

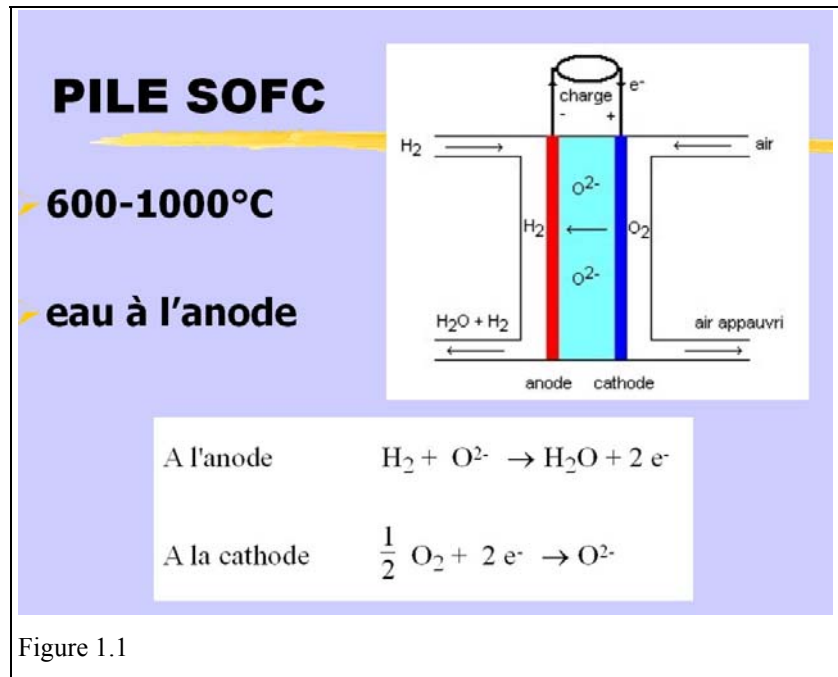
Fiche-guide de TD sur la modélisation de piles à combustible SOFC

1) Objectifs du TD

L'objectif du projet est d'étudier le fonctionnement d'une pile à combustible à oxyde solide à haute température, dite SOFC, et de montrer comment on peut en modéliser de manière réaliste avec Thermoptim.

Dans une pile à oxyde solide (SOFC), ce sont les ions oxydes O^{2-} qui migrent de la cathode vers l'anode, où l'eau est produite.

La pile se comporte comme un quadripôle : sur la figure 1.1, qui représente une cellule de pile, l'hydrogène entre en haut à gauche de la pile, se combine au niveau de l'anode avec les ions O^{2-} pour former de l'eau, et ressort en bas à gauche enrichi en l'eau, tandis que l'air entre en haut à droite et ressort en bas à droite appauvri en oxygène.



Une pile SOFC travaille à très haute température (entre 600 et 1000 °C), de telle sorte que l'eau se trouve en sortie sous forme gazeuse.

Le TD permet aux élèves de construire des modèles de piles de complexité croissante :

- modèle très simple à deux paramètres de pile alimentée en hydrogène pur
- prise en compte de l'équation de polarisation de la pile, puis introduction d'un refroidissement de la pile
- couplage de la pile à une turbine à gaz pour former une installation de cogénération à haut rendement
- remplacement de l'hydrogène par un combustible comme le méthane.

Cette fiche-guide correspond aux séances Diapason S61 à S63¹.

2) Références

Des informations sur la technologie des piles SOFC peuvent être obtenues à partir des liens ci-dessous :

- le site de l'Association française de l'hydrogène : http://www.afh2.org/index.php?page=memento_fiches
- le site du Club français Pile à Combustible : <http://club.pac.free.fr/version3/index2.html>
- le site de Siemens Westinghouse pour les exemples industriels donnés dans ce TD <http://www.siemenswestinghouse.com/en/fuelcells>

¹ Séance S61 <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S61/seance.html>

Séance S62 <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S62/seance.html>

Séance S63 <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S63/seance.html>

3) TD principale

3.1 Enoncé

Il s'agit pour les élèves de se familiariser avec le fonctionnement des piles à combustible SOFC en construisant progressivement des modèles de complexité croissante. Ils commencent par étudier un modèle très simple à deux paramètres de pile alimentée en hydrogène pur, puis prennent en compte l'équation de polarisation de la pile, avant d'introduire un refroidissement de la pile. Le couplage de la pile à une turbine à gaz permet alors de former une installation de cogénération à haut rendement. Enfin, ils généralisent le modèle de la pile en remplaçant l'hydrogène par un combustible comme le méthane.

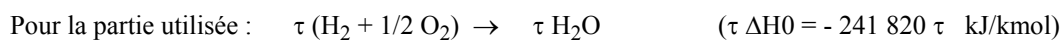
Ce TD est bien adapté à un travail interactif avec les élèves, en alternant les activités suivantes :

- mise en équation des phénomènes à l'occasion d'un échange de vues avec la classe
- utilisation des classes externes fournies pour tester la sensibilité des modèles aux différents paramètres, et pour voir comment le composant étudié peut s'intégrer dans un système
- possibilité, si le temps disponible le permet, d'entrer dans l'implémentation des classes externes, voire de les modifier (cette implémentation est commentée dans la documentation de chaque classe).

3.2 Modèle de pile à hydrogène et deux paramètres

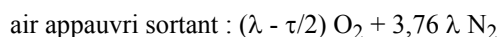
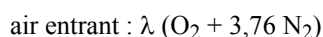
Le premier modèle que nous développerons est particulièrement simple : on suppose que le taux d'utilisation de l'hydrogène τ et le rendement énergétique ε sont connus.

Du côté de l'anode, seule la fraction τ de l'hydrogène disponible est transformée dans la pile, le reste ressortant. Typiquement, $\tau = 0,5 - 0,7$. La réaction donnant les espèces en sortie s'écrit globalement :



$\tau \Delta H_0$ représente l'énergie théorique mise en jeu par la conversion de la partie utilisée. Une fraction ε de cette énergie est directement convertie en électricité, et $(1 - \varepsilon)$ est transformée en chaleur.

Par ailleurs de l'oxygène est prélevé sur l'air comburant du côté de la cathode. λ représentant le flux d'air entrant, on a



Le modèle que l'on peut retenir est alors le suivant :

- 1) la composition des espèces est donnée par la résolution des équations ci-dessus : on détermine les débits molaires d'hydrogène et d'air en entrée, ce qui fournit la valeur de λ , dont on déduit les débits molaires en sortie, les valeurs de τ et de ε étant lues à l'écran ;
- 2) la chaleur libérée par la fraction $\tau (1 - \varepsilon)$ du combustible sert à fournir l'énergie nécessaire à l'échauffement des gaz

L'enthalpie libérée est égale à $\dot{m}_{\text{mol}} \tau \Delta H_0$. Elle se répartit entre de l'électricité $\dot{m}_{\text{mol}} \varepsilon \tau \Delta H_0$, et de la chaleur pour l'échauffement des gaz $\dot{m}_{\text{mol}} \tau (1 - \varepsilon) \Delta H_0$, \dot{m}_{mol} étant le débit molaire d'hydrogène.

Comme nous l'avons vu, une pile à combustible présente la particularité d'être traversée par deux flux séparés, qui échangent des ions ou des protons par l'intermédiaire d'un milieu imperméable pour les autres espèces chimiques. Elle se comporte donc comme un quadripôle recevant deux fluides en entrée, et dont en sortent deux autres.

Pour la représenter dans Thermoptim, on forme ce quadripôle en associant un mélangeur en entrée (classe SOFCH2inlet) et un diviseur en sortie (classe SOFCH2outlet), les deux étant reliés par une transfo-point qui joue un rôle purement passif.

