



# Investigation expérimentale de l'inflammation du lignite dans les conduits de cheminée

Présentée le 02/12/2021 par  
Safae KELLALI - Doctorante Institut PPRIME (UPR 3346 CNRS)

Equipe de travail :

Pr. Thomas Rogaume, Dr. Franck Richard, Dr. Pierre Cremona, Dr. Benjamin Batiot,  
Mme Pauline Dias Lopes, M. Marc Poisson



*Phase solide : Energie  $\geq E_a$  de pyrolyse du lignite*

**Phase gaz**

**Problèmes associés [1]**

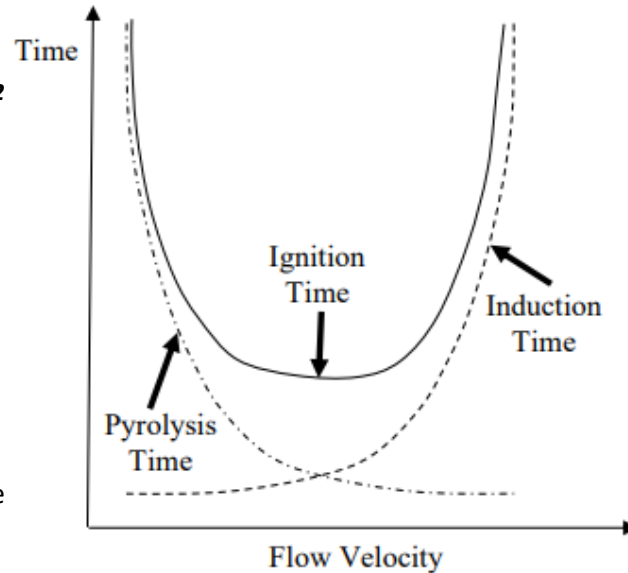
*Interactions solide/gaz & types d'inflammation du lignite*

- **Prédiction quantitative et non qualitative des gaz :**  
*Tout ce qui est produit ne réagit pas*  
Par exemple  $CO_2$ , gaz inertes,  $H_2O$ ...

- **Migration des gaz de pyrolyse & mélange avec  $O_2$**   
(perméabilité, porosité du lit, etc.)

- **Vitesse des gaz de pyrolyse**  
(temps de pyrolyse Vs temps de résidence et temps des réactions)

- **Mélange inflammable  $\in [LII, LSI]$**   
(temps d'ignition = temps de pyrolyse + temps pour que le mélange ait suffisamment d'énergie pour s'enflammer : atteinte du nombre de damkohler critique)  
Nombre de Damkohler = temps\_résidence / temps\_réactions  
Si temps\_réactions < temps\_résidence, alors occurrence de l'ignition.  
Quelle est la chaleur nécessaire pour atteindre le nombre de **Damkohler critique** ? (Aspect non résolu) [1]



*Ignition phase gazeuse*



*Ignition hétérogène*



*Ignition dans phase solide & gaz*



*Smoldering ignition*

## Objectif de la campagne expérimentale :

- *Etude de la décomposition thermique, de l'inflammation et de la combustion d'un lit poreux de lignite à l'échelle du conduit de cheminée*

### Etude expérimentale de l'inflammation sous différentes conditions

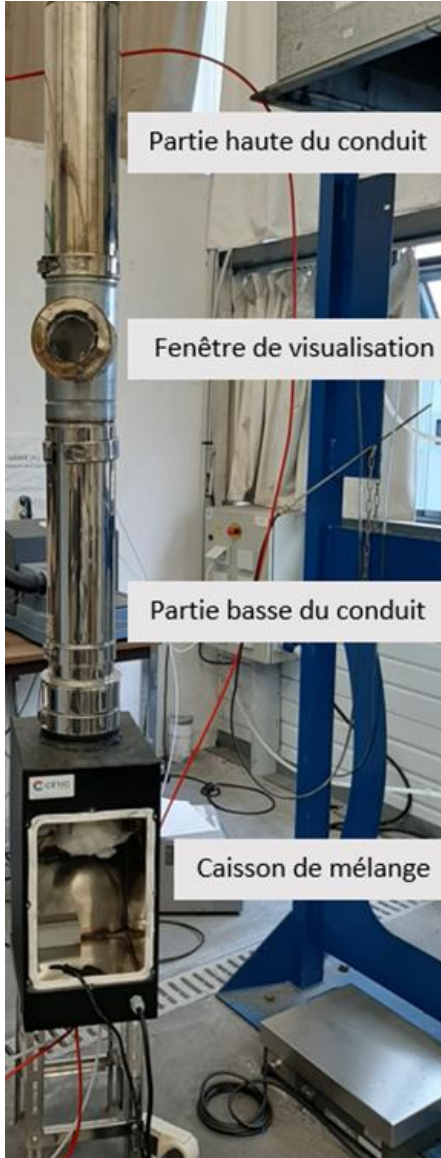
**Enjeu** : *Investigation des principaux paramètres qui influent le temps d'inflammation et sa sévérité*

- *Concentration d'oxygène*
- *Température des gaz traversant le lit poreux du lignite*
- *Masse initiale du combustible, granulométrie et porosité du lit poreux du lignite*

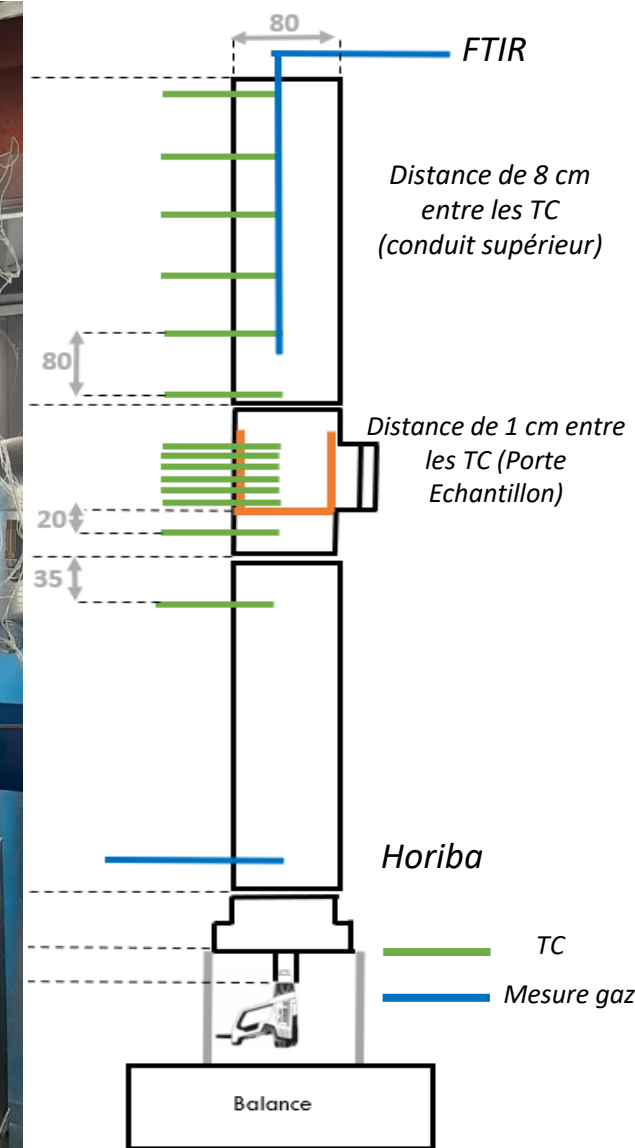
### Recherche des conditions minimales d'inflammation (concentration d'oxygène, masse du lignite, chaleur fournie).

