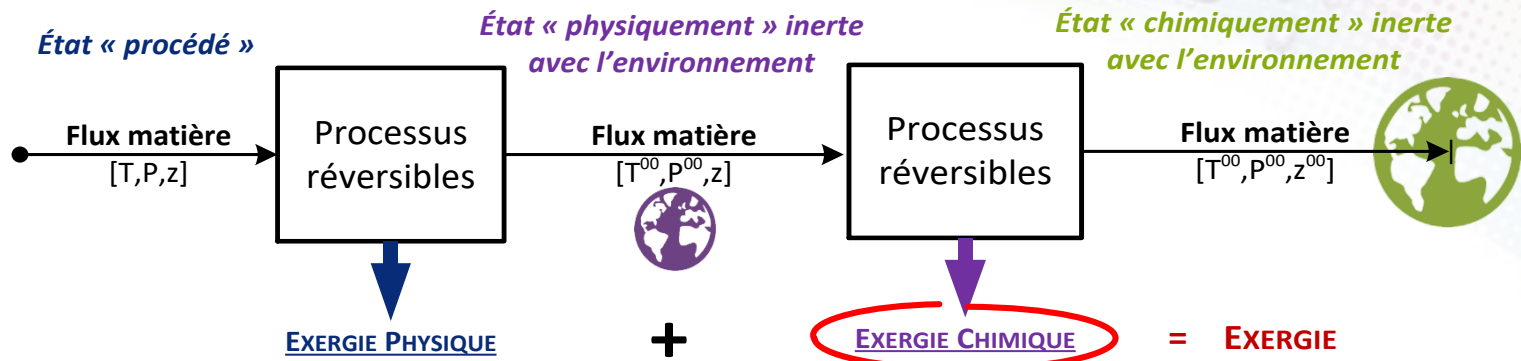
$$b^{ch,\Phi}(T, P, z) = \sum_{i=1}^{N_C} z_i \cdot [b_i^{0,*} + R \cdot T^{00} \cdot \ln(z_i)] + (g^\Phi - g^*)_{T^{00}, P^{00}, z}$$

- Approches thermodynamiques hétérogènes (liquide -> par modèle à coefficients d'activité) (vapeur -> par équation d'état)

$$b^{ch,v}(T, P, y) = \sum_{i=1}^{N_C} y_i \cdot [b_i^{0,*} + R \cdot T^{00} \cdot \ln(y_i)] + (g^\Phi - g^*)_{T^{00}, P^{00}, y}$$

$$b^{ch,l}(T, P, x) = \sum_{i=1}^{N_C} x_i \cdot [b_i^{0,l} + R \cdot T^{00} \cdot \ln(x_i)] + g^E(T^{00}, P^{00}, x)$$

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
  - Bilans exergétiques
  - Efficiacités exergétiques
  - Le ternaire exergétique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives



$$b^{ch}(T, P, z) = h(T^{00}, P^{00}, z) - T^{00} \cdot s(T^{00}, P^{00}, z) - \sum_{i=1}^{N_C} z_i \cdot \left[ \sum_{j=1}^{N_{ref}} \nu_{ij} (h_j(T^{00}, P^{00}) - T^{00} \cdot s_j(T^{00}, P^{00})) \right]$$

- Approches thermodynamiques homogènes (par équations d'état)

$b_i^{0,*}, b_i^{0,l}$  = exergies chimiques standard  
 → Valeurs tabulées pour les corps purs

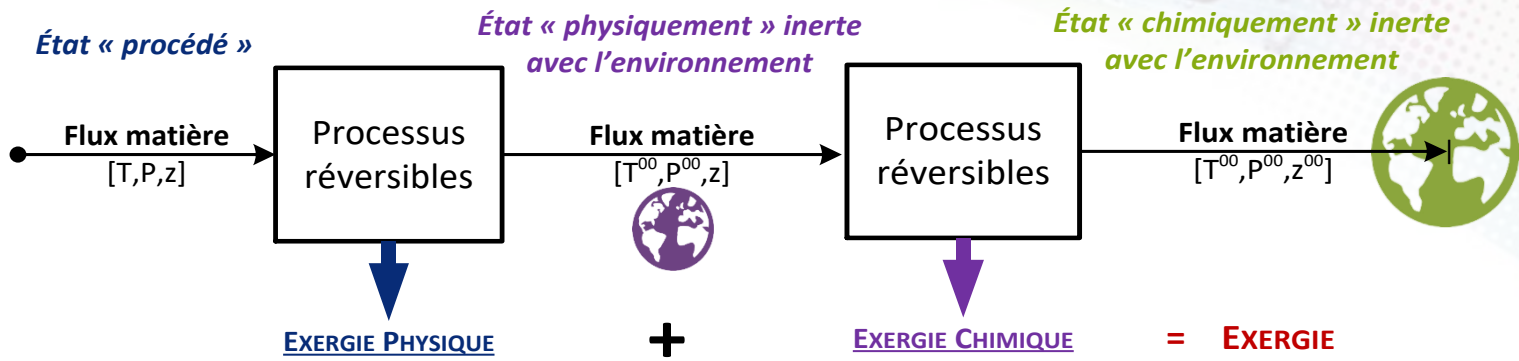
$$b^{ch,\Phi}(T, P, z) = \sum_{i=1}^{N_C} z_i \cdot [b_i^{0,*} + R \cdot T^{00} \cdot \ln(z_i)] + (g^\Phi - g^*)_{T^{00}, P^{00}, z}$$

$$b^{ch,v}(T, P, y) = \sum_{i=1}^{N_C} y_i \cdot [b_i^{0,*} + R \cdot T^{00} \cdot \ln(y_i)] + (g^\Phi - g^*)_{T^{00}, P^{00}, y}$$

$$b^{ch,l}(T, P, x) = \sum_{i=1}^{N_C} x_i \cdot [b_i^{0,l} + R \cdot T^{00} \cdot \ln(x_i)] + g^E(T^{00}, P^{00}, x)$$

# COoPeRE 3. Exergie d'un flux matière

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
  - Bilans exergétiques
  - Efficacités exergétiques
  - Le ternaire exergétique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives



	A	B	C	D
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				

Somme			
	A	B	C
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			

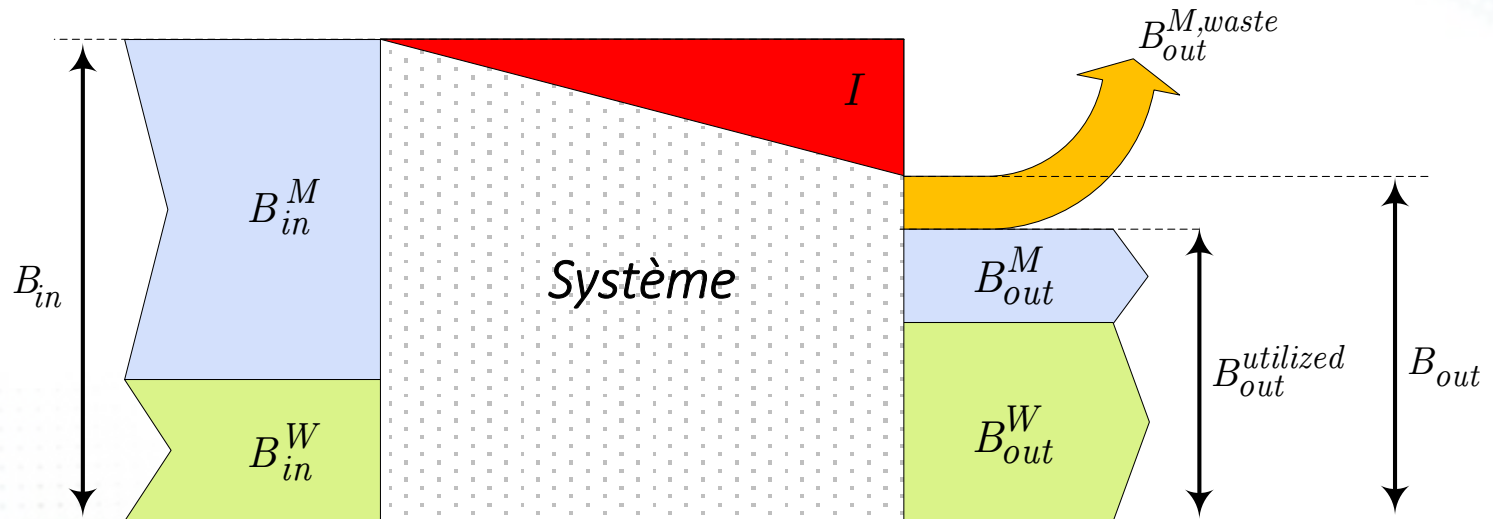
Simulis Calculator Exergy			
	Unit	Value	Unit
Exergy			
Flow rate	kmol/h	1000	
#	cmpd	z mol	
1	OXYGEN	0.21	
2	NITROGEN	0.79	
Temperature	°C	50	
Pressure	atm	5	
Physical Exergy	J/mol	4018.712652	
Thermal Exergy	J/mol	28.99377556	
Mechanical Exergy	J/mol	3989.718877	
Chemical Exergy	J/mol		
=stCALChemicalExergy(C7:D14;D15:D12;0;1;1;0)			

	Unit	Value
Physical Exergy	kW	1116.30907
Thermal Exergy	kW	8.053826545
Mechanical Exergy	kW	1108.255244
Chemical Exergy	kW	21.78506357

La méthodologie COoPeRE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
<b>Analyse du procédé complet</b>
• Bilans exergétiques
• Efficacités exergétiques
• Le ternaire exergétique
• Application
Rétro-conception du procédé
Conclusions et perspectives

↓ Diagramme de Grassmann



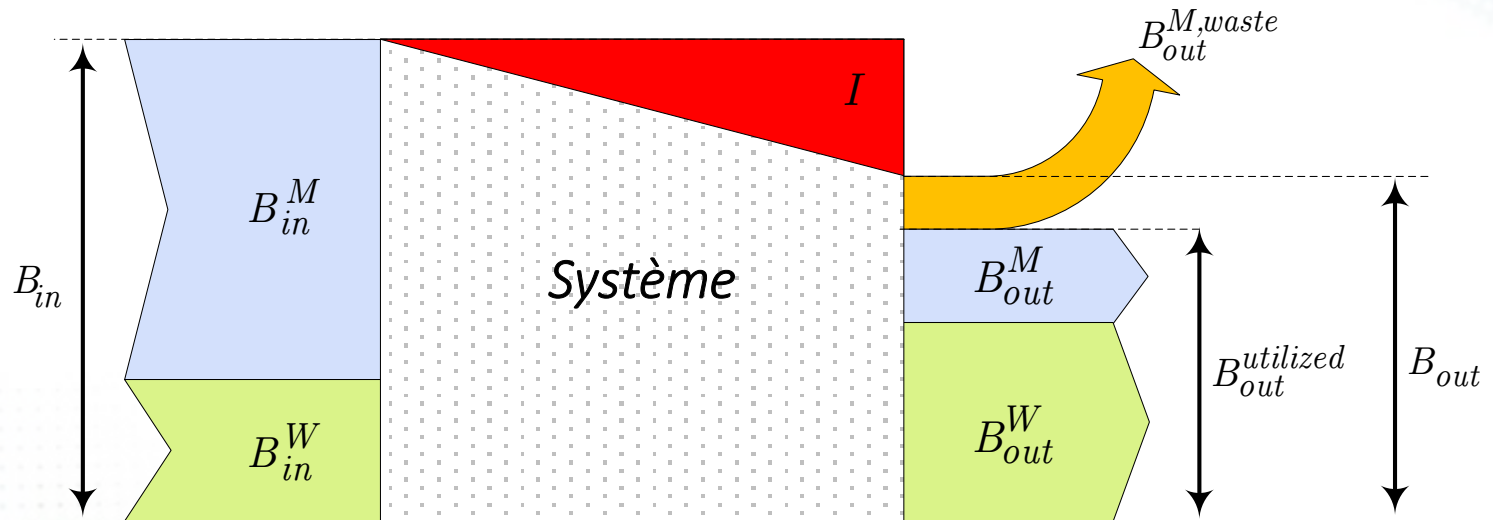
$$B_{in}^M + B_{in}^W = B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W + B_{out}^{M,waste} + I$$



