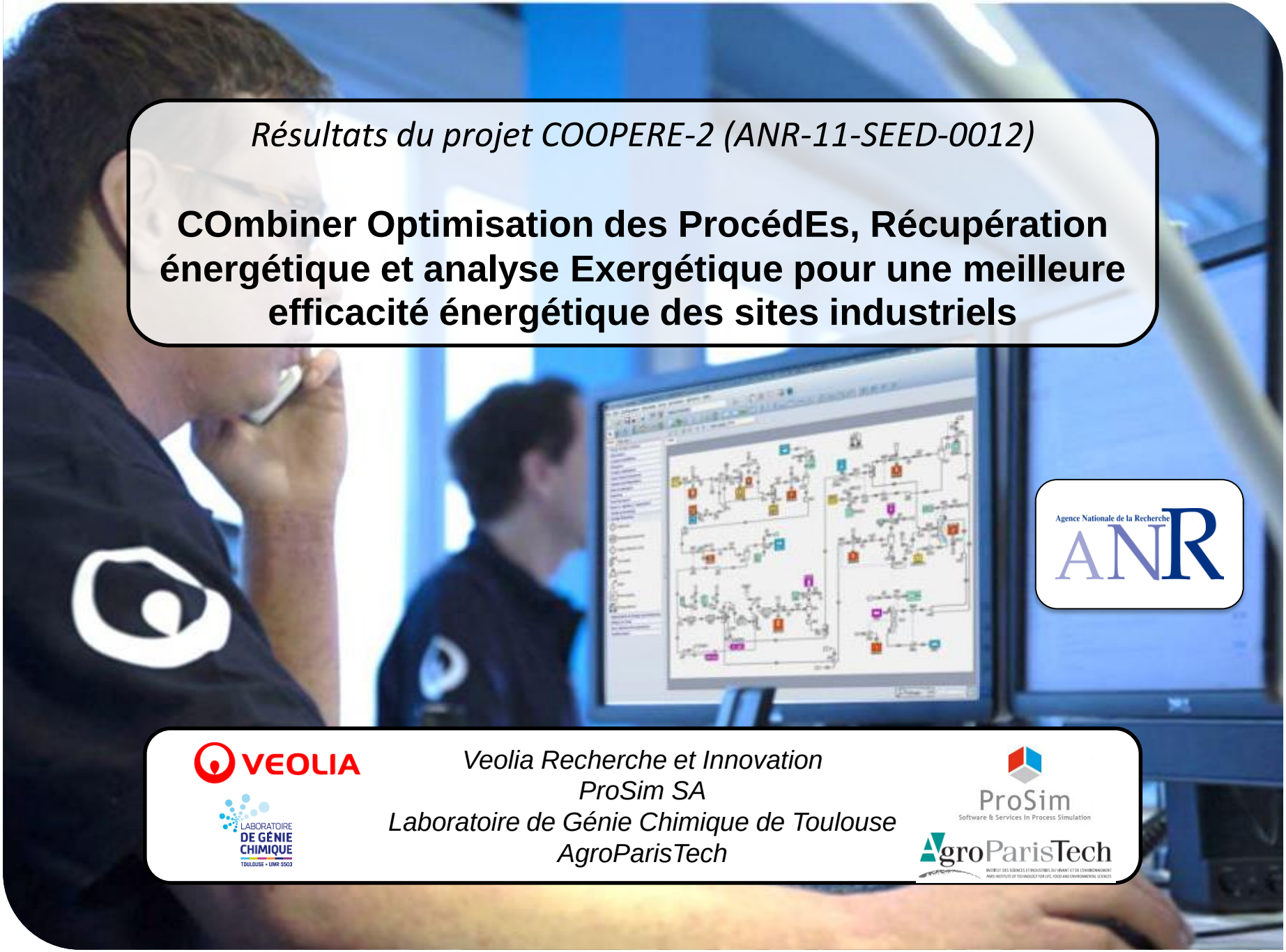


Résultats du projet COOPERE-2 (ANR-11-SEED-0012)

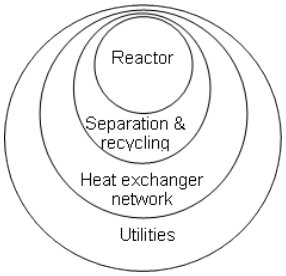
COmbiner Optimisation des ProcédEs, Récupération énergétique et analyse Exergétique pour une meilleure efficacité énergétique des sites industriels

Veolia Recherche et Innovation
ProSim SA
Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse
AgroParisTech

Un besoin croissant d'efficacité énergétique → Les moyens

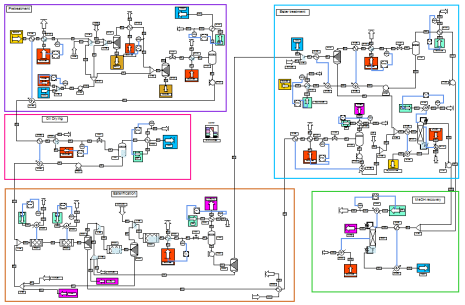
Périmètre

- Audits classiques portant principalement sur les utilités
  - → Extension du périmètre pour descendre jusqu'au Procédé



Méthodes et outils avancés

- *Utilisation de logiciels de simulation des procédés*
  - → Application de méthodes d'analyses puissantes à l'approche globale sur des procédés complexes, vs « audit à la main »
- *Réplication des modèles et des analyses*
  - → Industrialisation du processus
- *Conséquence*
  - → Coût et temps de formation initiaux mais rentabilisation rapide attendue ensuite



Identification de solutions

- *Outils et Méthodes = Aide à la décision*
  - →L'identification de solution repose toujours sur l'expertise et l'expérience de l'utilisateur
- *Les méthodes et outils magiques n'existent pas*

Un besoin croissant d'efficacité énergétique → Le projet COOPERE

COmbiner **O**ptimisation des **P**rocéd**E**s, **R**écupération énergétique et analyse **E**xergétique pour une meilleure efficacité énergétique des sites industriels

4 partenaires :

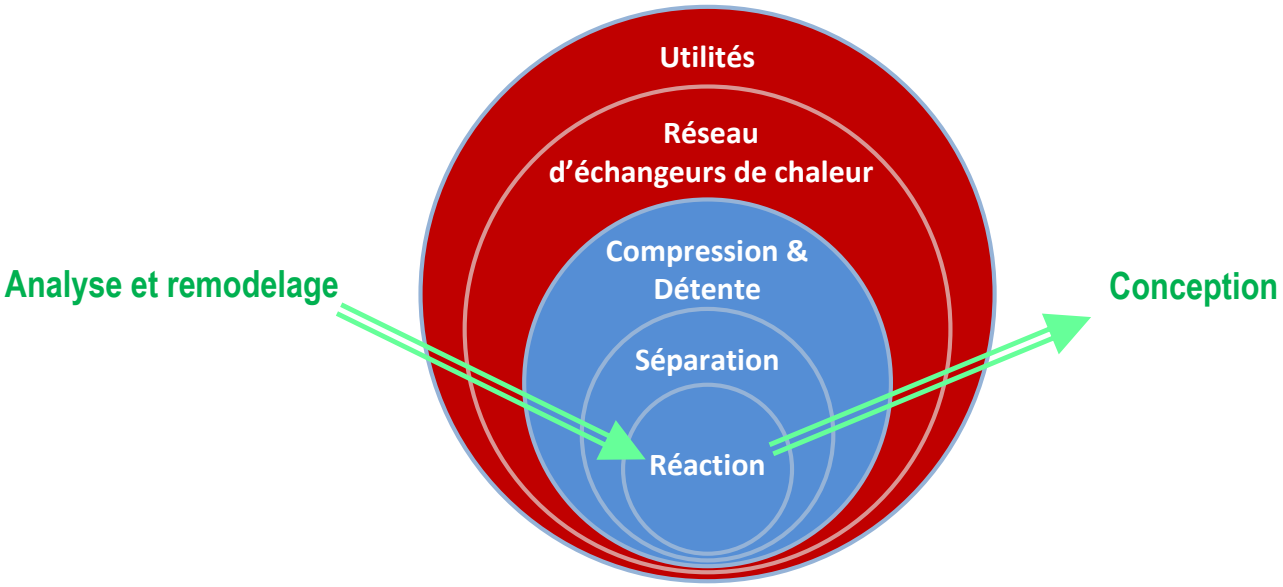
- *Veolia R&I* — *Applications industrielles et gestion de projet*
- *ProSim* — *Editeur de logiciel (ProSimPlus)*
- *LGC Toulouse* — *Méthodologie globale, Exergie et Analyse exergétique*
- *AgroParisTech* — *Valorisation des Sous-produits*

Financement par l'ANR sur 3 ans (2012-2015), dans l'appel à projets ANR-11-SEED-0012 (Systèmes énergétiques efficaces et décarbonés)

Objectifs

Rendre accessible à l'auditeur, des méthodes puissantes et avancées et industrialiser le processus

La méthodologie « COOPERE »



Analyse des deux **couches externes**

Analyse du **procédé complet**

Analyse Pincement

Analyse Exergétique

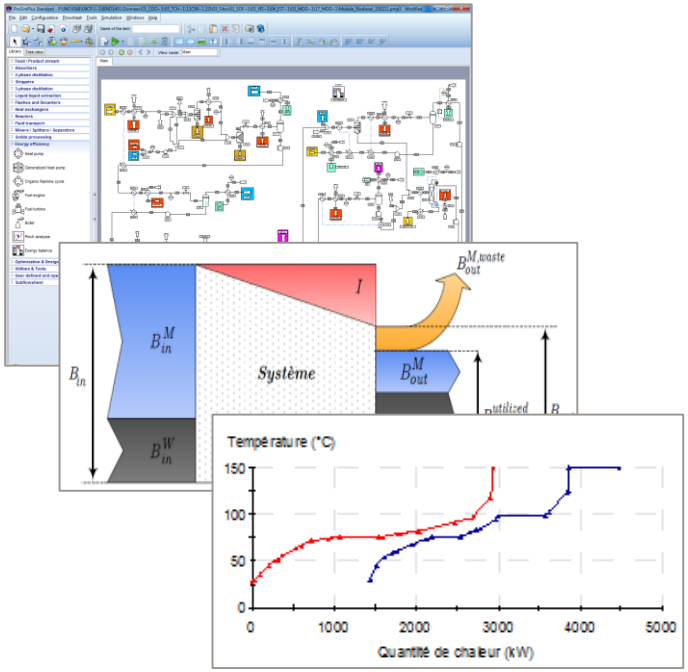
La méthodologie « COOPERE »

1. **Création du support d'analyse (Modélisation du site)**

2. **Analyse du procédé (Pinch, Exergie, Sous-produits)**

3. **Rétro-conception du procédé (Identification de solutions)**

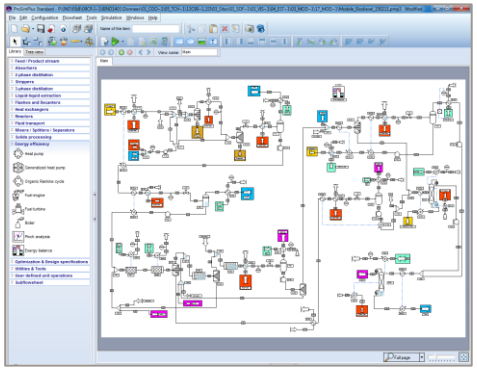
4. **Optimisation des solutions (dans le modèle)**



Etape 1 : Modélisation du site

1

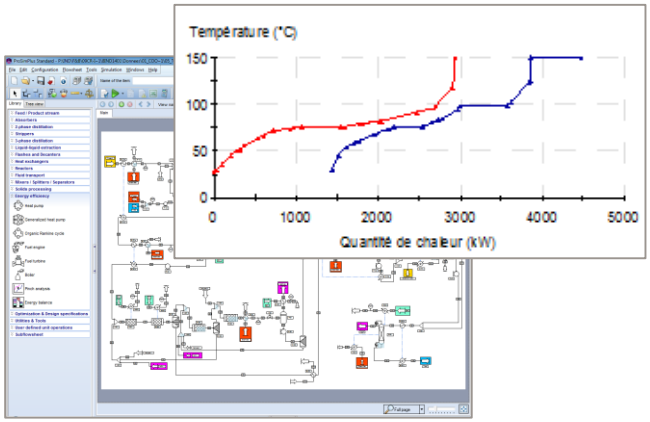
Création du support d'analyse (Modélisation du site)