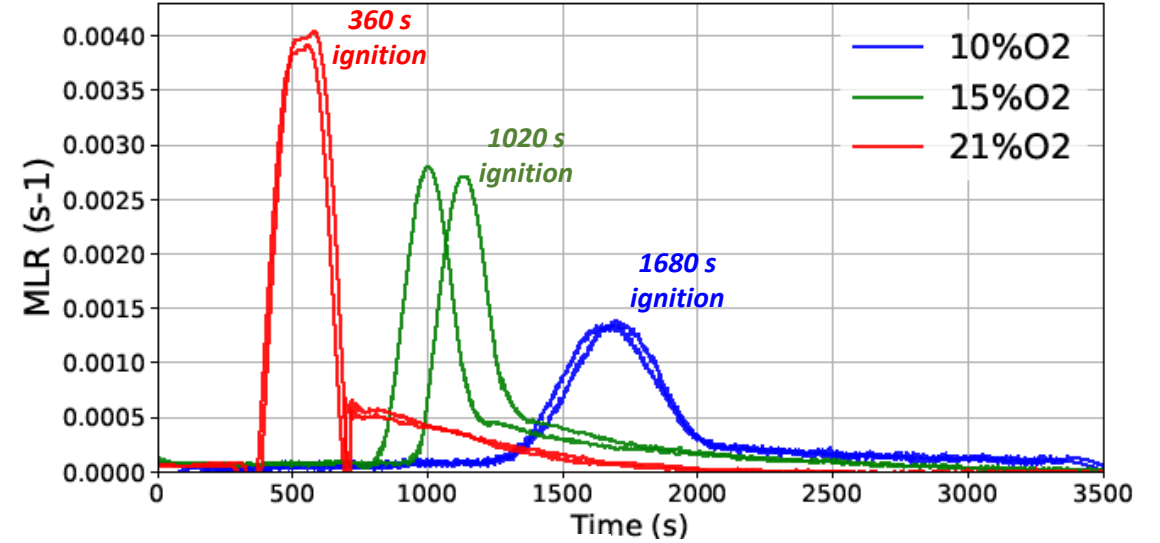
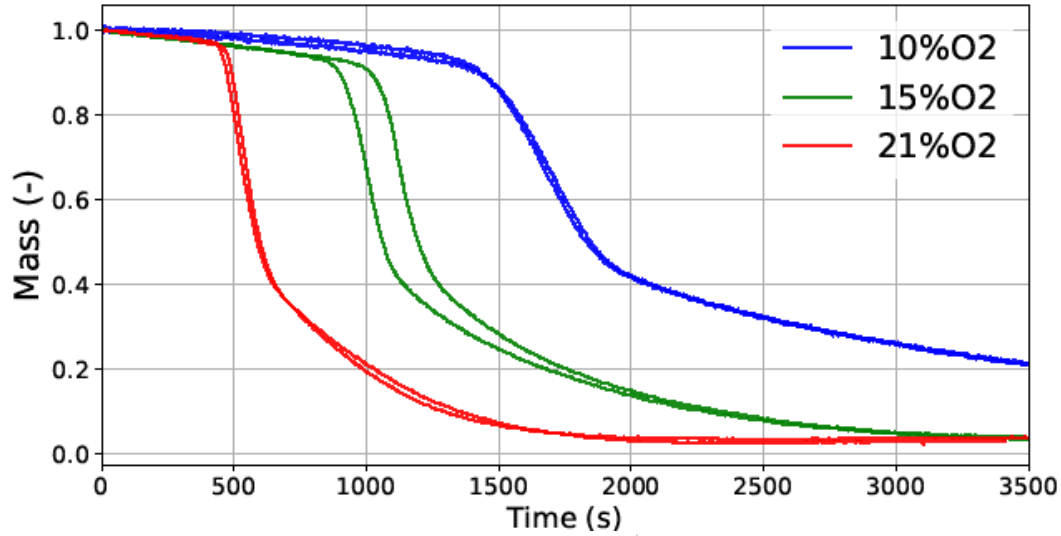
**Enjeu** : *Objectif sécuritaire & avoir des ordres de grandeurs pour effectuer les essais de la campagne expérimentale à échelle réelle*

### Perspectives



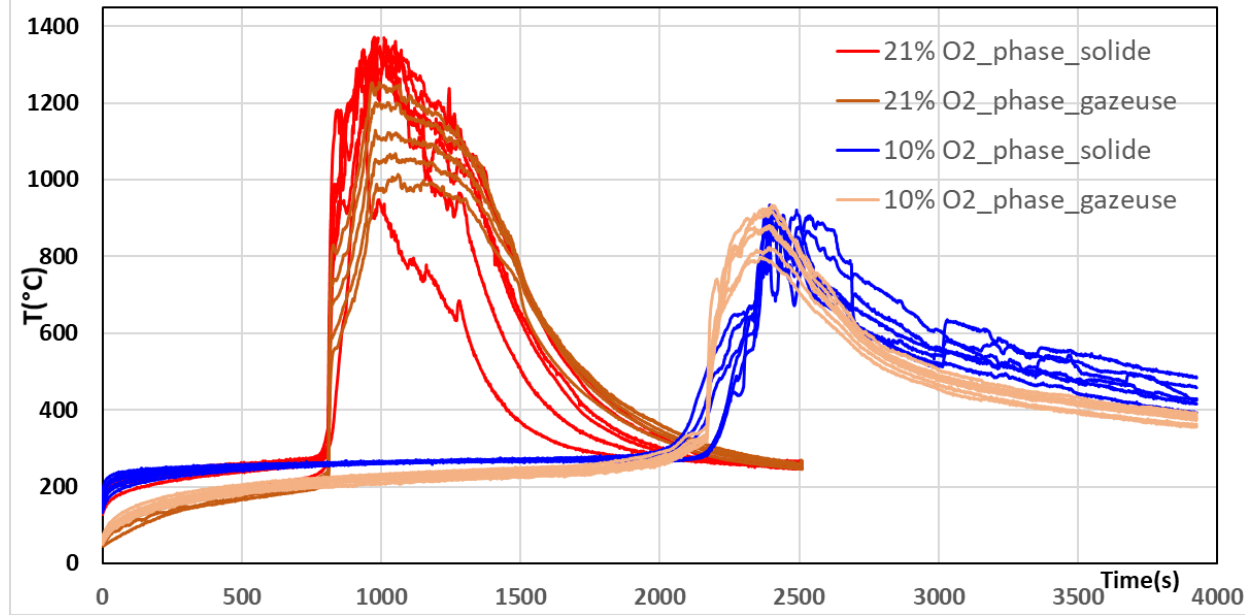
<b>Paramètres</b>	<b>Détails</b>
<i>Générateur de chaleur</i>	Décapeur thermique Débit fonction du choix de température
<i>Plage de température</i>	50°C à 630°C Ventilation : 3 crans
<i>Diamètre intérieur du conduit</i>	8 cm
<i>Hauteur du conduit</i>	145,5 cm
<i>Distance entre le décapeur et le porte-échantillon</i>	78,5 cm
<i>Mesure – Températures</i>	Diamètre : 1,5 mm Type : K Erreur : $\pm 1^\circ\text{C}$ 14 points de mesure
<i>Mesure – Masse</i>	Balance Minebae Intec Résolution : 0,1 g
<i>Mesure – Gaz</i>	Analyseur Horiba – Après la chambre de mélange FTIR : 20 cm au-dessus du porte échantillon



