



# Modélisation d'un incinérateur de boues en lit fluidisé en vue de la maîtrise des émissions de NOx

Soutenance de Thèse

*Shi Li*

## JURY

M. Jean-Philippe CASSAR  
M. Gilles TRYSTRAM  
M. Sami OTHMAN  
M. Alain BARRAUD  
Mme Catherine CADET  
M. Pierre-Xavier THIVEL

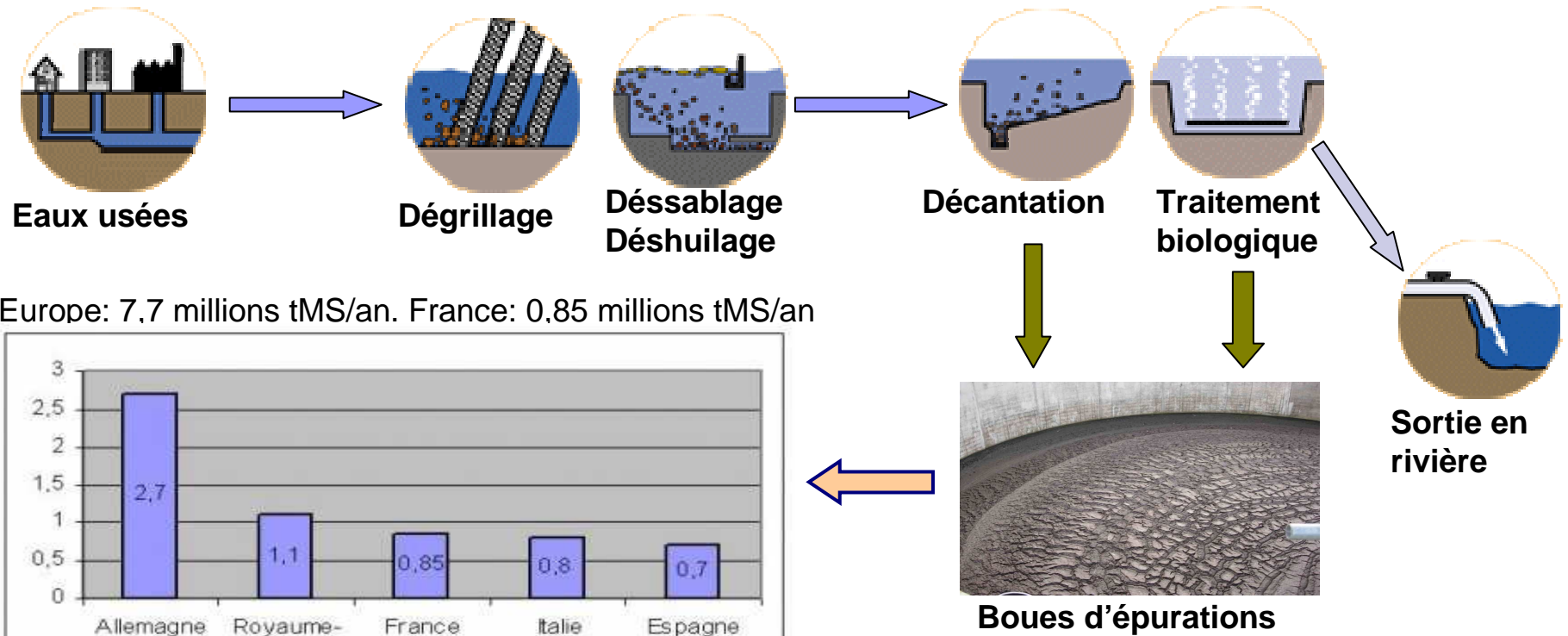
Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Directeur  
Co-encadrant  
Examineur

**Collaboration avec le LEPMI**  
(Laboratoire d'électrochimie et de physico-chimie des matériaux et des Interfaces)

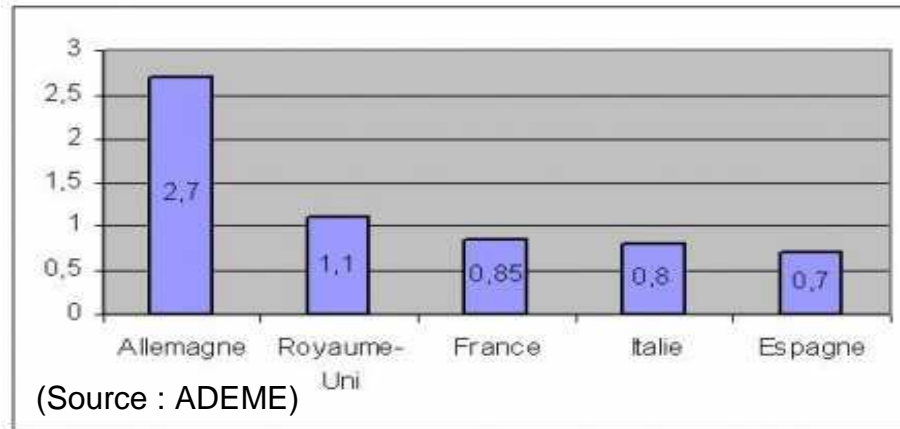
## Plan de l'exposé

- I. Contexte et objectif
- II. Proposition d'un modèle d'incinérateur en lit fluidisé
- III. Validation du modèle avec des données industrielles
- IV. Proposition d'une stratégie de commande
- V. Conclusion et perspectives

# Les boues d'épurations: formation et élimination



Europe: 7.7 millions tMS/an. France: 0.85 millions tMS/an



- Elimination des boues en France:**
- Épandage agricole (50~60%)
  - Mise en décharge (20~25%)
  - Incinération (15~20%)**
  - Autres: pyrolyse, gazéification, ...
- Pollution du sol (métaux lourds)**  
**Interdit après 2015**  
**Pollution atmosphérique, plus coûteux**

