



HYCE

Rapport Systèmes embarqués

PITA 3A : Intégration des systèmes embarqués et interfaces de communication

ABI KHALIL Paul – BUZEAU Lucas – Couprie Jules – Renou Thomas – ROY Yohan

Table des matières

Table des matières	2
Remerciements	4
1. Introduction	5
2. Méthodologie/démarche.....	5
3. Étude réglementaire	6
4. Présentation des capteurs actionneurs	7
4.1 Présentation des capteurs.....	7
4.2 Présentation des actionneurs	8
4.3 Présentation des liens entre capteurs actionneurs	9
5. Modélisation capteurs / actionneurs.....	10
6. Modélisation SIMULINK de l'architecture générale.....	11
6.1 Réservoirs	12
6.2 Soupape de décharge.....	15
6.3 Vanne d'arrêt automatique.....	16
6.4 Vanne d'arrêt manuelle	17
6.5 TPRD (Thermal Pressure Relief Device).....	18
6.6 Réservoir d'arrivée	19
6.7 Acheminement.....	20
6.8 Dashboard	20
6.9 Tests	21
7. Perspectives d'évolution.....	22
8. Retour d'expérience.....	22
9. Conclusion.....	23
Annexes.....	23

Tables des figures

Figure 1 - Tableau des concentrations critiques en H2	9
Figure 2 - Contraintes réglementaires capteur concentration H2 habitacle	13
Figure 3 - Modélisation capteur concentration H2 habitacle	13
Figure 4 - Architecture théorique.....	14
Figure 5 - Modélisation Simulink du réservoir d'hydrogène 700 bars	15
Figure 6 - Modélisation SIMULINK de la jauge de carburant	16
Figure 7 - Modélisation SIMULINK du capteur de la jauge.....	17
Figure 8 - Calcul de la masse d'hydrogène consommée.....	17
Figure 9 - Modélisation soupape de décharge.....	18
Figure 10 - Modélisation SIMULINK de la vanne d'arrêt automatique	19
Figure 11 - Modélisation SIMULINK d'ouverture de la vanne d'arrêt auto.....	20
Figure 12 - Modélisation SIMULINK du convertisseur.....	20
Figure 13 - Modélisation SIMULINK de la vanne d'arrêt manuelle	20
Figure 14 - Modélisation SIMULINK de la vanne du TPRD.....	21
Figure 15 - Modélisation SIMULINK signal d'entrée du TPRD.....	21
Figure 16 - Modélisation SIMULINK du convertisseur pour TPRD	22
Figure 17 - Modélisation de l'acheminement de l'hydrogène	23
Figure 18 - Modélisation SIMULINK du Dashboard.....	24
Figure 19 - Dashboard à la suite d'une simulation.....	24
Figure 20 - Extrait cahier des charges.....	27
Figure 21 - Tableau des interactions capteurs/actionneurs.....	27
Figure 22 - Architecture SIMULINK Complète.....	28

Remerciements

Nous profitons de ce rapport pour adresser nos sincères remerciements à l'ensemble des personnes ayant contribué à l'aboutissement de ce projet. Nous tenons tout particulièrement à exprimer notre gratitude envers M.Rizoug ainsi que M.Khenfri pour leur accompagnement, leurs orientations éclairées dans nos choix techniques ainsi que la pertinence de leurs conseils tout au long du projet. Nous adressons aussi nos remerciements à nos responsables de promotion à savoir M.Charon et M.Barbier pour leur encadrement tout au long de l'année.

Nous souhaitons également remercier les entreprises qui nous ont apporté leur soutien, notamment la société BOSCH, pour la mise à disposition de documentation relative à l'acheminement d'hydrogène et aux enjeux de sécurité embarquée du prototype.

1. Introduction

Le projet HYCE est porté par le développement de la technologie du moteur à combustion interne à l'hydrogène et son implémentation dans un véhicule de course afin de réaliser le record de tour du Nürburgring dans notre catégorie.