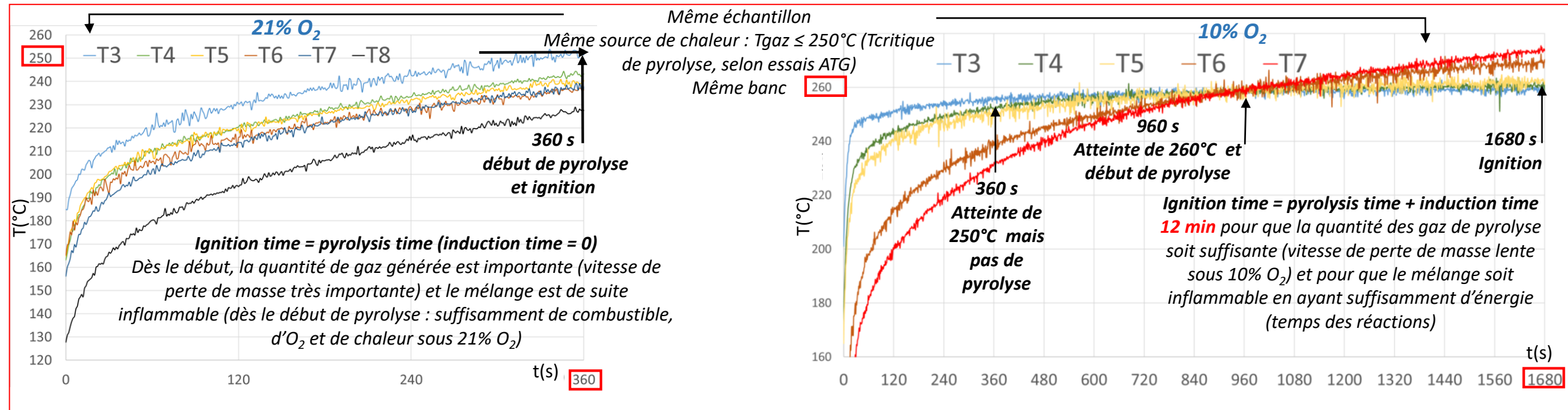


**Temps d'ignition :**

- 21% d'O<sub>2</sub> : 360 s
- 10% d'O<sub>2</sub> : 1680 s



## Observation:



### Pyrolyse et ignition du lignite

5. T ≥ T<sub>critique</sub> : Ignition

1. T < T<sub>critique</sub> : Réactions d'adsorption d'O<sub>2</sub>

4. T ≥ T<sub>critique</sub> : Décomposition de composés intermédiaires stables & début de pyrolyse & oxydation

2. T < T<sub>critique</sub> : Production de composés intermédiaires instables (R-O-O-R...)

3. T < T<sub>critique</sub> : Décomposition de composés intermédiaires instables et production de composés stables (carboxyle, carbonyle...)

Etapes 1, 2 & 3 :  
The oxygen-adsorption mass-gain



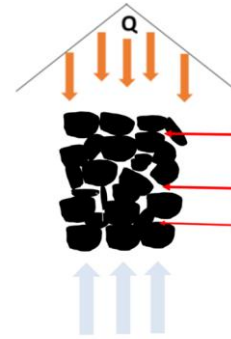
## Justification :

- “the chemisorption process gradually shifts to higher temperature regions as the oxygen concentration decreases.” [1]
- “the decreasing oxygen concentration limits the formation rates of the oxygenated intermediates.” [1]
- “the oxygen-adsorption mass-gain, has been demonstrated as an accurate factor reflecting the ignition behavior.” [1]