# Incinération de boues en lit fluidisé

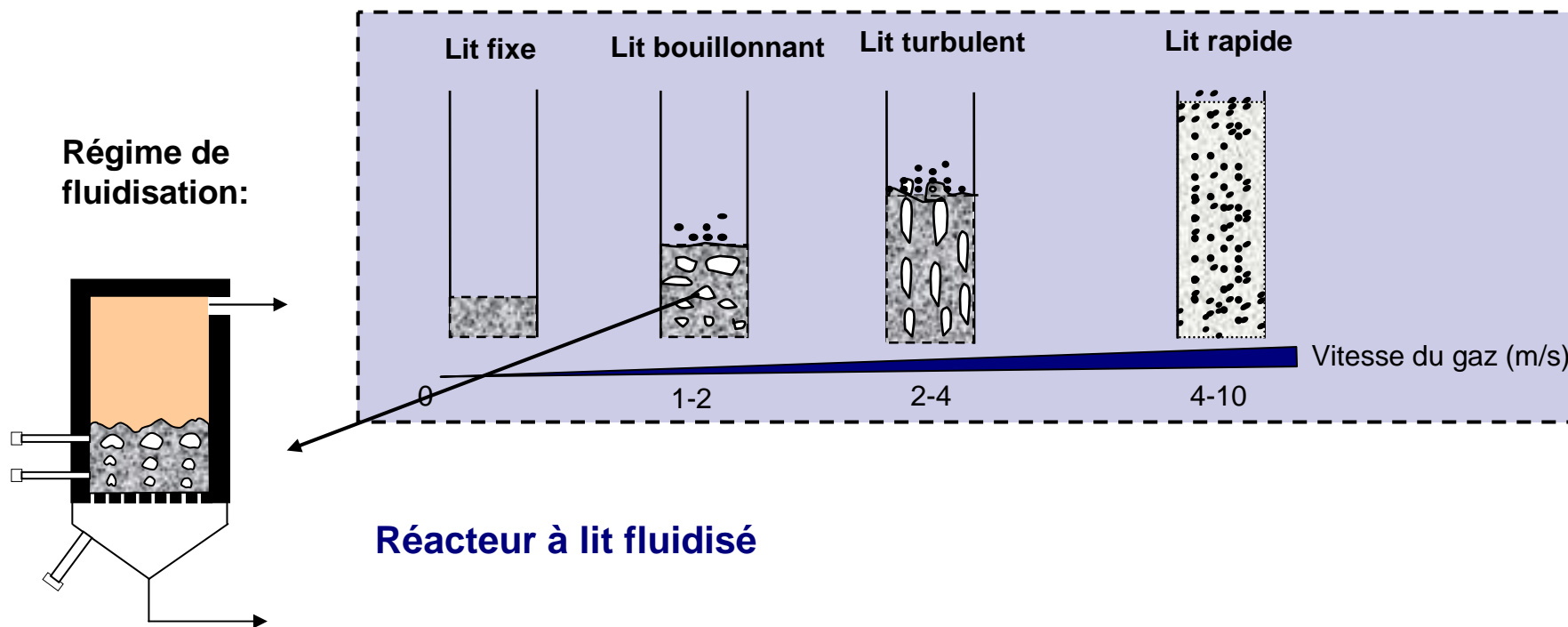


Incinérateur

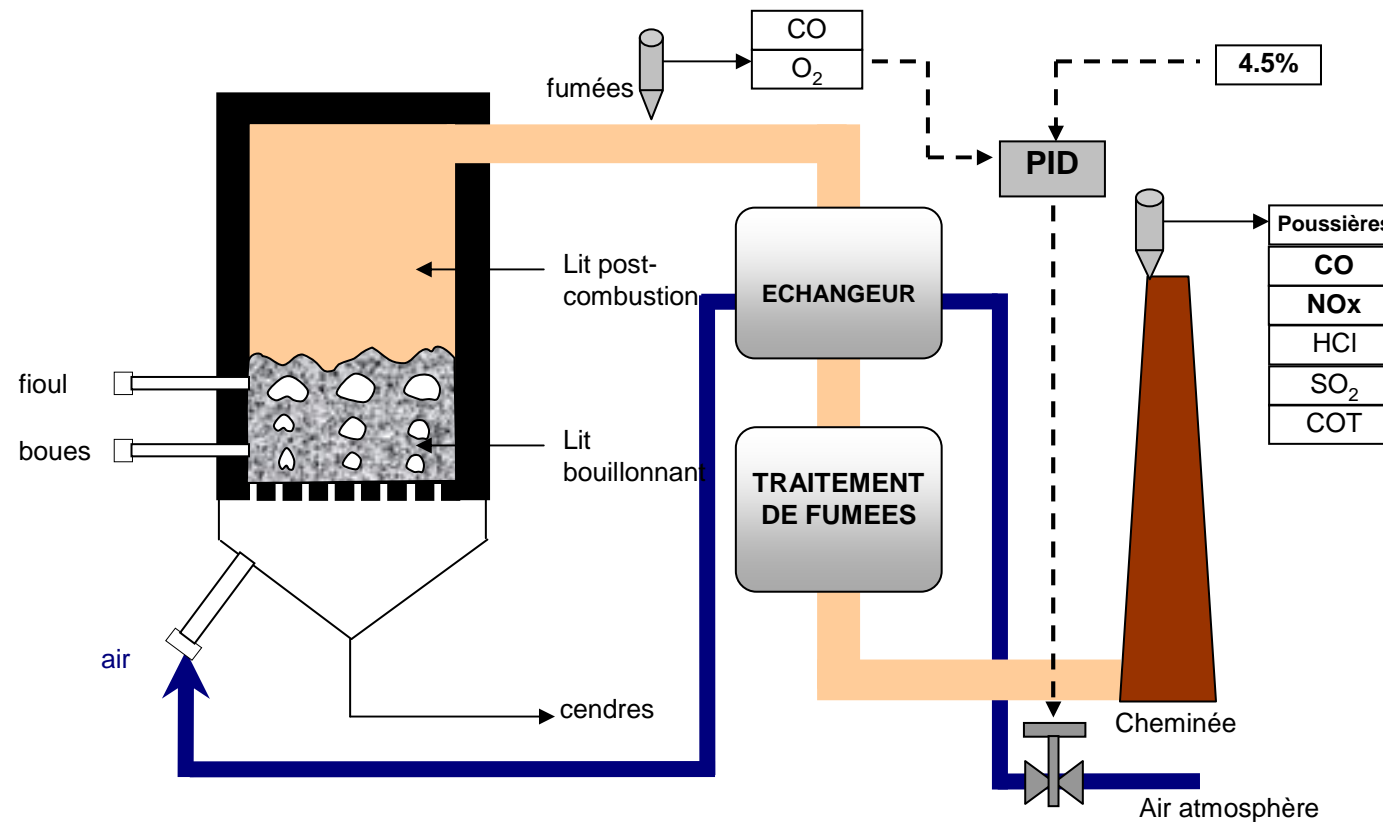
Mono-incinération: ~25% de MS

Co-incinération (charbon, déchets, cimenterie):  
>90% de MS

Technique: lit fluidisé

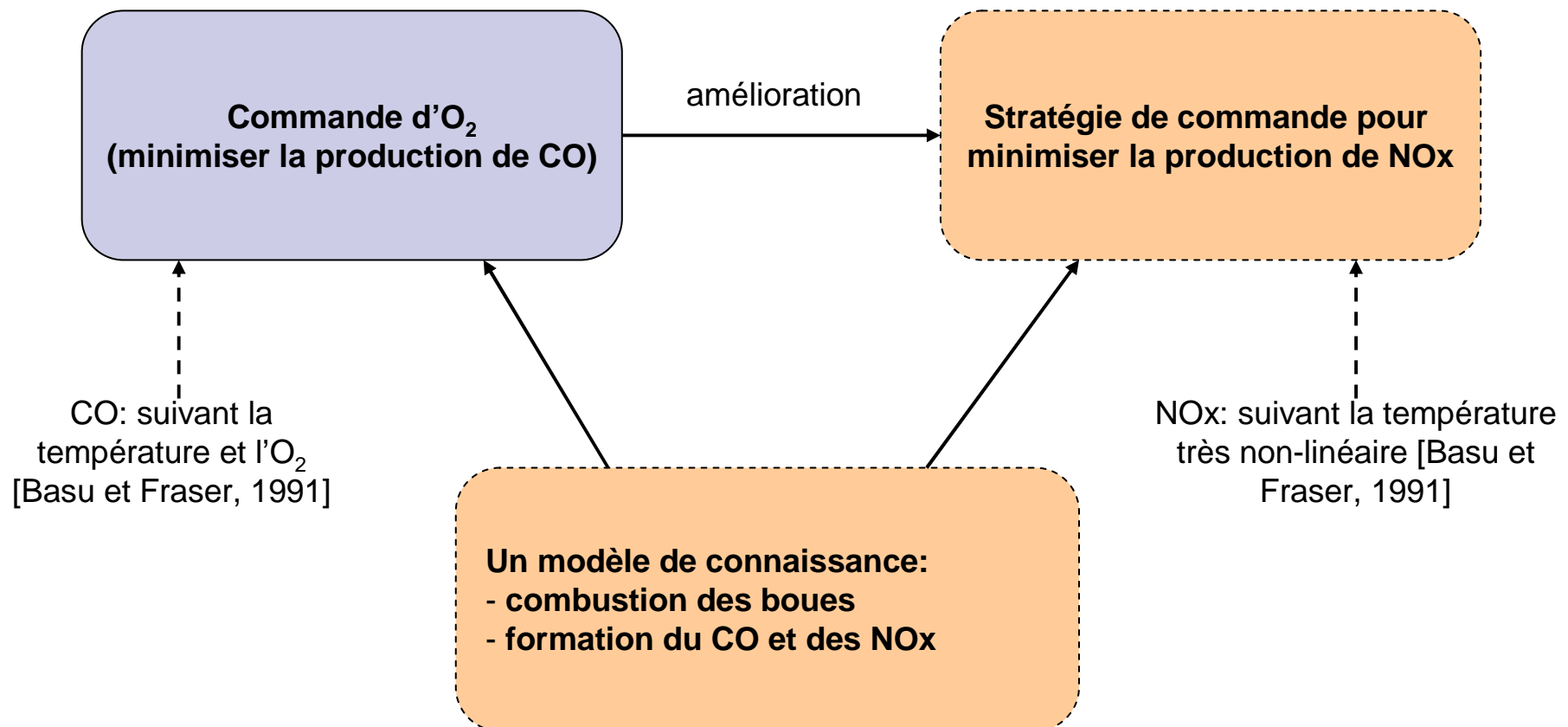


# Problématique de fonctionnement d'une unité d'incinération de boues en lit fluidisé



- CO: limité par la régulation d'O<sub>2</sub>**
- NOx: quantité importante (formation issue des Boues-N)**
- Variations en composition des boues: non mesurables en ligne**

## Objectif



## Plan de l'exposé

I. Contexte et objectif

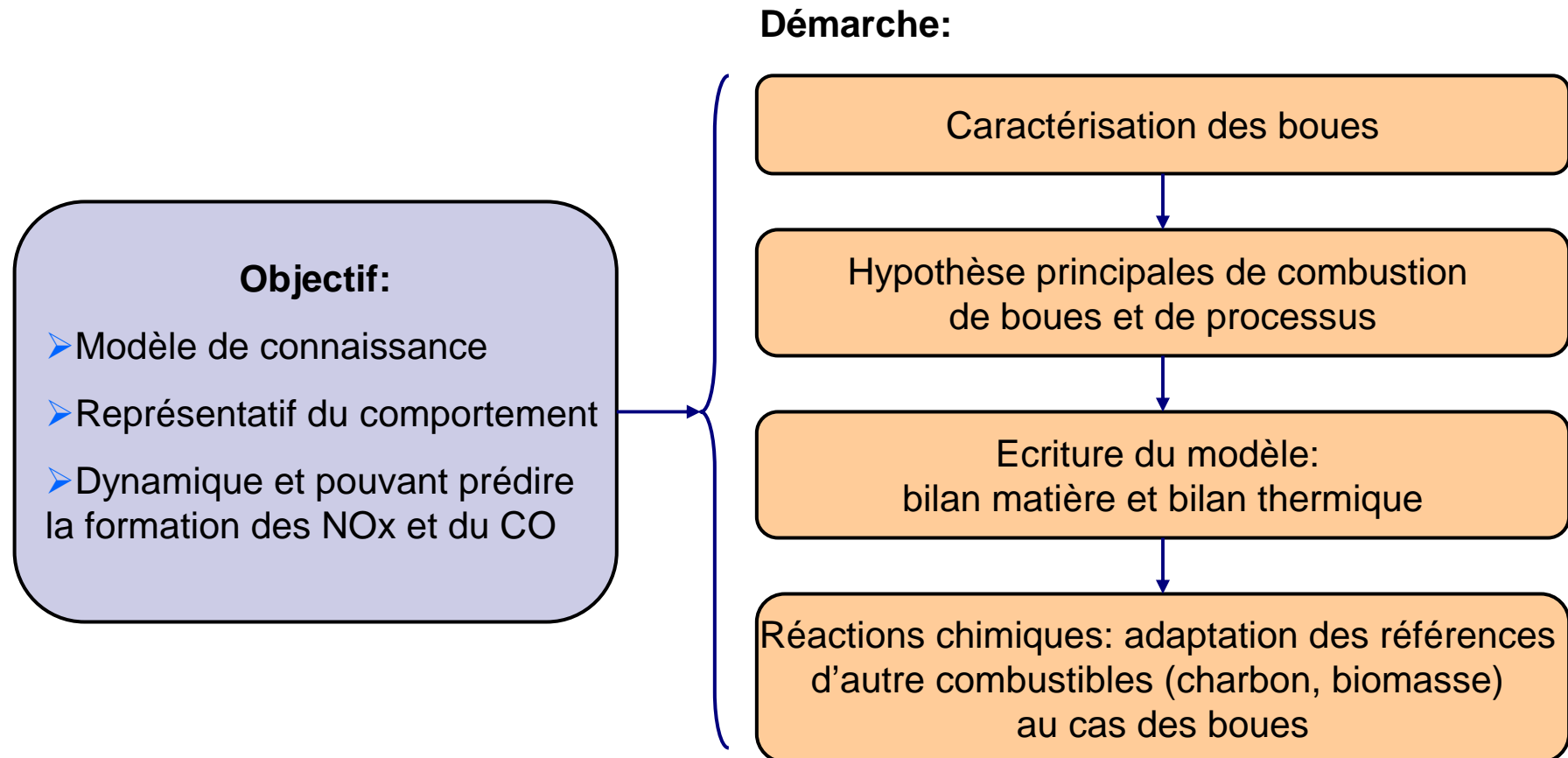
**II. Proposition d'un modèle d'incinérateur en lit fluidisé**

III. Validation du modèle avec des données industrielles

IV. Proposition d'une stratégie de commande

V. Conclusion et perspectives

## Objectif et démarche de modélisation

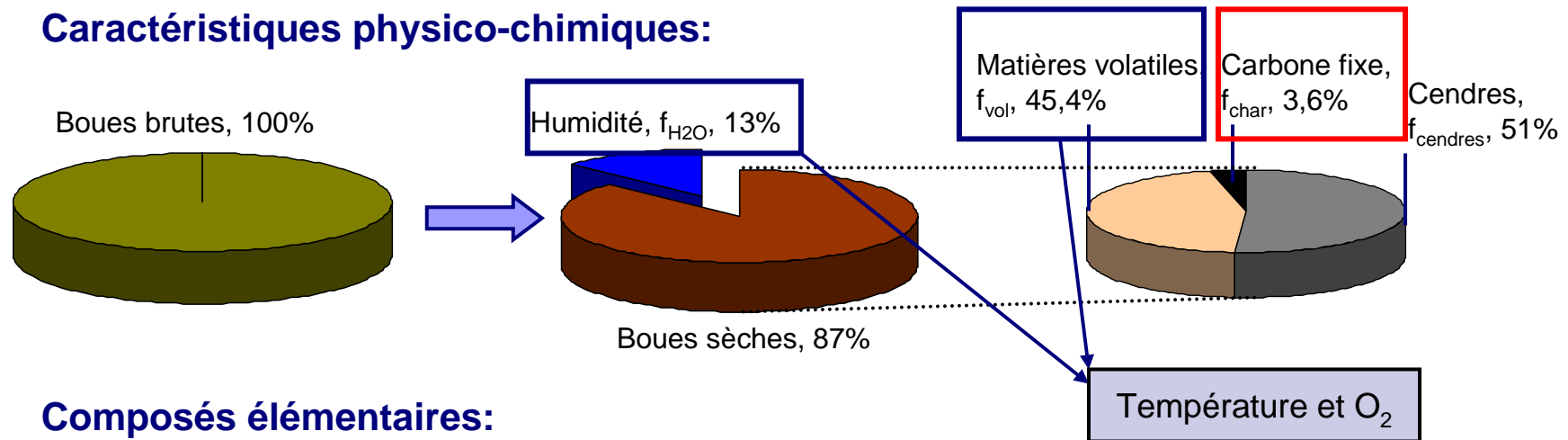




# Caractéristiques et composition des boues

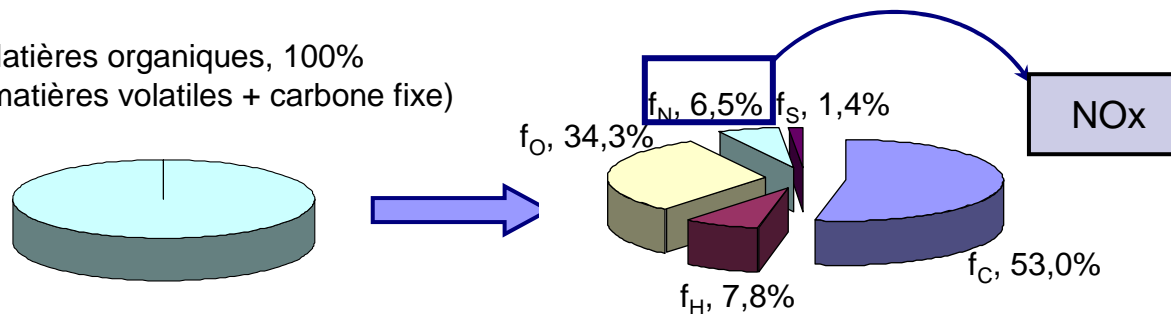
[Werther et Ogada, 1999]: boues sèches

## Caractéristiques physico-chimiques:



## Composés élémentaires:

Matières organiques, 100%  
(matières volatiles + carbone fixe)

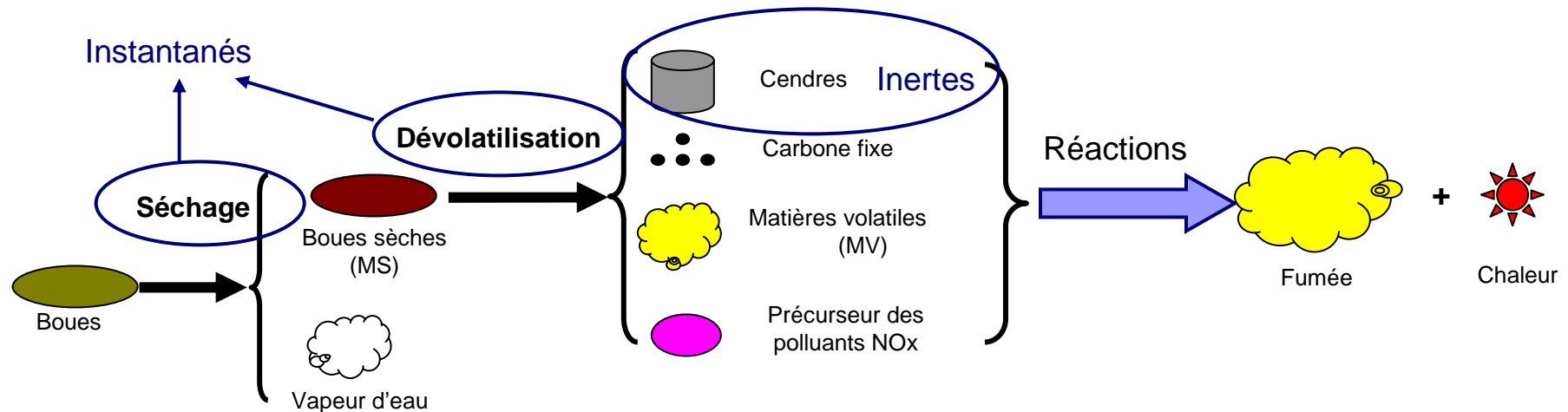


## Fractions importantes:

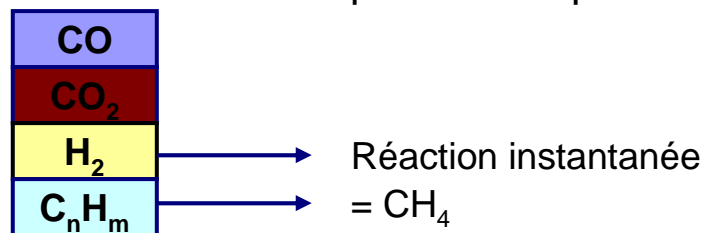


# Hypothèses principales pour la combustion de boues

## Combustion d'une particule de boue:

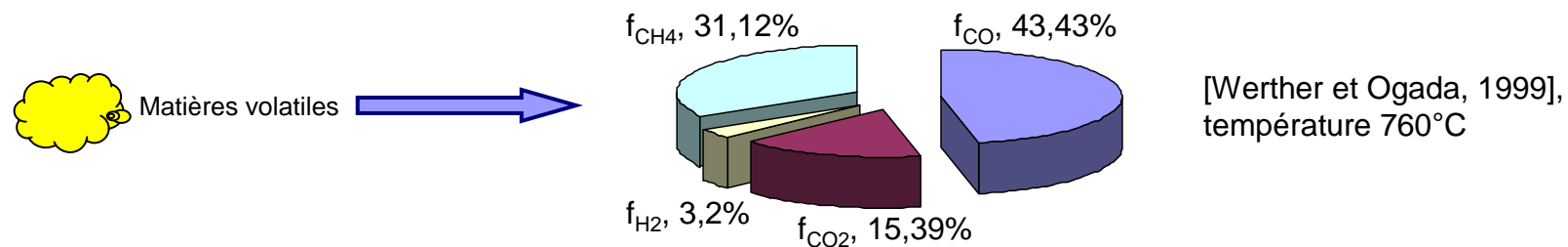


- Séchage et dévolatilisation sont instantanés et complets
- Pas de carbone fixe
- Les cendres sont chimiquement inertes
- Les matières volatiles sont constituées par les composés volatils gazeux:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ .

