



LMCS 2014

Logiciels pour la modélisation et le calcul scientifique

Vendredi 4 avril 2014, site d'EDF à Chatou (78), France

Conférencier : HAGI Hayato^{a, b}, NEMER Maroun^b, LE MOULLEC Yanna, BOUALLOU Chakib^b

^a EDF R&D, Mécanique des fluides, Energie et Environnement, 6 Quai Watier, 78401 Chatou, France

^b Mines ParisTech, DEP – Département Energétique et Procédés, 60 Bd Saint Michel, 75006 Paris, France

Organisme : EDF

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

L'objectif de la présente étude est de développer et d'appliquer une méthodologie d'intégration énergétique basée sur la minimisation des pertes exergetiques afin de comparer différentes configurations d'un procédé complexe, à savoir une centrale à charbon pulvérisé fonctionnant en oxy-combustion avec un système de captage du CO₂, et ce en adoptant une approche systémique. La principale originalité de ce travail est d'étudier dans le détail un système en cours de développement afin d'en optimiser la conception a priori.

Tout d'abord, une centrale oxy-combustion conventionnelle avec une intégration thermique minimale, dite de référence, est modélisée et simulée avec le logiciel commercial de simulation de procédé Aspen Plus particulièrement adapté pour la simulation de régime permanent et la conception de procédé. Une analyse exergetique, approche prenant à la fois en compte le premier et le second principe de la thermodynamique, est réalisée sur cette centrale afin d'identifier la localisation et l'importance des irréversibilités intervenant dans le système. A partir de ces informations, les modifications de procédé permettant a priori d'améliorer le rendement énergétique du système sont identifiées et mise en place. Cette méthodologie a été appliquée à différentes configurations de recyclage des fumées afin d'identifier celles qui mènent aux meilleures performances.

Parmi les différents cas étudiés, la configuration menant au meilleur rendement net de centrale permet d'obtenir un gain en termes de rendement de 2,2 points, et ainsi porter le rendement qui était initialement de 36,1 %_{PCI}, pour la centrale de référence sans intégration, à 38,3 %_{PCI}.

Mots-clés : Modélisation de procédé à l'échelle système, Aspen Plus®, Centrale électrogène, Captage du CO₂, Oxy-combustion

Introduction

Les préoccupations concernant les émissions des gaz à effet de serre, et plus particulièrement de dioxyde de carbone (CO₂) sont grandissantes dans la société actuelle. Dans un contexte où la production électrique, réalisée à 41 % à partir de charbon, représente plus de 40 % des émissions mondiales de CO₂, la mise en place des technologies de captage du CO₂ sur les centrales thermiques est primordiale. Aujourd'hui, la technologie de référence pour le captage du CO₂ des centrales à charbon est la post-combustion, procédé mettant en œuvre un solvant aminé pour séparer le CO₂ des fumées par absorption chimique. L'oxy-combustion est un procédé alternatif dont le principe est de séparer l'oxygène de l'azote en amont de la chaudière afin d'obtenir des fumées quasi-exemptes d'azote pour faciliter le captage du CO₂ en aval. Cependant, les surconsommations liées à l'unité de séparation d'air (ASU) ainsi que de l'unité compression et de purification des fumées (CPU) mènent

actuellement à des pertes de rendement significatives. Ainsi, cette étude propose la comparaison de différentes configurations de centrale oxy-combustion, et en particulier des options de recyclage des fumées, afin d'identifier les meilleures solutions d'un point de vue énergétique, qui pourront ensuite faire l'objet d'études d'ingénieries plus poussées pour en évaluer leur faisabilité et leur pertinence économique.

