

Utilisation du modèle de combustion de biomasse

Sur le plan thermodynamique, les principaux paramètres qui influencent la combustion de la biomasse sont les suivants :

- en premier lieu, bien évidemment, la composition du combustible
- en second lieu, son humidité, qui d'une part détermine l'enthalpie nécessaire au séchage, d'autre part joue sur la composition des gaz, et enfin influence la dissociation du CO_2
- enfin, la température de figeage et le taux de dissociation du CO_2

Afin de séparer autant que possible l'influence de ces deux premiers paramètres, la composition sera celle du combustible sec, et l'humidité sera prise en compte par un apport d'eau. Etant donné que l'humidité globale n'est pas nécessairement celle qui régit l'équilibre thermodynamique, une partie de la vapeur d'eau pouvant, pour des raisons de cinétique ou de géométrie, ne pas réagir, nous introduirons un paramètre complémentaire, égal à la fraction de l'eau intervenant dans la combustion. Physiquement, cela signifie qu'une fraction de l'eau n'est pas dissociée : elle demande à être vaporisée et joue sur la composition des gaz comme si elle était inerte.

La classe externe BiomassCombustion correspond à un modèle simplifié. On se reportera à sa documentation pour des explications détaillées sur son fonctionnement. Dans cette note, nous montrerons comment elle peut être utilisée pour simuler une combustion simple ou un gazéifieur.

Définition du combustible et déroulement de la combustion

La définition du combustible dans Thermoptim sera faite de la manière suivante (figure 1) :

- la composition du gaz sec, hors espèces non prises en compte dans le noyau de Thermoptim est estimée, par exemple dans un tableur, et entrée sous forme d'un gaz composé (transfo-point "dry fuel")
- les espèces non considérées par le noyau de Thermoptim sont prises en compte séparément : elles sont entrées dans l'écran du composant, et font l'objet d'une précombustion
- le gaz sec est mélangé à de l'eau (vapeur condensable « eau ») pour former le combustible humide (transfo-point "humidity")
- la combustion finale est réalisée grâce aux fonctions du noyau de Thermoptim, qui sont émulées depuis la classe externe (mélangeur externe "biomass combustion"), en tenant compte de la précombustion et de l'enthalpie qui aurait été nécessaire pour vaporiser l'eau