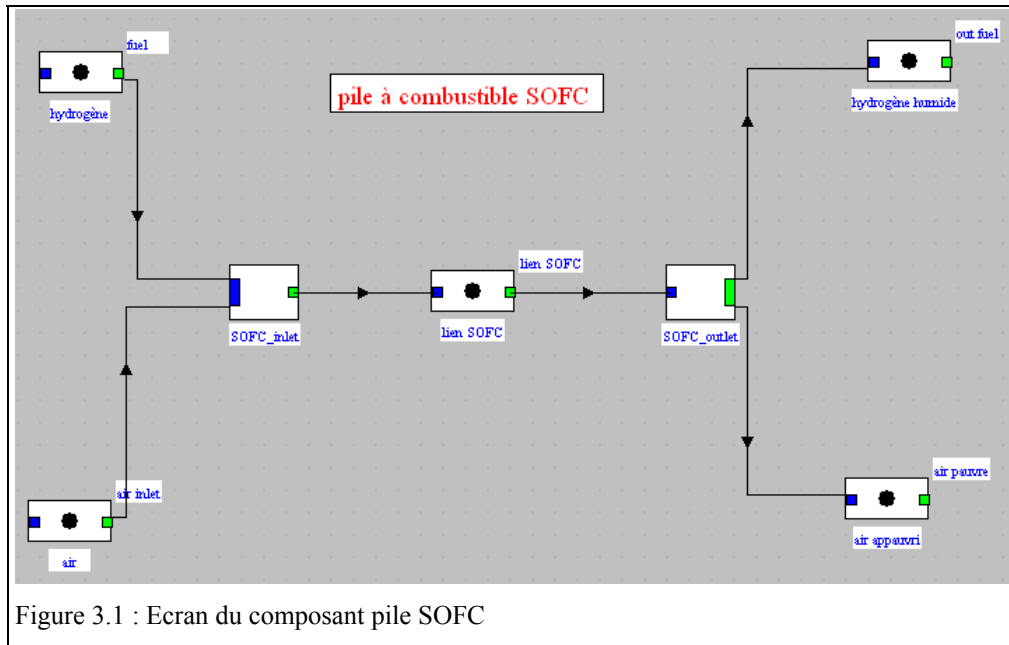


Figure 3.1 : Ecran du composant pile SOFC

Pour que le modèle soit bien cohérent, on synchronise les calculs effectués par les deux nœuds, plus précisément le diviseur de sortie prend le contrôle du mélangeur, dont le rôle se limite à effectuer une mise à jour des variables de couplage associées aux flux d'entrée. La structure du modèle est donnée figure 3.1.

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
air appauvri	104,761	104,761	1 185,55	1 297,68
hydrogène hu...	19,239	19,239	1 185,55	4 163,21

SOFC H2 outlet

fuel use rate: 0.480

conversion efficiency: 0.44

heat released (W): 128983.68

electric power generated (W): -101344.31

outlet temperature (K): 1458.71

Figure 3.2 : Ecran du composant pile SOFC

La seule difficulté que l'on rencontre lors de la construction du modèle concerne la sélection des classes externes. Elle est très facilement levée en se référant à la note Utilisation des classes externes ou en opérant comme indiqué dans les 9 premières étapes de la séance Diapason S07_ext². Les intitulés des classes sont "SOFC H2 inlet" et "SOFC H2 outlet".

L'écran du composant pile SOFC est donné figure 3.2. Les intitulés des données d'entrée du modèle sont affichés en bleu, et on a supposé que les gaz en entrée de pile étaient à la température de 500 °C.

Il s'agit d'une pile de technologie cylindrique du type de celle développée par Westinghouse, correspondant à un système de 100 kWe, pour laquelle $\tau = 0,48$ et $\varepsilon = 0,44$.

Avec les paramétrages ci-dessus (4 g/s d'hydrogène et 120 g/s d'air en entrée de la pile, à 1 bar et 500 °C), les compositions des gaz que l'on obtient sont les suivantes :

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
N2	0,781	0,7555302
Ar	0,009	0,01241636
O2	0,21	0,2320534

Figure 3.3 : air en entrée de la pile, débit 120 g/s

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
H2	0,48	0,09362063
H2O	0,52	0,9063794

Figure 3.4 : hydrogène humidifié en sortie, débit 19,24 g/s, PCI : 11 230 kJ/kg

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
N2	0,8824047	0,8654283
Ar	0,01016856	0,01422242
O2	0,1074267	0,1203493

Figure 3.5 : air appauvri en O₂, débit 104,76 g/s

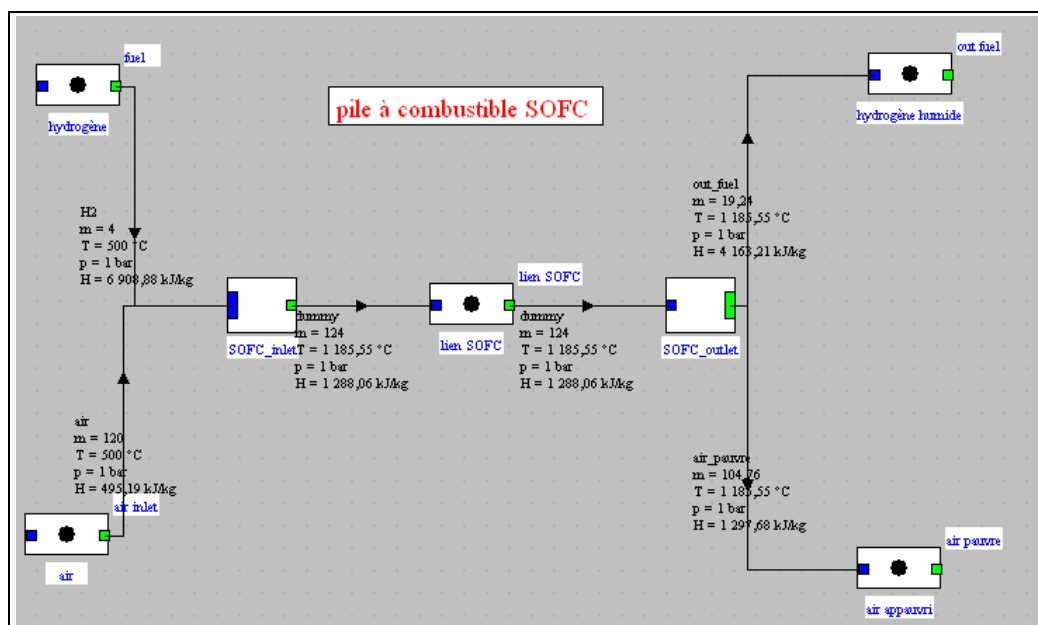


Figure 3.6 : Synoptique du composant pile SOFC

² Séance S07_ext : http://www.thermoptim.org/SE/seances/S07_ext/seance.html

3.3 Amélioration du modèle de la pile

Dans ce second modèle, on suppose que le taux d'utilisation de l'hydrogène τ et le rendement énergétique ε sont déterminés à partir d'un modèle électrique. Les classes externes s'appellent SOFCH2ElecInlet et SOFCH2ElecOutlet, et leurs intitulés sont "SOFC H2 elec inlet" et "SOFC H2 elec outlet".