Etape 2.1 : Analyse du réseau d'échangeurs

1

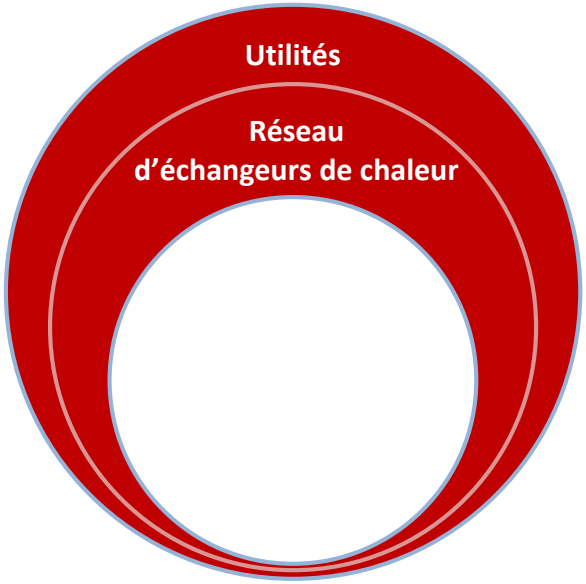
Création du support d'analyse (Modélisation du site)



2

Analyse du procédé (Pinch, Exergie, Sous-produits)

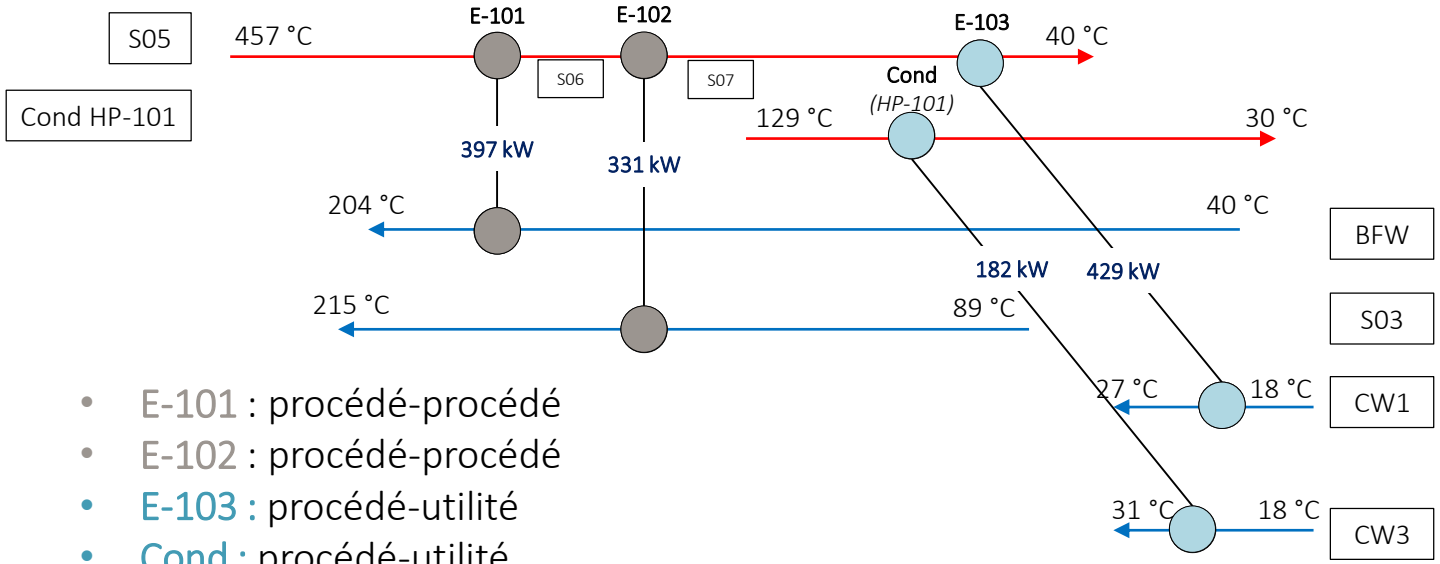
2.1. Analyse du réseau d'échangeurs



Etape 2.1 : Analyse du réseau d'échangeurs

- Distinction flux « procédé » / flux « utilité »

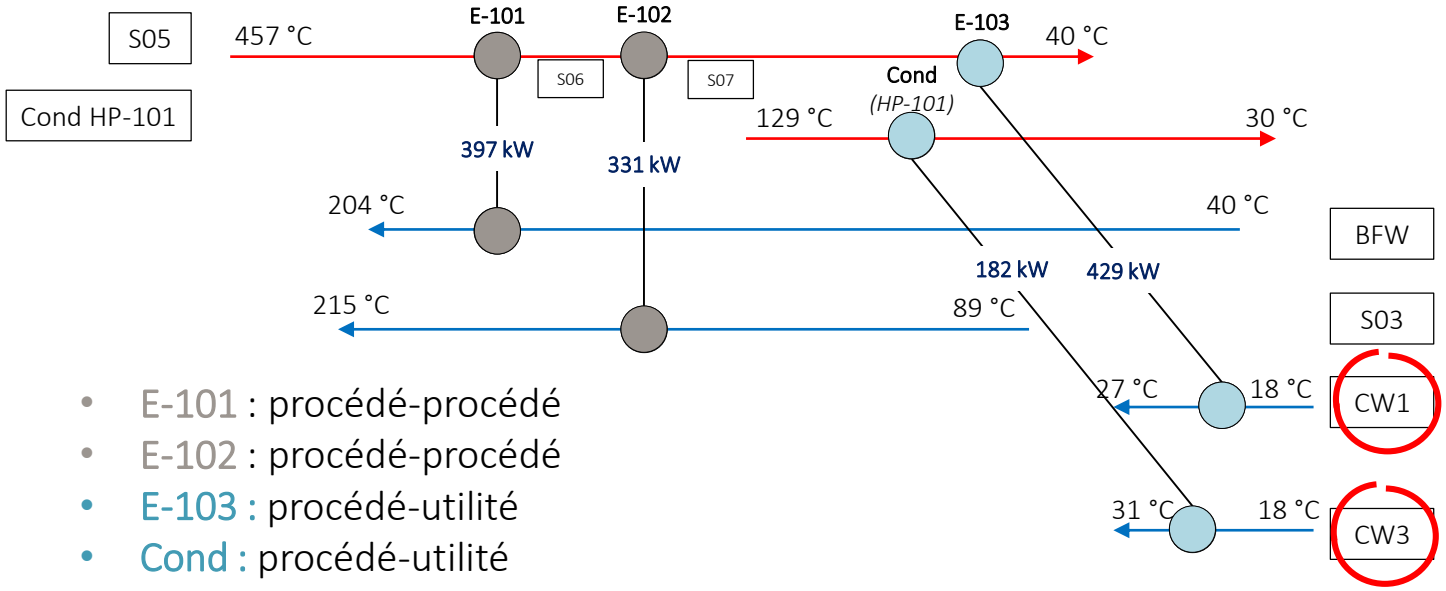
- Distinction
  - Échangeurs « procédé-procédé » (ou échangeur d'intégration)
  - Échangeurs « procédé-utilité »



- E-101 : procédé-procédé
- E-102 : procédé-procédé
- E-103 : procédé-utilité
- Cond : procédé-utilité

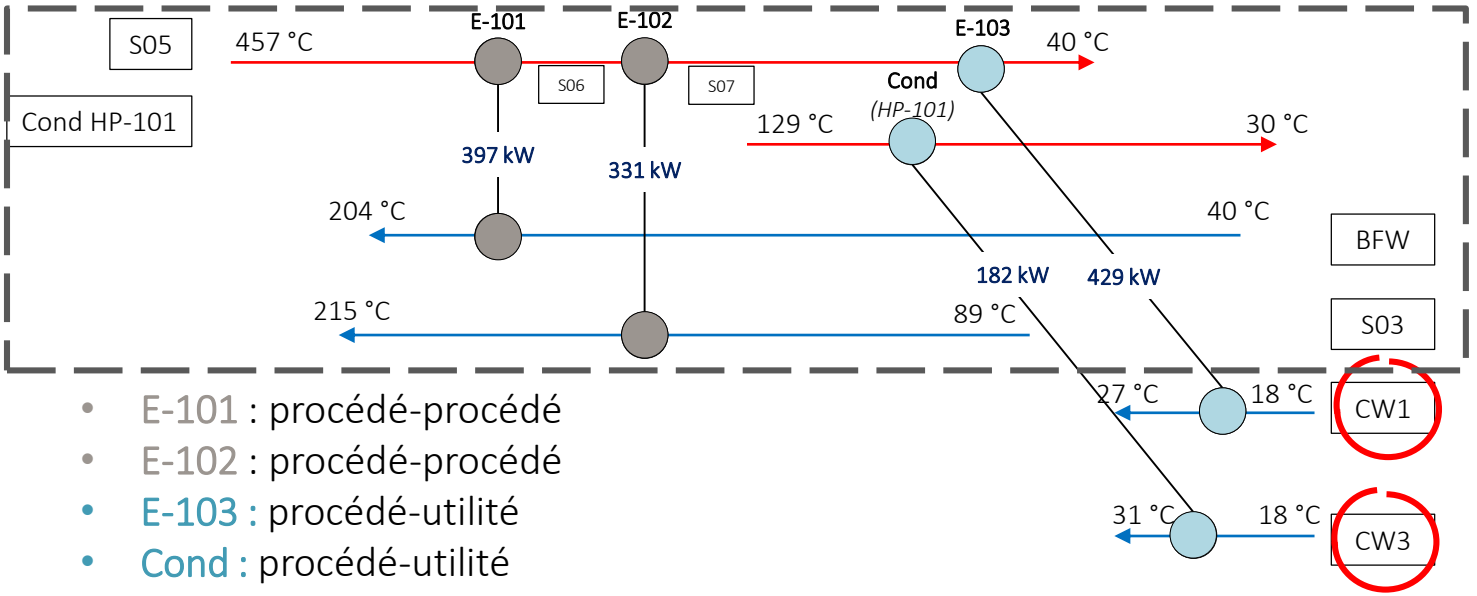
Utilités froides

Etape 2.1 : Analyse du réseau d'échangeurs



- E-101 : procédé-procédé
- E-102 : procédé-procédé
- E-103 : procédé-utilité
- Cond : procédé-utilité

Etape 2.1 : Analyse du réseau d'échangeurs



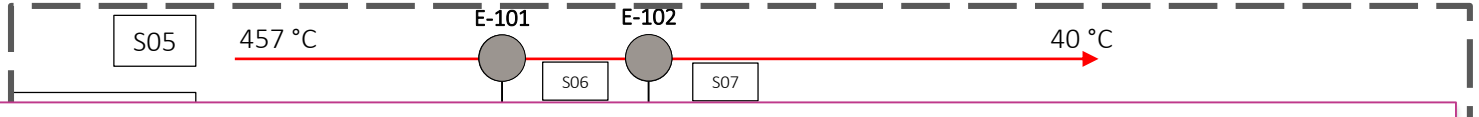
- E-101 : procédé-procédé
- E-102 : procédé-procédé
- E-103 : procédé-utilité
- Cond : procédé-utilité

Analyse Pincement appliquée à tous les flux « procédé »

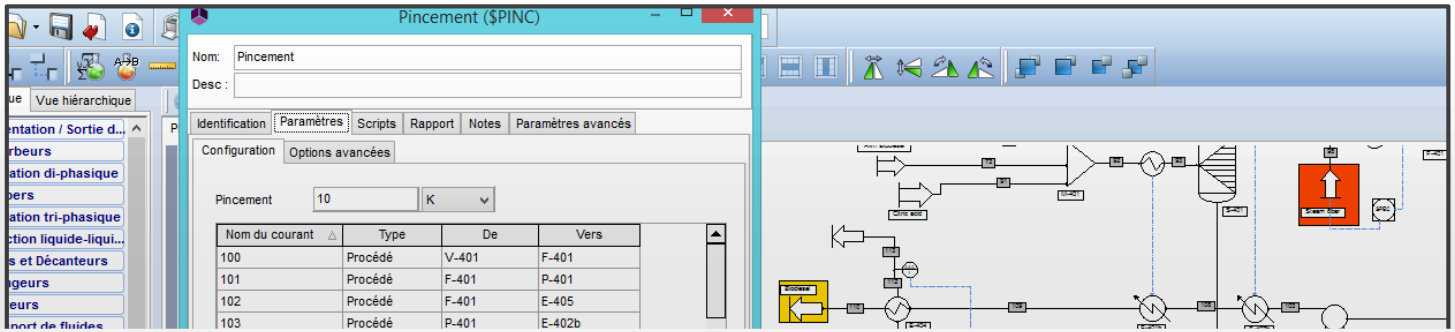
Marge d'amélioration
Remodelage complet du réseau d'échangeur