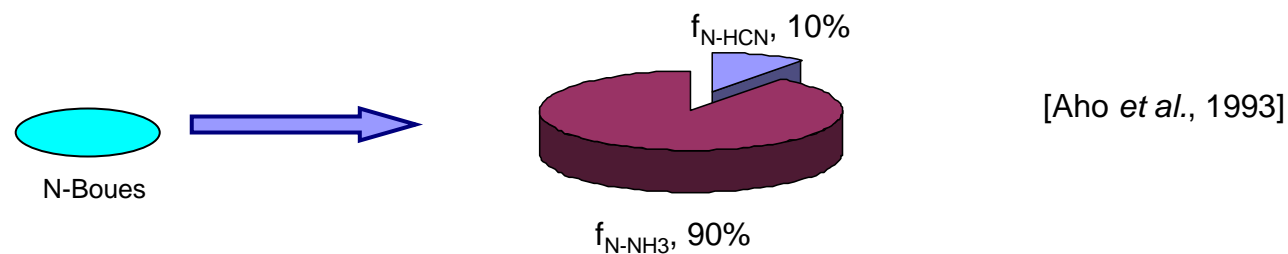


# Hypothèses pour les composés après la dévotatilisation des boues

## Composition des matières volatiles après la dévotatilisation:



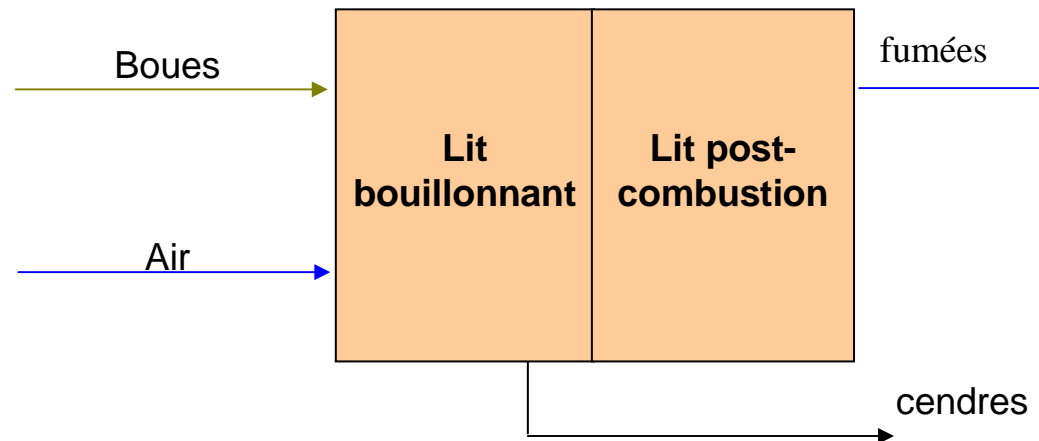
## Précurseur des NOx après la dévotatilisation:



HCN: acide cyanhydrique

NH3: ammoniac

## Hypothèses principales pour le processus



- Le lit bouillonnant et le lit post-combustion sont assimilés à deux réacteurs parfaitement agités (RPA)
- La pression dans le four est atmosphérique (101.3kPa)
- L'échange de chaleur du four avec l'extérieur est négligé

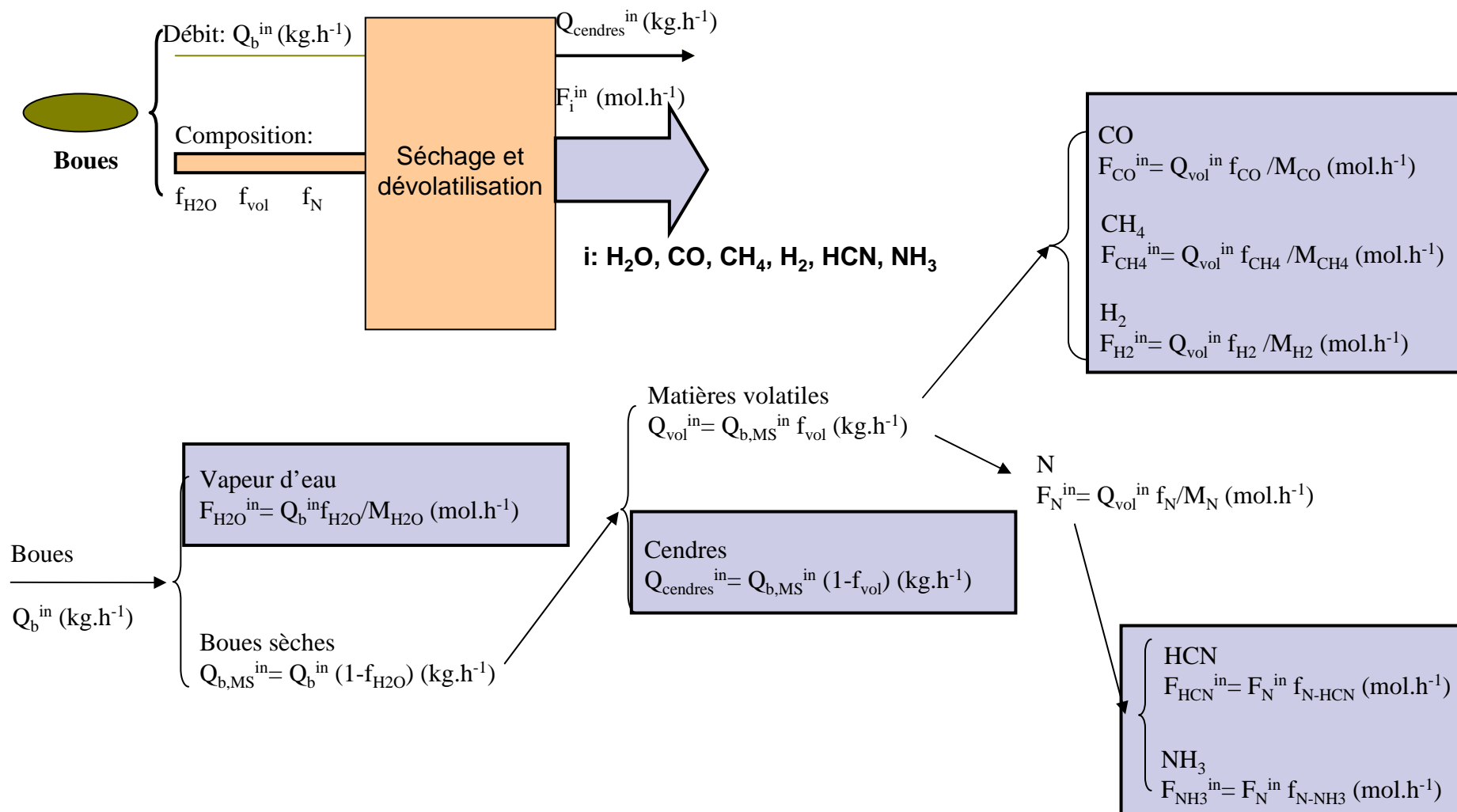
### Variables d'états:

Lit bouillonnant (B):  $C_{CO}^B$   $C_{CH_4}^B$   $C_{O_2}^B$   $C_{H_2O}^B$   $C_{HCN}^B$   $C_{NH_3}^B$   $C_{NO}^B$   $T^B$

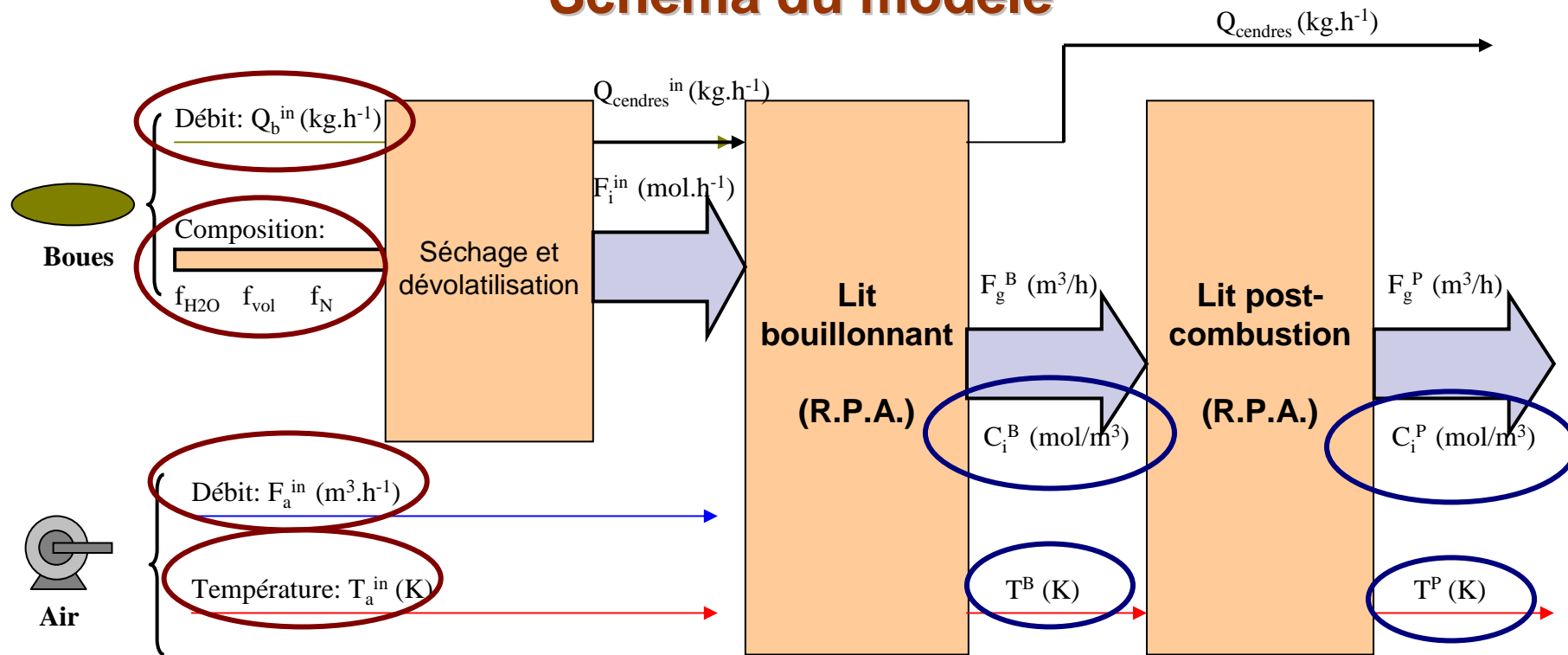
Lit bouillonnant (P):  $C_{CO}^P$   $C_{CH_4}^P$   $C_{O_2}^P$   $C_{H_2O}^P$   $C_{HCN}^P$   $C_{NH_3}^P$   $C_{NO}^P$   $T^P$

C: concentration molaire; T: température

## Calcul des différents flux issus du séchage et de la dévotilisation des boues



## Schéma du modèle



$C_i^B, C_i^P$ : concentration molaire du composant  $i$  dans le lit B et le lit P

$i$ : CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, HCN, NH<sub>3</sub>, NO, O<sub>2</sub>

$F_g^B, F_g^P$ : débit volumique de gaz sortant du lit B et du lit P

**Entrées:**  $Q_b^{in}, F_a^{in}, T_a^{in}, f_{H_2O}, f_{vol}, f_N$

**Variables d'état:**  $C_i^B, T_i^B, C_i^P, T^P$

## Bilan matière et bilan thermique dans les deux lits

**Lit  
bouillonnant  
(R.P.A.)**

$$V^B \frac{dC_i^B}{dt} = F_i^{in} - C_i^B F_g^B + \phi_i^B V^B$$

- V : volume du lit

-  $\phi_i$  : vitesse de production ou de consommation de composé i par les réactions chimiques

$$C_p^B \frac{dT^B}{dt} = (\text{Flux entrants})^B - (\text{Flux sortants})^B - Q_{\text{séchage}}^B - Q_{\text{réactions}}^B$$

-  $C_p$ : la chaleur spécifique, J.K<sup>-1</sup>.

- Flux entrants: air, boues, flux sortants: gaz, cendres.

**Lit post-  
combustion  
(R.P.A.)**

$$V^P \frac{dC_i^P}{dt} = C_i^B F_g^B - C_i^P F_g^P + \phi_i^P V^P$$

$$C_p^P \frac{dT^P}{dt} = (\text{Flux entrants})^P - (\text{Flux sortants})^P - Q_{\text{réactions}}^P$$

- Flux entrants: gaz, flux sortants: gaz.

## Adaptation du modèle de combustion de biomasse et de charbon à la combustion des boues

**Schéma réactionnel de référence:** [Liu et Gibbs, 2002] (25 réactions de combustion de biomasse et de charbon)

- 5 réactions de combustion: C, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>
- 20 réactions de NO et N<sub>2</sub>O: 6 réactions homogènes, 14 réactions hétérogènes, catalyseurs: carbone fixe, cendres, CaO

### Sélection des réactions chimiques pour la combustion de boues:

Réactions de combustion:

- Carbone fixe est négligé.
- C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> sont supposés être du CH<sub>4</sub>.
- Réaction de combustion H<sub>2</sub> est supposée en instantanée et totale dans lit bouillonnant.