Méthodologie

Dans cette étude, le fonctionnement en base et en régime permanent d'une oxy-combustion de référence de 1100 MWe brute est modélisé et simulé en utilisant Aspen Plus, un logiciel commercial de simulation de procédé statique. L'oxygène est fourni par une unité de distillation cryogénique de l'air et le CO₂ est purifié par condensation partielle des fumées et comprimé afin de respecter les spécifications pour le transport et le stockage géologique. Par soucis de comparabilité avec d'autres études européennes sur le captage du CO₂, les hypothèses de modélisations retenues dans cette étude sont basées sur les recommandations de l'European Benchmarking Task Force [1]. Ainsi, un charbon bitumineux de qualité internationale avec un pouvoir calorifique inférieur (PCI) de 25,2 MJ/kg et des conditions ambiantes relatives aux normes ISO pour une construction dans les terres sont retenues. Enfin, la nature des espèces mises en jeu différant fortement au sein du procédé, trois modèles thermodynamiques différents ont été mis en oeuvre pour représenter au mieux les phénomènes mis en jeu : table de l'eau pour le cycle vapeur, L'équation d'état de Redlich-Kwong & Soave modifiée par ASPEN-Tech pour la partie chaudière et traitement des fumées et l'équation d'état Peng-Robinson, avec les lois de mélange de Boston-Mathias, pour les parties cryogéniques (ASU et CPU).

Ainsi, cette centrale de référence est utilisée pour identifier les sources de pertes par analyse exergétique, en vue de mettre en place les modifications de procédés permettant d'améliorer les performances énergétiques du système. L'approche exergétique, contrairement à l'approche énergétique, prend en compte à la fois le premier et le second principe de la thermodynamique. En effet, l'exergie, qui par définition est la quantité d'énergie utile récupérable contenue dans un système par rapport à un environnement de référence, permet d'appréhender au mieux les irréversibilités engendrées par les différents processus intervenant dans un procédé et est ainsi particulièrement adapté à l'étude de systèmes énergétiques. Or, la nature multi-composant avec des physico-chimiques particulières ainsi que le nombre important de flux de matière, d'énergie et d'opérations unitaires intervenant dans le modèle d'une centrale oxy-combustion complique considérablement la mise en oeuvre de l'analyse exergétique. Ainsi, un module additionnel d'Aspen Plus – ExerCom [2] - permettant de calculer le contenu exergétique des flux de matière à l'état gazeux et liquides est employé. Un bilan exergétique à l'échelle de l'opération unitaire est ensuite mise en place dans Aspen Plus afin de pouvoir identifier la localisation et l'importance des pertes exergétiques intervenant dans le système. A partir des informations tirées de l'analyse exergétique, les modifications de procédé permettant l'amélioration des performances de la centrale sont identifiées et mis en place.

Description du système

Un schéma simplifié de la centrale oxy-combustion de référence est présentée Figure 1. Le cycle vapeur considéré est un cycle de Hirn à resurchauffe simple avec des conditions vapeur de 300 bar / 600 °C / 620 °C. L'eau de cycle est préchauffée jusqu'à 315 °C dans sept préchauffeurs d'eau à contact indirect et un échangeur à contact direct remplissant également le rôle de déaérateur. Une tour aéro-réfrigérante à convection naturelle fournissant de l'eau de refroidissement à 18 °C est considérée, menant ainsi à un vide au condenseur de 48 mbar.

L'objectif de l'étude étant l'évaluation des performances énergétiques et non la prédiction des polluants issus de la combustion du charbon, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à de la mécanique des fluides assistée par ordinateur pour modéliser la chaudière. Celle-ci est donc modélisée par un réacteur calculant les équilibres chimique et de phase par minimisation de l'énergie libre de Gibbs à la température moyenne du foyer (1250 °C). L'eau du cycle vapeur préchauffée traverse successivement quatre échangeurs de chaleur représentant l'économiseur, les tubes écrans et deux surchauffeurs. Deux échangeurs sont considérés pour la resurchauffe de la vapeur. Après dénitrification dans une unité de réduction catalytique (SCR), les fumées entrent dans un échangeur rotatif dans lequel sont préchauffées les fumées recyclées. S'en suivent le dépoussiérage dans un