Energie thermique déjà récupérée

Etape 2.1 : Analyse du réseau d'échangeurs

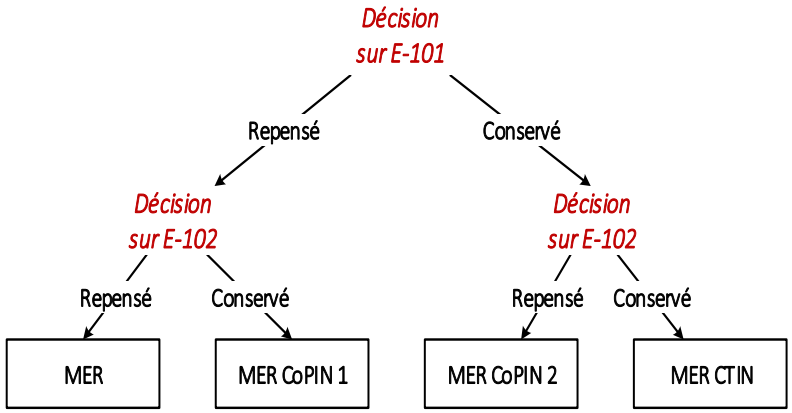


MODULE PINCEMENT (ProSimPlus®)



Evaluation des scénarii

- Algorithme d'exploration exhaustive
  - génère tous les scénarii possibles
  - évalue le MER pour chaque scénario



Marge d'amélioration

Remodelage complet du réseau d'échangeur

Energie thermique déjà récupérée

Etape 2.2 : Analyse exergétique

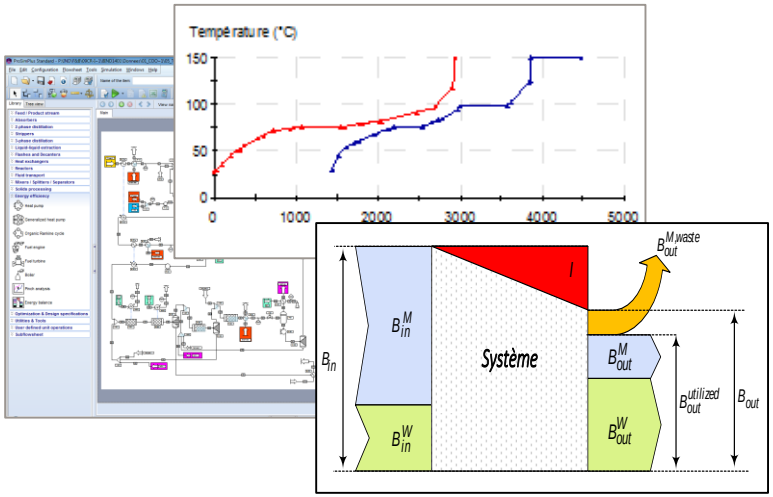
1

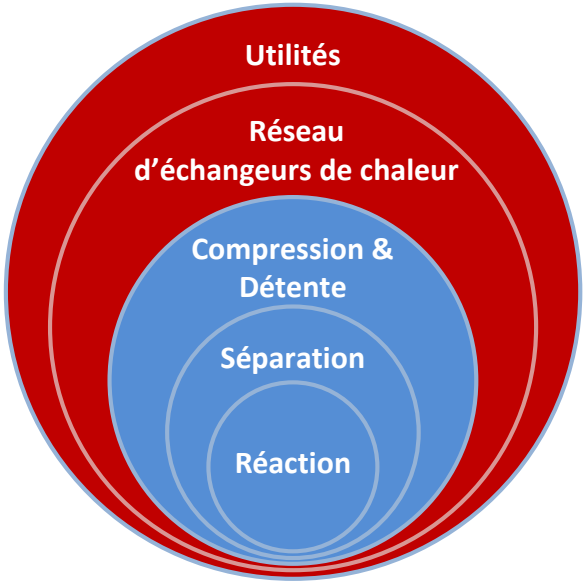
Création du support d'analyse (Modélisation du site)

2

Analyse du procédé (Pinch, Exergie, Sous-produits)

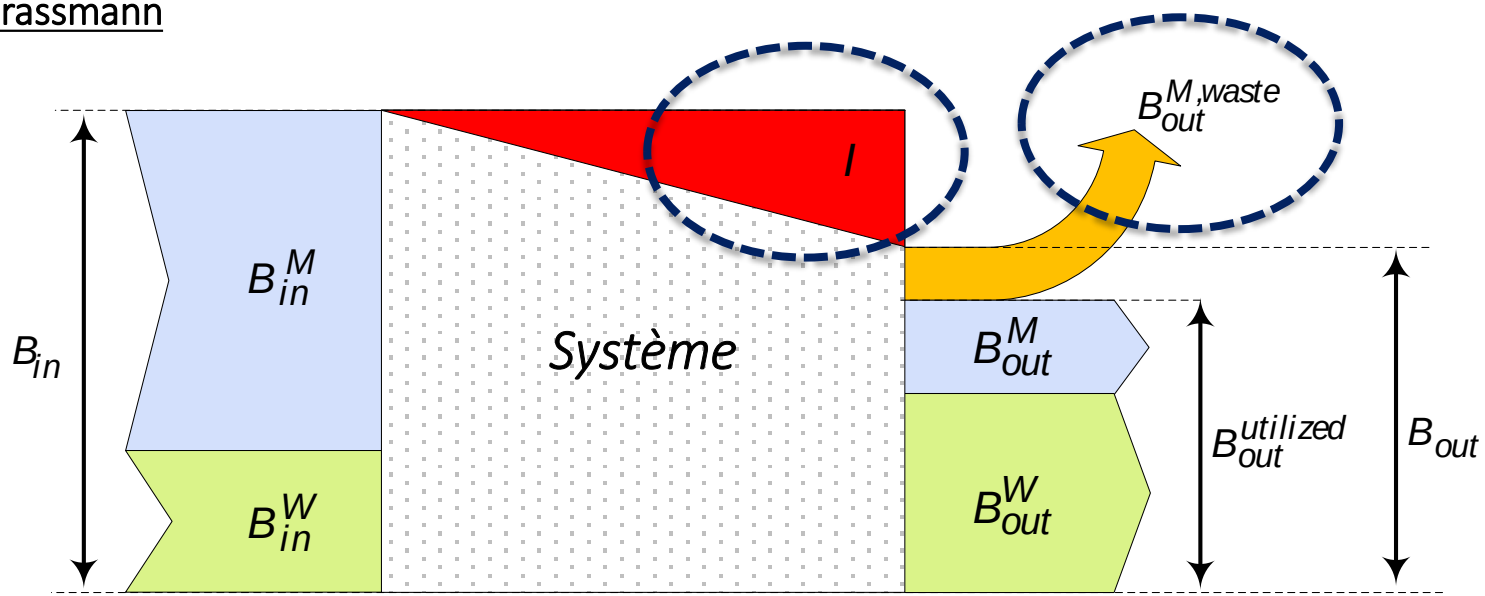
- 2.1. Analyse du réseaux d'échangeurs
- 2.2. Analyse exergetique





Etape 2.2 : Analyse exergétique - bilans exergétiques

Diagramme de Grassmann

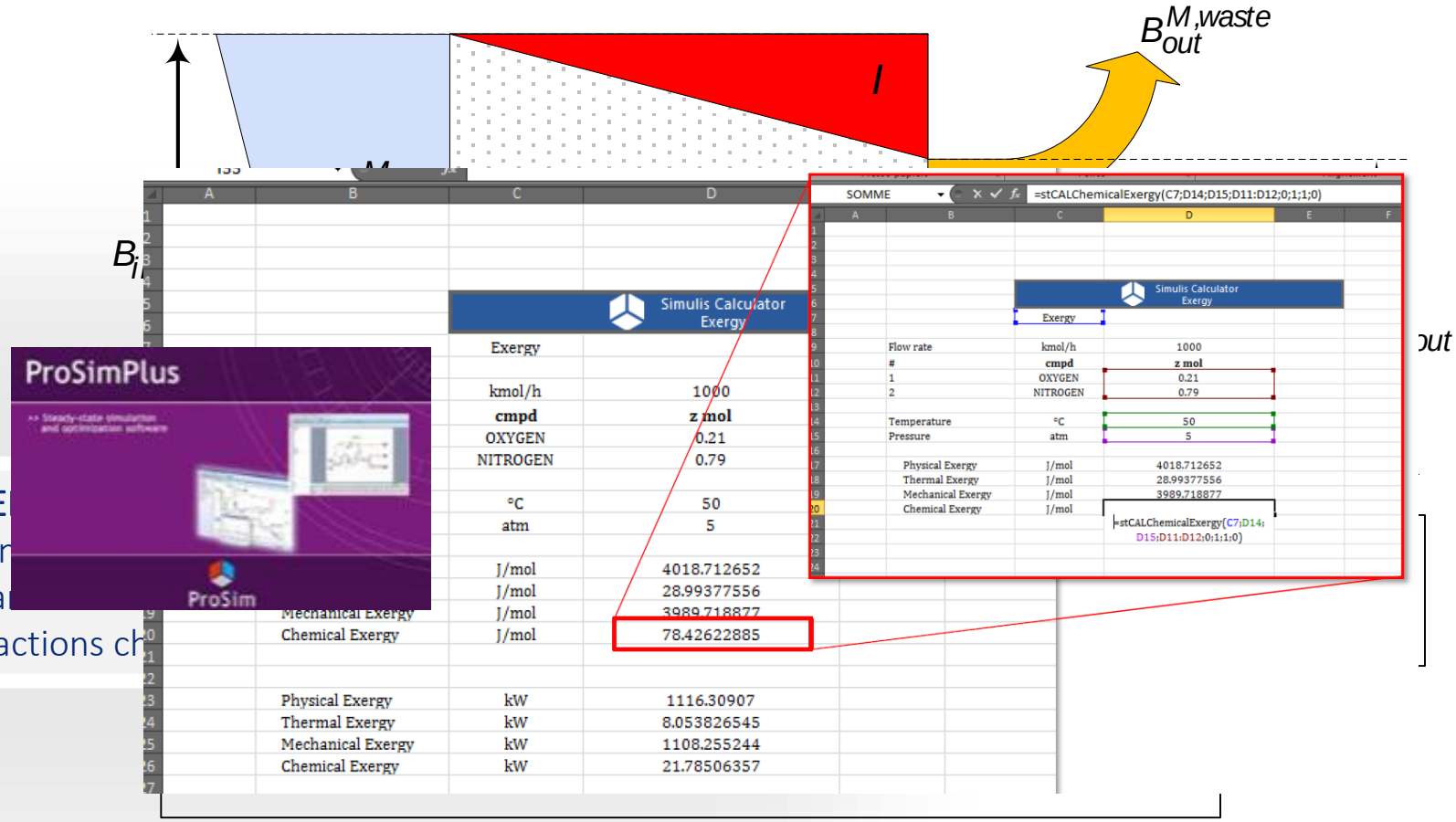


Exergie entrante = Exergie sortante « utile » + Exergie perdue + Exergie détruite