Comme toute nouvelle technologie, le MCI à l'hydrogène apporte des enjeux et de possibles complications, nécessitant une réglementation qui encadre son utilisation, comprenant notamment la sécurité.

C'est dans ce contexte que ce PITA trouve son utilité. Lors de l'utilisation du véhicule sur un tour rapide, le pilote et l'équipe technique doit être capable de se rendre compte de tout mauvais fonctionnement afin d'y remédier et de conserver l'intégrité du pilote et de la voiture.

Le respect de l'article 266 du nouveau règlement de la FIA sur les véhicules hydrogène guidera notre étude et nous permettra de réaliser notre architecture conformément aux attentes.

Le but de ce PITA est donc en premier lieu d'établir une compréhension complète de l'article 266 du règlement FIA afin de l'adapter à notre projet puis de réaliser une architecture complète et fonctionnelle sur Simulink avant d'implémenter notre code sur une carte STM 32.

Le but de ce projet se limite à l'architecture des systèmes embarqués visant la sécurité vis à vis de l'hydrogène.

2. Méthodologie/démarche

Ce projet PITA s'est structuré autour de deux phases principales. Dans un premier temps, une analyse approfondie du besoin a été menée. Celle-ci a consisté à identifier, au regard de la réglementation en vigueur, les exigences essentielles garantissant la sécurité d'un véhicule fonctionnant à l'hydrogène.

Une fois ce besoin défini, la seconde phase, a porté sur la modélisation du système de sécurité embarqué. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel MATLAB SIMULINK, en s'appuyant notamment sur la bibliothèque Simscape. Cette modélisation vise à reproduire le comportement d'un système réel en intégrant les capteurs et actionneurs identifiés lors de la première phase du projet. L'idée est d'aboutir à un système fonctionnel qui nous permet de définir plusieurs types de failles, à savoir :

- Fuite d'hydrogène
- Suppression

- Surchauffe

Ce système vise également à évaluer la réactivité des différents composants, ainsi que la transmission des informations relatives à l'état du véhicule vers le pilote.

3. Étude réglementaire

L'étude du besoin constitue une étape essentielle du projet. Il est en effet primordial de définir avec précision les exigences à respecter dans la conception du système de sécurité embarqué du véhicule du projet HYCE. À défaut, l'homologation du véhicule, condition nécessaire à son utilisation sur circuit, ne pourrait être obtenue.

L'année précédente, une étude réglementaire avait été menée dans le cadre d'un PITA de deuxième année afin d'étudier l'implémentation d'un système de stockage d'hydrogène au sein d'un véhicule de compétition. Cette étude préliminaire s'appuyait sur la réglementation FIA 253. Cependant, au cours de l'année 2025, une nouvelle version de cette réglementation a été publiée : le règlement FIA 266. La première étape de notre travail a donc consisté à mettre à jour le cahier des charges afin de prendre en compte ces nouvelles exigences réglementaires. Un extrait de celui-ci est présenté en annexe n°1.

Cette nouvelle édition concerne principalement les systèmes de stockage d'hydrogène liquide. Son impact sur nos contraintes est donc resté limité, dans la mesure où le projet HYCE s'oriente vers une solution de stockage gazeux. Des informations complémentaires à ce sujet sont disponibles dans la section « Recherche » de notre [site internet](#).

La principale différence entre les deux réglementations était le tableau de concentrations maximales acceptées dans les différents compartiments du véhicule :

Zone	Threshold % by volume	
	Warning	Shut down
Cockpit environment	0.3 %	0.4 %
Compressed hydrogen storage system compartment(s)	0.75 %	1 %
Fuel Cell / ICE	0.75 %	1 %
Fuel Cell Exhaust Line	3 %	4 %

Figure 1 - Tableau des concentrations critiques en H2

Ces valeurs sont essentielles dans l'algorithme de fonctionnement de notre système de sécurité, puisqu'elles correspondent aux seuils limites à partir desquels les différents actionneurs seront déclenchés.

La réglementation en vigueur nous indique également les différents capteurs et actionneurs que doit contenir notre système pour veiller au bon fonctionnement de notre véhicule. Vous trouverez le détail de ceux-ci dans la partie suivante.