précipitateur électrostatique (ESP), l'abattement des espèces soufrées dans une installation de désulfuration humide (FGD) et la déshumidification par saturation à basse température dans une colonne à contact direct (DCCPS). Enfin, les fumées sont légèrement réchauffées dans un échangeur électrique pour éviter tout risque de condensation acide en aval du procédé. Dans une centrale oxy-combustion, une fraction des fumées doit être recyclée pour diluer le flux d'oxygène produit par l'ASU afin d'obtenir des conditions de combustion équivalente à une combustion à l'air dans un environnement majoritairement composé de CO₂ et de vapeur d'eau. Celui-ci, dans le procédé de référence, est réalisé après la déshumidification.

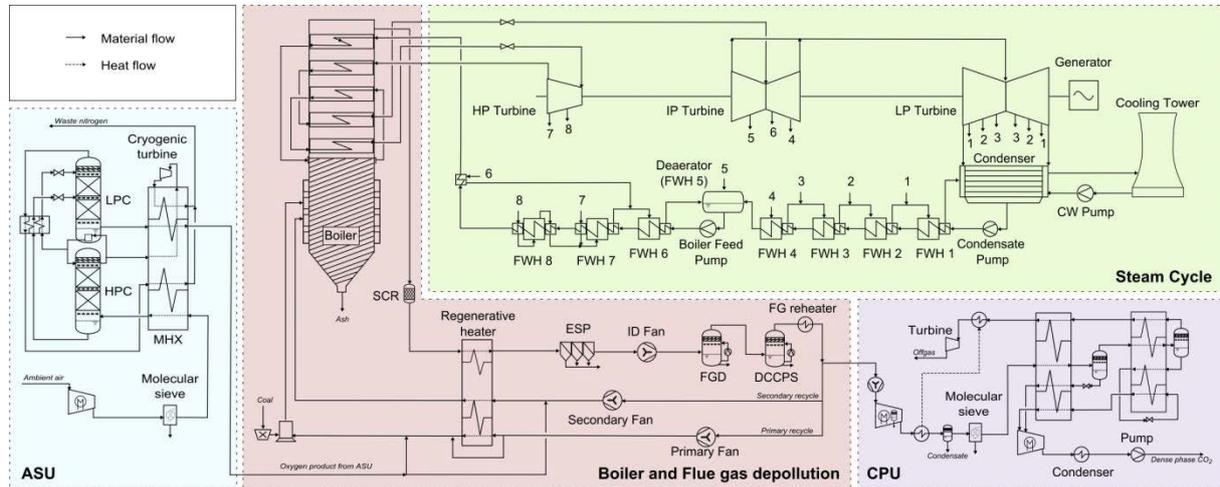


Figure 1 Schéma de procédé simplifié d'une centrale à charbon pulvérisé fonctionnant en oxy-combustion

L'unité de séparation d'air considérée est un procédé de distillation cryogénique conventionnel dit à double-colonne dont le fonctionnement est basé sur le couplage thermique de deux colonnes opérant à deux pressions différentes via un évapo-condenseur. Un flux d'oxygène à 95 %_{mol} et à 1,2 bar est produit. Concernant la purification des fumées, la fraction non-recyclée des fumées en sortie de circuit de dépollution est envoyée dans une unité de purification et de compression du CO₂ (CPU) dans laquelle le CO₂ est successivement condensé dans deux ballons de séparation gaz-liquide. Le flux riche en CO₂, d'une pureté de 96 %_{mol}, est comprimé jusqu'à 110 bar pour pouvoir être transporté et stocké.

Schémas de recyclage des fumées

Une des spécificités de l'oxy-combustion est la modification du circuit des fumées et en particulier la présence d'un recyclage des fumées. Les fumées peuvent être recyclées en aval des différentes unités de dépollution comme il a été considéré dans la centrale de référence mais le recyclage peut être réalisé à un autre point du circuit des fumées. Suivant le choix adopté, la température à laquelle celle-ci seront retournés à la chaudière ainsi que sa composition (humidité, présence de polluants) seront différentes.

