



Conception et analyse à l'échelle système de différentes configurations de centrales à charbon pulvérisé avec captage du CO₂ par oxy-combustion

Hayato Hagi^{a, b}, Yann Le Moullec^a, Maroun Nemer^b, Chakib Bouallou^b

^a EDF R&D, Département Mécanique des Fluides, Énergies et Environnement, 6 quai Watier, 78401 Chatou, France

^b MINES ParisTech, DEP – Département Énergétique et Procédés, 60 Bd St Michel, 75272 Paris Cedex 06, France

CONTEXTE (1)



Réchauffement climatique

GIEC : réduire d'au moins 50 % les émissions de GES d'ici 2050

Europe : 3 x 20 % (GES, ENR, Efficacité énergétique) à l'horizon 2020

Production électrique et émissions de GES en 2010 (AIE)

Électricité = 1^{er} poste d'émission de GES (41 %)

NRJ Fossiles = 67 % de l'électricité, dont 41 % pour le charbon

Ressources importantes + faible coûts + demande croissante

→ **Charbon = acteur majeur**

Captage du CO₂ = une solution



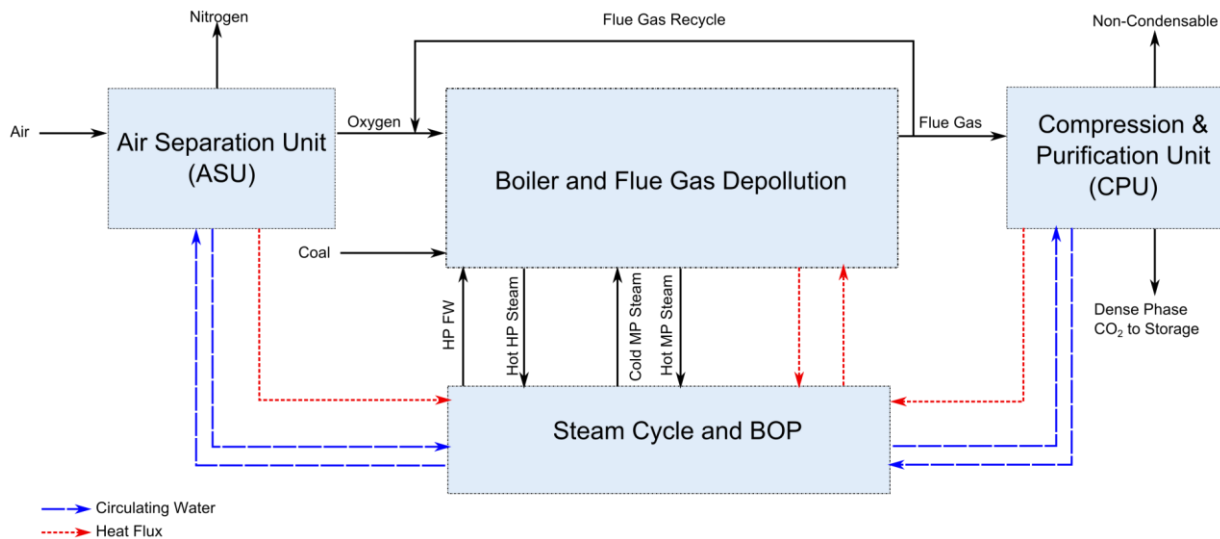
CONTEXTE (2)

Oxy-combustion : séparer l'oxygène de l'azote pour obtenir des fumées riches en CO_2

Rendement centrale sans captage $\sim 46\%_{\text{PCI}}$

Rendement centrale avec captage $\sim 36\%_{\text{PCI}}$ (surconsommation ASU & CPU)

→ Pénalité énergétique $\sim 10\% \text{-pts}$



Approche à l'échelle système basée sur l'exergie pour minimiser la pénalité énergétique

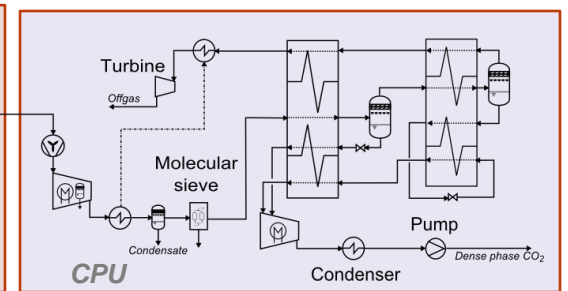
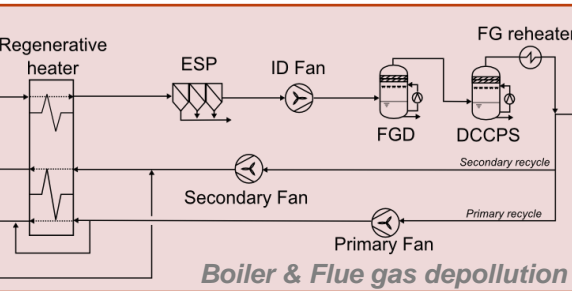
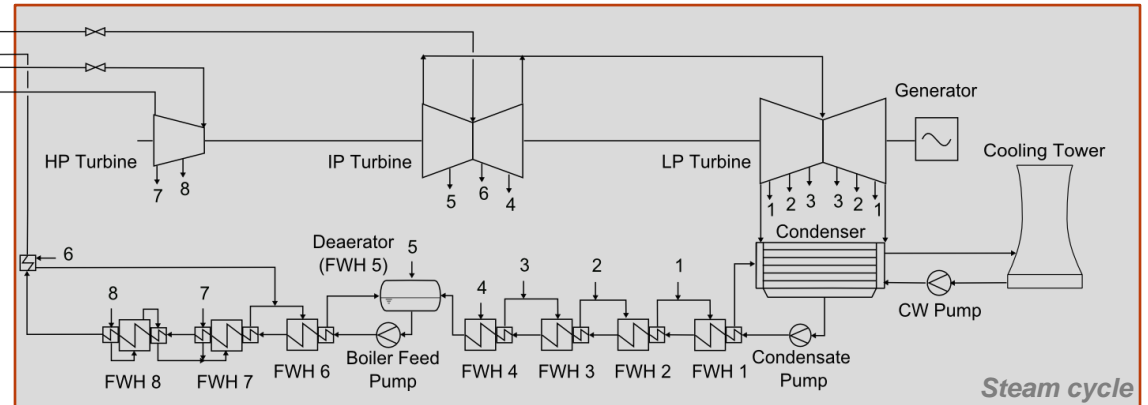
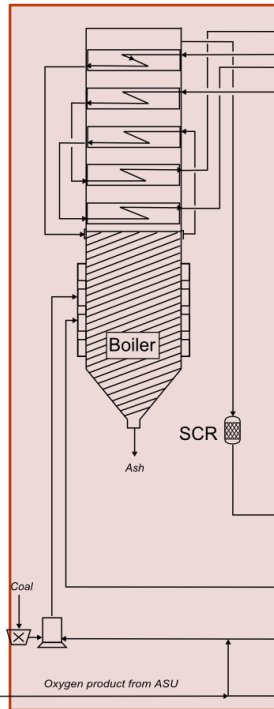
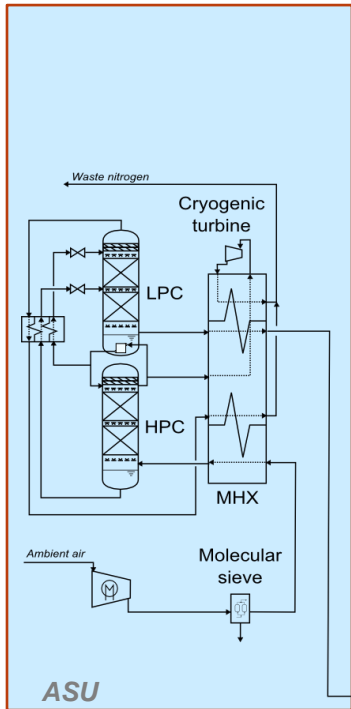
DÉMARCHE ADOPTÉE