4. Présentation des capteurs actionneurs

4.1 Présentation des capteurs

Afin d'identifier les différents capteurs nécessaires au système, nous nous sommes appuyés sur deux documents principaux. Le premier est le règlement FIA 266, qui définit les exigences réglementaires applicables aux véhicules à hydrogène. Le second est une documentation technique fournie par BOSCH, décrivant l'architecture d'acheminement de l'hydrogène du prototype Ligier JS2R H2.

L'ensemble de nos capteurs nous permettent d'avoir des informations sur les différentes zones à risque de notre véhicule : la baie moteur, le compartiment de stockage, l'habitacle et l'échappement.

Tous nos capteurs fonctionnent sur une conversion analogique. Le capteur envoie un signal électrique à l'ECU, la tension électrique de ce signal dépend de la valeur physique qu'elle représente. Tous les capteurs ont une plage de fonctionnement en tension, il faut donc adapter le choix de chaque capteur en fonction du nombre de valeurs et de la précision qu'il requiert.

Une fois ce signal électrique reçu, il est converti en valeur physique : une température, une pression, une concentration. Mais l'ECU ne peut pas lire des valeurs physiques, il ne comprend que des valeurs

analogiques. Il faut donc effectuer une deuxième conversion physique-analogique. On compare ensuite cette valeur analogique à nos valeurs critiques afin de décider de l'action à effectuer.

Voilà la liste de nos différents capteurs :

- Capteur de concentration : ces capteurs nous donnent la concentration en hydrogène dans plusieurs zones critiques du véhicule. L'hydrogène étant très facilement inflammable, il faut pouvoir prévenir la moindre fuite pour éviter les complications. Chacun des capteurs de concentration présente une valeur critique différente pour le warning et le shutdown.

Pour la baie moteur le seuil critique pour le warning est 0.75% de concentration de H₂ et 1% pour le shutdown

Pour l'échappement, le seuil warning est de 3% et le seuil shutdown de 4%. Pour l'habitacle, le seuil warning est de 0.3% et le seuil Shutdown de 0.4%.

Dans le compartiment de stockage, le seuil warning est à 0.75% et le seuil de Shutdown de 1%.

- Capteur de pression : les capteurs de pression sont présents dans le compartiment de stockage, ils s'assurent du bon fonctionnement du détendeur en prenant la pression en aval de ce dernier et permettent de commander la fermeture de la vanne automatique en prenant la pression en amont du détendeur.
- Capteur de température : le capteur de température est lui aussi présent dans le compartiment de stockage. L'hydrogène qui est stocké doit respecter une certaine plage de température, tout dépassement de cette plage doit être captée et entraîner l'arrêt du véhicule.

4.2 Présentation des actionneurs

Les actionneurs sont commandés par l'ECU selon les valeurs issues des capteurs. Ils permettent de remédier aux éventuels problèmes détectés. Nous avons premièrement établi deux niveaux de risque : warning et shutdown. Ces deux niveaux tiennent au courant le pilote et les membres de l'équipe technique et sont représentés par deux lampes LED : jaune pour le warning et rouge pour le shutdown. Tous nos actionneurs sont contenus dans le compartiment stockage.

Voici la liste de nos actionneurs :

- La vanne automatique : la vanne automatique a pour but d'isoler l'hydrogène du circuit d'acheminement. Elle permet de mettre en sécurité le réseau lors d'un dysfonctionnement.

- La vanne manuelle : la vanne manuelle est là pour palier au non-fonctionnement de la vanne automatique. Comme son nom l'indique, son fonctionnement n'est pas commandé par un capteur mais par un bouton directement activé par le pilote.
- La soupape de décharge : la soupape de décharge a pour but de gérer la pression à l'intérieur des réservoirs à carburant. La pression dans ces réservoirs est de base extrêmement élevée : 700 bars. Si cette pression est dépassée, la soupape s'ouvre pour dépressuriser le circuit.
- Le TPRD (Thermal Pressure Relief Device) : cet actionneur est particulier puisqu'il n'est pas actionné par l'ECU mais il reste important pour la sécurité du pilote. C'est un dispositif déclenché en cas de surpression et activé thermiquement.
- Le clapet anti-retour : Il permet d'éviter que l'hydrogène remonte dans la goulotte de remplissage au moment du plein.