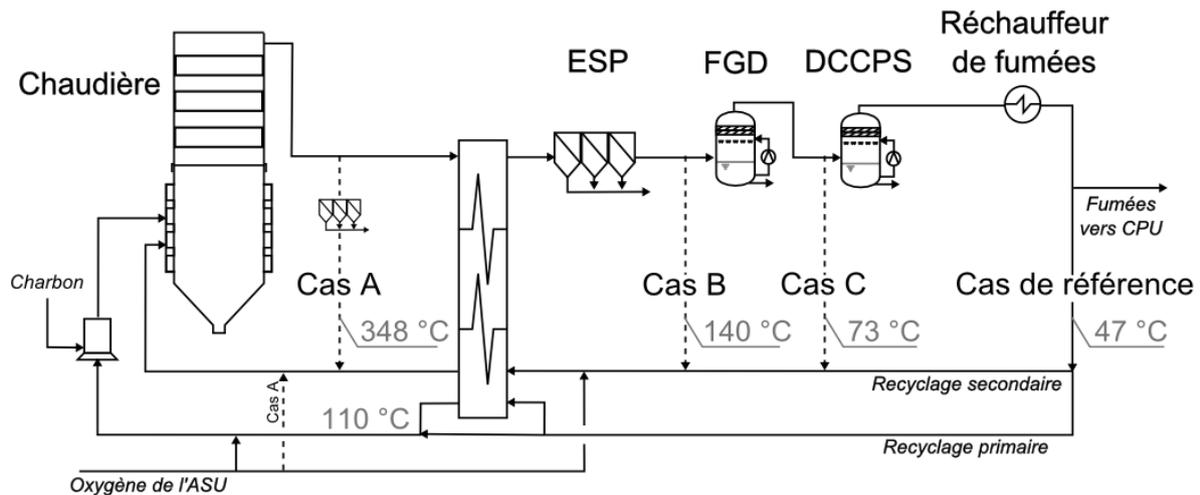


Figure 2 Représentation schématique des différentes options de recyclage de fumées étudiées

La Figure 2 est une représentation schématique des options de recyclage des fumées investiguées dans le cadre de cette étude. Dans le cas de référence a été représenté en trait plein, après dépollution et déshumidification. Trois cas alternatifs ont été considérés :

- Cas A : le recyclage secondaire est réalisé avant l'échangeur rotatif afin de maximiser la température à laquelle le flux retournera à la chaudière ;
- Cas B : le recyclage secondaire est réalisé après l'ESP. Dans cette configuration, la température des fumées en sortie de l'échangeur rotatif étant autour de 170°C, un échangeur de chaleur refroidissant les fumées autour de 130 °C est placé en aval afin de respecter la température d'approche fixée par l'échangeur rotatif (30 K). Le flux de recyclage est comprimé par un ventilateur, mélangé au flux d'oxygène en provenance de l'ASU et réchauffé par les fumées sortant de la chaudière jusqu'à 310 °C ;
- Cas C : le recyclage secondaire est réalisé après la désulfuration mais avant la déshumidification. Les fumées sont alors à 70 °C mais avec une teneur en eau significativement plus élevée.

Il est à noter que suivant la teneur en eau des fumées recyclées, la pression partielle d'oxygène nécessaire pour obtenir des conditions de combustion équivalente à une combustion à l'air est différente [3]. Ainsi, alors que cette pression partielle est de 0,35 pour le cas de référence, elle est de 0,28 pour les cas A et B et une valeur de 0,24 a été fixée pour le cas C. Ainsi, pour chaque cas, la fraction de fumée recyclée a été ajustée par la mise en place d'un contrôleur.

