

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

Raphaële Hétreux¹, Pascal Floquet¹, Gilles Hétreux¹

Ali Ghannadzeh³, Stéphane Gourmelon²

Lucille Payet¹

¹ Laboratoire de Génie Chimique Toulouse

² Air Liquide

³ Hamedan University of Technology

financeurs



Partenaires



ProSim
Software & Services in Process Simulation



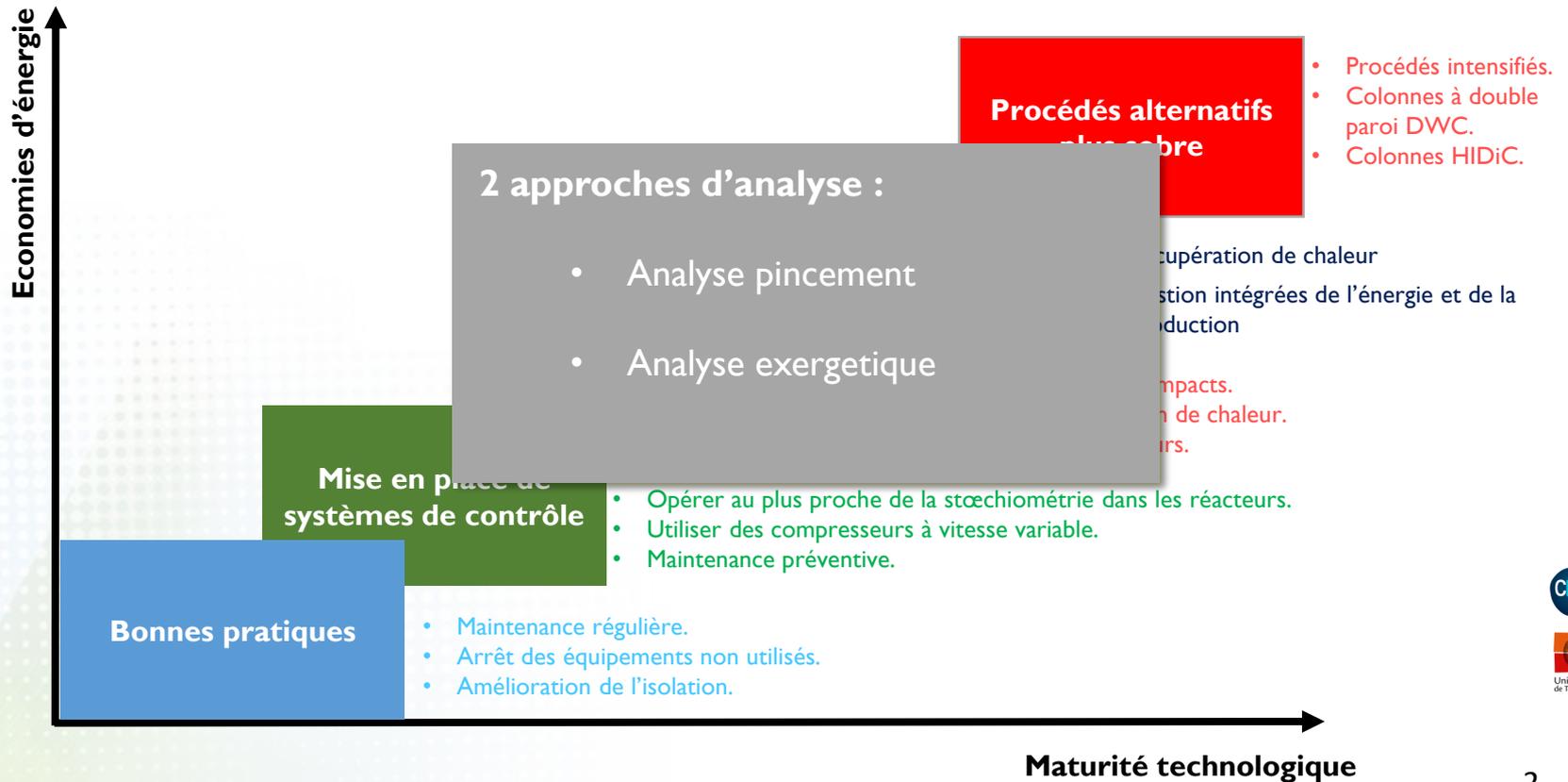
Université
de Toulouse



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



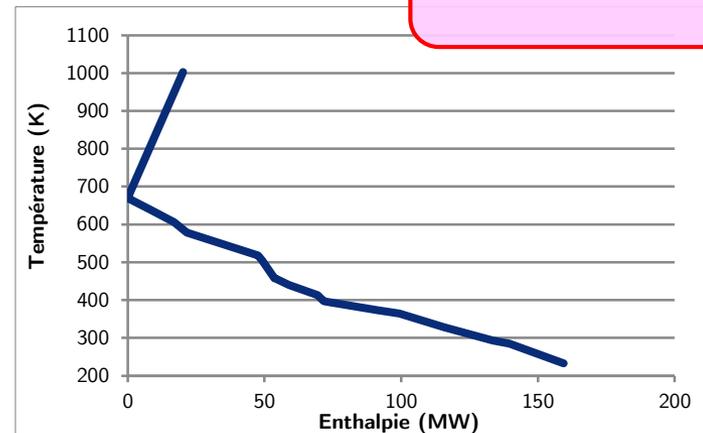
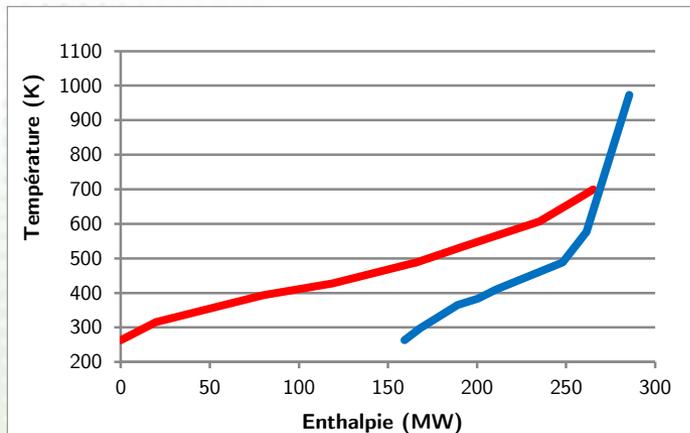
Générateur d'idées
(construction de réseaux d'échangeurs de chaleur)



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



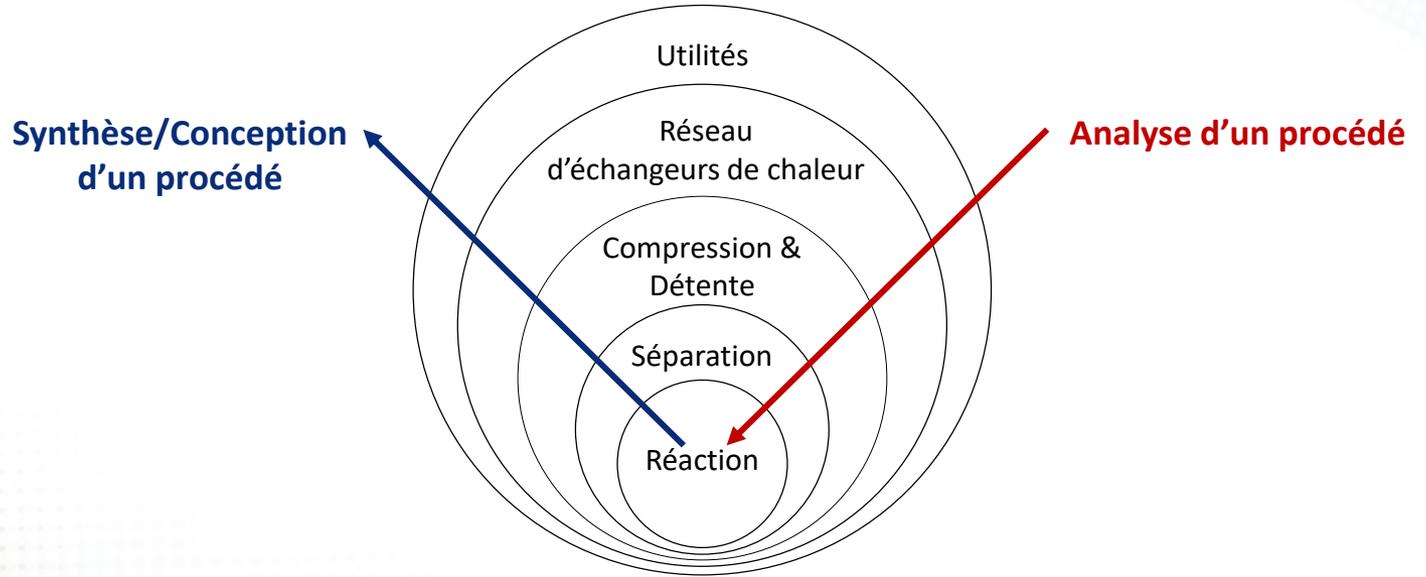
Concept difficile à appréhender

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

Pas un générateur d'idées

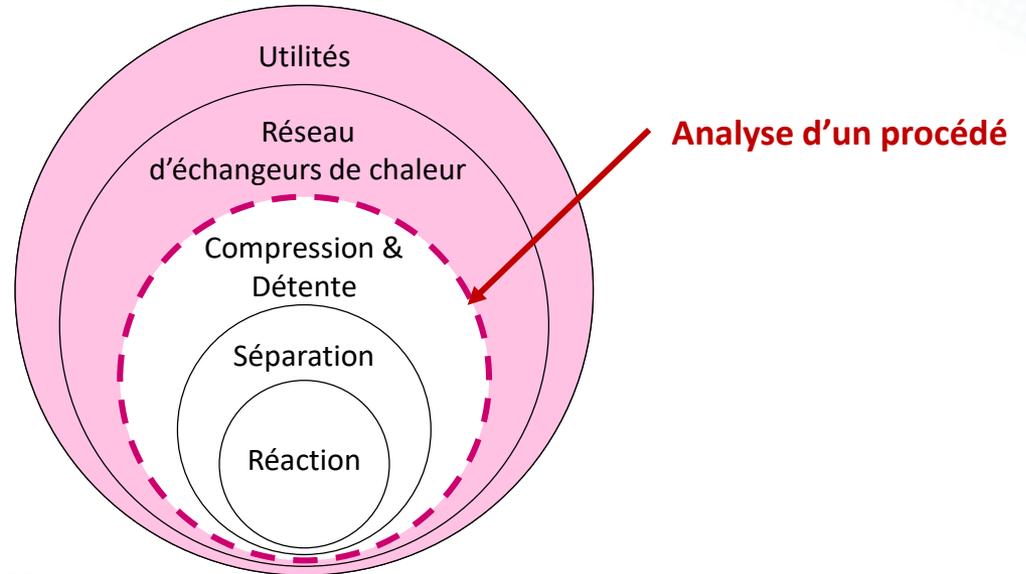
Introduction

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPERe



Introduction

- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRe



- Analyse des deux **couches externes** :

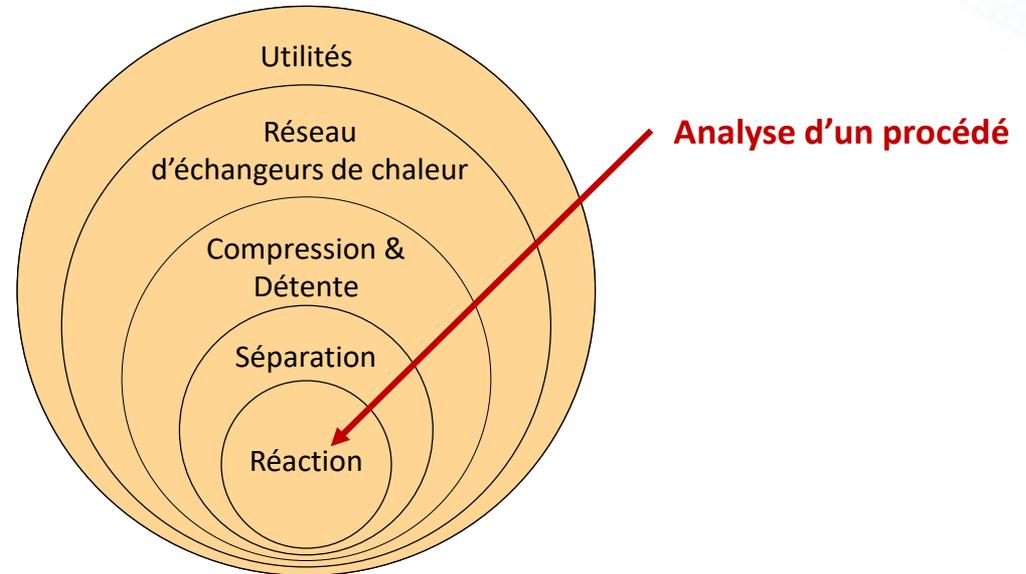
 **Analyse Pincement**

Introduction

Contexte

● Pinch Vs Exergie

└ L'approche CoOPERe



- Analyse des deux **couches externes** :



Analyse Pincement

- Analyse du **procédé complet** :



Analyse Exergétique

Introduction

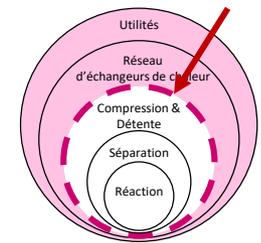
- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRE

Collecte de données et modélisation

2

Analyse pincement optimisation

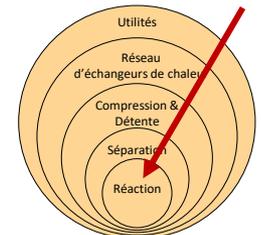
Analyse voire remodelage du réseau d'échangeurs de chaleur



3

Analyse du procédé complet

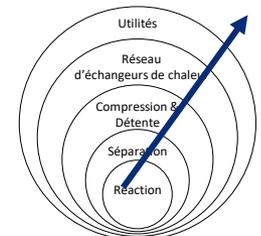
Analyse exergetique



4

Rétroconception du procédé complet

RaPC optimisation Analyse Pincement



Introduction

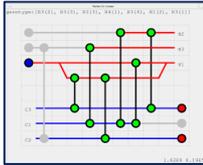
- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRE

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)**

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

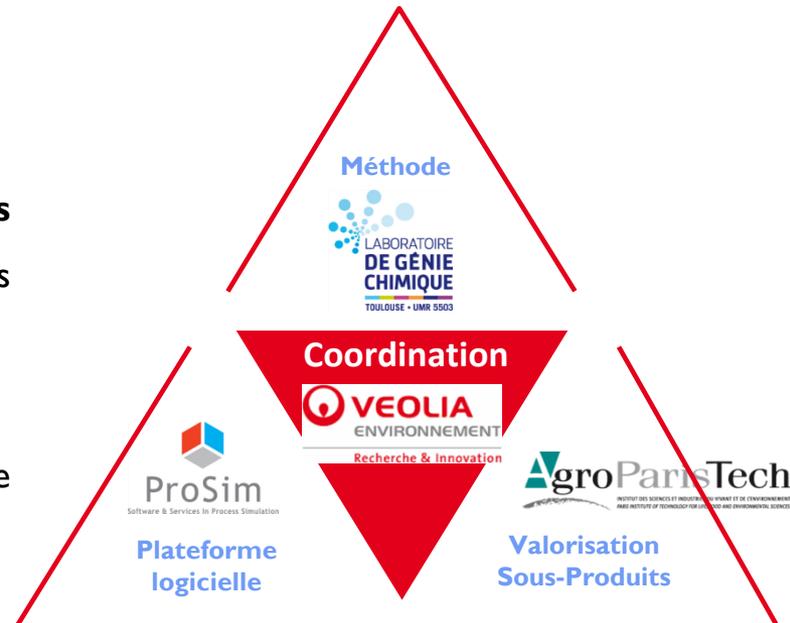
○ **Financement : Agence Nationale de la Recherche**



Objectif

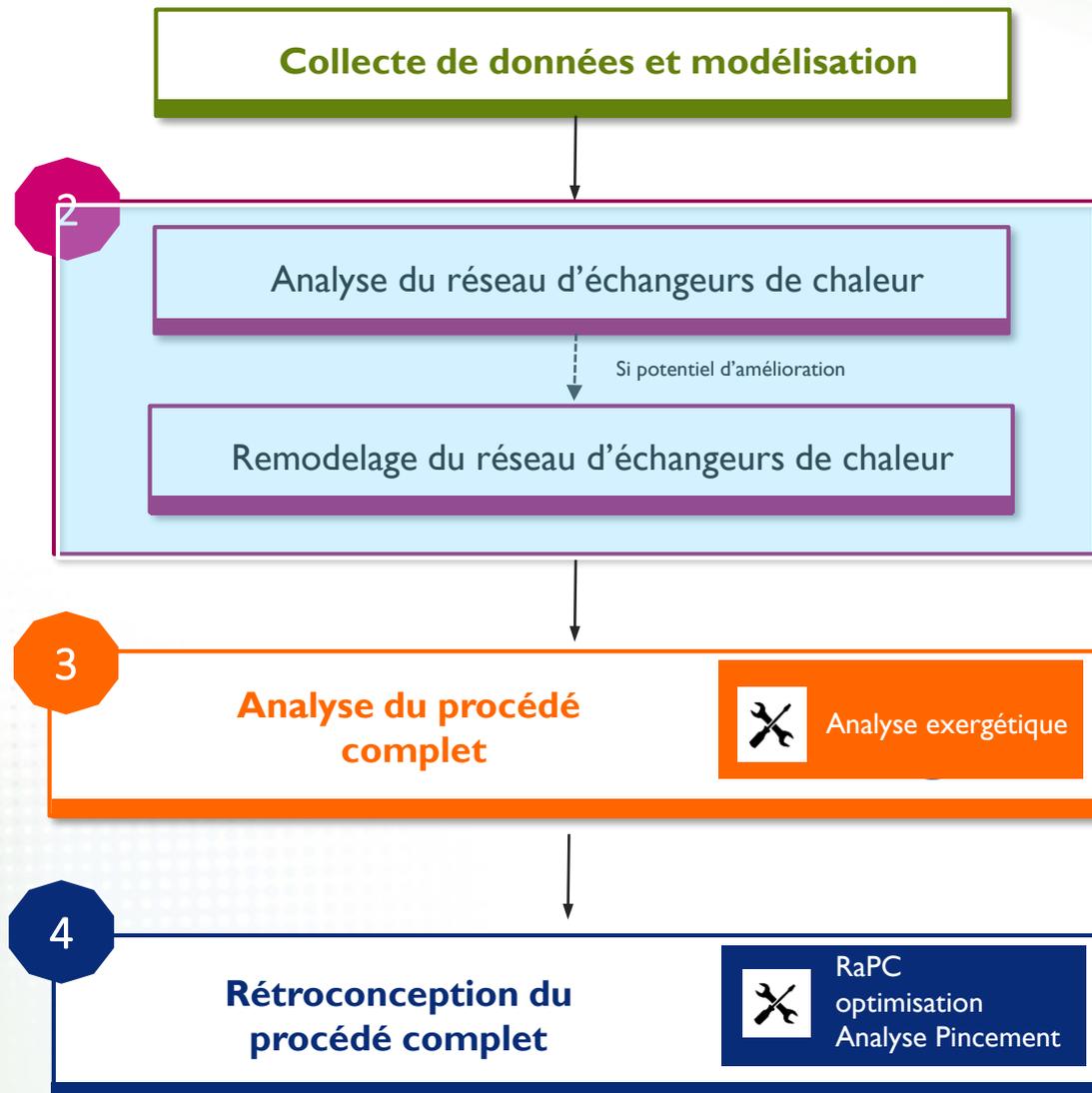
Développer des **outils méthodologiques et logiciels** dédiés à la définition de solution d'efficacité énergétique des procédés industriels