4.3 Présentation des liens entre capteurs actionneurs

Chaque actionneur est activé par l'ECU grâce à une information délivrée par un capteur.

- Comme vu auparavant, le TPRD n'est pas activé par un capteur mais le capteur de température dans le compartiment de stockage s'assure tout de même que le TPRD ne s'ouvre pas par erreur. En effet le TPRD s'ouvre à une certaine température car le matériau qui le compose fond. Si ce dernier fond avant la température limite, la dépression s'opère alors qu'elle n'est pas demandée, le capteur de température permet de le savoir.
- Pour la vanne d'arrêt automatique, il faut vérifier que la pression des réservoirs soit toujours à 700 bars. Si les capteurs de pression en amont et en aval du détendeur du compartiment de stockage captent une pression anormalement basse ou élevée, l'ECU commande la vanne en fermeture. La vanne se ferme également si une concentration ou une température anormale est détectée.
- La demande d'activation de la vanne d'arrêt manuelle est déclenchée lorsqu'il reste un débit dans le circuit malgré une position fermée de la vanne d'arrêt automatique.

Ces interactions sont recensées dans un classeur Excel dont vous avez un extrait en annexe.

5. Modélisation capteurs / actionneurs

Avant de procéder à la modélisation des différents capteurs, plusieurs hypothèses ont dû être formulées. En effet, la modélisation dépend à la fois de la grandeur étudiée et des seuils de sécurité définis par la réglementation.

Nous détaillerons ici la modélisation du capteur de concentration d'hydrogène dans l'habitacle. Ce capteur a été le premier à être développé et a servi de base pour la conception des modèles suivants.

Nous rappelons les contraintes réglementaires de ce capteur :

Zone	Threshold % by volume	
	Warning	Shut down
Cockpit environment	0.3 %	0.4 %

Figure 2 - Contraintes réglementaires capteur concentration H2 habitacle

La première étape de la modélisation de notre capteur a consisté à définir sa plage de fonctionnement. Dans notre cas, nous avons choisi d'associer la valeur brute maximale lisible par la carte STM32 à une concentration d'hydrogène de 1 % dans l'habitacle. Nous avons également supposé qu'une concentration de 1 % correspondait à une tension de sortie du capteur égale à 5 V.

La carte STM32 étant équipée d'un convertisseur analogique-numérique codé sur 12 bits, la valeur brute obtenue peut varier entre 0 et 4095. En considérant que la valeur maximale correspond à une concentration de 1 %, nous obtenons alors :

$$1 \% \rightarrow 4095$$

Par application du produit en croix nous obtenons :

$$0,3 \% \rightarrow 1229$$

$$0,4 \% \rightarrow 1638$$

Une fois ces hypothèses posées, nous pouvons définir l'architecture suivante :