- Distinguer **les courants de pertes** et les courants « utiles »
- Calculer l'exergie d'un **flux matière**
- Calculer l'exergie d'un **flux travail**

La méthodologie COoPeRE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
<b>Analyse du procédé complet</b>
• Bilans exergetiques
• Efficacités exergetiques
• Le ternaire exergetique
• Application
Rétro-conception du procédé
Conclusions et perspectives

↓ Diagramme de Grassmann



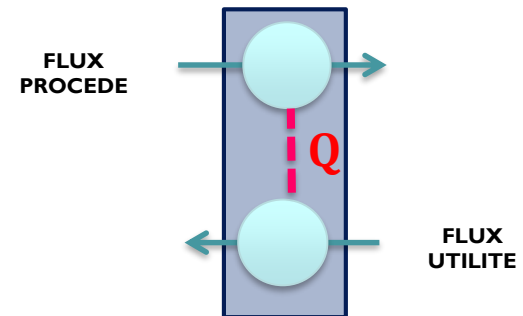
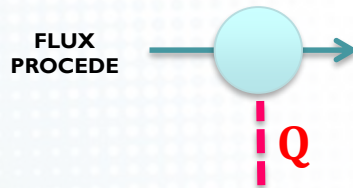
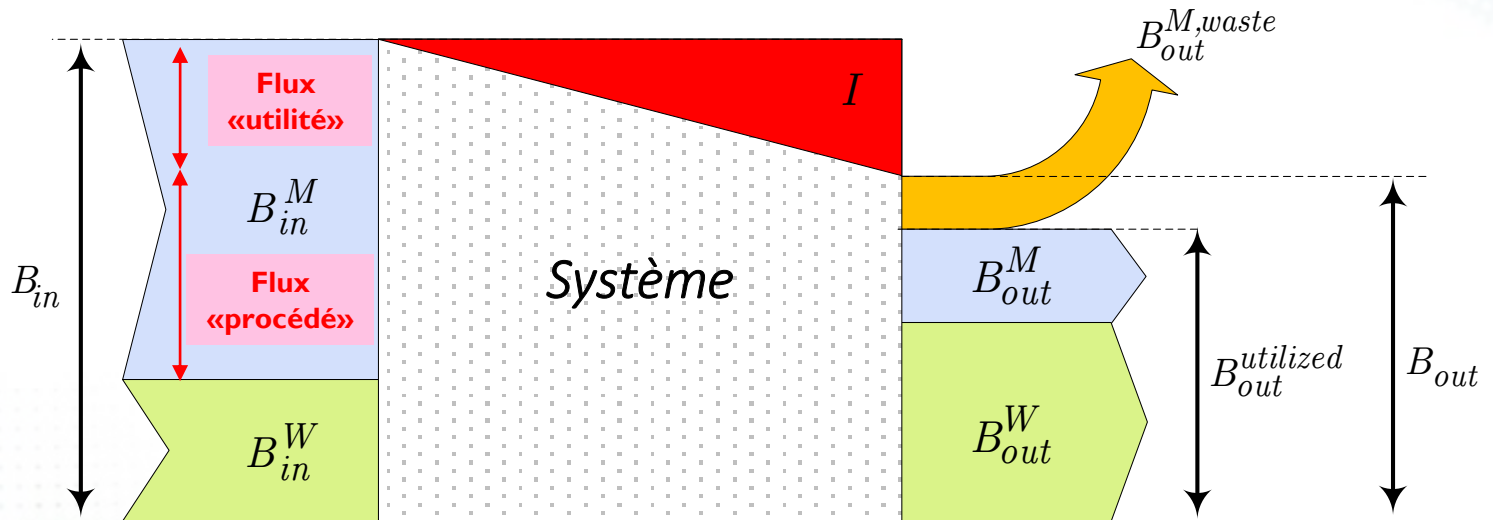
L'exergie est définie comme le maximum de travail théorique....

$$B^W = W$$



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
  - Bilans exergetiques
  - Efficacités exergetiques
  - Le ternaire exergetique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

↓ Diagramme de Grassmann



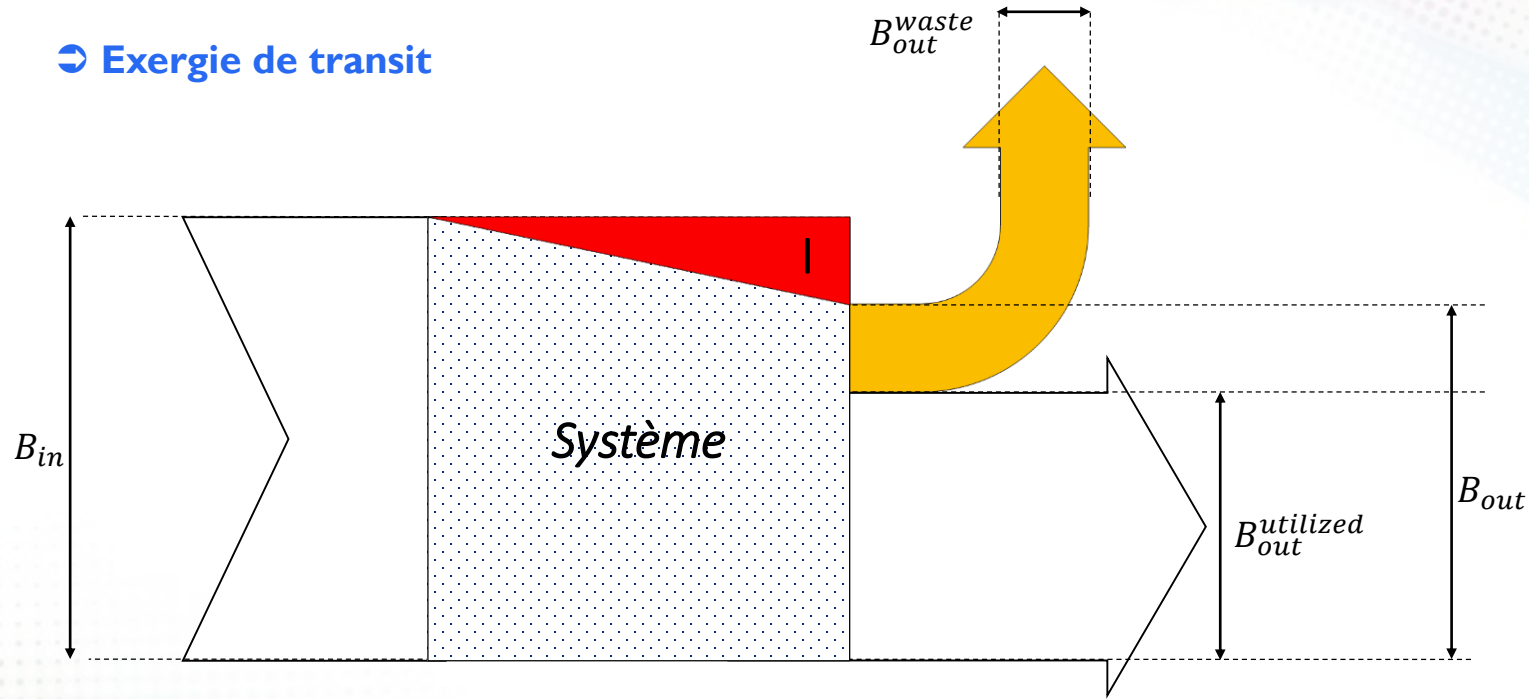
**Flux de chaleur représenté par des flux matière « utilité »**



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Bilans exergetiques
- Efficacités exergetiques
- Le ternaire exergetique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

Efficacité simple peu informative

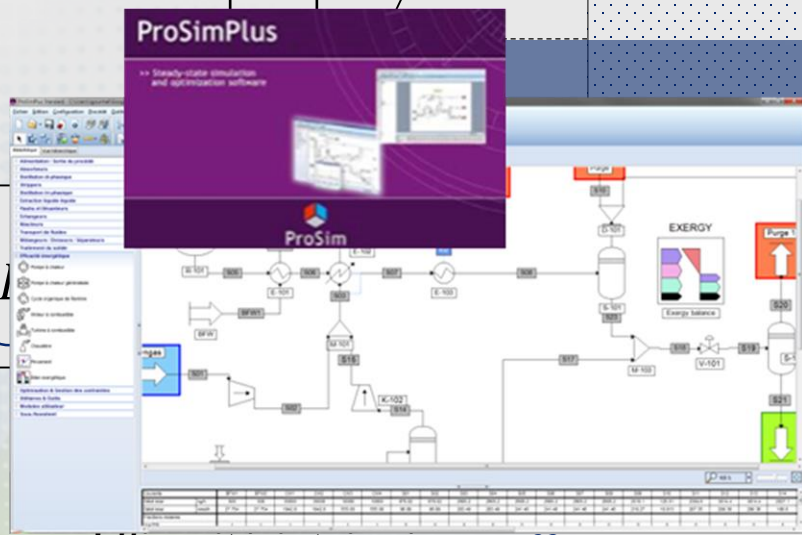
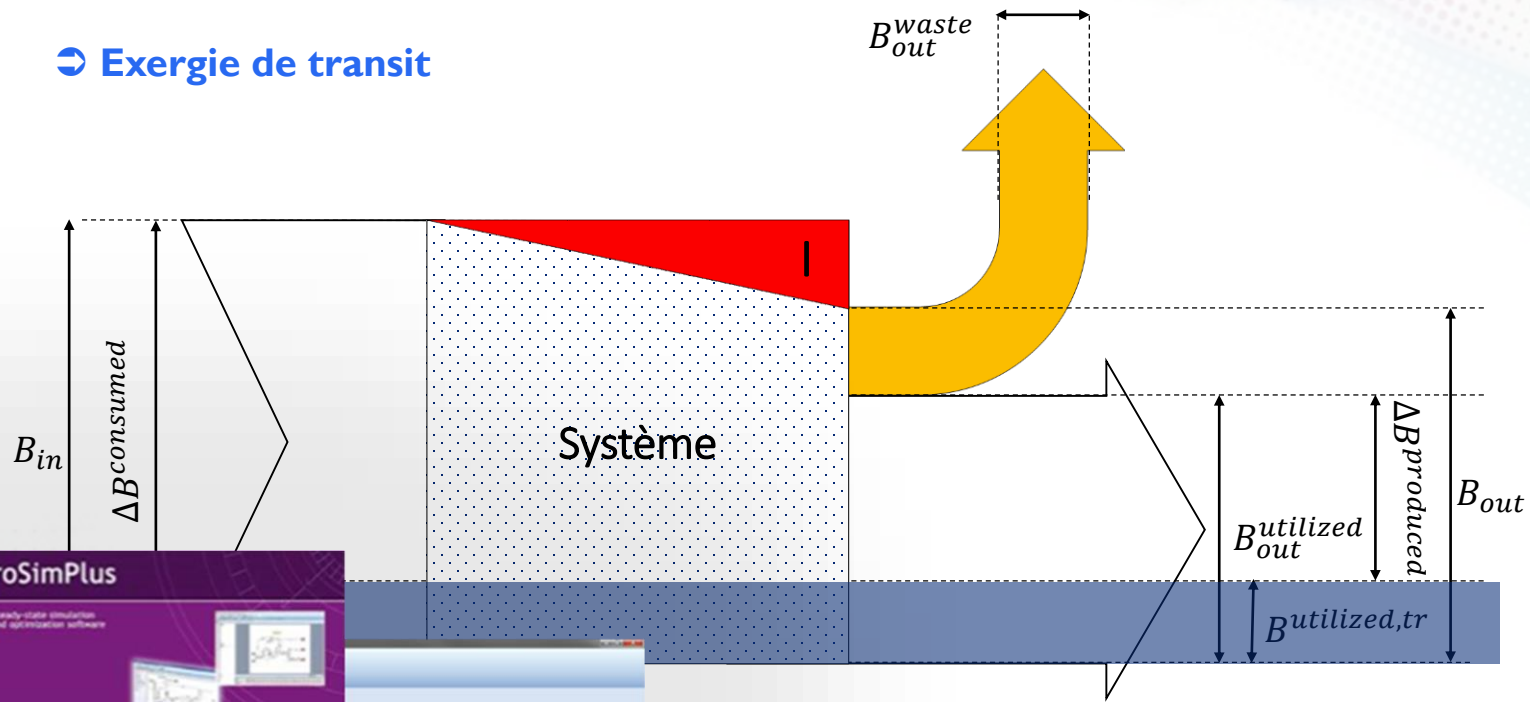
## Exergie de transit



$$B_{in}^M + B_{in}^W = B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W + B_{out}^{M,waste} + I$$