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

Etape 2.2 : Analyse exergétique - bilans exergétiques

Diagramme de Grassmann



IRREVE
- Nor
- Eca
- Réactions ch

Etape 2.2 : Analyse exergétique - termaire exergétique

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

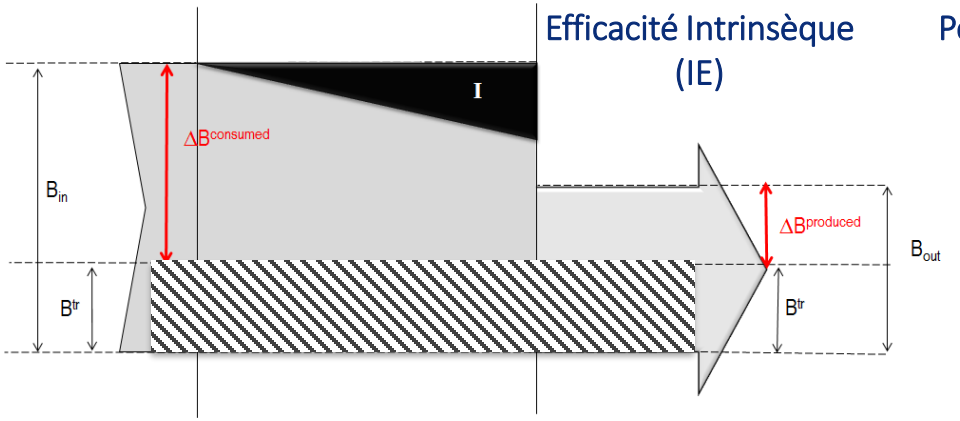
$$\Delta B^{consumed} = \Delta B^{produced} + \boldsymbol{B_{out}^{M,waste}} + \boldsymbol{I}$$

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

Efficacité Intrinsèque (IE)

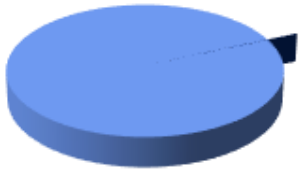
Pertes Intrinsèques (IW)

Irreversibilité Intrinsèque (II)



Etape 2.2 : Efficacité exergétique – Ternaire exergétique

D-101 + S-101 :



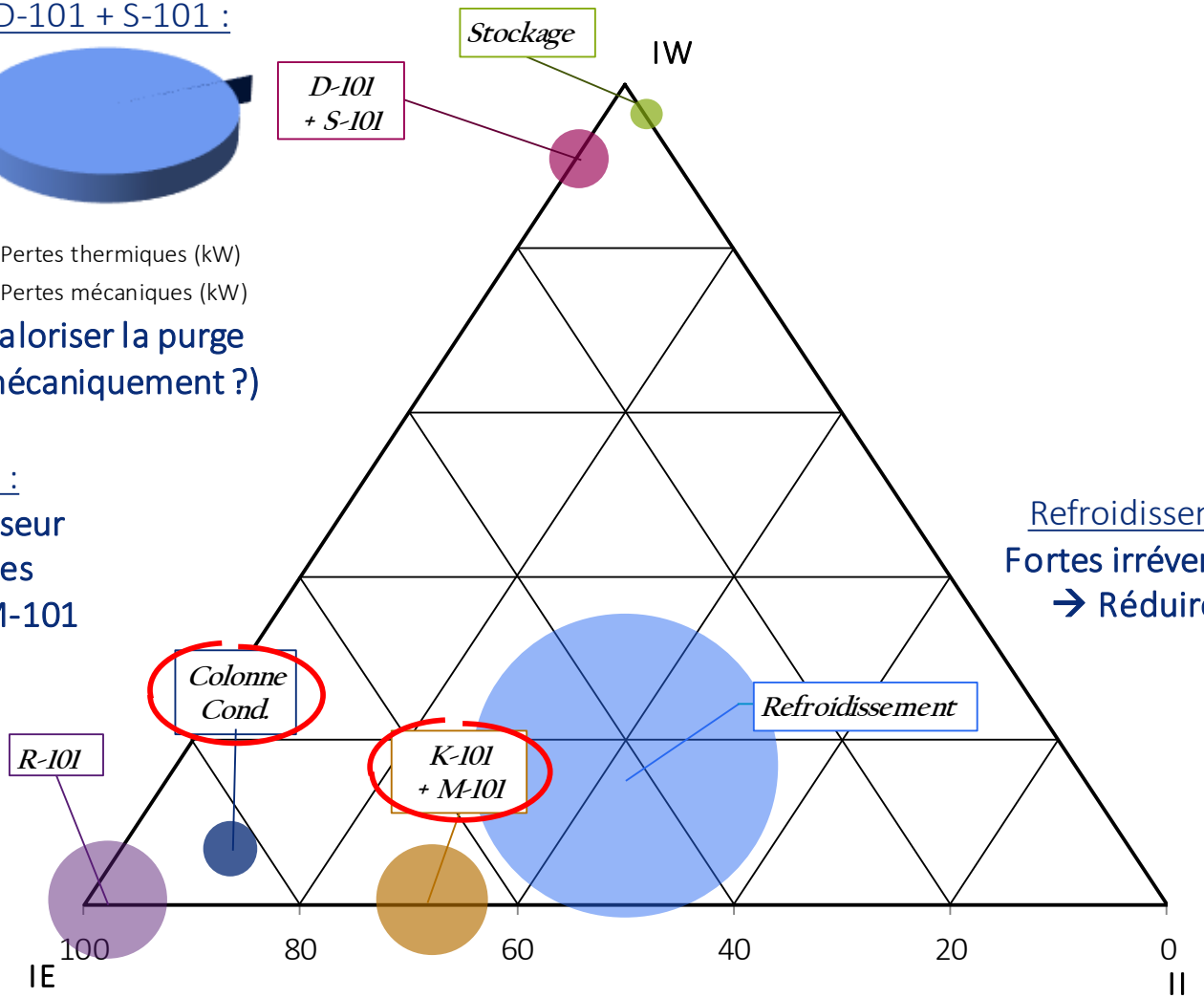
Valoriser la purge (mécaniquement ?)

K-101 + M-101 :

Etager le compresseur
Homogénéiser les alimentations de M-101

Colonne Cond. :

Réduire **ΔT** au niveau de l'évaporateur et du condenseur



Refroidissement :

Fortes irréversibilités
→ Réduire **ΔT**

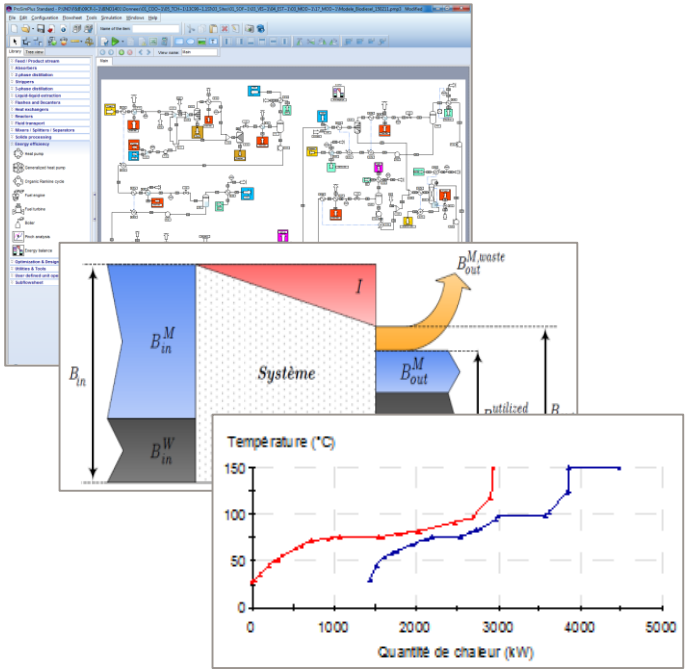
La méthodologie « COOPERE »

1. **Création du support d'analyse (Modélisation du site)**

2. **Analyse du procédé (Pinch, Exergie, Sous-produits)**

3. **Rétro-conception du procédé (Identification de solutions)**

4. **Optimisation des solutions (dans le modèle)**



Etapes 3 & 4:
Identification et optimisation des solutions d'amélioration

- **Deux stratégies d'amélioration selon le type de perte exergétique observée**
  - ✓ **Pertes externes au procédé (flux sortant mal/non valorisé)**
    - Flux entièrement caractérisés pour l'identification de la meilleure voie de valorisation
      - → *Exergie physique → (T, P)*
      - → *Exergie chimique → BMP, PCI*
    - Briques technologiques développées pour la mise en œuvre de la valorisation
      - → *PAC, méthaniseur, sécheur, …*
    - L'utilisation de l'exergie chimique reste un axe d'amélioration
  - ✓ **Pertes internes au procédé (équipements)**

- **L'étape d'identification des solutions n'est pas automatique**
  - *Les méthodes d'analyse permettent de définir les équipements à améliorer prioritairement*
  - *L'identification des solutions repose sur l'expertise et l'expérience de l'utilisateur*

Etapes 3 & 4 :
Identification et implémentation des solutions d'amélioration

3 **Propositions de modifications locales du procédé**
- → Modifications structurelles et/ou opératoires
- → Valorisation des courants de pertes externes

4.1 **Conception d'alternatives globales**
- → Génération de la nouvelle structure globale
- → Définition des nouveaux paramètres opératoires
- → Conception du réseau d'échangeurs de chaleur

4.2 **Comparaison technico-économique**

Raisonnement à Partir de Cas

Analyse Pincement

Etape 3 & 4 : Résultats - procédés biodiesel

Amélioration du réseau d'échangeur :
→ **Ajout de 6 échangeurs d'intégration**
→**10 échangeurs existants modifiés**
Total: + 90 m²

Solution 1 + implémentation de **3 pompes à chaleur** pour des transferts thermiques avancés
Total: 184 kW d'électricité

	Situation actuelle	Solution 1 : Après amélioration	Variation	Solution 2 : Après amélioration	Variation
Utilités froides [kW]	2209	1790	- 19 %	1042	- 53 %
Utilités chaudes [kW]	2302	2105	- 9 %	1051	- 54 %
Electricité pour utilités froides [kW]	539	473	- 12 %	125	- 77 %
Electricité pour PAC [kW]	-	-	-	184	-
Coût des utilités [k€/an]	985	863	- 12 %	455	- 54 %
Coût des équipements[k€]	-	27	-	200	-
TRB [an]	-	< 1	-	< 1	-

- Résultats obtenus valables en première approche. Faisabilité à confirmer.
- Solutions axées exclusivement sur la récupération de chaleur intra-procédé

Etape 3 & 4 : Résultats - procédé ammoniac

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

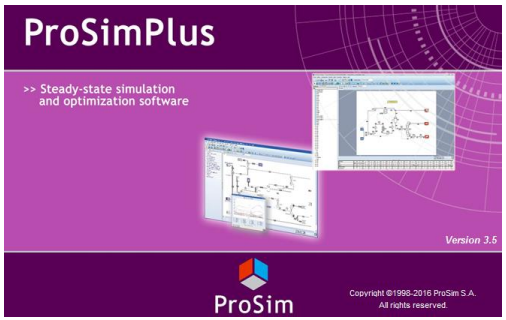
- Solutions axées sur des aménagements du procédé visant à améliorer son efficacité exergétique : mise en place d'une turbine à gaz en aval du réacteur, mise en œuvre de compresseurs étagé, valorisation mécanique d'une purge…

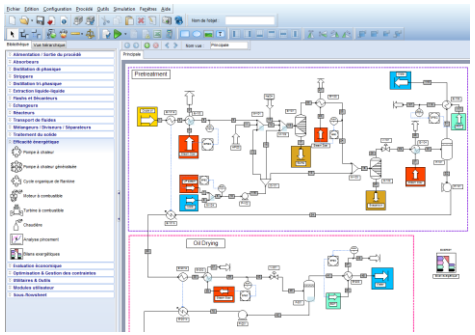
Les développements logiciels

- Développements réalisés à la fois pour l'analyse et la mise en œuvre des solutions visant à une amélioration de l'efficacité énergétique :

Analyse	Analyse pincement
	Bilans exergétiques
	Evaluation économique
Optimisation	Optimisation Stochastique
Technologique	Pompe à chaleur
	Chaudière *
	Combustion *
	Moteur à combustible *
	Réacteur de méthanisation
	Turbine à combustible
	Cycle organique de Rankine
	Sécheur (en cours d'implémentation)

* Améliorations seulement





Conclusions - Perspectives

Conclusions

- *Coopération réussie entre académiques et industriels*
- *Contribue à la démocratisation de la Thermodynamique et de l'Exergie*
- *Fournit des méthodes et des outils logiciels pour faciliter l'identification de solutions*

Perspectives

- *Immédiatement*

  → Déployer de façon opérationnelle le package COOPERE

- *Pour de futurs développements*

  → Faciliter la proposition de solutions :

  - développer et enrichir l'outil de Raisonnement à partir de Cas

  → Améliorer la caractérisation et la valorisation des sous-produits :

  - Mieux analyser l'exergie chimique (vs. les valeurs d'exergie physique)

Pour approfondir

Thèse INPT-LGC

- Stéphane Gourmelon (2015). Méthodologie d'analyse et de rétro-conception pour l'amélioration énergétique des procédés industriels, Thèse INPT

