

# Etude de la stabilisation d'une flamme diluée au CO<sub>2</sub> dans une chambre de combustion de turbine à gaz

## Impact énergétique de la récupération du CO<sub>2</sub> Couplage cycle turbine et procédé membranaire

PHYCAP      PP      2007  
COCASE      PIE      2008-2010

G. Cabot, M.S. Cabot, M. Boukhalfa

UMR 6614

**coRia**

COMPLEXE DE RECHERCHE  
INTERPROFESSIONNEL EN AEROTHERMOCHIMIE



# **Etude de la stabilisation d'une flamme diluée au CO<sub>2</sub> dans une chambre de combustion de turbine à gaz**

## **Objectif :**

**Etudier la combustion d'une flamme de méthane dans les conditions rencontrées dans les turbines à gaz en tenant compte des modifications apportées pour augmenter l'efficacité du procédé de séparation membranaire.**

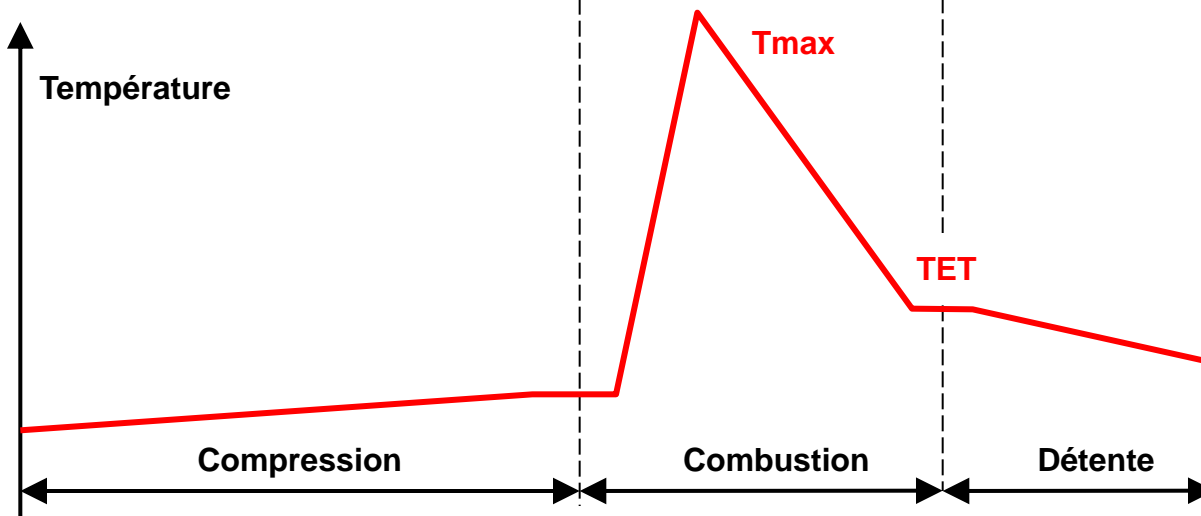
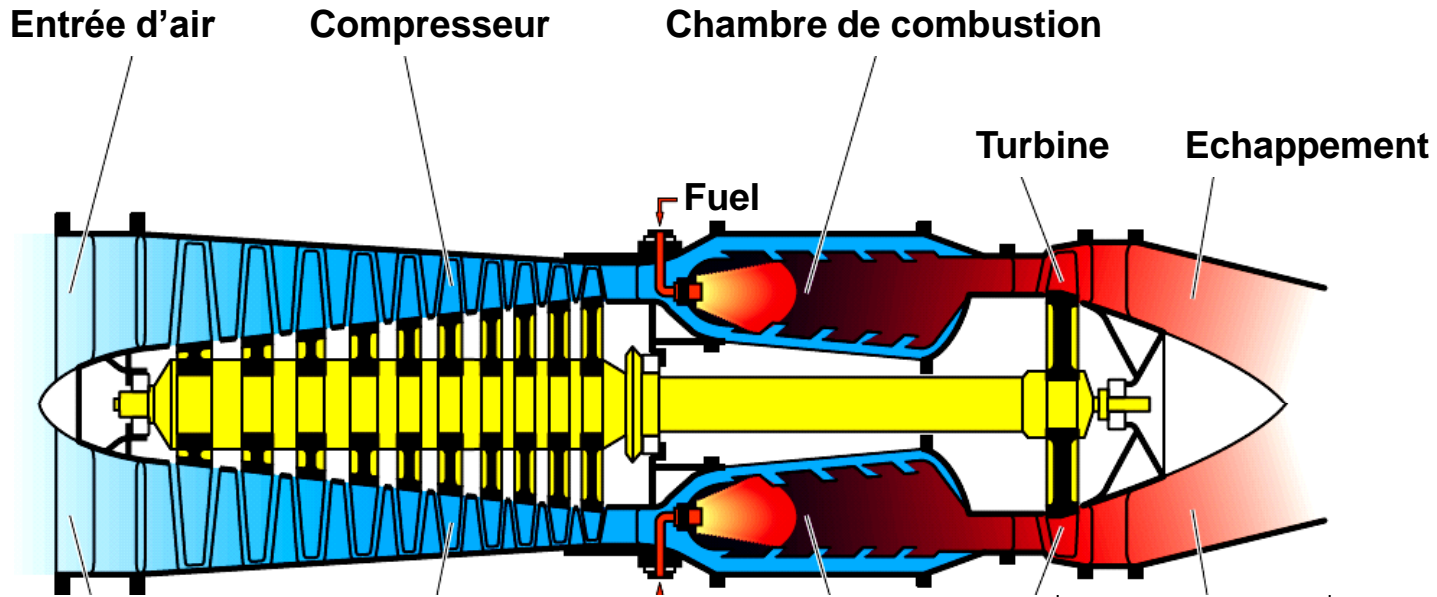
**Contexte technologique des turbines**

**Contexte scientifique de la combustion**



# Contexte technologique des turbines

## Turbine à Gaz Standard

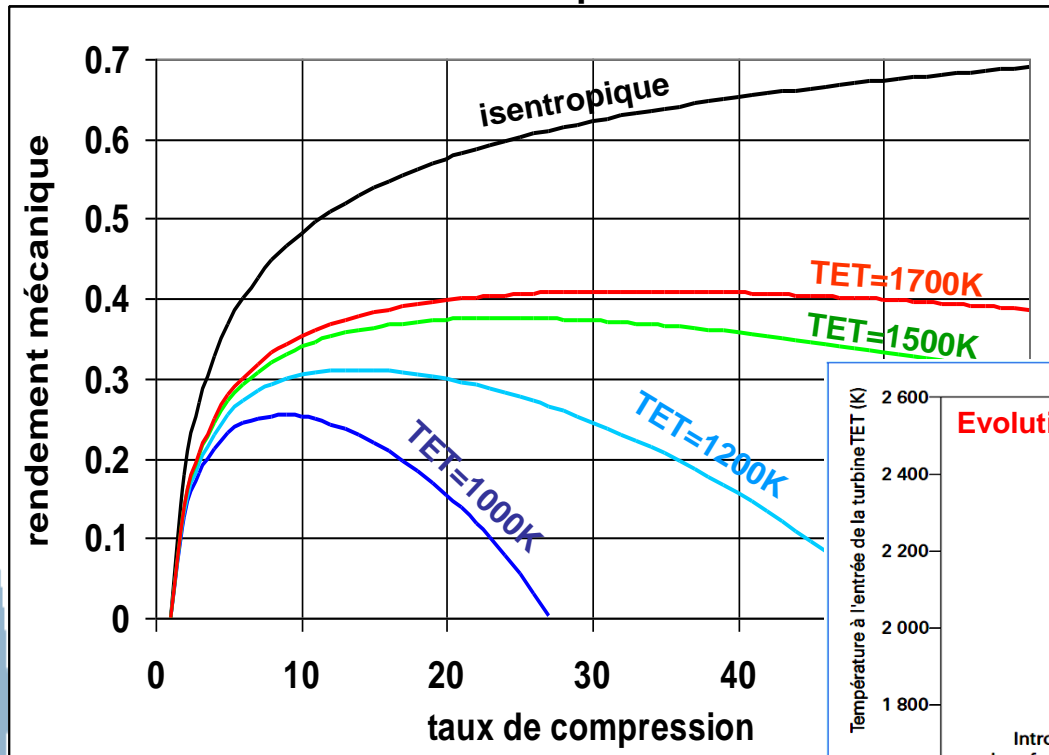


TET: Température  
Entrée Turbine

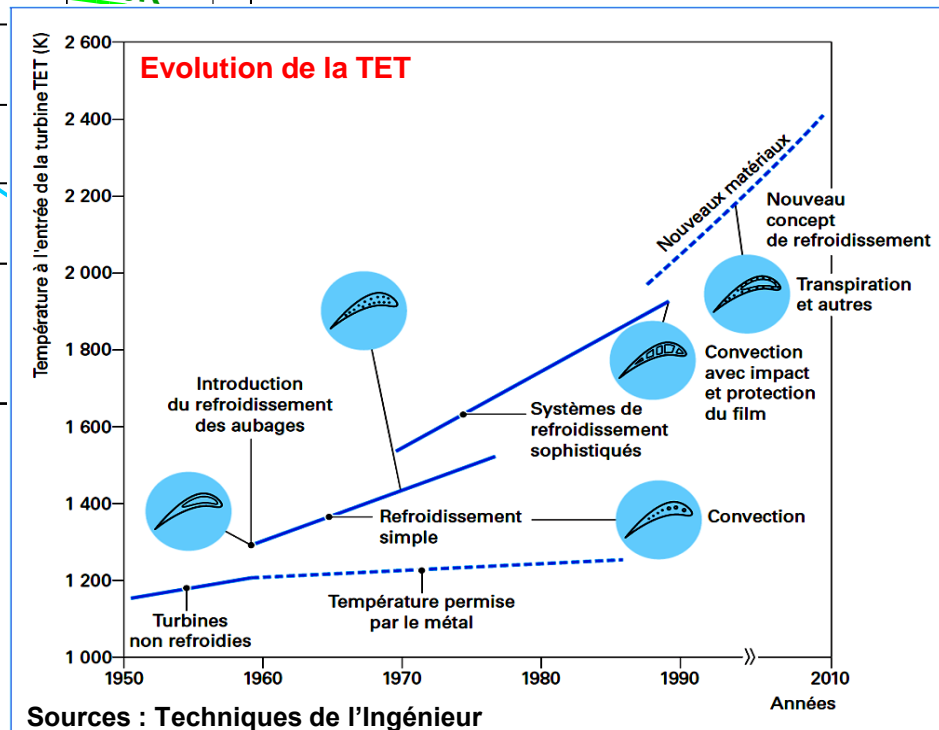


# Contexte technologique des turbines

Evolution du Rendement de la Turbine à Gaz en fonction du taux de compression et de la TET



$\eta_{is\ comp} \approx 87\%$ ,  $\eta_{is\ tur} \approx 85\%$ ,  $T_1 = 15\ C$ ,  $P_1 = P_{atmo}$