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Bilans exergetiques
- Efficacités exergetiques
- Le ternaire exergetique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

## Exergie de transit



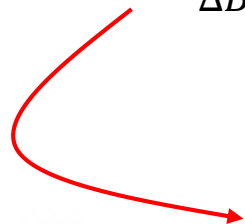
$$\Delta B^{produced} = + B_{out}^W - B_{utilized,tr} + B_{out}^{M,waste} + I$$

Efficacite intrinseque :  $\eta = \frac{\Delta B^{produced}}{\Delta B^{consumed}} = \frac{B_{in}^M + B_{in}^W - B_{utilized,tr}}{B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W - B_{utilized,tr}}$

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
  - Bilans exergetiques
  - Efficacités exergetiques
  - Le ternaire exergetique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

$$B_{in}^M + B_{in}^W - B^{utilized,tr} = B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W - B^{utilized,tr} + B_{out}^{M,waste} + I$$

$$\Delta B^{consumed} = \Delta B^{produced} + B_{out}^{M,waste} + I$$



$$1 = \frac{\Delta B^{produced}}{\Delta B^{consumed}} + \frac{B_{out}^{M,waste}}{\Delta B^{consumed}} + \frac{I}{\Delta B^{consumed}}$$

**Efficacité Intrinsèque (IE)**

**Pertes Intrinsèques (IW)**

**Irreversibilité Intrinsèque (II)**

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
  - Bilans exergetiques
  - Efficacités exergetiques
  - Le ternaire exergetique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

$$IE = \frac{\Delta B^{produced}}{\Delta B^{consumed}}$$

Opération efficace

$$A: \begin{cases} IE = 30\% \\ II = 60\% \\ IW = 10\% \end{cases}$$

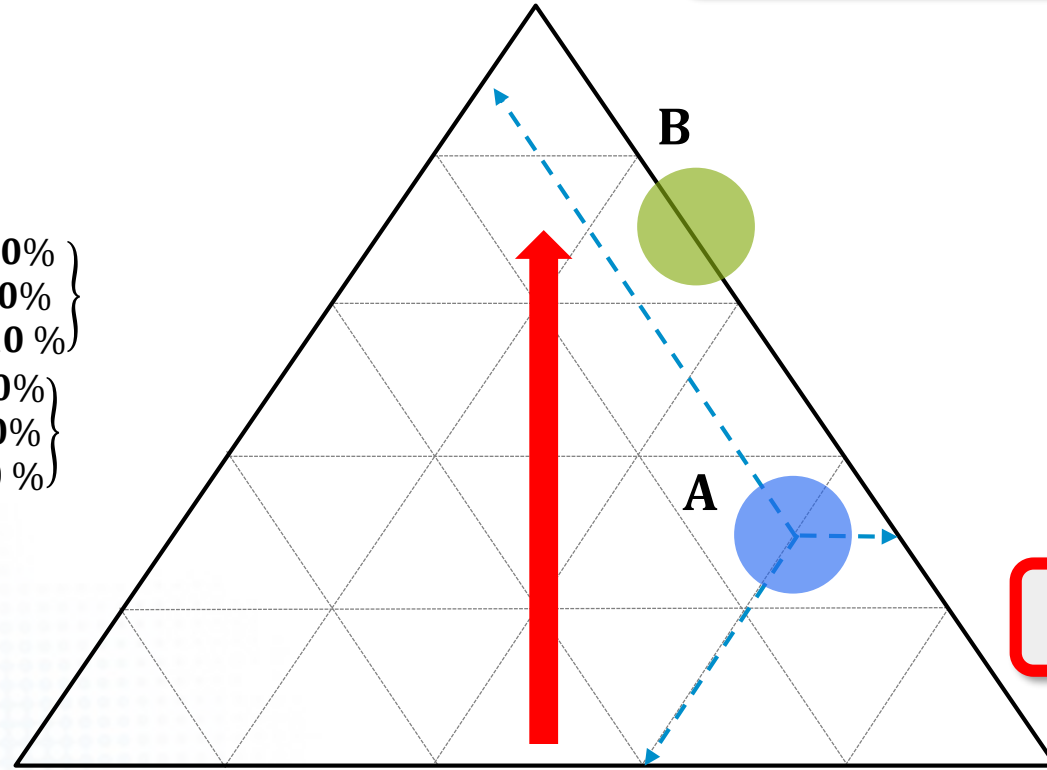
$$B: \begin{cases} IE = 70\% \\ II = 30\% \\ IW = 0\% \end{cases}$$

Valorisation des pertes externes

Réduction des irréversibilités

$$IW = \frac{B_{out}^{waste}}{\Delta B^{consumed}}$$

$$II = \frac{I}{\Delta B^{consumed}}$$



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
  - Bilans exergetiques
  - Efficacités exergetiques
  - Le ternaire exergetique
  - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

$$IE = \frac{\Delta B^{produced}}{\Delta B^{consumed}}$$

Opération efficace

$$(I + B_{out}^{waste})_A \gg (I + B_{out}^{waste})_B$$

$$A: \begin{cases} IE = 30\% \\ II = 60\% \\ IW = 10\% \end{cases}$$

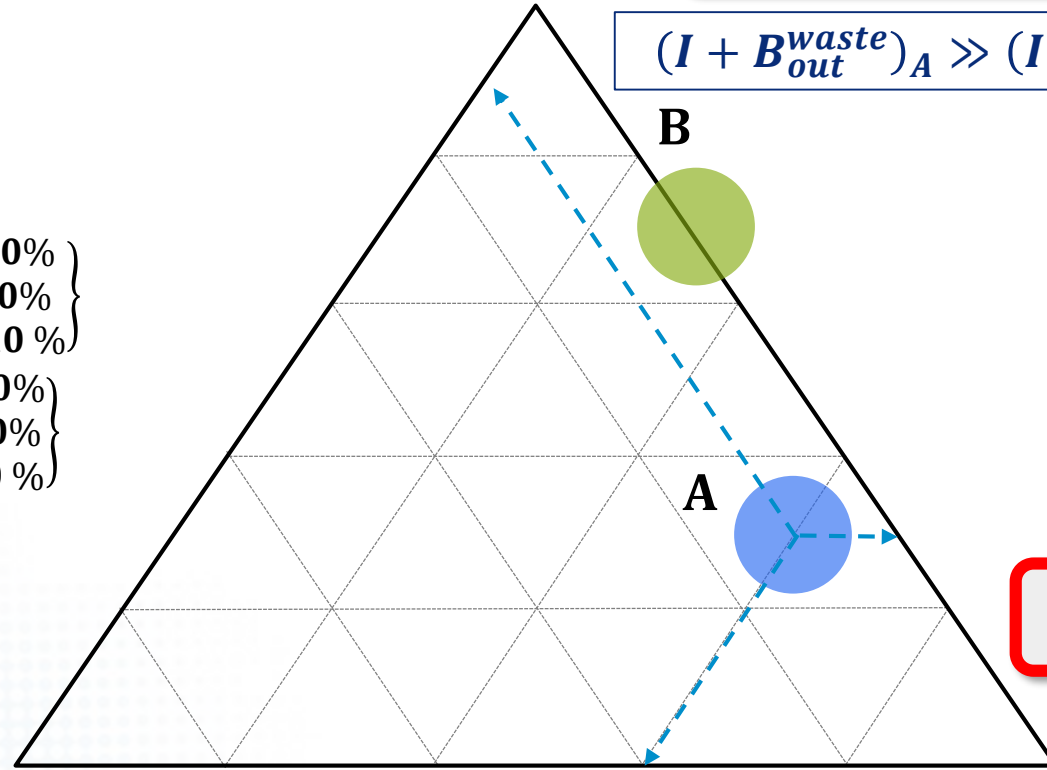
$$B: \begin{cases} IE = 70\% \\ II = 30\% \\ IW = 0\% \end{cases}$$

