

LIVRE BLANC

Concevoir des systèmes de piles à combustible à l'aide du design au niveau système

Modélisation et simulation dans Simulink et Simscape

Ce livre blanc présente l'utilisation de Simulink® et Simscape™ pour concevoir et simuler un système de pile à combustible dédié à la mobilité électrique. Il explique à travers des exemples la manière dont Simulink et Simscape supportent :

- La modélisation physique multi-domaines et les simulations de systèmes de pile à combustible, y compris les systèmes thermiques, gazeux et liquides.
- Différents niveaux de fidélité de modélisation.

Depuis des décennies, les piles à combustible sont utilisées pour alimenter diverses applications. L'utilisation des piles à combustible dans le programme spatial américain en est un exemple. Aujourd'hui, les piles à combustible sont considérées comme l'un des blocs de base dans la transformation vers la mobilité verte.

Bien que leur utilisation de longue date témoigne d'une technologie éprouvée et aboutie, le déploiement des piles à combustible en tant que source d'énergie pour la mobilité électrique soulève plusieurs questions, telles que les effets sur l'efficacité et l'autonomie des véhicules.

Un système d'entraînement de véhicule électrique à pile à combustible (FCEV) est constitué de nombreux composants issus de différents domaines de l'ingénierie, comme l'électricité, le contrôle, la mécanique, la thermodynamique et même la chimie, afin de gérer la diffusion des gaz à travers la membrane de la pile à combustible. Le design de ces composants, individuellement et en tant que système global, aura des conséquences sur les performances du véhicule. La modélisation et l'optimisation de vos designs vous aideront à tester un large éventail de conditions, à raccourcir vos délais de développement et à réduire vos coûts.

Ce livre blanc présente le design et le paramétrage d'un modèle de pile à combustible et de ses systèmes de support (BoP, Balance-of-Plant) à l'aide de Simscape. Le modèle utilise un bloc Membrane Electrode Assembly (MEA) personnalisé `FuelCell.ssc` proposé avec Simscape Fluids™ ainsi qu'un domaine personnalisé "Multispecies Gas" spécialement conçu pour la modélisation de piles à combustible.

Il repose sur une pile à combustible à membrane électrolyte polymère (MEP, Polymer Electrolyte Membrane), le type de pile à combustible le plus populaire pour les applications de mobilité en raison de sa faible température de fonctionnement, sa faible pression et son rendement élevé. Le modèle comporte également les composants BoP.

Pourquoi utiliser des modèles de pile à combustible ?

L'utilisation de modèles de pile à combustible au lieu de prototypes hardware traditionnels présente de nombreux avantages à tous les stades du design. Vous pouvez comparer les variants de design, réaliser des études de compromis, puis choisir et dimensionner les composants pour obtenir la performance désirée. Une fois le premier modèle créé, vous pouvez optimiser les paramètres et identifier les meilleures stratégies opérationnelles.

Usages d'un modèle de pile à combustible

Les modèles de pile à combustible peuvent être utilisés de nombreuses manières, notamment pour :

- Choisir et dimensionner les composants
 - Réaliser des études de compromis en utilisant différents variants de design
 - Optimiser les paramètres et les stratégies opérationnelles
- Concevoir et valider les algorithmes de contrôle
 - Gérer la température et l'humidité
 - Contrôler la pression
- Analyser la performance
 - Analyser les flux d'énergie entre les batteries et les piles à combustible
 - Déterminer l'autonomie d'un FCEV à l'aide de profils de conduite

Les avantages de la simulation comprennent :

- Des délais de développement raccourcis
- Un large éventail de conditions testées
- Des coûts de test réduits

Ces modèles vous permettent également de concevoir et de valider les algorithmes et la logique de contrôle en même temps que le système, avant même que le hardware ne soit disponible. Vous pouvez partir d'un modèle simplifié et faire évoluer ensemble vos stratégies de contrôle et le système global.

Lorsque le design du système est terminé et validé, vous pouvez implémenter les composants avec la génération de code. MATLAB®, Simulink et Stateflow offrent des capacités de génération de code C/C++, HDL et de texte structuré qui peuvent s'exécuter sur n'importe quel processeur, FPGA ou PLC. Spécifiquement pour les applications automobiles, les fonctions de génération de code comprennent également le support des workflows conformes à AUTOSAR.

L'utilisation de modèles de simulation vous permet d'explorer un plus large éventail de conditions de fonctionnement des piles à combustible, y compris des conditions peu pratiques ou dangereuses lors de l'utilisation de prototypes hardware. Vous pouvez également analyser les performances globales du système de pile à combustible, par exemple en déterminant les flux d'énergie entre les batteries et les stacks de piles à combustible ou en estimant l'autonomie des FCEV. Les données obtenues grâce à la simulation vous aident à développer de meilleurs prototypes hardware et vous permettent ainsi de gagner en efficacité tout en réduisant le coût de vos tests.

Définition du modèle de pile à combustible

Les modèles Simscape capturent le comportement de systèmes complets de pile à combustible, y compris les caractéristiques thermodynamiques et de diffusion détaillées des gaz mélangés. Ils permettent par ailleurs de gérer la température et l'humidification dans le domaine thermo-liquide.