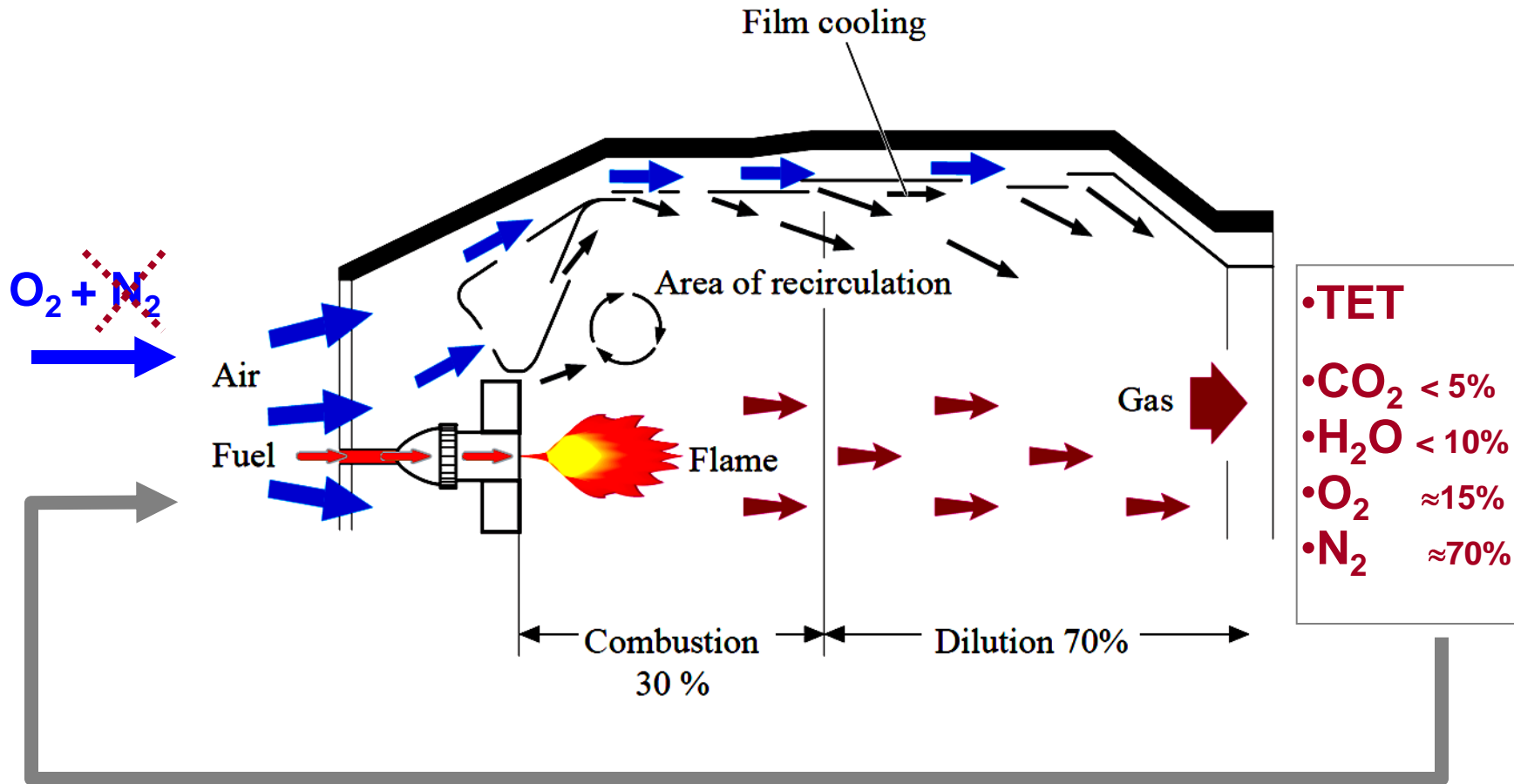


Sources : Techniques de l'Ingénieur



# Contexte technologique des turbines

## Chambre de Combustion



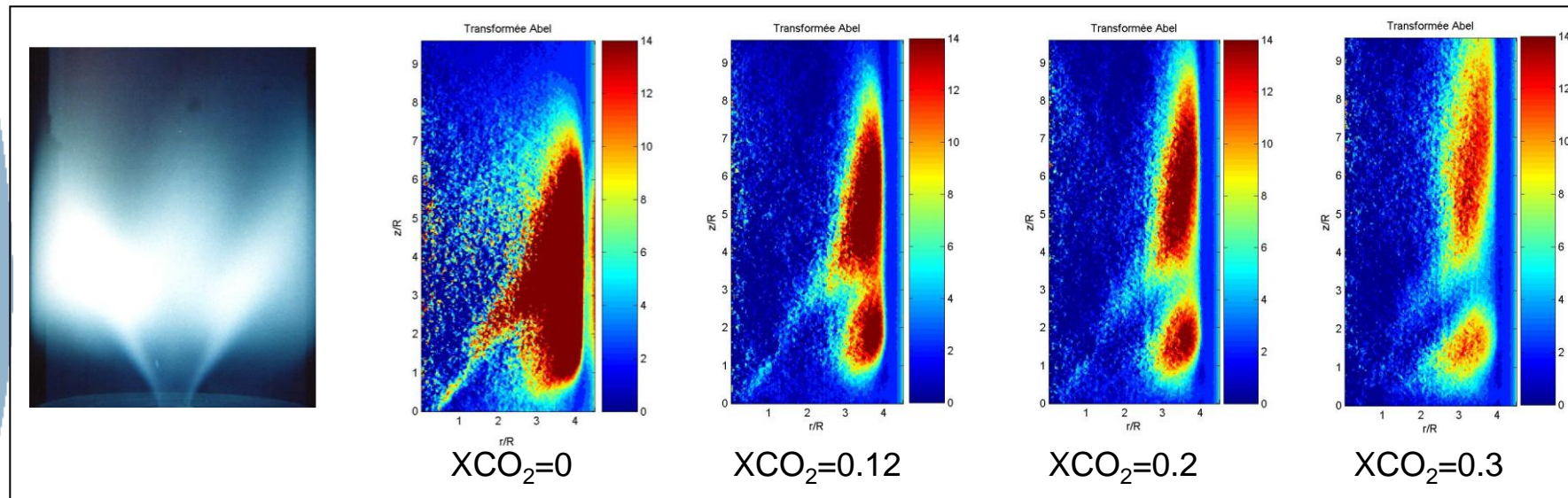
# Contexte scientifique de la combustion prémélangée diluée au $\text{CO}_2$

## PHYCAP PP

Dans le cadre de ce programme préparatoire, nous sommes partis des connaissances acquises au laboratoire sur la combustion prémélangée air/biogaz (biogaz 70% $\text{CH}_4$  - 30% $\text{CO}_2$ )

-Programme européen AFTUR

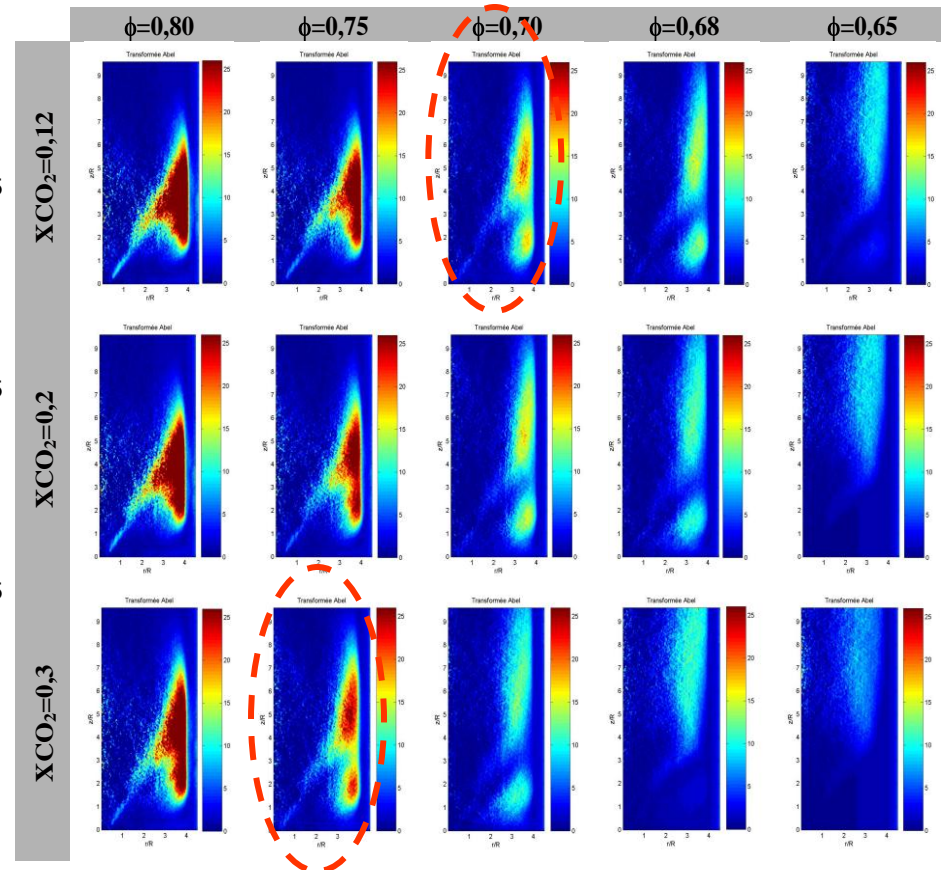
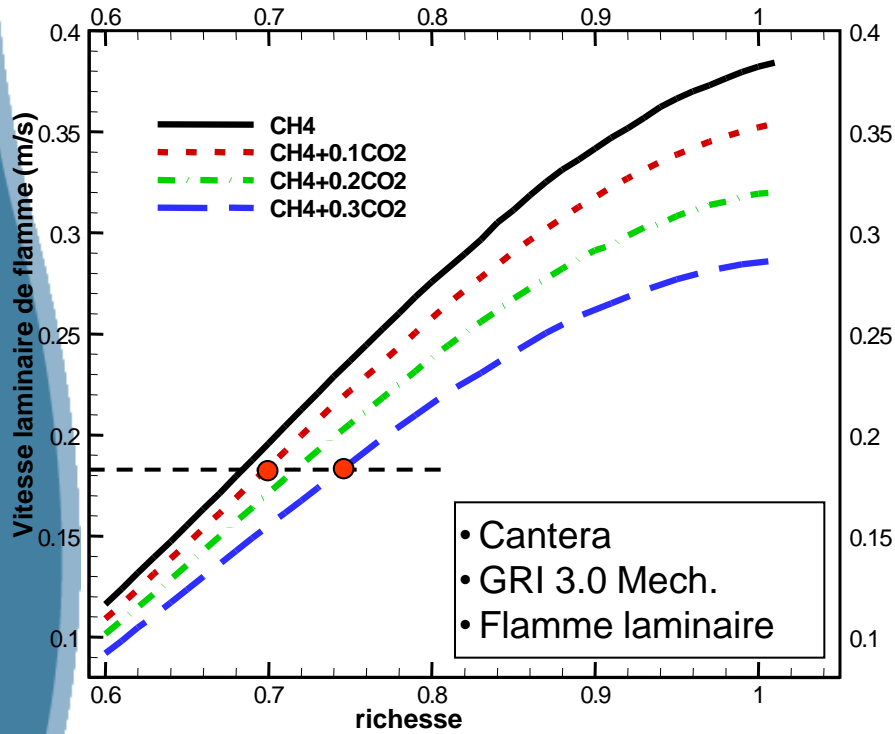
-Thèse :Yannick Lafay- Experiments in fluids 2007 - Combustion in Flame 2008



Evolution de la structure de flamme en fonction de la teneur en  $\text{CO}_2$  du Biogaz - Richesse = cte