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

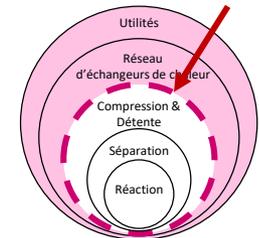
- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRE**

Collecte de données et modélisation

2

Analyse pincement optimisation

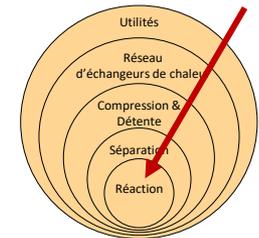
Analyse voire remodelage du réseau d'échangeurs de chaleur



3

Analyse du procédé complet

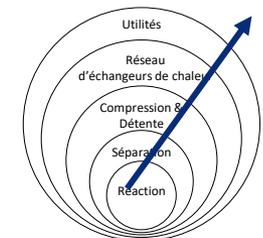
Analyse exergetique



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

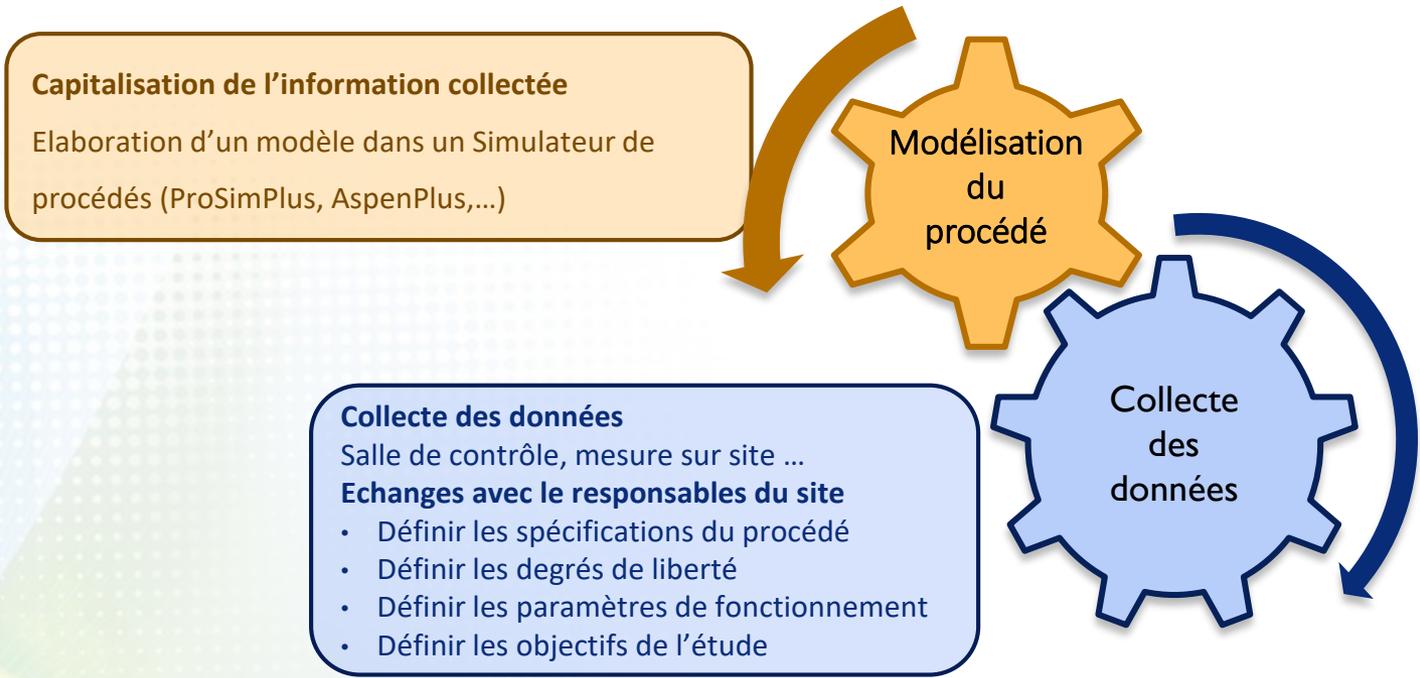
Collecte des données
 Salle de contrôle, mesure sur site ...
Echanges avec le responsables du site

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



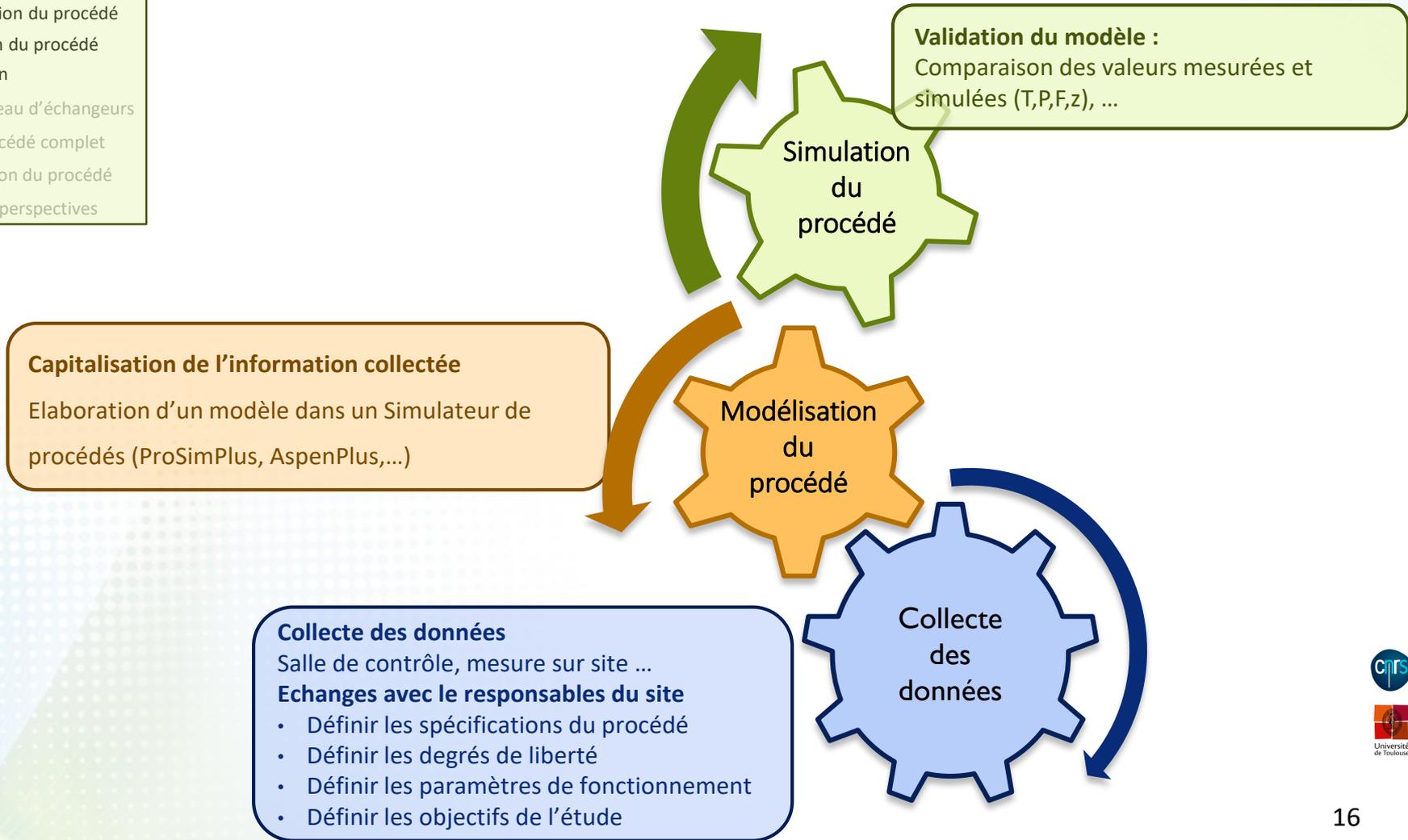
La méthodologie COoPERE
Création du support d'analyse
--- Collecte des données
● Modélisation du procédé
--- Simulation du procédé
--- Application
Analyse du réseau d'échangeurs
Analyse du procédé complet
Rétro-conception du procédé
Conclusions et perspectives

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	

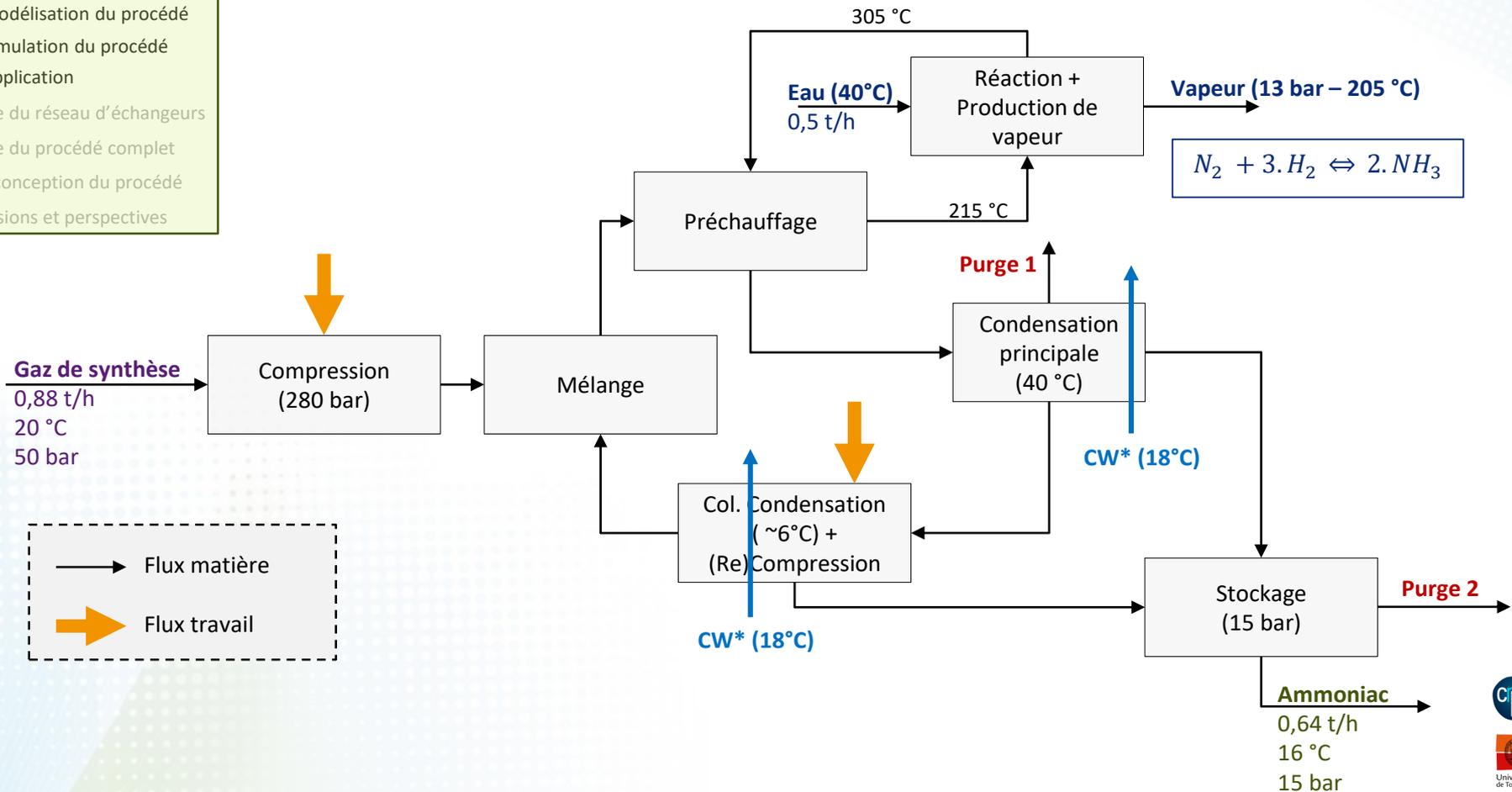
Collecte de données et modélisation





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

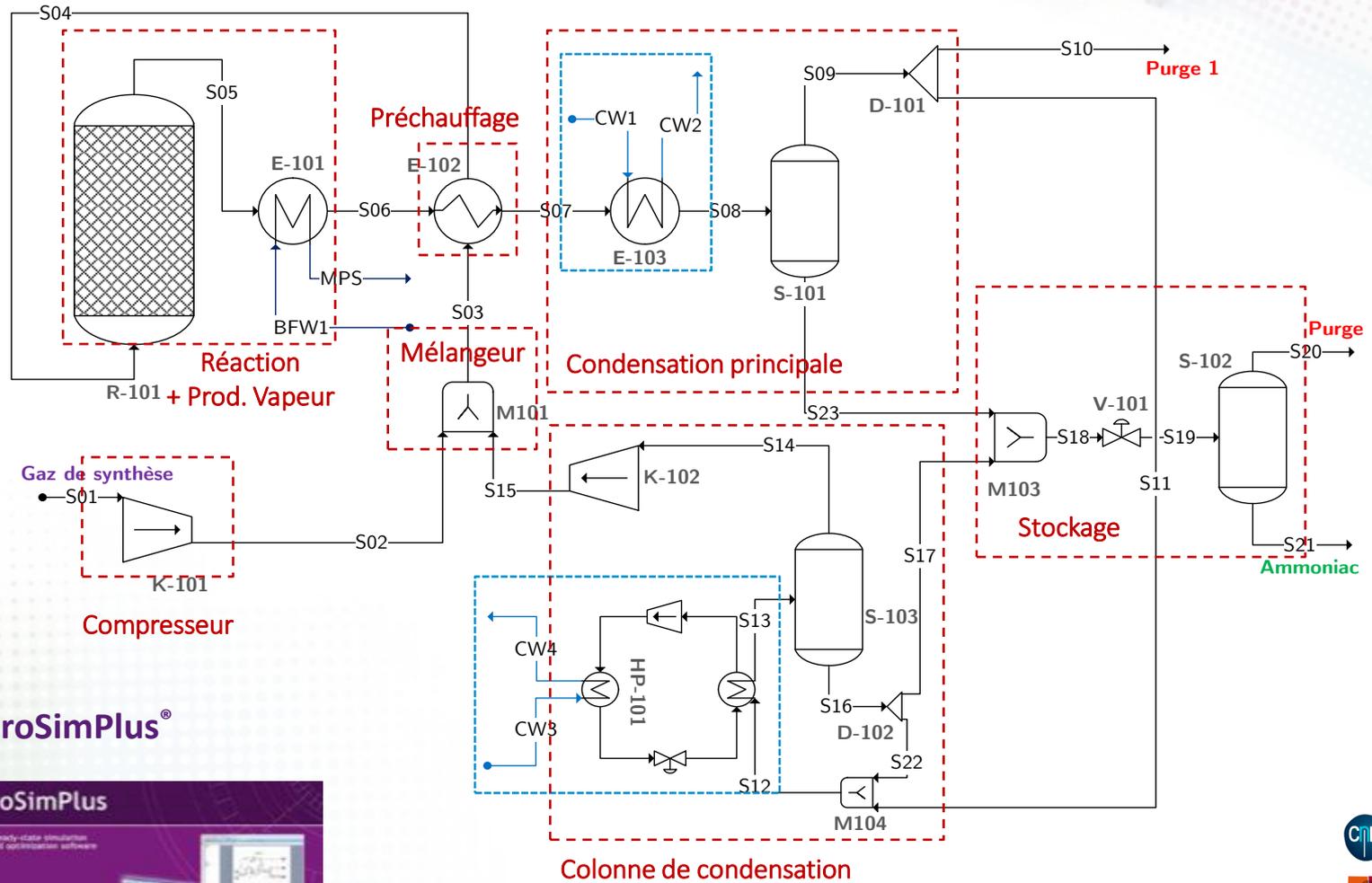
- Procédé « ammoniac » [Brodyansky et al., 1994][Seider et al., 2003]