Thèse AgroParisTech – UML GENIAL

- Charlène Lambert (2015). Simulation de procédés alimentaires dans un logiciel de génie chimique

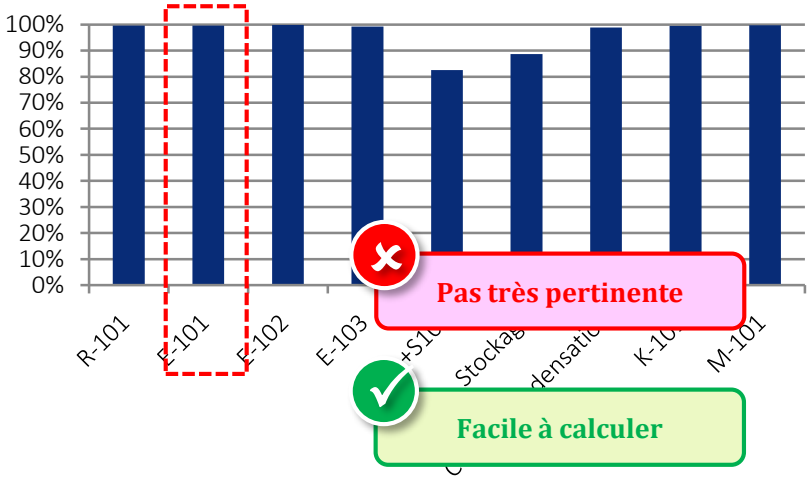
complements

complements

Efficacité simple

$$\eta = \frac{\text{Exergie sortante utile}}{\text{Exergie entrante}}$$

$$\eta = 1 - \frac{\text{Exergie perdue} + \text{Exergie détruite}}{\text{Exergie entrante}}$$



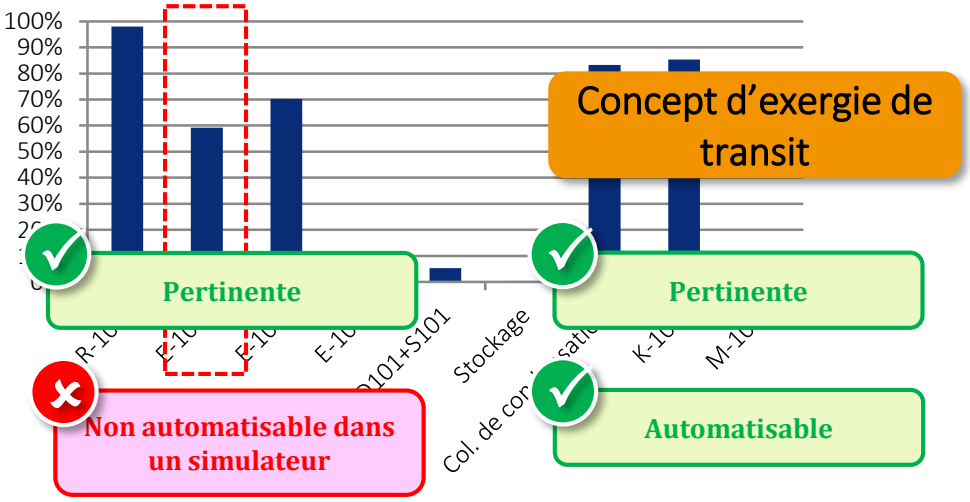
Efficacité « produit-consommé »

$$\eta = \frac{\text{Exergie produite}}{\text{Exergie consommée}}$$

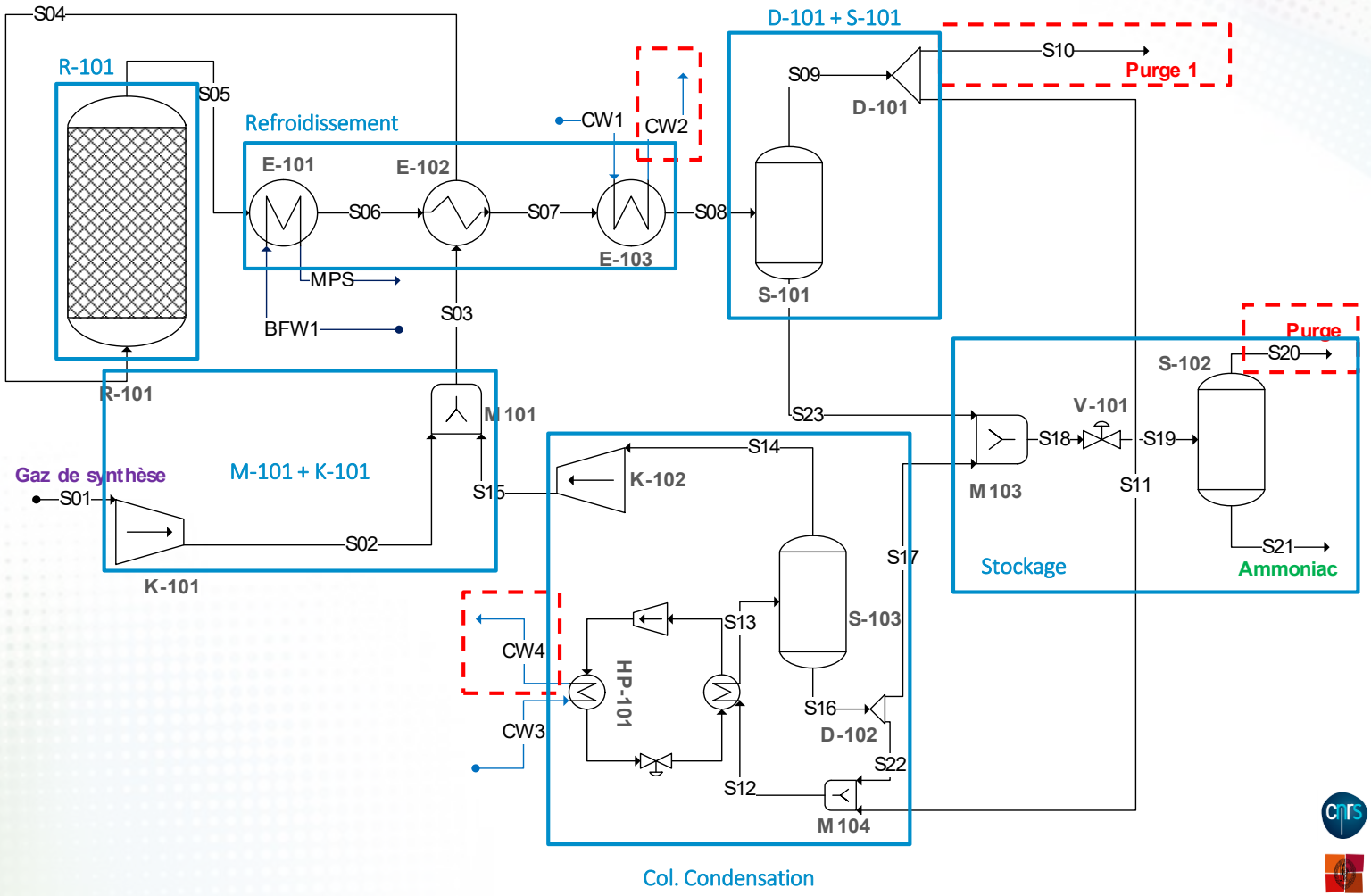
Efficacité rationnelle

$$\eta = \frac{\text{Exergie désirée}}{\text{Exergie nécessaire}}$$

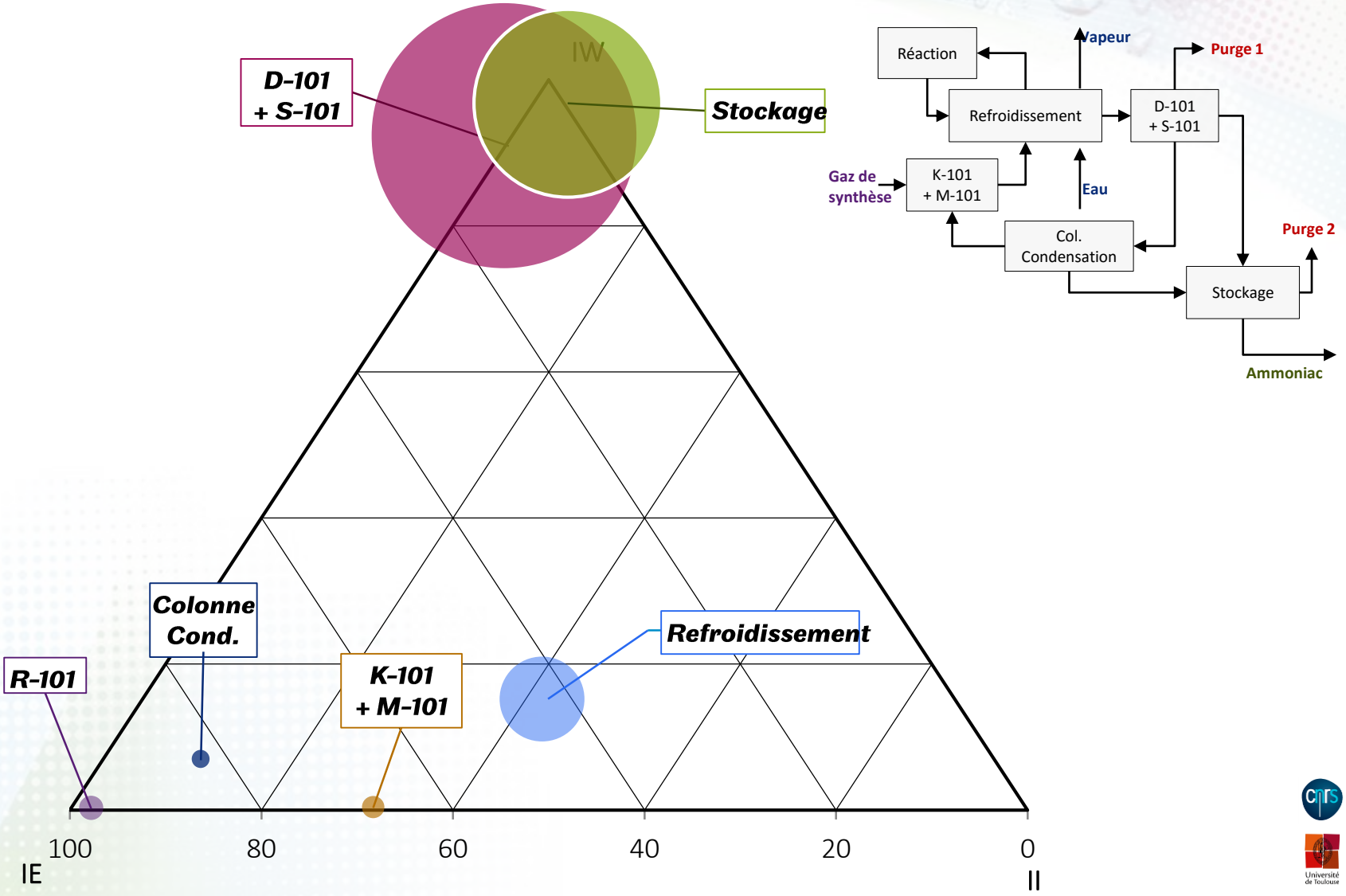
$$\eta = \frac{\text{Augmentation d'exergie}}{\text{Diminution d'exergie}}$$