Le modèle ci-dessous (Figure 1) utilise une bibliothèque personnalisée et un domaine Simscape personnalisé pour la modélisation de gaz multi-espèces. L'assemblage membrane-électrode est un composant personnalisé conçu à l'aide du code Simscape que vous pouvez adapter pour répondre à des exigences spécifiques.

Custom Fuel Cell Domain

Multispecies gas network
for N_2, O_2, H_2, H_2O

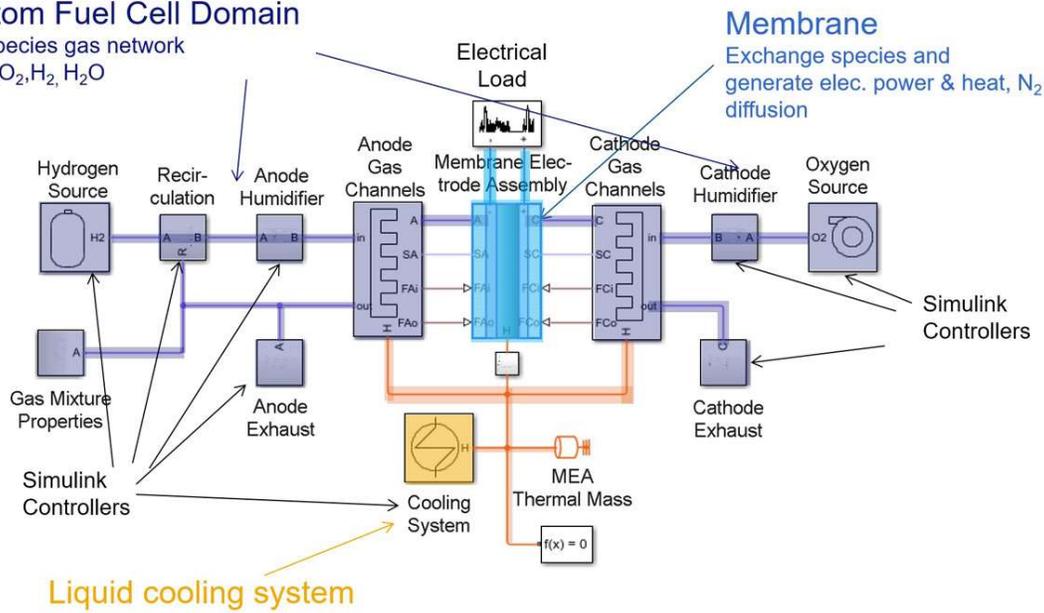


Figure 1. Système de pile à combustible utilisant le domaine de pile à combustible personnalisé, dont le modèle de membrane.

Pour plus d'informations, veuillez-vous référer à cet exemple : [Système de pile à combustible à MEP](#).

Les sections surlignées en violet clair représentent le domaine de pile à combustible personnalisé. Celui-ci traite les complexités propres aux systèmes de piles à combustible, qui découlent du fait que ce sont des réseaux gazeux multi-espèces. Il faut considérer la thermodynamique et les caractéristiques des fluides d'un mélange de quatre espèces gazeuses différentes : l'azote (N_2), l'oxygène (O_2), l'hydrogène (H_2) et l'eau (H_2O).

La membrane, surlignée en bleu, est écrite dans le langage Simscape, qui sera brièvement évoqué à la fin de ce document. Le modèle de membrane calcule le comportement électrique en s'appuyant sur la loi de Faraday, l'équation de Nernst et la connexion de la membrane à la charge électrique alimentée par le stack de piles. Ses propriétés permettent également la diffusion de l'azote, une capacité essentielle pour concevoir des stratégies de purge. Ces dernières sont nécessaires pour optimiser l'efficacité et la puissance de sortie et déterminer la taille requise de la batterie.

La couleur orange correspond au système de gestion thermique. Le stack de piles à combustible doit fonctionner à une température d'environ $80\text{ }^\circ\text{C}$ et produit de la chaleur résiduelle. Il est donc nécessaire d'assurer une gestion thermique à l'aide de refroidisseurs, d'échangeurs de chaleur, de pompes et d'appareils de chauffage, dans le cas d'un démarrage à froid, pour les composants auxiliaires.

De nombreux composants du système de piles à combustible nécessitent différents types de contrôleurs, comme l'indique la Figure 1.

Le réservoir reçoit un débit massique externe (\dot{M}_{in}) à une certaine température (T_{in}). Il possède un port de connexion thermique (H, à gauche) qui, dans ce cas, est isolé et un port (A) qui le relie à l'unité suivante, le réducteur de pression. Le réservoir possède également des mesures en sortie de pression (p), de température (T) et de fractions molaires (y_i) sur les quatre espèces de gaz. La valve attachée réduit la pression de l'hydrogène du réservoir, qui est d'environ 700 bars, aux 1,6 bars requis pour le stack de piles à combustible. Le port B de la valve est relié à un élément de tuyau qui a pour entrées le débit massique (\dot{M}_{in}) et la température (T_{in}) ainsi qu'un port thermique, qui ne sont pas utilisés ici.

Système de recirculation

La recirculation (Figure 3) est modélisée car l'hydrogène n'est pas entièrement utilisé dans l'anode. L'hydrogène inutilisé est réintroduit au lieu d'être rejeté dans l'environnement. L'élément de recirculation est une chambre à volume constant dotée de trois ports. Le port B est relié à un injecteur équipé d'un contrôleur qui commande le flux de (R) vers le port (B) de la chambre à volume, ceci en fonction du courant utilisé par la charge électrique du stack (i_{stack} , en bas à gauche).