1. Modélisation d'une centrale oxy-combustion de base (Aspen Plus)
2. Analyse exergetique sur la centrale de base
3. Identification des stratégies d'amélioration
4. Mise en place des intégrations énergétiques
5. Évaluation des performances énergétiques de la centrale intégrée

DESCRIPTION DU PROCÉDÉ

Compression étagée avec refroidissement intermédiaire
 Spécifications: 95 %_{mol} / 1,2 bars
 Consommation spécifique = 202 kWh/t_{O₂}

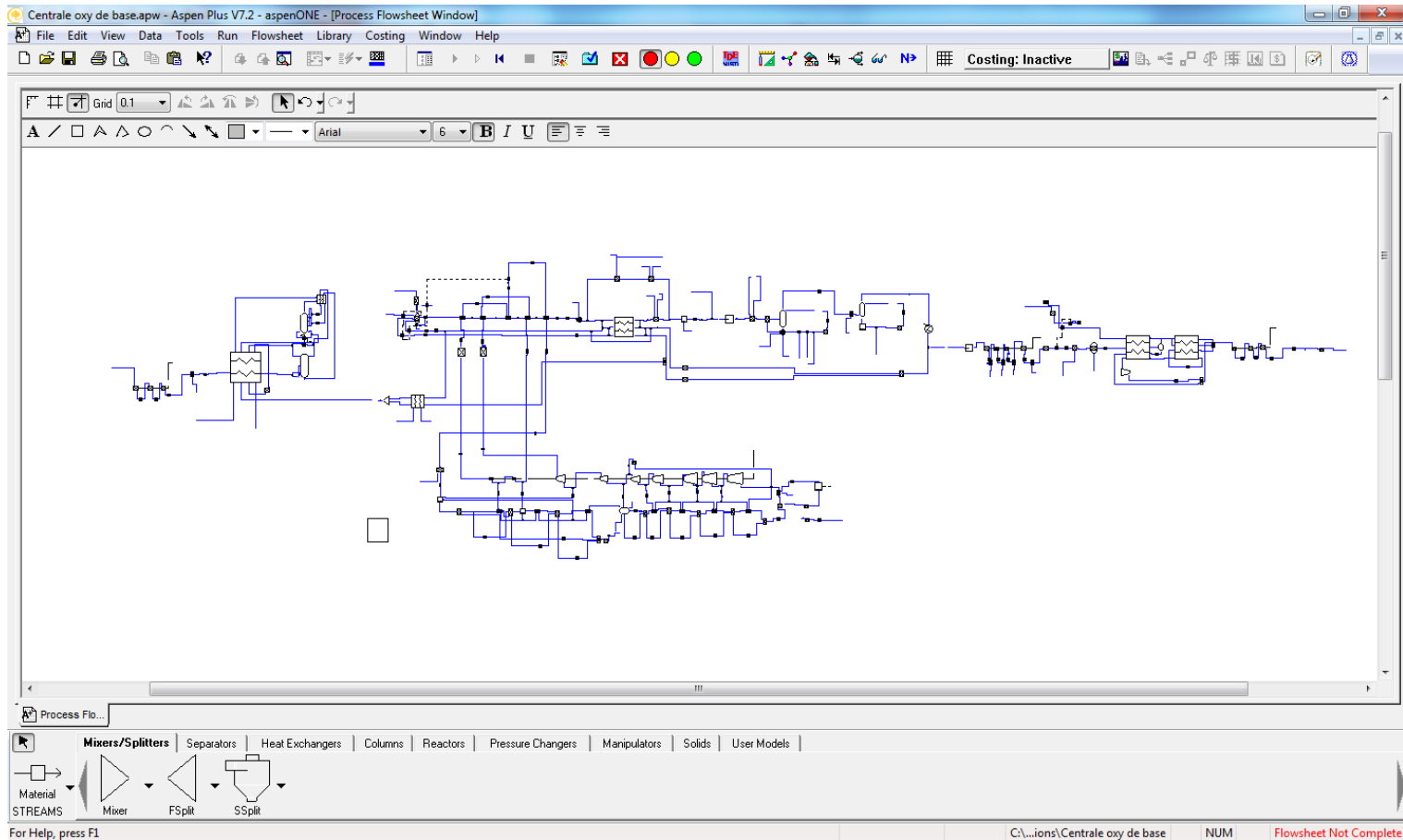
300 bars/600°C/620°C (pression de resurchauffe = 60 bars)
 T_{préchauffe eau de cycle} = 315 °C
 T_{source froide} = 18°C