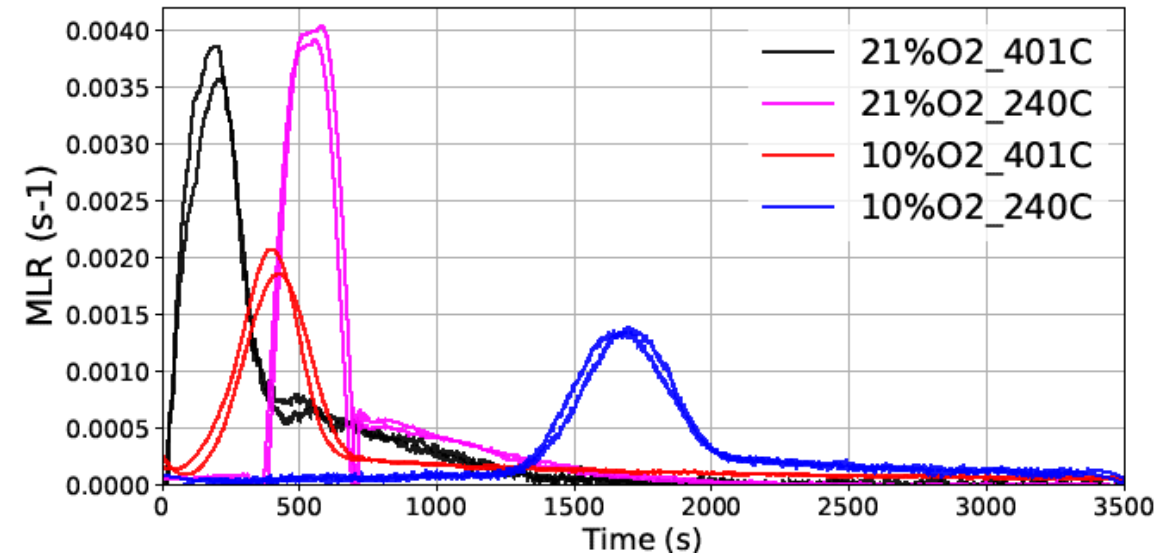
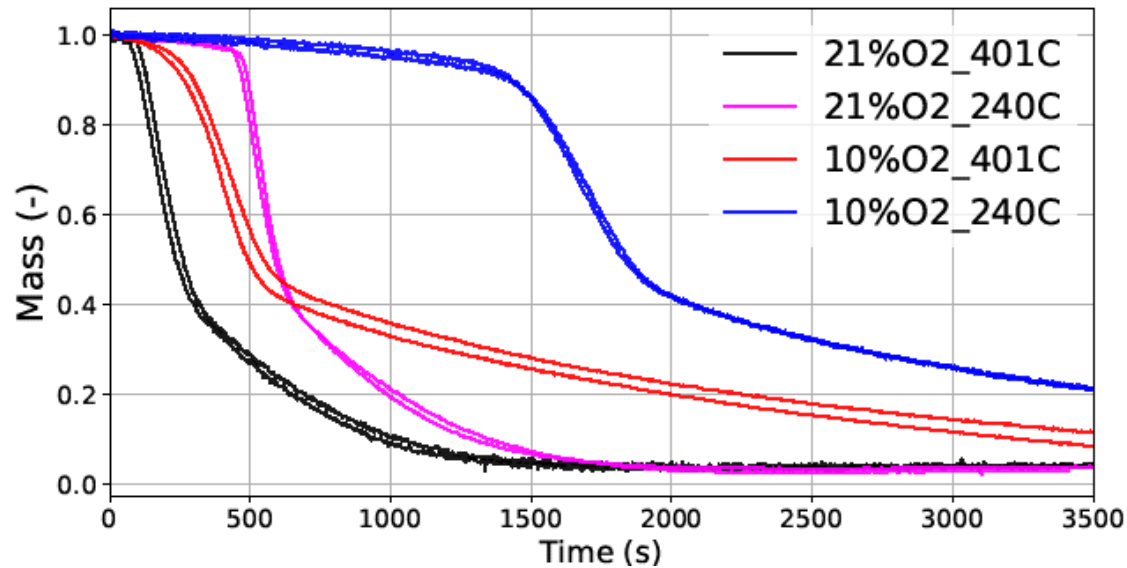
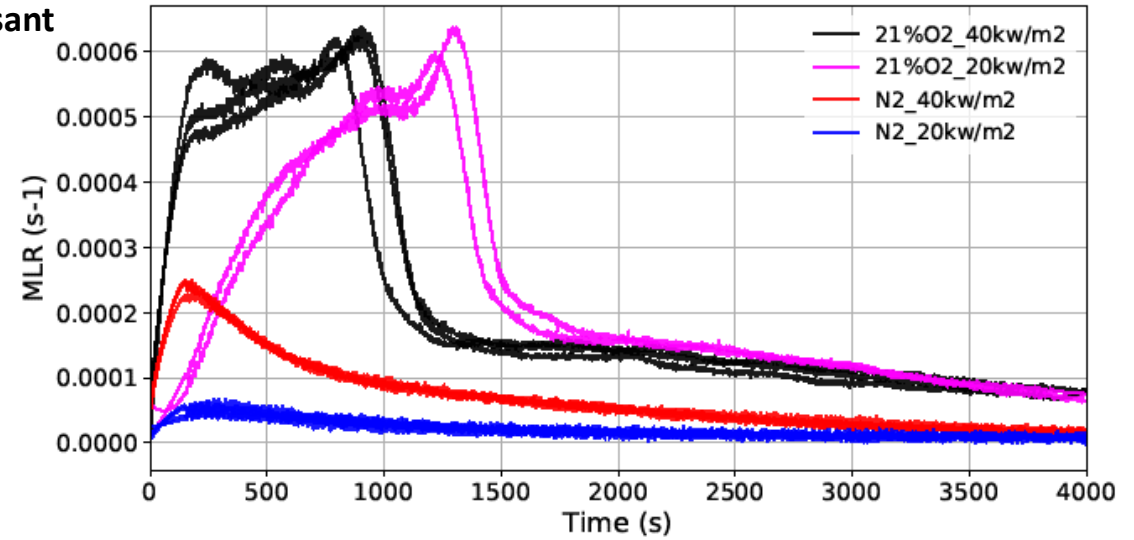
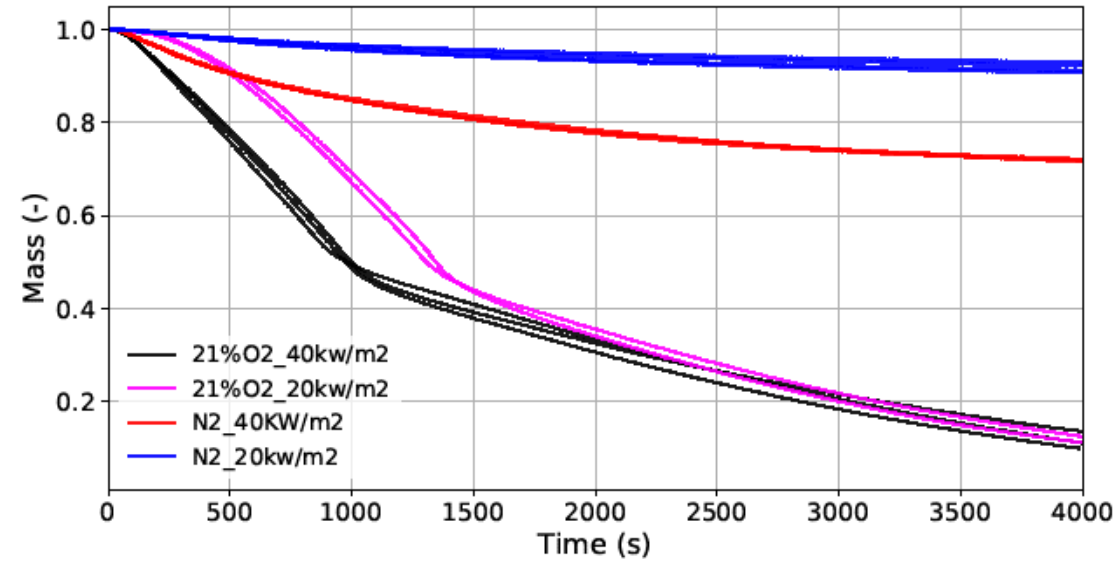
O <sub>2</sub> (%)	T (°C)
21	250
15	255
9	260

[1] Ma, Liyang, et al. "The competitive reaction mechanism between oxidation and pyrolysis consumption during low-rank coal combustion at lean-oxygen conditions: a quantitative calculation based on thermogravimetric analyses." *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 96.12 (2018): 2575-2585.