Le modèle de recirculation vous permet de voir les effets sur l'efficacité d'une modification du rapport entre l'hydrogène frais et le gaz usé refluant de l'anode.

Une section ultérieure est consacrée à la validation du design et des contrôleurs à l'aide de la simulation avec Simulink et Simscape. Il vous est possible d'explorer en profondeur l'espace de design avant de prototyper un système à l'aide du hardware.

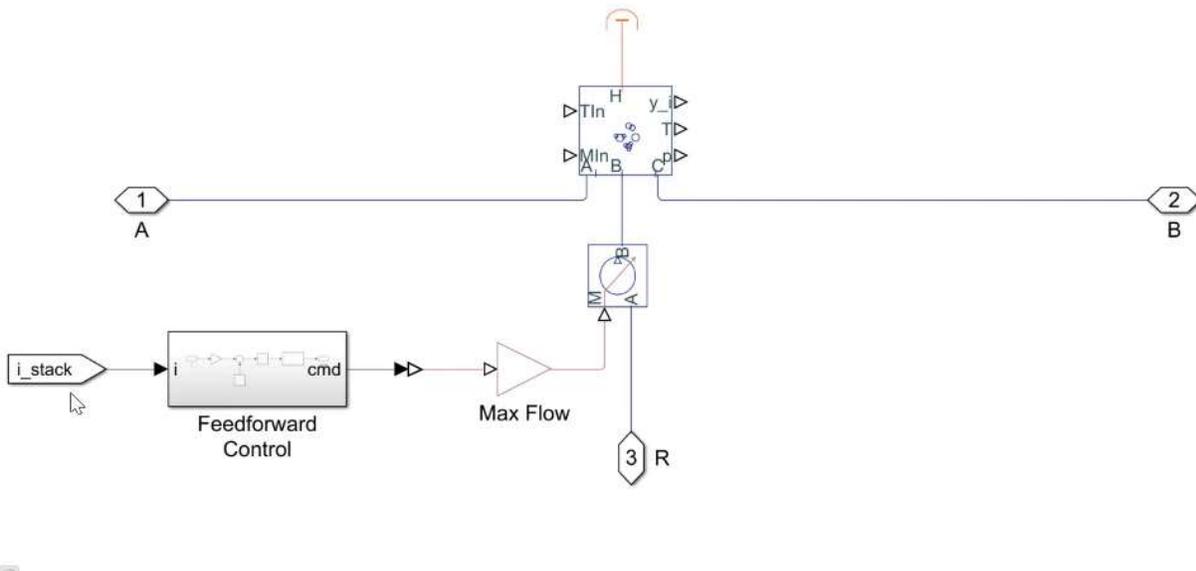


Figure 3. Système de recirculation avec contrôleur et valve.

Humidificateur

L'humidificateur d'anode se fixe au port (B) du système de recirculation (Figure 4). La membrane doit être humide pendant le fonctionnement, sinon elle sera endommagée. Pour ce faire, l'humidificateur maintient l'humidité relative du mélange gazeux, entrant dans l'anode, à 100 % en injectant de la vapeur d'eau dans le tuyau par M_in.

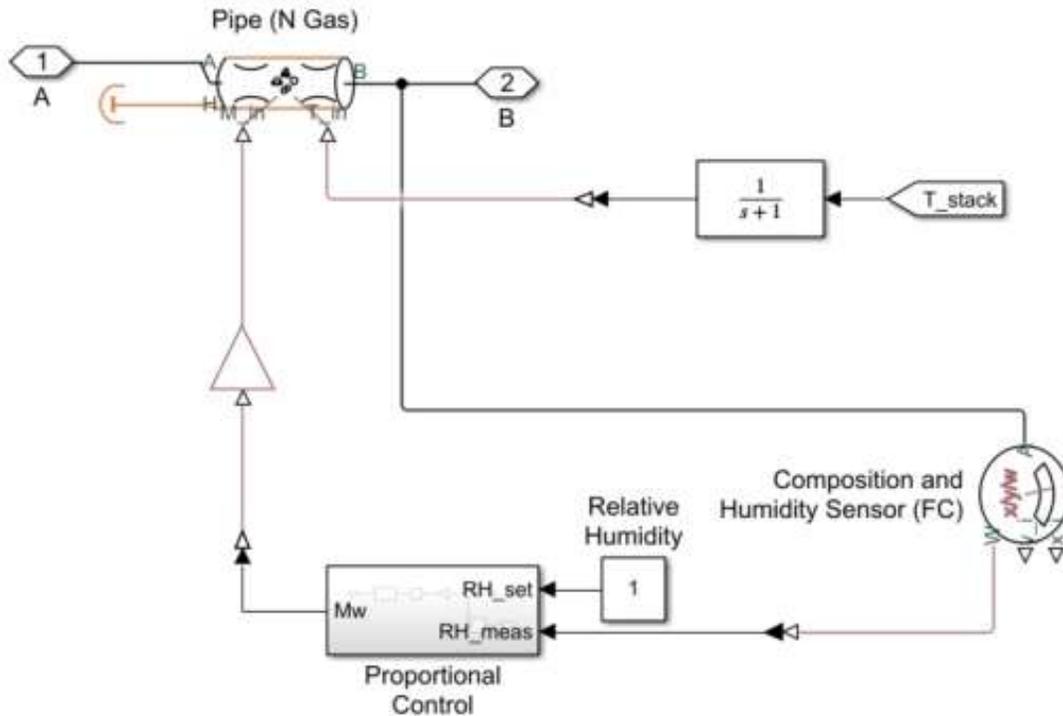


Figure 4. L'élément humidificateur comprend un capteur de composition et d'humidité au niveau de la membrane.

