



Belghit *et al.* (2000) [2], Muller *et al.* (2003) [3], Zedtwitz *et al.* (2007) [4], Z'Graggen and Steinfeld (2008) [5] ont proposé différents modèles en état stationnaire pour des différents réacteurs et arrangements. Ces modèles simulent la production des gaz combustibles à partir d'une source radiative concentrée qui n'est pas forcément de l'énergie solaire.

La gazéification des composés carbonés avec une source solaire en lit fluidisé est encore en développement, donc afin d'explorer la efficacité potentielle de ce procédé, un modèle pour simuler son comportement et rendements doit être mis en place.

## 2. Développement du modèle

Le gazéifieur est un réacteur cylindrique en lit fluidisé avec trois pseudo-phases, deux phases gazeuses et une phase solide. La première phase gazeuse est celle concentrée dans les bulles, la deuxième est celle contenue dans l'émulsion gaz –solide (cf. figure 1).

Etant donné que le transfert de chaleur par conduction des solides est considérablement diminué dans un lit fluidisé, et pour une meilleure distribution de la température, les solides sont introduits par le haut du lit (Cf. figure 2), de cette manière les particules chaudes de la surface descendent jusqu'au fond du réacteur.

### 2.1. Bilans de matière et énergie

#### 2.1.1. Hypothèses principales

Les hypothèses suivantes ont été prises en compte pour le développement du modèle :

- Pendant le processus de gazéification, aucun gaz inerte n'a été utilisé
- Les gaz ont un comportement de gaz parfait
- Les bulles ne contiennent pas de solides
- Les paramètres du système changent que dans la direction Z
- Les particules de « char » sont des sphères, selon la théorie de « shrinking core model » le diamètre moyen demeure constant
- Le système est préchauffé avec un gaz inerte pour que la pyrolyse ait lieu et pour éviter une condensation de la vapeur.
- Le « biochar » a seulement carbone et cendres
- L'interaction avec les parois est négligée

#### 2.1.2. Equations des bilans

La figure 2 montre le volume de contrôle pour le développement du modèle.

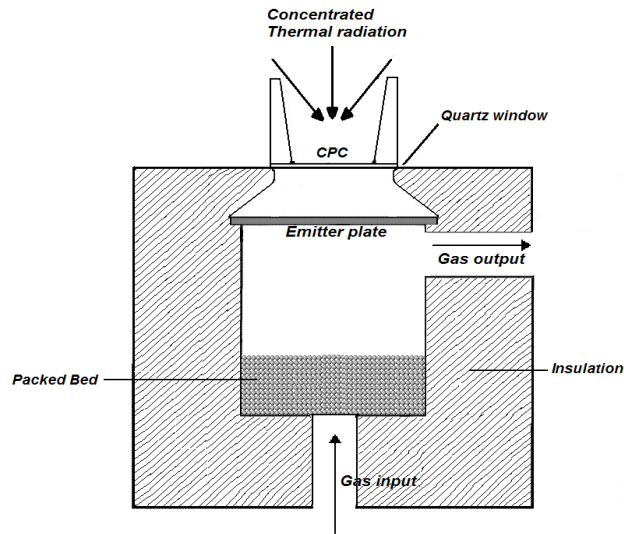
- Bilan masse du gaz  $i$  contenu dans les bulles

$$\frac{\partial(\delta_b C_{ib})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left( D_{ib} \frac{\partial C_{ib}}{\partial Z} \right) - \frac{\partial(\delta_b U_b C_{ib})}{\partial Z} - \delta_b K_{be} (C_{ib} - C_{ie}) + \delta_b \alpha_{i1} r_{b1} \quad (1)$$

- Bilan masse du gaz  $i$  contenu dans l'émulsion

$$\frac{\partial(\delta_e C_{ie})}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left( D_{ie} \frac{\partial C_{ie}}{\partial Z} \right) - U_e \frac{\partial(\delta_e C_{ie})}{\partial Z} + \delta_e K_{be} (C_{ib} - C_{ie}) + \delta_e \alpha_{i1} r_{e1} + \frac{1}{A_R} \frac{dA_S}{dZ} \sum_{j=2}^4 \alpha_{ij} r_j \quad (2)$$

(a)



(b)