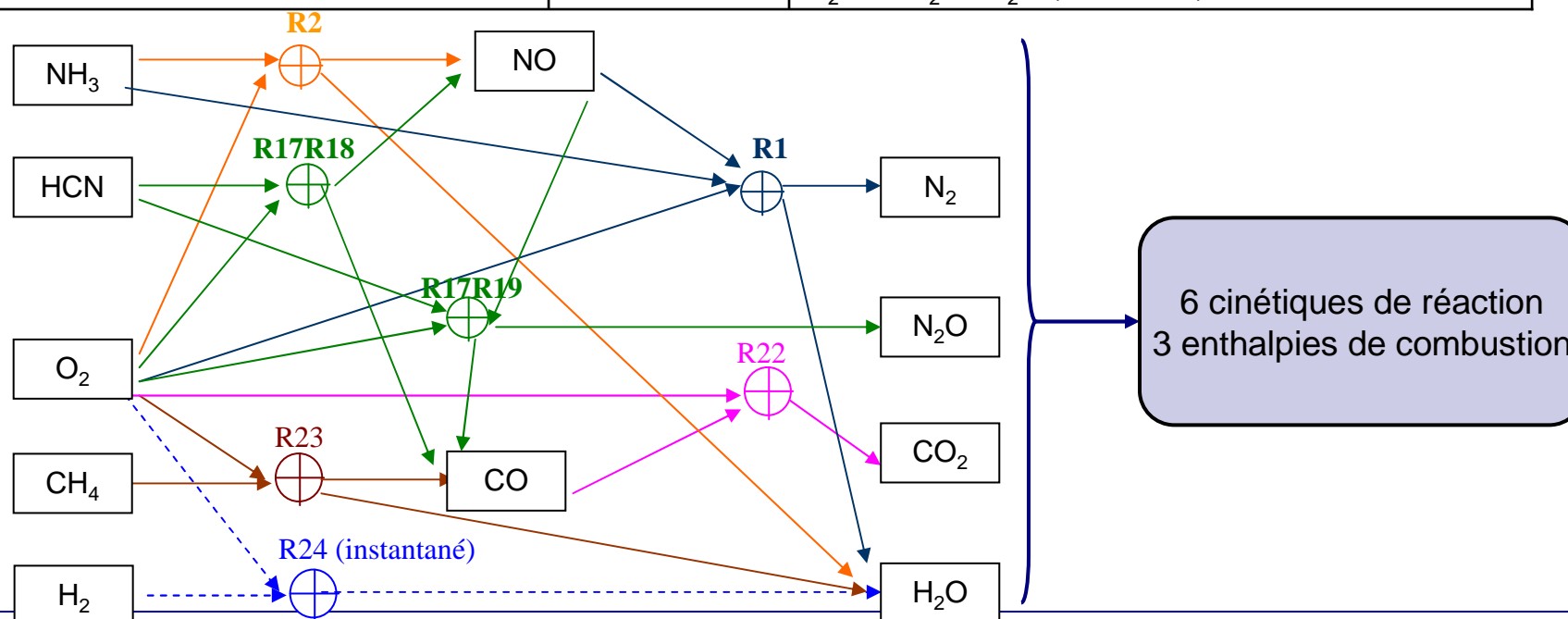
Réactions de formation/réduction de NOx

- rôle de catalyseurs:
  - carbone fixe est négligé
  - chaux (CaO) n'est pas être utilisé
  - les effets des cendres sont mal-connus, ils sont négligés.
- N<sub>2</sub>O négligé. (N<sub>2</sub>O est réduit facilement dans le lit post-combustion où la température est plus élevée [Werther et Ogada, 1999])



## Réactions chimiques de combustion de boues

Type	No.	Réaction
Oxydation de $\text{NH}_3$	R1	$\text{NO} + \text{NH}_3 + 1/4 \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 3/2 \text{H}_2\text{O}$
	R2	$\text{NH}_3 + 5/4 \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + 3/2 \text{H}_2\text{O}$
Oxydation de HCN	R17R18	$\text{HCN} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{CO} + \text{H}$
	R17R19	$\text{HCN} + 1/2 \text{O}_2 + \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{CO} + \text{H}$
Réaction de combustion	R22	$\text{CO} + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$
	R23	$\text{CH}_4 + 3/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$
	R24	$\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ (instantané)



## Vitesses et enthalpie de réaction dans le lit bouillonnant

Lit B:

$$\begin{pmatrix} \varphi_{H_2O}^B \\ \varphi_{CO}^B \\ \varphi_{CH_4}^B \\ \varphi_{HCN}^B \\ \varphi_{NH_3}^B \\ \varphi_{NO}^B \\ \varphi_{O_2}^B \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5 & 1.5 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ -0.25 & -1.25 & -1 & -0.5 & -0.5 & -1.5 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} r_1^B \\ r_2^B \\ r_{1718}^B \\ r_{1719}^B \\ r_{22}^B \\ r_{23}^B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{H_2}^{in} \times 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -F_{H_2}^{in} \times 0.5 \end{pmatrix} / V_B$$

$$\begin{pmatrix} r_1^B \\ r_2^B \\ r_{1718}^B \\ r_{1719}^B \\ r_{22}^B \\ r_{23}^B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1(T^B) \left( \epsilon_{NH_3}^B \right)^{0.5} \left( C_{NO}^B \right)^{0.5} \left( C_{O_2}^B \right)^{0.5} \\ k_2(T^B) \left( C_{NH_3}^B \right) \left( C_{O_2}^B \right) \\ k_{1718}(T^B) \left( C_{HCN}^B \right) \left( C_{O_2}^B \right) \\ k_{1719}(T^B) \left( C_{HCN}^B \right) \left( C_{O_2}^B \right) \\ k_{22}(T^B) \left( C_{CO}^B \right) \left( C_{H_2O}^B \right)^{0.5} \left( C_{O_2}^B \right)^{0.5} \\ k_{23}(T^B) \left( C_{CH_4}^B \right)^{0.7} \left( C_{O_2}^B \right)^{0.8} \end{pmatrix}$$

Coefficients stœchiométriques entre les composants et les réactions

k: constante de réaction, par la loi d'Arrhénius

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R T}\right)$$

$k_0$ : facteur préexponentiel

$E_a$ : Energie d'activation  $R=8,134 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$$Q_{réaction}^B = r_{22}^B \Delta H_{R22} V^B + r_{23}^B \Delta H_{R23} V^B + F_{H_2}^{in} \Delta H_{R24}$$

## Vitesses et enthalpie de réaction dans le lit post-combustion

$$\text{Lit P: } \begin{pmatrix} \varphi_{H_2O}^P \\ \varphi_{CO}^P \\ \varphi_{CH_4}^P \\ \varphi_{HCN}^P \\ \varphi_{NH_3}^P \\ \varphi_{NO}^P \\ \varphi_{O_2}^P \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1.5 & 1.5 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ -0.25 & -1.25 & -1 & -0.5 & -0.5 & -1.5 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} r_1^P \\ r_2^P \\ r_{1718}^P \\ r_{1719}^P \\ r_{22}^P \\ r_{23}^P \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} r_1^P \\ r_2^P \\ r_{1718}^P \\ r_{1719}^P \\ r_{22}^P \\ r_{23}^P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_1(T^P) (C_{NH_3}^P)^{0.5} (C_{NO}^P)^{0.5} (C_{O_2}^P)^{0.5} \\ k_2(T^P) (C_{NH_3}^P) (C_{O_2}^P) \\ k_{1718}(T^P) (C_{HCN}^P) (C_{O_2}^P) \\ k_{1719}(T^P) (C_{HCN}^P) (C_{O_2}^P) \\ k_{22}(T^P) (C_{CO}^P) (C_{H_2O}^P)^{0.5} (C_{O_2}^P)^{0.5} \\ k_{23}(T^P) (C_{CH_4}^P)^{0.7} (C_{O_2}^P)^{0.8} \end{pmatrix}$$

$$Q_{réaction}^P = r_{22}^P \Delta H_{R22} V^P + r_{23}^P \Delta H_{R23} V^P$$

## Paramètres du modèle

Type	Notation	Nombre
Paramètres chimiques	$M_{H_2O} M_{CO} M_{CH_4} M_{H_2} M_N M_{O_2} M_{air} M_{mel} T_0 R P_0 \rho_{a(T)} \rho_{g(T)}$	13
Paramètres du four	$V^B V^P m_s^B m_g^P$	4
Paramètres thermiques	$C_{pa} C_{pg} C_{pb} C_{p,cendres} C_{ps} T_{am} L_{H_2O} \Delta H_{R22} \Delta H_{R23} \Delta H_{R24}$	10
Paramètres de répartition issus de la dévolatilisation	$f_{CO} f_{CH_4} f_{H_2} f_{N-HCN} f_{N-NH_3}$	5
Paramètres cinétiques	$k_1 k_2 k_{1718} k_{1719} k_{22} k_{23}$ (pour 1 réaction, soit $k(T)=k_0^* \exp(-Ea/RT)$ , 2 paramètres $k_0$ et $Ea/R$ ; soit on prend les cinétiques constantes par plage de température, donc $k^B$ et $k^P$ )	12