Le capteur de composition et d'humidité, qui est attaché à la membrane, mesure en continu les fractions massiques (x_i) et molaires (y_i) de tous les composants, tandis que le régulateur proportionnel applique de l'eau au mélange selon les besoins. Outre le débit massique (M_{in}), une fonction de transfert (en haut à droite) détermine la température de la vapeur d'eau appliquée à partir de la température actuelle de la pile à combustible.

Anode

À l'intérieur de l'anode (Figure 5), l'hydrogène est divisé en protons et en électrons, phénomène chimique connu sous le nom d'oxydation. Les protons passent à travers la membrane pour atteindre la cathode. Les électrons circulent dans un circuit électrique externe, générant le courant électrique qui alimente la charge connectée.

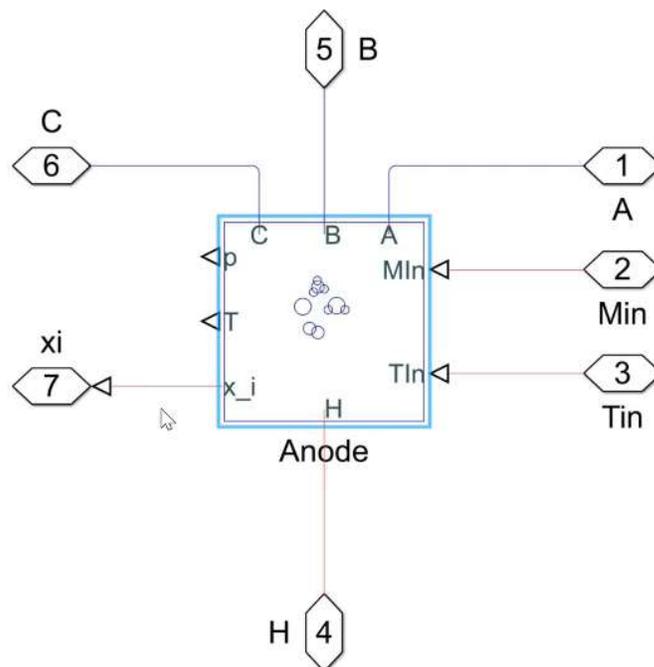


Figure 5. Sous-système de canaux de gaz de l'anode.

L'anode, également modélisée comme une chambre à volume constant, a ses entrées sur le port (C) et évacue le gaz par le port (B). Le port (A) est utilisé pour lire la température et la pression au niveau de la membrane. Aucun flux ne circule dans cet élément. Le flux de la membrane est contrôlé par les ports (Min) et (Tin). Le port (H) assure l'échange de chaleur avec le système de refroidissement/chauffage. Enfin, le port (x_i) sert à obtenir les fractions massiques des différents composants du gaz.

Système d'échappement et de purge

Pendant le fonctionnement, l'azote, en plus des protons et de l'eau, traverse la membrane de la pile à combustible. L'azote s'accumule à l'anode, réduisant l'utilisation de l'hydrogène, ce qui entraîne une diminution de la puissance de sortie. Pour limiter cet effet, le système de pile à combustible utilise un dispositif d'échappement au niveau de l'anode pour purger le système.