Transformée d'Abel des images moyennes d'émission spontanée de CH

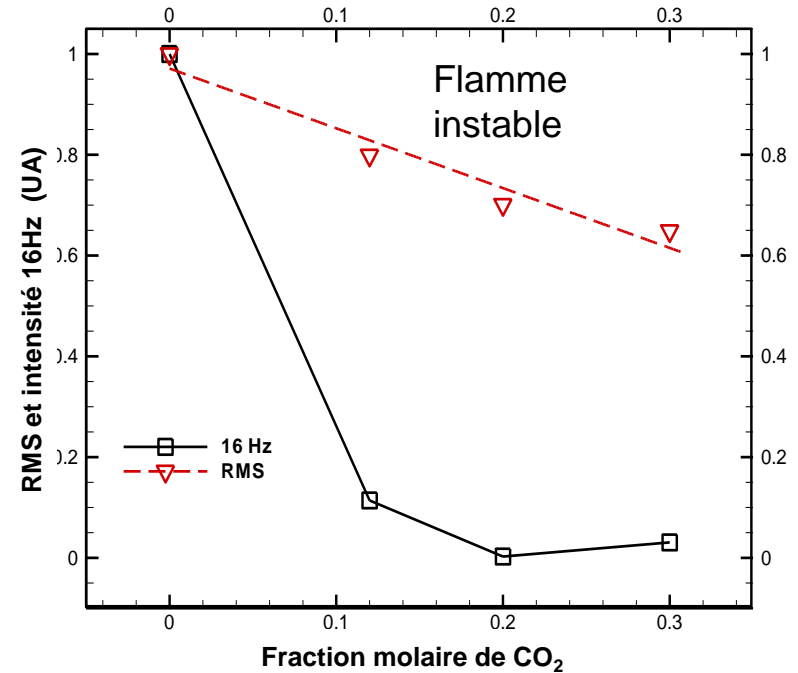
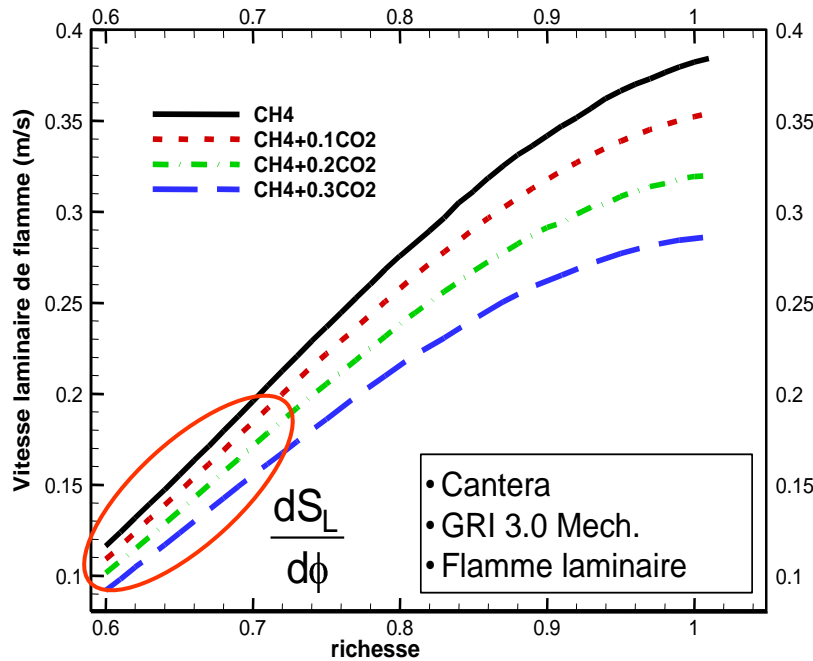




Relation entre vitesse de combustion laminaire calculée et structure de flamme observée



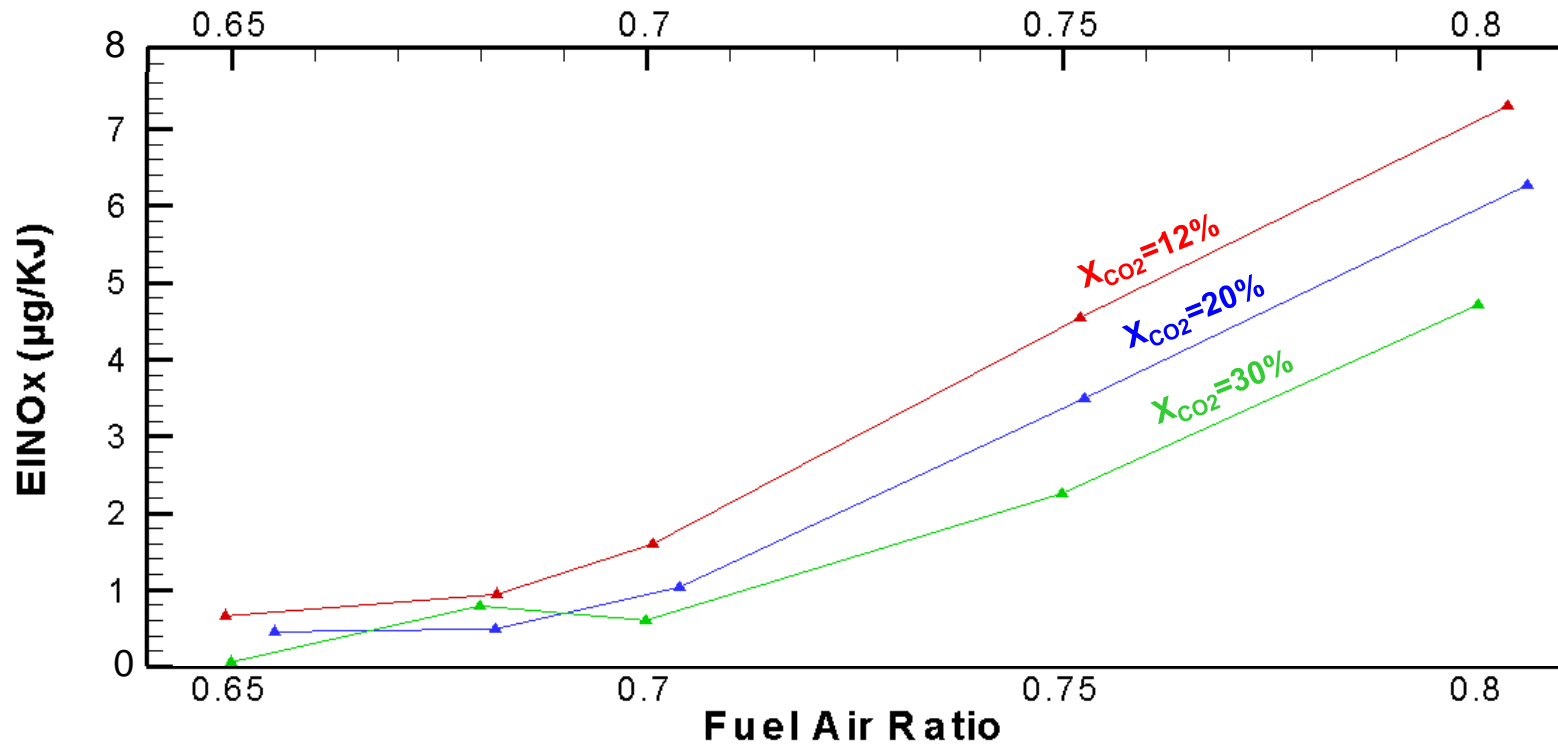
- La dilution au CO<sub>2</sub> améliore la stabilité de la flamme
- Peut être expliqué par la sensibilité de la vitesse laminaire de flamme à la richesse



Relation entre vitesse de combustion laminaire calculée et instabilité de combustion







Evolution des émission de NOx en fonction de la richesse et de la teneur en CO<sub>2</sub> du combustible



## PHYCAP

### CONCLUSION

L'injection de  $\text{CO}_2$  dans des proportions relativement faibles produit :

- Une réduction de l'intensité de réaction
- Une forte modification de la structure de flamme
- Une réduction du domaine de fonctionnement du brûleur
- Une réduction des émissions de  $\text{NO}_x$

### QUESTIONS :

- Qu'en sera-t-il lors d'une injection de  $\text{CO}_2$  massive dans l'air ?
- Pourra t'on toujours obtenir une flamme stabilisée ?
- Quelles modifications devra t'on apporter à l'alimentation en comburant de la chambre de combustion ?
- ...

SUITE : COCASE PIE



## COCASE PIE

L'objectif des travaux du CORIA dans le programme COCASE est de :

- Réaliser des flammes dans des conditions réalistes de turbine à gaz (Pression, température, écoulement à swirl, ...) et des conditions de fortes dilutions en CO<sub>2</sub>
- D'analyser les résultats en terme de structure de flamme, d'instabilité, de domaine de fonctionnement et en terme d'émissions polluantes
- De relier ces résultats aux résultats de calcul de cinétique chimique et résultats expérimentaux des laboratoires ICARE (UPR 3021) et LCD (UPR 9028)
- Enfin l'objectif final est de coupler nos résultats aux études sur les membranes du LSGC UPR(6811)



## Matériel mis en œuvre pour l'étude COCASE

- 1<sup>ère</sup> année

Adaptation du banc d'essai à la dilution par CO<sub>2</sub>  
étude à Pression et Température Ambiante

f (CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, Phi)

- 2<sup>ème</sup> année      Effet de la température (à pression ambiante)

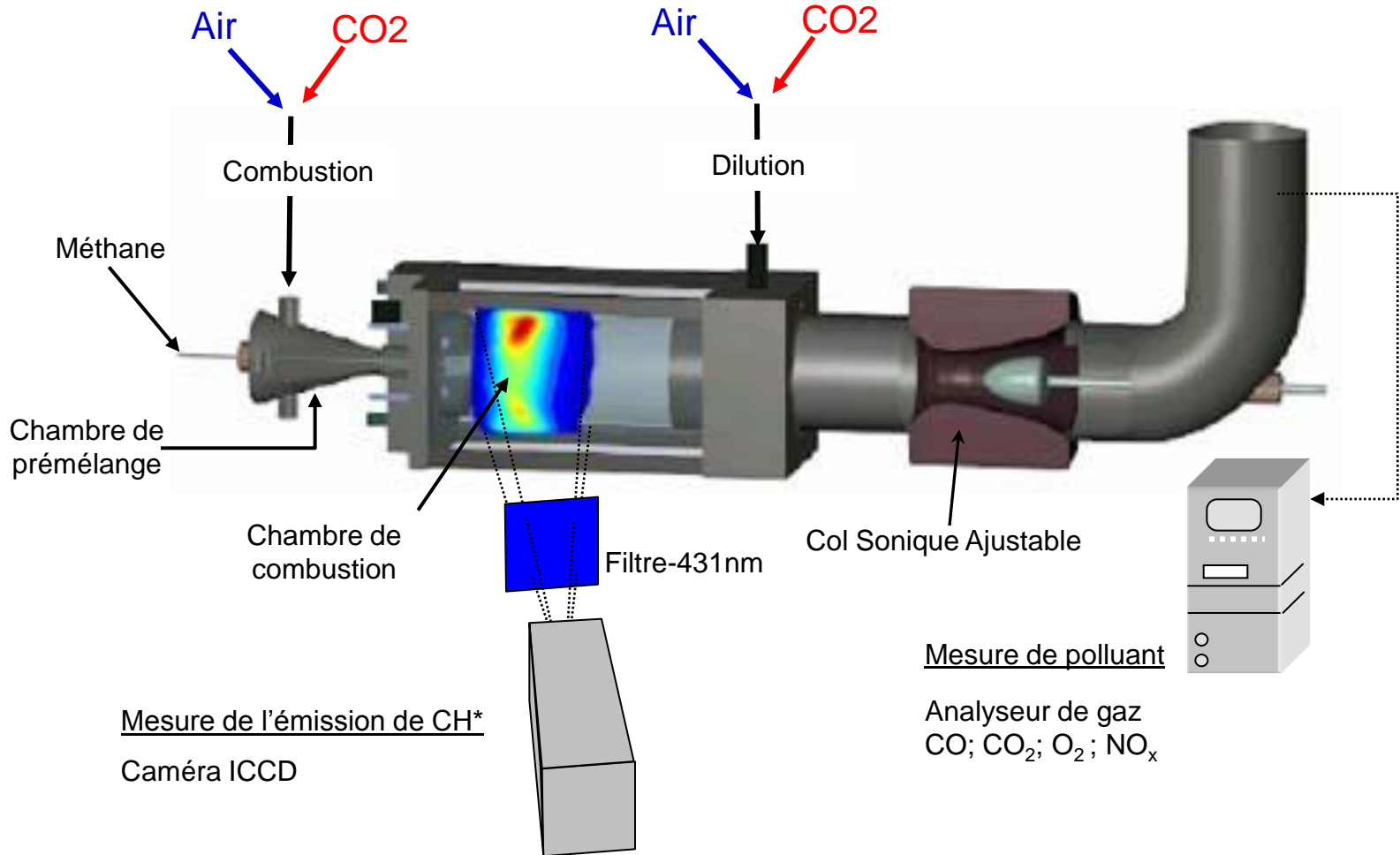
T=20,100, 200 et 300 C

- 3<sup>ème</sup> année      Effet de la pression (à pression ambiante)