Analyse exergétique

Une analyse exergétique à l'échelle de l'opération unitaire a été réalisée sur la centrale oxy-combustion de référence. Les résultats de celle-ci ont été agrégés dans la Figure 3. Ainsi, on peut observer qu'environ 60 % de l'exergie introduite dans le système (charbon) est détruit en différents points du procédé. C'est au niveau de la chaudière et du générateur de vapeur qu'interviennent les pertes les plus importantes (respectivement 37 % et 29 %). Les turbines à vapeur, la distillation de l'ASU, les étapes de compression de l'ASU et de la CPU, les préchauffeurs d'eau de cycle, le réchauffeur de fumées et la section échangeur rotatif sont également des sources de pertes d'exergie importants.

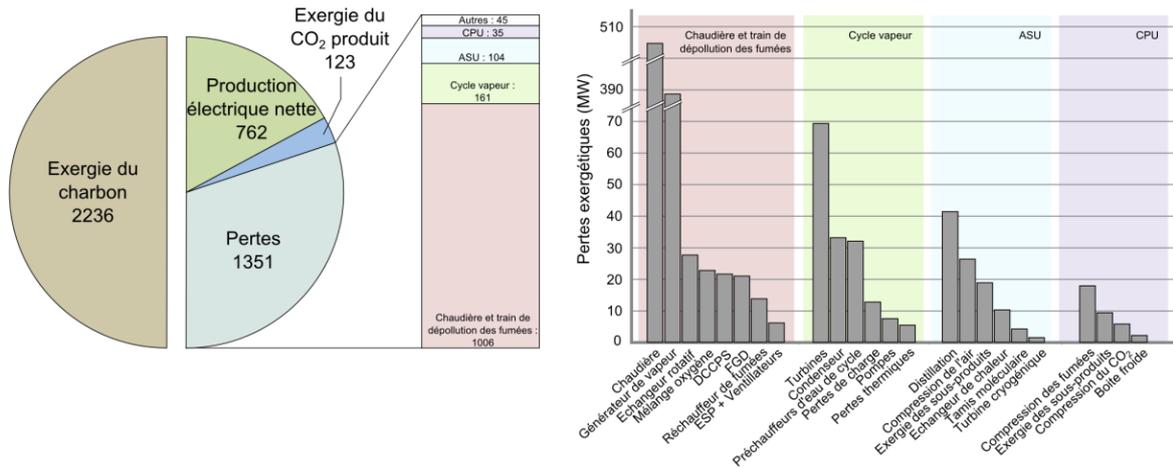


Figure 3 Répartition et postes de pertes exergetiques de la centrale de référence

Parmi ces pertes, celles qui sont a priori évitables sont identifiées. En effet, certaines d'entre elles étant dues à des phénomènes physiques comme pour la combustion du charbon dans la chaudière ou à des limitations technologiques comme la tenue des matériaux (température, pression) ou encore les rendements de conversion, elles ne peuvent être évitées. Ainsi, les pistes d'améliorations identifiées à l'issue de cette étape sont les suivantes :

- Afin de réduire les pertes dues à un transfert thermique avec une différence de température significative dans l'échangeur rotatif, une fraction du débit de fumées chaudes en entrée de cet échangeur est déviée pour homogénéiser les profils de température dans celui-ci. La chaleur contenue dans le flux de fumées ainsi dévié peut être valorisée (chaleur des fumées) ;
- La différence de température entre le flux d'oxygène provenant de l'ASU et des fumées recyclées entraîne un refroidissement de ce flux, qui en plus d'entraîner une perte d'exergie locale impacte la température d'entrée dans l'échangeur rotatif et donc les pertes intervenant dans celui-ci. Ainsi, le préchauffage de l'oxygène à la température adéquate (dépendant de la stratégie de recyclage considérée) est mise en place ;
- Les refroidissements intermédiaires lors des étapes compressions de l'ASU et de la CPU contribuent largement à la perte importante d'exergie de cette section. Cette chaleur de faible qualité ne peut être valorisée efficacement dans le procédé. Ainsi, la compression étagée avec refroidissement intermédiaire a été substituée par une compression adiabatique afin d'obtenir une source de chaleur exergetiquement plus dense qui pourra être intégrée ;
- L'utilisation d'électricité, exergie pure, pour réchauffer un débit important de fumées de 20 à 40 °C entraîne des pertes importantes. La substitution de cet échangeur par un échangeur à contact indirect utilisant une source chaude dont la température est plus adaptée permet de réduire les pertes associée à cette étape.