* 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

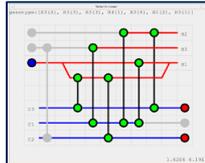
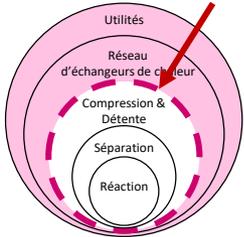
- Contexte
- Pinch Vs Exergie
- L'approche CoOPeRE

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

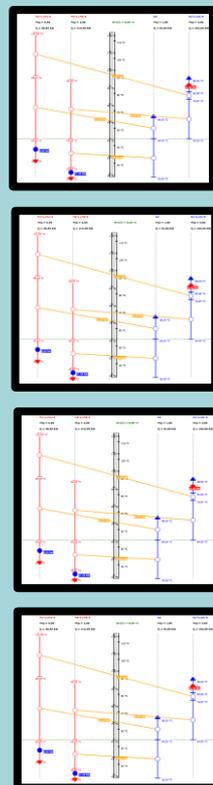
EDiFy

Collecte de données avancée

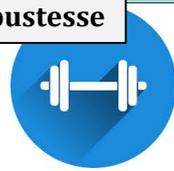
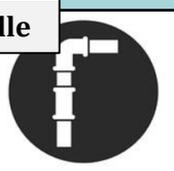
Diagnostic Energétique

Multiples configurations

Synthèse de réseaux



Indicateurs de performance

- ROI 
- Efficacité énergétique 
- robustesse 
- Taille 

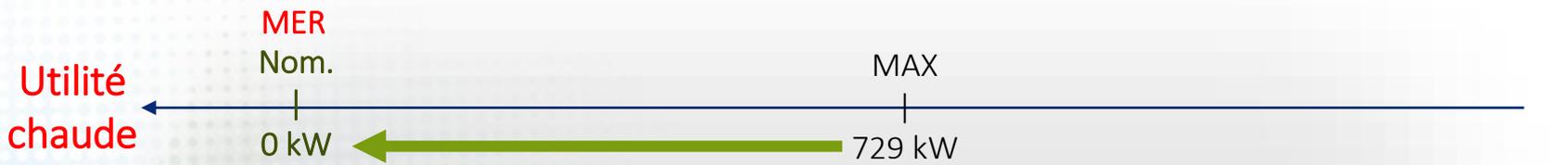
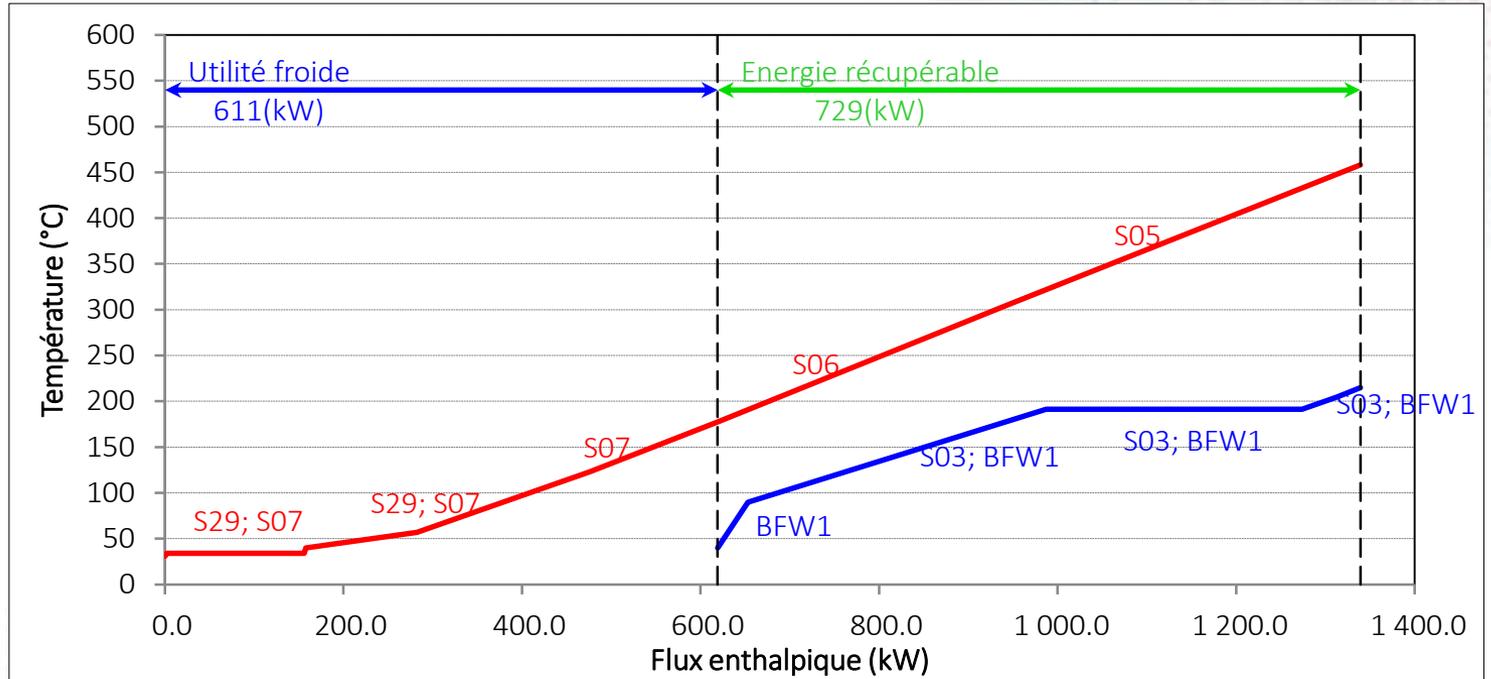
- Localiser et caractériser les différents cas de marche
- Simulation

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

Reformulation du problème
(ajout de nouvelles contraintes)

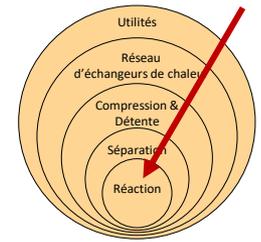
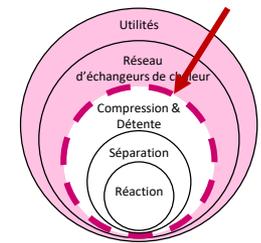
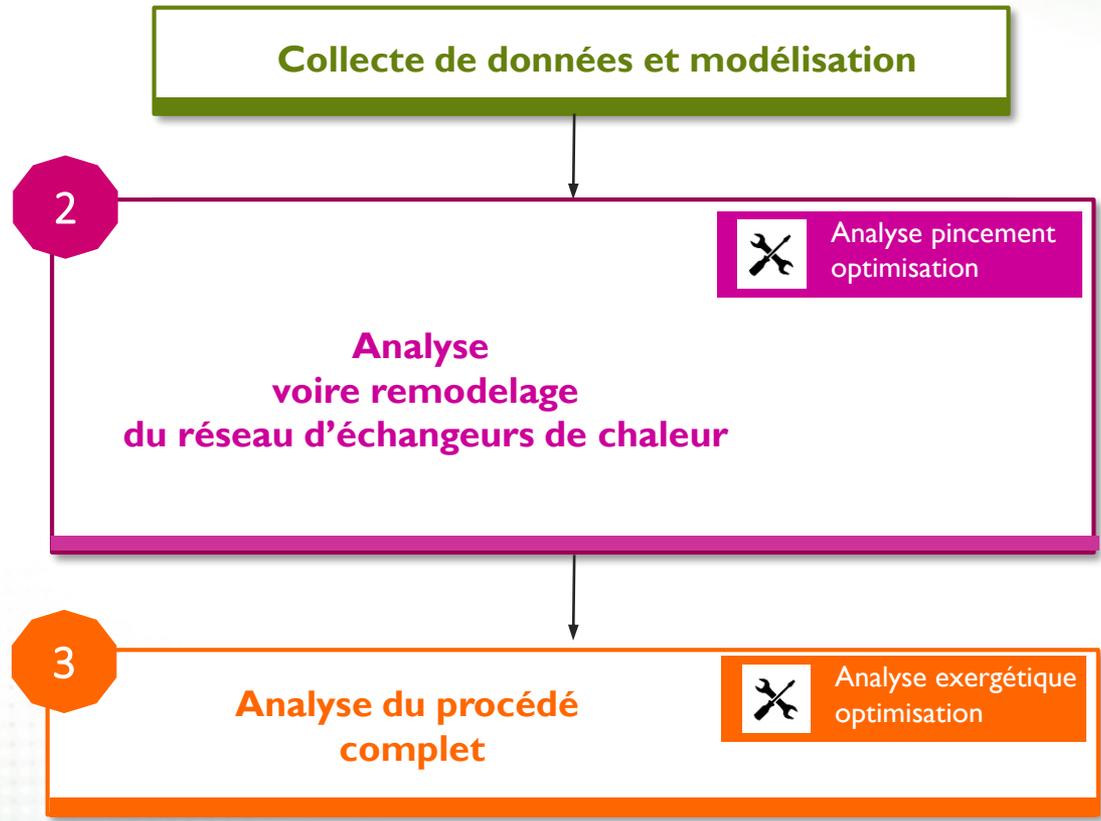


- La méthodologie COOPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse globale
- Analyse détaillée
- Application
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives



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

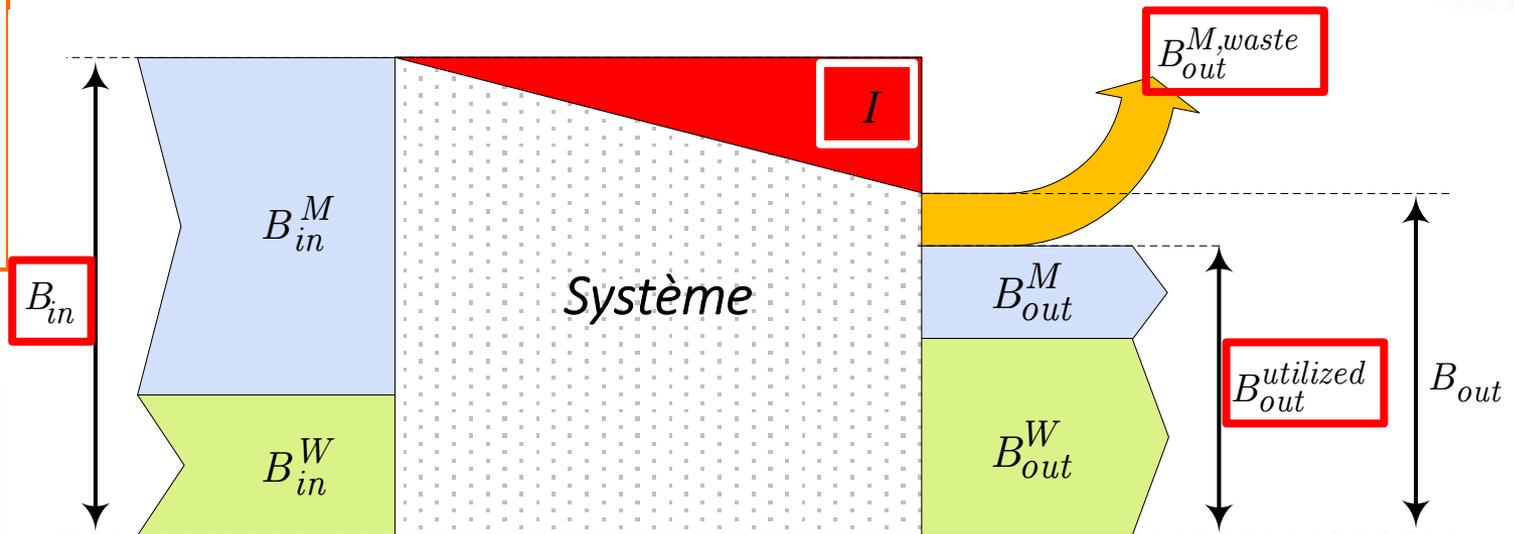
- La méthodologie COoPERE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
 - Bilans exergétiques**
 - Efficacités exergétiques
 - Le ternaire exergétique
 - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

- **Analyse exergétique**
 - **Bilans exergétiques**
 - **Efficacités exergétiques**

- 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



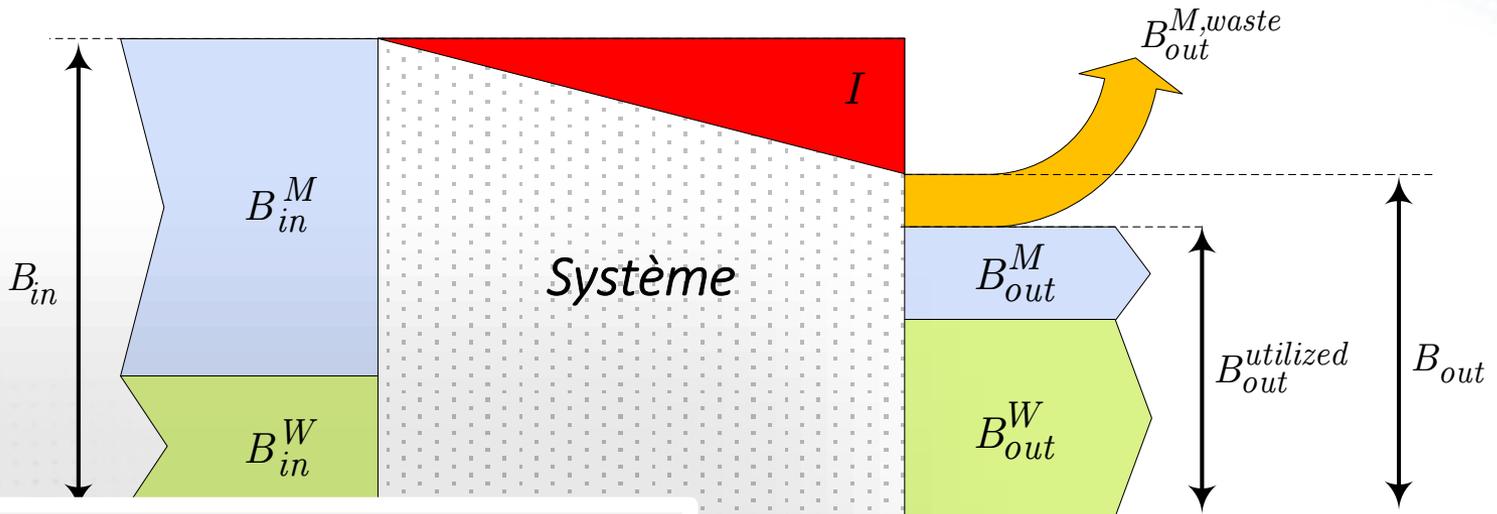
Exergie entrante = Exergie sortante « utile » + Exergie perdue + Exergie détruite

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

- 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, ...