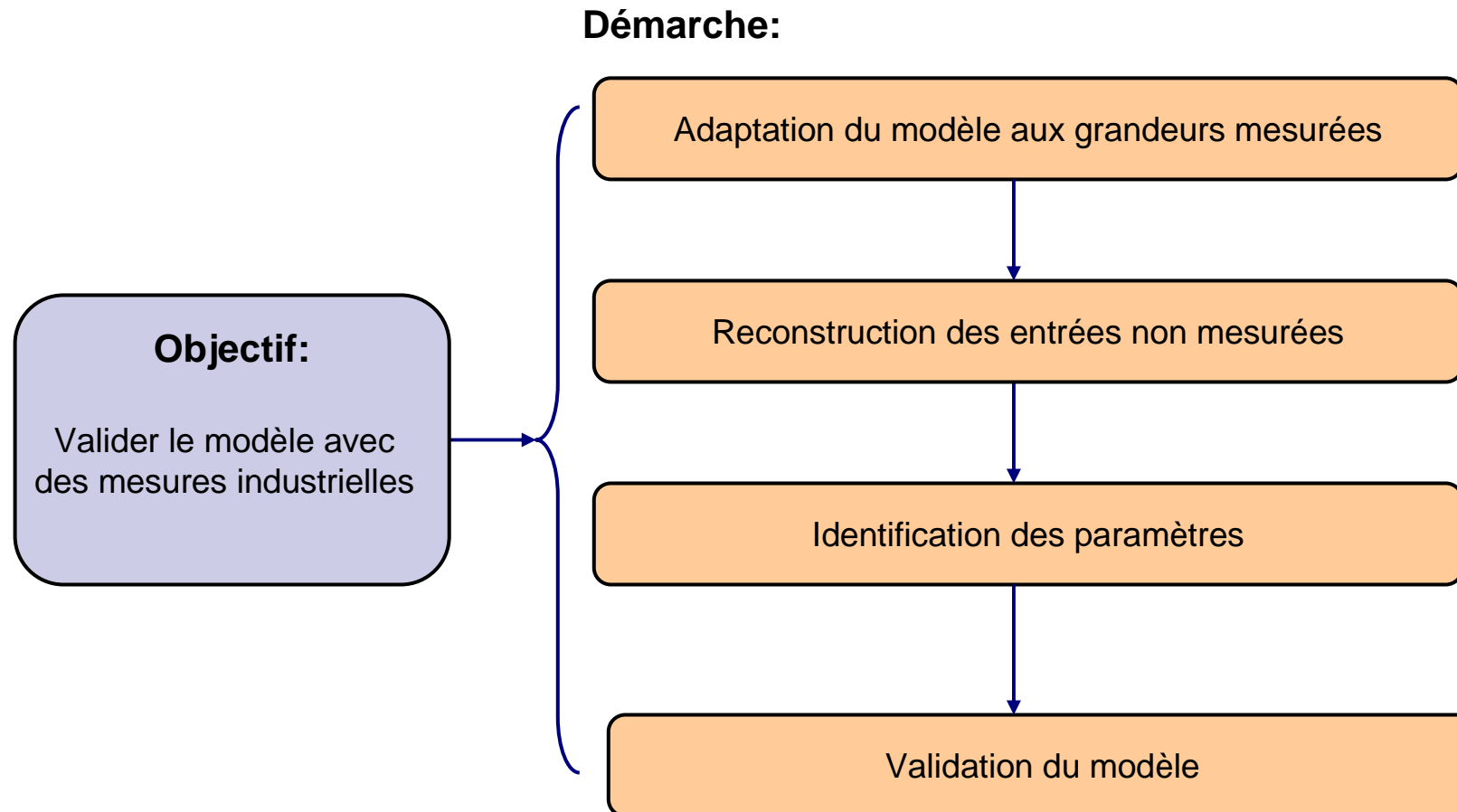
**paramètres à estimer**



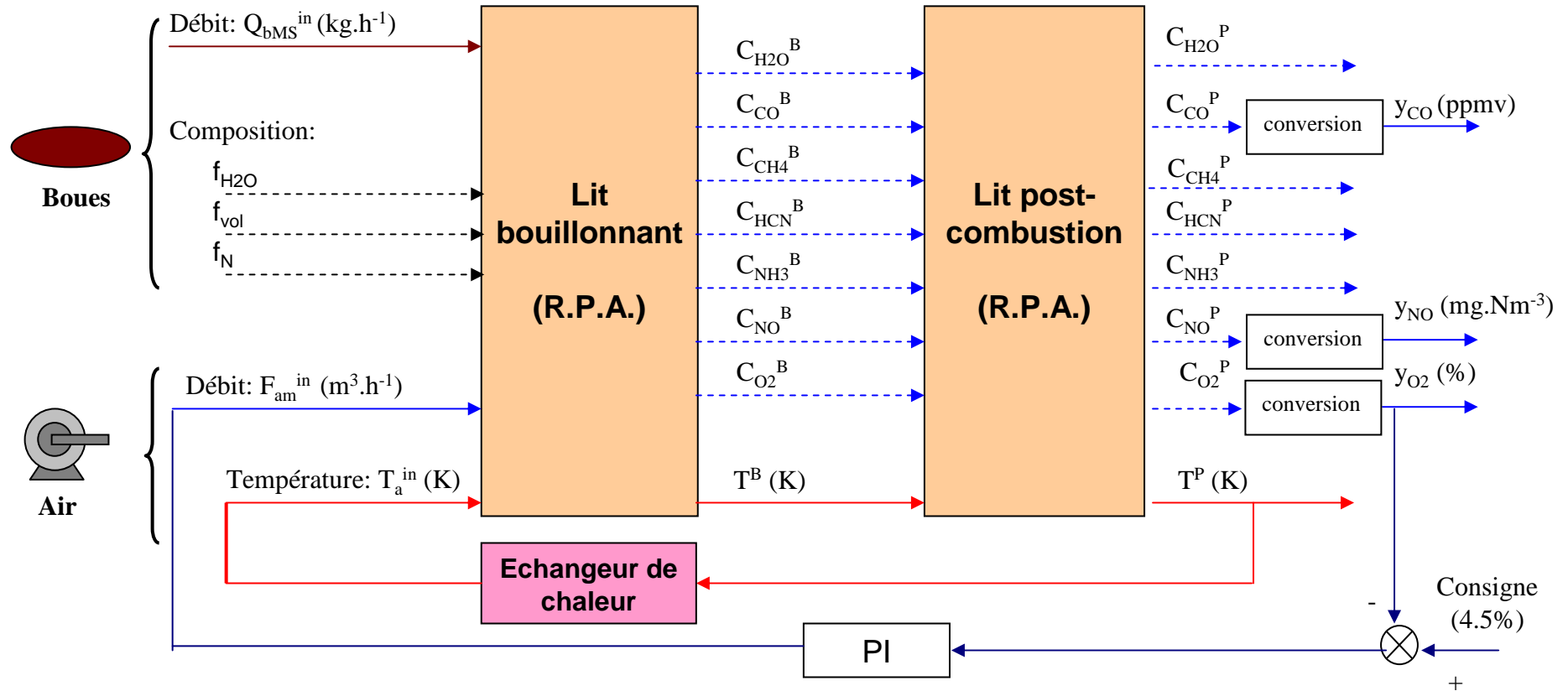
## Plan de l'exposé

- I. Contexte et objectif
- II. Proposition d'un modèle d'incinérateur en lit fluidisé
- III. Validation du modèle avec des données industrielles**
- IV. Proposition d'une stratégie de commande
- V. Conclusion et perspectives

## Objectif et démarche de validation



## Les grandeurs mesurées et non mesurées



■ 6 entrées du modèle:

- 3 entrées inconnues:  $f_{H_2O}$ ,  $f_{vol}$ ,  $f_N$
- 2 entrées dépendant de la sortie:  $F_{am}^{in}$ ,  $T_a^{in}$
- 1 seule entrée mesurée:  $Q_{bMS}^{in}$

■ 16 variables d'états:

5 sorties du modèle mesurées

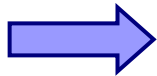
**Nécessité d'adapter le modèle**



## Adaptation du modèle

### Simplification du nombre de variables d'état

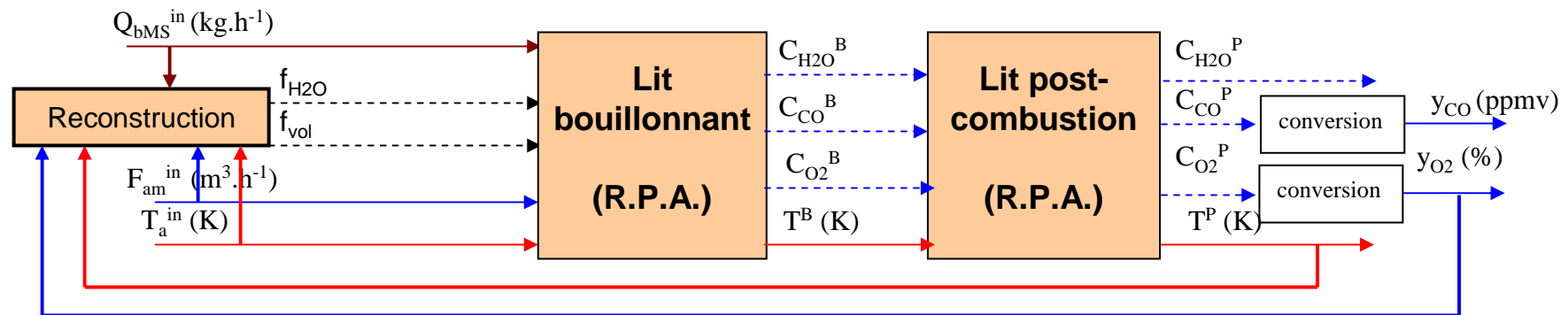
- $\text{CH}_4$  est supposé instantané dans lit bouillonnant: 1 cinétique négligé – 1 enthalpie conservée
- HCN négligé (faible quantité comparée avec  $\text{NH}_3$ ): 2 cinétiques négligées



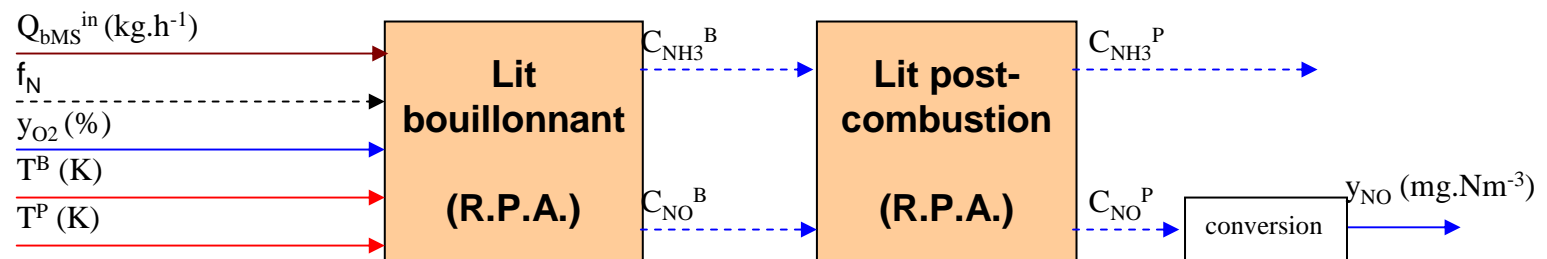
4 variables d'états et 6 paramètres cinétiques supprimés

Modèle simplifié: 12 variables d'états, 6 paramètres cinétiques

### Séparation en deux sous-modèle: sous-modèle de combustion et sous-modèle des NOx

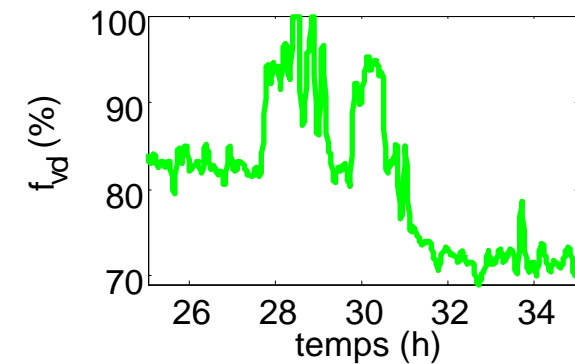
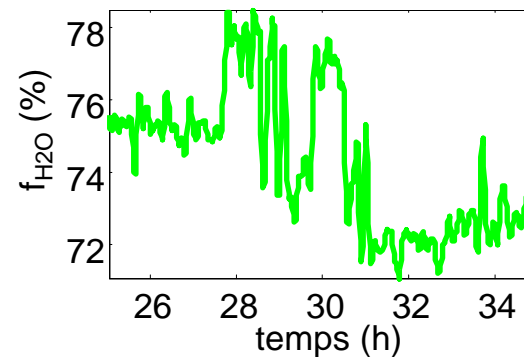
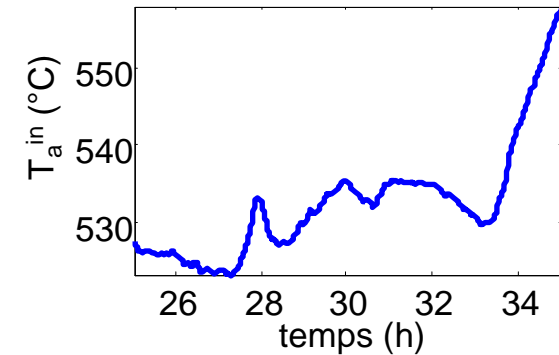
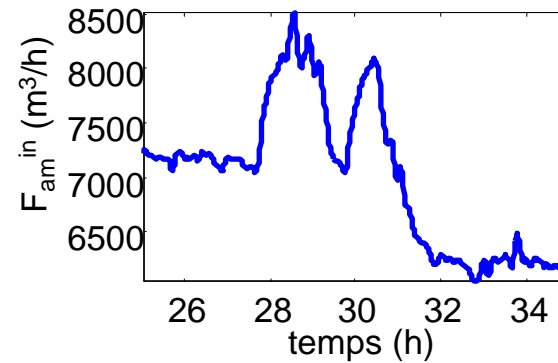
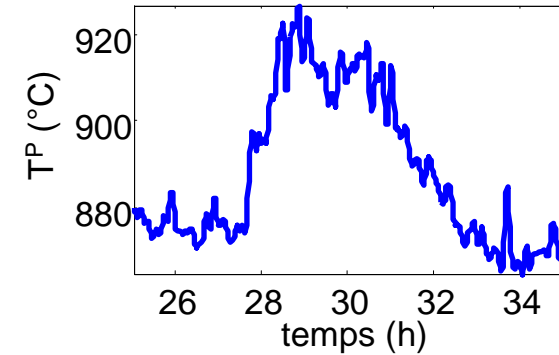
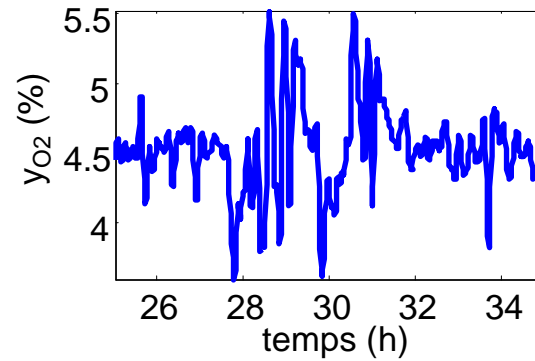
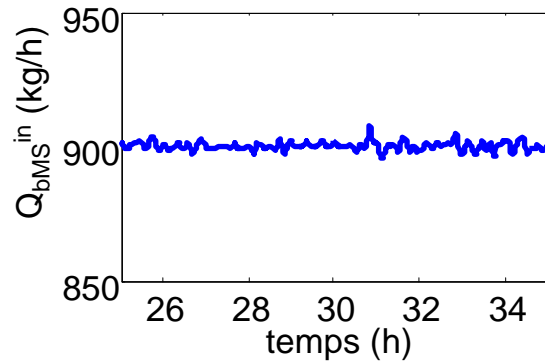