Valorisation des pertes externes

Réduction des irréversibilités

$$= \frac{IW}{\Delta B^{consumed}}$$

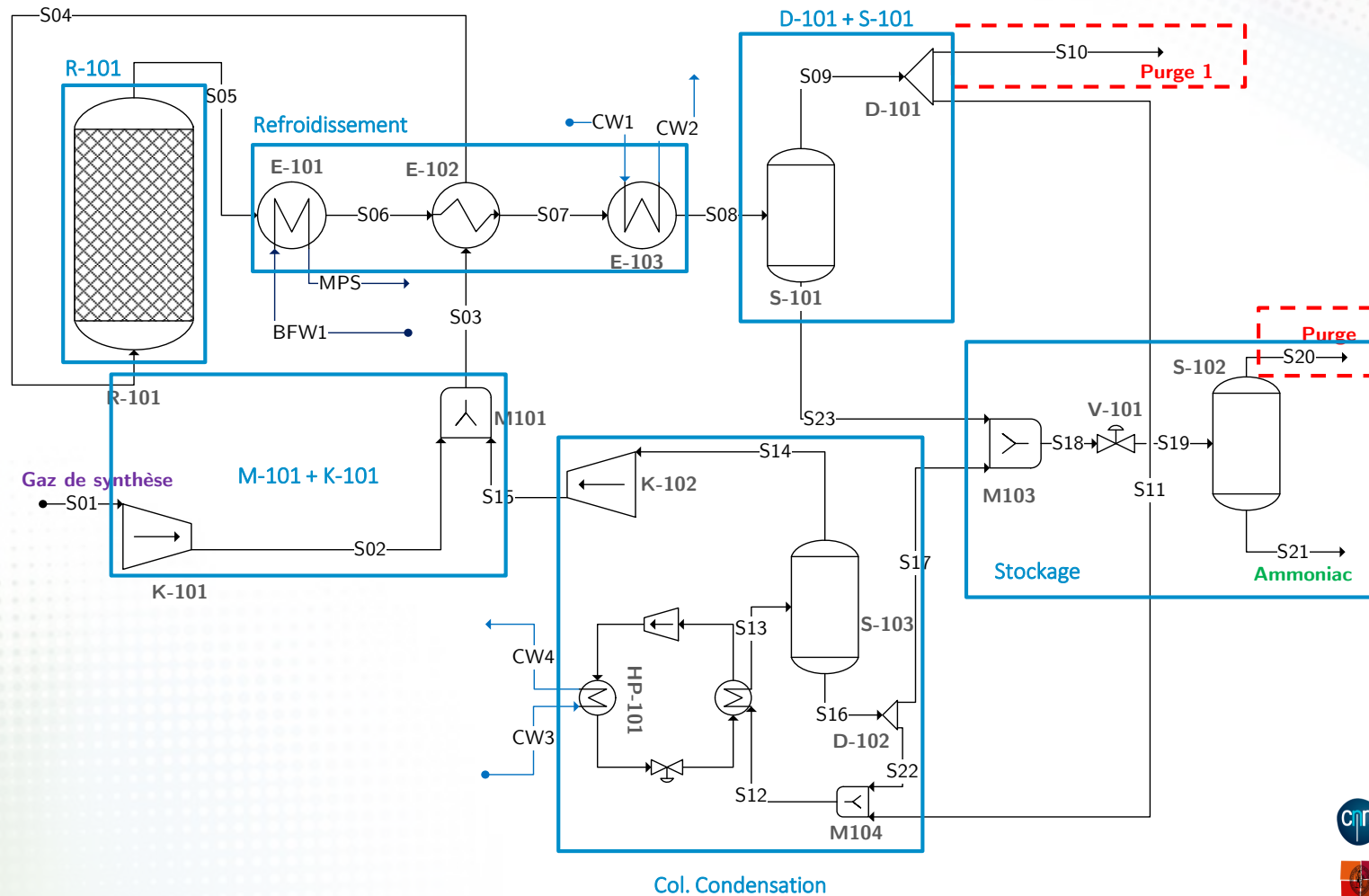
$$= \frac{II}{I}$$







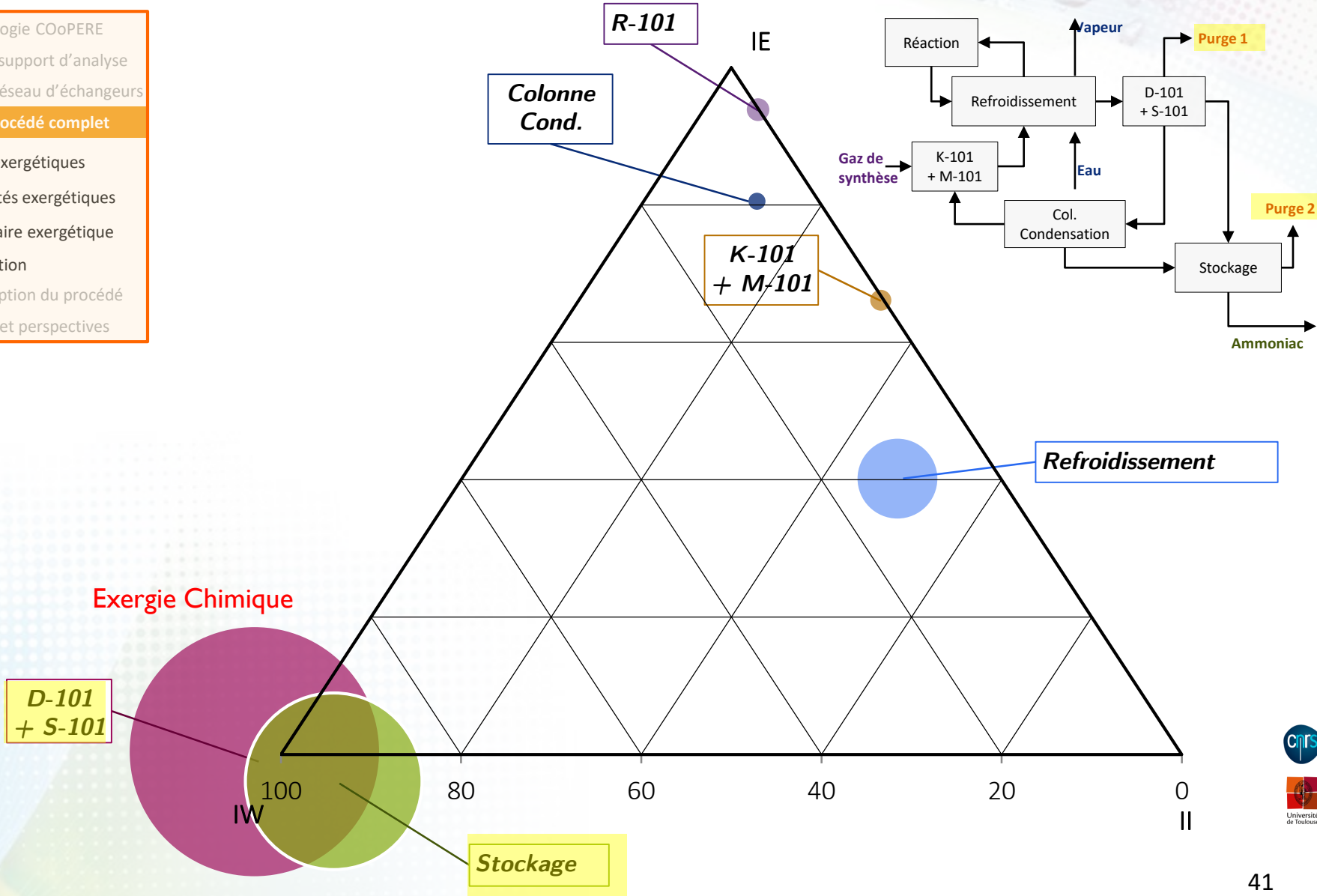
La méthodologie COoPeRE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
<b>Analyse du procédé complet</b>
--- Bilans exergétiques
--- Efficacités exergétiques
--- Le ternaire exergétique
● Application
Rétro-conception du procédé
Conclusions et perspectives







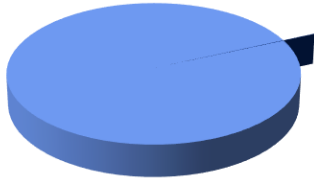
- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
- Bilans exergétiques
- Efficacités exergétiques
- Le ternaire exergétique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives





- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
- Bilans exergétiques
- Efficacités exergétiques
- Le ternaire exergétique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

D-101 + S-101 :



- Pertes thermiques (kW)
- Pertes mécaniques (kW)
- Valoriser la purge (mécaniquement ?)**

**R-101**

**Colonne Cond.**

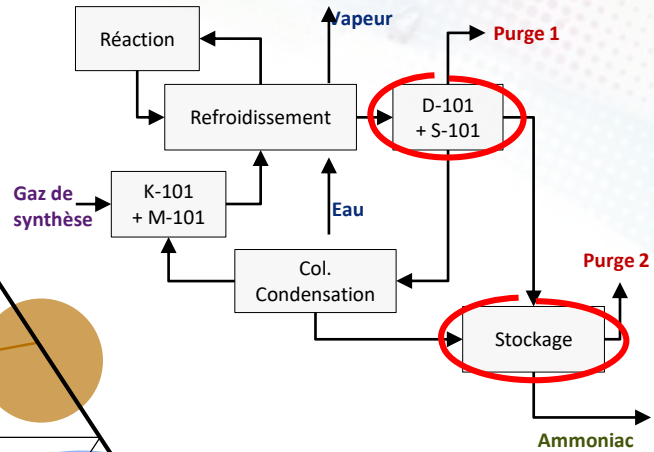
**K-101 + M-101**

**Refroidissement**

**Refroidissement : Fortes irréversibilités → Réduire  $\Delta T$**

**D-101 + S-101**

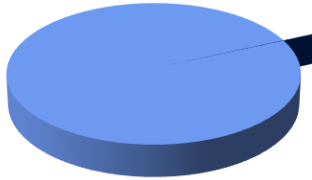
**Stockage**





- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Bilans exergétiques
- Efficacités exergétiques
- Le ternaire exergétique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

D-101 + S-101 :



- Pertes thermiques (kW)
- Pertes mécaniques (kW)

**Valoriser la purge (mécaniquement ?)**

R-101

Colonne Cond.

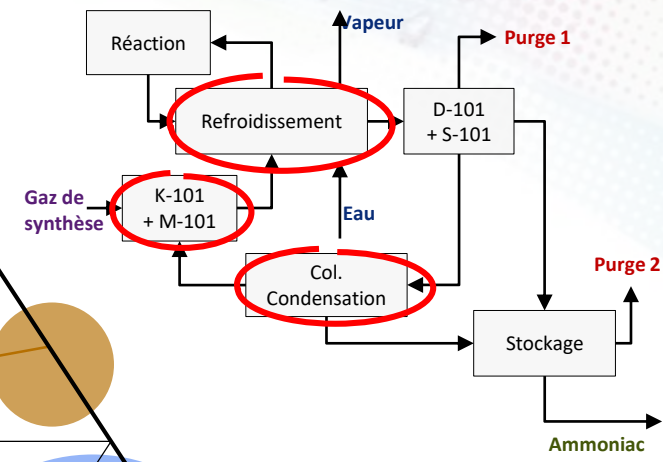
K-101 + M-101

D-101 + S-101

K-101 + M-101 :  
**Etager le compresseur**  
**Homogénéiser les alimentations de M-101**



Stockage



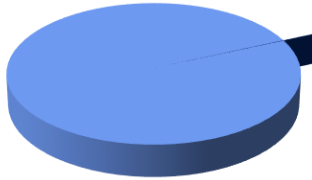
Refroidissement  
 Refroidissement :

**Fortes irréversibilités  
 → Réduire ΔT**



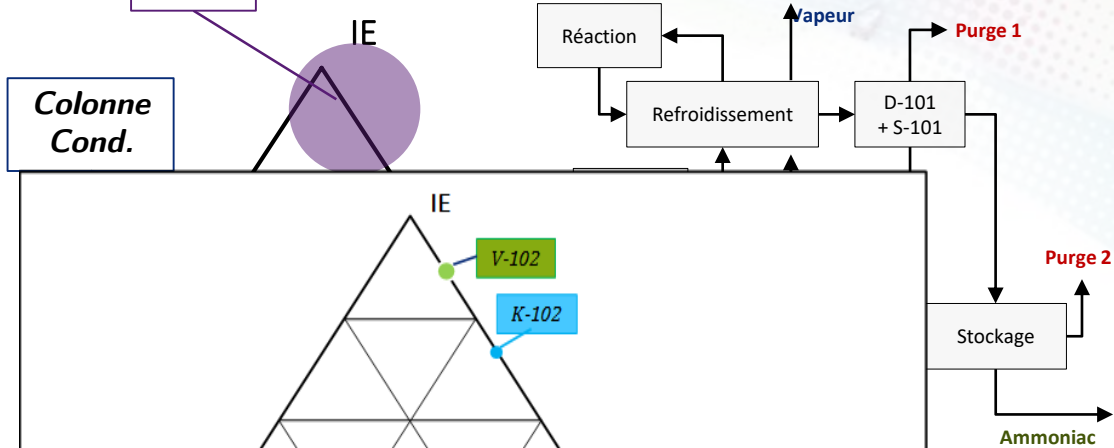
- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
- Bilans exergétiques
- Efficacités exergétiques
- Le ternaire exergétique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

D-101 + S-101 :

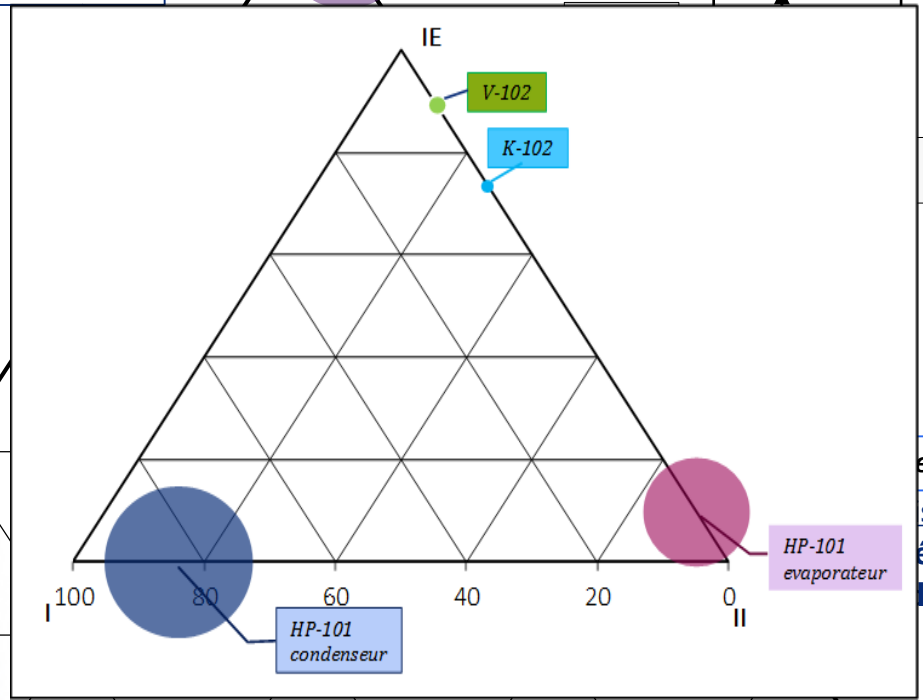


■ Pertes thermiques (kW)  
 ■ Pertes mécaniques (kW)  
**Valoriser la purge (mécaniquement ?)**