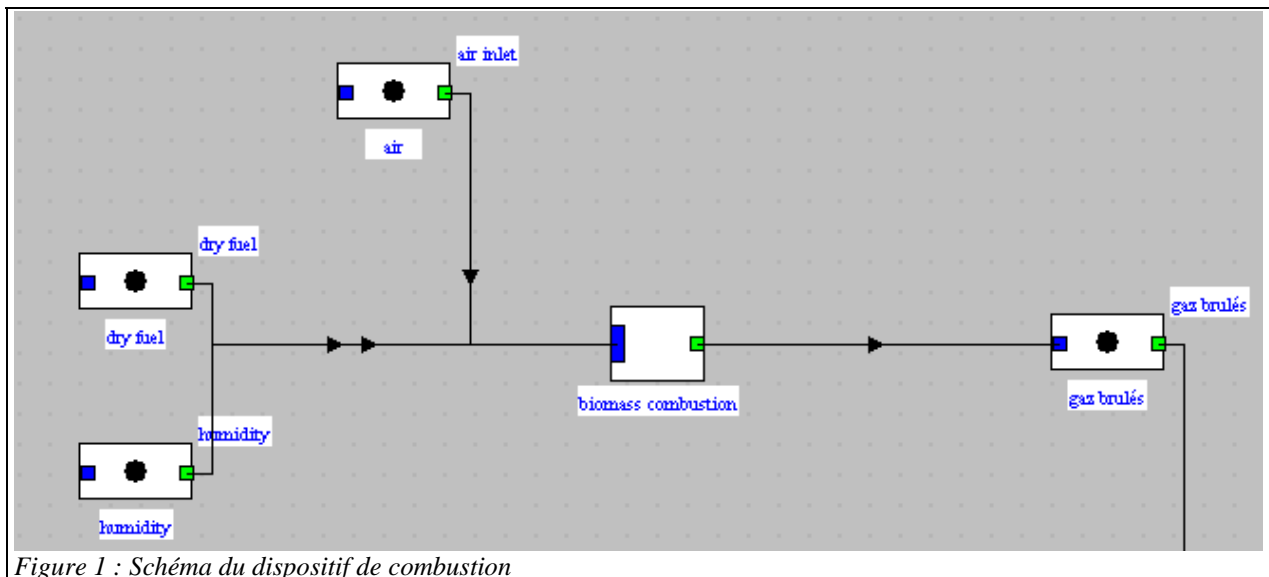


Figure 1 : Schéma du dispositif de combustion

Le comburant (généralement de l'air) est quant à lui défini dans la transfo-point "air inlet". Les débits mis en jeu sont eux aussi spécifiés dans chacune des trois transfos-points en entrée du mélangeur externe. Leurs rapports respectifs permettent ainsi de jouer sur l'humidité du combustible et sur l'excès d'air.

Attention : le mélangeur externe "biomass combustion" doit être **connecté à des transfos-points** et non pas à d'autres types de transfos, faute de quoi l'état des points n'est pas correctement mis à jour. Par ailleurs, dans le cas où le combustible et le comburant sont à des températures différentes, la température choisie pour la transfo-point apportant l'eau doit être choisie sur la base d'un raisonnement physique adéquat pour refléter la répartition de l'humidité entre ces deux flux entrants.

Exemple de combustion en excès d'air

Dans cet exemple simulant une chaudière brûlant de la biomasse, la combustion est réalisée en excès d'air.

La figure 2 montre l'écran du composant permettant de modéliser la combustion de la biomasse. Dans le cas présenté, on fait l'hypothèse que le combustible comprend 0,634 % d'ammoniac et 10,5 % de carbone rapportés à la masse sèche, que la température de figeage est égale à 900 °C, que le taux de dissociation du CO₂ vaut 0,05, et que toute l'humidité participe à la combustion.

noeud **biomass combustion** type **external mixer**

veine principale **afficher** m global 12,639175

gaz brûlés h global 1 722,91314717

☐ isobare T global 1 321,37888966

☒ système ouvert ☐ système fermé

Calculer

nom transfo	m abs	T (°C)	H
air	10	20	-4,86
dry fuel	1,25	20	-6,42
humidity	1,25	20	83,99

ajouter une branche

supprimer une branche

biomass combustion

NH3 (% dry mass) 0.634 ashes (% dry mass) 10.0

C solid (% dry mass) 10.50 LHV (kJ/kg fuel flow) 8688.07

quench T (°C) 900.00

CO2 diss. rate 0.0500 ☐ including outlet LHV

H2O in combustion (%) 100.0

lambda 1.22896

Figure 2 : composant combustion de biomasse

1,25 g/s de combustible sec, de composition donnée figure 3, d'humidité 50 % en masse (débit d'eau de 1,25 g/s) sont brûlés avec 10 g/s d'air sec, conduisant à un facteur d'air $\lambda = 1,23$. La composition des gaz brûlés est donnée figure 4.

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
O2	0,01374655	0,01641626
H2	0,1041061	0,007832275
C2H6 ` éthane	0,1096048	0,1230014
CO2	0,2733782	0,4490144
CO	0,2348086	0,2454598
CH4 ` méthane	0,2643558	0,1582759

Figure 3 : composition du gaz sec (PCI : 17,2 MJ/kg)

Sur la figure 2, outre les valeurs relatives au gaz brûlés (débit, température, enthalpie), les grandeurs affichées sont le facteur d'air λ et le taux de dissociation du CO₂ (si $\lambda > 1$, c'est une entrée, sinon il est recalculé).