2 Paramètres à estimer:  $k_{22}^B, k_{22}^P$

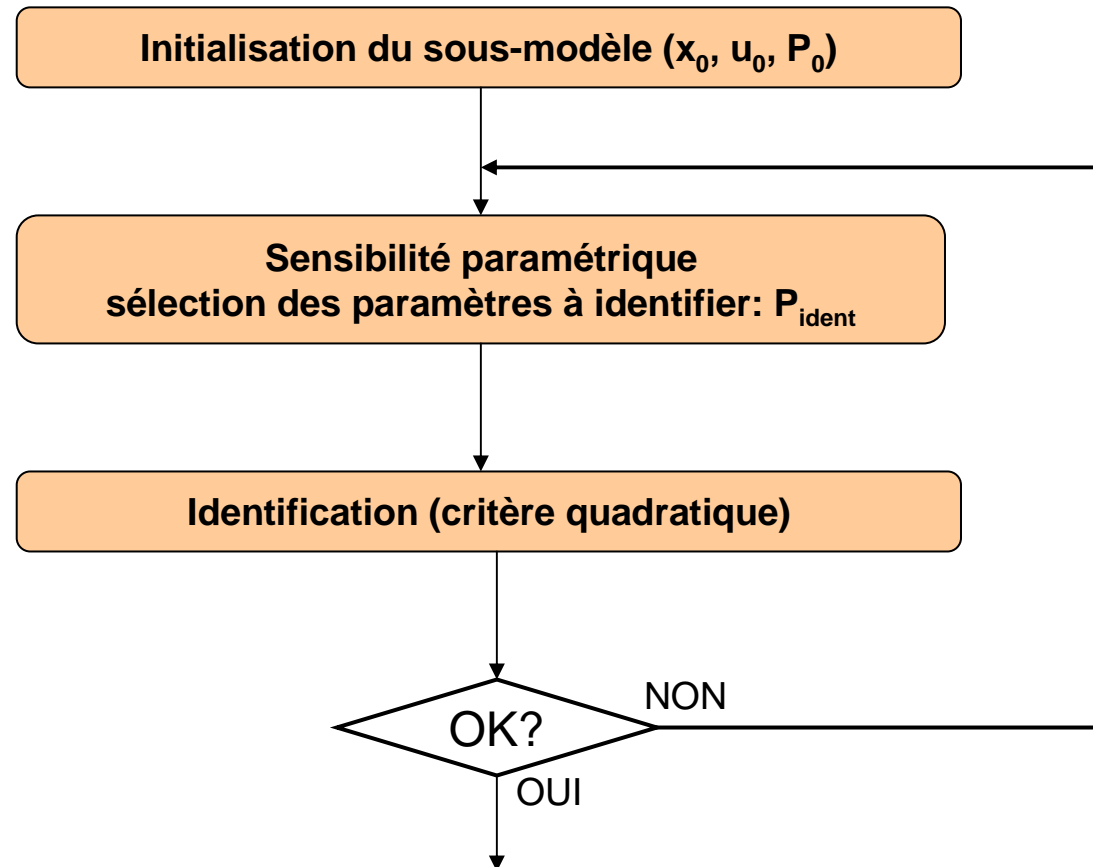


4 Paramètres à estimer:  $k_1^B, k_1^P, k_2^B, k_2^P$

## Reconstruction des entrées non mesurées

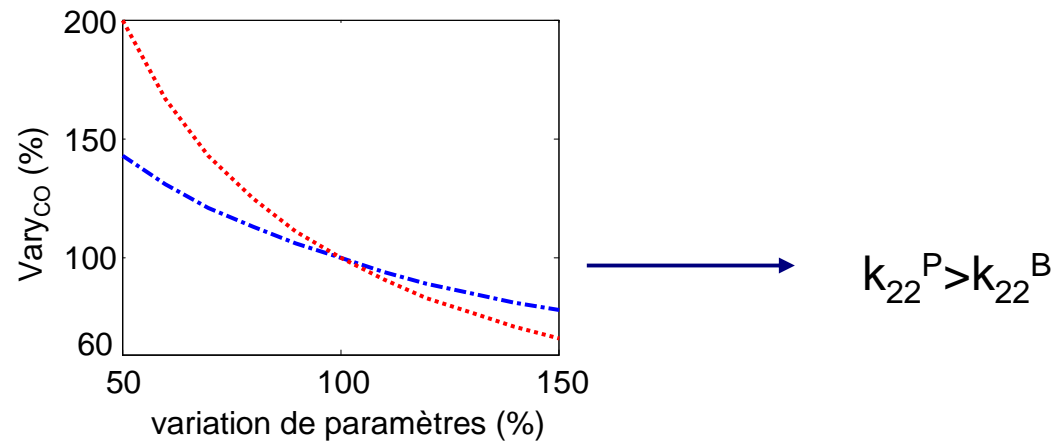
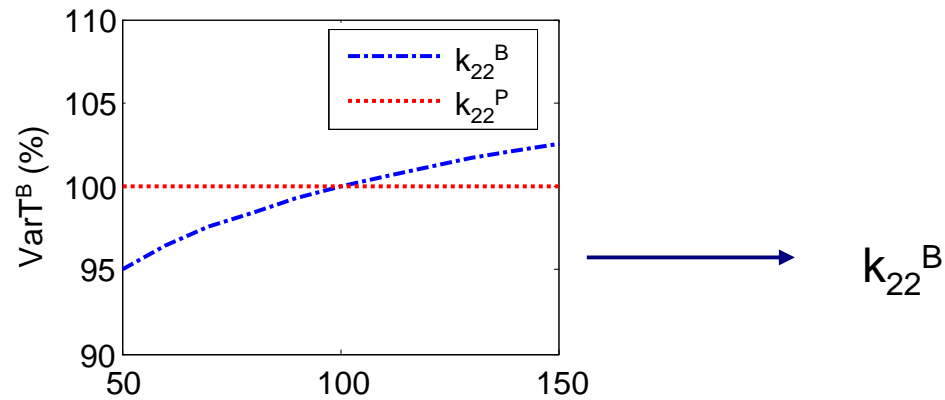


## Démarche d'identification des paramètres du sous-modèle

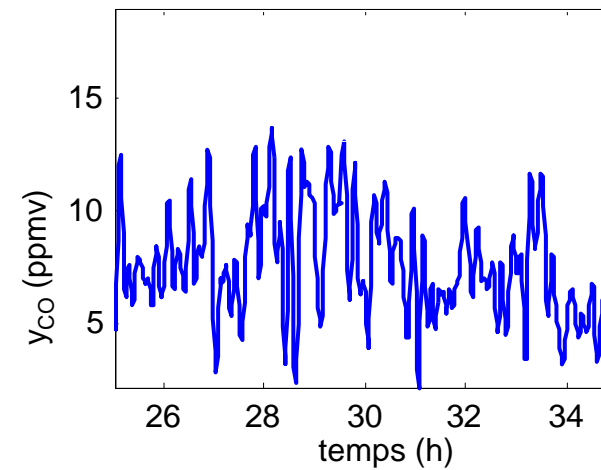
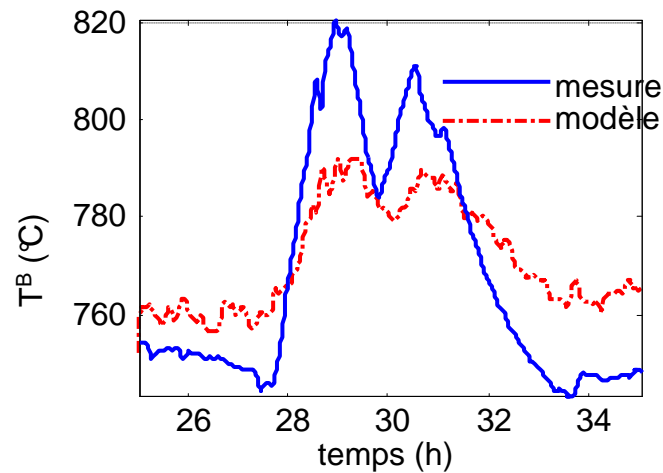


Validation avec un autre fichier de mesure

## Etude de sensibilité paramétrique $k_{22}^B$ et $k_{22}^P$ du sous-modèle de combustion



## Estimation de paramètre $k_{22}^B$ du sous-modèle de combustion



Paramètre à estimer:  $k_{22}^B$

Critère quadratique: 
$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{mes}^B(i) - T_{sim}^B(i))^2$$

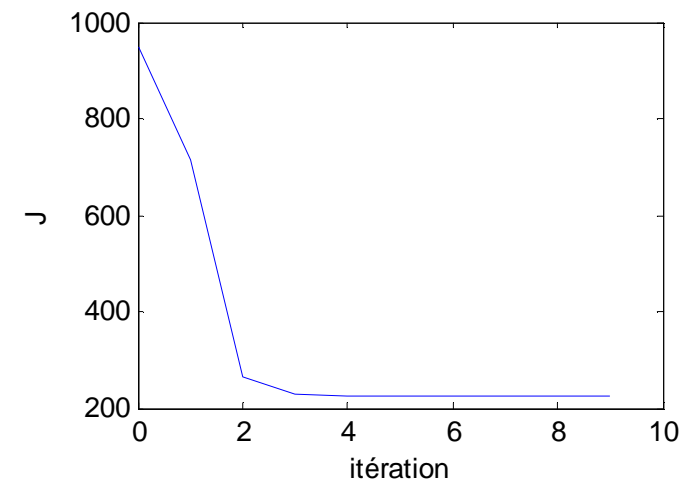
Paramètre initial: 1,3

Critère  $J_0=947$

Paramètre estimé: 1,3949+-0,0088

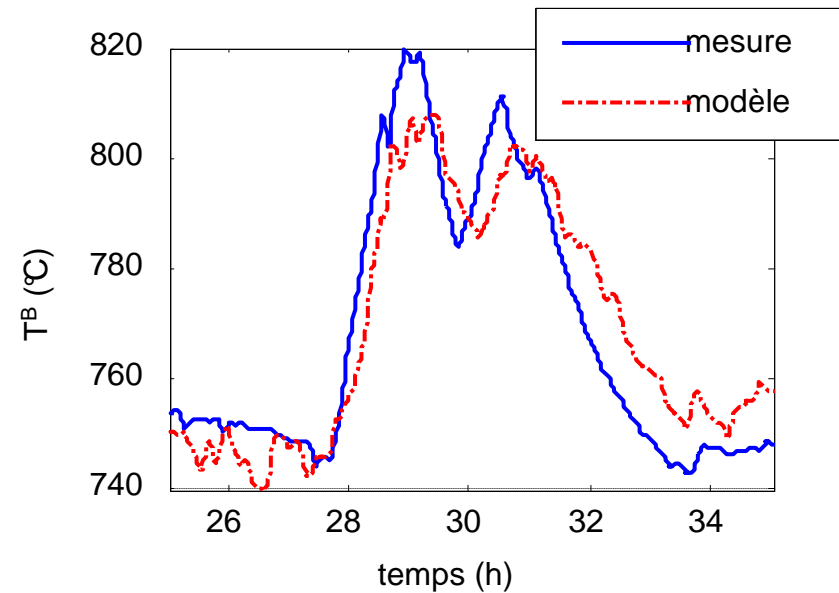
Critère  $J_f=226$

9 itérations.



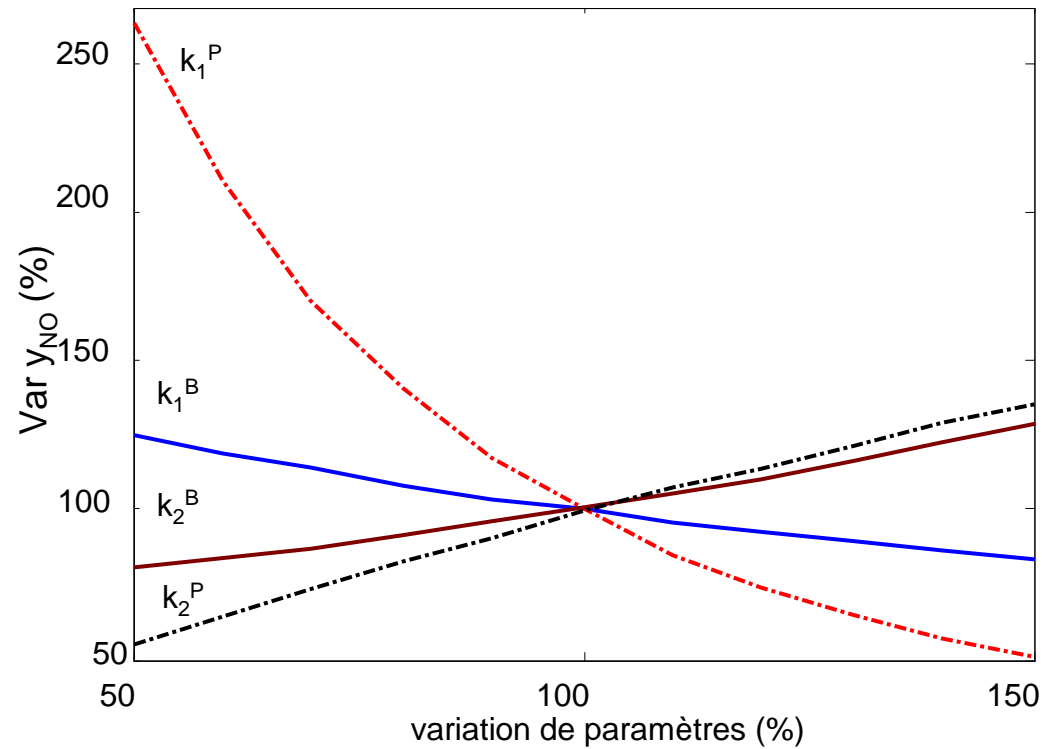
## 2<sup>ème</sup> ajustement: estimation des paramètres $k_{22}^B$ en fonction de température

Avec la loi d'Arrhénius:  $k_{22}^B = (2211 \pm 5) \exp\left(-\frac{(7743 \pm 2)}{T^B}\right)$



Critère statistique	$T^B$
Erreur relative moyenne	0,8%
Écart-type	0,5%

# Etude de sensibilité paramétrique $k_1^B$ $k_1^P$ $k_2^B$ $k_2^P$ du sous-modèle des NOx



R1	$\text{NO} + \text{NH}_3 + 1/4\text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + 3/2\text{H}_2\text{O}$
R2	$\text{NH}_3 + 5/4\text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + 3/2\text{H}_2\text{O}$

$k_1^P > k_2^P > k_1^B > k_2^B$

**Paramètre à estimer:  $k_1^P$**

## Estimation du paramètre $k_1^P$

Critère quadratique: 
$$J = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{NO,mes}(i) - y_{NO,sim}(i))^2$$

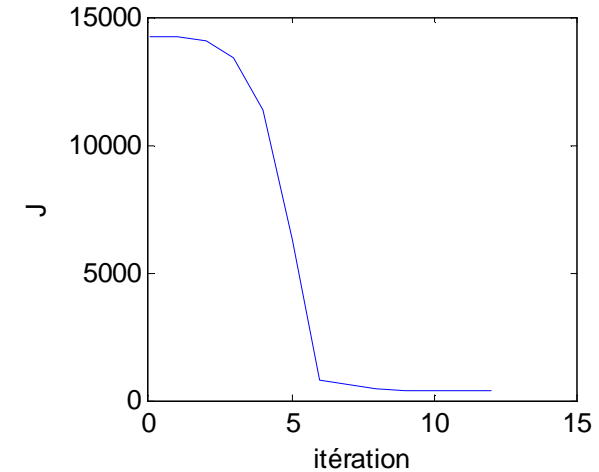
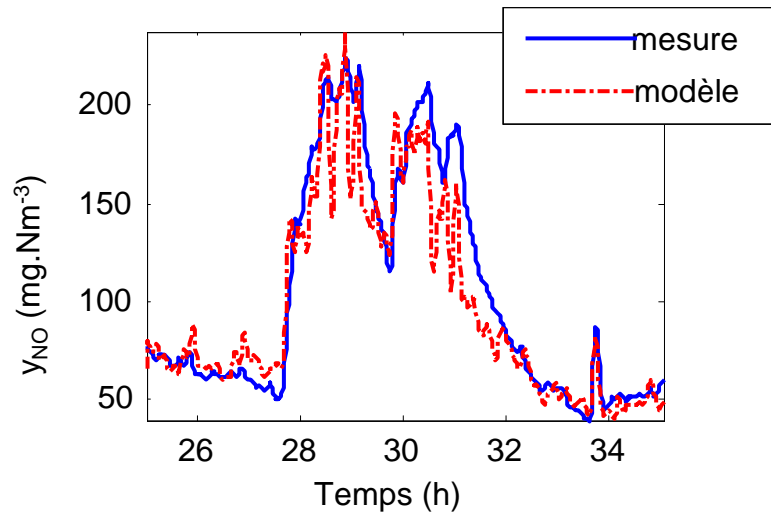
Paramètre initial: 30

Critère  $J_0=14248$

Paramètre final: 0,9981+0,0035

Critère  $J_f=398$

12 itérations.