3.3.1 Modèle électrique retenu

Pour calculer la tension de cellule V_{cell} connaissant l'intensité et la surface active (figure 3.7), divers modèles ont été proposés. Nous retiendrons celui qui a été développé au Centre Energétique et Procédés de l'Ecole des Mines de Paris. Son équation est :

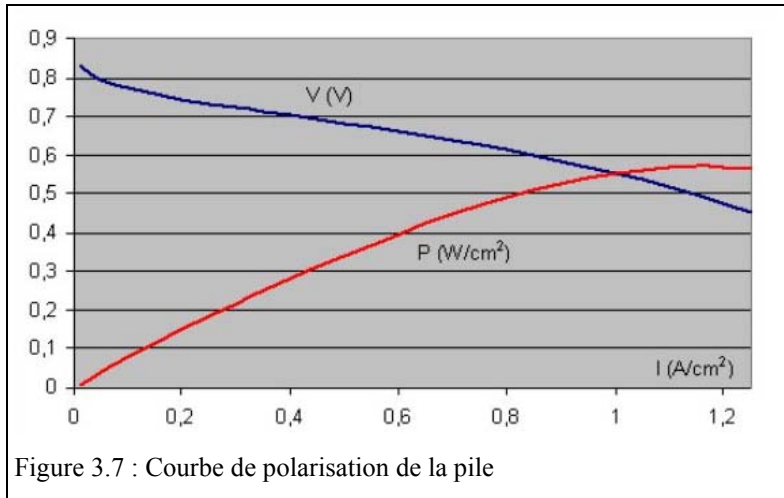


Figure 3.7 : Courbe de polarisation de la pile

$$V_{cell}(J) = E + \frac{b}{\ln(J/J_d) - 2} + \left(\frac{b}{4J_d} - \Delta \right) J$$

où : $J = I/A$ est l'intensité de courant (intensité divisée par la surface active A), en A/cm²

E, J_d , b et Δ sont quatre paramètres dépendant a priori de la température de la cellule et de la pression en hydrogène. Ils peuvent en première approximation être considérés constants, mais l'influence de la température et de la pression partielle en H₂ sur chaque paramètre peut aussi être prise en compte si nécessaire.

noeud : SOFC_outlet type : external divider

veine principale : lien SOFC m global : 124 h global : 1 743,75928158 T global : 1 186,45141929

isobare

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
air appauvri	104,761	104,761	1 186,45	1 298,77
hydrogène hu...	19,239	19,239	1 186,45	4 166,83

SOFC H2 elec outlet

current intensity (A) : 360 Number of cells : 400

active surface (cm2) : 900.000 fuel use rate : 0.480

heat released (W) : 129168.00 conversion efficiency : 0.440

electric power generated (W) : -101160.00 voltage : 281.000

outlet temperature (K) : 1459.61

Figure 3.8 : Ecran du composant pile SOFC avec modèle électrique

Connaissant V_{cell} , il est possible de calculer simplement la puissance de la cellule : $P_{elec} = V_{cell} I N_{cell}$

Le taux d'utilisation de l'hydrogène est supposé proportionnel à la densité de courant J , ce qui correspond en première approximation à ce qui se passe en pratique : la fraction d'hydrogène consommée est nulle en circuit ouvert physiquement, et croît lorsque l'intensité débitée augmente. On a retenu la loi suivante : $\tau = 1,2 J$

Les nouveaux paramètres du modèle sont : le nombre de cellules N_{cell} , l'intensité de courant demandée I , et la surface active d'une cellule A . Le modèle calcule τ et ε , ainsi que la tension délivrée V .

L'écran du composant pile SOFC est donné figure 3.8, les intitulés des données d'entrée du modèle étant affichés en bleu, et on a supposé que les gaz en entrée de pile étaient à la température de 500 °C.

Il s'agit d'une pile de technologie cylindrique du type de celle développée par Westinghouse, chaque cellule ayant un diamètre de 19 mm et une longueur de 1,5 m, soit une surface de 900 cm², conduisant à une intensité de 360 mA avec une densité de courant de 400 mA/cm².

Les résultats du calcul, pour un ensemble de 400 cellules, correspondant à un système de 100 kW_e, sont donnés ci-dessous : $\tau = 0,48$, $\varepsilon = 0,44$, $V = 281$ V. En terme de puissance électrique et thermique, ce modèle conduit bien aux mêmes valeurs que le modèle simple développé précédemment .

3.3.2 Activités proposées

A partir de ce modèle, il est possible d'une part d'affiner l'étude paramétrique du comportement de la pile en jouant sur les nouvelles données d'entrée, et d'autre part d'étudier la classe externe correspondante et de l'améliorer, notamment en introduisant divers tests pour vérifier la cohérence des données retenues, car elles ne peuvent pas être choisies totalement indépendamment. Par exemple, la densité de courant doit être comprise entre 0 et 700 ou 800 mA/cm², faute de quoi les calculs n'ont plus de sens.

3.4 Prise en compte d'un thermocoupleur

Le troisième modèle est une extension de celui avec prise en compte de l'équation électrique, où l'on suppose que la pile à combustible est refroidie par de l'eau à 40 bars, dont la température passe de 200 °C (liquide), à 450 °C (vapeur). Les classes externes s'appellent SOFCH2ThermoInlet et SOFCH2ThermoOutlet.

Le refroidissement de la pile est modélisé par un thermocoupleur connecté sur le diviseur de sortie.

Le mécanisme des thermocoupleurs complète celui des échangeurs de chaleur en permettant à des composants autres que des transfos "échange" de se connecter à une ou plusieurs transfos "échange" pour représenter un couplage thermique. Il n'englobe pas celui des échangeurs : deux transfos "échange" ne peuvent pas être connectés par un thermocoupleur.

Un tel mécanisme présente un grand intérêt, car il permet de représenter de nombreux couplages thermiques qui ne constituent pas pour autant un échange de chaleur classique, comme par exemple le refroidissement des parois de la chambre de combustion d'un moteur alternatif, une compression refroidie, et surtout des apports ou des extractions de chaleur au niveau de composants externes multi-fonctionnels comme la pile à combustible.

On se reportera au manuel de référence pour une présentation détaillée des thermocoupleurs.

Nous supposons dans ce modèle qu'un tiers de la chaleur dégagée dans la pile est récupéré par la vapeur de refroidissement, le reste servant à échauffer les gaz qui alimentent la pile.

Les figures 3.9 à 3.11 montrent les modifications apportées au modèle. Avec les hypothèses retenues, le thermocoupleur permet de porter 17,4 g/s d'eau à 40 bars et 200 °C à 450 °C.

L'écran du composant pile fait apparaître, en dessous à droite de la table des branches, un champ dans lequel apparaît le nom du thermocoupleur. En double-cliquant dessus, on ouvre l'écran de ce dernier (figure 3.10).