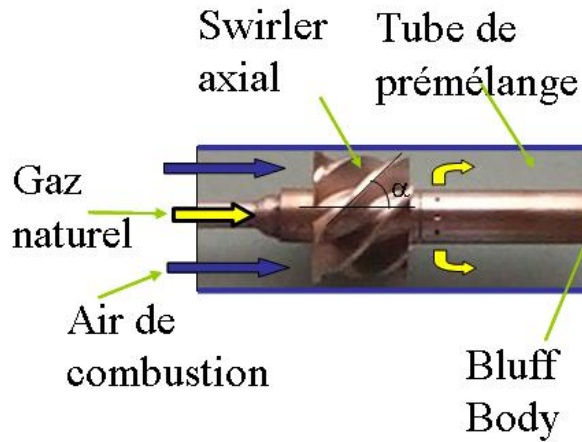
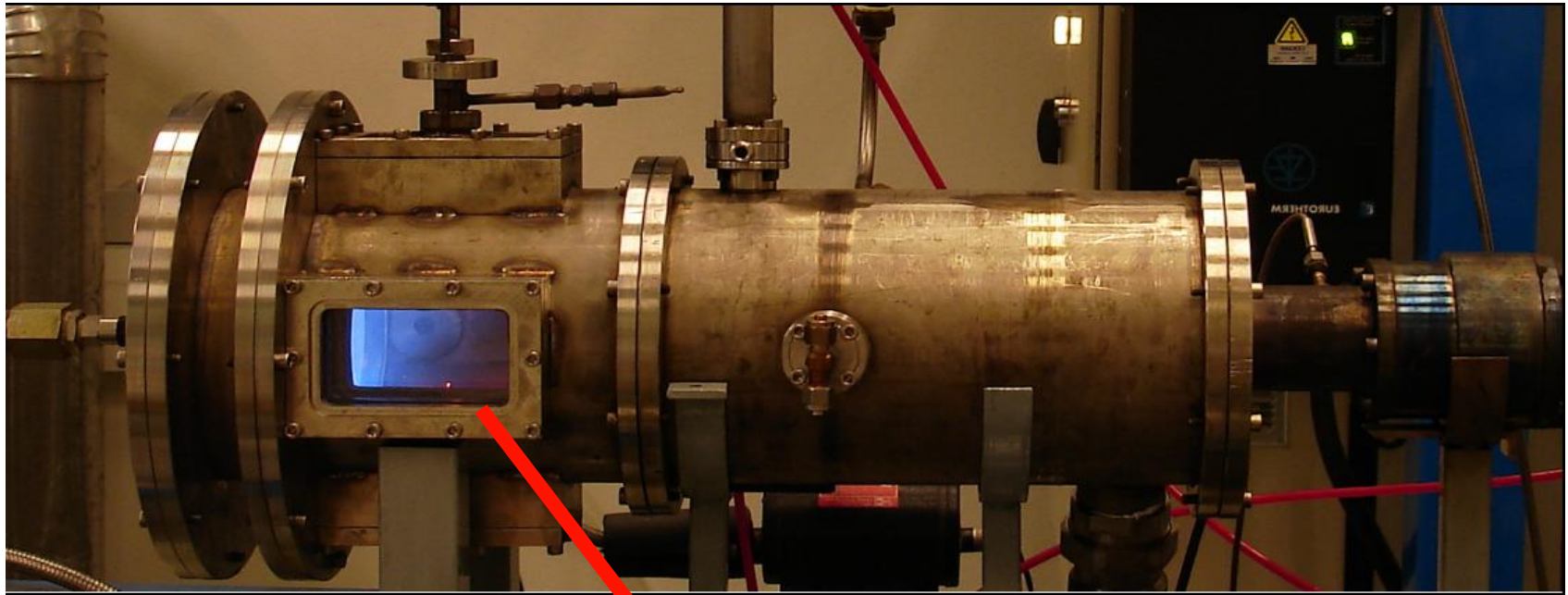
P = 1, 2, 3 et 4 atm.



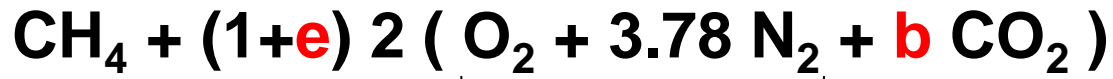
## Matériel mis en œuvre pour l'étude COCASE



## Matériel mis en œuvre pour l'étude COCASE



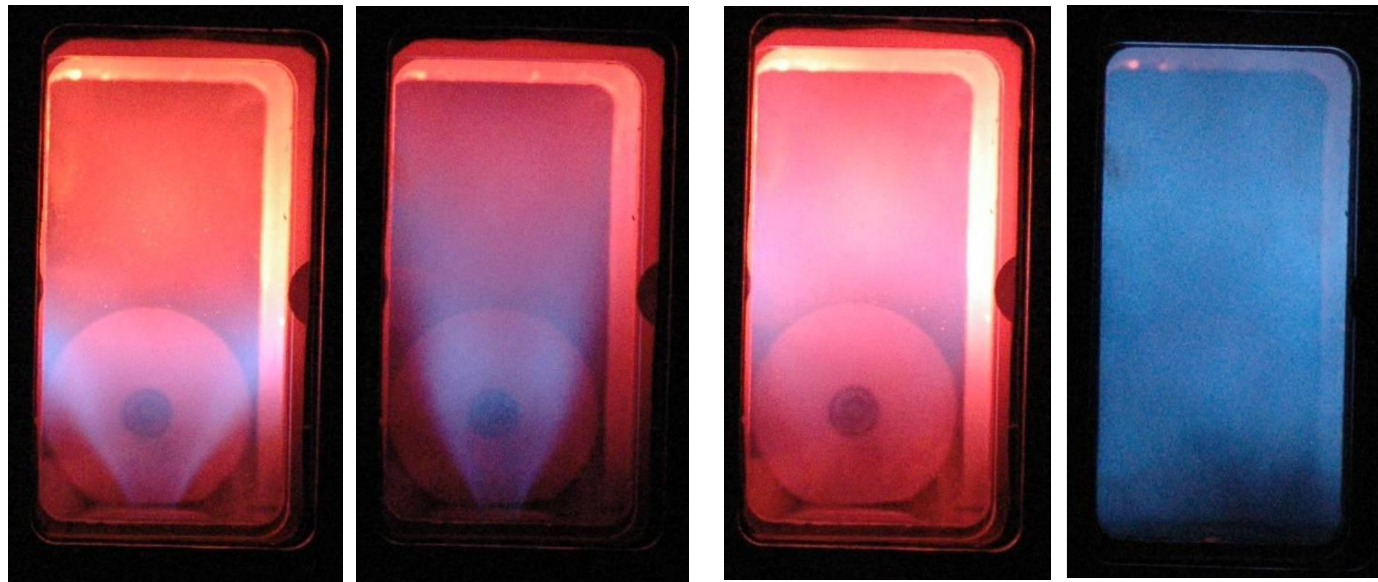
Evolution de la structure de la flamme en fonction de la quantité de CO<sub>2</sub> injectée