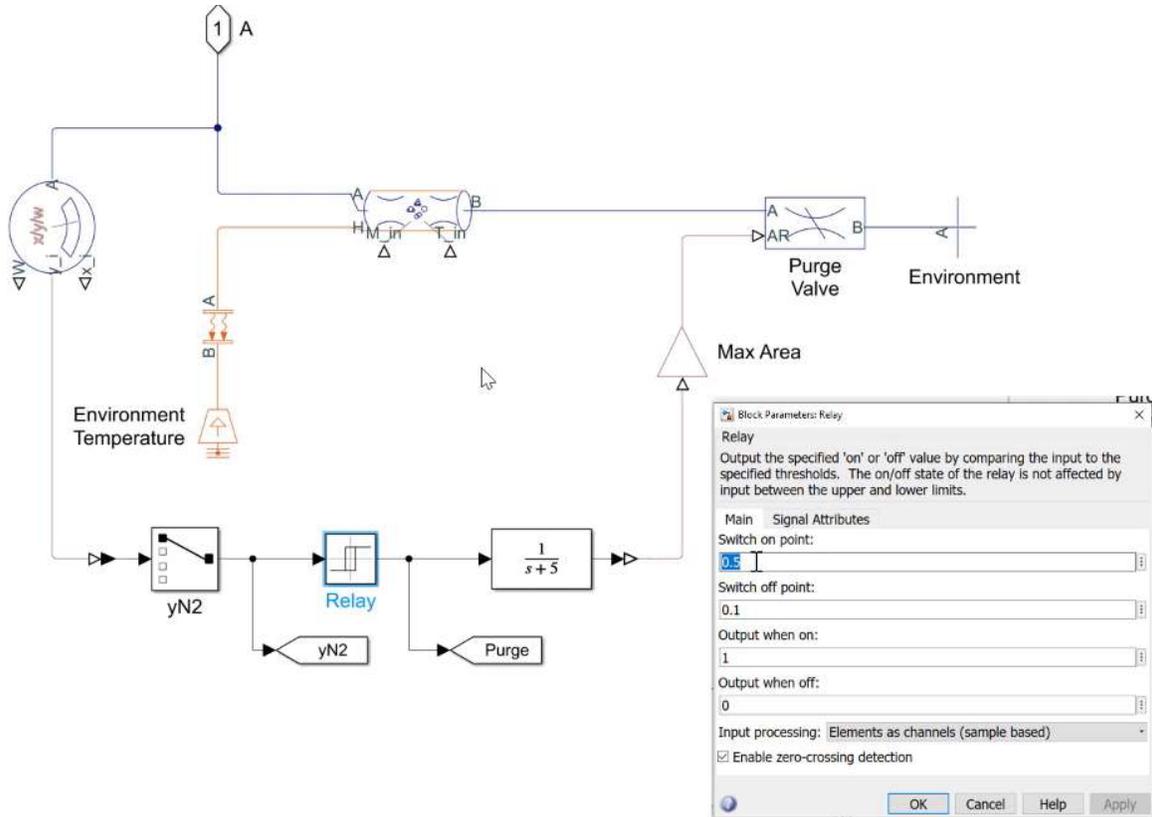


Figure 6. Système d'échappement de l'anode avec relais de purge.

Dans cet exemple, le reflux sera purgé par un relais dès que le niveau d'azote atteindra une fraction molaire de 0,5 (point d'activation dans les paramètres du bloc Relay, Figure 6) et s'arrêtera à 0,1 (point de désactivation dans les paramètres du bloc Relay). Lorsque la purge est activée, la vanne de purge est complètement ouverte. Lorsqu'elle est désactivée, la vanne est complètement fermée.

Validation des stratégies de contrôle : exemple de purge

Vous pouvez utiliser Simscape pour valider le fonctionnement du contrôleur dans ce système. Simscape enregistre les sorties de tous les blocs pendant les simulations. Celles-ci peuvent être inspectées dans Simscape Results Explorer (Figure 7).

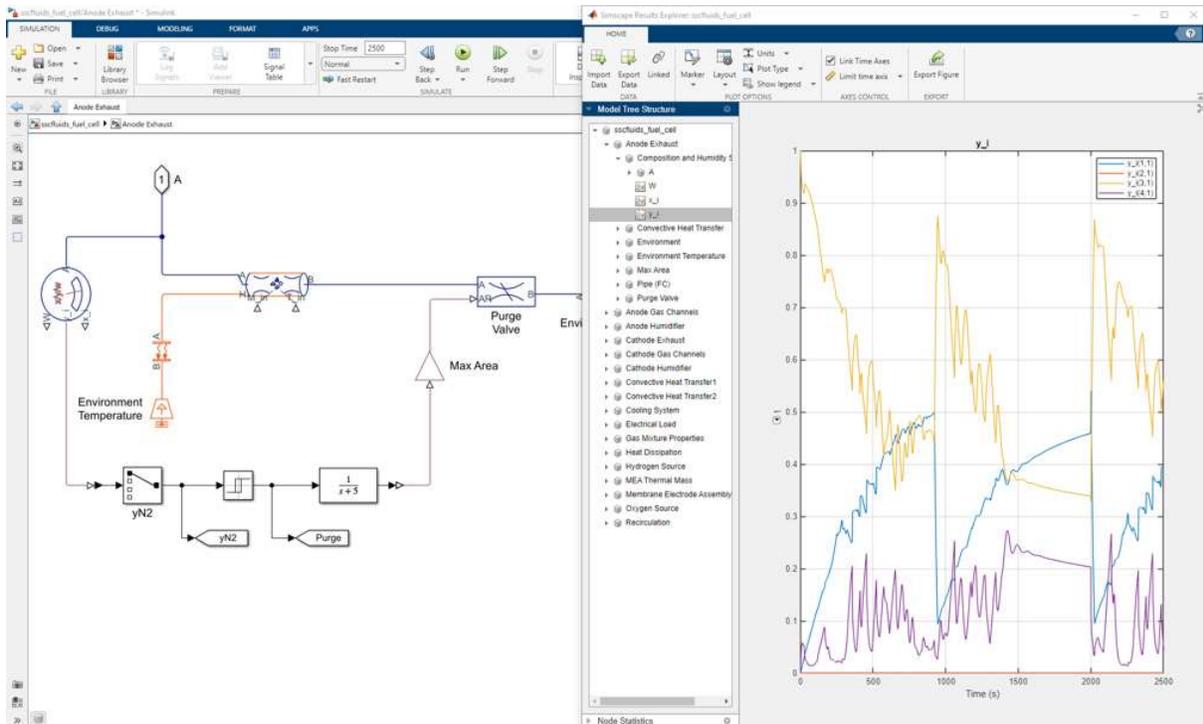


Figure 7. L'élément de purge (à gauche) avec les résultats de simulation dans Simscape Results Explorer.