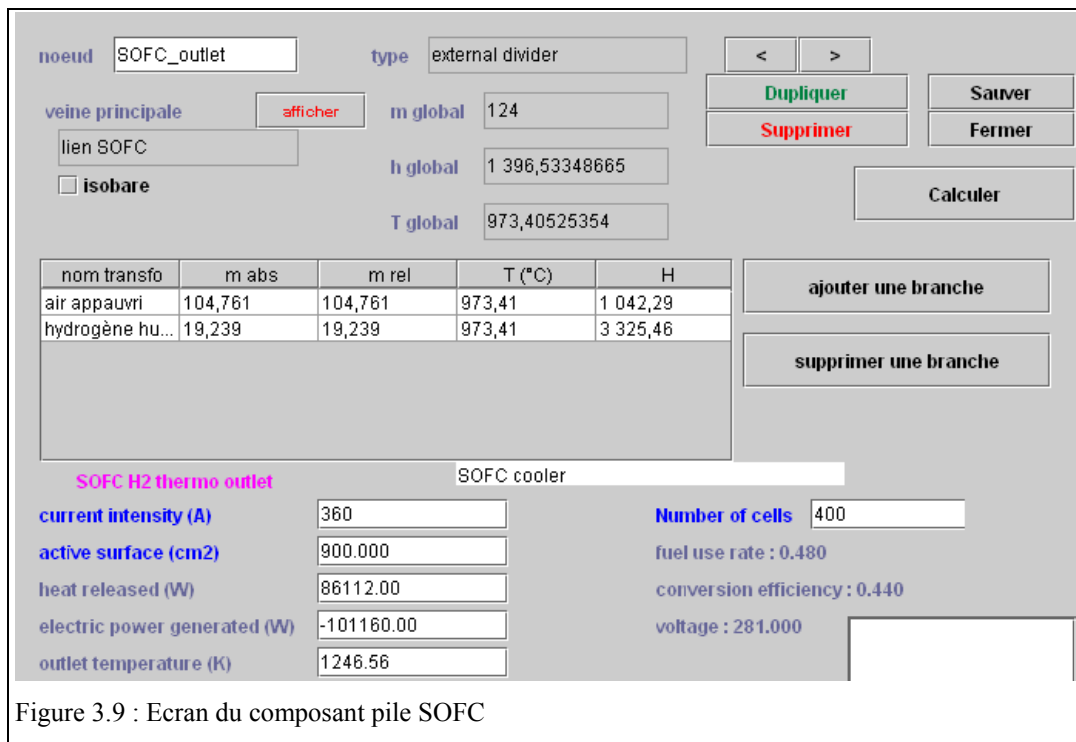


Figure 3.9 : Ecran du composant pile SOFC

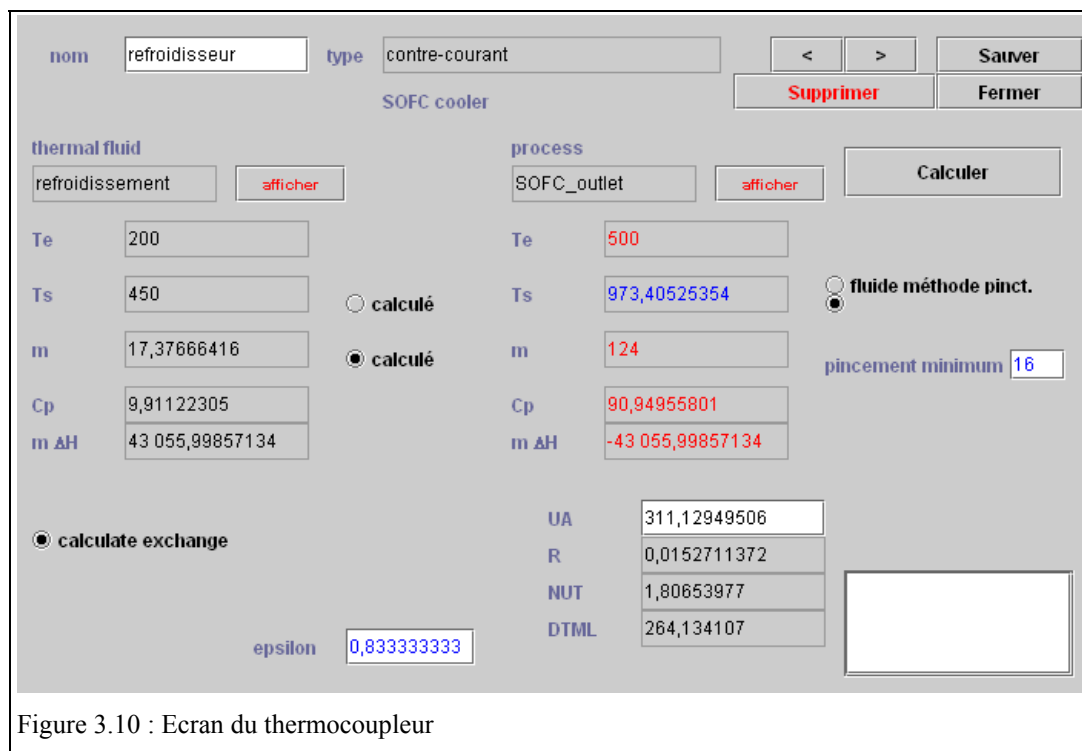
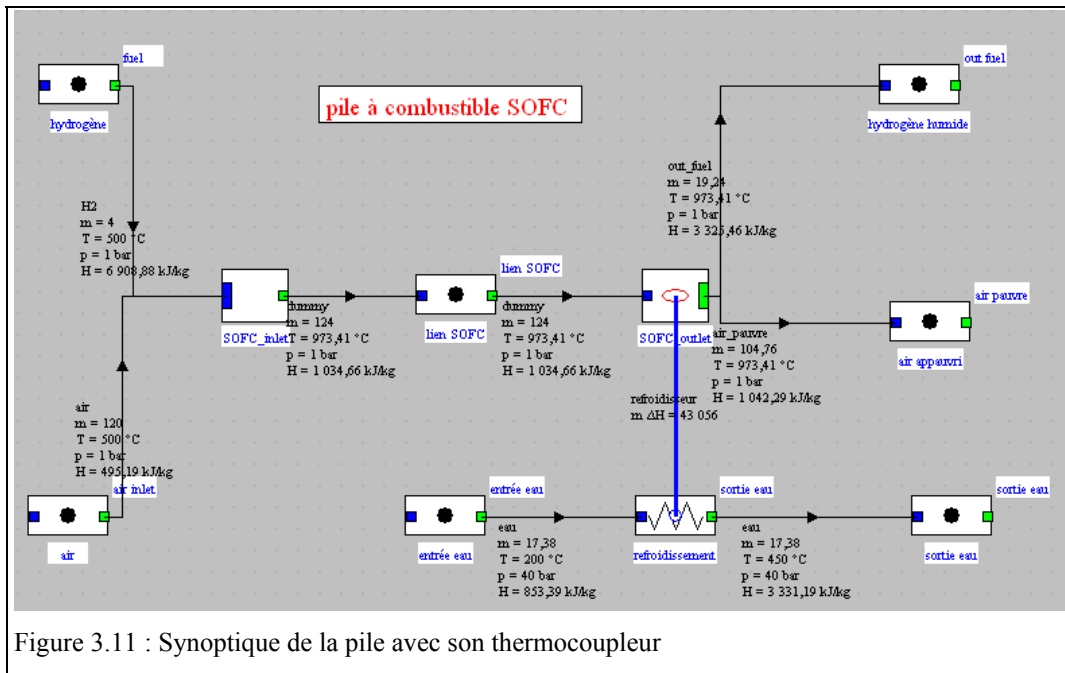