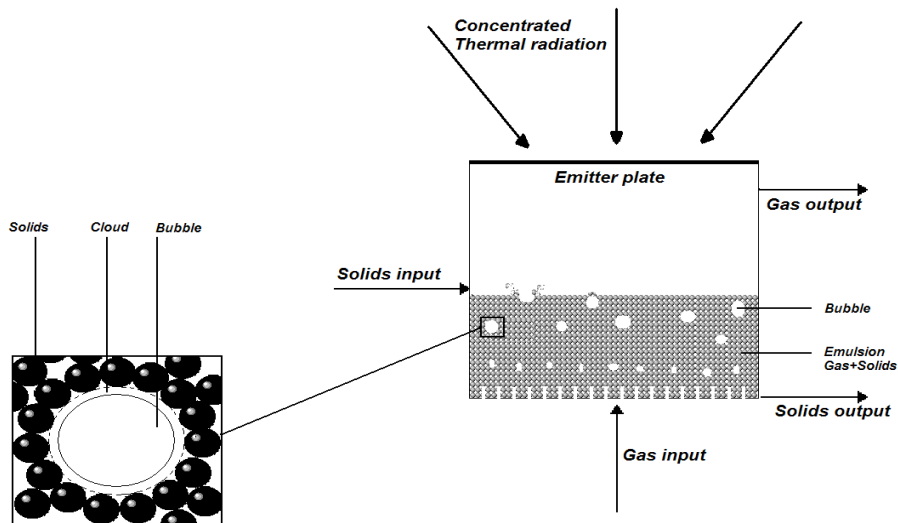


Figure.1. Gazéifieur à énergie solaire concentrée. (a) Arrangement expérimental fait par Piatkowski et al (2009) (b) réacteur simulé.

- Bilan masse du solide

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \dot{m}_s - \dot{m}_e + \frac{1}{A_R} \frac{dA_S}{dz} \sum_{j=2}^4 \alpha_{ij} r_j \quad (3)$$

- Conditions initiales

$$\text{en } t = 0 \quad \begin{cases} C_{ib} = C_{i0} \\ C_{ie} = C_{i0} \\ M = M_0 \end{cases} \quad (4)$$

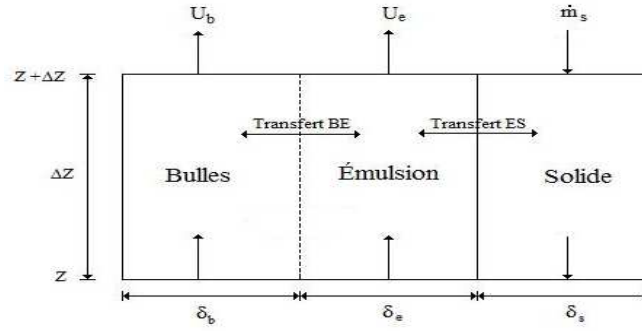


Figure 2. Volume de contrôle dans le réacteur

- Bilan d'énergie du gaz  $i$  contenu dans les bulles

$$\sum_{i=1}^5 \frac{\partial}{\partial t} (\delta_b C_{ib} C p_i(T_b) T_b) = - \frac{\partial}{\partial Z} (\delta_b U_B \sum_{i=1}^5 C_{ib} C p_i(T_b) T_b) - \frac{1}{A_R} \frac{dA_B}{dZ} h_{be} (T_b - T_e) + \delta_b r_{b1} \Delta H_{r,1} \quad (6)$$

- Bilan d'énergie du gaz  $i$  contenu dans l'émulsion

$$\sum_{i=1}^5 \frac{\partial}{\partial t} (\delta_e C_{ie} C p_i(T_e) T_e) = - \delta_e U_E \frac{\partial}{\partial Z} (\sum_{i=1}^5 C_{ib} C p_i(T_e) T_e) + \frac{1}{A_R} \frac{dA_B}{dZ} h_{be} (T_b - T_e) - \frac{1}{A_R} \frac{dA_S}{dZ} h_{se} (T_e - T_s) + \delta_e r_{e1} \Delta H_{r,1} + \frac{1}{A_R} \frac{dA_S}{dZ} \sum_{j=2}^4 r_j \Delta H_{r,j} \quad (7)$$

- Bilan d'énergie du solide

$$\frac{\partial}{\partial t} (\delta_s \rho_s C p_s T_s) = \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_e \frac{\partial T_s}{\partial Z} + Q_r \right) \frac{1}{V_R} + (\dot{m}_s C p_s T_s - \dot{m}_s C p_s T_s) + \frac{1}{A_R} \frac{dA_S}{dZ} h_{se} (T_e - T_s) - \frac{1}{A_R} \frac{dA_S}{dZ} \sum_{j=2}^4 r_j \Delta H_{r,j} \quad (8)$$