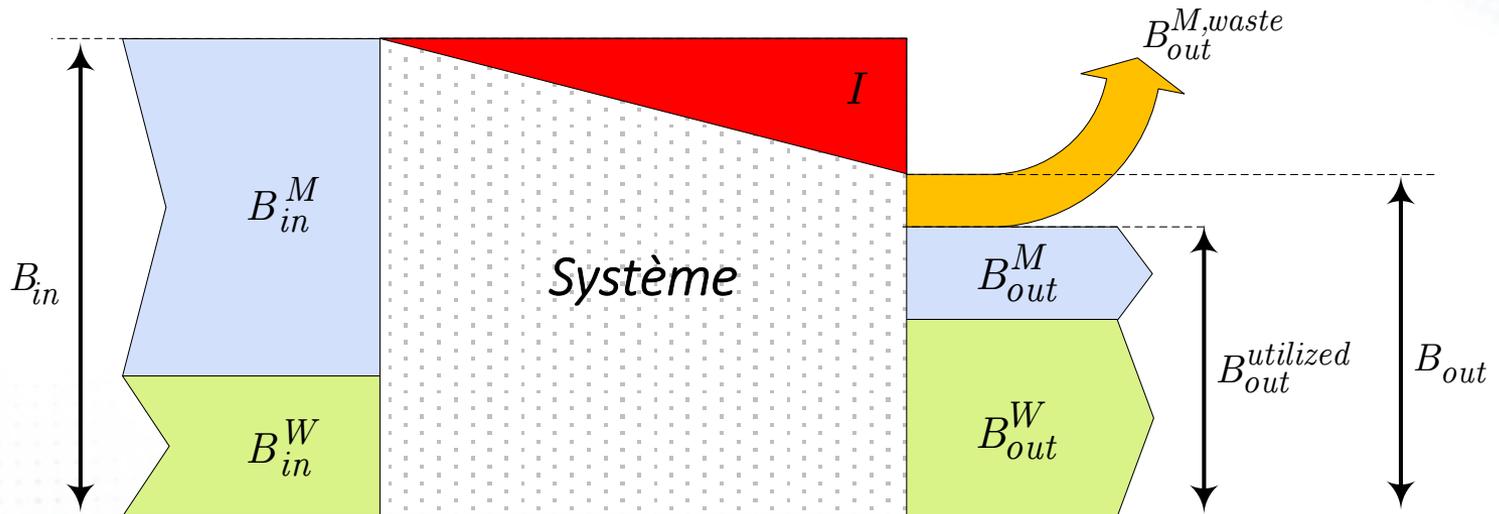
Irréversibilité = exergie détruite

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

- 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

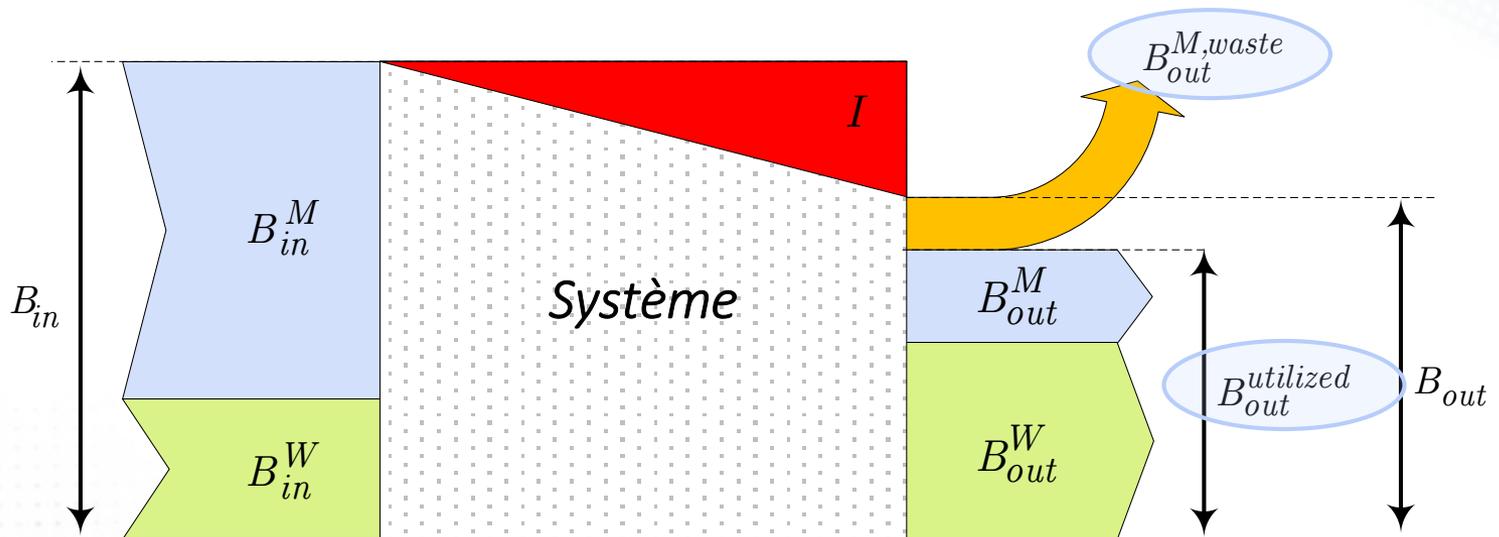
Irréversibilité = exergie détruite

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

- 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



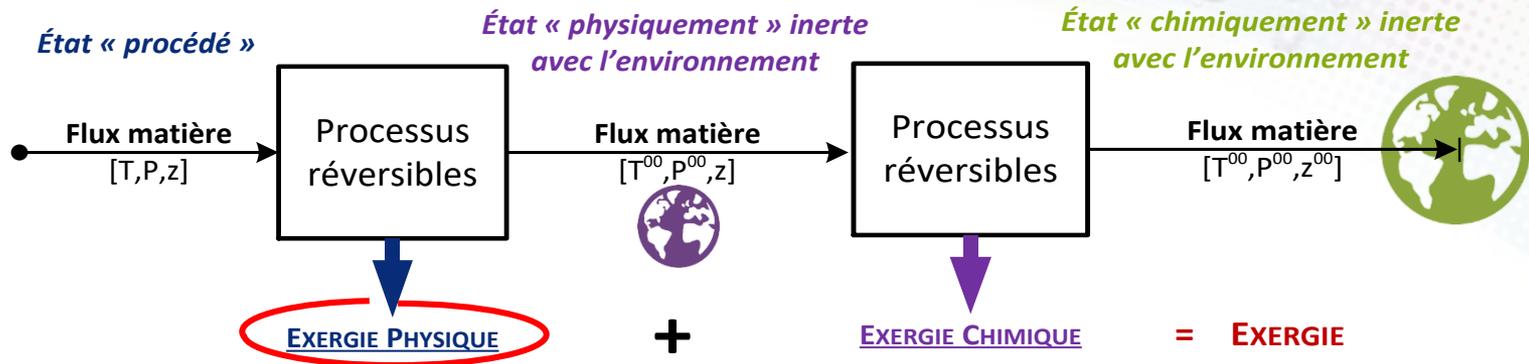
$$B_{in}^M + B_{in}^W = B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W + B_{out}^{M,waste} + I$$



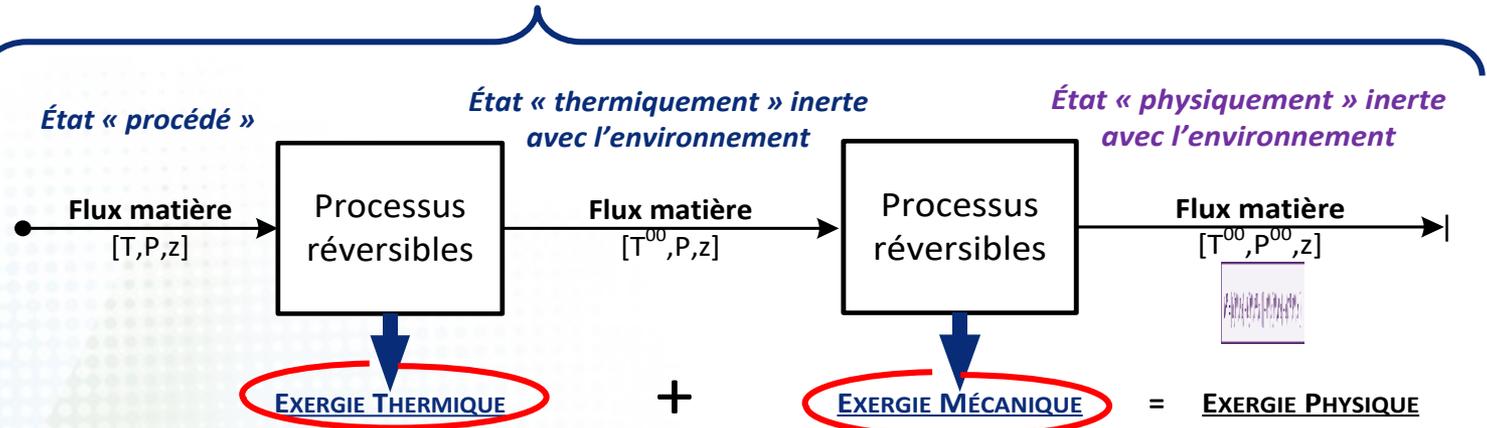
- Distinguer les courants de pertes et les courants « utiles »
- Calculer l'exergie d'un flux matière

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



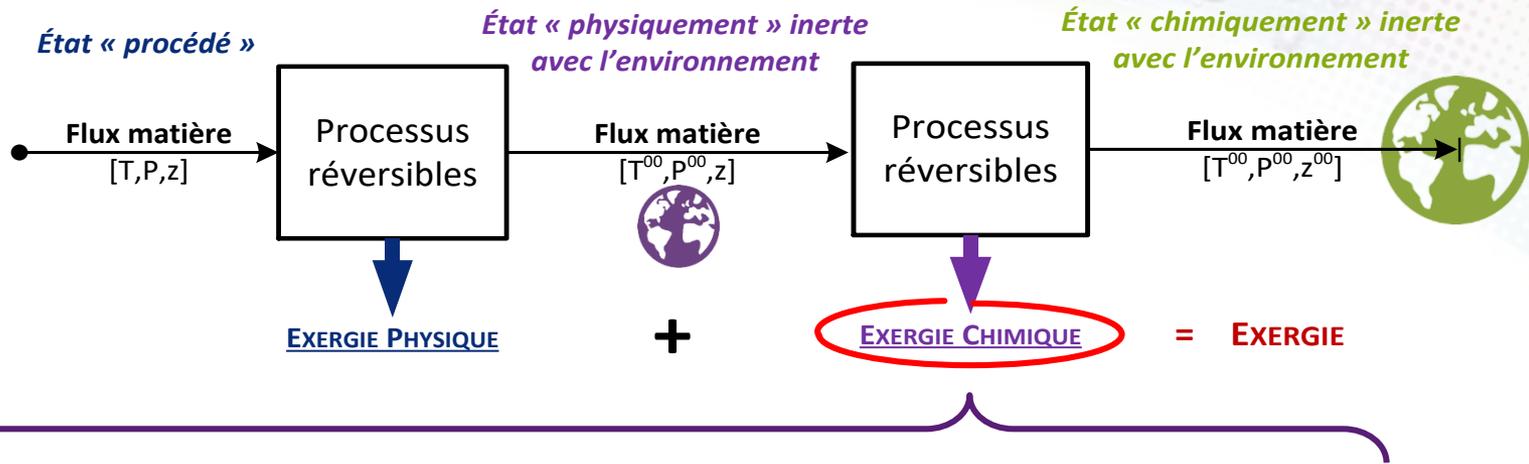
$$b^{ph} = [h(T, P, z) - h(T^{00}, P^{00}, z)] - T^{00}[s(T, P, z) - s(T^{00}, P^{00}, z)]$$



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

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

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



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

- Approches thermodynamiques homogènes (par équations d'état)

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

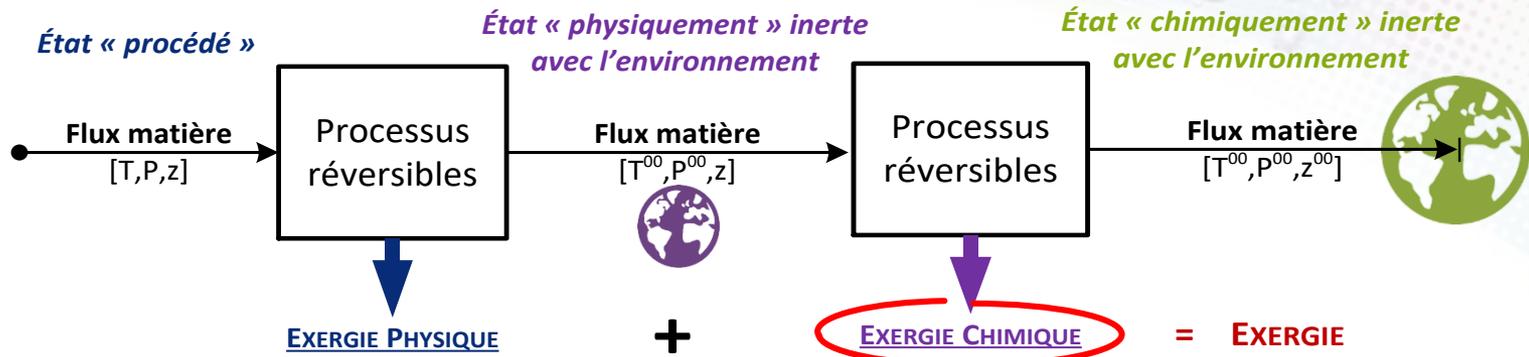
- Approches thermodynamiques hétérogènes (liquide -> par modèle à coefficients d'activité) (vapeur -> par équation d'état)

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

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

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



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

- Approches thermodynamiques homogènes (par équations d'état)

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

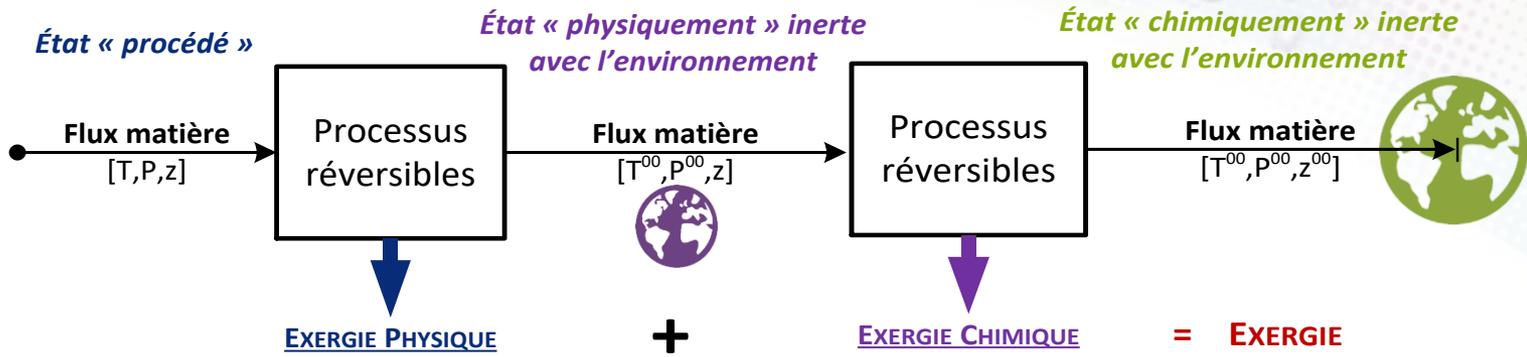
$$b^{ch,\Phi}(T, P, z) = \sum_{i=1}^{N_C} z_i \cdot [b_i^{0,*} + R \cdot T^{00} \cdot \ln(z_i)] + (g^\Phi - g^*)_{T^{00}, P^{00}, z}$$

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

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

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



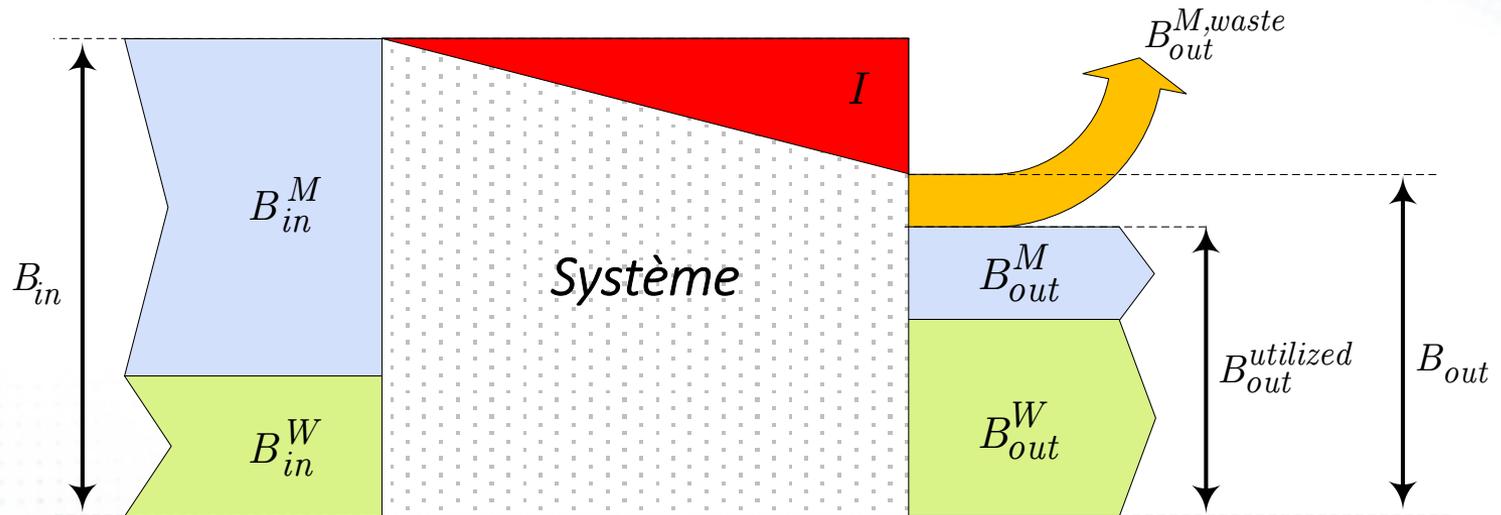
	A	B	C	D
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				
21				
22				
23				
24				

Somme			
	A	B	C
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		78.42622885

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
Analyse du procédé complet
• Bilans exergetiques
• Efficacités exergetiques
• Le ternaire exergetique
• Application
Rétro-conception du procédé
Conclusions et perspectives

↓ Diagramme de Grassmann



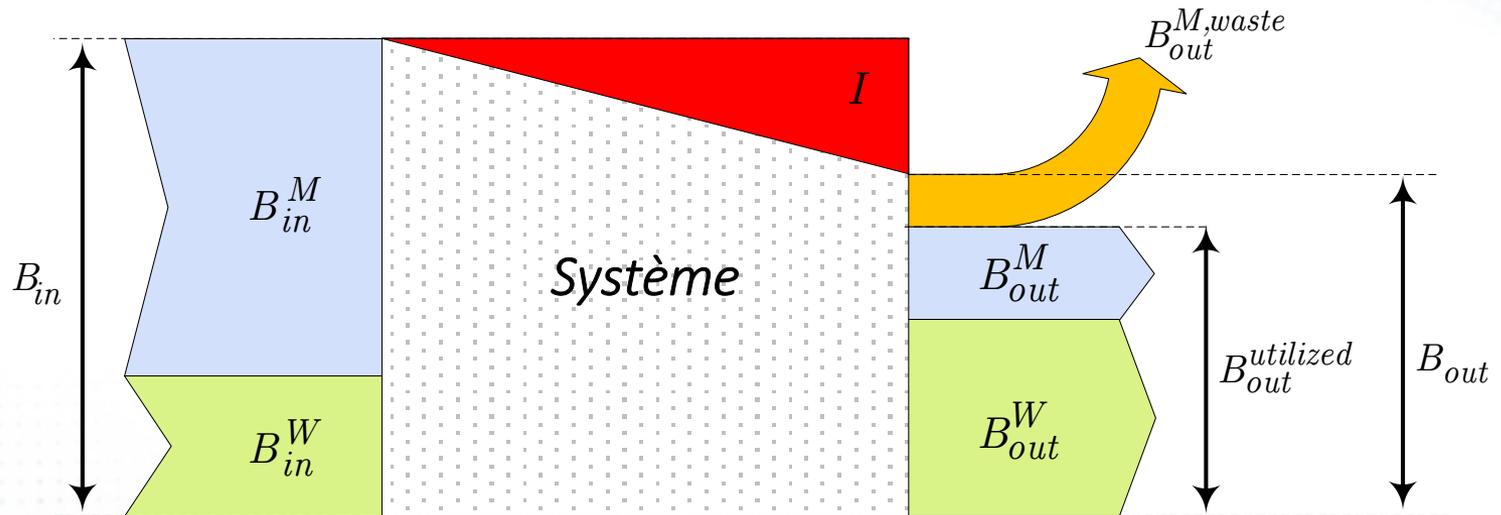
$$B_{in}^M + B_{in}^W = B_{out}^{M,utilized} + B_{out}^W + B_{out}^{M,waste} + I$$