Des cendres peuvent être prises en compte dans le calcul du PCI. Deux modes sont prévus : soit inclure la valeur du PCI des gaz sortant du composant, soit ne pas en tenir compte. Dans le cas d'un gazéifieur comme ici, ce PCI sera valorisé en aval, ce qui justifie qu'il ne soit pas comptabilisé.

Le PCI affiché est ramené au kg de combustible, en incluant son humidité et les cendres éventuelles.

L'enthalpie totale correspondant à ce PCI est prise en compte dans le bilan global comme énergie payante.

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,1180614	0,1892233
H2O	0,2398588	0,1573671
O2	0,03282001	0,03824633
N2	0,5864343	0,5982773
CO	0,006213756	0,006338563
H2	0,009859662	0,0007238424
Ar	0,006752062	0,009823597

Figure 4 : composition du gaz humide (PCI : 0,15 MJ/kg)

Exemple de combustion en défaut d'air (gazéifieur)

La gazéification de la biomasse correspond à l'oxydation partielle d'une ressource organique, principalement composée de cellulose ($C_6H_{10}O_5$), pour produire un gaz de synthèse. La biomasse étant généralement très humide, l'oxydation s'effectue en quatre étapes successives :

- séchage du combustible ;
- pyrolyse ou carbonisation (en défaut d'oxygène), produisant des goudrons et du carbone
- combustion du carbone et de l'oxygène, réaction exothermique assurant entre autres le séchage du combustible
- réduction du CO_2 , de H_2 et de l'eau par le carbone et les goudrons

En réalisant une combustion en défaut d'air, on peut modéliser un gazéifieur (figure 5) à tirage vers le bas en utilisant la classe BiomassCombustion. Nous avons supposé ici que 50 % de l'humidité du combustible seulement intervient dans la combustion, le reste ne participant pas à la combustion.

The screenshot shows the 'biomass combustion' component configuration in a software interface. The 'type' is set to 'external mixer'. The 'veine principale' (main vein) is 'gaz brûlés' (burnt gas), with an 'afficher' (show) button. The 'isobare' checkbox is unchecked. Global parameters are displayed: m global = 5,839175, h global = 513,18924958, and T global = 381,57508669. The 'système ouvert' (open system) radio button is selected. A 'Calculer' (calculate) button is present. Below these are buttons for 'ajouter une branche' (add branch) and 'supprimer une branche' (remove branch). A table lists the input streams:

nom transfo	m abs	T (°C)	H
air	3,2	20	-4,86
dry fuel	1,25	20	-6,42
humidity	1,25	20	83,99

Below the table, the 'biomass combustion' section contains various input fields:

- NH3 (% dry mass): 0.634
- C solid (% dry mass): 10.50
- quench T (°C): 900.00
- CO2 diss. rate: 0.5871
- H2O in combustion (%): 50.0
- lambda: 0.23923
- ashes (% dry mass): 10.0
- LHV (kJ/kg fuel flow): 2212.29
- including outlet LHV: (unchecked)

Figure 5 : composant gazéifieur de biomasse

Comme nous l'avons dit, les débits de combustible, d'eau et de comburant en entrée jouent bien évidemment un rôle fondamental : leurs rapports influencent directement la composition du gaz de synthèse (figure 6).

Dans cet exemple, l'humidité du combustible est égale à 50 % en masse, les débits des deux transfos "dry fuel" et "humidity" étant égaux. Le débit d'air étant inférieur à celui qui aurait assuré une combustion stoechiométrique (environ 7,8 kg/s), la combustion a lieu en défaut d'air et le taux de dissociation du CO₂ est recalculé.

La température du gaz de synthèse dépend beaucoup la chaleur de réaction, elle-même fonction de l'oxygène disponible : s'il y en a très peu, c'est essentiellement du CO qui est produit, avec peu de CO₂.