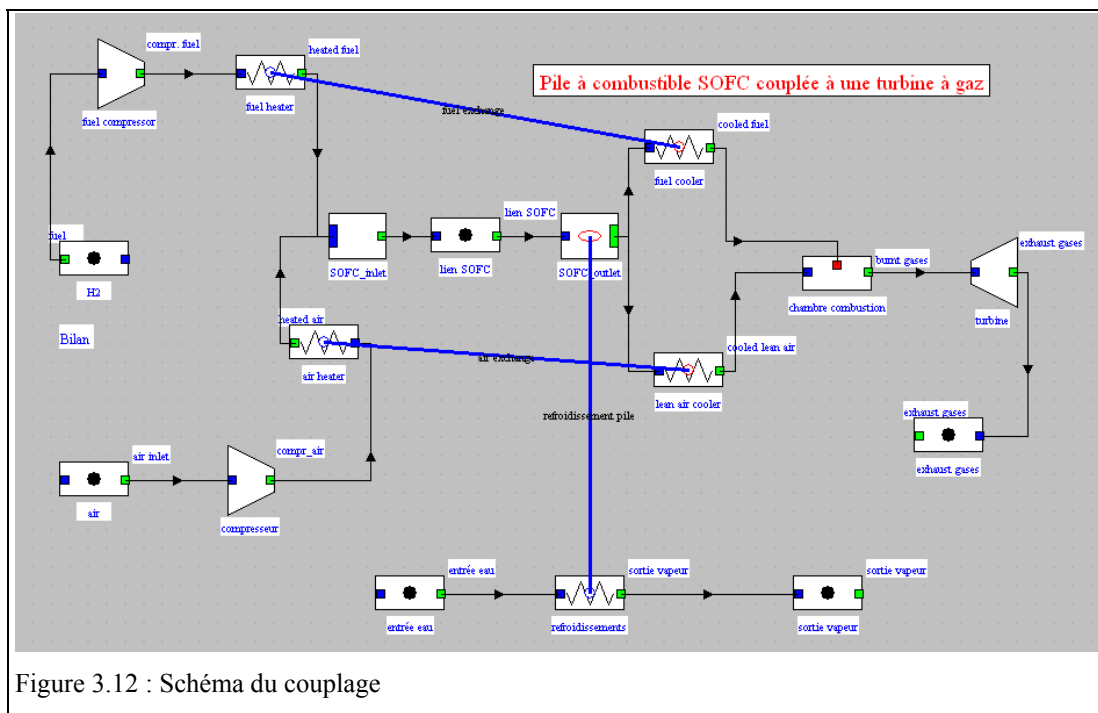
Figure 3.10 : Ecran du thermocoupleur

La figure 3.11 montre le nouveau synoptique obtenu.



3.5 Couplage d'une pile à combustible SOFC avec une turbine à gaz

Si les élèves n'ont pas déjà modélisé un cycle de turbine à gaz simple, il faut qu'ils commencent par travailler sur les séances S20 et S24³. De surcroît, le modèle à bâtir comportant certaines difficultés de paramétrage, il est recommandé qu'ils commencent par travailler sur la séance Diapason S07_trucs⁴ qui présente des trucs et astuces pour modéliser avec Thermoptim.



³ Séance S20 <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S20/seance.html>

Séance S24 <http://www.thermoptim.org/SE/seances/S24/seance.html>

⁴ Séance S07_trucs: http://www.thermoptim.org/SE/seances/S07_trucs/seance.html

Le schéma de l'installation est donné figure 3.12.

L'air et l'hydrogène sont initialement à la température de 15 °C et la pression de 1 bar. Leurs débits respectifs sont de 300 g/s et 4 g/s (on a beaucoup augmenté le débit d'air pour d'une part disposer de suffisamment d'oxygène dans l'air appauvri pour brûler tout l'hydrogène résiduel en sortie de pile, et d'autre part limiter à une valeur raisonnable la température d'entrée dans la turbine.

L'air et l'hydrogène sont comprimés à 20 bars par des compresseurs de rendement isentropique égal à 0,85, puis préchauffés avant entrée dans la pile par échange avec les gaz sortant de l'anode et de la cathode. 43 kW thermiques sont prélevés sur la pile pour produire de la vapeur à 40 bars et 500 °C.

L'air appauvri et l'hydrogène humidifié sont ensuite brûlés dans la chambre de combustion, et les gaz brûlés détendus dans la turbine de rendement isentropique égal à 0,9.

La figure 3.13 montre le synoptique de l'installation avec le résultat de la simulation.

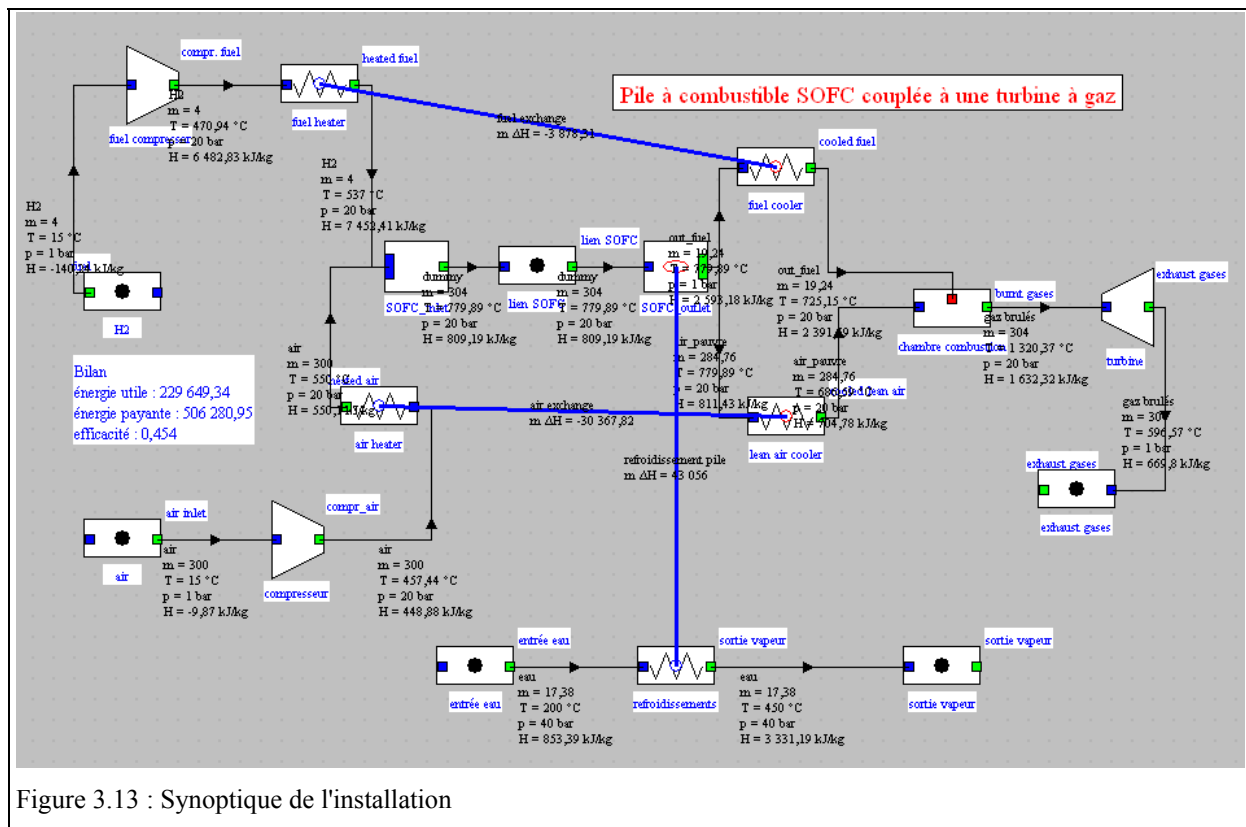


Figure 3.13 : Synoptique de l'installation

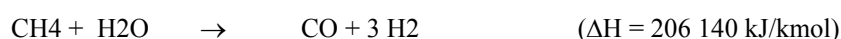
Alors que le rendement de la pile seule est égal à 44 %, le rendement électrique de cette installation est déjà égal à 45,4 %, et on dispose de 43 kW de vapeur et de 180 kW thermiques environ dans les gaz d'échappement qui sortent de la turbine à près de 600 °C.

La puissance disponible en cogénération est égale à 230 kWe, plus 223 kW thermiques, pour une dépense d'énergie payante de 506 kW. Le rendement global est donc égal à 89,5 %.

3.6 Modification du modèle pour remplacer H2 par CH4

Les modèles que nous avons développés jusqu'à présent n'admettaient que de l'hydrogène pur comme combustible. Dans la réalité, il est très rare que l'on dispose d'hydrogène : il faut le produire à partir d'un autre combustible. Cette opération est appelée reformage.