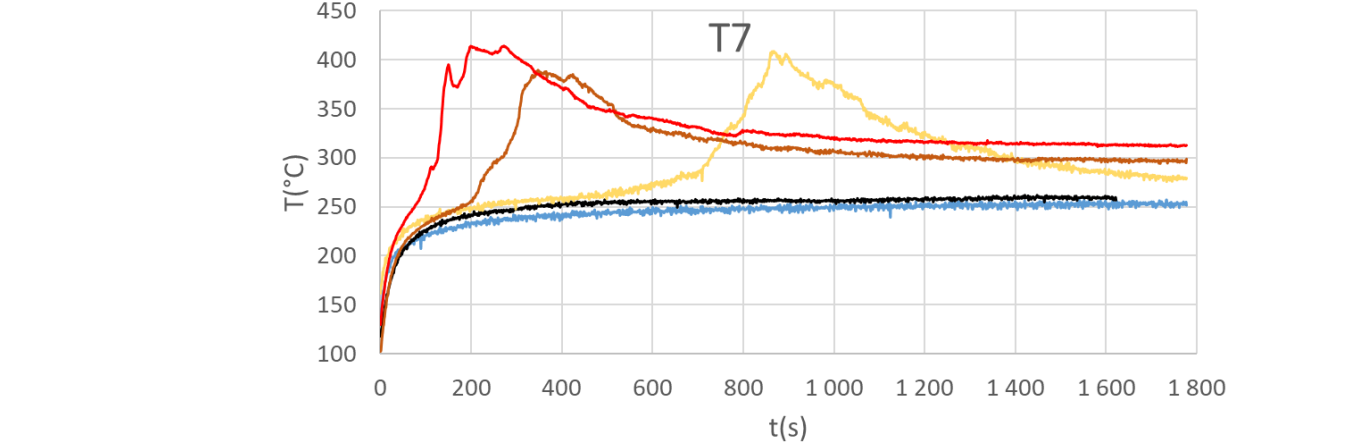
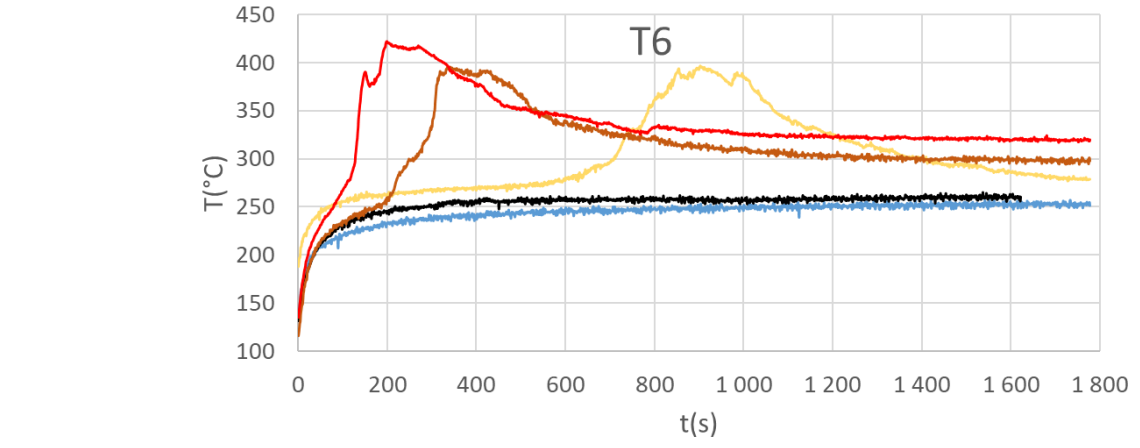
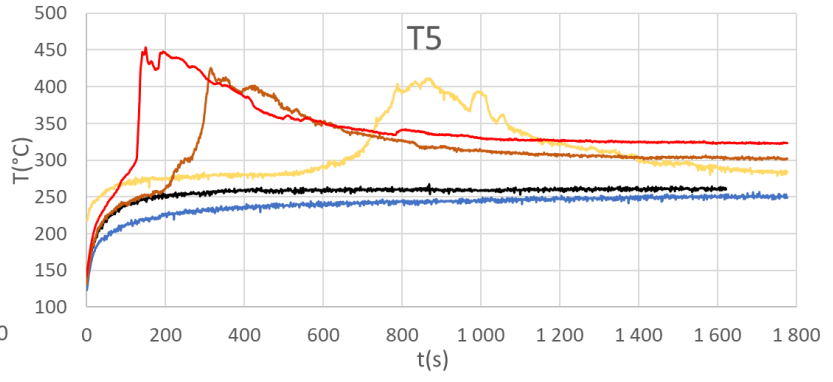
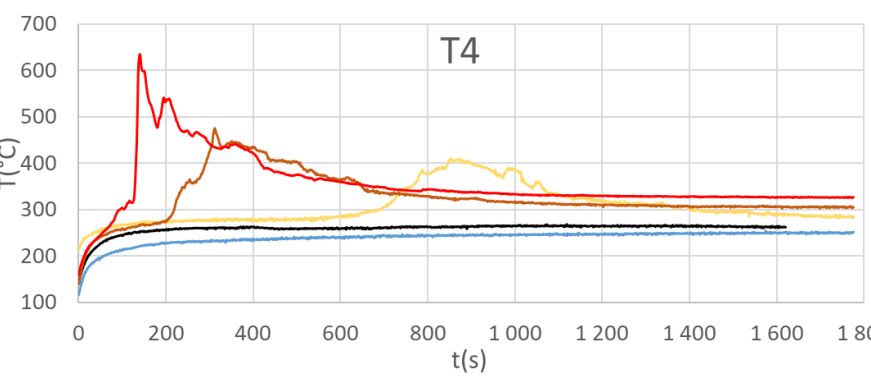
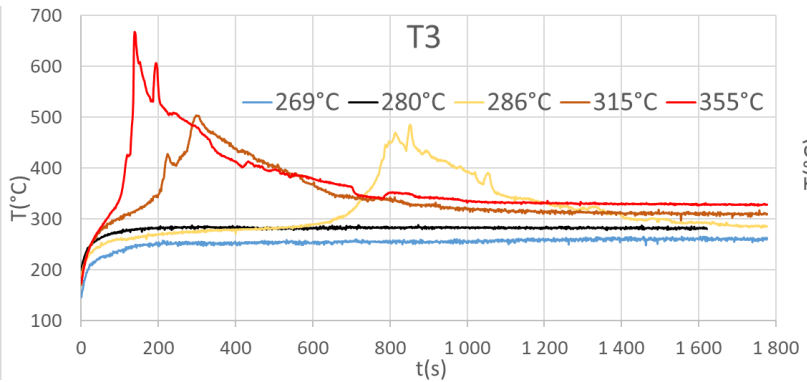
Banc CGT  
Cône Gaz Traversant



Banc Conduit



20g, 12% O<sub>2</sub>



## Observation

**355°C Temps d'inflammation : 149 s**

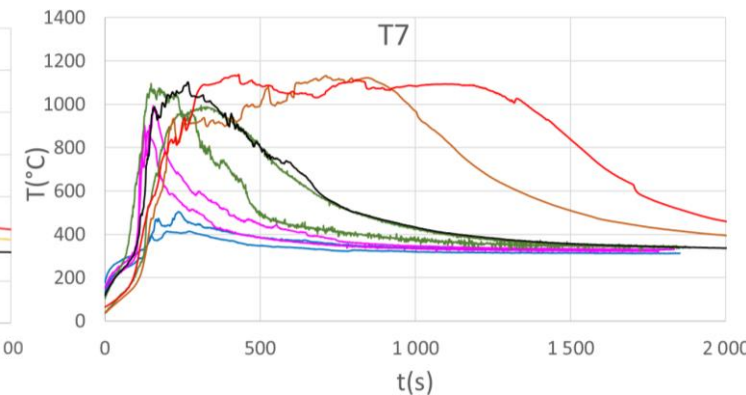
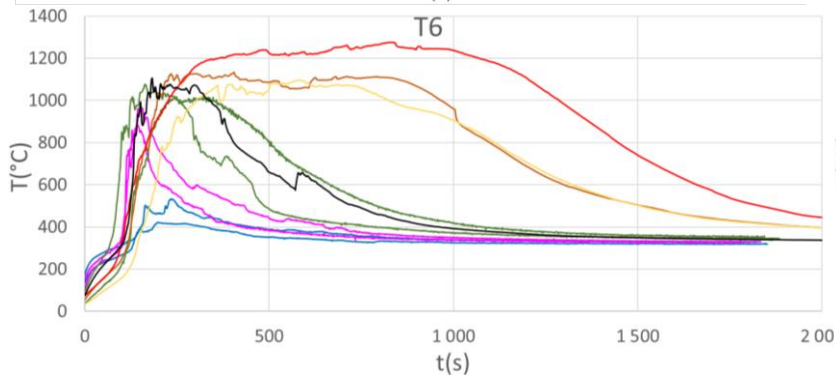
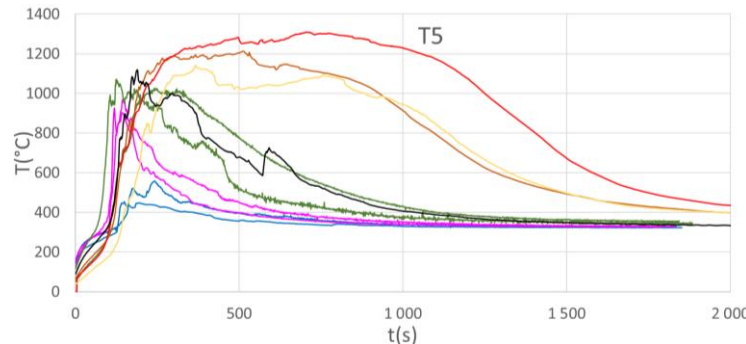
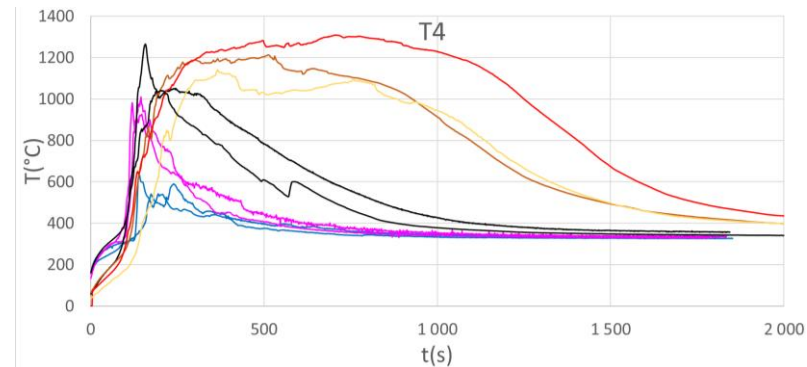
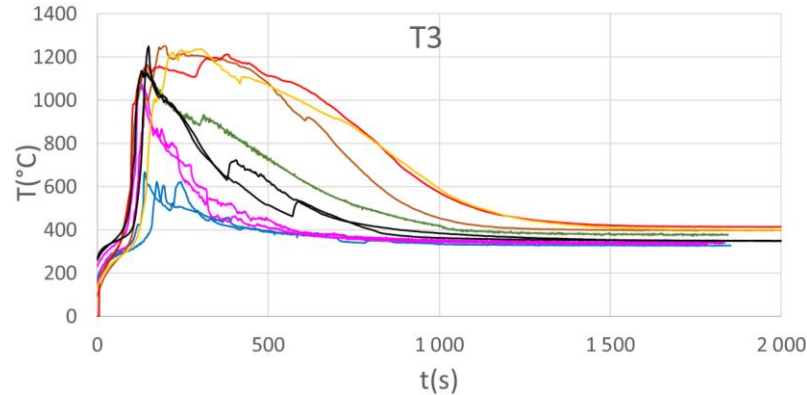
**315°C Temps d'inflammation : 252 s**