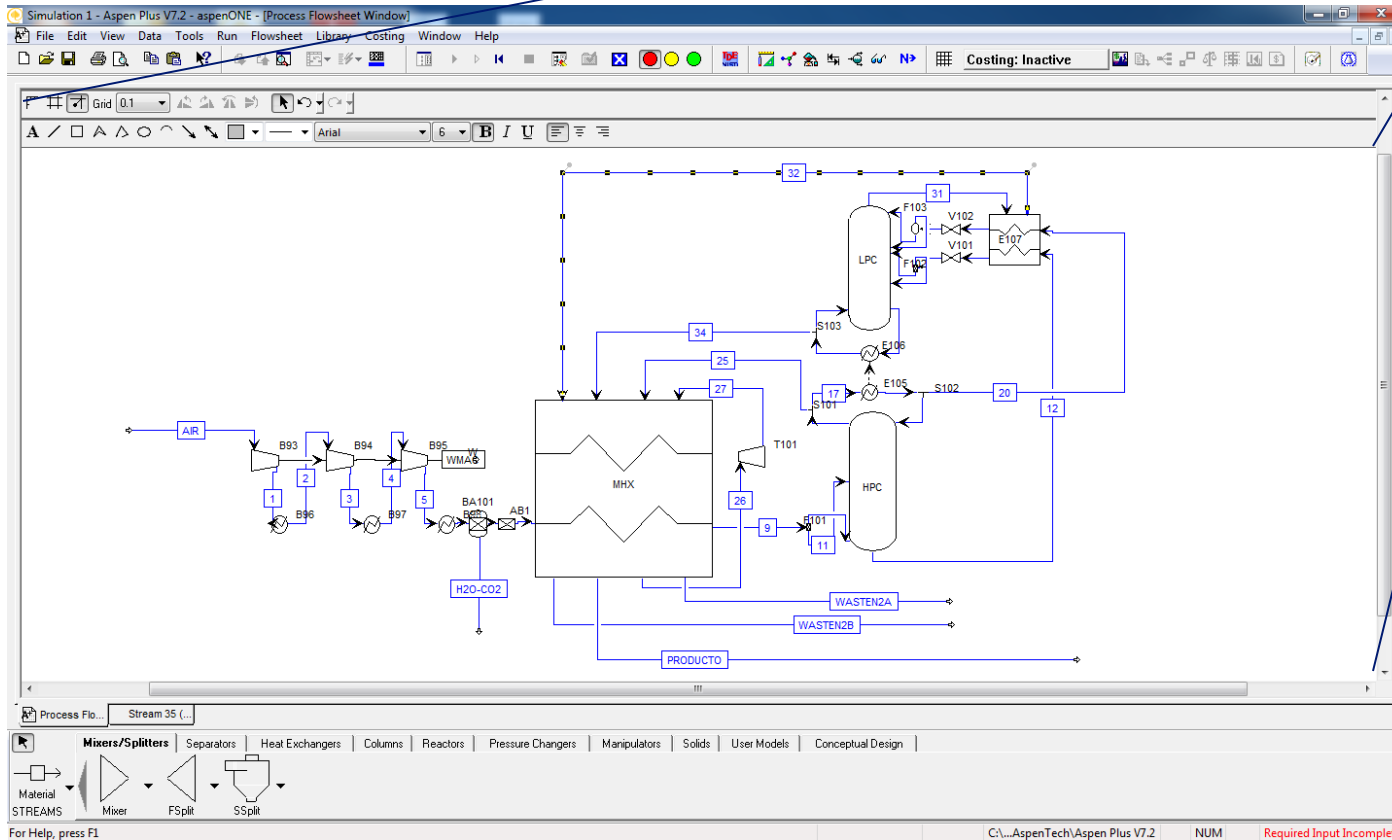
1100 MWe brute, charbon bitumineux
 SCR, ESP, FGD, DCCPS, réchauffeur de fumées (électrique)
 Dépollution totale du recyclage primaire et secondaire

Compression étagée avec refroidissement intermédiaire
 Spécifications: 96 %_{mol} / 110 bars
 Consommation spécifique = 113 kWh/t_{CO₂}

MODÈLE DU PROCÉDÉ (ASPEN PLUS)



MODÈLE DU PROCÉDÉ (ASPEN PLUS)



44 flux
23 opérations unitaires
2 contrôleurs
1 calculateur

ANALYSE EXERGÉTIQUE (1)

Définition

Travail utile total que renferme un système par rapport à son environnement de référence

Mécanique (W) ; Electrique (P) ; Thermique (Q, T); flux de matière (T, P, composition)

Or, opération réelle = irréversibilités (frictions, ΔT , Δ concentration, ...) \rightarrow Pertes exergetiques

Système ouvert en régime permanent échangeant du travail, de la chaleur et des flux de matière avec le milieu extérieur

Bilan énergétique (1^{er} principe)
$$\sum_{in} \dot{W}_{in} + \sum_{in} \dot{Q}_{in} + \sum_{in} \dot{m}_{in} \bar{H}_{in} = \sum_{out} \dot{W}_{out} + \sum_{out} \dot{Q}_{out} + \sum_{out} \dot{m}_{out} \bar{H}_{out} + \dot{Q}_{transf} \quad (1)$$