- 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
Analyse du procédé complet
● Bilans exergetiques
Efficacités exergetiques
Le ternaire exergetique
Application
Rétro-conception du procédé
Conclusions et perspectives

↓ Diagramme de Grassmann

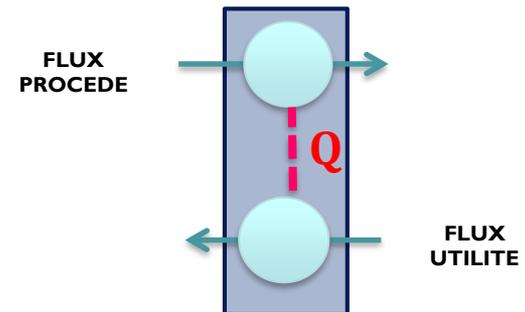
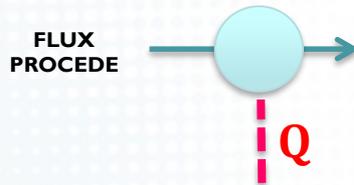
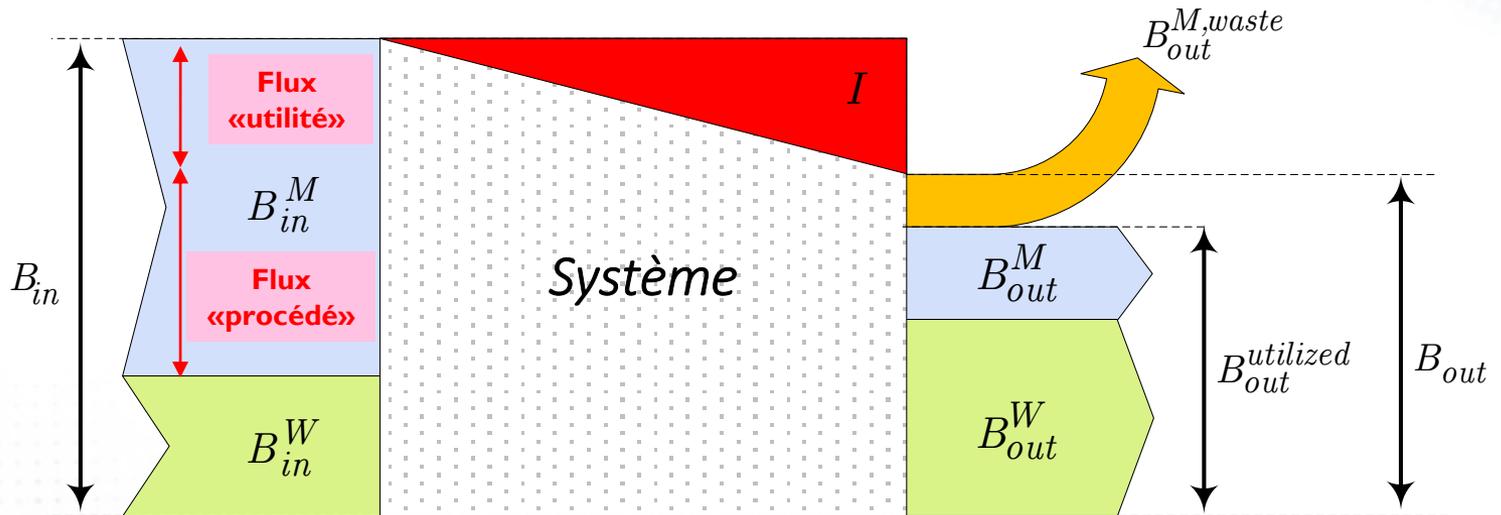


L'exergie est définie comme le maximum de travail théorique....

$$B^W = W$$

- 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

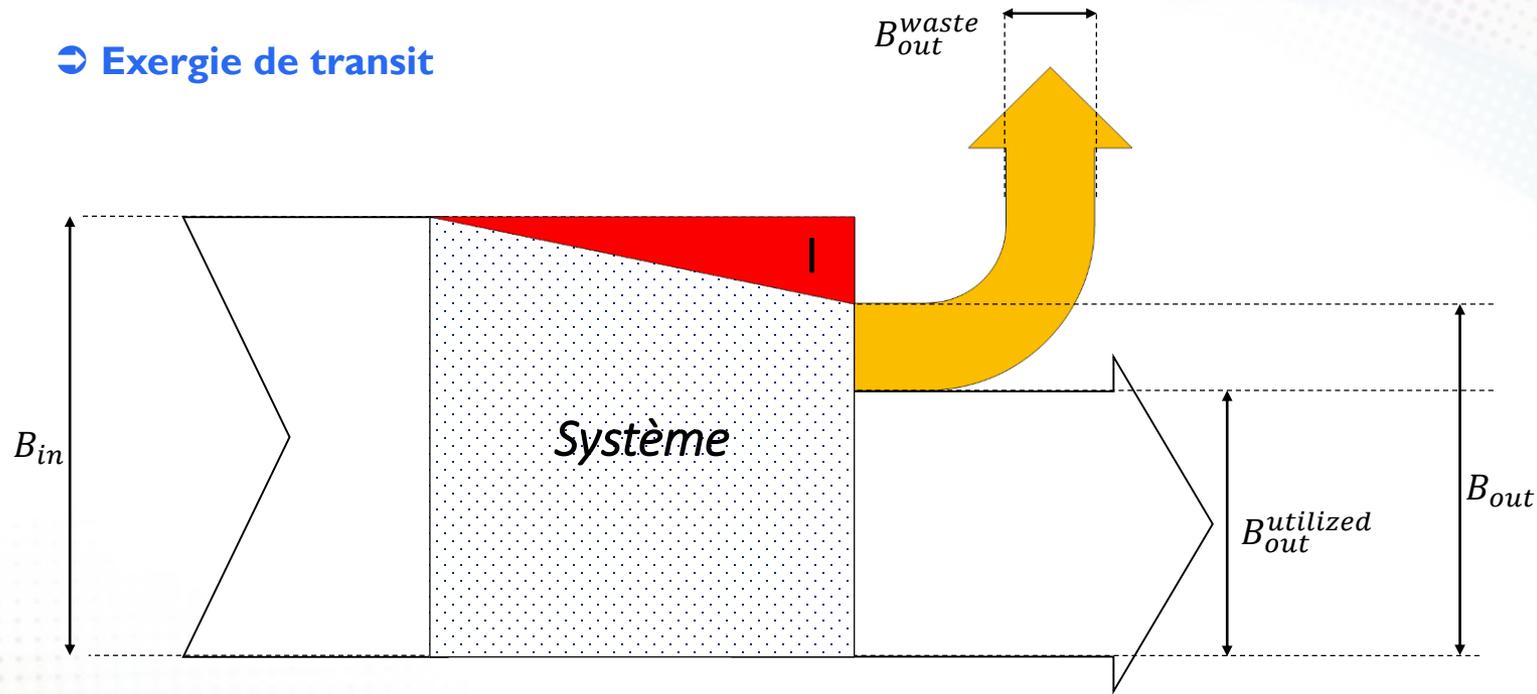


Flux de chaleur représenté par des flux matière « utilité »

- 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

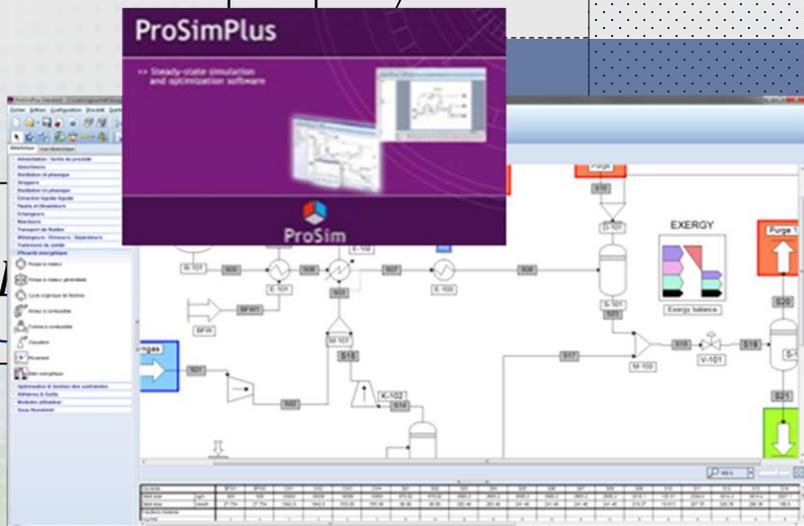
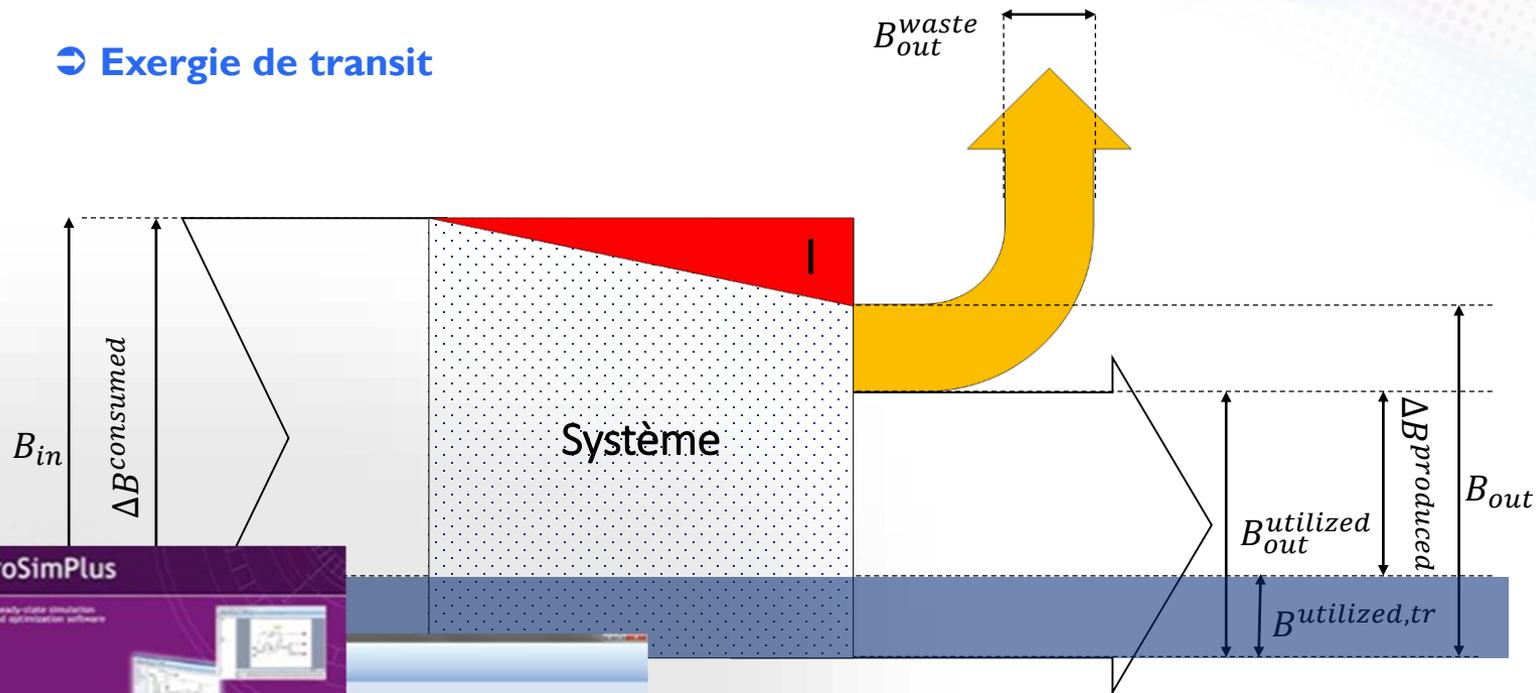
Exergie de transit



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

- 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



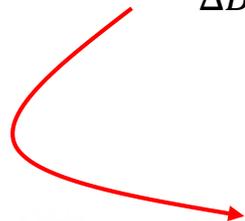
$$\Delta B^{produced} = + B_{out}^W - B_{utilized,tr} + B_{out}^{M,waste} + I$$

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

- 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)

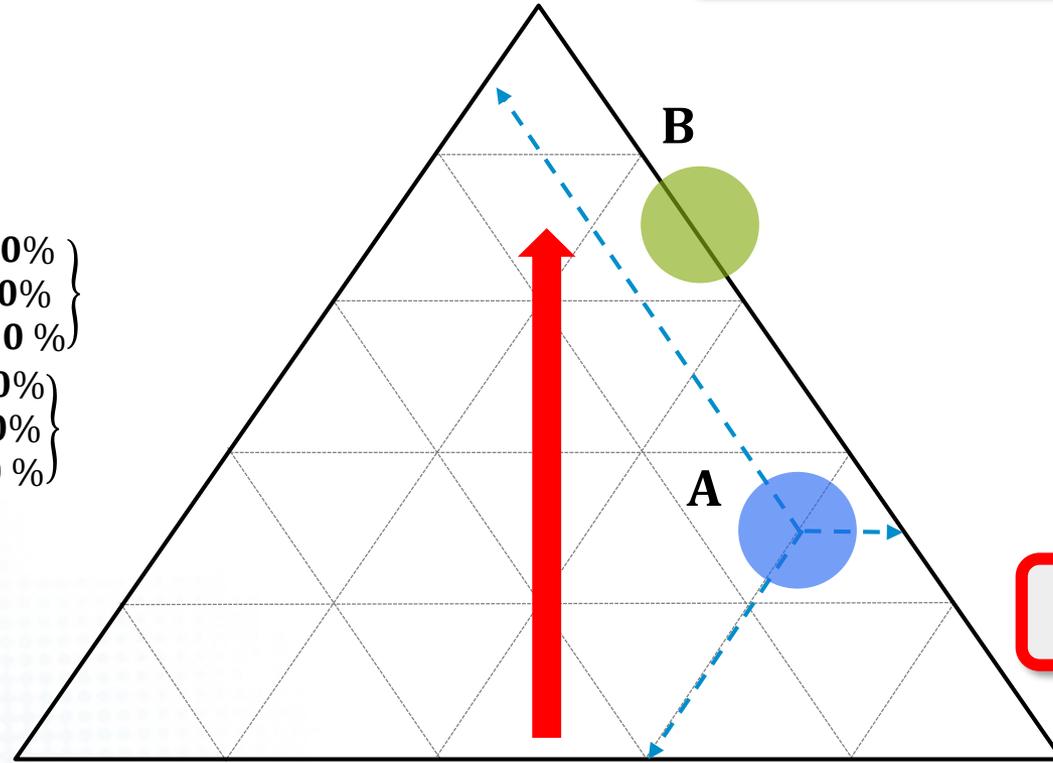
- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
 - Bilans exergetiques
 - Efficacités exergetiques
 - Le ternaire exergetique
 - Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

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

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

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

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

- 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

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

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

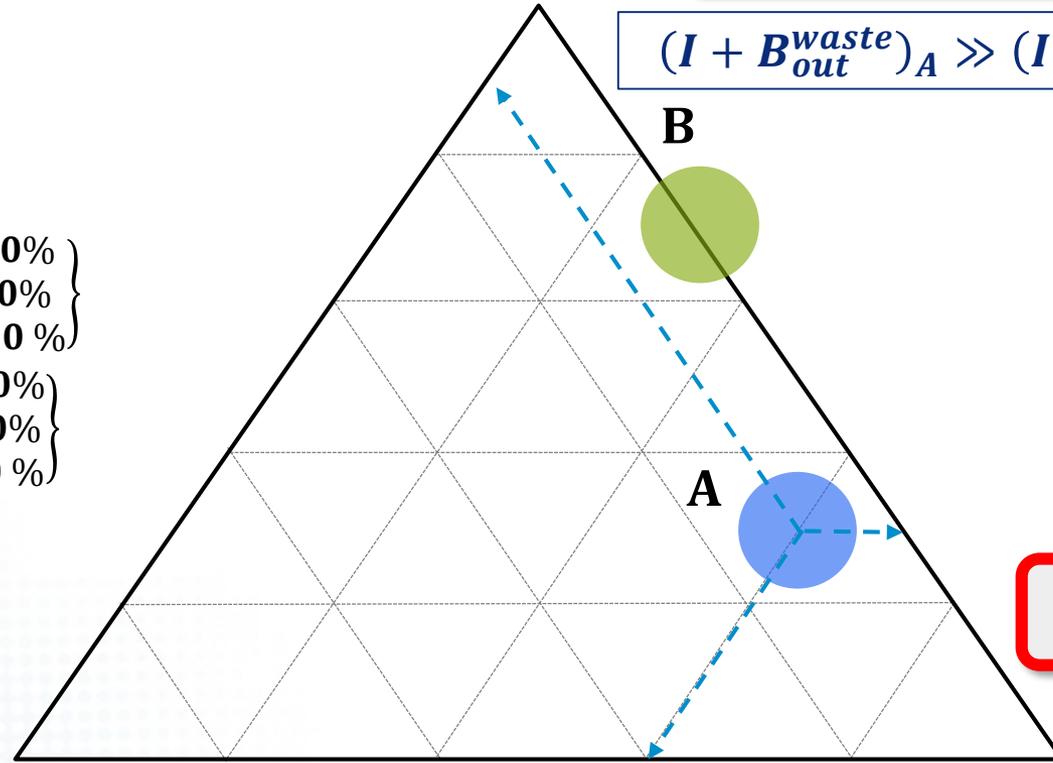
$$B: \begin{cases} IE = 70\% \\ II = 30\% \\ IW = 0\% \end{cases}$$