La température des gaz influence le temps d'inflammation & moment pic T(°C)

## Justification

Avec la même masse initiale du combustible (20g) et sous la même concentration d'O<sub>2</sub> (12% O<sub>2</sub>), l'augmentation de T<sub>gaz</sub> cause un apport plus important de chaleur, ce qui amène le mélange plus rapidement entre la LII et la LSI (temps des réactions diminue).





## Observations :

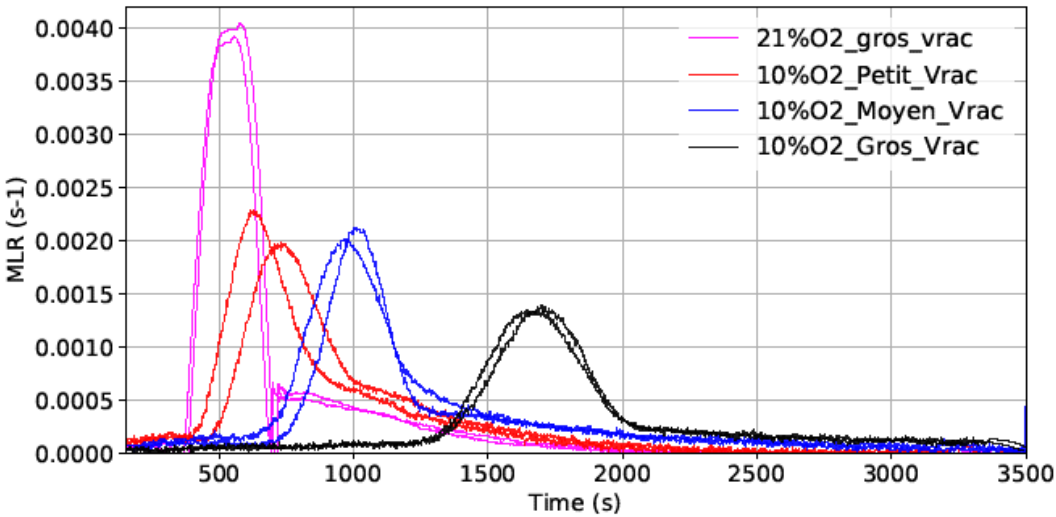
Masse de lignite	Temps d'inflammation (s)
100 g	135
50 g	115
20 g	137

- La masse n'influence pas considérablement le temps d'inflammation et sa sévérité (pic de  $T(^{\circ}\text{C})$ ), elle influence la durée de combustion.
- Moment d'augmentation de  $T(^{\circ}\text{C})$  est  $\approx$  le même pour les masses ( $\equiv$  temps d'inflammation).

## Justification:

- Sous les mêmes conditions :  $T$  gaz ( $355^{\circ}\text{C}$ ) et concentration d' $\text{O}_2$  ( $12\% \text{O}_2$ ), la masse initiale n'influence pas le moment d'inflammation ni son intensité (pic). Car faible masse et faible concentration d' $\text{O}_2$ , donc mélange reste proche des conditions stœchiométriques.
- Une masse initiale plus importante augmente la durée de combustion ( $12\% \text{O}_2$  et  $T$  gaz, conditions présentes durant toute la durée du test en conduit).