Cas d'étude

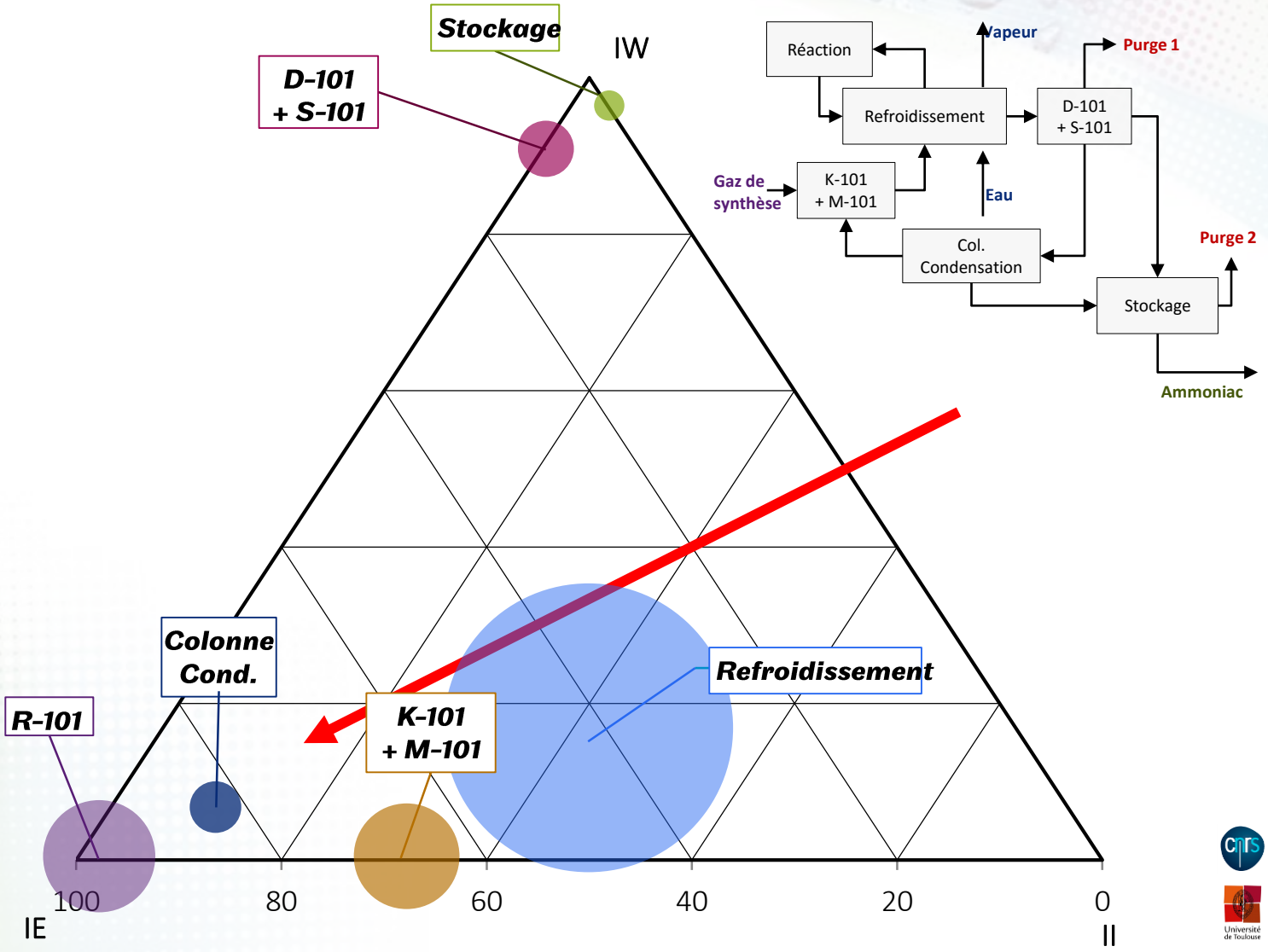

S04
R-101
S05
Refroidissement
E-101
E-102
S06
S07
CW1
CW2
E-103
S08
D-101 + S-101
S09
D-101
S10
Purge 1
MPS
BFW1
S03
S-101
R-101
M 101
Purge
S-102
S20
V-101
S23
S18
S19
Gaz de synthèse
S01
M-101 + K-101
S15
K-102
S14
M 103
S11
S02
K-101
S17
Stockage
S21
Ammoniac
CW4
S13
S-103
HP-101
S16
CW3
D-102
S22
S12
M 104
Col. Condensation

Cas d'étude


D-101
+ S-101
IW
Stockage
Colonne
Cond.
R-101
K-101
+ M-101
Refroidissement
100
80
60
40
20
0
IE
II

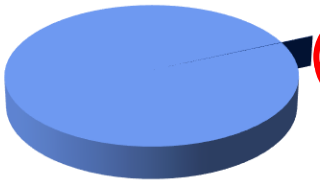
Réaction
Vapeur
Purge 1
Refroidissement
D-101
+ S-101
Gaz de
synthèse
K-101
+ M-101
Eau
Col.
Condensation
Purge 2
Stockage
Ammoniac

Cas d'étude


Stockage
IW
D-101
+ S-101
Réaction
Vapeur
Purge 1
Refroidissement
D-101
+ S-101
Gaz de
synthèse
K-101
+ M-101
Eau
Col.
Condensation
Purge 2
Stockage
Ammoniac
Colonne
Cond.
Refroidissement
R-101
K-101
+ M-101
100
80
60
40
20
0
IE
II

Cas d'étude

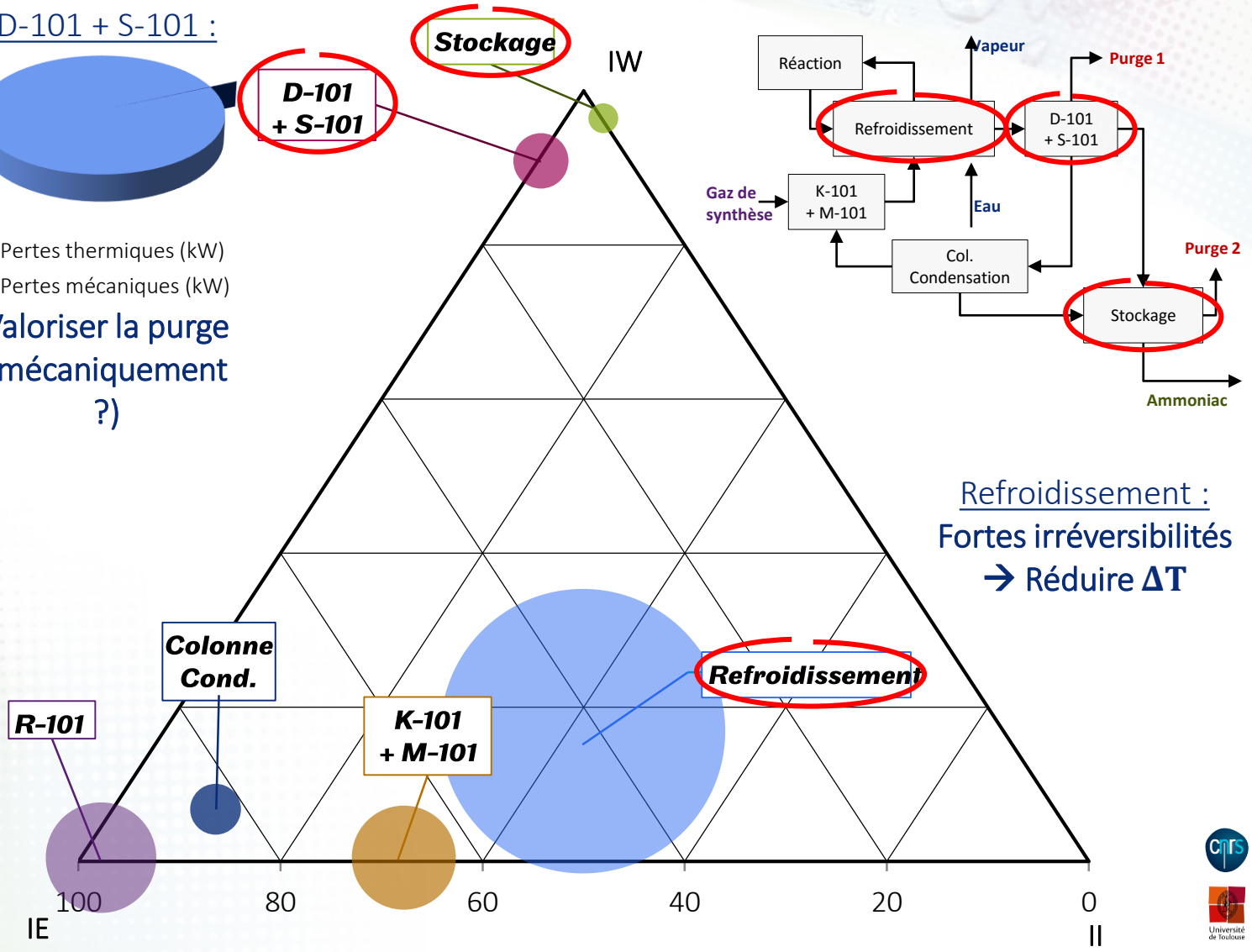
D-101 + S-101 :



Pertes thermiques (kW)

Pertes mécaniques (kW)

Valoriser la purge (mécaniquement ?)



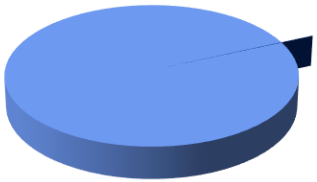
Refroidissement :

Fortes irréversibilités

→ Réduire ΔT

Cas d'étude

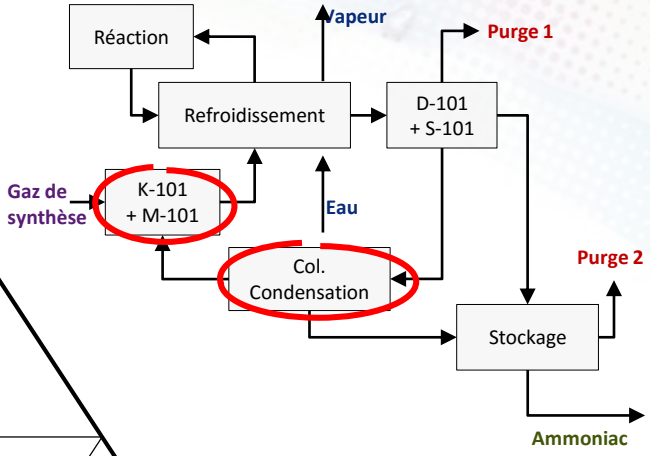
D-101 + S-101 :



Pertes thermiques (kW)

Pertes mécaniques (kW)

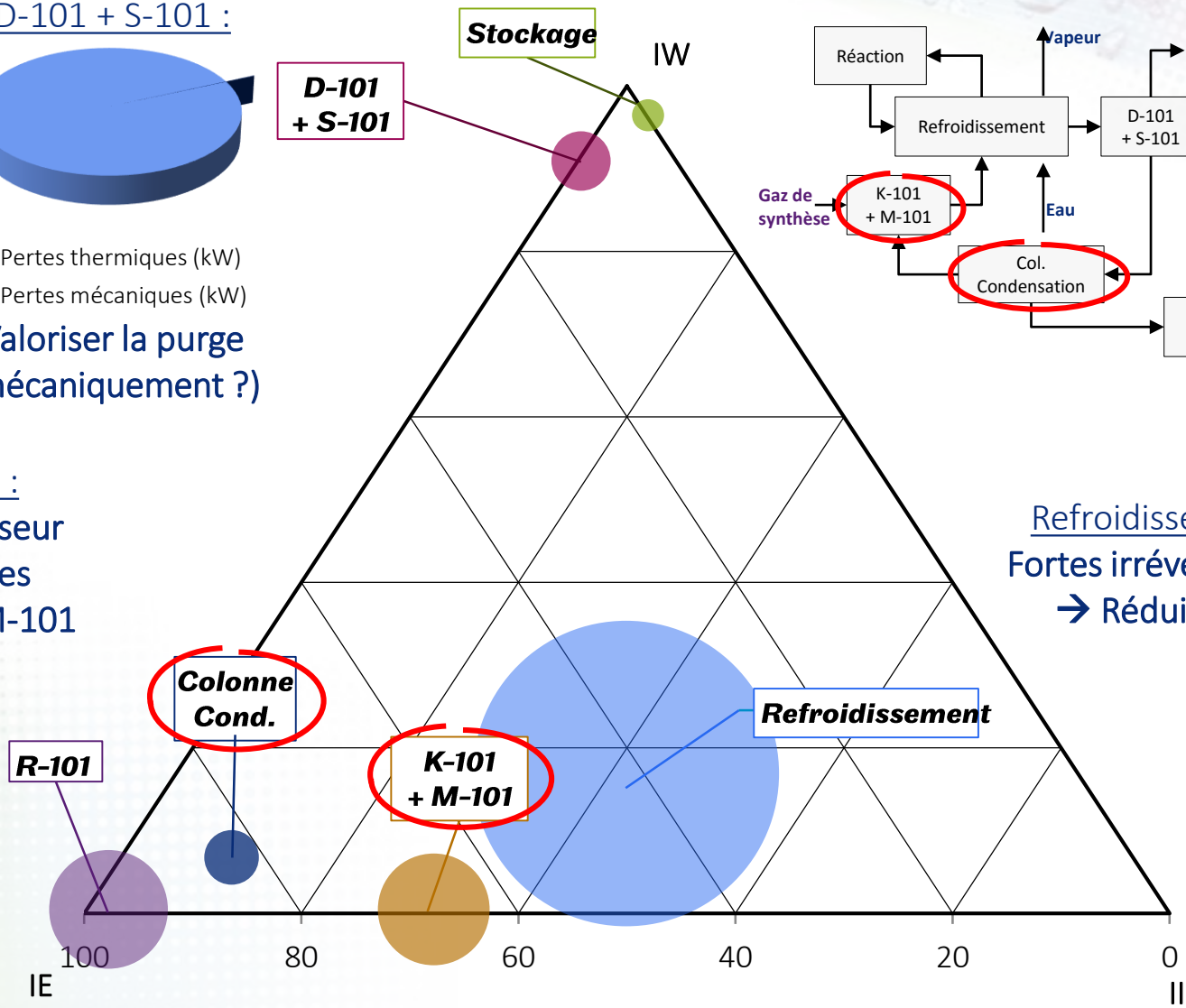
Valoriser la purge (mécaniquement ?)