Air

**b = 0**

**b = max**



Flamme accrochée

Flamme soulevée

Extinction

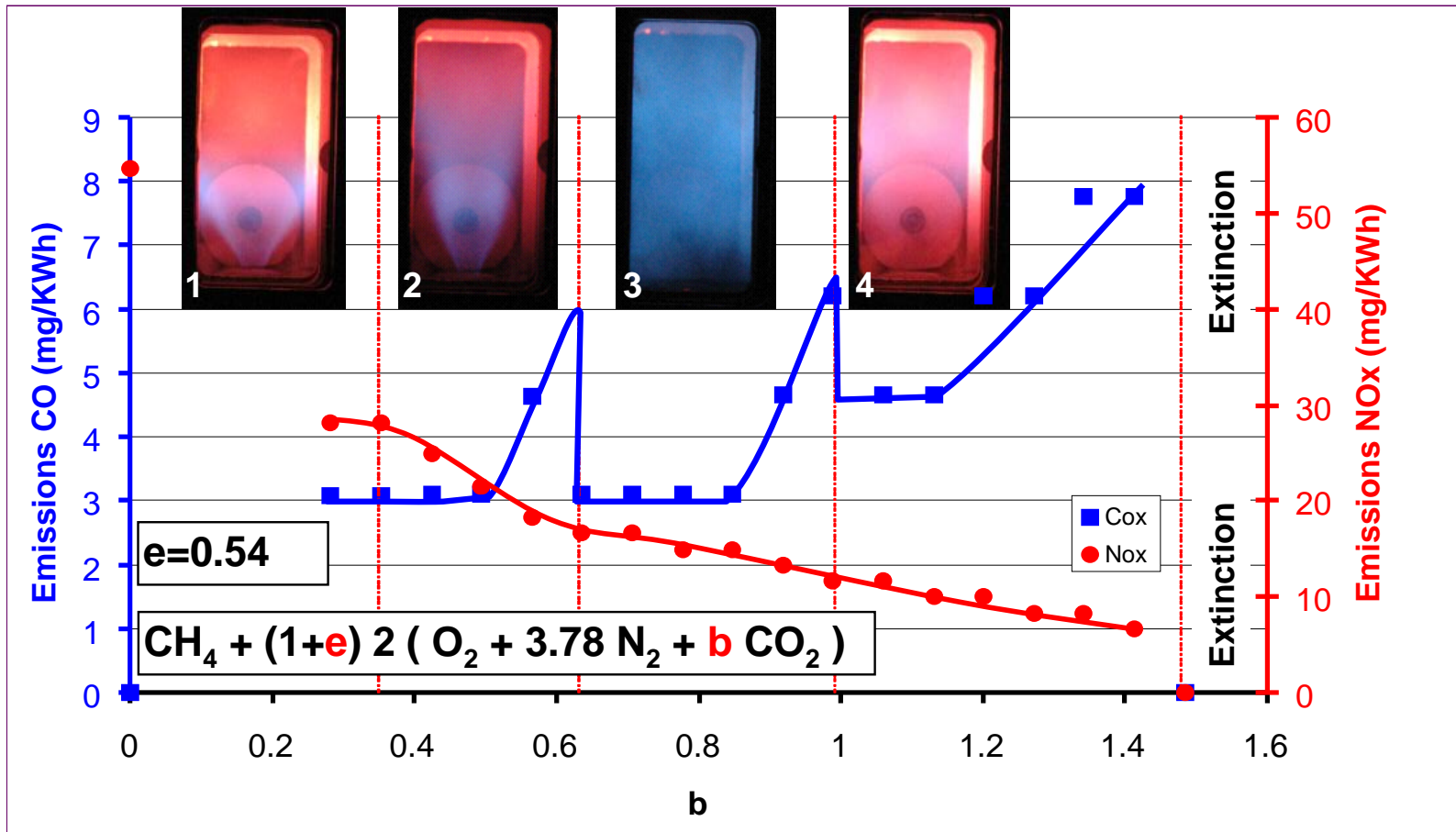
Extinction

à excès d'air  
constant



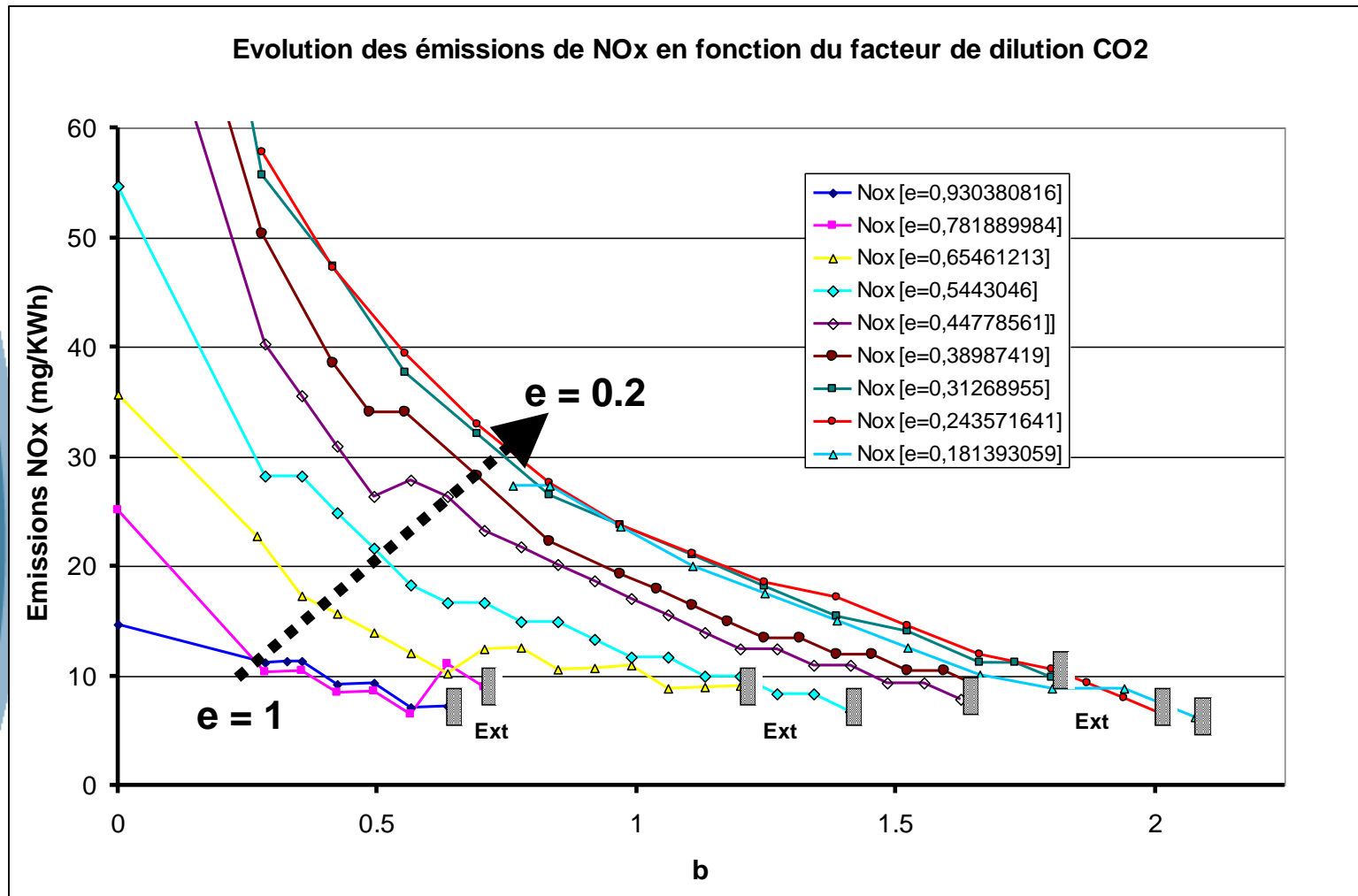
Evolution de la structure de la flamme et des émissions de CO et de NOx en fonction du facteur de dilution en CO<sub>2</sub> (b)

Excès d'air constant

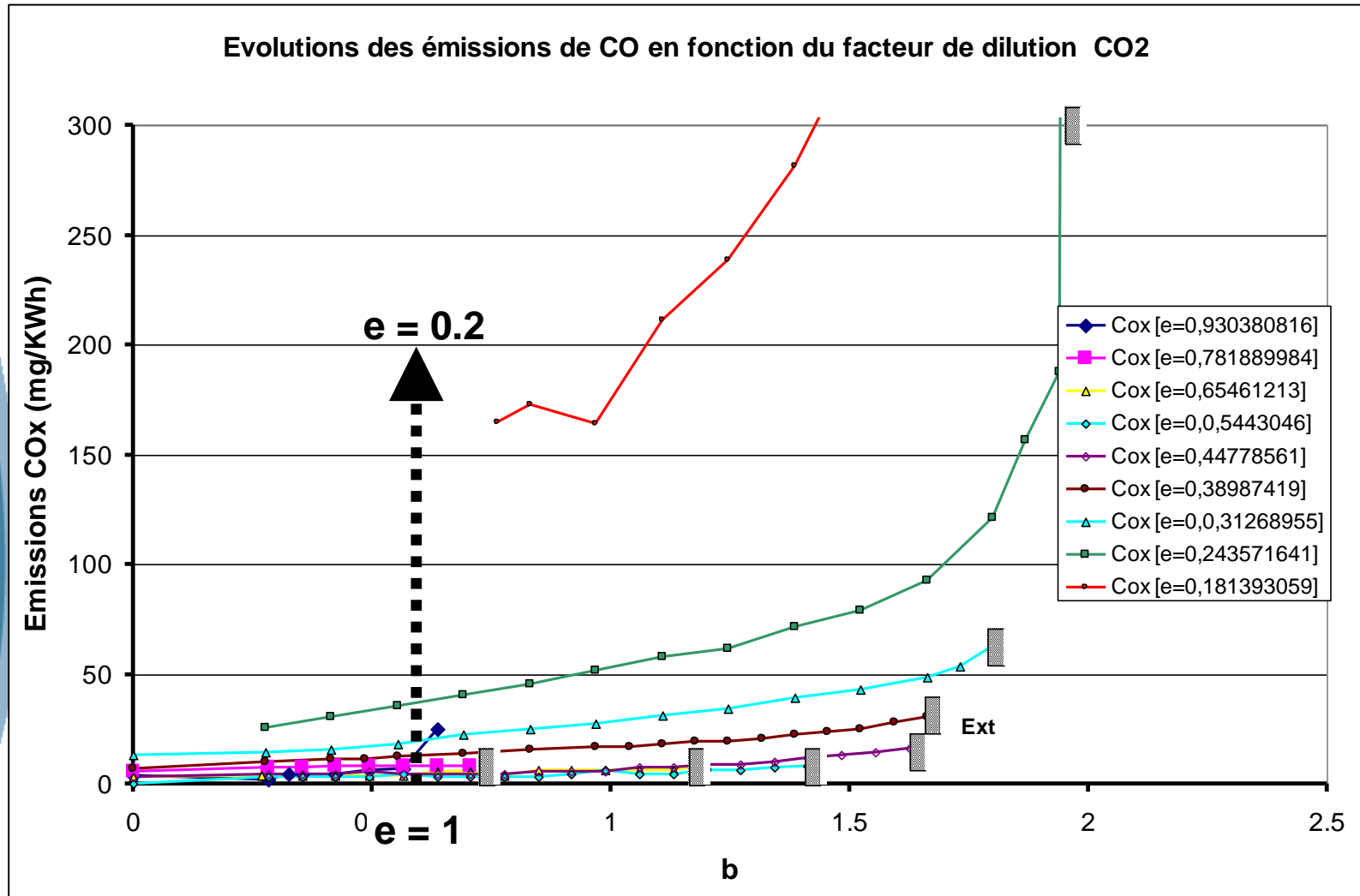




Evolution des émissions de NOx en fonction du facteur de dilution en CO<sub>2</sub> (**b**) et de l'excès d'air (**e**)



Evolution des émissions de CO en fonction du facteur de dilution en CO<sub>2</sub> (**b**) et de l'excès d'air (**e**)



# COCASE

CONCLUSION : 1ère année

l'injection massive de  $\text{CO}_2$  dans la combustion prémélangée modifie fortement la structure de la flamme ( à forte dilution, l'accrochage de la flamme disparaît)

A richesse équivalente, l'injection de  $\text{CO}_2$  réduit les émissions de  $\text{NO}_x$ , Par contre pour des richesses proches de l'extinction pauvre, on obtient toujours les mêmes niveaux minimaux d' $\text{NO}_x$ .

En contrepartie les émissions de  $\text{CO}$  augmentent fortement

Il est donc nécessaire de continuer à analyser ce type de combustion en vue de dimensionner les chambres de combustion qui devront être adaptées à l'utilisation de la recirculation du  $\text{CO}_2$ .



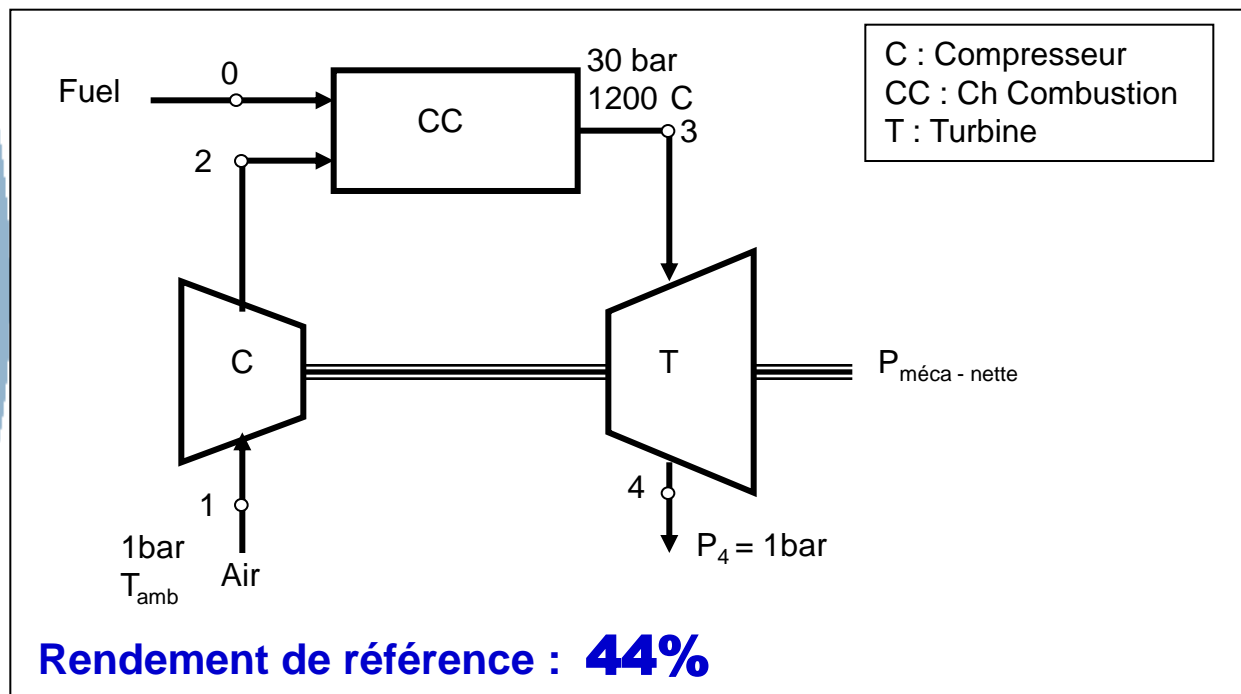
L'objectif de cette étude est chiffrer l'impact énergétique de la séparation membranaire post combustion en tenant compte des modifications techniques qu'on devra apporter à la turbine notamment pour la recirculation des produits de combustion.