# Influence de la taille des particules (porosité du lit) sur l'inflammation

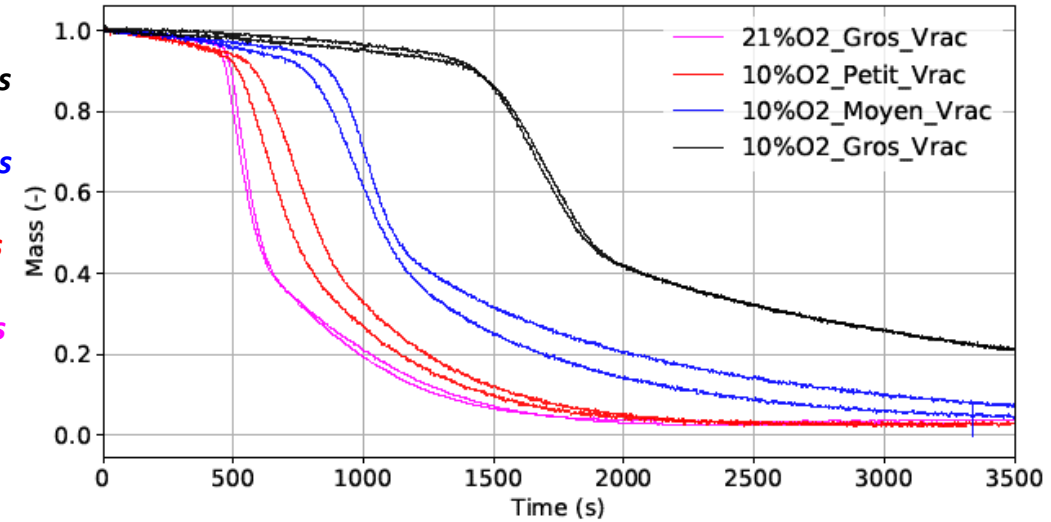


10% O<sub>2</sub> Gros Vrac: 1680 s

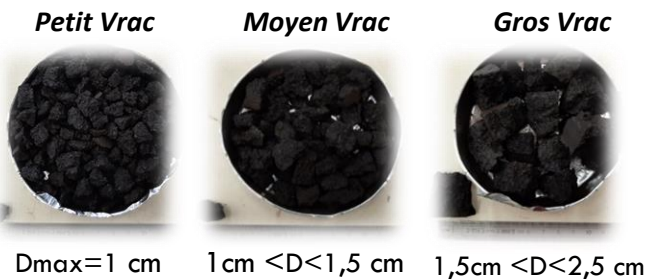
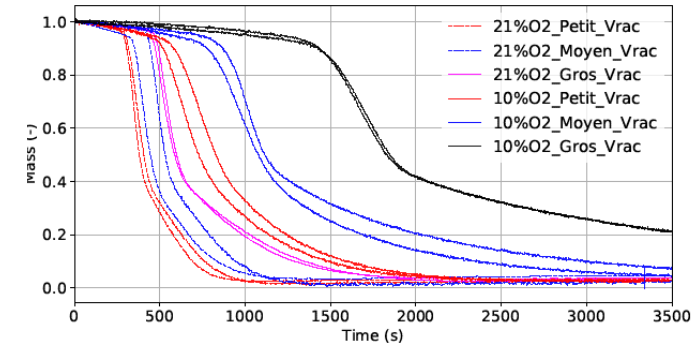
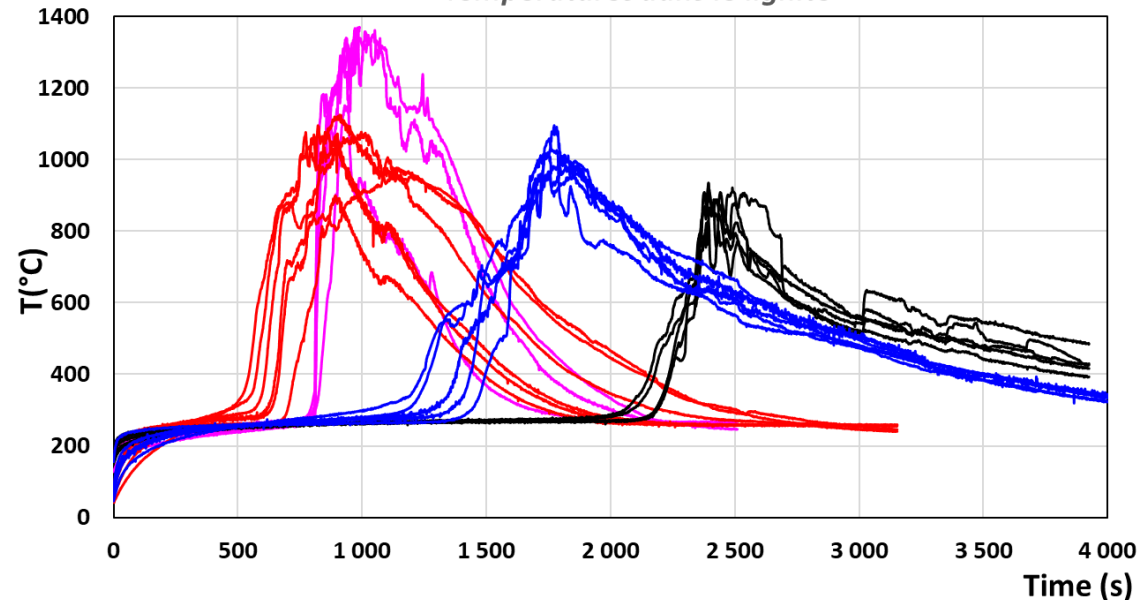
10% O<sub>2</sub> Moyen Vrac: 1351 s

10% O<sub>2</sub> Petit Vrac: 501 s

21% O<sub>2</sub> Gros Vrac: 360 s



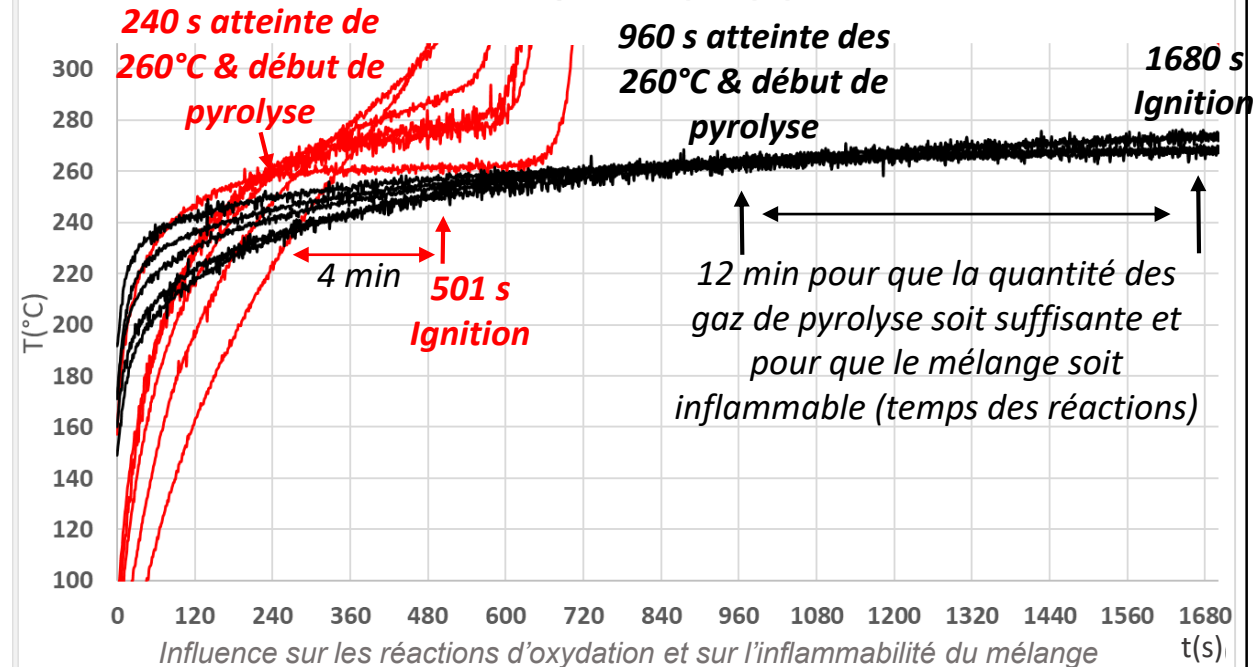
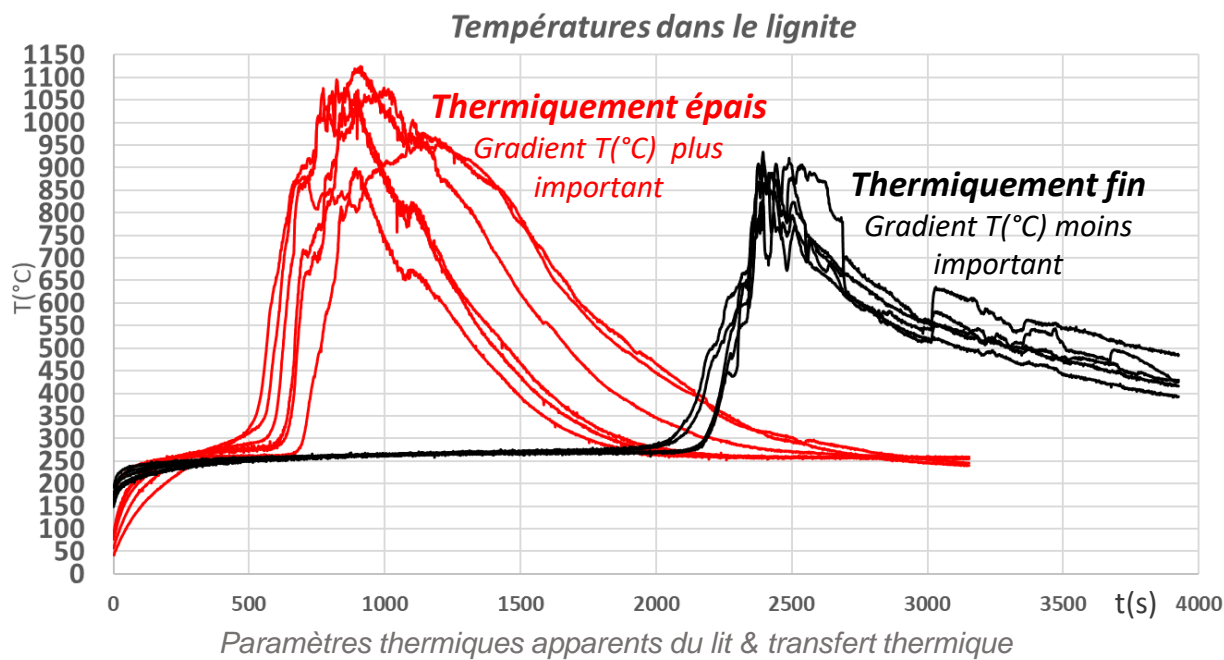
Températures dans le lignite