K-101 + M-101 :

Etager le compresseur

Homogénéiser les alimentations de M-101



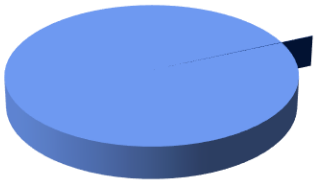
Refroidissement :

Fortes irréversibilités

→ Réduire ΔT

Cas d'étude

D-101 + S-101 :



Pertes thermiques (kW)

Pertes mécaniques (kW)

Valoriser la purge (mécaniquement ?)

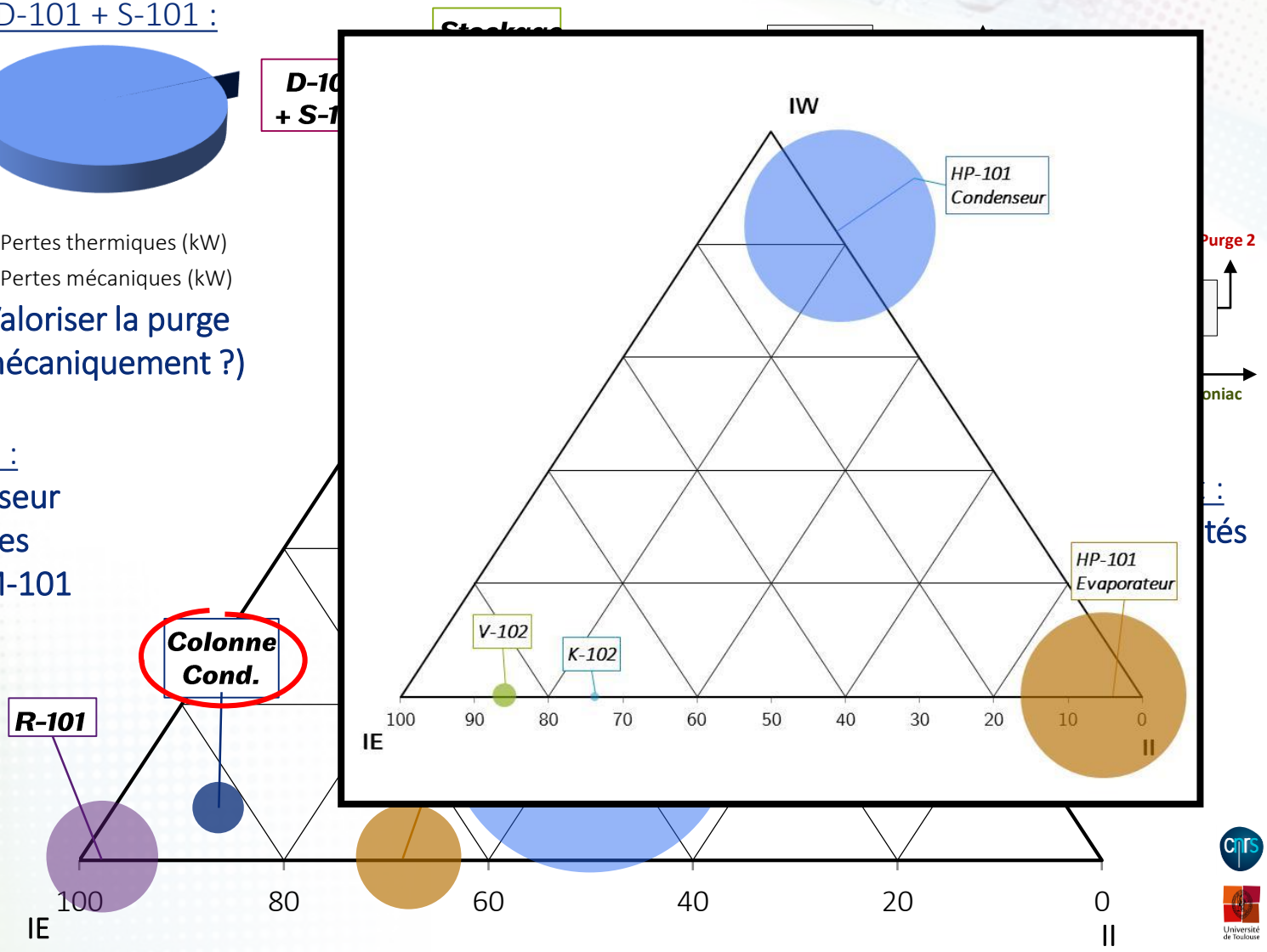
K-101 + M-101 :

Etager le compresseur

Homogénéiser les alimentations de M-101

Colonne Cond. :

Réduire ΔT au niveau de l'évaporateur et du condenseur



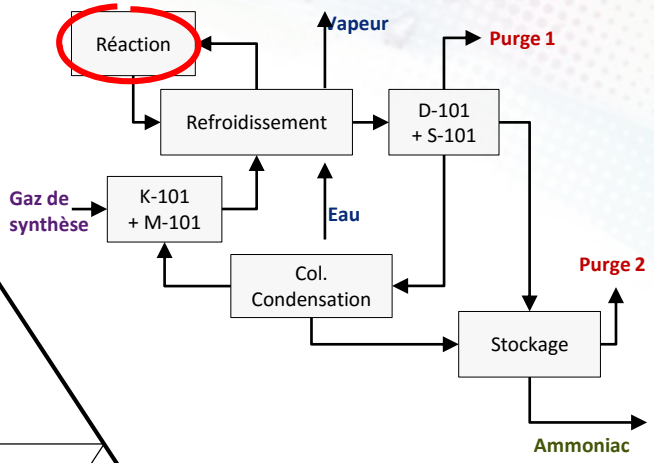
Cas d'étude

D-101 + S-101 :

Pertes thermiques (kW)

Pertes mécaniques (kW)

Valoriser la purge (mécaniquement ?)



K-101 + M-101 :

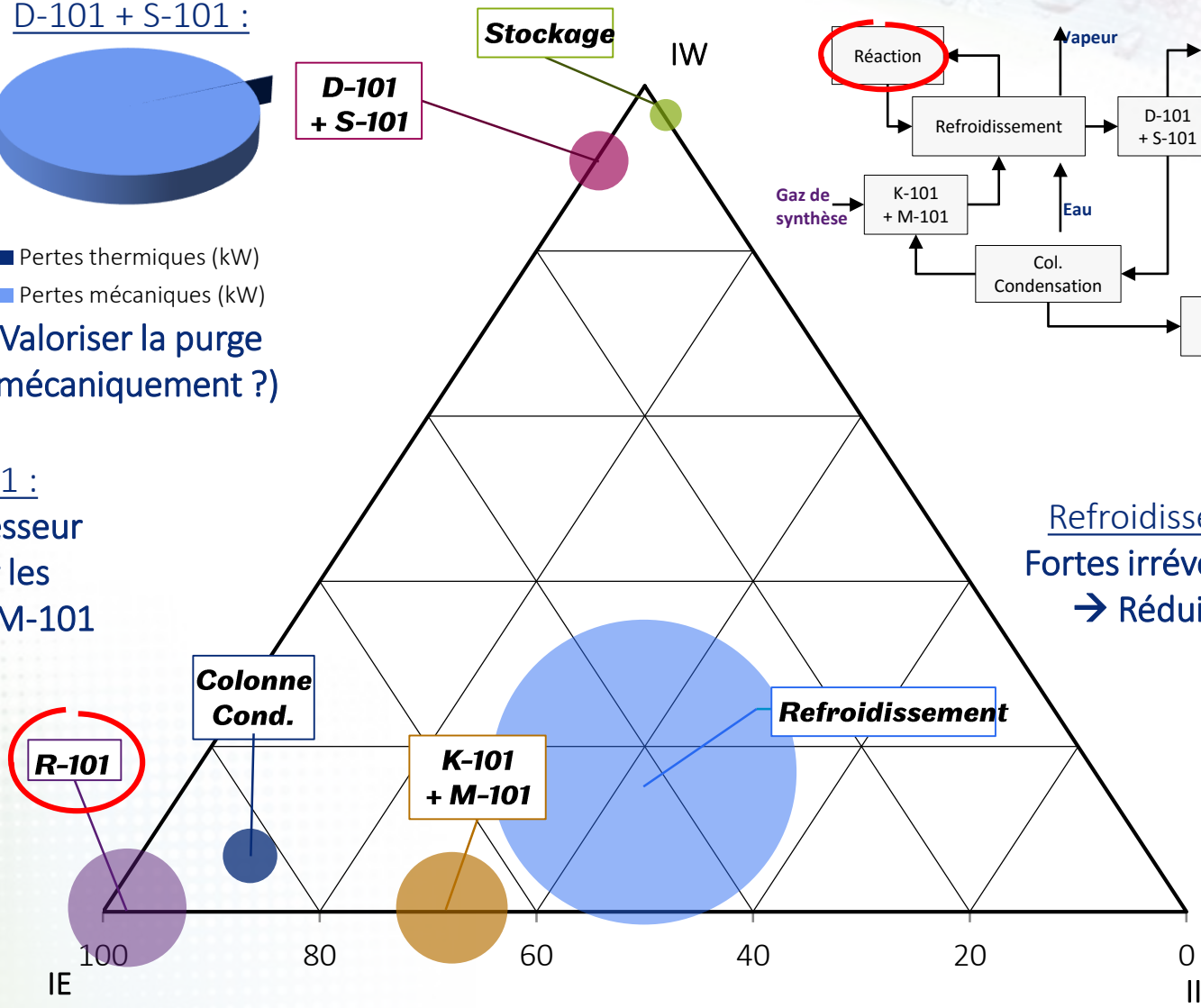
Etager le compresseur
Homogénéiser les alimentations de M-101

Refroidissement :

Fortes irréversibilités
→ Réduire ΔT

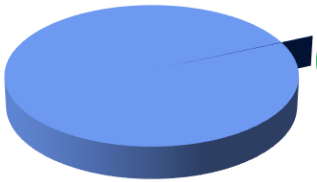
Colonne Cond. :

Réduire ΔT au niveau de l'évaporateur et du condenseur



Cas d'étude

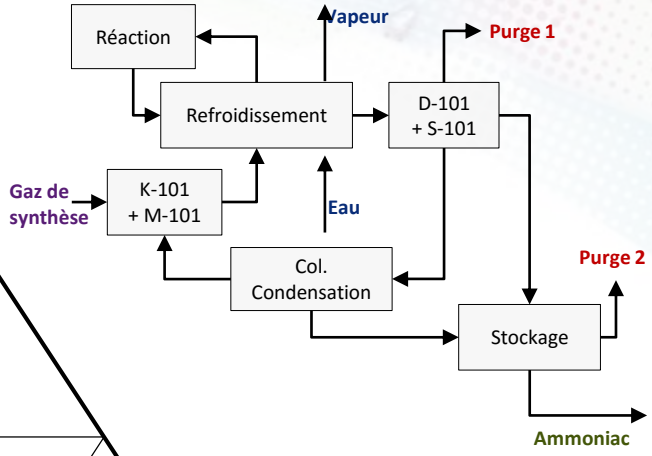
D-101 + S-101 :



Pertes thermiques (kW)

Pertes mécaniques (kW)

Valoriser la purge (mécaniquement ?)