Nous observons ici les fractions molaires (y_i) des espèces gazeuses au niveau du port (A) du capteur de composition et d'humidité dans le système d'échappement de l'anode pendant le fonctionnement. Le niveau d'azote (ligne bleue) est nul au début. Avec l'augmentation du niveau d'azote, la proportion d'hydrogène (ligne jaune) diminue. Lorsque la proportion d'azote atteint 0,5, le processus de purge commence et s'arrête à 0,1 comme souhaité.

Dans le même temps, nous observons que la quantité d'eau (ligne violette) varie en fonction de l'humidificateur. Enfin, la proportion d'oxygène (ligne orange) reste à zéro, ce qui est une bonne chose car il ne faut jamais que l'oxygène et l'hydrogène se retrouvent du même côté de la cellule. Les résultats de la simulation offrent un moyen de vérifier en images si la stratégie de purge fonctionne, permettant ainsi de valider le contrôleur.

Admission d'air

Le bloc Cathode (non illustré) a la même apparence que l'anode illustrée à la Figure 5. Il comporte également les mêmes ports et les mêmes entrées. À l'intérieur, l'oxygène, en tant que réactif, accepte les électrons qui circulent dans le circuit électrique externe et réagit avec les protons de la membrane, formant ainsi de l'eau.

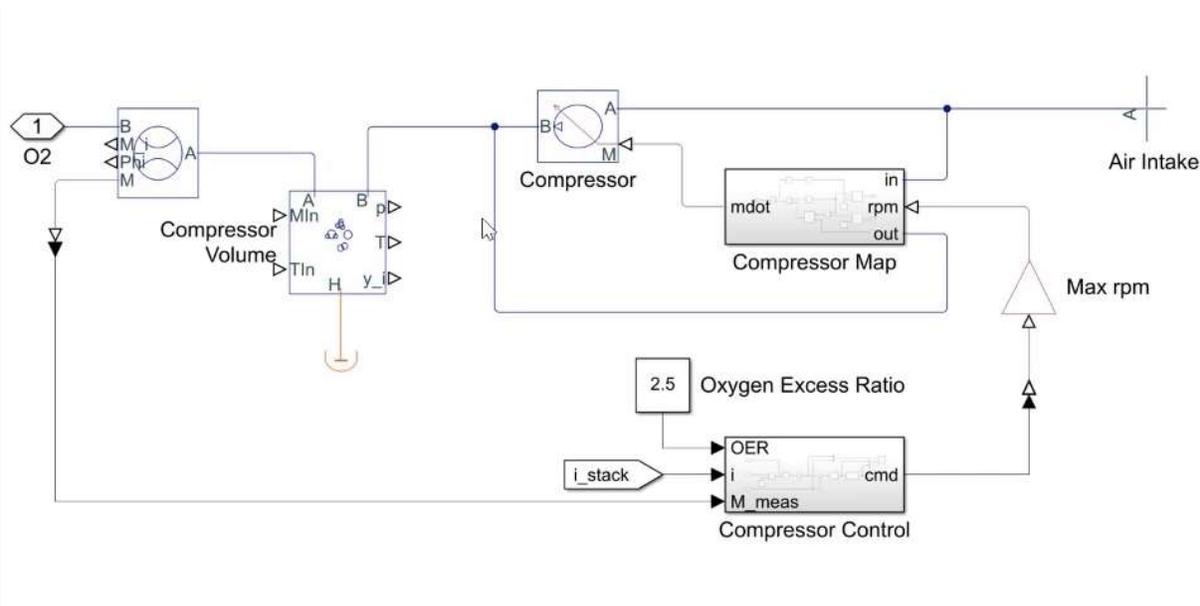


Figure 8. Compresseur d'admission d'air avec contrôleur.

Le côté cathodique du système de pile à combustible diffère également du côté anodique car il absorbe de l'air à pression ambiante et a donc besoin d'un compresseur pour le porter à la pression requise à l'intérieur du stack (Figure 8). Le compresseur dispose de son propre contrôleur, lequel opère en fonction du courant demandé par la charge électrique (i_{stack}). Étant donné la grande disponibilité de l'air, aucun système de recirculation ou de purge n'est nécessaire. Par conséquent, un simple dispositif d'échappement est suffisant.

Système de refroidissement

Le système de refroidissement est connecté à l'anode, à la cathode et à la membrane (Figure 9). Le refroidissement liquide est privilégié en raison de sa grande efficacité. Il se compose d'un réservoir, d'une pompe, d'un échangeur de chaleur, d'un radiateur et du contrôleur de la pompe qui agit sur la température du stack, dont la valeur de consigne est 80° C.