**R-101**



**Colonne Cond.**



K-101 + M-101 :  
**Etager le compresseur**  
**Homogénéiser les alimentations de M-101**

**D-101 + S-101**

Colonne Cond. :  
**Réduire ΔT au niveau de l'évaporateur et du condenseur**

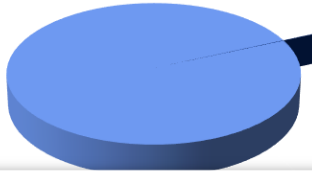
**Stockage**

ent  
 ssement :  
 éversibilités  
 uire ΔT



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Bilans exergétiques
- Efficacités exergétiques
- Le ternaire exergétique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

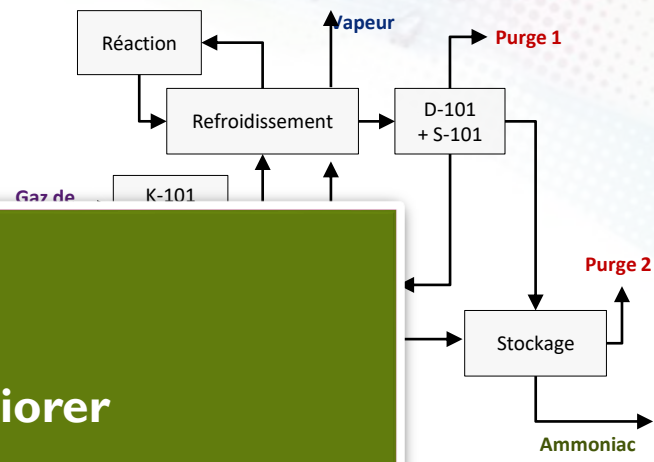
D-101 + S-101 :



R-101

IE

Colonne Cond.



## Zones des procédés à améliorer

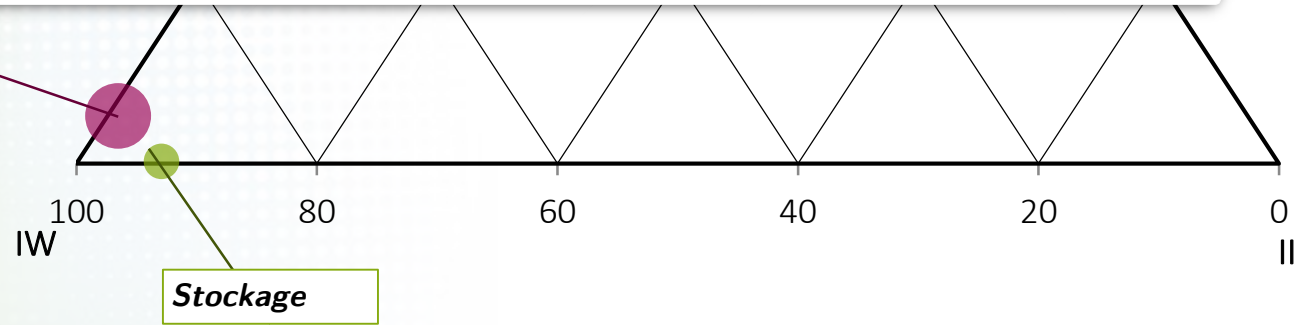
1. Refroidissement
2. Compression + Mélange
3. Purge
4. Colonne de condensation

K-101 + M-101  
**Etager le comp**  
**Homogénéi**  
**alimentations**

sement  
 s irréversibilités  
**Réduire ΔT**

D-101 + S-101

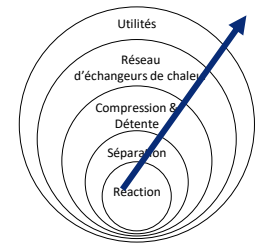
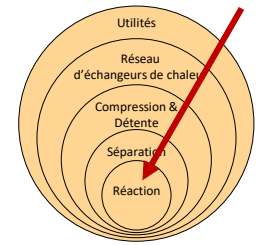
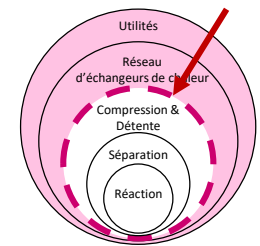
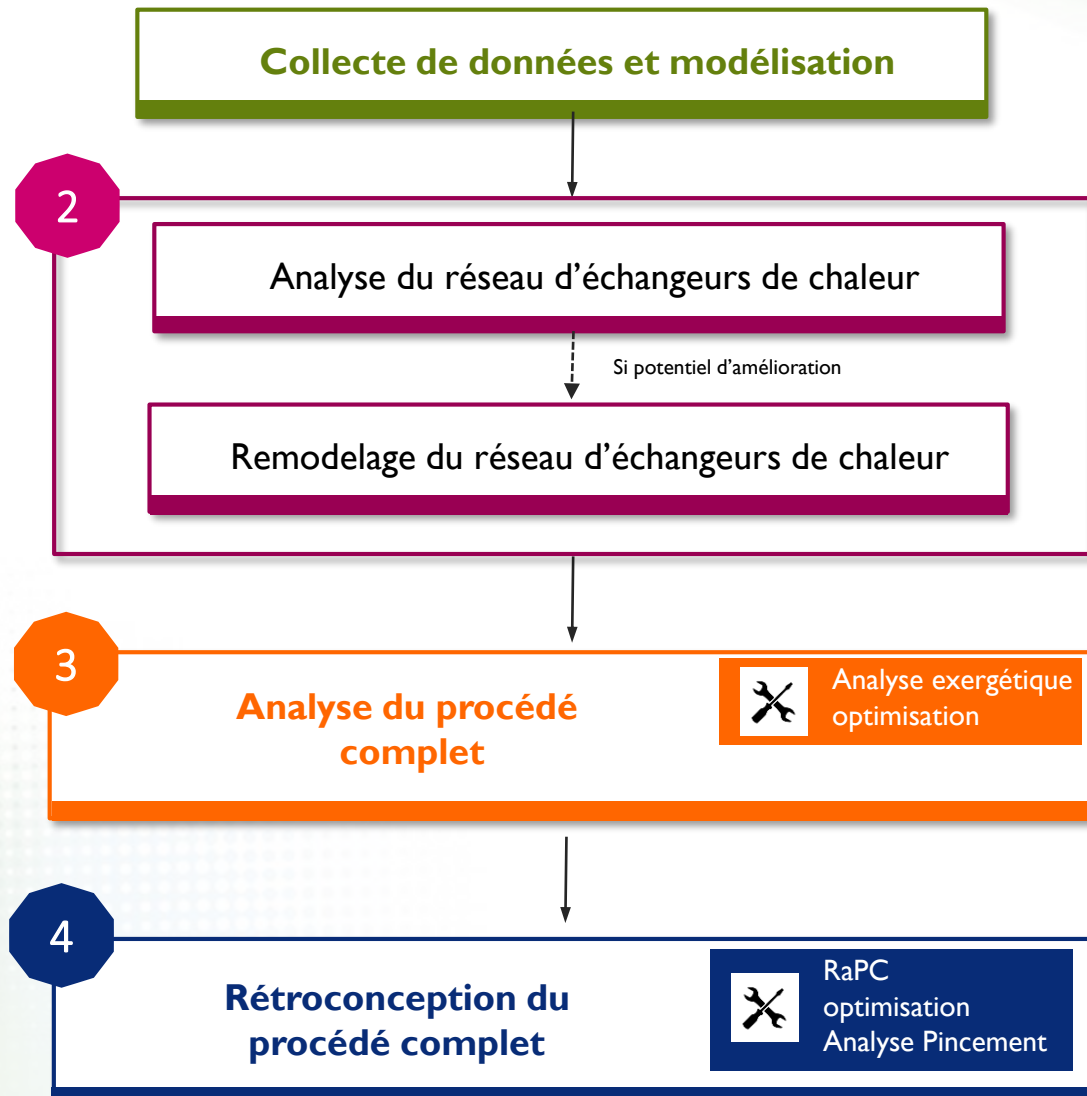
Colonne Cond. :  
**Réduire ΔT au niveau de l'évaporateur et du condenseur**





**Introduction**

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRE





La méthodologie COoPeRE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
Analyse du procédé complet
<b>Rétro-conception du procédé</b>
• Méthodologie générale
- RàPC : modifications locales
- Synthèse d'alternatives
- Application
Conclusions et perspectives

3.1

## Propositions de modifications locales du procédé

- Modifications structurelles et/ou opératoires
- Valorisation des courants de pertes externes



**Raisonnement à Partir de Cas**

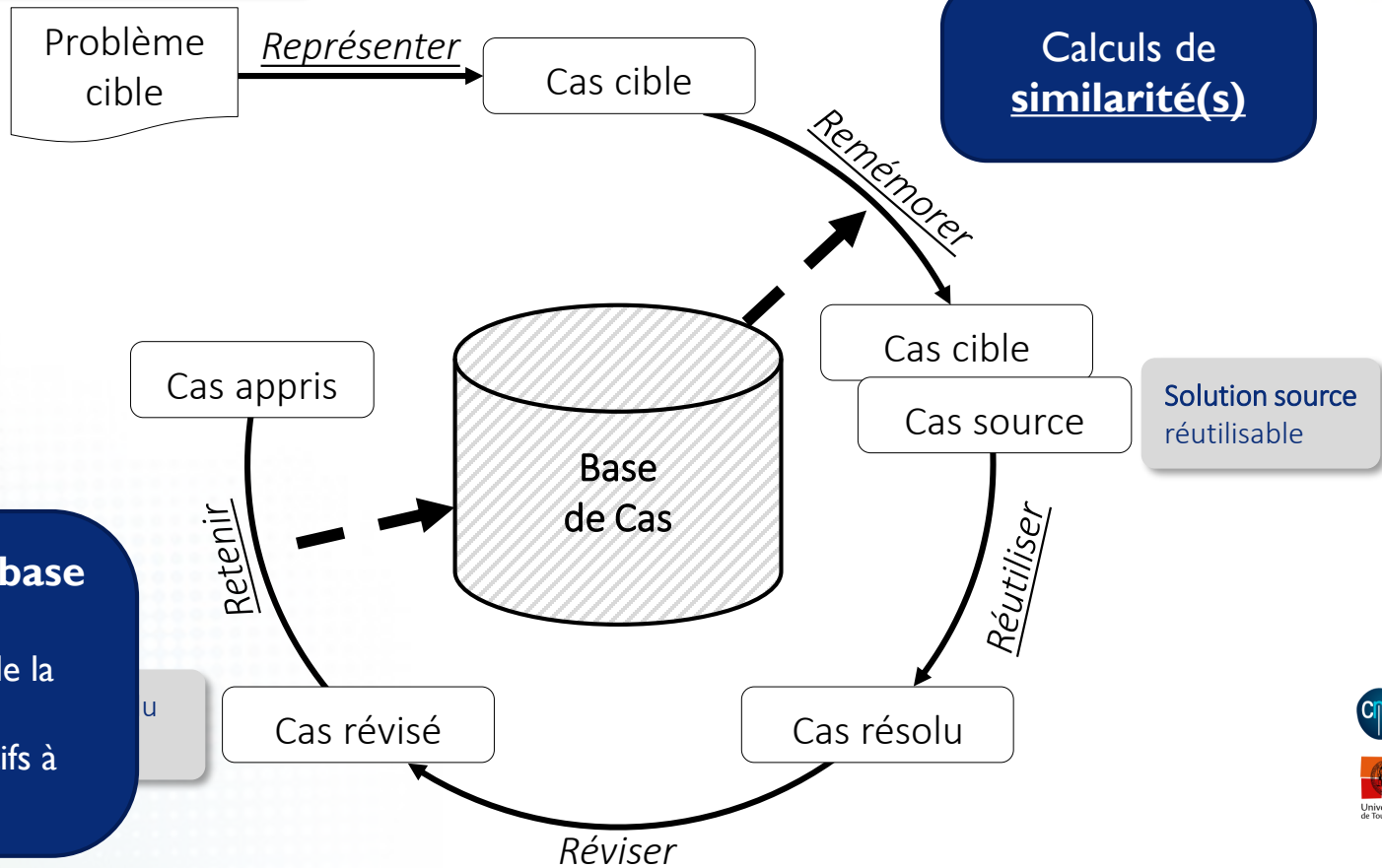
- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé**
  - Méthodologie générale
  - RàPC : modifications locales**
  - Synthèse d'alternatives
  - Application
- Conclusions et perspectives