## Observations :

	<b>10% O<sub>2</sub> Petit Vrac</b>	<b>Temps d'inflammation : 501 s</b>
	<b>10% O<sub>2</sub> Gros Vrac</b>	<b>Temps d'inflammation : 1680 s</b>

## Justification :



	<b>Petites particules</b>	<b>Grandes particules</b>
	$\phi \sim 1,0 \text{ cm}$	$\phi \sim 2,0 \text{ cm}$
$S_{tot} \text{ (cm}^2\text{)}$	1560,29	1005,31
$S_{spé} \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	7,19	4,32

*Les surfaces spécifiques de contact avec l'O<sub>2</sub> sont plus importantes pour le petit vrac, plus de réactions hétérogènes et d'oxydation et amélioration du mélange O<sub>2</sub> et gaz.*

**Hypothèses** : Des essais [1] sur différents appareils à bûches montrent qu'en fonctionnement nominal, le pourcentage volumique d'oxygène dans un vrai conduit est en moyenne de 12% et la température de l'air est de 340°C.

### % d'O<sub>2</sub> minimale causant l'inflammation ?

- [8-10%] suffisent à l'inflammation

Paramètres fixes	% O <sub>2</sub>	Paramètres fixes	T gaz (°C)
masse minimale à partir de la série 2 Tgaz=355°C Petit Vrac	12% O <sub>2</sub>	12% O <sub>2</sub> masse minimale à partir de la série 2 Petit Vrac	355°C
	8-10% O <sub>2</sub>		315°C, 296°C, 286°C, 280°C
	7% O <sub>2</sub>		269°C

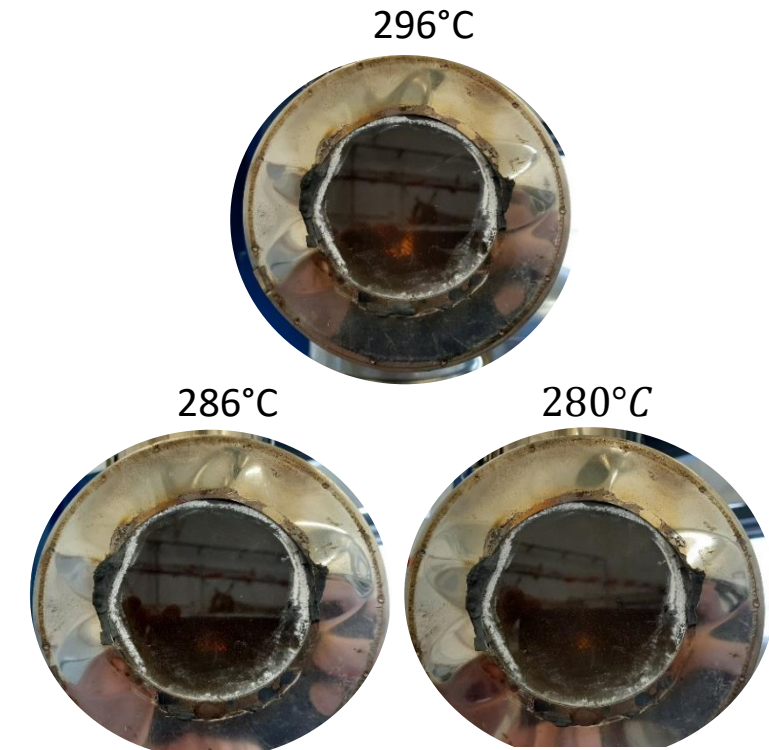
Paramètres fixes	Masse
12% O <sub>2</sub> Tgaz=355°C Petit Vrac	100g
	50 g, 30 g, 20 g
	15 g

### Masse minimale causant l'inflammation ?

- 20 g suffit à l'inflammation

### Température minimale causant l'inflammation ?

- T air de 280°C suffit à l'inflammation



Photos quelques secondes après inflammation

## Scientifiques

- ❑ Une meilleure compréhension de la combustion homogène et hétérogène d'un milieu poreux de lignite.

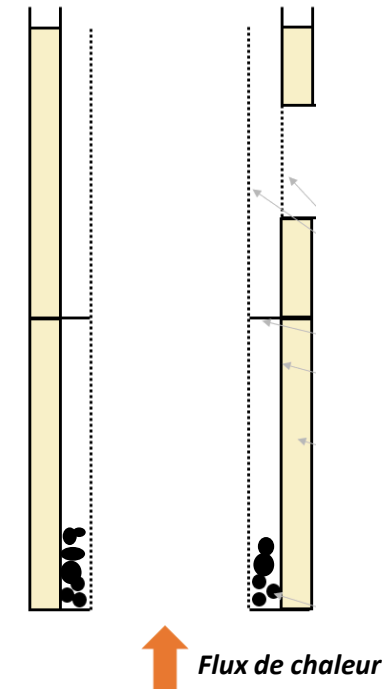


Echantillon sorti du CCAC  
(après un test sous air, sous  $20\text{kW/m}^2$ , pendant 5000 secondes)

- ❑ Compréhension de la combustion lente du lignite (SMOLDERING)
- ❑ ...

## Industrielles

- ❑ Campagne expérimentale à l'échelle réelle (lignite en configuration verticale) afin de déterminer les conditions d'inflammation des dépôts dans un vrai conduit de cheminée.



“A candle can lighten other candles without shortening its life. That is the case of knowledge. It never decreases by being shared !!”

S. Kellali



“A candle is a beautiful story of combustion.” S. Kellali

## Equipe :

### Combustion Hétérogène et Milieux Poreux & OPTIFUM

Pr. Thomas Rogaume, Dr. Franck Richard, Dr. Pierre Cremona, Dr. Benjamin Batiot,  
Mme Pauline Dias Lopes (Stagiaire PPRIME du 31/05/2021 au 24/09/2021, Banc Conduit), M. Marc Poisson (Assistant ingénieur de l'équipe)

Ce travail est un travail d'équipe !!! Et donc un grand merci à chacun de vous pour votre contribution !!!