Paramètre	Valeur de référence	Valeur estimée
$k_1^P$	7,2	1,0

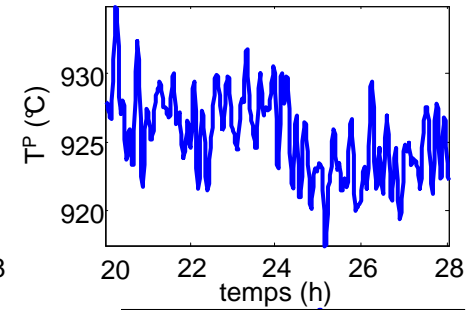
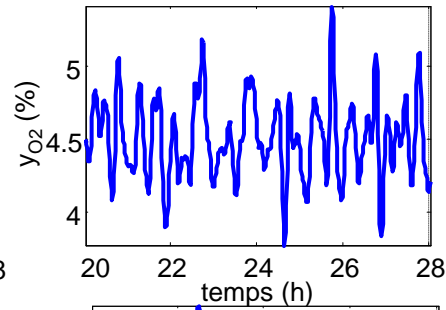
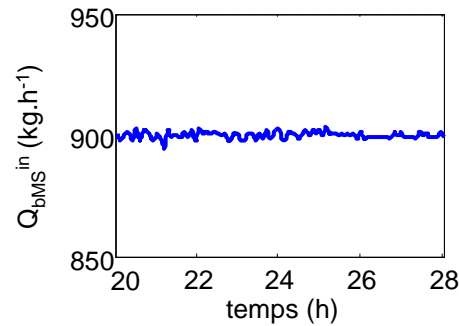
avec la loi d'Arrhénius, pas de meilleur résultat.

**R1 (réduction de NO par  $\text{NH}_3$ ) est diminué.  
R2 (formation de NO par  $\text{NH}_3$ ) est la réaction prédominante.**

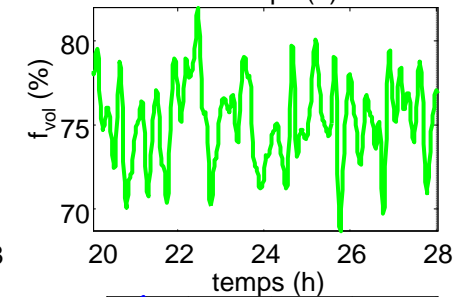
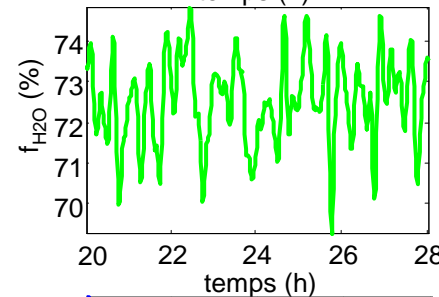
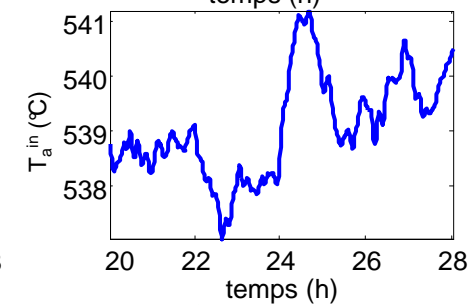
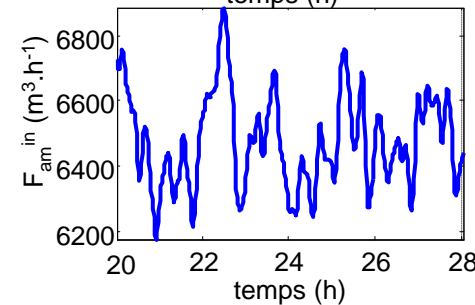


# Fichier de validation

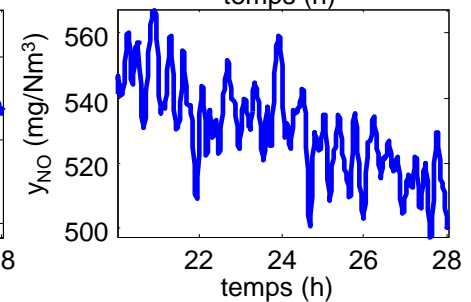
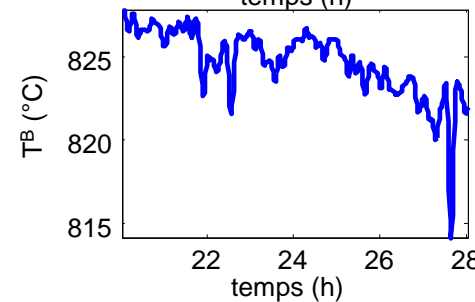
**Entrées mesurées:**



**Entrées reconstruites:**

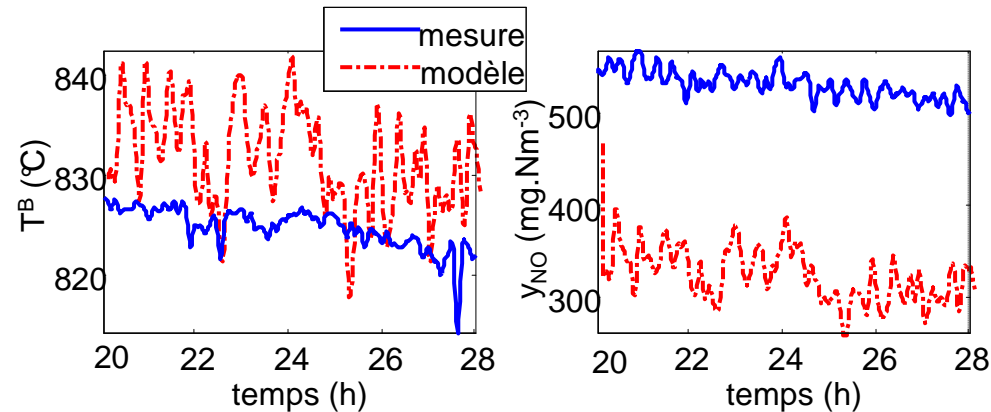


**Sorties mesurées:**



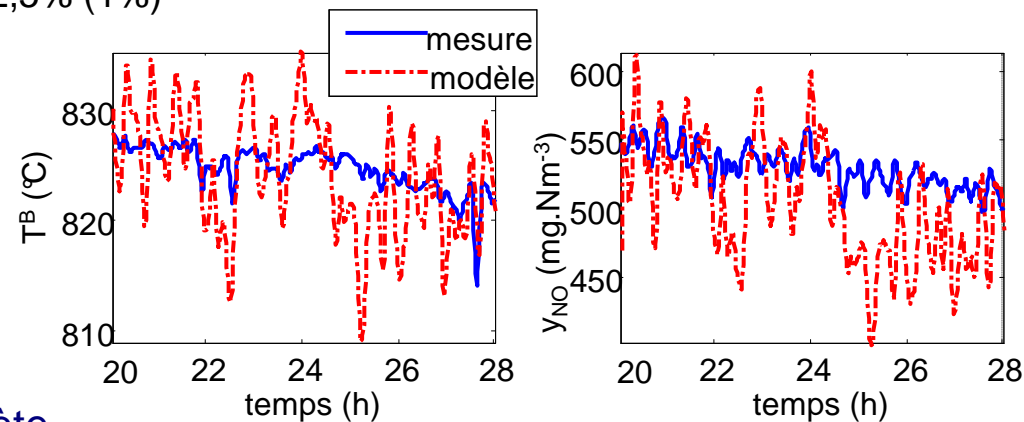
## Validation du modèle

Les sorties:



Ajuster la fraction d'azote de boues et la répartition des composés volatils afin d'améliorer les performances:

- répartition des composé volatils:  $f_{H_2}=2\%$  (3,2%)
- $f_N=2,5\%$  (1%)



Validation incomplète.

Mais le modèle représente les tendances des mesures et les hypothèses sont validées.

## Conclusion sur la validation

- Validation n' est pas complète, on manque les connaissances sur
  - la composition des boues
  - la dévolatilisation
  
- Améliorations possibles:
  - Mesures supplémentaires dans le four et en sorties:  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $HCN$ ,  $CH_4$ , débit de gaz.
  - Mesures de la composition de boues: humidité, fraction volatile, fraction d'azote. Estimation depuis la station amont.
  - Equations empiriques de la dévolatilisation dépendant de la température.
  
- Le modèle est capable de reproduire la dynamique des mesures. Il peut être utilisé en simulation afin d'établir une stratégie de commande.

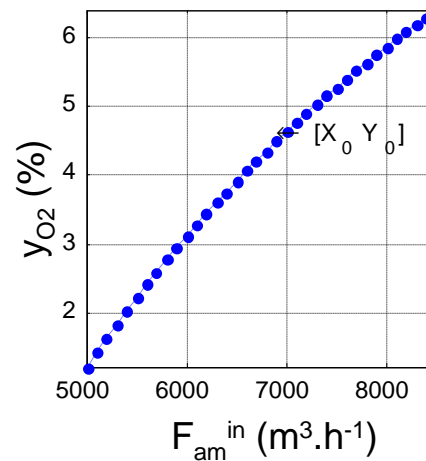
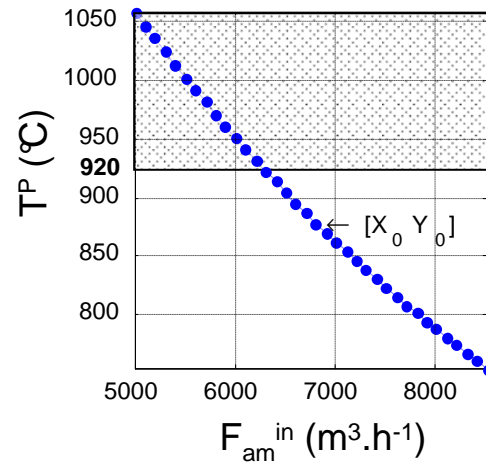
## Plan de l'exposé

- I. Contexte et objectif
- II. Proposition d'un modèle d'incinérateur en lit fluidisé
- III. Validation du modèle avec des données industrielles
- IV. Proposition d'une stratégie de commande**
- V. Conclusion et perspectives

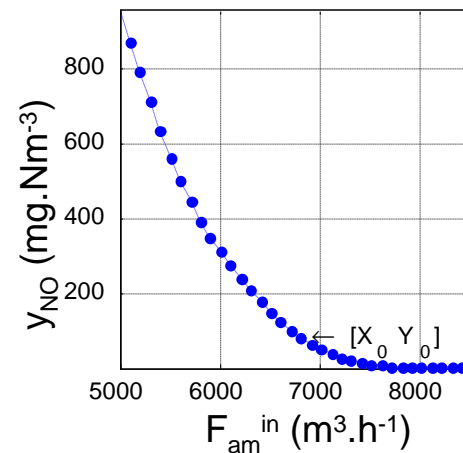
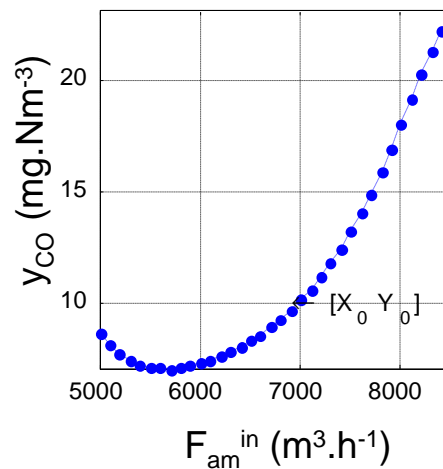
## Objectif de la stratégie de commande

- Minimiser la production de NOx
- Garantir une combustion complète (minimiser CO)
- Malgré les fluctuations de la composition des boues
- En respectant les contraintes:
  - Sortie:  $\text{NO}_x < 200 \text{ mg.Nm}^{-3}$ ,  $\text{CO} < 50 \text{ mg.Nm}^{-3}$  (norme européenne)
  - Action:  $5000 \text{ m}^3.\text{h}^{-1} < F_{\text{am}}^{\text{in}} < 8500 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$
  - Fonctionnement:  $700^\circ\text{C} < T^{\text{B}} < 840^\circ\text{C}$ ,  $T^{\text{P}} < 920^\circ\text{C}$ ,  $0\% < \text{O}_2 < 14\%$  (point optimal 4-6%)
- Choix de l'actionneur:
  - débit de boues doit garantir le stockage dans le silo
  - donc, on utilise le débit d'air