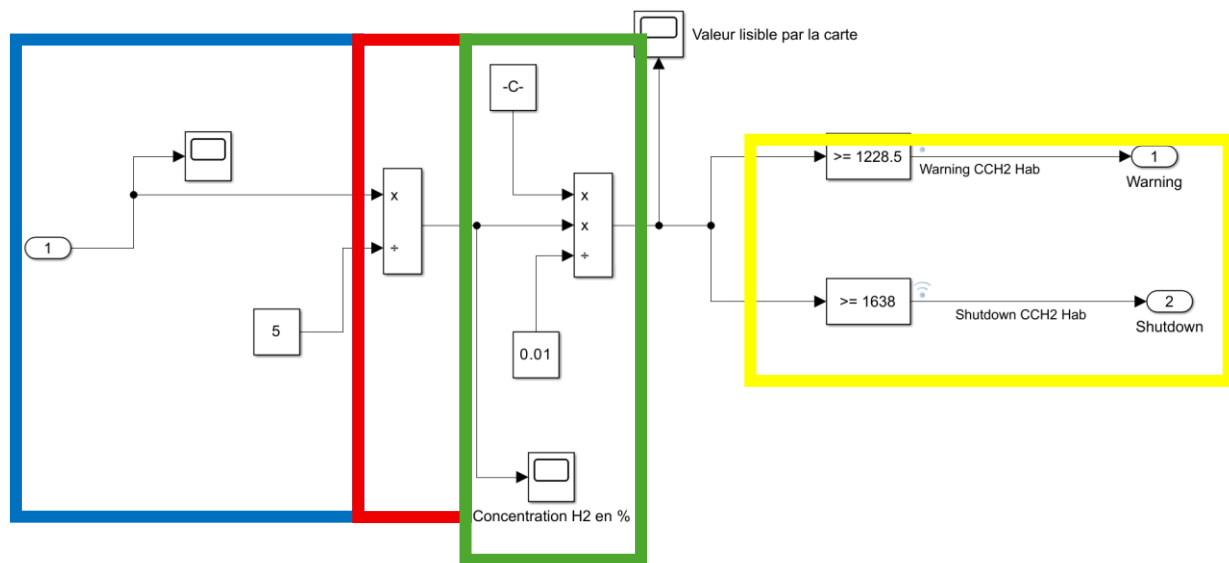


Figure 3 - Modélisation capteur concentration H2 habitacle

Zone bleue : cette zone correspond à la réception de la tension issue du capteur. La tension d'entrée évolue entre 0 et 5 V.

Zone rouge : cette partie du modèle réalise le calcul permettant de déterminer la concentration d'hydrogène associée, exprimée en pourcentage.

Zone verte : cette zone assure la conversion de la concentration en une valeur exploitable par la carte STM32, selon le coefficient suivant :

$$C = \frac{4095}{100}$$

Zone jaune : cette partie correspond à la comparaison entre la valeur d'entrée et les seuils critiques définis. Lorsque la valeur dépasse 1229, la sortie *Warning* prend la valeur 1. Si la valeur dépasse 1638, la sortie *Shutdown* prend également la valeur 1.

L'ensemble des capteurs de notre système est modélisé selon ce modèle avec bien sûr des adaptations au niveau des hypothèses de départ.

6. Modélisation SIMULINK de l'architecture générale

Lors du premier travail de recherche et d'étude du cahier des charges, nous nous étions fixés sur l'architecture suivante. Cette architecture permet de regrouper l'entièreté des capteurs et actionneurs définis auparavant dans ce rapport.