On comparera à un cycle de turbine à gaz simple de référence.

## Cycle turbine de référence

$$P_3 = HP = 30\text{bar}, \quad P_1 = P_2 = P_{\text{atmo}}, \quad T_4 = 1200 \text{ C}$$

$$\eta_{\text{is-compresseur}} = 0.9, \quad \eta_{\text{is-turbine}} = 0.9, \quad \Delta P_{\text{Ch Comb}} = 5\%$$



**Modélisation à l'aide de EES  
Engineering Equation Solver  
Université du Wisconsin**

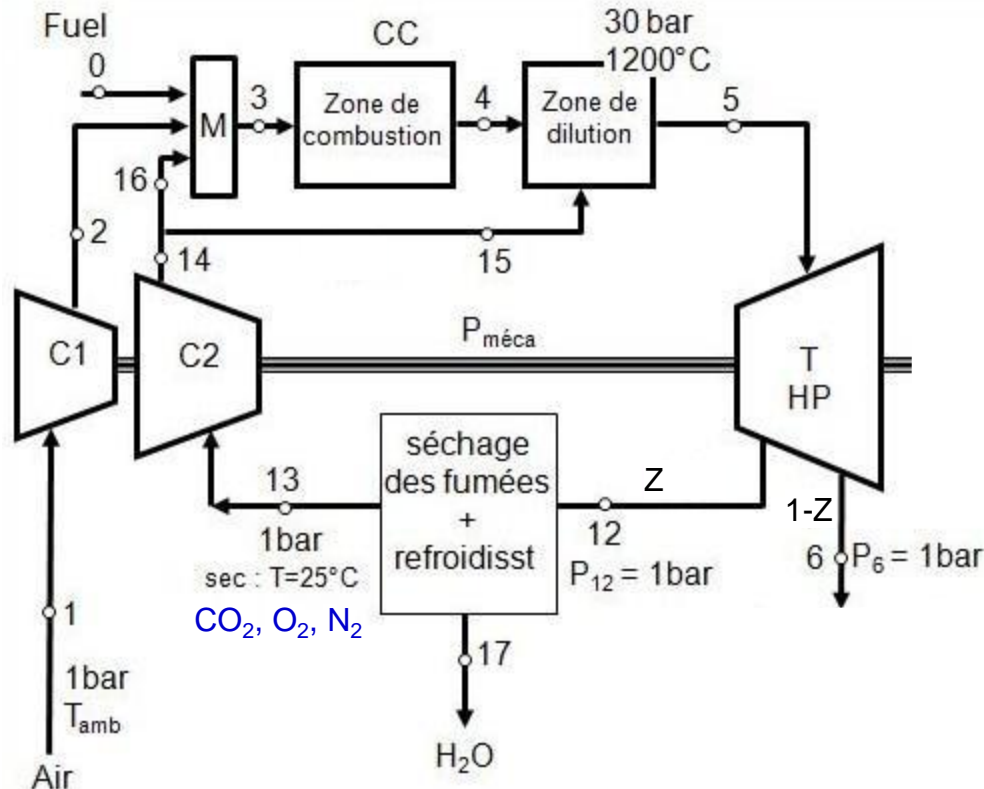
- Solveur d'équation
- Propriétés thermodynamiques des fluides réels



## Cycle turbine + recyclage des produits de combustion

$$: P_3 = HP = 30\text{bar}, P_1 = P_2 = P_{\text{atmo}}, T_4 = 1200\text{ C}$$

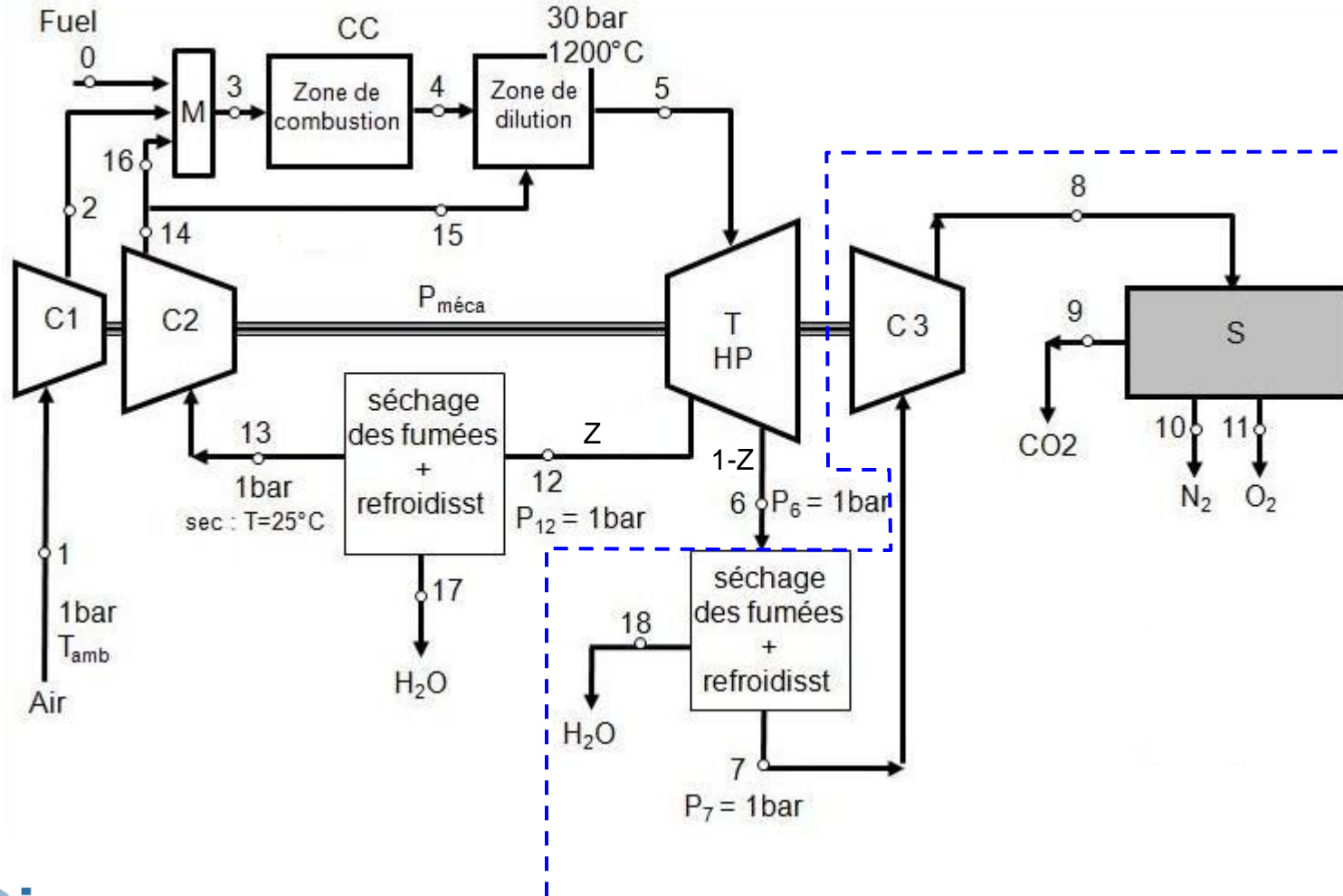
$$\eta_{\text{is-compresseur}} = 0.9, \quad \eta_{\text{is-turbine}} = 0.9, \quad \Delta P_{\text{Ch Comb}} = 5\%$$



Cycle turbine réaliste + recyclage + recompression - capture CO<sub>2</sub>(idéal)

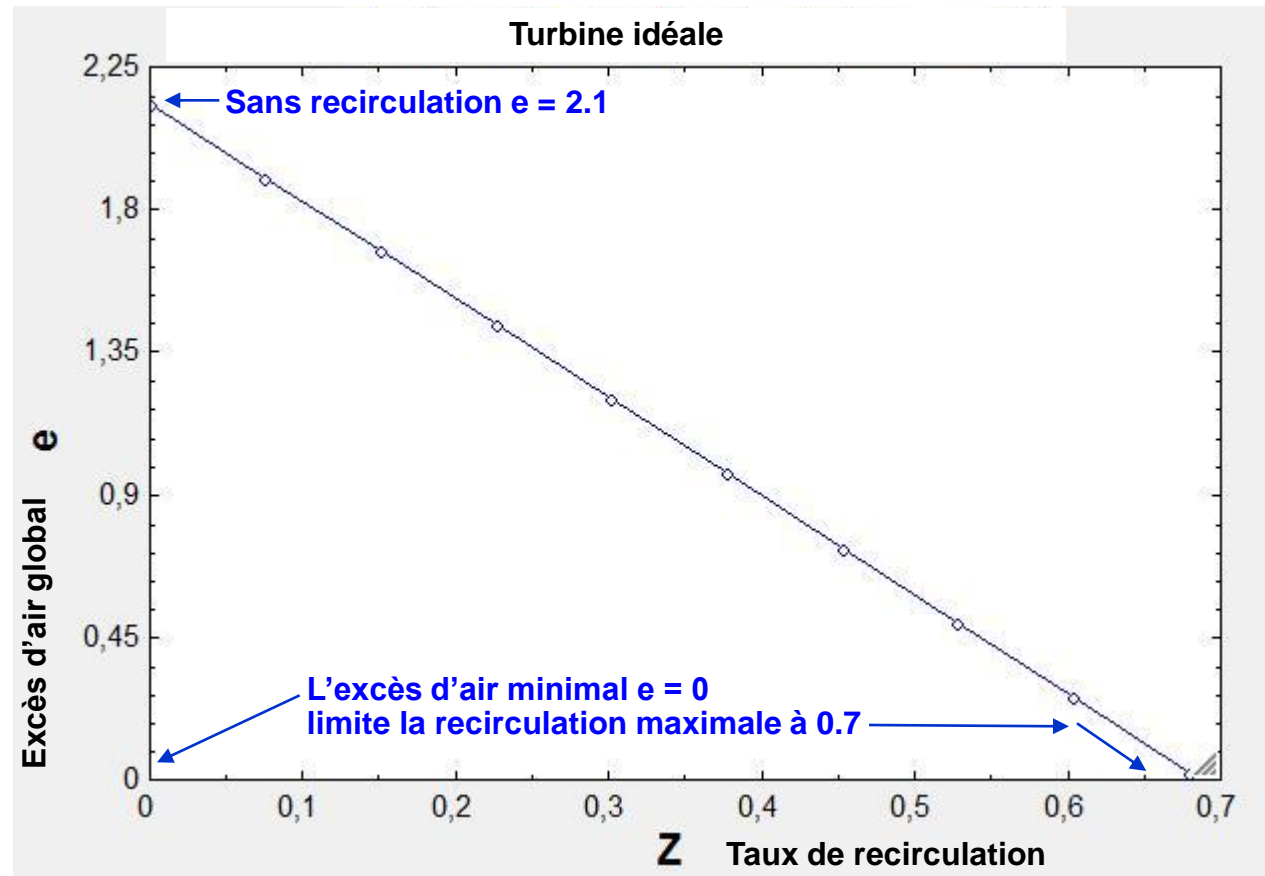
$$: P_3 = HP = 30\text{bar}, P_1 = P_2 = P_{\text{atmo}}, T_4 = 1200\text{ C}$$

$$\eta_{\text{is-compresseur}} = 0.9, \quad \eta_{\text{is-turbine}} = 0.9, \quad \Delta P_{\text{Ch Comb}} = 5\%$$