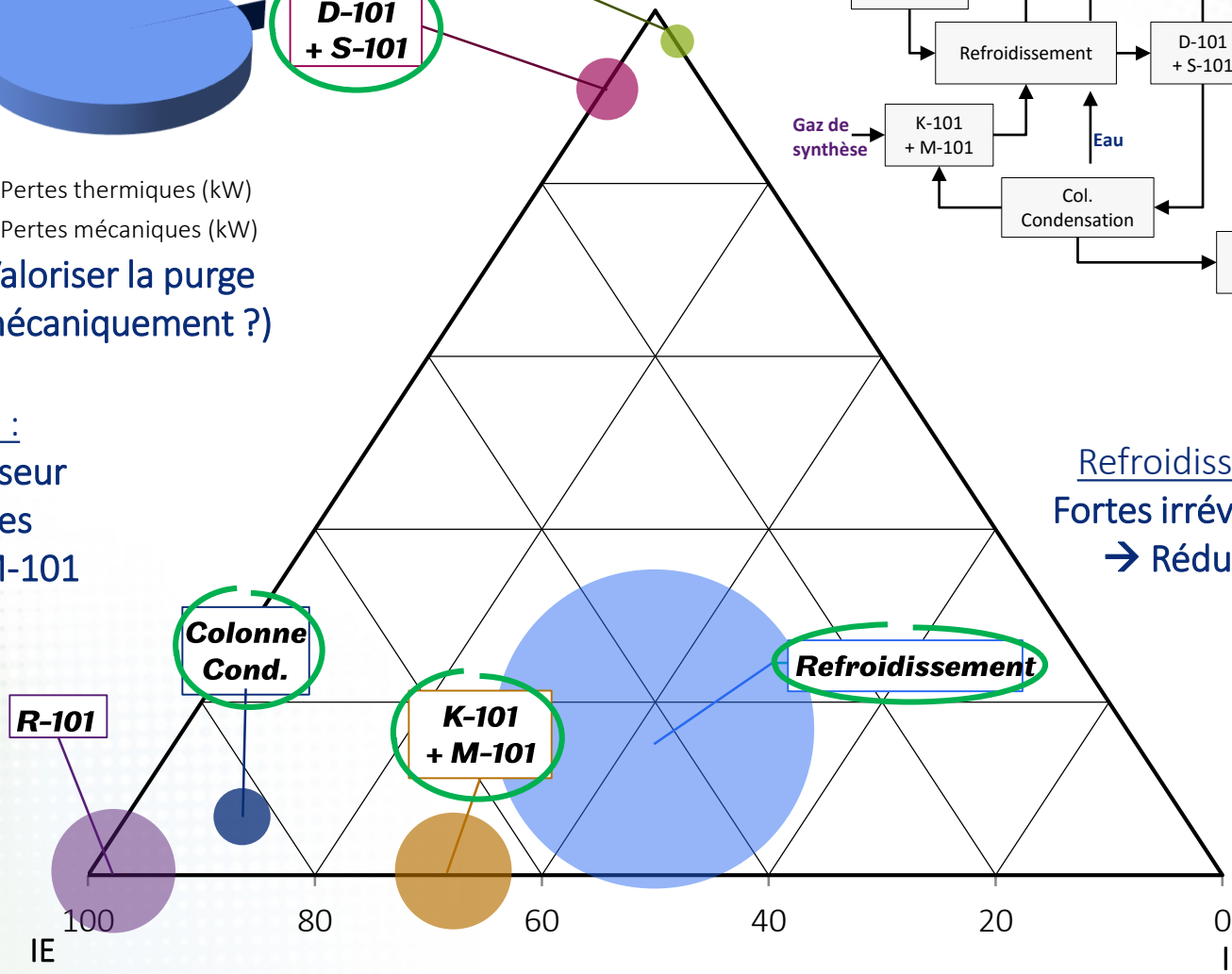


K-101 + M-101 :

Etager le compresseur
Homogénéiser les alimentations de M-101

Colonne Cond. :

Réduire ΔT au niveau de l'évaporateur et du condenseur



Refroidissement :

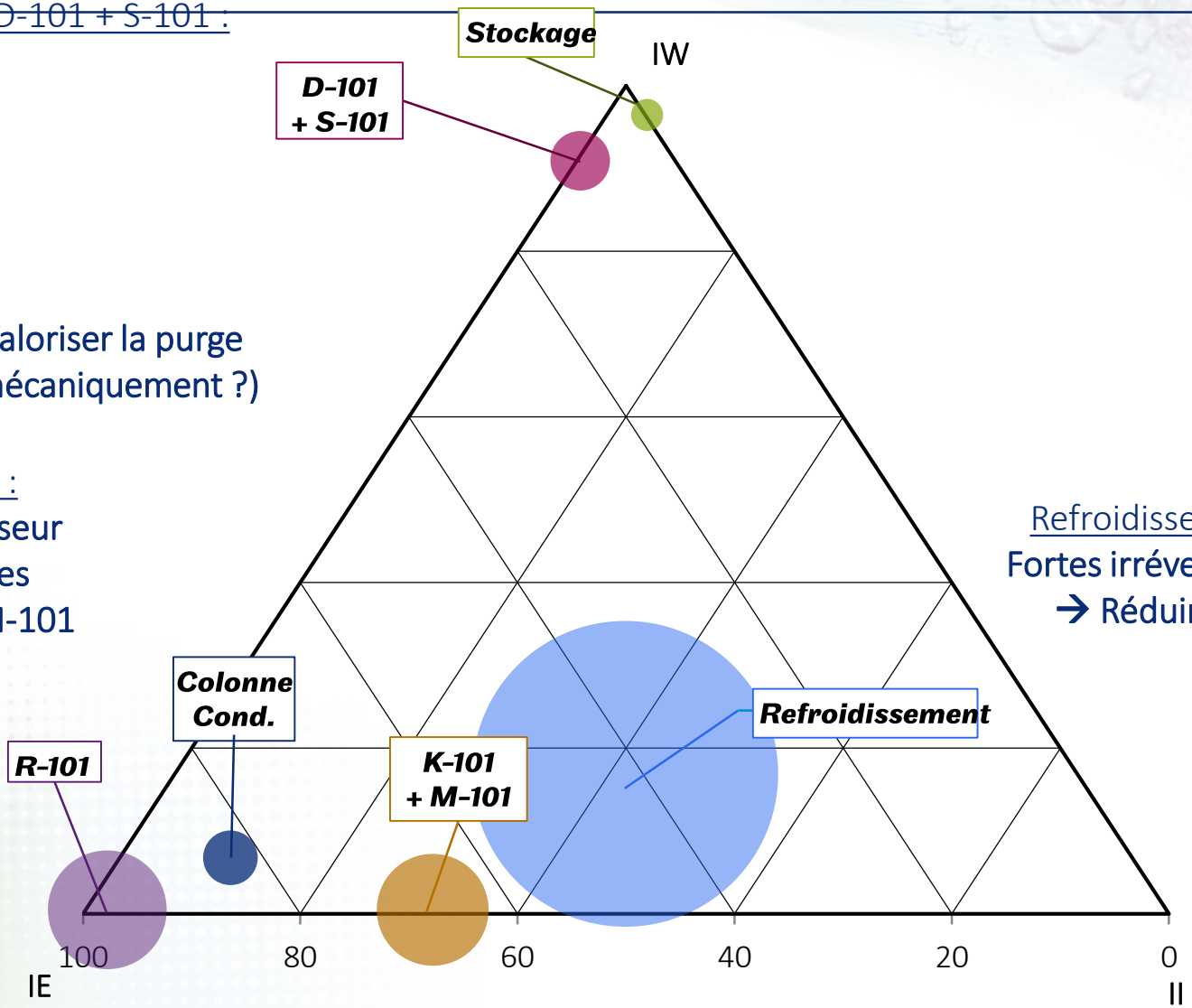
Fortes irréversibilités
→ Réduire ΔT

~~D-101 + S-101 :~~

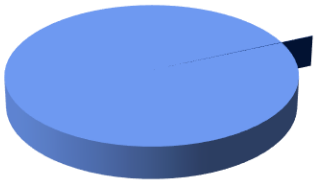
Valoriser la purge
(mécaniquement ?)

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

Refroidissement :
Fortes irréversibilités
→ Réduire **ΔT**



D-101 + S-101 :



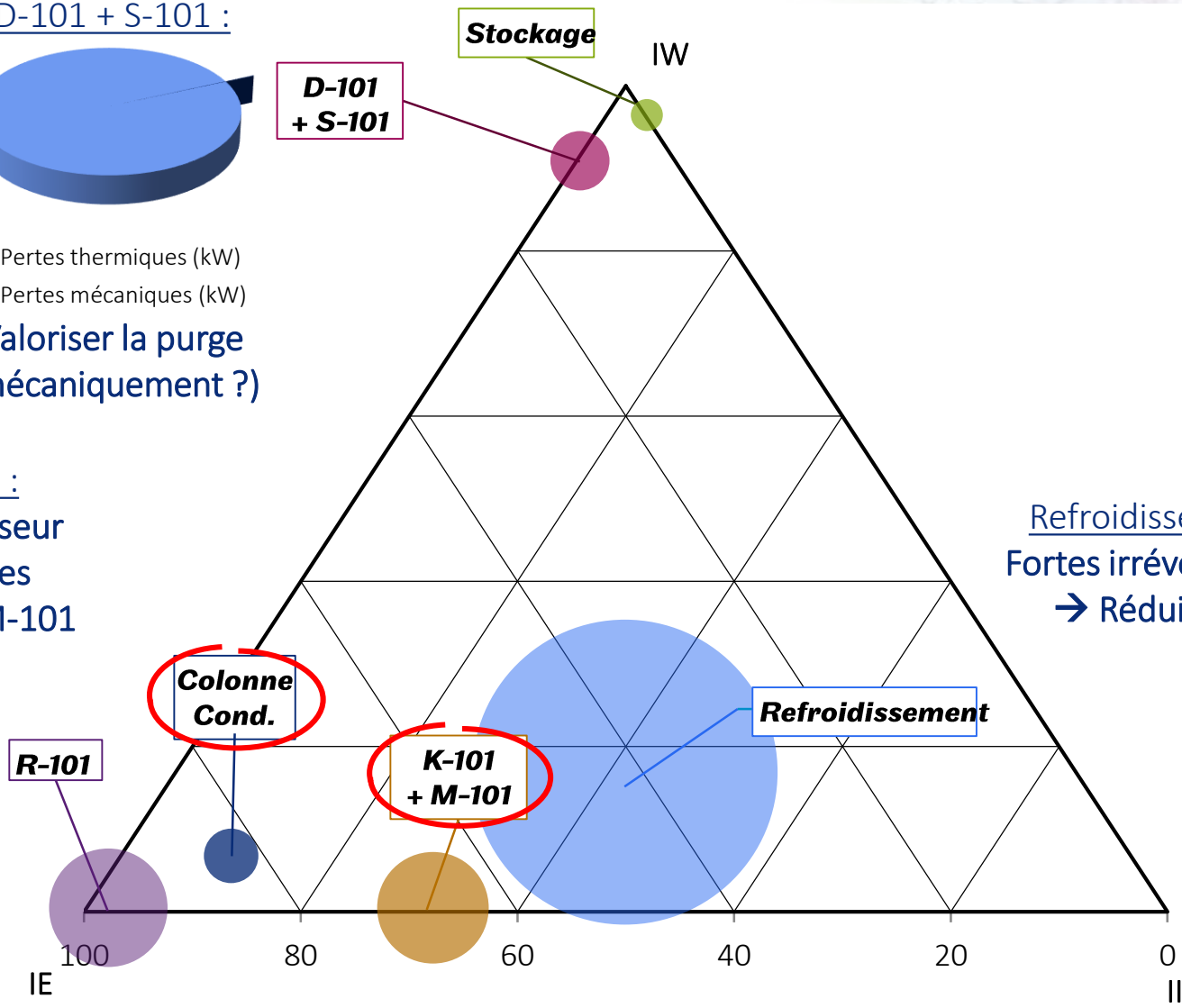
Valoriser la purge (mécaniquement ?)

K-101 + M-101 :

Etager le compresseur
Homogénéiser les alimentations de M-101

Colonne Cond. :

Réduire ΔT au niveau de l'évaporateur et du condenseur

Refroidissement :

Fortes irréversibilités
→ Réduire ΔT