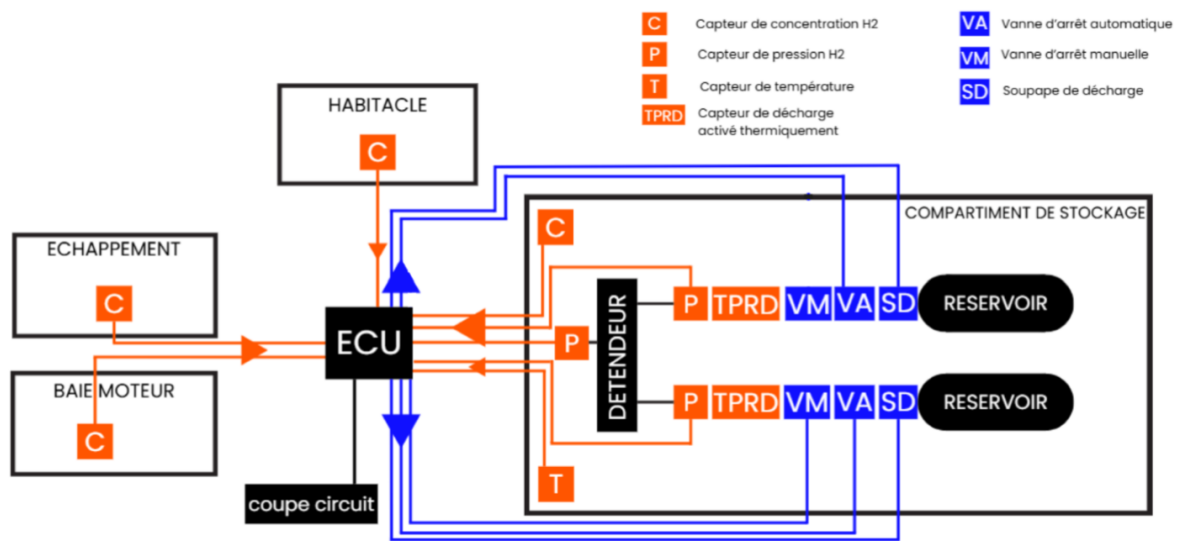


Figure 4 - Architecture théorique

L'objectif ici est donc de reproduire fidèlement cette architecture sur SIMULINK. Grâce à cette représentation nous allons pouvoir mieux s'y repérer visuellement dans un premier temps, et puis y faire des analyses plus précises en plus de valider ou non le système de sécurité complet.

La tâche étant assez lourde, nous avons fait le choix de nous disperser des plus petites tâches pour que chacun puisse travailler sur le logiciel et apprendre. Ensuite nous avons entamé un travail de regroupement pour former une seule architecture que vous trouverez en annexe.

Nous allons alors dans cette partie présenter les différents sous-systèmes modélisés sur SIMULINK, comment ils fonctionnent et leur intégration au sein de l'architecture finale.

6.1 Réservoirs

Au sein du compartiment de stockage, nous avons à sa base le réservoir d'hydrogène gazeux compressé à 700 bars.

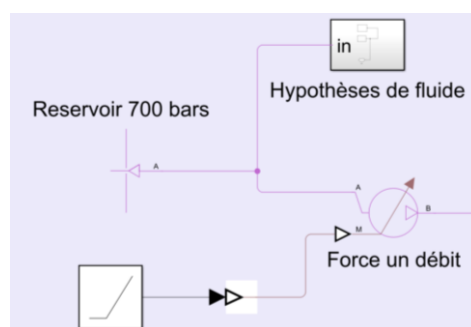
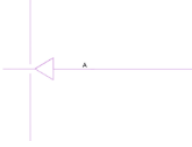
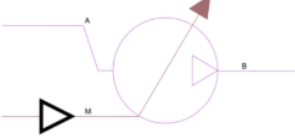


Figure 5 - Modélisation Simulink du réservoir d'hydrogène 700 bars

Les blocs utilisés sur Simulink et leur signification au sein de ce système sont les suivants :

BLOC SIMULINK	Nom	Représentation et utilité
	Gas Reservoir	Simule le réservoir d'hydrogène à une pression fixée (70 MPa)
	Gas Pressure Source	Génère un débit d'hydrogène sortant du réservoir. Le débit étant contrôlé en entrée
	Ramp	Sert d'entrée pour indiquer quel débit l'on sort du réservoir. La rampe permet de simuler une plage intéressante à analyser
	PS Converter	Permet de convertir le signal envoyé par le capteur en un signal compatible avec les blocs Simscape
	Sous ensemble (Gaz Properties + Function Solver)	Permet le calcul des simulations avec un fluide, ici de l'hydrogène gazeux

De manière similaire aux voitures de tous les jours, il est nécessaire d'avoir une jauge de carburant afin de prévenir le pilote du cas où il ne reste plus beaucoup d'hydrogène. Nous avons alors décidé de modéliser une jauge qui indiquera sur le Dashboard si le niveau d'hydrogène est inférieur à 10% et 0%.

Ne pouvant pas mettre un capteur de pression à l'intérieur du réservoir pour en déduire le volume restant, nous devons calculer le débit sortant de celui-ci afin d'obtenir la masse d'hydrogène consommée.