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO ₂	0,09095625	0,1780174
H ₂ O	0,2800306	0,2243506
O ₂	0	0
N ₂	0,3332404	0,4151491
CO	0,1293294	0,1611006
H ₂	0,1626134	0,01457812
Ar	0,003829836	0,006804206

Figure 6 : composition du gaz de synthèse brut (PCI : 3,4 MJ/kg)

Ce gaz de synthèse brut, très humide, peut être lavé et partiellement déshydraté, en utilisant la classe WaterQuench (figure 7), conduisant à un gaz de synthèse propre de composition donnée figure 8.

noeud type

veine principale m global

h global

☐ isobare T global

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
clean syngas	4,6682	4,6682	29	5,21
eau condens...	41,171	41,171	17,45	73,32

water quench

outlet rel. humidity

inlet rel. humidity : 1.000 epsilon : 0.949

ΔQ' : -1284.084 UA : 10.988

water involved : -1.17099 NUT : 3.017

approach (°C) : 364.127 R : 0.022

range (°C) : 7.449 DTML : 116.871

Figure 7 : Ecran du composant "water quench"

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,1213256	0,2226726
H2O	0,03963997	0,02978099
O2	0	0
N2	0,4445061	0,5192881
CO	0,1725113	0,2015123
H2	0,2169084	0,01823501
Ar	0,00510858	0,008511023

Figure 8 : composition du gaz de synthèse propre (PCI : 4,2 MJ/kg)

Le paramétrage précédent correspond à une biomasse très humide, avec l'hypothèse que 50 % de l'eau participe à la combustion. Dans le paramétrage ci-dessous, on considère le même combustible sec, avec une humidité de 18 % environ, dont seulement 85 % participe à la combustion.

noeud type

veine principale m global h global T global

☐ gaz brûlés ☐ isobare ☒ système ouvert ☐ système fermé

nom transfo	m abs	T (°C)	H
air	3,2	20	-4,86
dry fuel	1,25	20	-6,42
humidity	0,25	20	83,99

biomass combustion

NH3 (% dry mass) ashes (% dry mass)

C solid (% dry mass) LHV (kJ/kg fuel flow)

quench T (°C) ☐ including outlet LHV

CO2 diss. rate

H2O in combustion (%)

lambda

Figure 9 : composant gazéifieur de biomasse

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,08701678	0,1615728
H2O	0,1129561	0,08585517
O2	0	0
N2	0,4238407	0,5009383
CO	0,1931595	0,2282711
H2	0,1781559	0,01515237
Ar	0,004871079	0,008210274

Figure 10 : composition du gaz de synthèse brut (PCI : 4,1 MJ/kg)

noeud type

veine principale m global

h global

☐ isobare T global

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
clean syngas	4,5584	4,5584	29	5,13
eau condens...	80,2808	80,2808	21,45	90,05

water quench

outlet rel. humidity

inlet rel. humidity : 1.000 epsilon : 0.976

$\Delta Q'$: -3847.009 UA : 18.798

water involved : -0.28079 NUT : 3.770

approach (°C) : 778.980 R : 0.015

range (°C) : 11.449 DTML : 204.651

Figure 11 : Ecran du composant "water quench"

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO2	0,09420891	0,1715257
H2O	0,03963997	0,02954352
O2	0	0
N2	0,4588721	0,5317963
CO	0,2091245	0,2423327
H2	0,1928808	0,01608576
Ar	0,005273684	0,00871603

Figure 12 : composition du gaz de synthèse propre (PCI : 4,4 MJ/kg)

Conclusion

Nous disposons d'un modèle permettant de simuler différents types de combustions de biomasse, dans lequel il est possible de faire varier avec une assez grande souplesse la composition et l'humidité du combustible ainsi que les conditions de la combustion. La classe BiomassCombustion peut ainsi être utilisée aussi bien pour simuler une chaudière qu'un gazéifieur à tirage vers le bas.