Valorisation des pertes externes

Réduction des irréversibilités

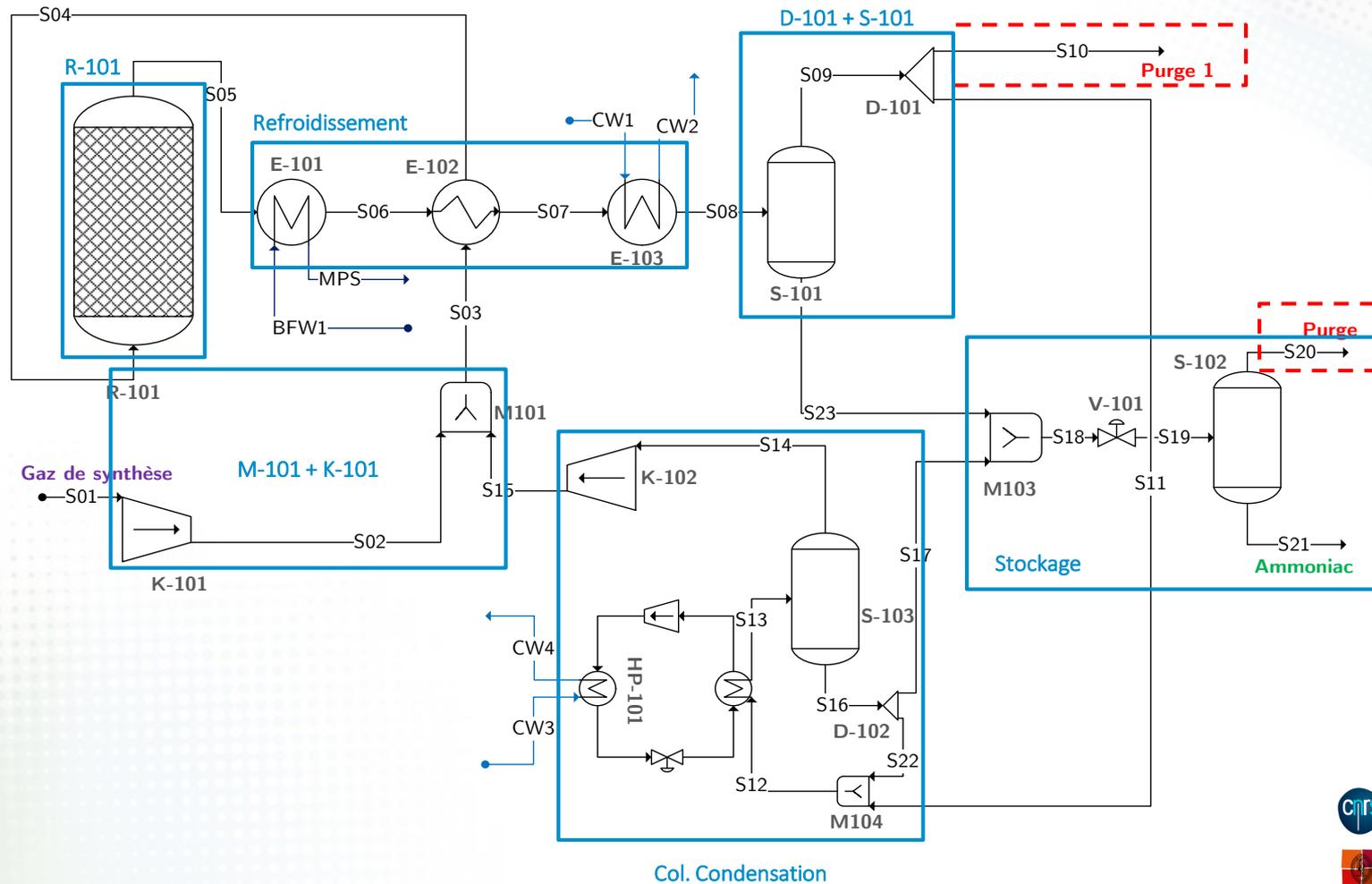
$$= \frac{IW}{\Delta B^{consumed}}$$

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



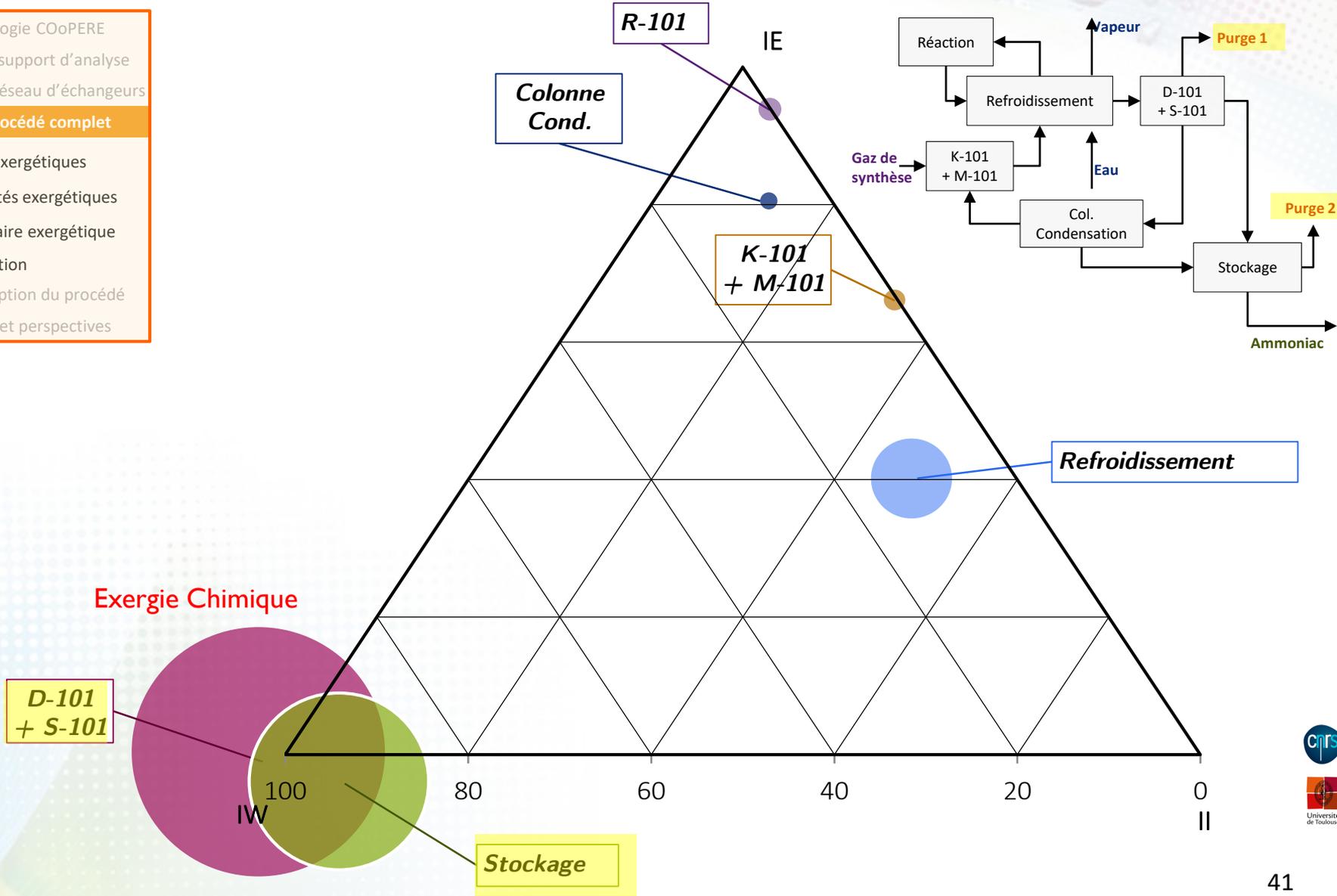


La méthodologie COoPeRE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
Analyse du procédé complet
--- Bilans exergetiques
--- Efficacités exergetiques
--- Le ternaire exergetique
● Application
Rétro-conception du procédé
Conclusions et perspectives





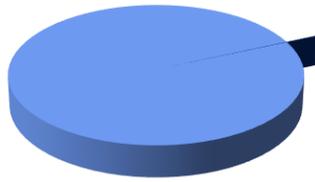
- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet**
- Bilans exergétiques
- Efficacités exergétiques
- Le ternaire exergétique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives





- 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

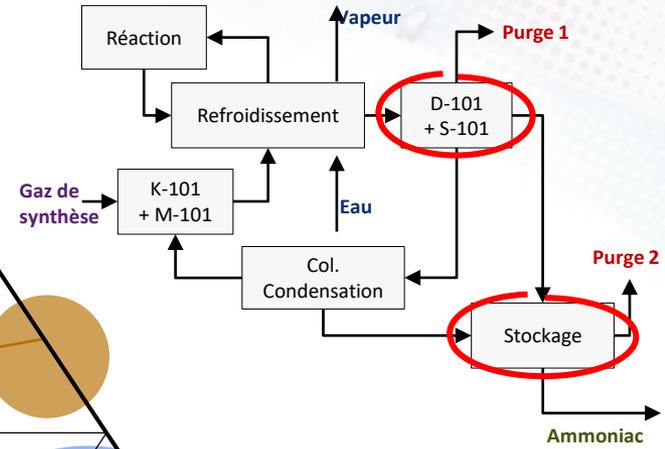
Refroidissement

Refroidissement : Fortes irréversibilités → Réduire ΔT

D-101 + S-101

Stockage

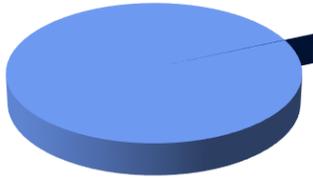
100 IW 80 60 40 20 0 II





- 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 :

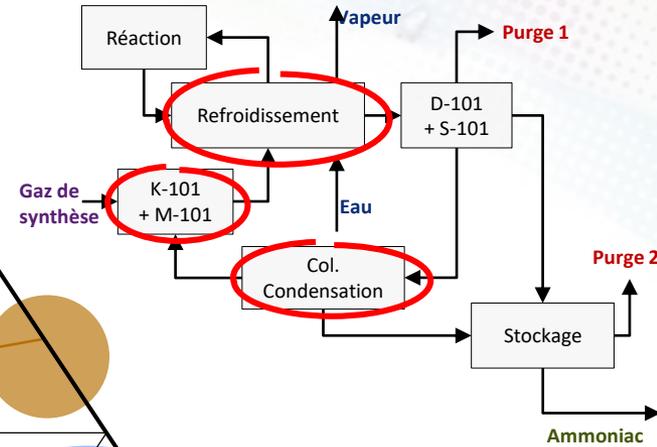


■ Pertes thermiques (kW)
 ■ Pertes mécaniques (kW)
Valoriser la purge (mécaniquement ?)

R-101

Colonne Cond.

K-101 + M-101



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

Refroidissement
 Refroidissement :
Fortes irréversibilités
→ Réduire ΔT

D-101 + S-101

100 IW

80

60

40

20

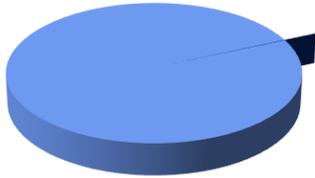
0 II

Stockage



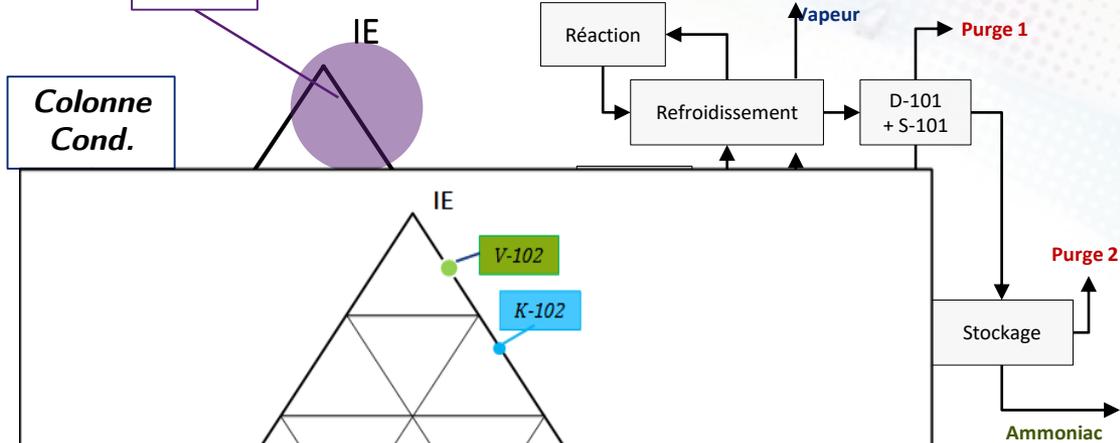
- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Bilans exergétiques
- Efficacités exergétiques
- Le ternaire exergétique
- Application
- Rétro-conception du procédé
- Conclusions et perspectives

D-101 + S-101 :

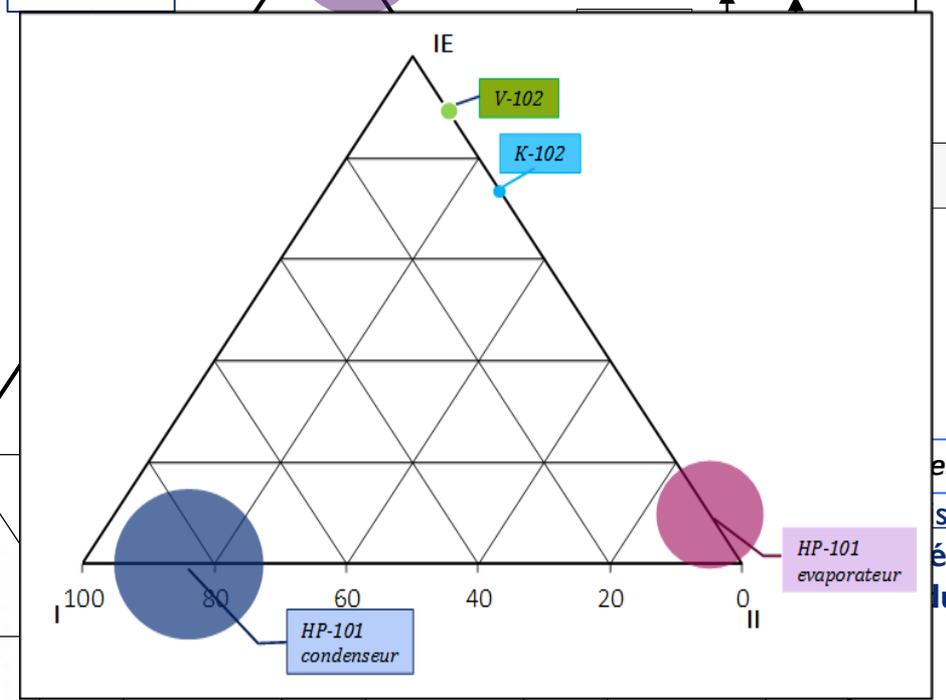


■ Pertes thermiques (kW)
 ■ Pertes mécaniques (kW)
Valoriser la purge (mécaniquement ?)

R-101



Colonne Cond.



K-101 + M-101 :
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

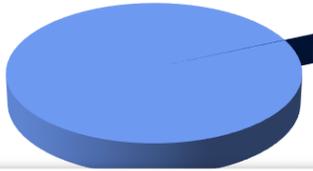
Stockage

ent
 ssement :
 éversibilités
 uire ΔT



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

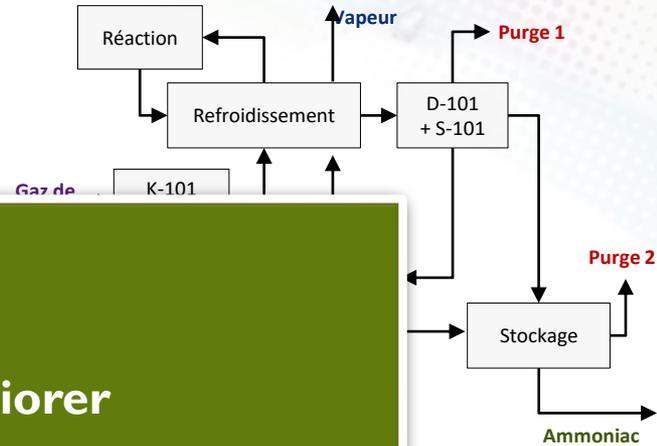
D-101 + S-101 :



R-101

IE

Colonne Cond.