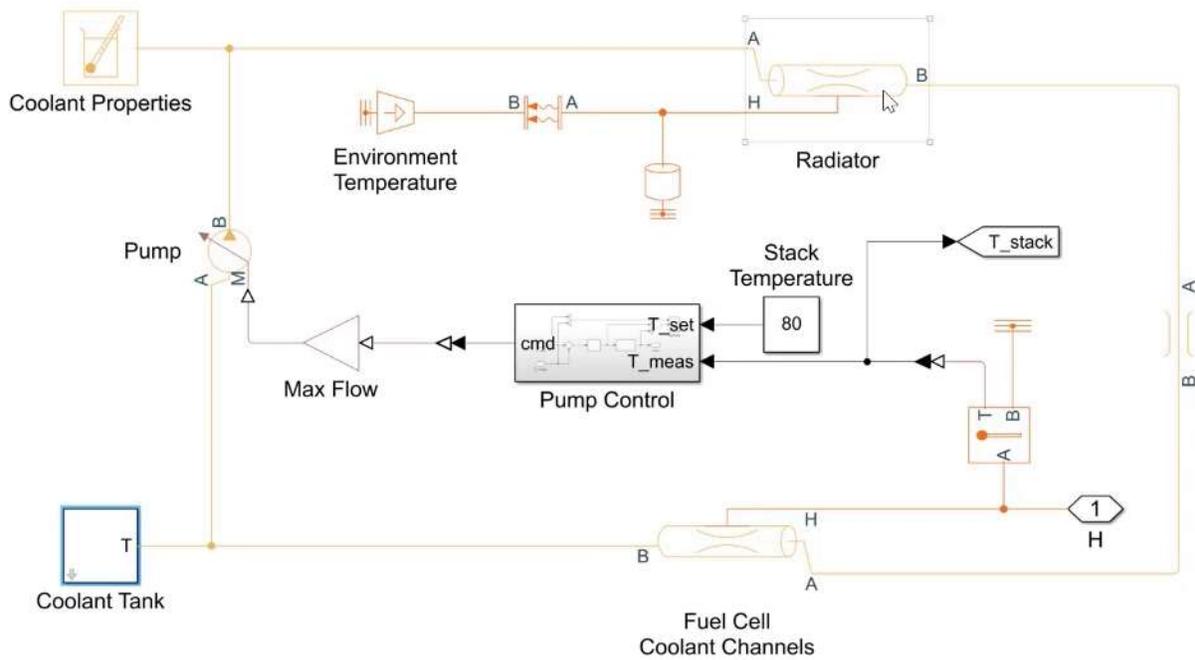


Figure 9. Système de refroidissement liquide.

Langage Simscape : modélisation de composants et de domaines personnalisés

Vous pouvez modéliser vos propres composants et domaines personnalisés à l'aide du langage Simscape, qui se base sur MATLAB et supporte la création de blocs Simscape pouvant être utilisés comme tout autre bloc de bibliothèque (Figure 10). Pour simplifier, l'exemple ci-dessous illustre le bloc Local Restriction du domaine de pile à combustible personnalisé.

Example: Local Restriction within Fuel Cell Domain

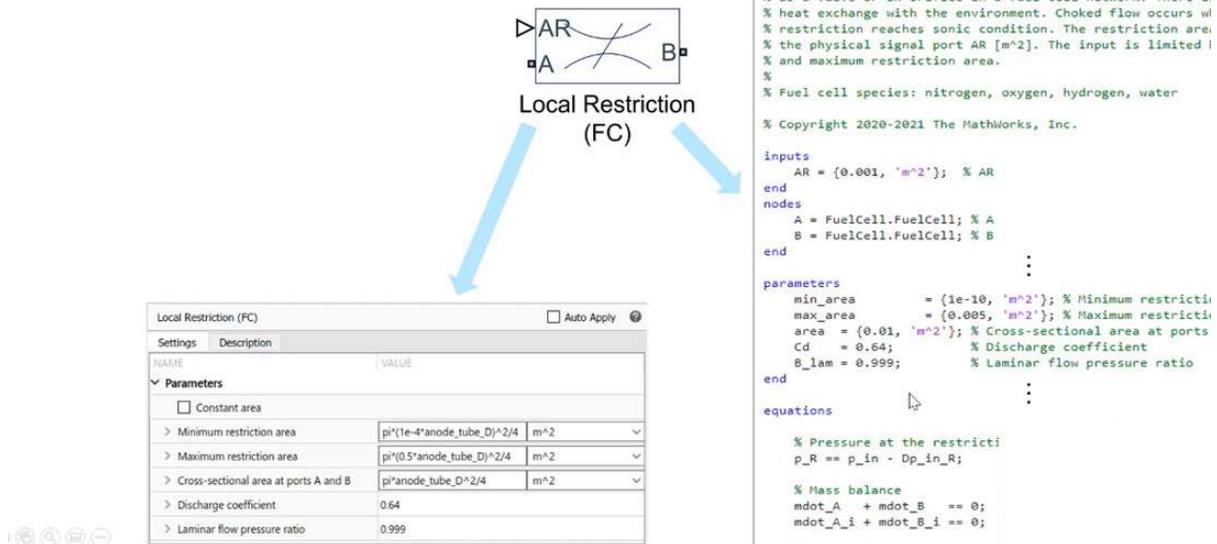


Figure 10. Composant du bloc Local Restriction développé avec le langage Simscape.

Le code source (Figure 10, à droite) commence par un `component` ou un `domaine`, suivi d'un nom. Il peut contenir une description du bloc suivie des entrées qu'il utilise : AR, ses nœuds (A et B), ainsi que les paramètres configurables à l'aide du masque des paramètres (en bas à gauche).

Les équations forment la composante centrale d'un bloc personnalisé. Elles expriment le comportement du composant ; dans cet exemple, elles indiquent la pression à l'entrée de restriction et le bilan massique. Les blocs peuvent également inclure le bilan énergétique ou d'autres types d'équations.