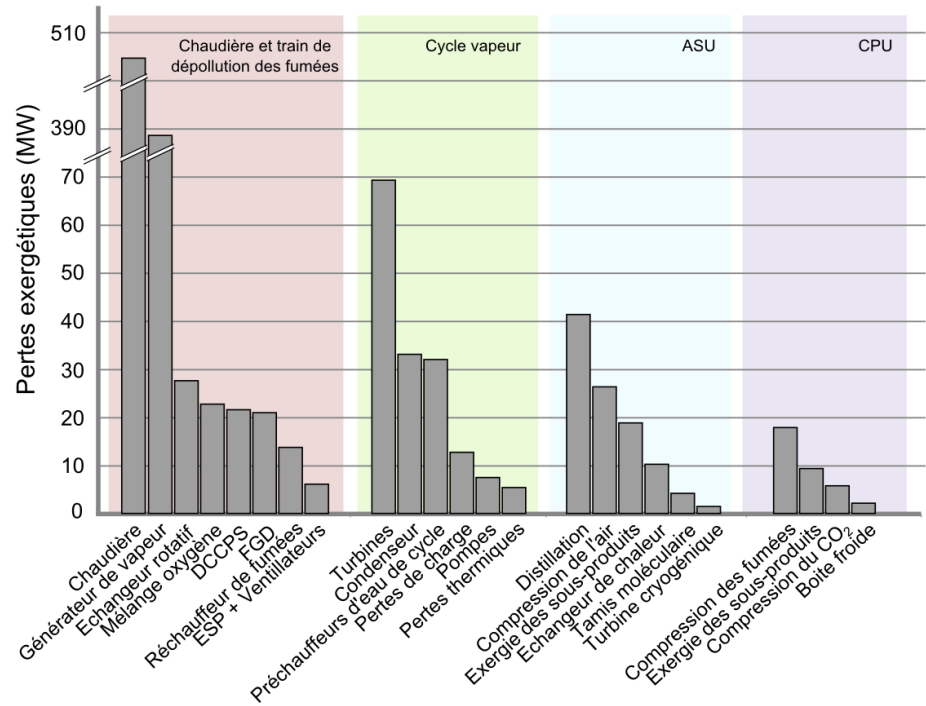
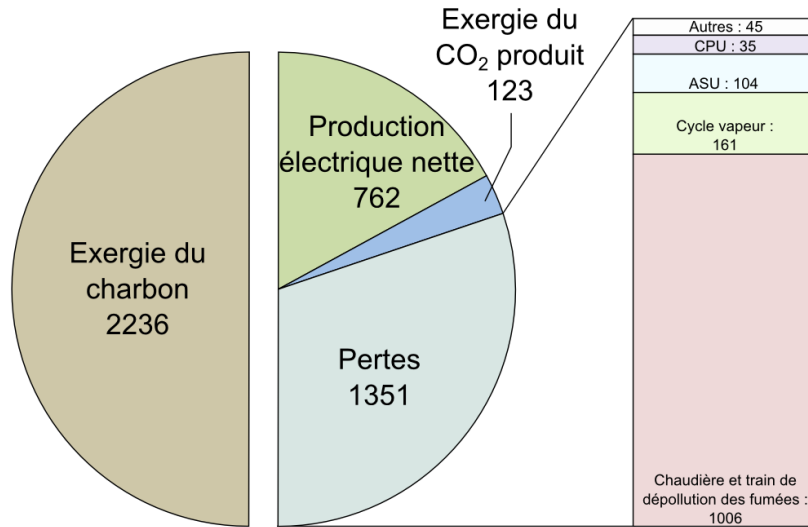
Bilan entropique (2^{ème} principe)
$$\sum_{in} \frac{\dot{Q}_{in}}{T_{in}} + \sum_{in} \dot{m}_{in} \bar{S}_{in} + \Delta S = \sum_{out} \frac{\dot{Q}_{out}}{T_{out}} + \sum_{out} \dot{m}_{out} \bar{S}_{out} + \frac{\dot{Q}_{transf}}{T_0} \quad (2)$$

Bilan exergetique
$$\sum_{in} \left[\dot{W}_{in} + \dot{Q}_{in} \left(1 - \frac{T_0}{T_{in}} \right) + \dot{m}_{in} (\bar{H}_{in} - T_0 \bar{S}_{in}) \right] = \sum_{out} \left[\dot{W}_{out} + \dot{Q}_{out} \left(1 - \frac{T_0}{T_{out}} \right) + \dot{m}_{out} (\bar{H}_{out} - T_0 \bar{S}_{out}) \right] + T_0 \Delta S$$

= (1) - $T_0 \cdot$ (2)

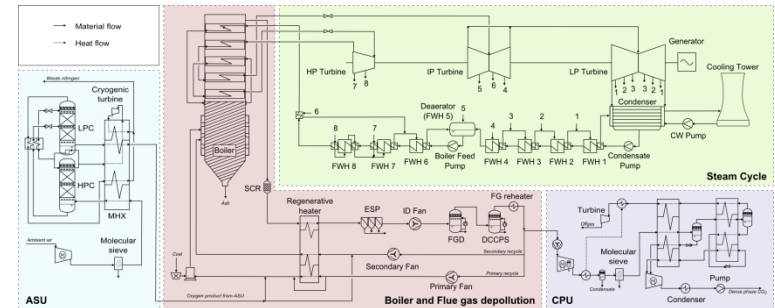
Pertes exergetiques = irréversibilités induites par le système

ANALYSE EXERGÉTIQUE (2)

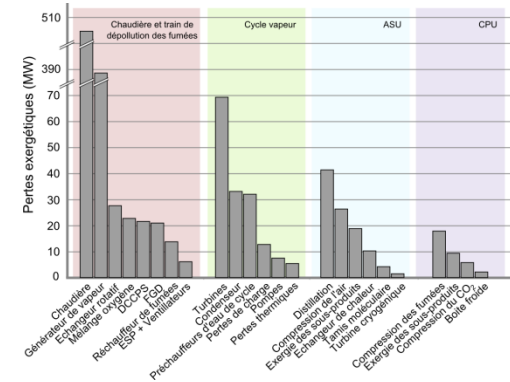


60 % !!

Ces pertes sont-elles évitables ?



ANALYSE EXERGÉTIQUE (3)



Exergie chimique → Chaleur à T finie
Chauffage des flux d'oxydants
Imbrûlés et formation de cendres

ΔT (i.e. >700 K, tubes écrans)
Pertes thermiques radiatives

Rendements

Exergie chimique

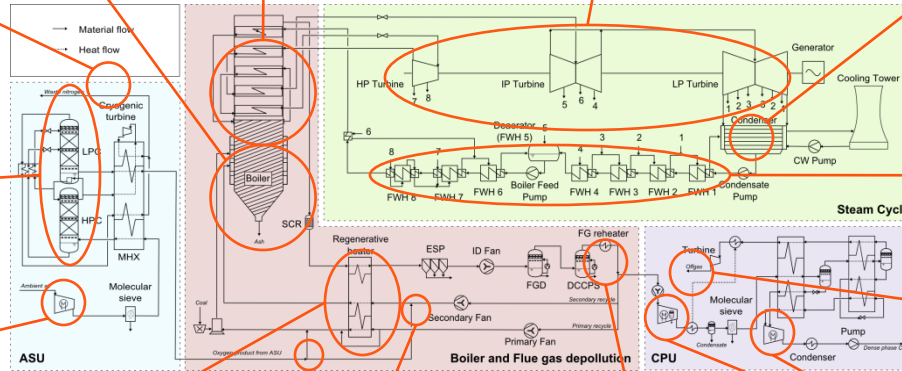
ΔT &
 Δ Potentiel chimique

Rendements
+ Refroidissement intermédiaire

ΔT (côté froid) de l'échangeur rotatif
Différence de débit fluide chaud/froid
Refroidissement à la $T_{op\acute{e}ratoire}$ de l'ESP
Quench du recyclage primaire chaud