Zones des procédés à améliorer

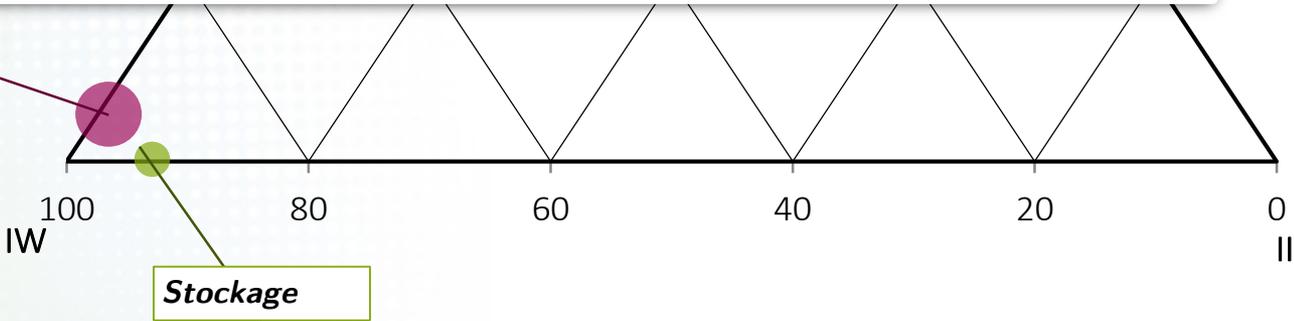
1. Refroidissement
2. Compression + Mélange
3. Purge
4. Colonne de condensation

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

sement
 s irréversibilités
Réduire ΔT

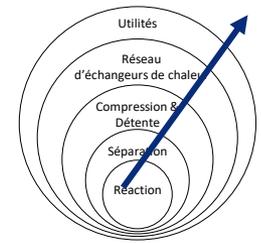
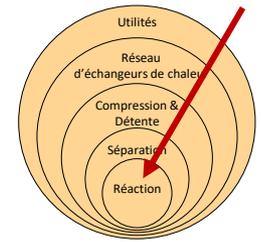
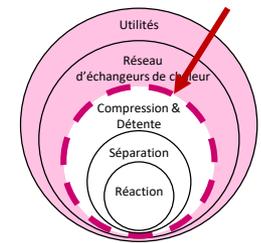
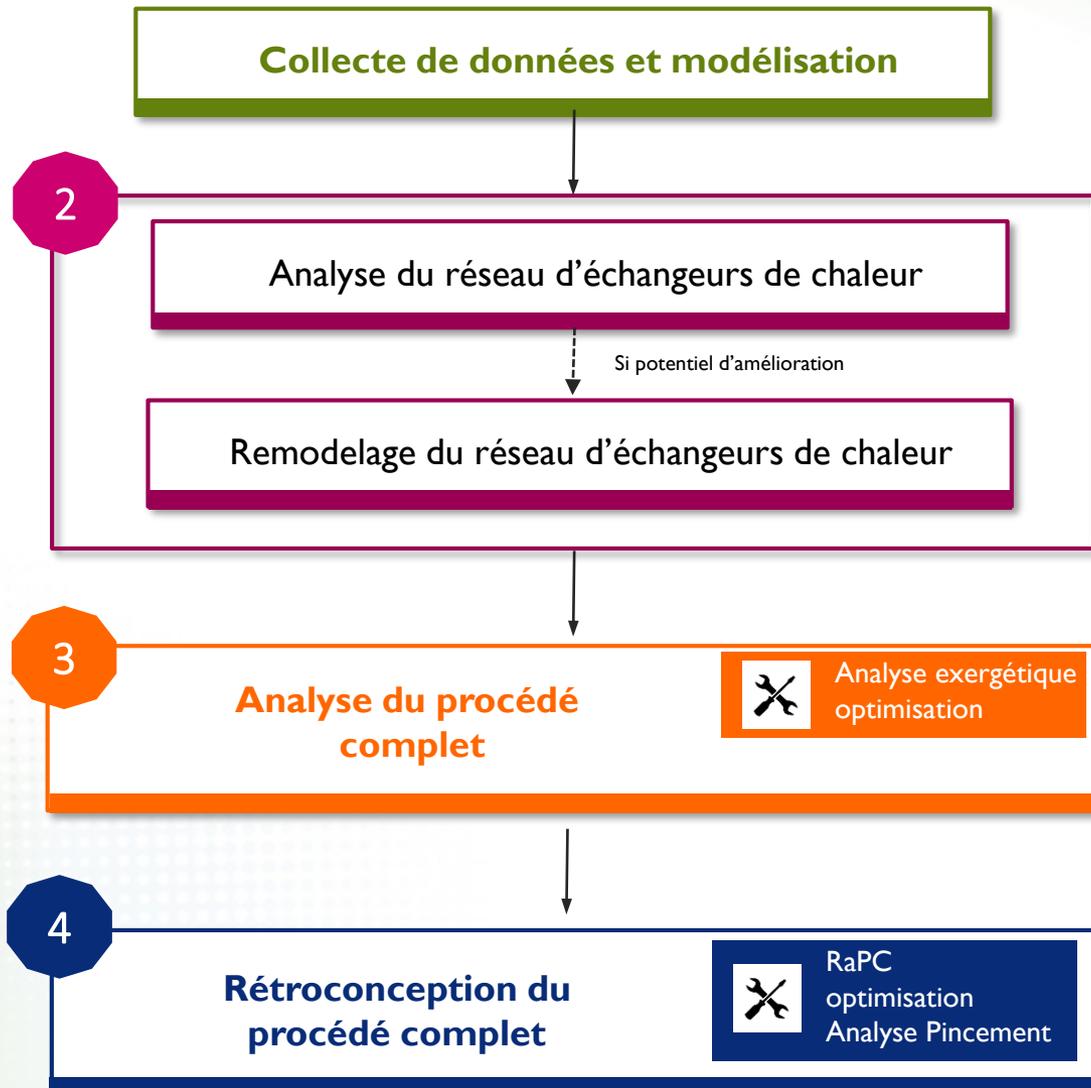
D-101 + S-101

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
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

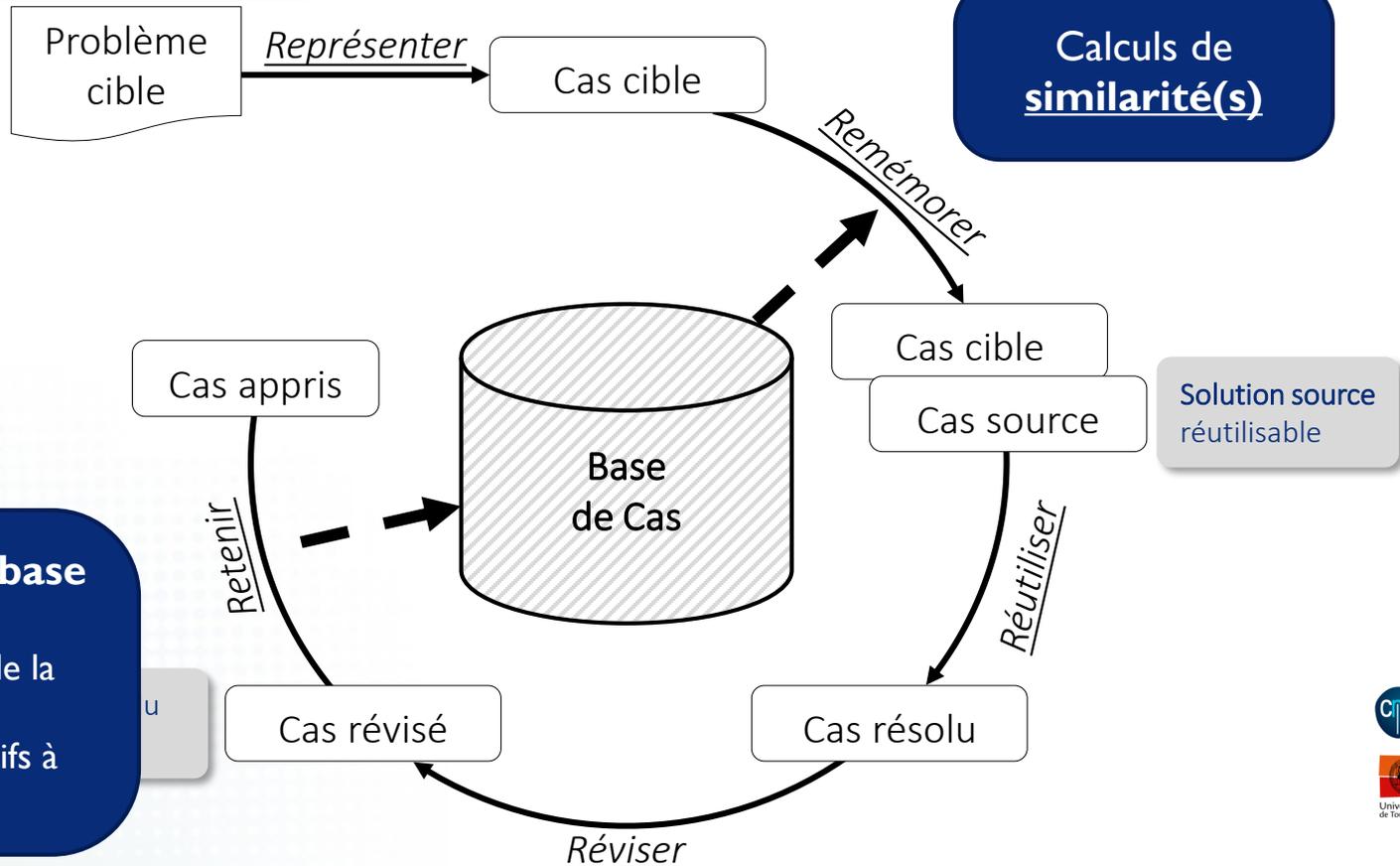
- La méthodologie COoPeRE
- Création du support d'analyse
- Analyse du réseau d'échangeurs
- Analyse du procédé complet
- Rétro-conception du procédé**
 - Méthodologie générale
 - RàPC : modifications locales**
 - Synthèse d'alternatives
 - Application
- Conclusions et perspectives

Raisonnement à partir de cas (RàPC) : Principe

Un ou plusieurs objectifs

- Refroidir
- Mélanger
- Valoriser

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



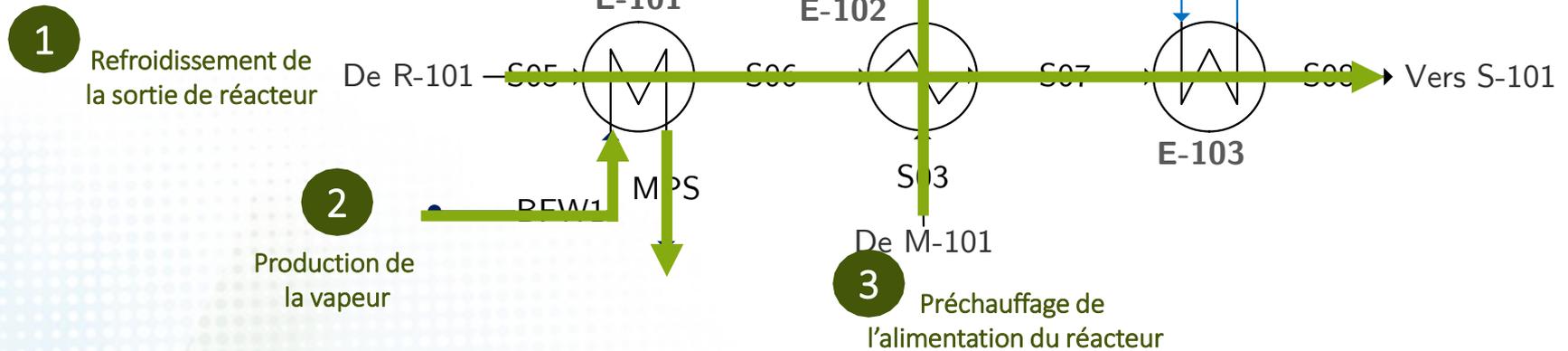
Alimentation de la base de cas :

- Récupération de cas de la littérature
- Génération de cas fictifs à partir de règles

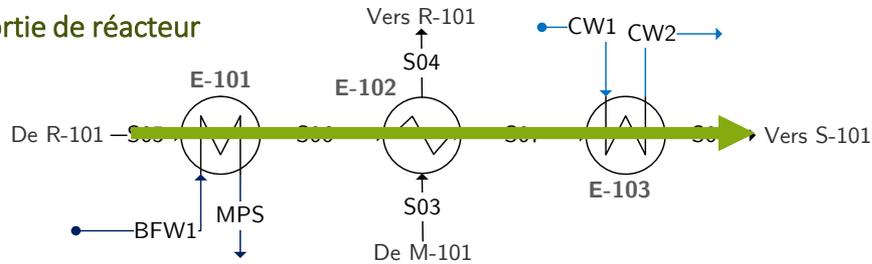


Zones des procédés à améliorer I. Refroidissement

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



1 Refroidissement de la sortie de réacteur

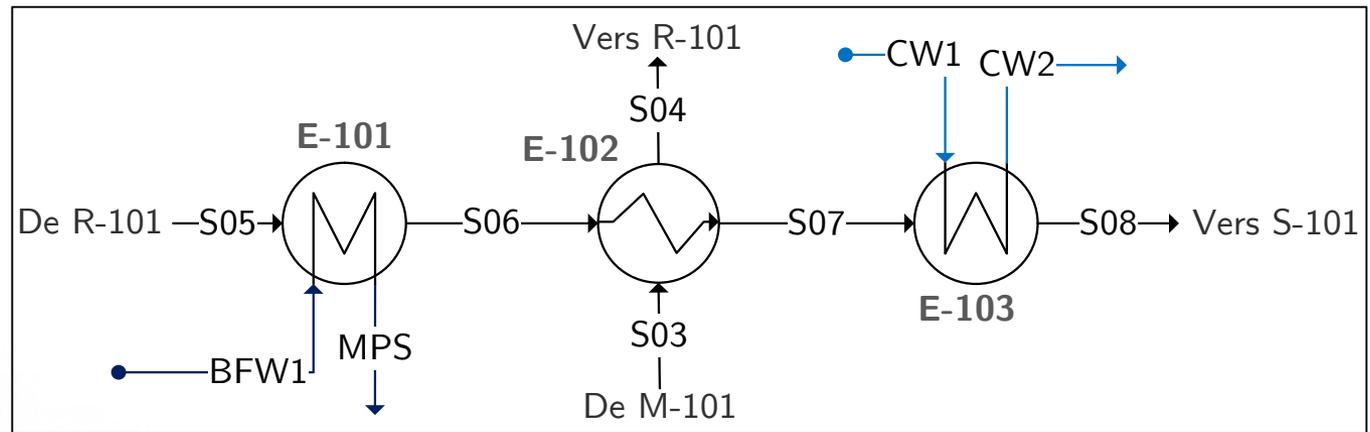


	Problème Cible	Cas similaires	
		<i>Production méthanol</i>	<i>Chaudière</i>
Fonction principale	Changement de température	Changement de température	Changement de température
Fonction technique	Refroidissement	Refroidissement	Refroidissement
Entrée(s)	S05	CA-04	23
- Température (°C)	458	280	1482
- Pression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



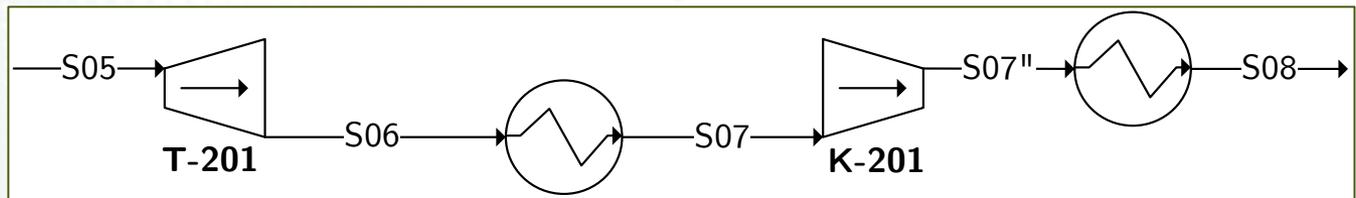
Zones des procédés à améliorer I. Refroidissement

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

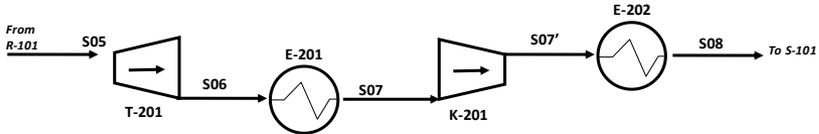
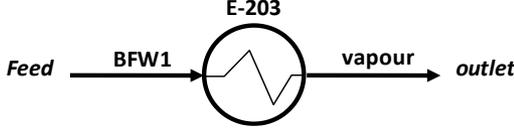
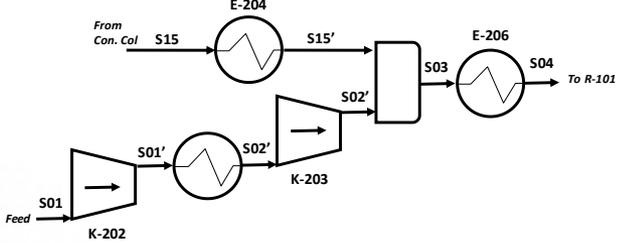
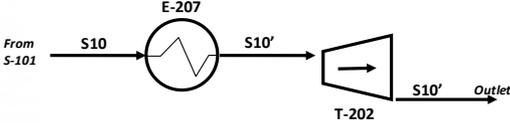


1 Solution : procédé méthanol

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
Refroidissement : solution 1 (config A)		Intégration d'une turbine à gaz en aval du réacteur
Refroidissement : solution 2 (config B)		Augmentation de la génération de vapeur
M101+K101		Introduction d'un deuxième étage de compression avec refroidissement intermédiaire Et préchauffe du courant S15 avant le mélangeur
Purge		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



- 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
Refroidissement : solution 1 (config A)		Intégration d'une turbine à gaz en aval du réacteur
Refroidissement : solution 2 (config B)		Augmentation de la génération de vapeur
M101+K101		Introduction d'un deuxième étage de compression avec refroidissement intermédiaire Et préchauffe du courant S15 avant le mélangeur
Purge		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