Ainsi, pour chacune des configurations de recyclage des fumées, les gains apportés par les modifications identifiées précédemment sont reportés dans la Figure 4.

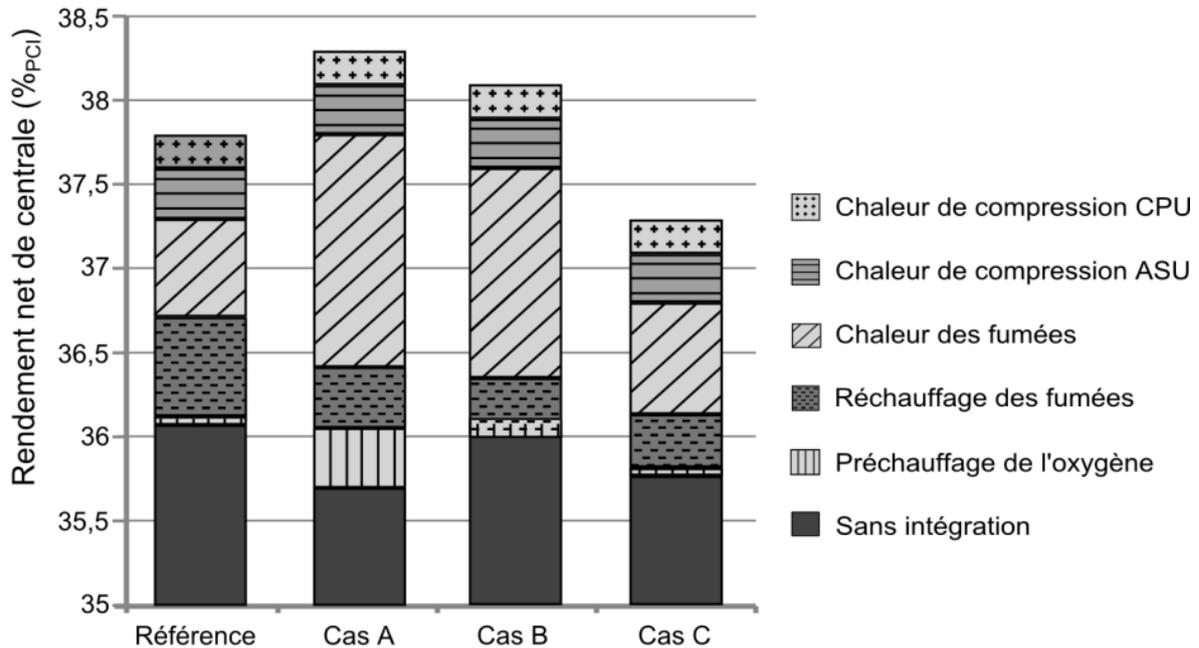


Figure 4 Gains apportés par les modifications de procédé en termes de rendement net de la centrale avec captage pour les différentes options de recyclage des fumées