Changement de composition
 ΔT

Électricité → chaleur à basse T



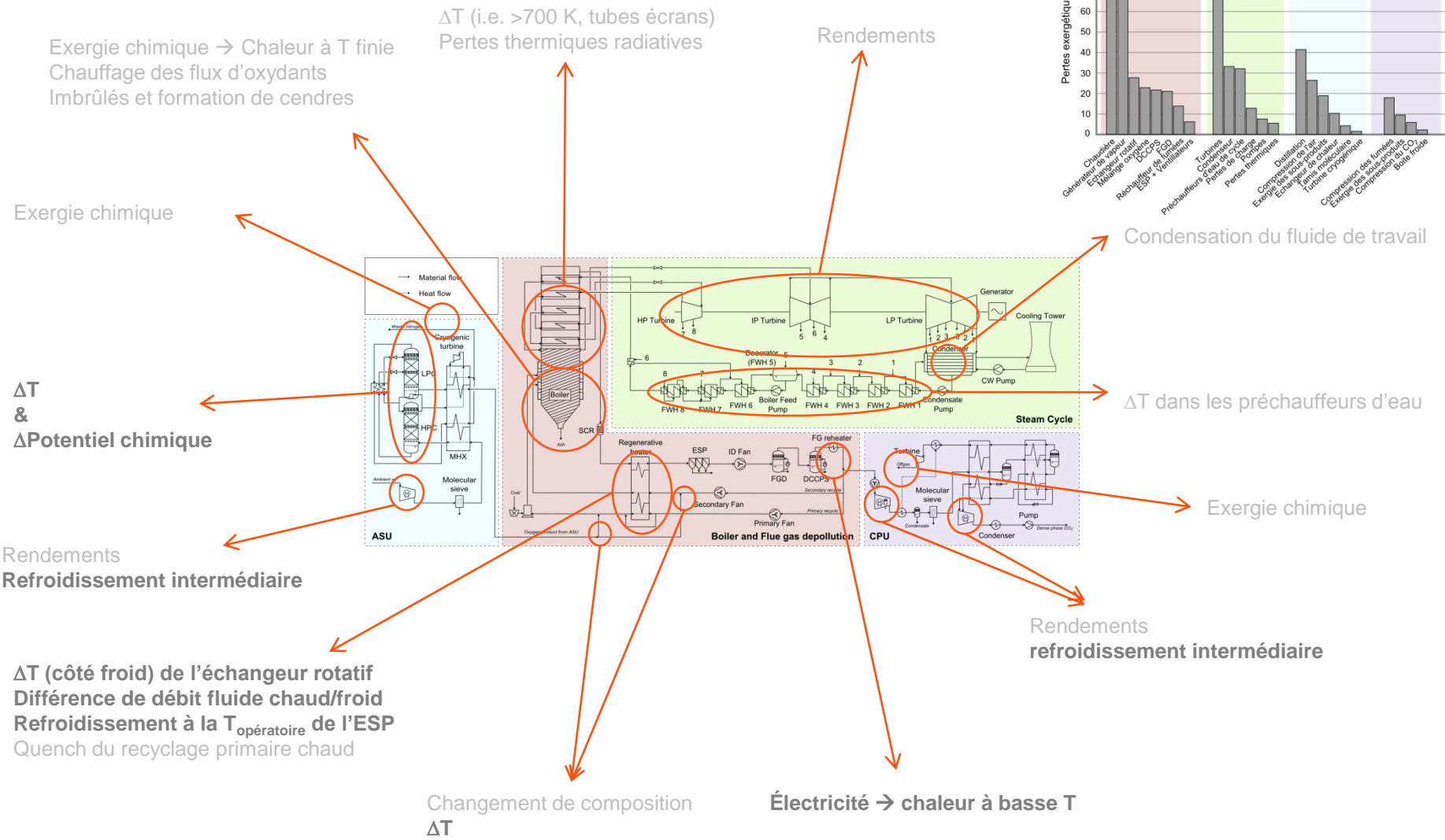
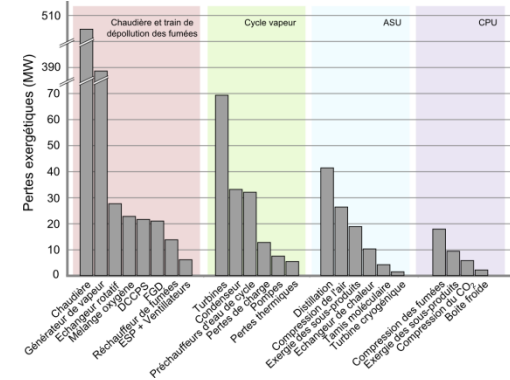
Condensation du fluide de travail