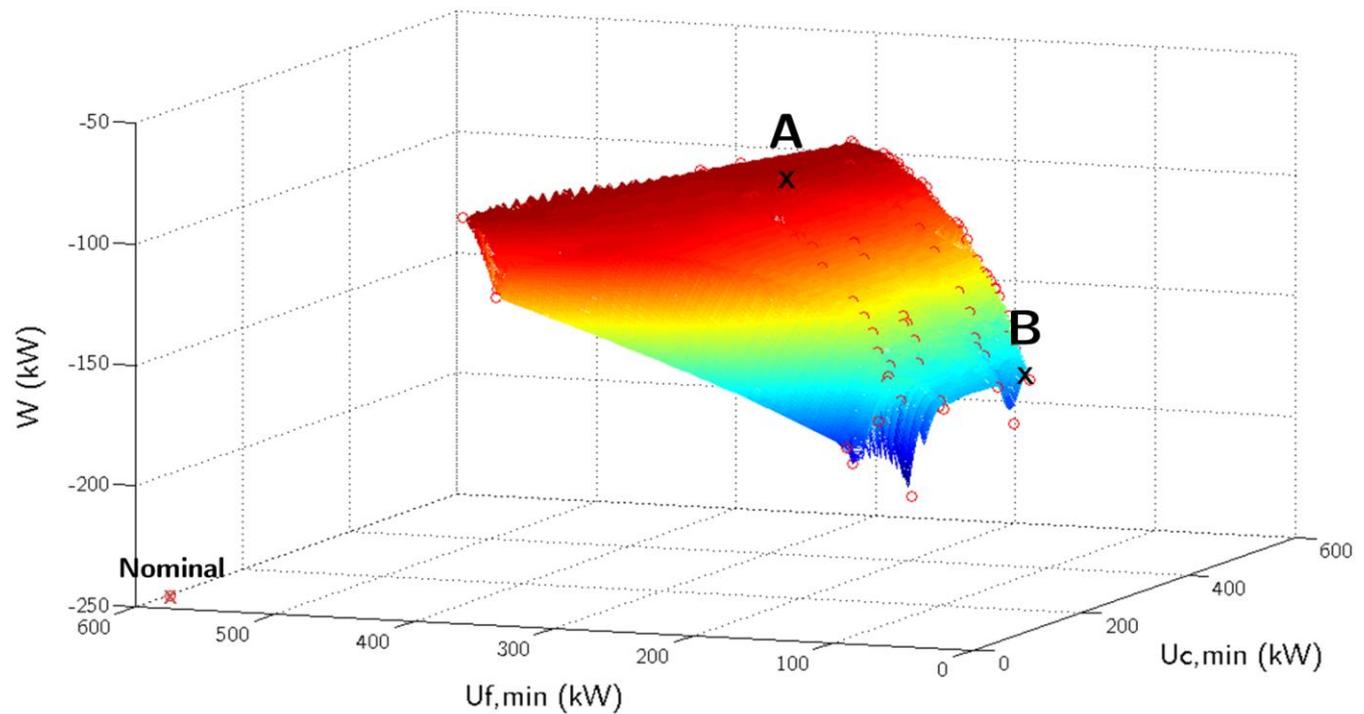
Simulateur de procédés → évaluation du travail **W** nécessaire
Analyse Pincement → évaluation de **Uc,min** et de **Uf,min**
Optimisation tri-critère

...que des



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

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

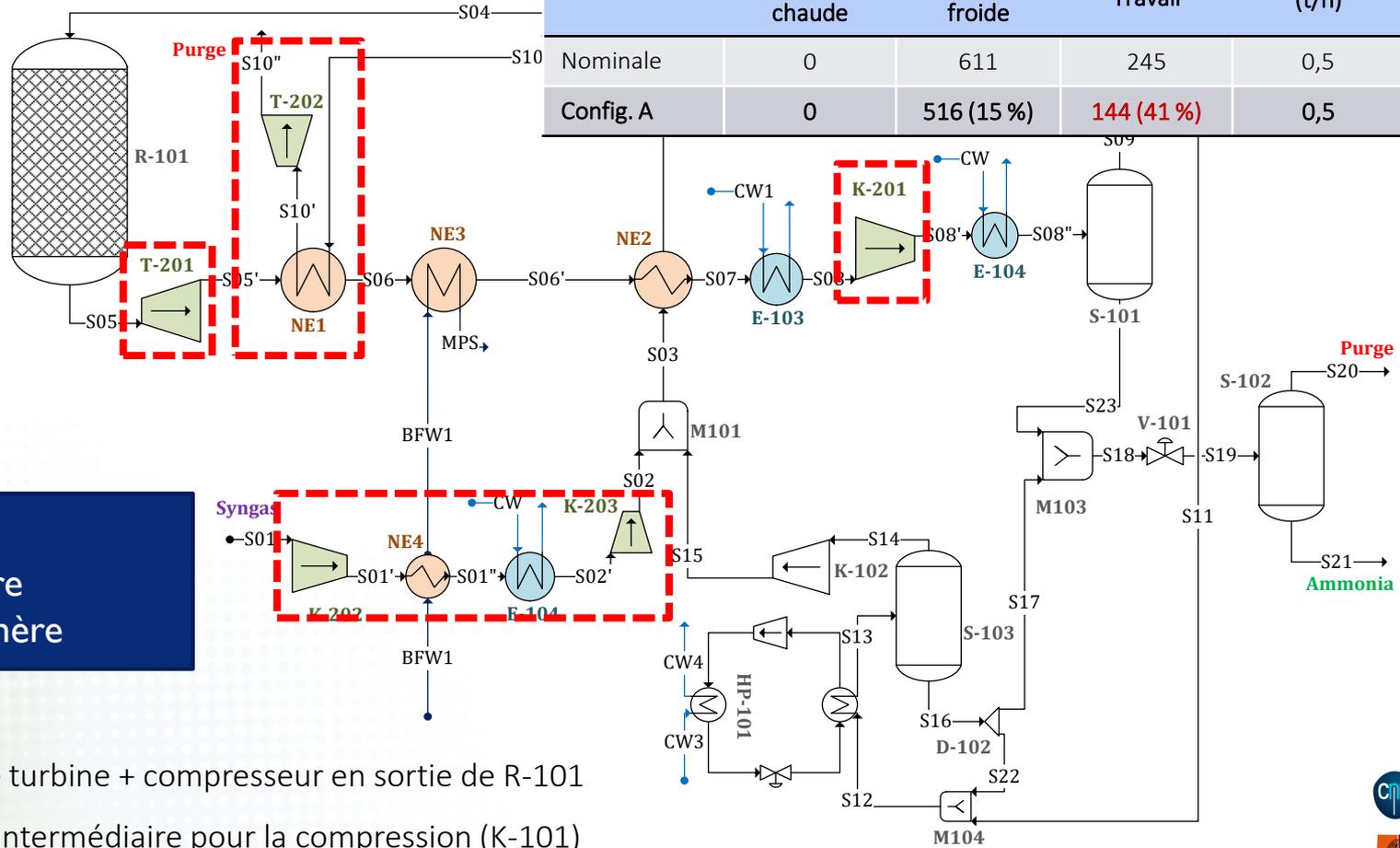




La méthodologie COoPeRE
Création du support d'analyse
Analyse du réseau d'échangeurs
Analyse du procédé complet
Rétro-conception du procédé
Méthodologie générale
RàPC : modifications locales
Synthèse d'alternatives
Application
Conclusions et perspectives

Configuration A

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



Avantageux si :

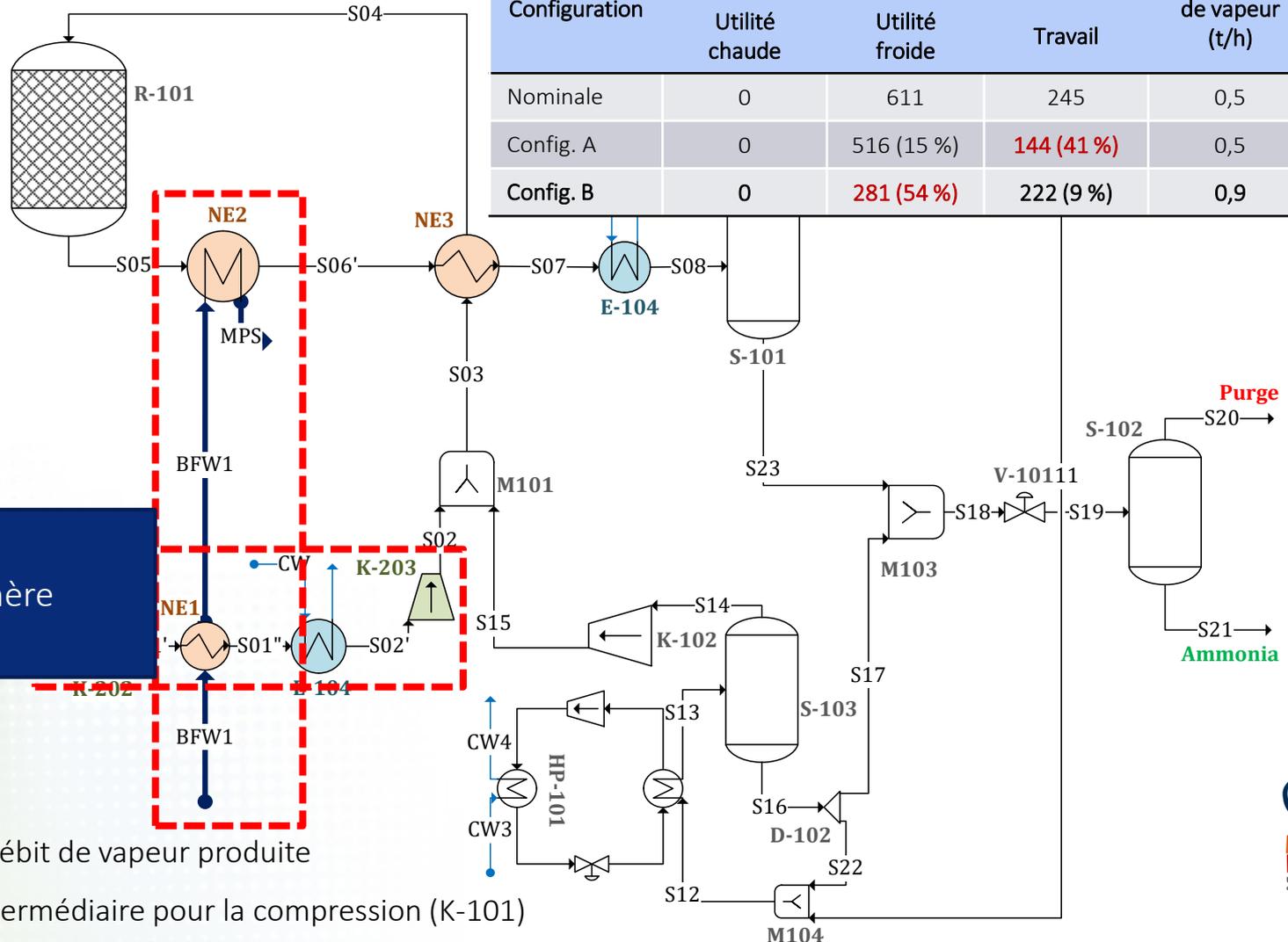
- Électricité chère
- frigories peu chère

- ✓ 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

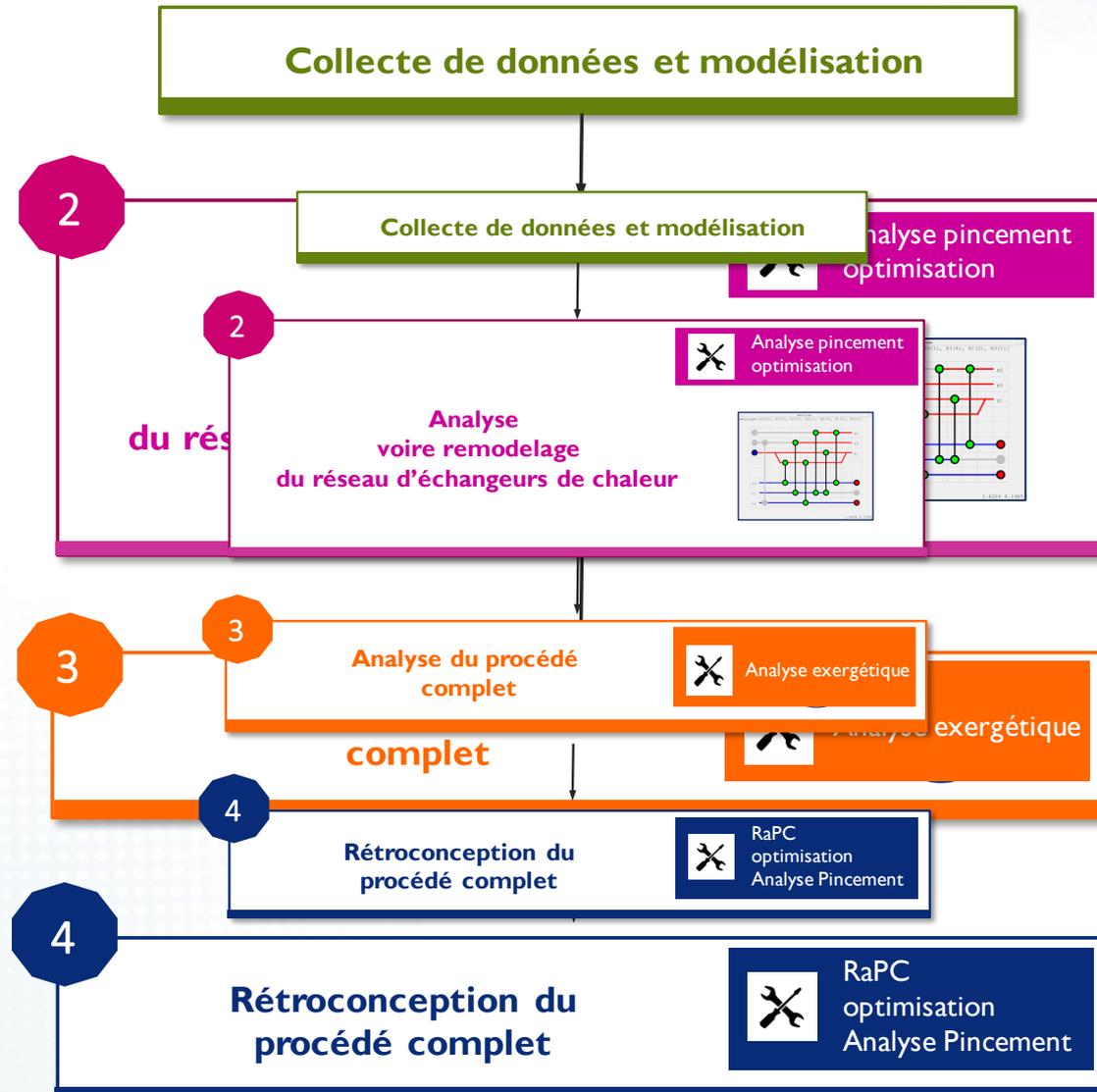


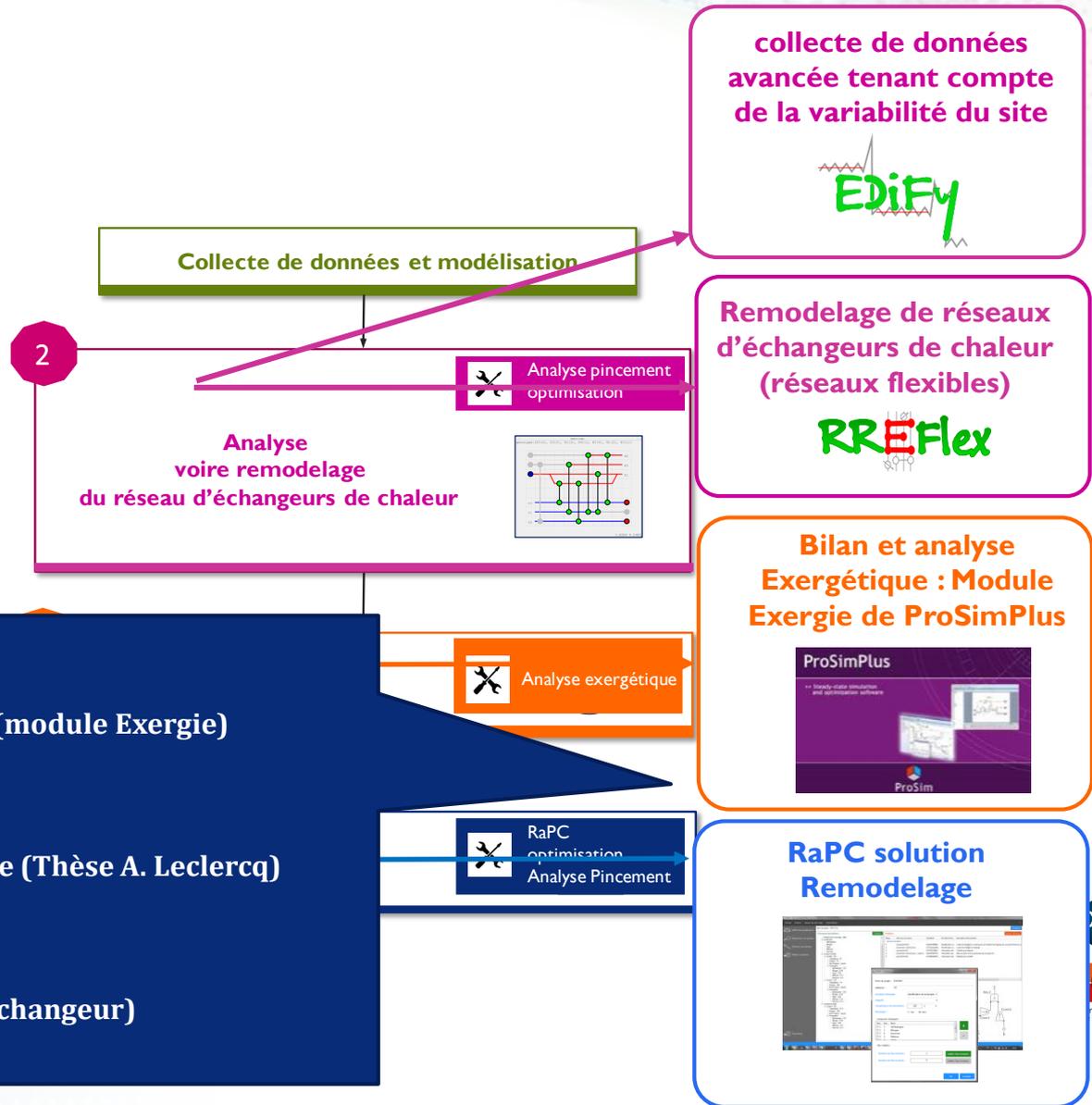
Configuration	Consommations (kW) (gain %)			Production de vapeur (t/h)
	Utilité chaude	Utilité froide	Travail	
Nominale	0	611	245	0,5
Config. A	0	516 (15 %)	144 (41 %)	0,5
Config. B	0	281 (54 %)	222 (9 %)	0,9

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**¹, Pascal Floquet¹, Gilles Hétreux¹

•Ali Ghannadazeh³, Stephane Gourmelon²

•Lucille Payet¹

Raphaelle.thery@ensiacet.fr