## Raisonnement à partir de cas (RàPC) : Principe

Un ou plusieurs objectifs

- Refroidir
- Mélanger
- Valoriser

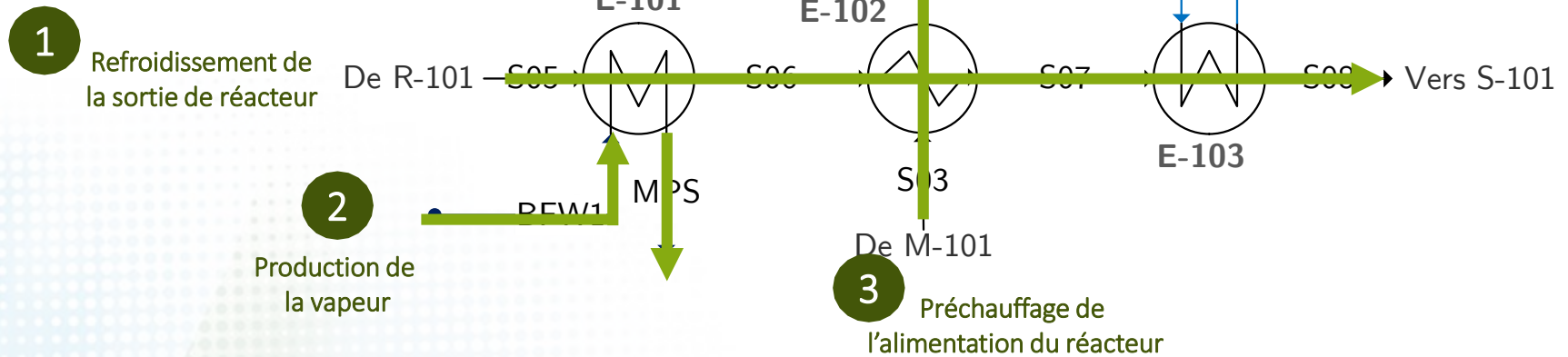
$$\text{Similarité}(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i \cdot \text{Similarité}(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^N \omega_i}$$



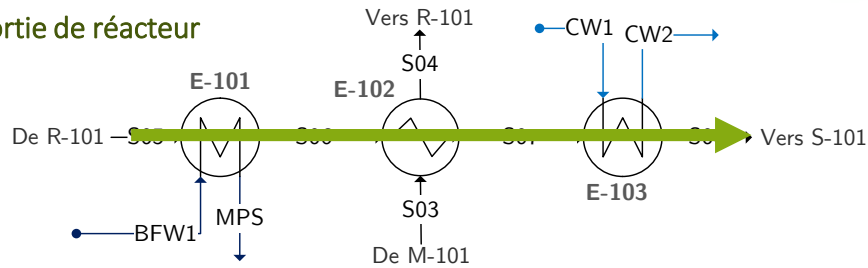


## Zones des procédés à améliorer I. Refroidissement

La méthodologie COoPERE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
Analyse du procédé complet
<b>Rétro-conception du procédé</b>
- Méthodologie générale
- RàPC : modifications locales
- Synthèse d'alternatives
- Application
Conclusions et perspectives



## 1 Refroidissement de la sortie de réacteur

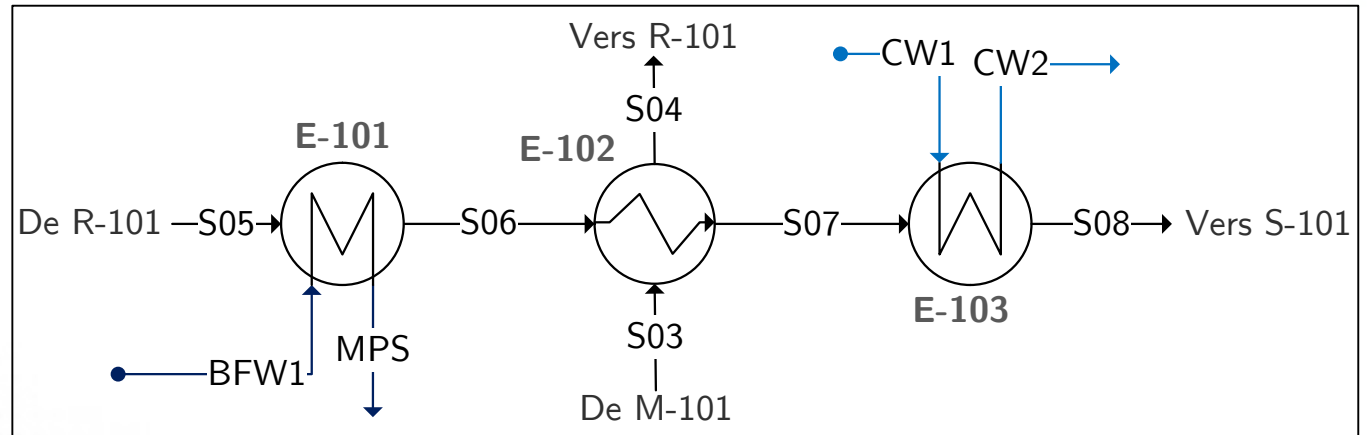


	Problème Cible	Cas similaires	
		<i>Production méthanol</i>	<i>Chaudière</i>
<b>Fonction principale</b>	Changement de température	Changement de température	Changement de température
<b>Fonction technique</b>	Refroidissement	Refroidissement	Refroidissement
<b>Entrée(s)</b>	S05	CA-04	23
- Température (°C)	458	280	1482
- Pression (bars)	278	90	1
- Etat physique	Vapeur	Vapeur	Vapeur
- Debit (t/h)	2,9	66	35,2
<b>Sortie(s)</b>	S08	CA-19	24
- Température (°C)	40	30	561
- Pression (bars)	278	90	1
- Etat physique	Liquide-Vapeur	Liquide-Vapeur	Vapeur
- Debit (t/h)	2,9	66	35,2
<b>Recyclage</b>	Non	Non	Non
<b>Fonction en amont</b>	Réaction	Réaction	Réaction (Combustion)
<b>Fonction en aval</b>	Séparation	Séparation	Changement de température
<b>Solution</b>	-	Intégration d'une turbine à gaz	Production de vapeur
<b>Similarité</b>	-	0,78	0,54



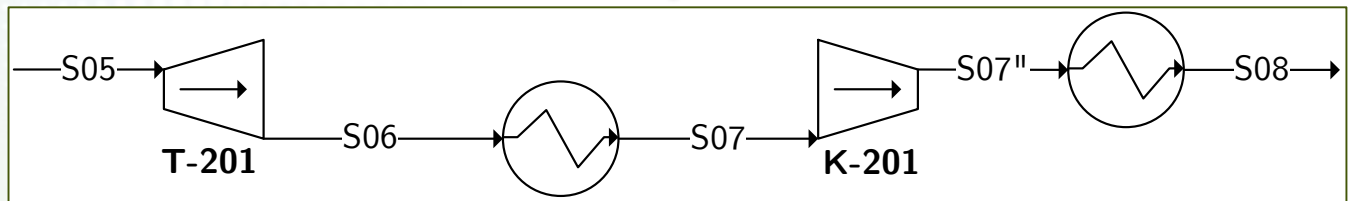
## Zones des procédés à améliorer I. Refroidissement

La méthodologie COoPeRE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
Analyse du procédé complet
<b>Rétro-conception du procédé</b>
Méthodologie générale
RàPC : modifications locales
● Synthèse d'alternatives
Application
Conclusions et perspectives

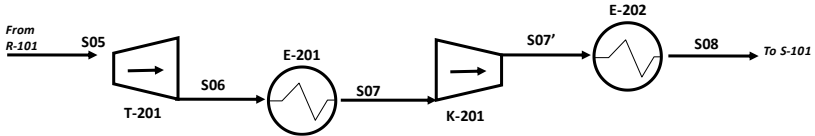
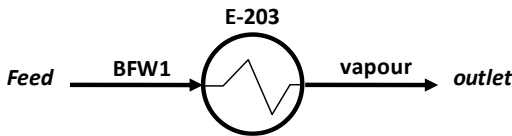
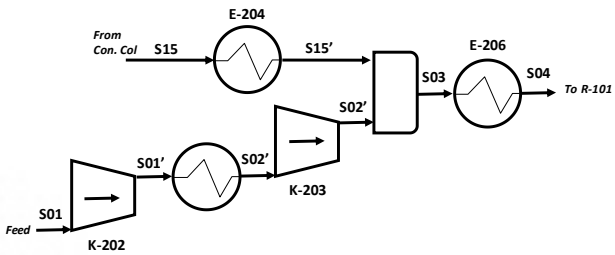
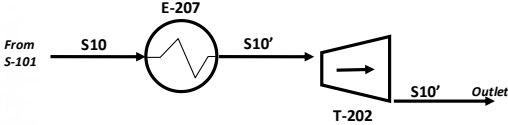


**1** Solution : procédé méthanol

Générer du travail à partir de la chaleur dégagée par la réaction



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé**
  - ..... Méthodologie générale
  - ..... RèPC : modifications locales
  - ..... Synthèse d'alternatives
  - Application
- Conclusions et perspectives

SECTION	AMENAGEMENT PROPOSE	DESCRIPTION
<b>Refroidissement : solution 1 (config A)</b>		Intégration d'une turbine à gaz en aval du réacteur
<b>Refroidissement : solution 2 (config B)</b>		Augmentation de la génération de vapeur
<b>M101+K101</b>		Introduction d'un deuxième étage de compression avec refroidissement intermédiaire Et préchauffe du courant S15 avant le mélangeur
<b>Purge</b>		Récupération de l'énergie contenue dans la purge par chauffe et ajout d'une turbine



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé**
  - Méthodologie générale
  - RèPC : modifications locales
  - Synthèse d'alternatives
  - Application
- Conclusions et perspectives

3.1

## Propositions de modifications locales du procédé

- Modifications structurelles et/ou opératoires
- Valorisation des courants de pertes externes



**Raisonnement à Partir de Cas**

3.2

## Conception d'alternatives globales

- Génération de la nouvelle structure globale



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé**
  - Méthodologie générale
  - RàPC : modifications locales
  - Synthèse d'alternatives
  - Application
- Conclusions et perspectives

## 3.1 Propositions de modifications locales du procédé

- Modifications structurelles et/ou opératoires
- Valorisation des courants de pertes externes



**Raisonnement à Partir de Cas**

## 3.2 Conception d'alternatives globales

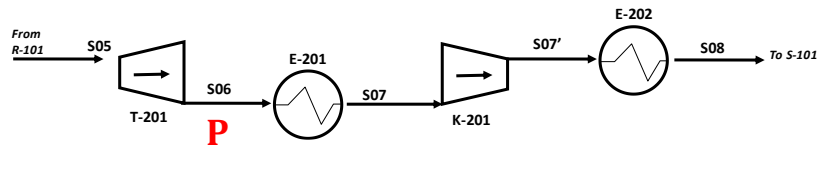
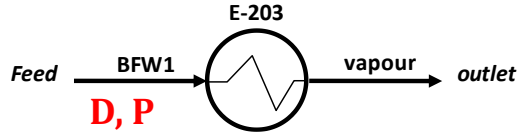
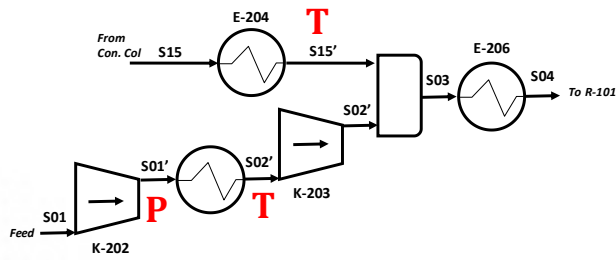
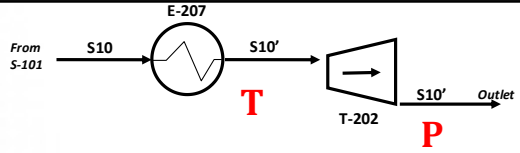
- Génération de la nouvelle structure globale