ΔT dans les préchauffeurs d'eau

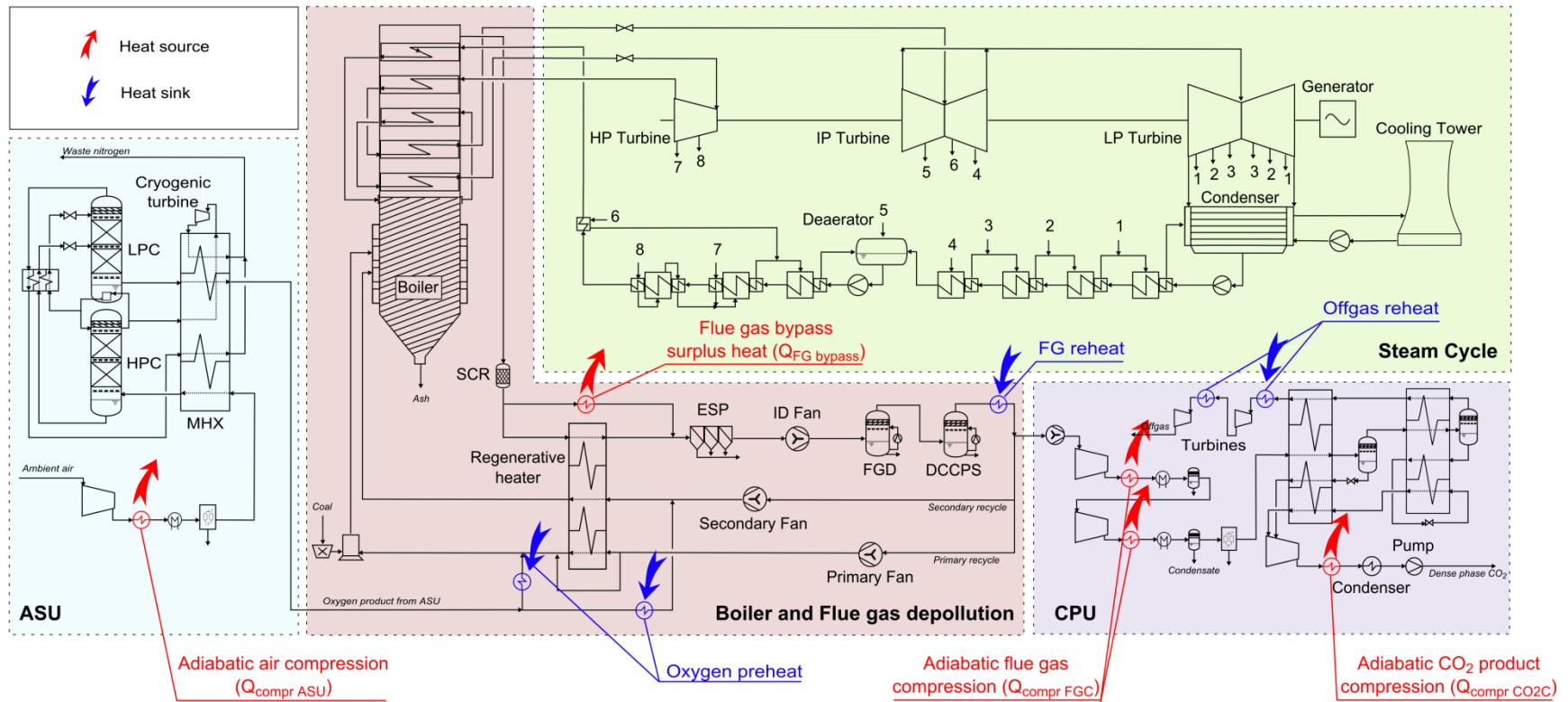
Exergie chimique

Rendements
+ refroidissement intermédiaire

ANALYSE EXERGÉTIQUE (3)

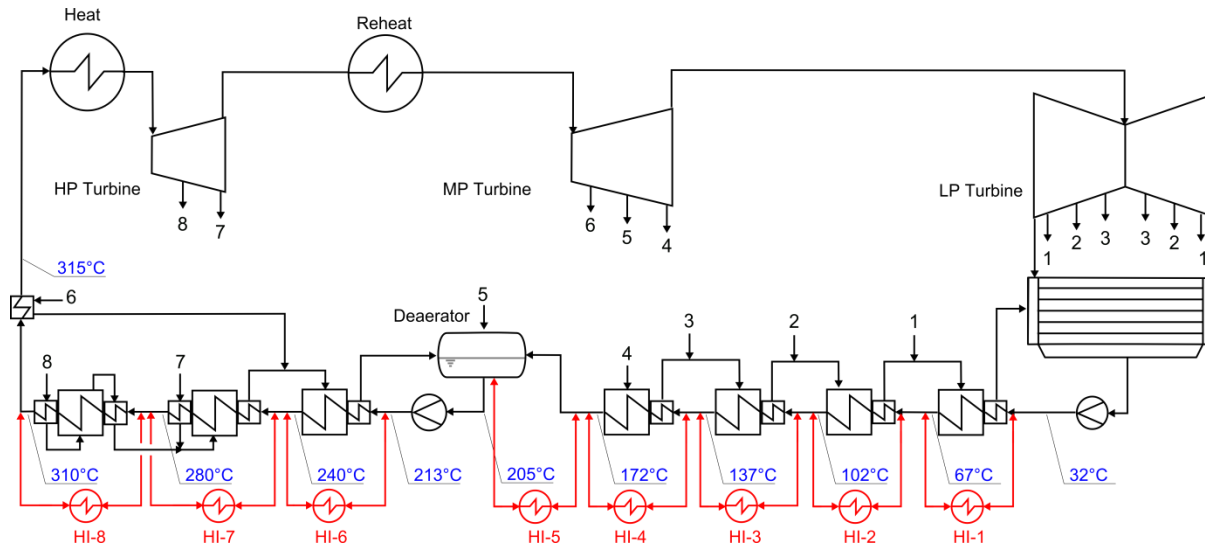


VOIES D'AMÉLIORATION IDENTIFIÉES



Comment intégrer ces sources & puits de chaleur ?

INTÉGRATION THERMIQUE



Pourquoi utiliser l'eau de cycle pour l'intégration thermique ?

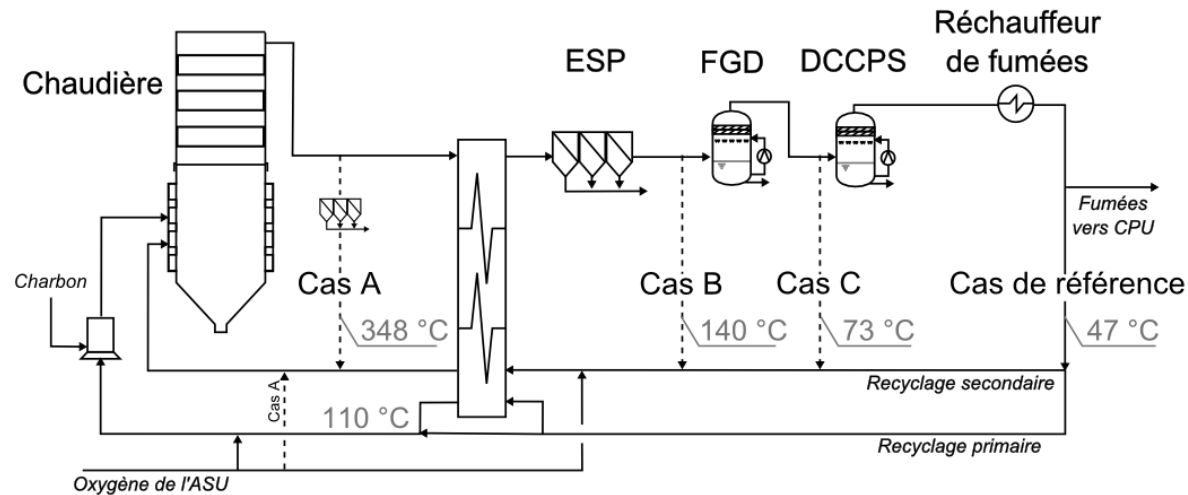
- Échanges Gaz/Liquide → pincements thermiques plus faibles que Gaz/Gaz
- Disponible en grande quantité
- Source ET puits de chaleur
- Échangeurs placés en parallèle → possibilité d'harmoniser les profils de T

SCHÉMAS DE RECYCLAGE DES FUMÉES

Une des spécificités de l'oxy-combustion : recyclage des fumées

→ Possibilité d'augmenter la température du recyclage secondaire

→ réduire le débit de fumées vers les appareils de dépollution (et donc ↘ tailles → ↘ coûts)



...mais la modification de la localisation du recyclage entraîne :