Si vous travaillez avec des partenaires ou si vous distribuez vos modèles et bibliothèques, vous pouvez en outre protéger votre propriété intellectuelle en les enregistrant au format binaire.

Blocs Simscape : sélection des niveaux de fidélité pour la modélisation de systèmes

Le modèle présenté ici utilise une approche basée sur les principes fondamentaux avec la dynamique des gaz. Vous pouvez vous appuyer sur ce niveau de fidélité pour le dimensionnement des composants, le design et la validation des systèmes de contrôle, le réglage des contrôleurs et l'identification des concentrations de toutes les espèces de gaz dans les branches du système.

Pour certaines applications, il est recommandé voire nécessaire de recourir à un niveau de fidélité inférieur, soit parce que les simulations individuelles prennent trop de temps, soit parce que la représentation d'un comportement n'a pas besoin d'être très précise. Dans ces cas de figure, Simscape Electrical™ inclut un bloc Fuel Cell simple reflétant le comportement de la tension par rapport au courant (Figure 11, en bas à gauche).

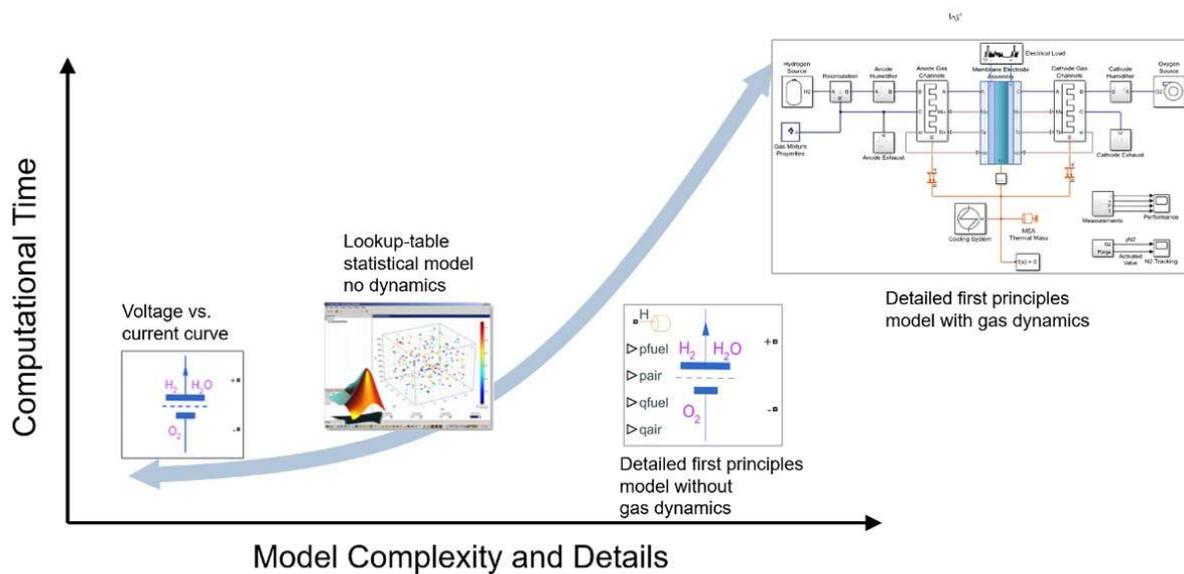


Figure 11. Le temps de calcul augmente en fonction de la complexité du modèle.

Simscape Electrical contient également des modèles plus détaillés basés sur les principes fondamentaux mais sans dynamique des gaz (deuxième à partir de la droite), ainsi que des modèles statistiques basés sur des lookup tables (deuxième à partir de la gauche) sans dynamique. Ces derniers nécessitent toutefois de réaliser des mesures approfondies afin de recueillir les données requises.

Ainsi, en fonction de l'application, vous pouvez sélectionner le modèle qui répond le mieux à vos besoins en termes de niveau de détail et de vitesse de simulation. Vous pouvez également extraire un modèle basé sur des lookup tables à partir du modèle détaillé et l'utiliser pour accélérer les simulations dans les phases de développement ultérieures,

sans pour autant perdre en précision. En combinant cette approche avec d'autres méthodes d'accélération de la simulation, telles que la parallélisation ou le cloud computing, vous pouvez augmenter votre productivité et réduire vos temps de développement.

Conclusion

Simscape offre des options pour la modélisation de piles à combustible à différents niveaux de fidélité. Les composants individuels tels que les réservoirs, les valves, le stack de piles à combustible, les humidificateurs et les compresseurs de différents domaines d'ingénierie ainsi que leurs contrôleurs peuvent être modélisés ensemble avec précision.

Grâce aux domaines et aux composants personnalisés, ces modèles capturent le comportement de systèmes complets de piles à combustible, y compris les caractéristiques thermodynamiques et de diffusion détaillées des gaz mélangés. Ils permettent par ailleurs de gérer la température et l'humidification dans le domaine thermo-liquide.

Vous pouvez vous servir de ces modèles de simulation pour le design, le réglage des paramètres des composants, la validation et la génération du code des contrôleurs et de la logique, les études d'intégration ou encore l'optimisation des paramètres de système et de contrôle.

Aller plus loin

[En savoir plus sur les modèles de piles à combustible](#)

[Regarder un webinar : Intégration des piles à combustible pour la propulsion électrifiée](#)