L'équation de base du reformage d'un combustible comme le méthane est la suivante :

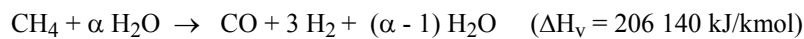


Elle permet de convertir le combustible en hydrogène, mais nécessite de l'eau et un apport de chaleur, et produit du monoxyde de carbone, qui constitue un poison pour certaines piles à combustible comme les PEMFC, pour lesquelles il est alors nécessaire de convertir aussi le CO.

On notera que l'un des avantages de la technologie SOFC est qu'elle tolère parfaitement la présence de CO, alors que dans d'autres cas une réaction shift est nécessaire pour le convertir en CO₂. Le rendement énergétique de l'ensemble est ainsi amélioré.

Appelons α le rapport molaire entre l'eau et le méthane (α doit être supérieur à 1 pour que tout le méthane puisse être transformé).

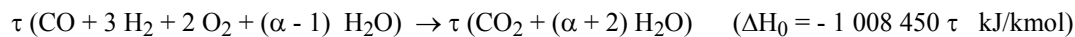
Du côté de l'anode, compte tenu du haut niveau de température de fonctionnement d'une pile SOFC, on peut considérer que tout le combustible est transformé par la réaction de vapocraquage :



Ensuite, seule une fraction τ (taux d'utilisation du combustible) est transformée dans la pile, le reste ressortant.

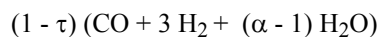
La réaction donnant les espèces en sortie s'écrit globalement de la manière suivante.

Pour la partie utilisée :

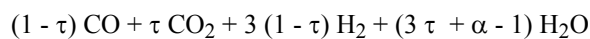


La chaleur de réaction ΔH_0 est ici calculée en considérant que l'eau produite reste à l'état gazeux compte tenu de la température.

Pour la partie non utilisée :

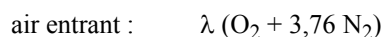


Au total, on a donc en sortie d'anode :



De la quantité utilisée, une fraction ε est directement convertie en électricité, et $(1 - \varepsilon)$ est transformé en chaleur (dont une partie est utilisée pour le vapocraquage).

Par ailleurs, λ étant un paramètre représentatif de l'air entrant, de l'oxygène est prélevé sur l'air comburant du côté de la cathode

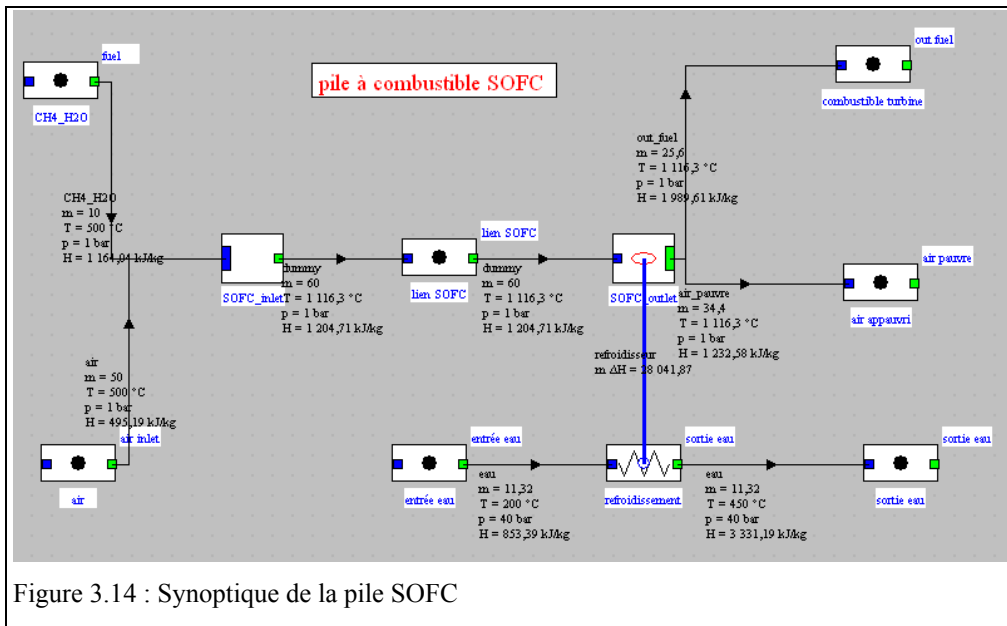


Le modèle que l'on peut retenir est alors le suivant :

- 1) la composition des espèces est donnée par la résolution des équations ci-dessus : on détermine les débits molaires de combustible humidifié et d'air en entrée, ce qui fournit les valeurs de α et de λ , dont on déduit les débits molaires en sortie, les valeurs de τ et de ε étant lues à l'écran ;
- 2) la chaleur libérée par la fraction $\tau (1 - \varepsilon)$ du combustible sert à fournir l'énergie nécessaire au vapocraquage et à l'échauffement des gaz

L'enthalpie libérée est égale à $\tau \Delta H_0$. Elle se répartit entre de l'électricité ($\varepsilon \tau \Delta H_0$), et de la chaleur pour le vapocraquage (ΔH_v) et l'échauffement des gaz ($\tau (1 - \varepsilon) \Delta H_0 - \Delta H_v$).

Dans ThermoOptim, la pile est représentée par un mélangeur externe connecté à un diviseur externe, les calculs étant effectués par ce dernier. Les classes s'appellent SOFCCH4inlet et SOFCCH4outlet.



La figure 3.14 montre le synoptique de cette pile à combustible. Le paramétrage retenu est proche de celui du modèle de pile fonctionnant à l'hydrogène : température d'entrée des gaz 500 °C, débit 10 g/s pour le combustible, et 80 g/s pour l'air.

Figure 3.15 : Ecran du mélangeur amont de la pile SOFC

nom transfo	m abs	T (°C)	H
air	50	500	495,19
CH4_H2O	10	500	1 164,04

SOFC CH4 inlet

b parameter: 0.63
 E parameter: 0.94
 Jd parameter: 400.00
 delta parameter: 0.0002
 tau/Jd parameter: 1.20

Cooling fract.: 0.33

La figure 3.15 montre l'écran du mélangeur amont, où apparaissent les paramétrages du modèle électrique, du taux d'utilisation du combustible et de la fraction de la puissance thermique extraite par le thermocoupleur.

L'écran du composant pile SOFC est présenté figure 3.16. On a pris un taux d'utilisation du combustible de près de 85%, correspondant au chiffre annoncé par Siemens et Westinghouse pour ce type de pile fonctionnant au gaz naturel.

Les compositions des gaz que l'on obtient sont données figures 3.17 à 3.20.

noeud type

veine principale m global

lien SOFC h global

isobare T global

nom transfo	m abs	m rel	T (°C)	H
air appauvri	34,4016	34,4016	1 116,3	1 232,58
combustible t...	25,5984	25,5984	1 116,3	1 989,61

SOFC CH4 outlet SOFC cooler

current intensity (A) Number of cells

active surface (cm2) fuel use rate : 0.867

heat released (W) conversion efficiency : 0.548

electric power generated voltage : 158.212

outlet temperature (K)

Figure 3.16 : Ecran du composant pile SOFC

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CH4 ` méthane	0,48	0,4511549
H2O	0,52	0,5488451

Figure 3.17 : fuel, débit 10 g/s, PCI : 22 562 kJ/kg

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
N2	0,781	0,7555302
Ar	0,009	0,01241636
O2	0,21	0,2320534

Figure 3.18 : air, débit 80 g/s

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
CO	0,03265306	0,0410301
CO2	0,2122449	0,4190309
H2	0,09795918	0,008858684
H2O	0,6571429	0,5310803

Figure 3.19 : combustible en sortie, débit 25,6 g/s, PCI : 1 477 kJ/kg

nom du composant	fraction molaire	fraction massique
N2	0,9483251	0,9385143
Ar	0,0109282	0,01542351
O2	0,04074674	0,04606218

Figure 3.20 : air appauvri en O2, débit 64,4 g/s

4) Variantes

Nous proposons ici quelques variantes, mais de nombreuses autres peuvent être imaginées, en fonction du temps disponible, du niveau des élèves, de leur nombre, et des objectifs pédagogiques poursuivis.