- Conditions initiales

$$\text{en } t = 0 \quad \begin{cases} T_b = T_{bi} \\ T_e = T_{bi} \\ T_s = T_{s0} \end{cases} \quad (9)$$

- Conditions aux limites

$$\text{en } Z = 0 \text{ et } t \geq 0 \quad \begin{cases} T_b = T_{bi} \\ T_e = T_{bi} \end{cases} \quad \text{en } Z = H \text{ et } t \geq 0 \quad \begin{cases} \frac{\partial T_b}{\partial Z} = 0 \\ \frac{\partial T_e}{\partial Z} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Pour la condition limite de la température du solide en  $Z = H$ , il est commode de la présenter sous forme de bilan thermique. Ce bilan est fait en prenant en compte les rayons solaires concentrés et la masse de solide introduite à la température ambiante. Le bilan s'écrit alors comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\delta_s \rho_s C p_s T_s) = \frac{\partial}{\partial Z} \left( \lambda_e \frac{\partial T_s}{\partial Z} + Q_r \right) \frac{1}{V_R} (\dot{m}_s C p_s T_s - \dot{m}_e C p_s T_{amb}) + \frac{1}{A_R} \frac{dA_S}{dZ} h_{se} (T_e - T_s) - \frac{1}{A_R} \frac{dA_S}{dZ} \sum_{j=2}^4 r_j \Delta H_{r,j} + \varepsilon \sigma (T_{plaque}^4 - T_s^4) \quad (11)$$

La température de la plaque émettrice est calculée comme suit :

$$\frac{dT_{plaque}}{dt} = \frac{Q_r \text{ solaire}}{M_{plaque} C p_{plaque}} \quad (12)$$

### 3. Résultats

#### 3.1.1. Résultats en état transitoire

La figure 4 montre le profil de température du lit pour un rapport de vitesses ( $U/U_{mf}$ ) de 1.5 et pour un taux d'alimentation de « char » de  $2.8 \times 10^{-3}$  kmol/s.

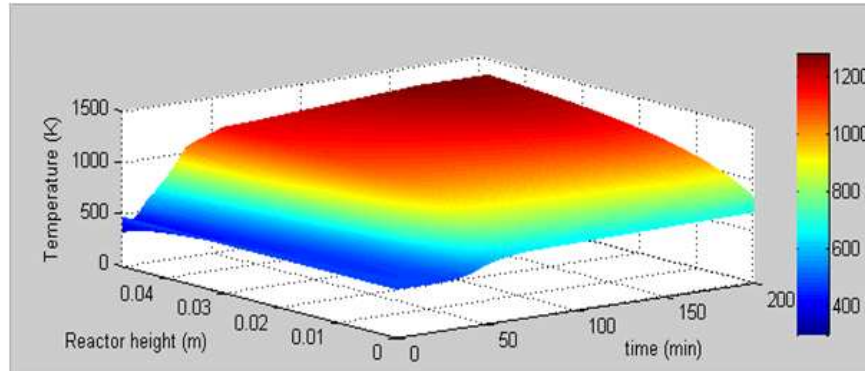


Figure 4. Profil de températures dans le gazéifieur

L'hydrogène demeure le produit principal suivi du monoxyde du carbone, la production de dioxyde de carbone reste petite est celle du méthane est négligeable. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés expérimentalement par Piatkowski et al (2009) [1] pour les composés avec un haut contenu en carbone.

Au début de la simulation, pendant que les solides sont chauffés la production des gaz est négligeable (Cf. Figure 5). Une fois les solides en haut du réacteur atteignent une température considérable ( $>1000$  K, entre 20 et 40 min) la production des gaz est augmentée rapidement. Quand la température de solides commence à se stabiliser, la pente de production de solides diminue pour finalement attendre l'état stationnaire.