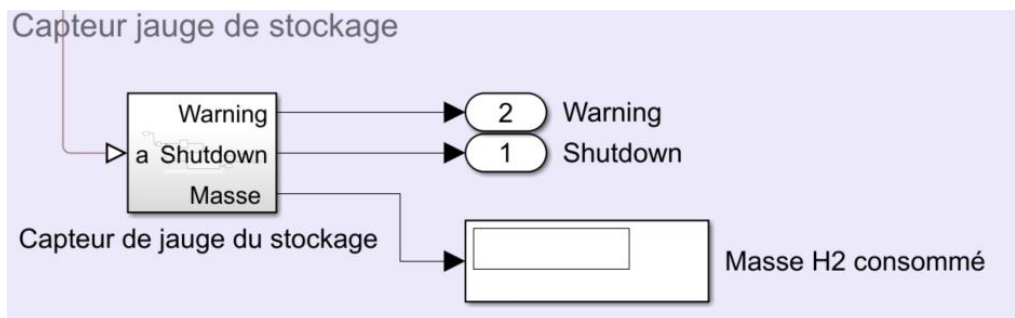


Figure 6 - Modélisation SIMULINK de la jauge de carburant

Nous retrouvons dans cette jauge le capteur avec une entrée et trois sorties. En entrée nous avons un capteur nous donnant la valeur physique du débit massique de l'hydrogène sortant du réservoir, en $[\text{kg.s}^{-1}]$. En sortie nous retrouvons les Warning et Shutdown qui sont relié au Dashboard pour le pilote, et le Display nous permettant de voir l'évolution de la masse consommée sur SIMULINK lorsque l'on test le système.

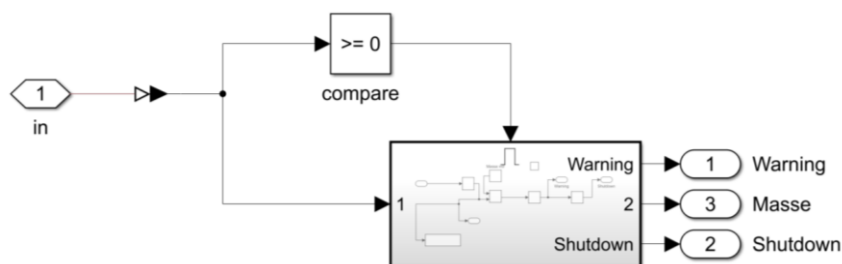


Figure 7 - Modélisation SIMULINK du capteur de la jauge

Le capteur est lié à une mesure du débit massique en sortie du réservoir. Si ce débit est nul, alors il est inutile de calculer la masse consommée, d'où le ">= 0" qui permet d'activer le système qui mesure la masse.

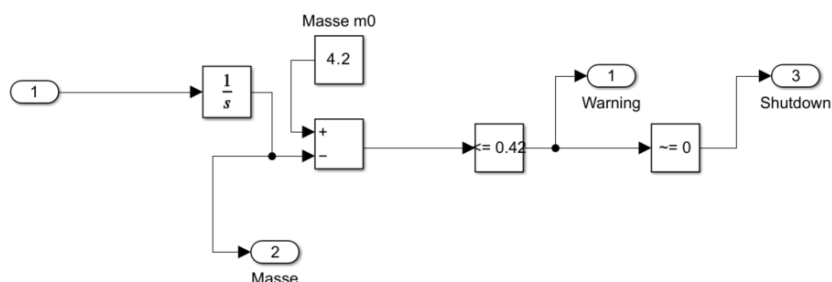


Figure 8 - Calcul de la masse d'hydrogène consommée

Pour calculer cette masse, il suffit d'intégrer le débit massique $[\text{kg.s}^{-1}]$ que l'on mesure par le temps. Nous soustrayons cette masse à la masse initiale du réservoir que l'on fixe ici à 4.2kg, pour avoir le

pourcentage d'hydrogène restant au sein du réservoir. Nous fixons le Warning à 10% d'hydrogène restant soit 0.42kg et le Shutdown à 0.

Cette jauge n'est reliée à aucuns actionneurs mais représente une donnée essentielle pour le pilote et est donc affiché sur le Dashboard.