4.1 Couplage de la pile à un cycle combiné

A partir du modèle développé section 3.5, il serait relativement facile de coupler un ou plusieurs cycle(s) à vapeur pour étudier les performances du cycle combiné.

4.2 Etude du module de pile à combustible SOFC développé par Siemens et Westinghouse

La figure 4.1 montre le schéma d'un module de pile à combustible SOFC développé par Siemens et Westinghouse.

Le combustible, du gaz naturel désulfuré, entre à droite de l'appareil, au point 1. Il est dirigé vers un éjecteur connecté à une tubulure qui aspire du gaz en sortie d'anode, au point 2, qui est ainsi partiellement recyclé.

Les gaz en sortie d'anode contenant beaucoup d'eau, ceci permet d'humidifier le combustible tout en le préchauffant. Le mélange entre ensuite dans le reformeur interne, constitué de tubes verticaux (3) chauffés par rayonnement par les cellules de la pile

Le combustible converti circule ensuite à l'extérieur des cellules (4)

L'air entre en haut à gauche du module, en 5, et se réchauffe en 6 par échange avec les gaz sortant de la pile. Il est ensuite injecté dans des tubes d'alimentation jusqu'au bas des cellules, puis circule dans l'espace annulaire entre les tubes et les cellules. L'air appauvri est enfin mélangé en 7 avec la fraction non recirculée des gaz sortant de l'anode, un complément d'oxydation prenant place du fait des hautes températures. Les gaz chauds sont alors évacués, après préchauffage de l'air entrant.

Quelques précisions sur les valeurs numériques retenues pourront être trouvées sur le site de Siemens Westinghouse : <http://www.siemenswestinghouse.com/en/fuelcells>

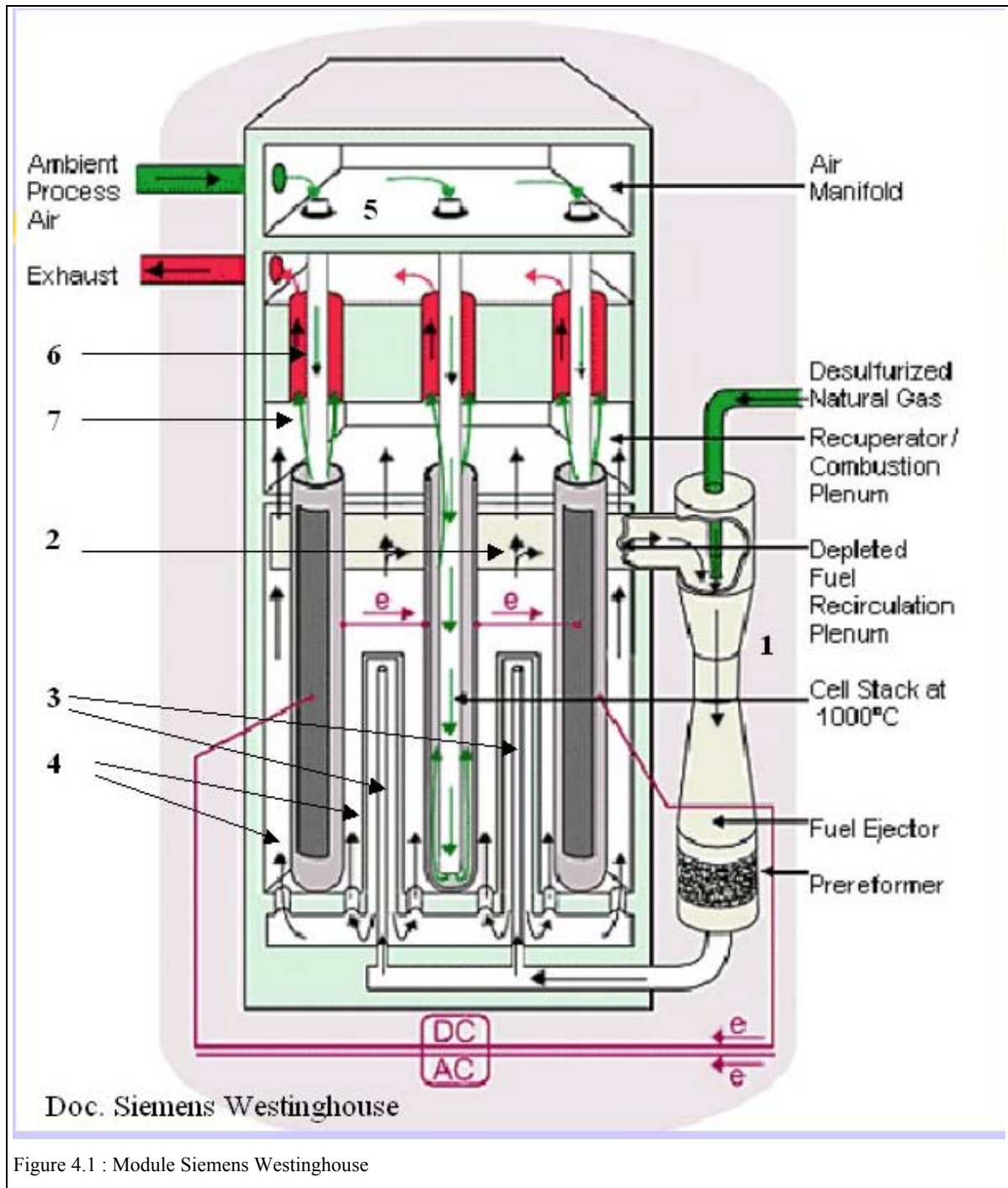
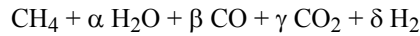


Figure 4.1 : Module Siemens Westinghouse

4.2.1 Modélisation de la pile avec recyclage

La description qui vient d'être faite du fonctionnement d'un module industriel de pile SOFC montre que, pour être réaliste, notre modèle de pile à combustible doit être encore affiné, notamment pour qu'il puisse accepter en entrée un mélange de méthane et de gaz sortant de l'anode.

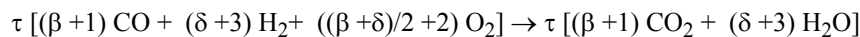
On a en entrée d'anode :



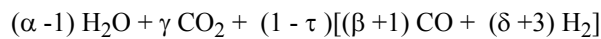
Le vapocraquage étant supposé complet (avec la condition $\alpha \geq 1$), la composition après vapocraquage est :



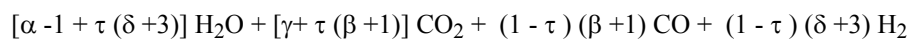
La partie réagissant a pour équation :



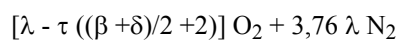
La partie ne réagissant pas est :



On en déduit la composition du gaz en sortie d'anode



En sortie de cathode, avec les notations habituelles, on a :



4.2.2 Prise en compte de l'influence de la pression sur les performances de la pile

Comme le montre le graphique de la figure 4.2, une particularité des cellules développées par Siemens et Westinghouse est que leurs performances s'améliorent avec la pression, son influence se faisant essentiellement sentir au niveau de la tension en circuit ouvert E.