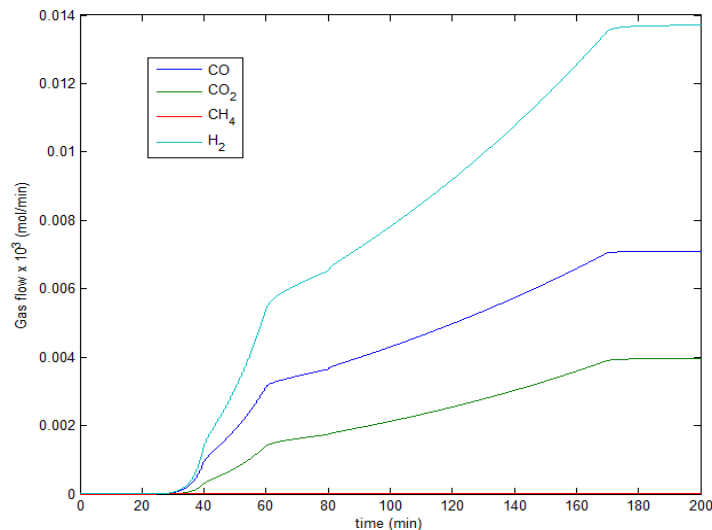


Figure 5. Production des gaz avec le temps pour  $\dot{m}_e = 2.8 \times 10^{-3}$  et  $\frac{U}{U_{mf}} = 1.5$

#### 3.1.2. Résultats en état stationnaire

Nous présentons dans cette partie les résultats issus des simulations lorsque l'état stationnaire est atteint, ou bien, lorsque le modèle converge. Le modèle est capable de

déterminer les caractéristiques des gaz et celles du solide tout au long du réacteur en fonction des variables de contrôle.

La figure 6 présente les résultats en état stationnaire. On y peut constater que pour des grandes vitesses des gazes la production des principaux produits est diminuée.

L'augmentation de la vitesse des gaz empêche le lit de retenir la chaleur jusqu'à la base du réacteur ce qui a comme conséquence la réduction de la production

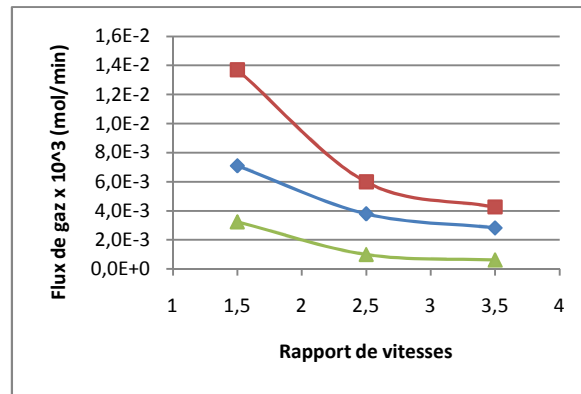


Figure 6. Effets du rapport de vitesse sur les concentrations des produits, (■) H<sub>2</sub> (◆) CO, (▲) CO<sub>2</sub>;  $\dot{m}_e = 1.4 \times 10^{-3}$

#### 4. Conclusion chaude de la surface descend jusqu'au fond du réacteur

En raison de la nature du lit fluidisé, la conductivité thermique faible et une porosité considérable, il existe un gradient de température très prononcé dans le lit, ce qui indique que le système est fortement non-isotherme (Cf. figure 4). La mise en place d'un lit fluidisé avec l'irradiation solaire dans la partie supérieure du réacteur est à un système moins efficace de gazéification en comparaison avec un lit fixe, mais pourrait être optimisé la source de chaleur est changé sur le fond du réacteur.

Les tendances et les réponses du modèle sont en bon accord avec les tendances expérimentales rapportées dans la littérature. L'hydrogène est le produit principal suivi par le monoxyde de carbone, la production de dioxyde de carbone est faible et la production de méthane est négligeable, ce qui indique une production de gaz de synthèse de haute qualité.

#### Références

- [1] Piatkowski N., Wieckert C., Steinfeld A. Experimental investigation of a packed-bed solar reactor for the steam-gasification of carbonaceous feedstocks, *Fuel processing technology*, (2009), 90:360-366.
- [2] Belghit A., Daguene M., Reddy A. Heat and mass transfer in a high temperature packed moving bed subject to an external radiative source. *Chemical engineering science*. (2000), 55:3967-3978.
- [3] Muller R., Zedtwitz P., Wokaun A., Steinfeld A. Kinetic investigation on steam gasification of charcoal under direct high-flux irradiation, *Chem. Eng. Sci.*, (2003), 58:5111-5119.
- [4] Zedtwitz P., Lipinski W., Steinfeld A. Numerical and experimental study of gas-particle radiative heat exchange in a fluidized-bed reactor for steam-gasification of coal, *Chem. Eng. Sci.*, (2007), 62:599-607.
- [5] A. Z'Graggen, A. Steinfeld. A two-phase reactor model for steam gasification of carbonaceous materials under concentrated thermal radiation. *Chemical engineering and processing*. (2008), 47: 655-662.