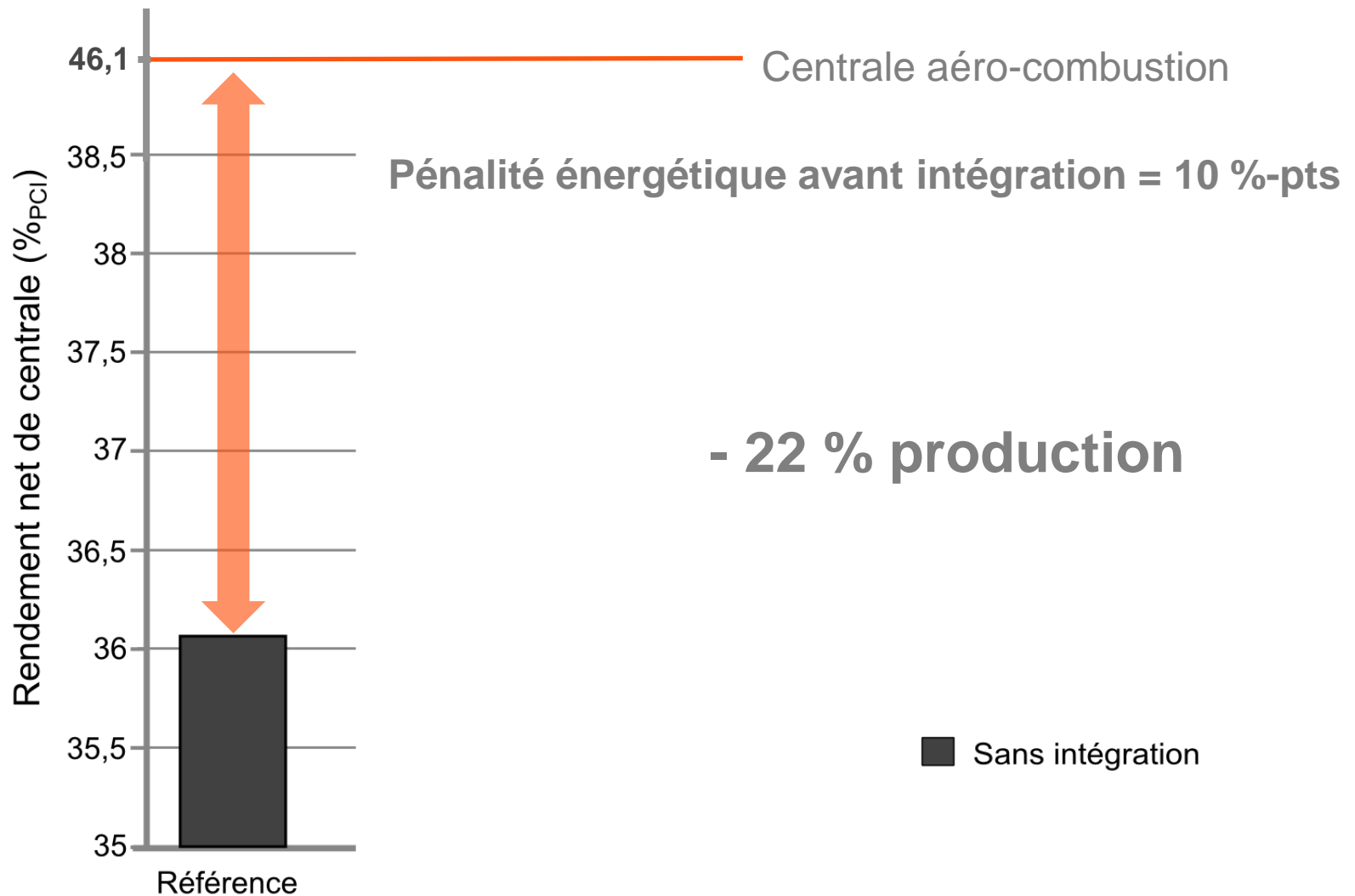
→ Taux d'humidité des fumées

→ Nécessité d'ajuster la p_{O_2} en entrée de chaudière et donc du taux de recyclage

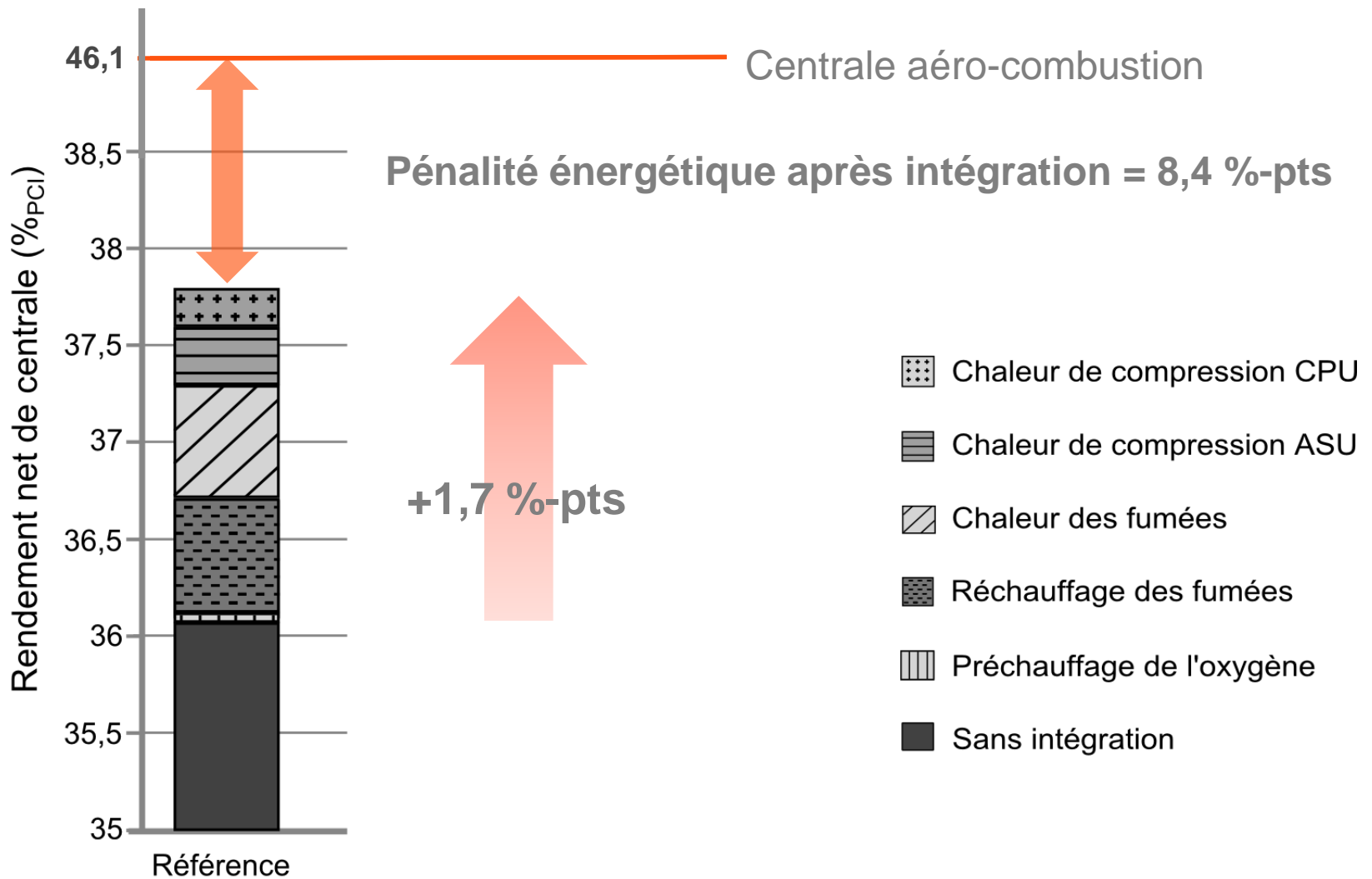
→ Changement de la demande en oxygène et de la composition des fumées en entrée de CPU