**Optimisation**



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé**
  - ..... Méthodologie générale
  - ..... RàPC : modifications locales
  - ..... Synthèse d'alternatives
  - Application
- Conclusions et perspectives

SECTION	AMENAGEMENT PROPOSE	DESCRIPTION
<b>Refroidissement : solution 1 (config A)</b>		Intégration d'une turbine à gaz en aval du réacteur
<b>Refroidissement : solution 2 (config B)</b>		Augmentation de la génération de vapeur
<b>M101+K101</b>		Introduction d'un deuxième étage de compression avec refroidissement intermédiaire Et préchauffe du courant S15 avant le mélangeur
<b>Purge</b>		Récupération de l'énergie contenue dans la purge par chauffe et ajout d'une turbine

- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé**
  - Méthodologie générale
  - RàPC : modifications locales
  - Synthèse d'alternatives
  - Application
- Conclusions et perspectives

**3.1 Propositions de modifications locales du procédé**

- Modifications structurelles et/ou opératoires
- Valorisation des courants de pertes externes



**Raisonnement à Partir de Cas**

**3.2 Conception d'alternatives globales**

- Génération de la nouvelle structure globale
- Détermination des valeurs optimales des paramètres opératoires
- Conception du réseau d'échangeurs de chaleur



**Optimisation**



**RREFlex**  
Analyse Pincement

Simulateur de procédés → évaluation du travail **W** nécessaire  
 Analyse Pincement → évaluation de **Uc,min** et de **Uf,min**  
**Optimisation tri-critère**

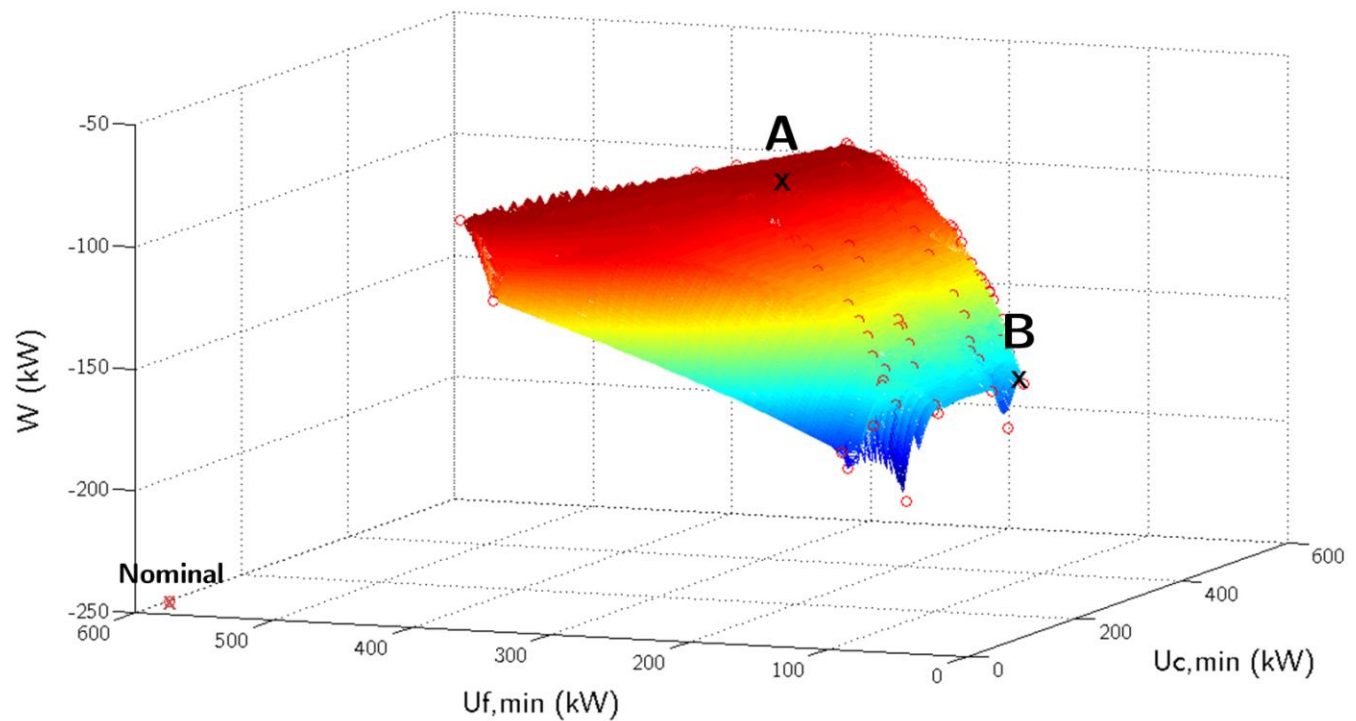
que des





La méthodologie COoPeRE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
Analyse du procédé complet
<b>Rétro-conception du procédé</b>
Méthodologie générale
RàPC : modifications locales
Synthèse d'alternatives
● Application
Conclusions et perspectives

- Optimisation 3-critère ( $U_{c,min}$ ,  $U_{f,min}$  et  $W$ )



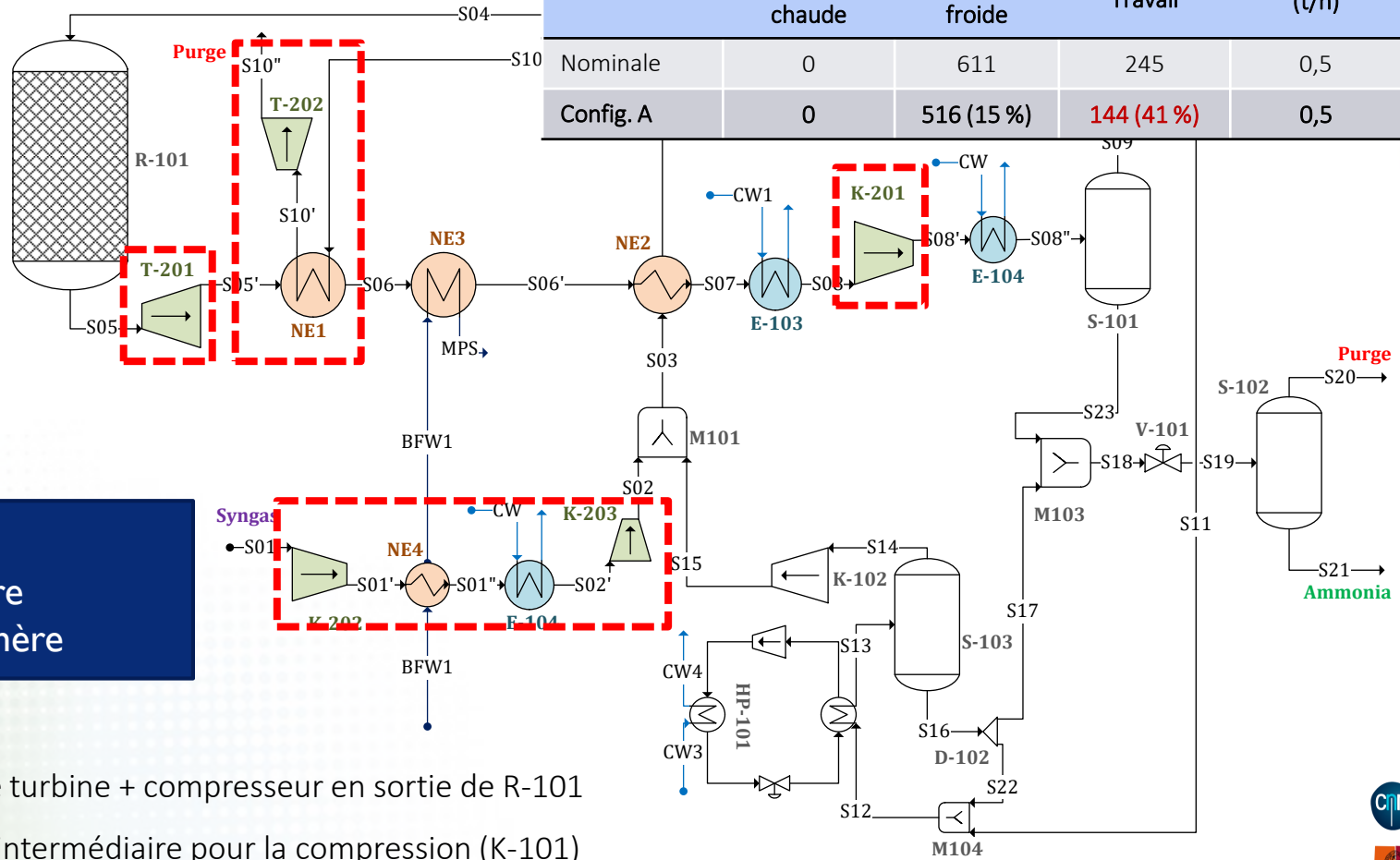




La méthodologie COoPeRE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
Analyse du procédé complet
<b>Rétro-conception du procédé</b>
Méthodologie générale
RàPC : modifications locales
Synthèse d'alternatives
Application
Conclusions et perspectives

## Configuration A

Configuration	Consommations (kW) (gain %)			Production de vapeur (t/h)
	Utilité chaude	Utilité froide	Travail	
Nominale	0	611	245	0,5
<b>Config. A</b>	<b>0</b>	<b>516 (15%)</b>	<b>144 (41%)</b>	<b>0,5</b>



### Avantageux si :

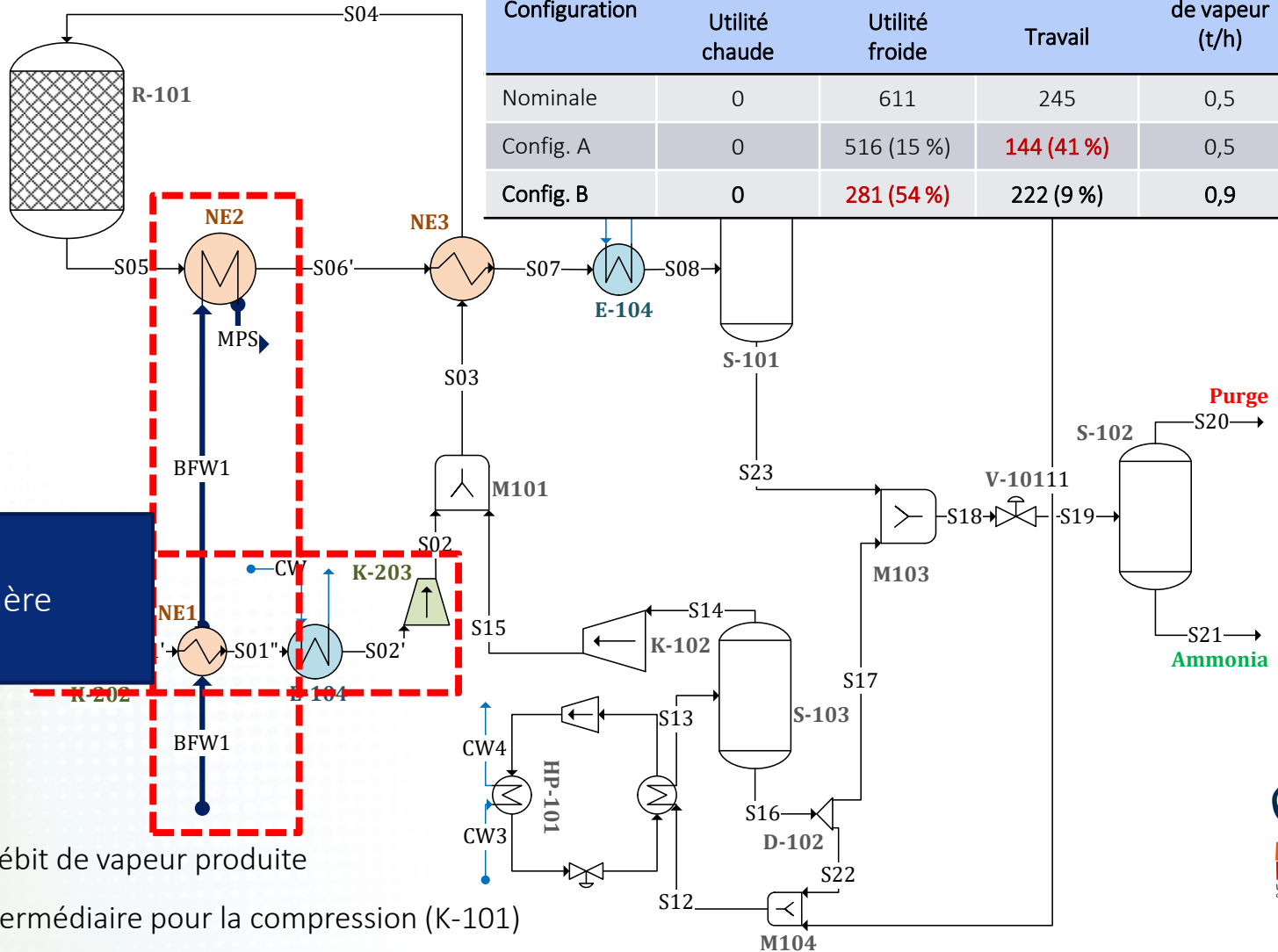
- Électricité chère
- frigories peu chère