## Cohérence du modèle: étude statique du modèle pour le débit d'air

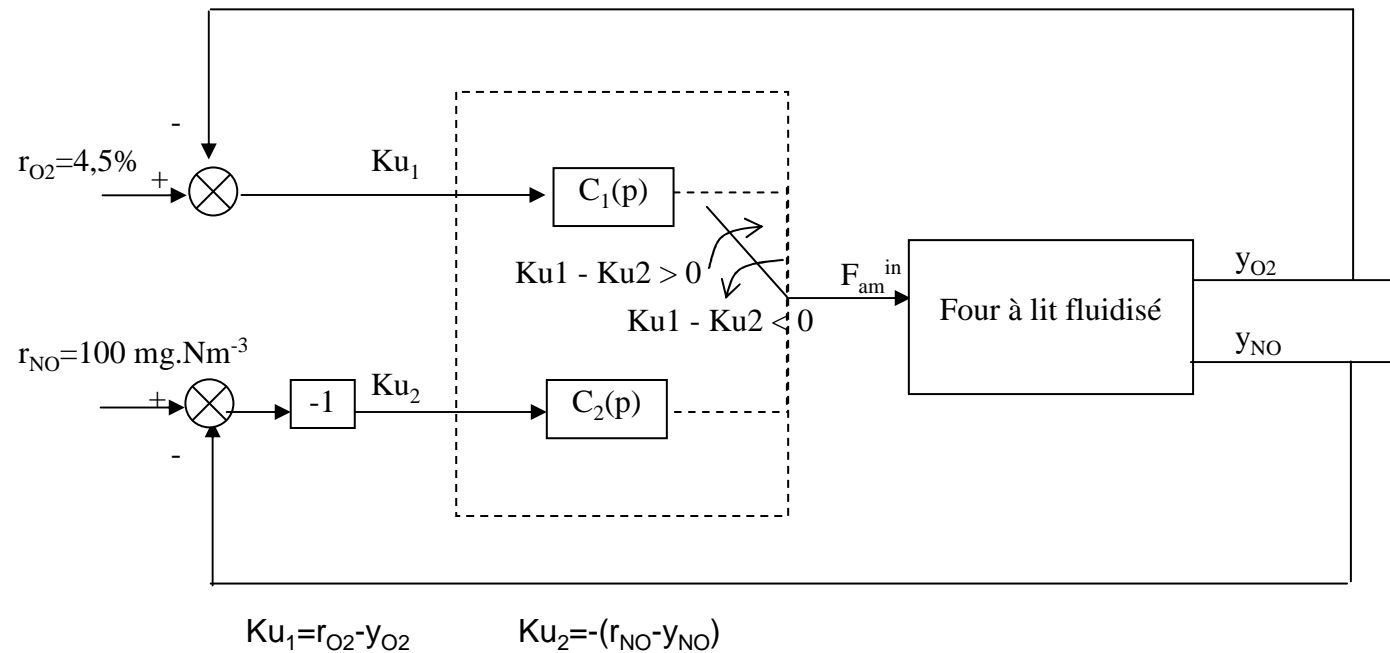


$[X_0, Y_0]$  est le point de fonctionnement (mesures industrielles)



**Le modèle est cohérent**

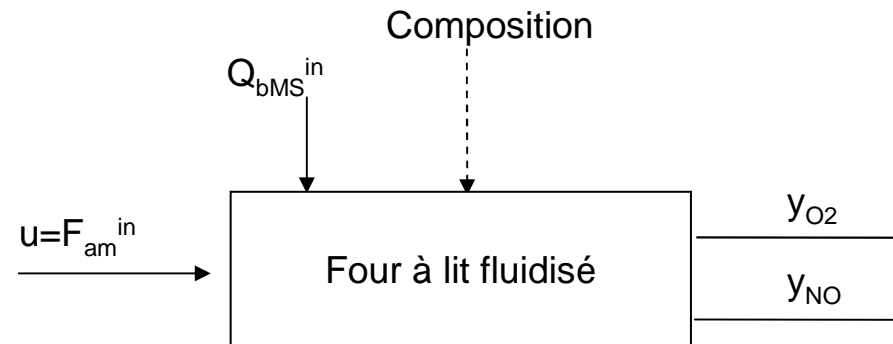
## Stratégie proposée



$$C_1(p) = 72 \left( 1 + \frac{1}{60p} \right) \quad \text{PI du site industriel}$$

$$C_2(p) = 19.4 \left( 1 + \frac{1}{368p} \right) \quad \text{PI calculé par la méthode des pôles dominants}$$

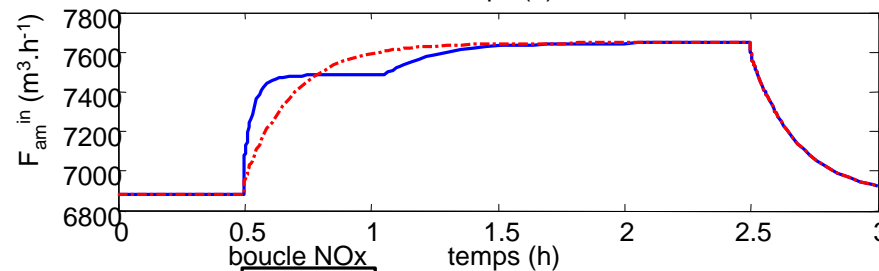
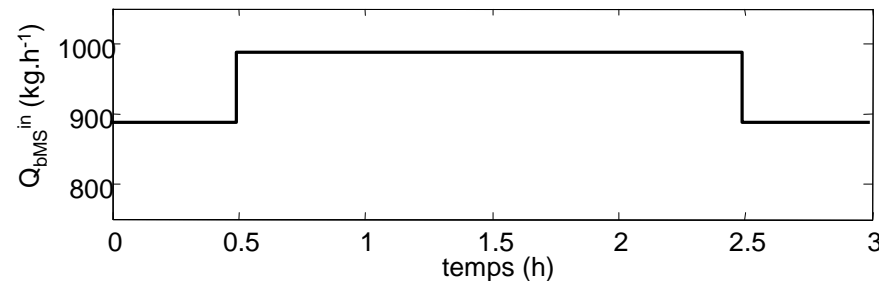
## Choix des tests en simulation



- **Perturbation mesurée:**
  - Débit de boues:  $Q_{bMS}^{in}$ .
  
- **Perturbations non mesurée:**
  - Composition de boues:  $f_{H_2O}$ ,  $f_{vol}$ ,  $f_N$ .

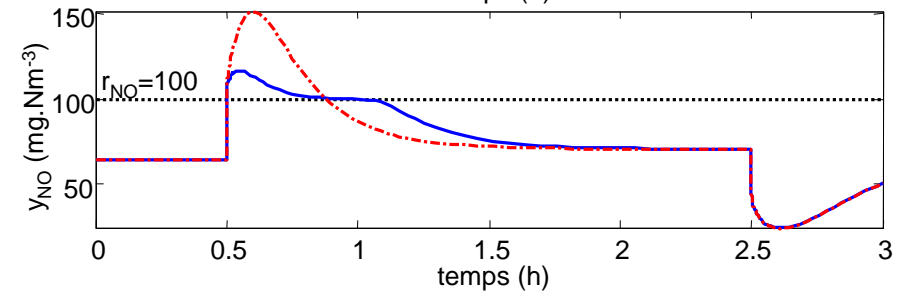
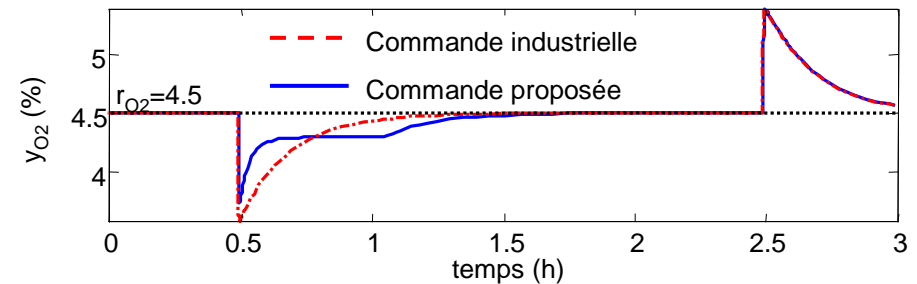


## Comparaison des stratégies en rejet de perturbation débit de boues



Basculement dans la commande proposé

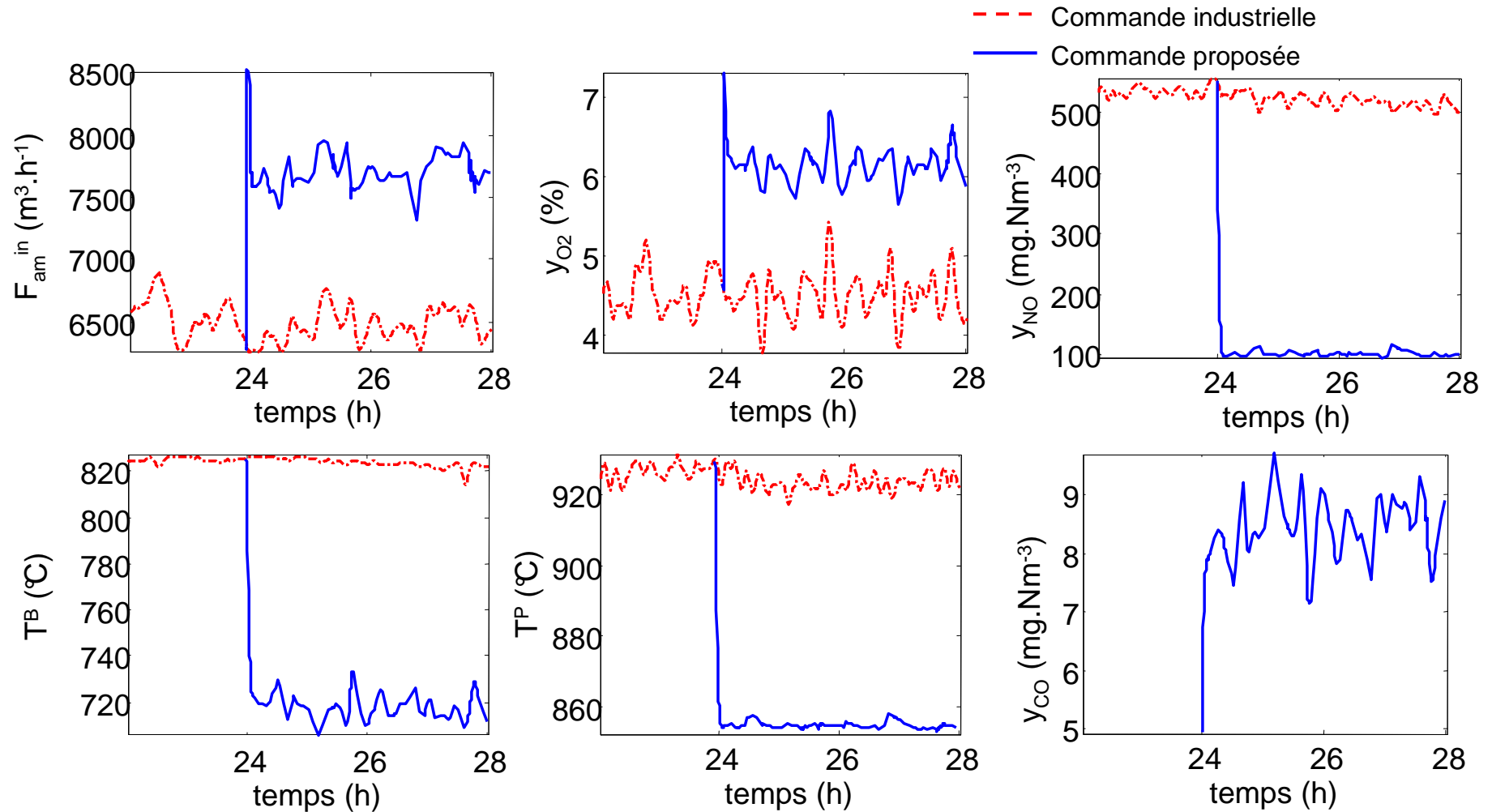
	Max( $\Delta u$ )	Ecart-type ( $\Delta u$ )
Industrielle (0,5h-2h)	37,34	10,87
Proposée (0,5h-2h)	41,45	9,76



	IAE
$e_{O_2} (0,5h-2h)$	65,52
$e_{O_2} (0,5h-2h)$	38,88
$e_{NO} (0,5h-0,9h)$	5942
$e_{NO} (0,5h-0,9h)$	1317

IAE: intégration d'erreur absolue

## Comparaison des stratégies sur les mesures industrielles



## Conclusion sur la stratégie de commande

- Stratégie de commande proposée: garantir le respect des normes des émissions de NOx
  
- Améliorations possibles:
  - Proposer des algorithmes de commande avancée utilisant le modèle et anticipant les effets des perturbations sur les NOx
  - Tester sur le site industriel

## Plan de l'exposé

- I. Contexte et objectif
- II. Proposition d'un modèle d'incinérateur en lit fluidisé
- III. Validation du modèle avec des données industrielles
- IV. Proposition d'une stratégie de commande
- V. Conclusion et perspectives**

## Conclusion

### Objectif:

Modéliser un incinérateur de boues en lit fluidisé en vue de maîtriser les émissions de NO<sub>x</sub>

### Difficultés principales:

- Manque d'études sur le sujet.
- Complexité des phénomènes mis en jeu.
- Manque des grandeurs mesurées: composition des boues, les variables d'états dans le four.

### Travaux réalisés:

- Adaptation de la littérature sur d'autres combustibles aux boues d'épuration.
- Etablir un modèle d'incinérateur de boues en lit fluidisé qui inclut les phénomènes majeurs (CO, NO<sub>x</sub>).
- Valider ce modèle avec des mesures industrielles – le modèle est capable de reproduire la dynamique des mesures.
- Proposer une stratégie de commande qui permet d'améliorer la régulation existante dans le site industriel

# Perspectives

## MODELISATION

- Réacteur piston pour le lit post-combustion
- Utilisation des cendres comme catalyseur dans le lit bouillonnant

## VALIDATION

- Mesures supplémentaires dans le four:  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $HCN$ ,  $CH_4$ , débit de gaz.
- Mesures dynamiques de la composition de boues:  $f_{H_2O}$ ,  $f_{vol}$ ,  $f_N$ , ou les estimer depuis la station amont

## COMMANDE

- Les algorithmes de commande avancée utilisant le modèle et anticipant les effets des perturbations sur les  $NO_x$
- Test sur le site industriel