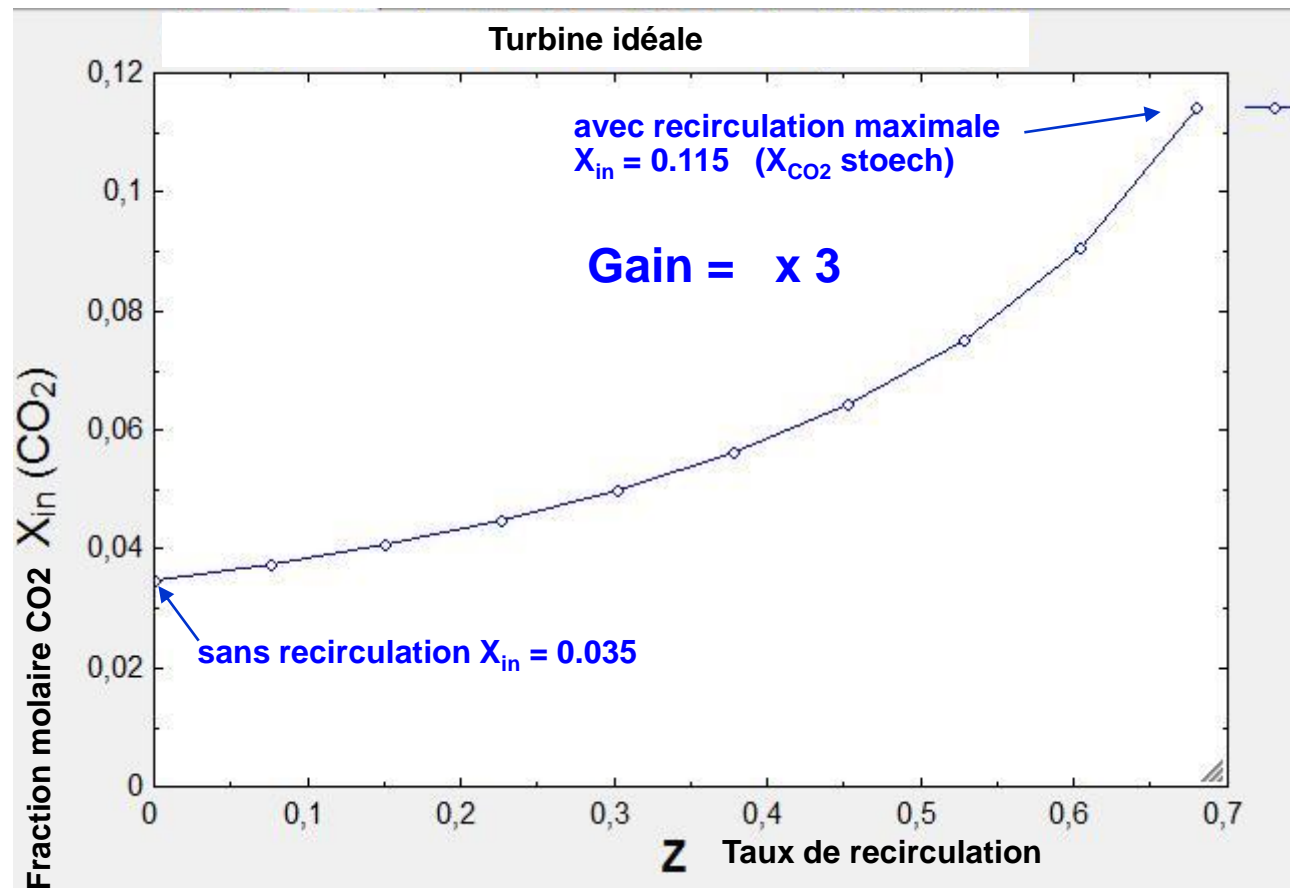


Impact du taux de recirculation Z sur l'excès d'air global de combustion

*Contrainte: maintenir 1200 C en sortie Chambre Combustion*

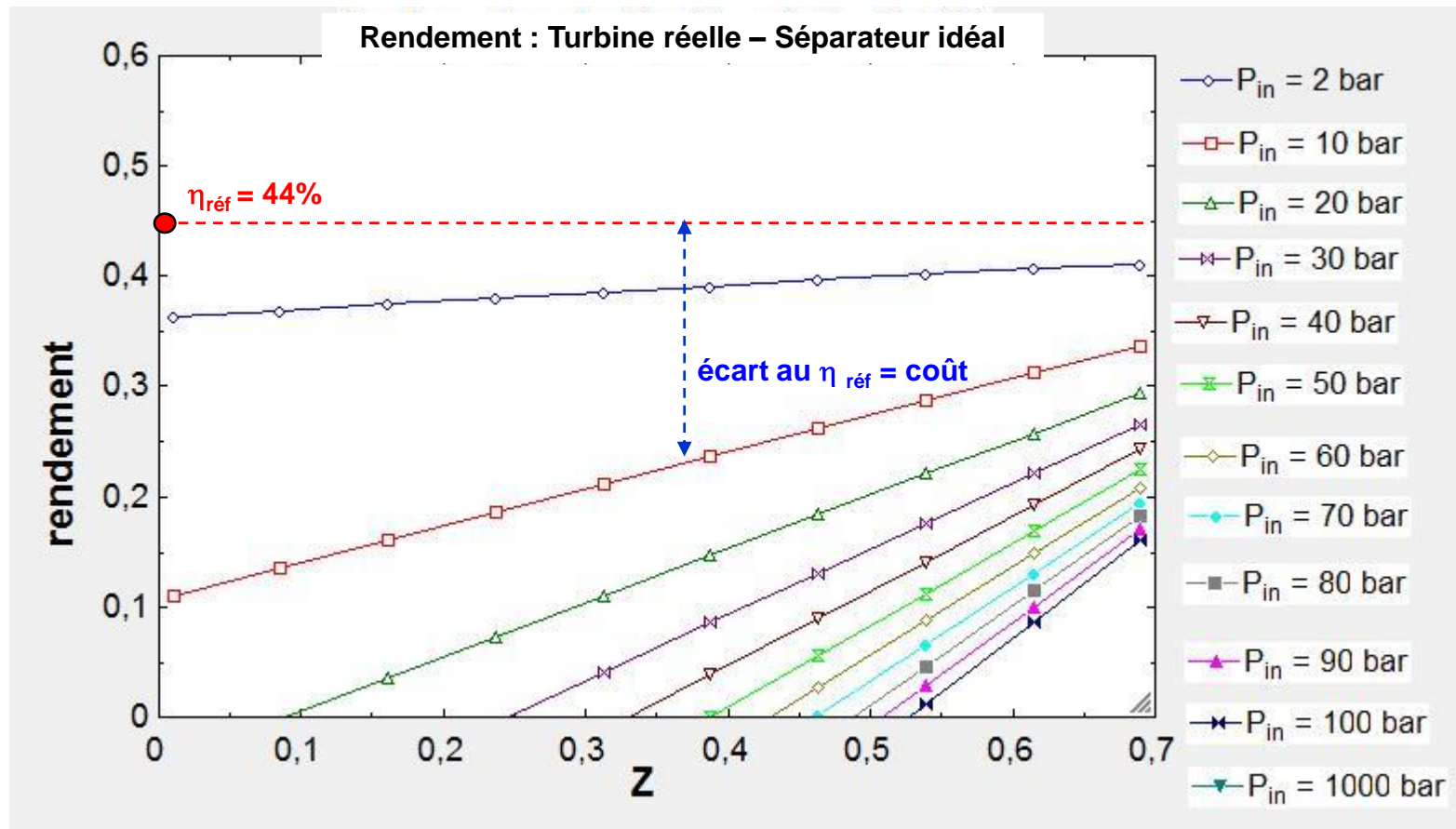


Impact du taux de recirculation Z sur la fraction molaire de CO<sub>2</sub> à l'entrée du séparateur





Impact du taux de recirculation  $Z$  et de la pression  $P_{in}$  en entrée du séparateur sur le rendement

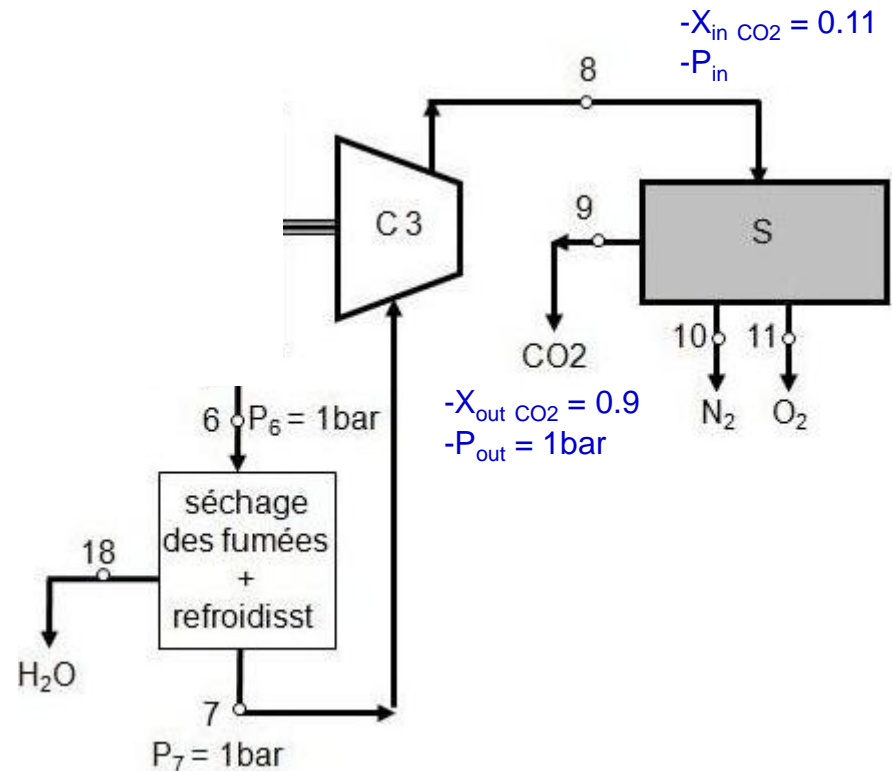


## Taux de récupération de la membrane

*Intégration des résultats du LSGC (UPR 6811)*

$X_{in} = 0.11$  maximale avec taux de recirculation maximale (0.7)