- ✓ Intégration d'une turbine + compresseur en sortie de R-101
- ✓ Refroidissement intermédiaire pour la compression (K-101)
- ✓ Valorisation de la purge (chauffe puis détente)



- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé**
  - Méthodologie générale
  - RàPC : modifications locales
  - Synthèse d'alternatives
  - Application
- Conclusions et perspectives

## Configuration B

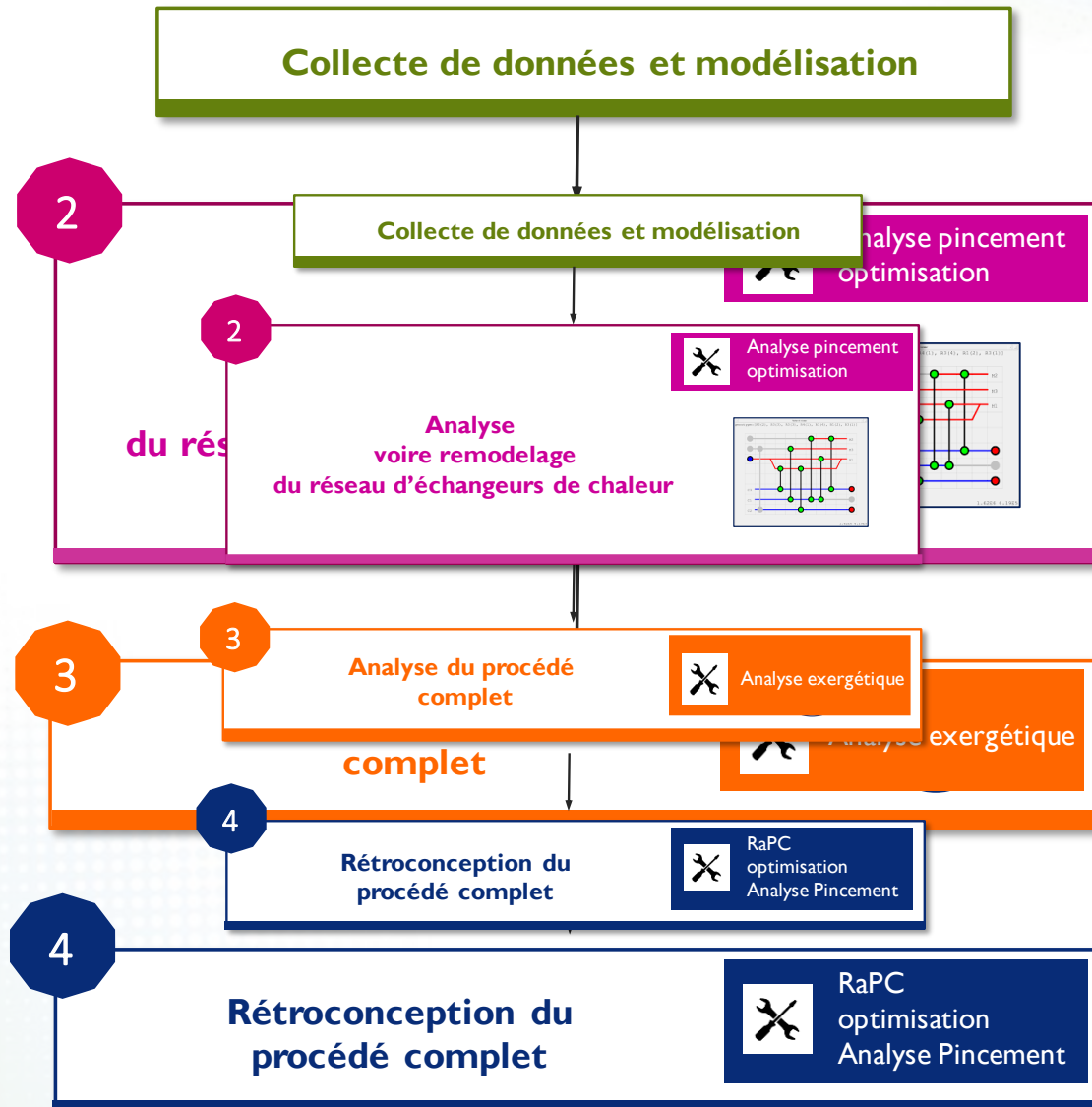


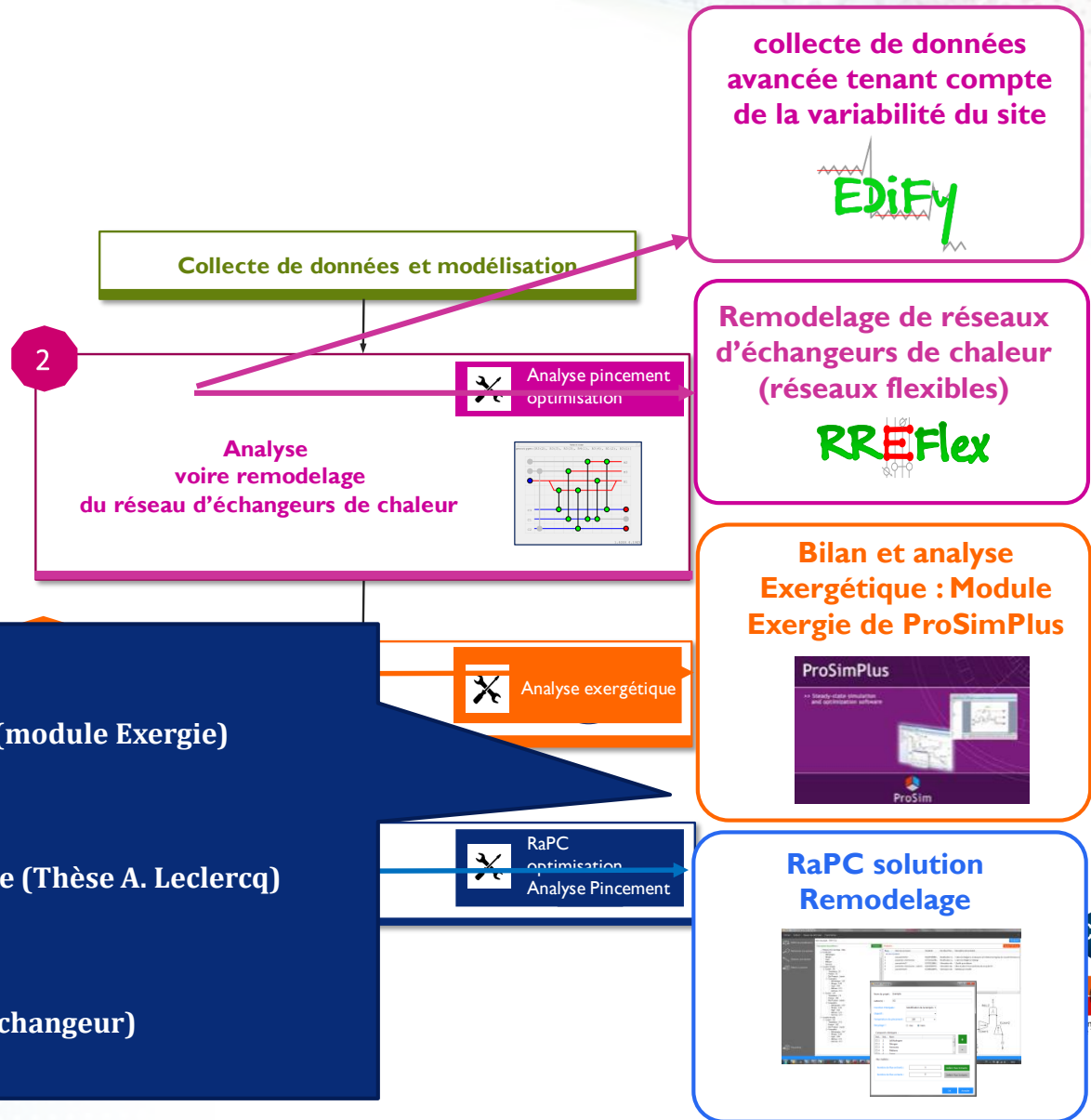
Configuration	Consommations (kW) (gain %)			Production de vapeur (t/h)
	Utilité chaude	Utilité froide	Travail	
Nominale	0	611	245	0,5
Config. A	0	516 (15 %)	144 (41 %)	0,5
Config. B	0	281 (54 %)	222 (9 %)	0,9

**Avantageux si :**

- Électricité peu chère
- Frigories chères

- ✓ Augmentation du débit de vapeur produite
- ✓ Refroidissement intermédiaire pour la compression (K-101)





**PERPECTIVES**

Eprouver les méthodologies et outils (module Exergie)  
 Développement du module RaPC

Valorisation des pertes externes :

- Exergie thermique : Chaleur Fatale (Thèse A. Leclercq)
- Exergie chimique ?

L'exergie comme aide à l'innovation  
 (conception optimale des réacteurs-échangeur)

📖 Payet ., Hétreux R., Hétreux G., Bourgeois F., Floquet P., 2017, Flexibility Assessment of Heat Exchanger Networks : From a thorough data extraction to robustness evaluation, Chemical Engineering Research & Design

📖 Gourmelon S., Théry-Hétreux R., Floquet P., 2015, Exergy Analysis in ProSimPlus Simulation Software: a focus on exergy efficiency evaluation, Computer and Chemical Engineering, Vol. 79, issue 4, pp. 91-112

📖 Gourmelon S., Hétreux R., Floquet P., 2017, A systematic approach : combining process optimization, exergy analysis and energy Recovery for a better efficiency of industrial processes, International Journal of Exergy 23(4):298

📖 Gourmelon S., Hétreux R., Floquet P., 2017, A systematic approach : combining process optimization, exergy analysis and energy Recovery for a better efficiency of industrial processes, International Journal of Exergy 23(4):298

•**Raphaële Hétreux**<sup>1</sup>, Pascal Floquet<sup>1</sup>, Gilles Hétreux<sup>1</sup>

•Ali Ghannadazeh<sup>3</sup>, Stephane Gourmelon<sup>2</sup>

•Lucille Payet<sup>1</sup>

**[Raphaelle.thery@ensiacet.fr](mailto:Raphaelle.thery@ensiacet.fr)**