On peut par exemple retenir un modèle exponentiel par rapport à la pression :

$$E = E_0 + E_1 e^{E_2 P}$$

Les paramètres de cette équation peuvent être définis dans le mélangeur d'entrée.

La figure 4.3 montre le schéma auquel on parvient

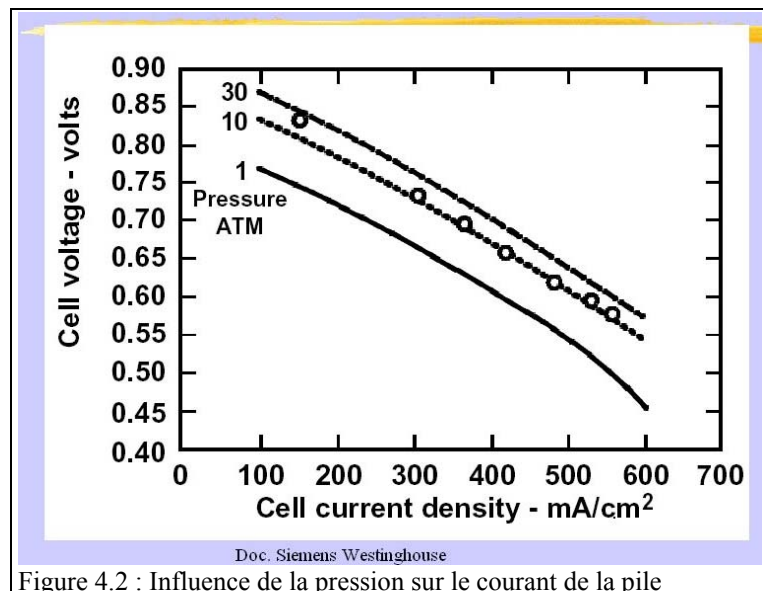


Figure 4.2 : Influence de la pression sur le courant de la pile

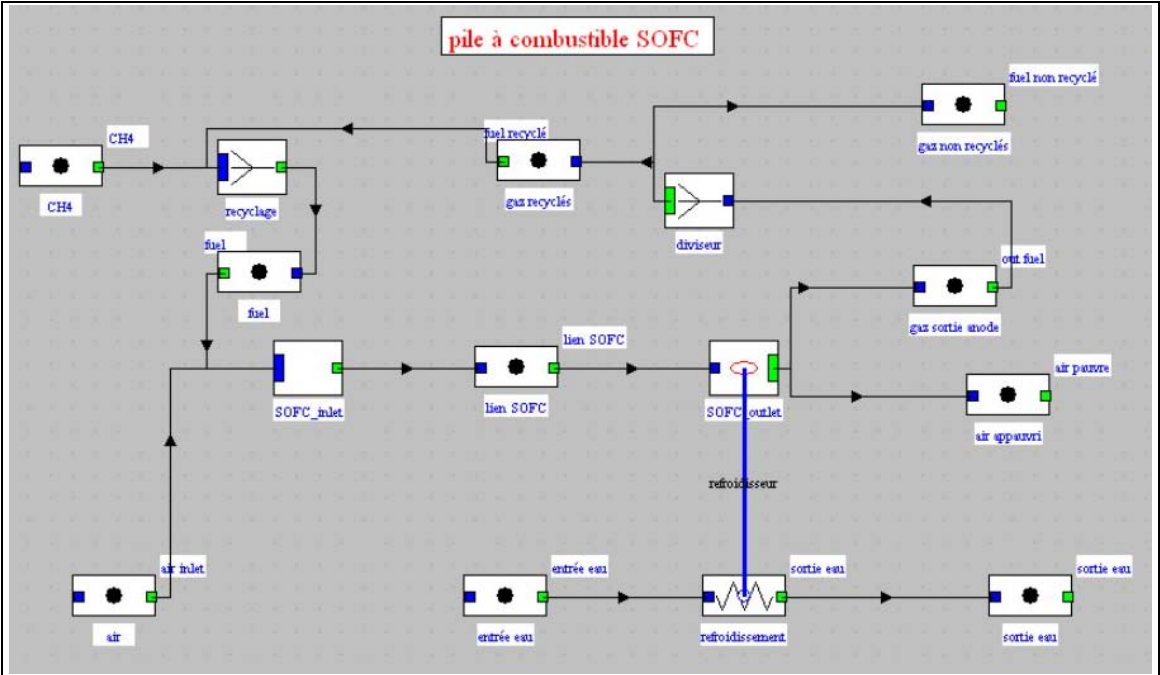


Figure 4.3 : Schéma de la pile Siemens Westinghouse

5) Fichiers de travail, recommandations

5.1 Fichiers de travail

Les fichiers de travail suivants sont joints au dossier dans l'archive Paco.zip :

- notes de présentation du code des diverses classes externes
- fichiers extThopt.zip et extUser.zip contenant ces classes externes
- fichier inth.zip contenant les ressources pour afficher Thermoptim en français
- fichiers de projet et de schéma des modèles Thermoptim utilisés

5.2 Recommandations

Il faut que l'enseignant vérifie bien que les élèves ont à leur disposition dans leur environnement de travail Thermoptim les classes externes dont ils auront besoin.

Le plus simple pour cela est de lancer Thermoptim, puis d'ouvrir l'écran du visualisateur de classes externes (menu Spécial du simulateur). Les classes y étant regroupées par type, les différentes versions de SOFInlet et SOFC ainsi que "ColdBattery" doivent apparaître parmi les mélangeurs et diviseurs externes, comme sur la figure 5.1.

Si l'une des classes manque, remplacez les fichiers extThopt.zip, extUser.zip et inth.zip par ceux qui sont fournis dans l'archive Paco.zip pour les élèves devant travailler sur ce TD. Si elles sont présentes, il est inutile d'effectuer ce changement.

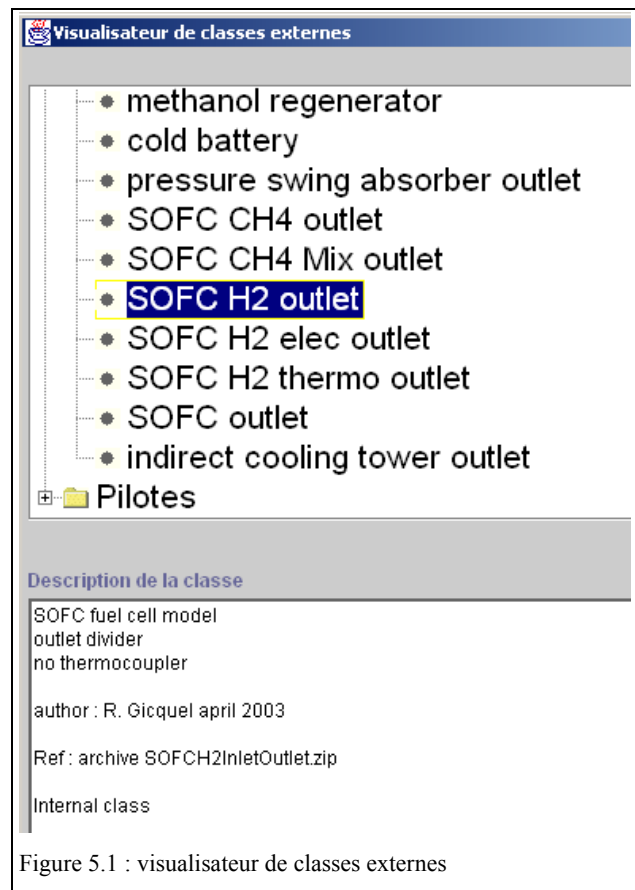


Figure 5.1 : visualisateur de classes externes