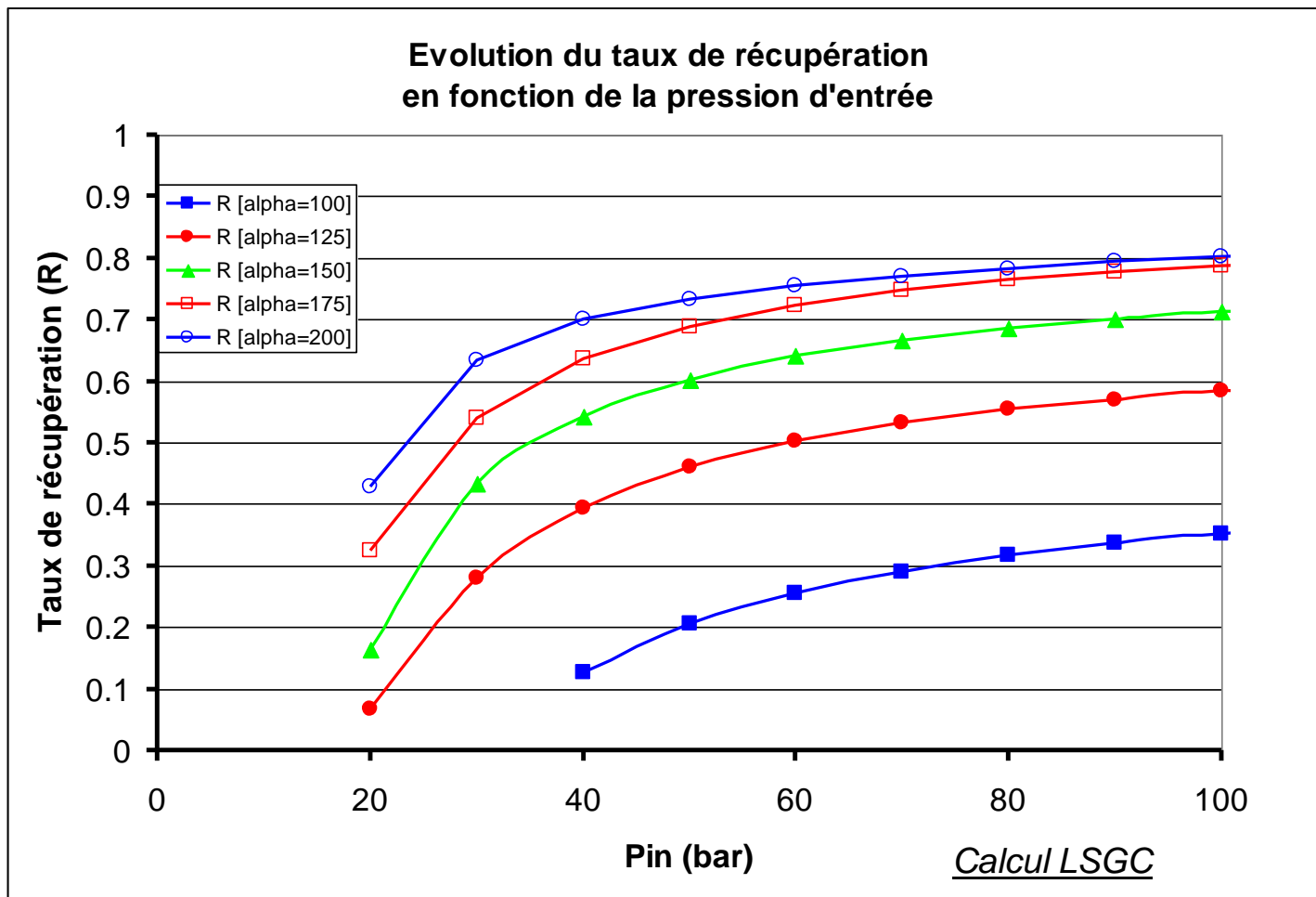
$X_{out} = 0.9$



Taux de récupération de la membrane  
en fonction de la sélectivité de la membrane et de la pression  $P_{in}$  (entrée membrane)

$X_{in} = 0.11$  maximale avec taux de recirculation maximale (0.7)

$X_{out} = 0.9$



# Impact énergétique de la récupération du CO<sub>2</sub>

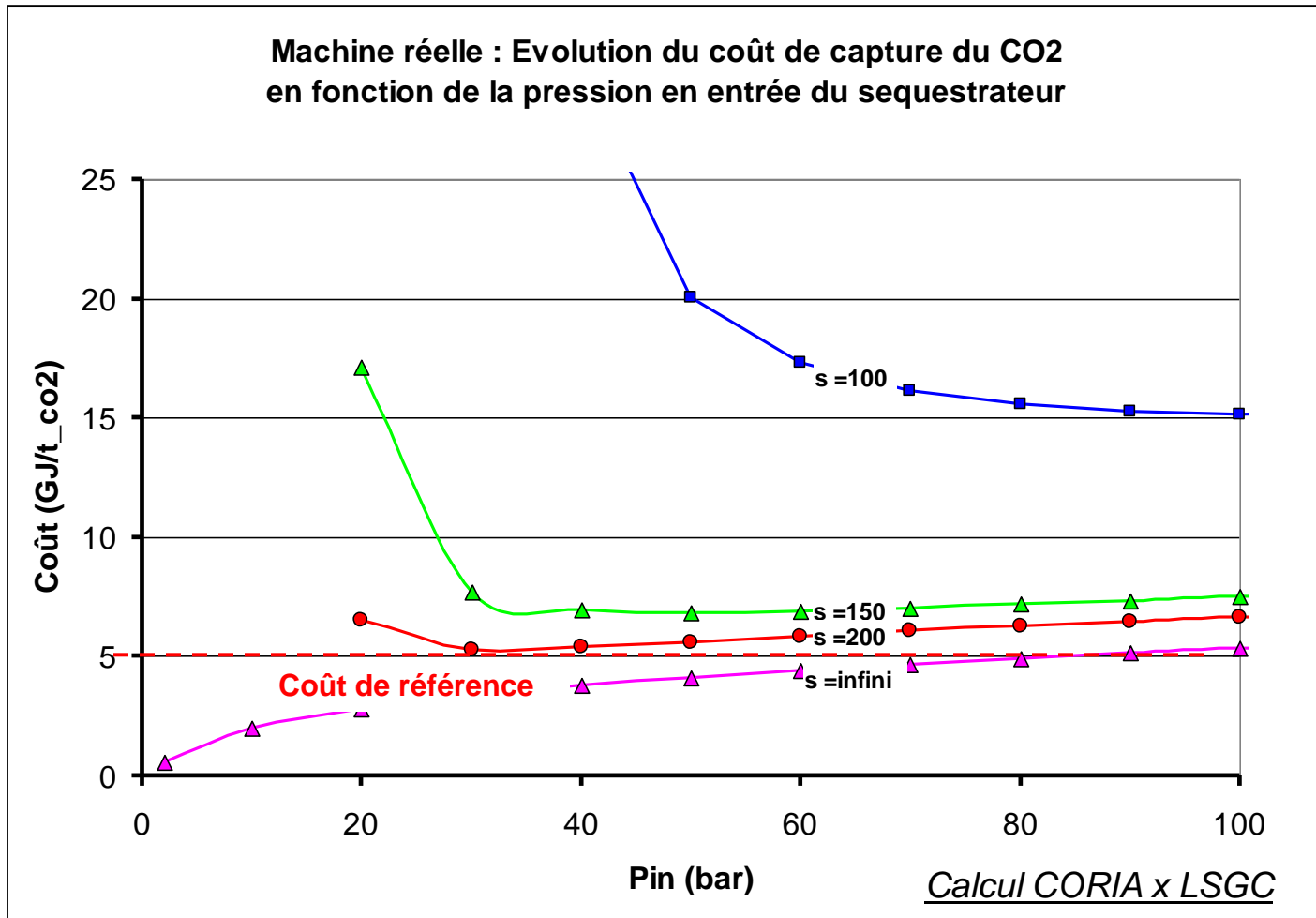
## Modélisation Cycle Turbine

COCASE

Coût de récupération de la membrane en fonction de la sélectivité de la membrane et de la pression  $P_{in}$  (entrée membrane)

$X_{in} = 0.11$  maximale avec taux de recirculation maximale (0.7)

$X_{out} = 0.9$



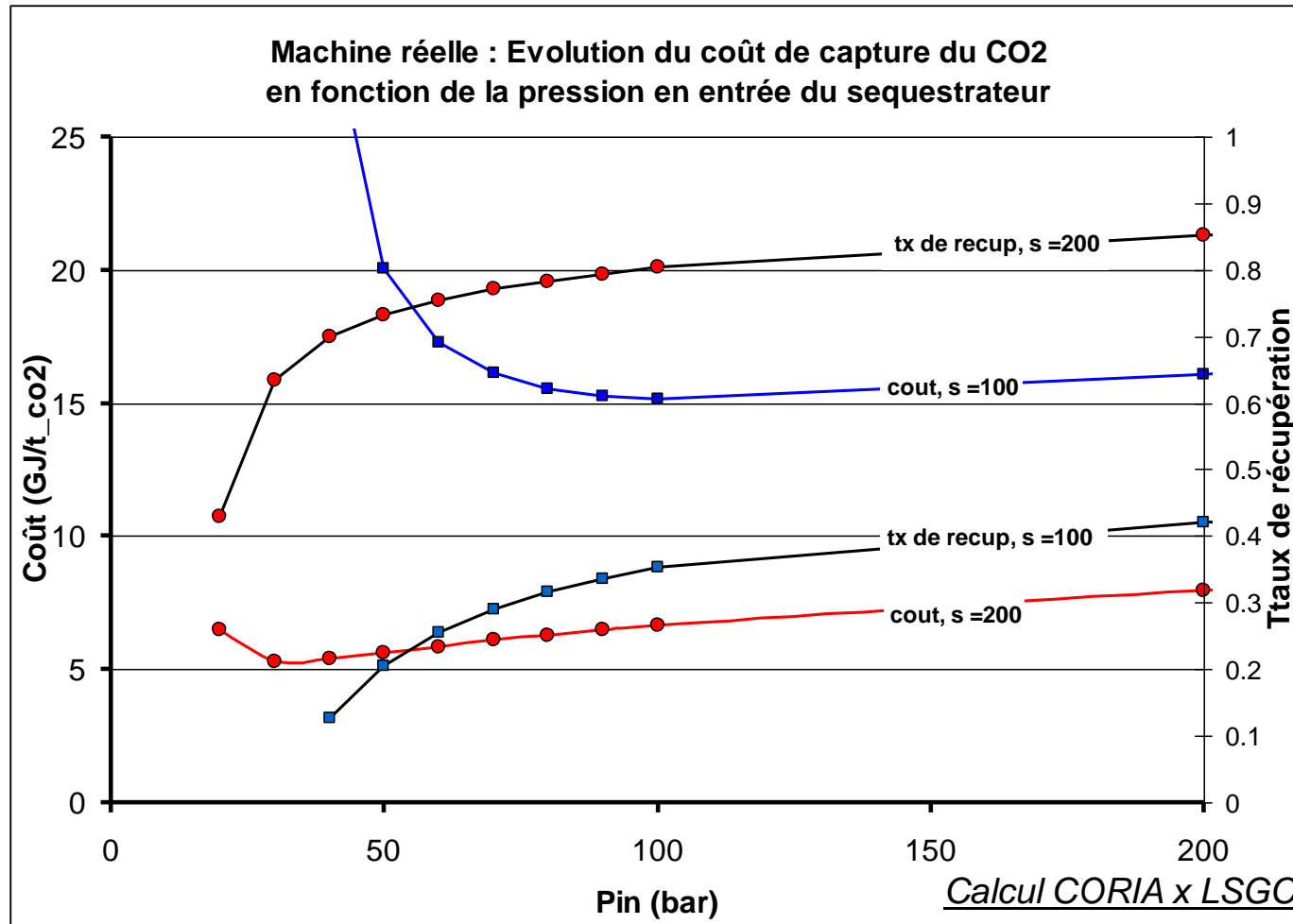
# Impact énergétique de la récupération du CO<sub>2</sub>

## Modélisation Cycle Turbine

Coût de récupération de la membrane en fonction de la sélectivité de la membrane et de la pression Pin (entrée membrane)

Xin = 0.11 maximale avec taux de recirculation maximale (0.7)

Xout = 0.9



Conclusions:

**Coût:**

L'augmentation de la pression  $P_{in}$  à l'entrée du séparateur membranaire fait augmenter le taux de récupération en CO<sub>2</sub> mais fait chuter le rendement de l'installation et donc fait augmenter les coût de capture CO<sub>2</sub>.

A l'inverse l'augmentation du taux de recirculation permet de réduire les coûts de capture CO<sub>2</sub>

Pour des conditions réalistes :

$$X_{in} = 0.11 \quad (\text{max})$$

$$S_{\text{membrane}} = 100 \quad (\text{max})$$

$$P_{in} < 100 \text{ bar} \quad (\text{max})$$

Il semble non réaliste de vouloir récupérer plus de 40% du CO<sub>2</sub> et ceci pour un coût non acceptable 15 GJ/T

Perspectives:

brûler avec de l'air suroxygénée en tenant compte de son coût de production