→ Variation du point de rosée acide

RÉSULTATS DE L'INTÉGRATION (1)



RÉSULTATS DE L'INTÉGRATION (2)

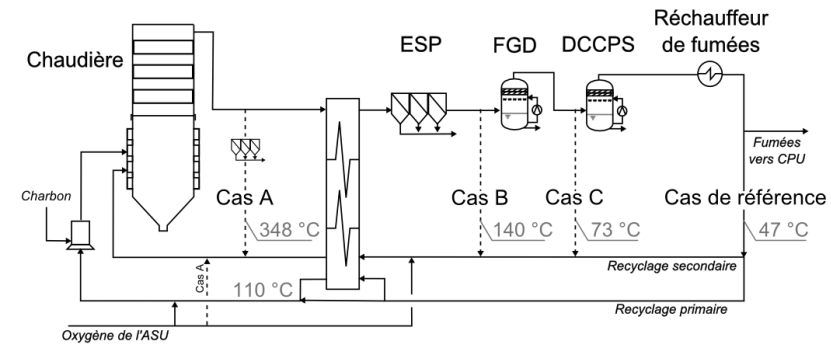
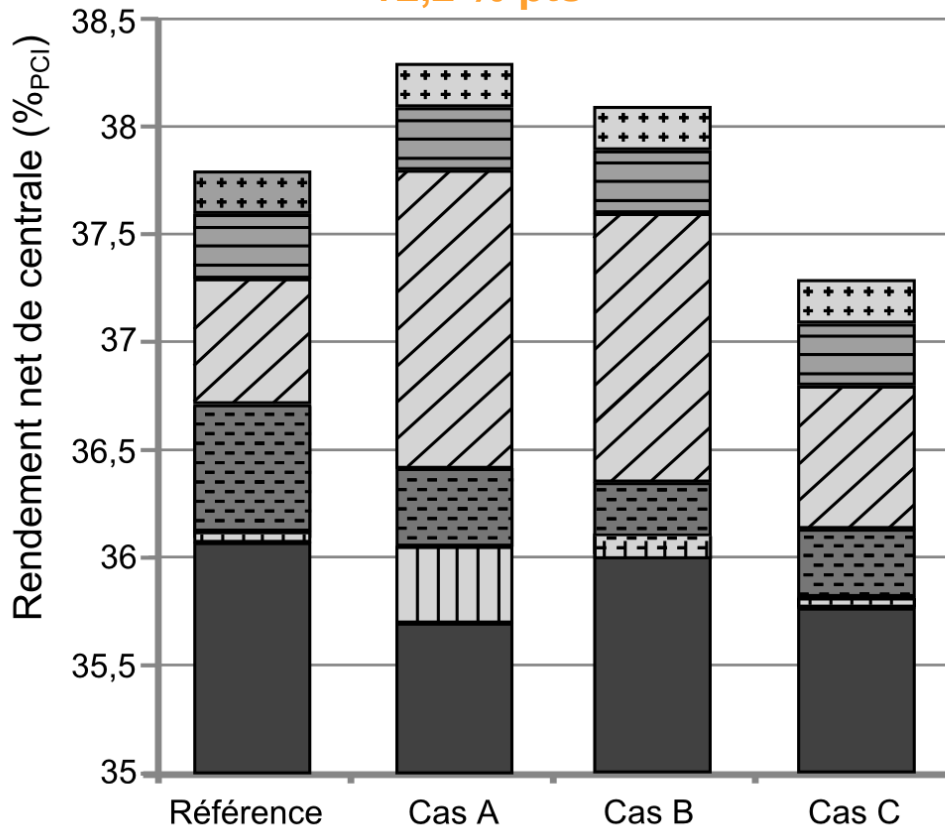








APPLICATION AUX DIFFÉRENTES ARCHITECTURES

$\eta = 38,3 \%_{\text{PCI}}$

Pénalité = 7,8 %-pts

+2,2 %-pts



-  Chaleur de compression CPU
-  Chaleur de compression ASU
-  Chaleur des fumées
-  Réchauffage des fumées
-  Préchauffage de l'oxygène
-  Sans intégration

CONCLUSIONS

- Une centrale à charbon pulvérisé fonctionnant en oxy-combustion avec captage du CO₂ a été modélisée et simulée en utilisant un logiciel commercial (Aspen Plus)
- Un approche basée sur l'exergie a été mise en œuvre pour identifier les modifications de procédé permettant de réduire les pertes (en exploitant les données obtenues à l'aide du module additionnel ExerCom)
- Ainsi, une configuration permettant d'augmenter le rendement de la centrale jusqu'à 2,2 %-pts a pu être identifiée (de 36,1 à 38,3 %-pts) réduisant ainsi la pénalité énergétique engendrée par le captage de 10%-pts à 7,8 %-pts
- D'autres modifications permettent de réduire encore d'avantage la pénalité énergétique du procédé (ASU avancée, procédés à plus faible TRL...)
- Les performances absolues obtenues sont à raffiner par des études d'ingénierie prenant en compte flexibilité/fonctionnement hors charge nominale

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Des questions ?