Cette figure met en évidence que les gains apportés par l'intégration, ainsi que la contribution de chaque intégration, dépend de l'option de recyclage des fumées adoptée. Le gain important du réchauffage des fumées dans le cas de référence est dû à un débit de fumées à réchauffer plus important que les autres cas puisque le recyclage est réalisé après celui-ci. Le rendement du cas A sans intégration est plus faible que tous les autres cas considérés car le flux recyclé chaud est refroidi par l'oxygène provenant de l'ASU. La température en entrée de chaudière est alors de 290 °C contre 310 °C pour les autres cas où le flux recyclé est réchauffé par les fumées sortant de la chaudière dans l'échangeur rotatif. Ceci explique le gain important apporté par le préchauffage de l'oxygène pour le cas A. Pour les cas B et C, la préchauffe de l'oxygène n'apporte pas de gain direct sur le rendement. Cependant, elle augmente la température du recyclage secondaire en entrée de l'échangeur rotatif, ce qui augmente le débit de fumées dévié de l'échangeur rotatif et donc la quantité de chaleur haute température valorisable (chaleur des fumées). L'intégration de la chaleur de compression de l'ASU et de la CPU mène à un gain équivalent pour tous les cas considérés, de l'ordre de 0,5 points de rendement.

Si aucune intégration n'est mise en place, les options les plus performantes sont le cas de référence et le cas B. Il est intéressant de noter qu'après préchauffage de l'oxygène, les rendements sont équivalents pour les cas de référence, le cas A et le cas B. Lorsque les diverses intégrations énergétiques sont mises en place, la configuration menant au meilleur rendement est le cas A avec un rendement de 38,3 %_{PCI}, ce qui représente une augmentation de 2,2 points de rendement par rapport au cas de référence sans intégration. Enfin, concernant le cas C, malgré une température du recyclage secondaire plus élevée que le cas de référence, l'important contenu en vapeur d'eau de ce flux entraîne une nécessité d'augmenter significativement le taux de recyclage des fumées. Ceci entraîne un débit de fumées plus important dans le circuit de dépollution qui s'accompagne d'une augmentation de la consommation des ventilateurs, des consommations d'auxiliaires liées aux appareils de dépollution et des pertes exergétiques dans l'échangeur rotatif.

Conclusion

Dans cette étude, le logiciel de simulation de procédé commercial Aspen Plus a été utilisé pour modéliser à l'échelle système et étudier les performances énergétiques de différentes configurations de centrale oxy-combustion. Grâce aux données thermodynamiques calculés par cet outil, les contenus exergétiques de chaque flux de matière intervenant dans le procédé ont pu être déterminés par le module ExerCom, lesquels ont été utilisés pour réaliser des bilans exergétiques à l'échelle de

l'opération unitaire pour déterminer les pertes intervenant au sein du système étudié. Ainsi, la localisation et l'importance des irréversibilités ont été déterminés, ce qui a permis d'identifier les modifications de procédé permettant d'améliorer le rendement énergétique de la centrale et ainsi minimiser la perte de rendement due à la mise en place d'un système de captage du CO₂. En mettant en oeuvre cette méthodologie, le rendement de la centrale avec captage a pu être augmenté de 2,2 points, passant de 36,1 %_{PCI} pour le cas de référence sans intégration à 38,3 %_{PCI}. Enfin, il est important de souligner encore une fois que l'objectif de cette approche est de réaliser une comparaison de concept préliminaire pour discriminer les configurations qui ont, à priori, les meilleures performances énergétiques. Ainsi, les performances en valeurs absolues mises en évidence par cette étude sont à raffiner par une étude d'ingénierie prenant en compte les critères requis pour l'opération d'une centrale comme la flexibilité ou encore les performances lors d'un fonctionnement hors charge nominal.

Références

- [1] European Benchmarking Task Force. European best practice guidelines for assessment of CO₂ capture technologies, public report from CAESAR, CESAR and DECARBit European Union Projects, 2011; Brussels, Belgium.
- [2] JACOBS Consultancy. ExerCom v2.2 manual for AspenPlus version 2006 & 2006.5 (local PC version) 2009. The Netherlands.
- [3] Wall T, Liu Y, Spero C, Elliott L, Khare S, Rathnam R, et al. An overview on oxyfuel coal combustion – State of the art research and technology. Chemical Engineering Research and Design 2009; 87: 1003-1016.