6.2 Soupape de décharge

La soupape de décharge est un actionneur mécanique assurant la régulation de la pression en aval du régulateur de pression. Son rôle est de maintenir la pression du circuit d'acheminement d'hydrogène à une valeur de 700 bars.

Cette soupape est constituée d'un ressort calibré de manière à ce que son déplacement provoque l'ouverture d'un orifice, laissant échapper de l'hydrogène et entraînant ainsi une diminution de la pression dans le circuit.

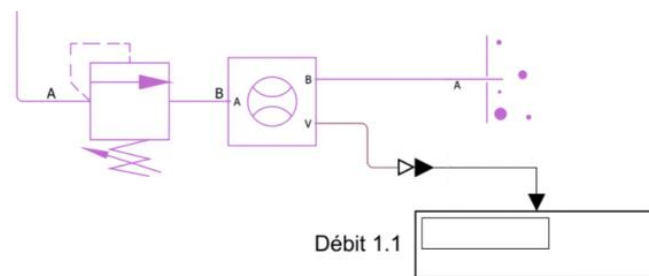


Figure 9 - Modélisation soupape de décharge

BLOC SIMULINK	Nom	Représentation et utilité
	Pressure Relief valve	Permet de simuler une soupape de décharge. Ce bloc est configuré avec une pression nominale à partir de laquelle la soupape s'ouvre.
	Flow Rate Sensor	Permet de mesurer le débit massique du gaz qui circule

	PS Converter	Permet de convertir le signal envoyé par le capteur en un signal compatible avec les blocs Simscape
	Gas Reservoir	Permet de récupérer l'excès d'hydrogène du circuit principal en cas de surpression

Le tuyau de décharge va acheminer l'hydrogène lorsque la soupape de surpression est ouverte, c'est à dire lorsque la pression nominale du circuit principal sera supérieure à 700 bars. C'est l'ouverture de cette soupape qui permet de faire chuter la pression dans le circuit principal.

Le bloc « Flow Rate Sensor » nous permet de mesurer le débit pour connaître l'état « ouvert » ou « fermé » de cette soupape de décharge.

Le réservoir placé à l'extrémité du tuyau de décharge nous permet de récupérer l'hydrogène dévié pour ne pas le laisser s'échapper dans le véhicule ce qui pourrait déclencher une surconcentration d'hydrogène est donc l'immobilisation du véhicule.

6.3 Vanne d'arrêt automatique

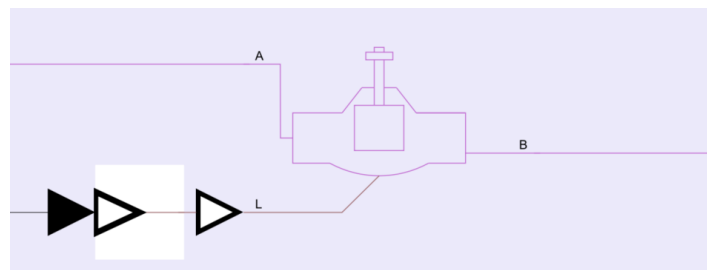
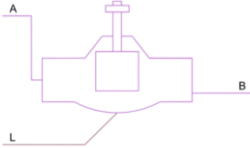


Figure 10 - Modélisation SIMULINK de la vanne d'arrêt automatique

Les blocs utilisés sur Simulink et leur signification au sein de ce système sont les suivants

BLOC SIMULINK	Nom	Représentation et utilité
	Gate valve	Valve à ouverture commandable (Proportion de la section ouverte entre 0 et 1) L'ouverture est commandée via le signal L

	PS Converter	Permet de convertir le signal envoyé par le capteur en un signal compatible avec les blocs Simscape
---	--------------	---

L'ouverture de cette vanne est dépendante des valeurs mesurées par les capteurs de concentration en hydrogène dans les différentes parties de la voiture (Baie moteur, Habitacle, Echappement).

Le principe est le même que celui expliqué ci-dessus, le capteur envoie un 1 lorsqu'il veut fermer la vanne.

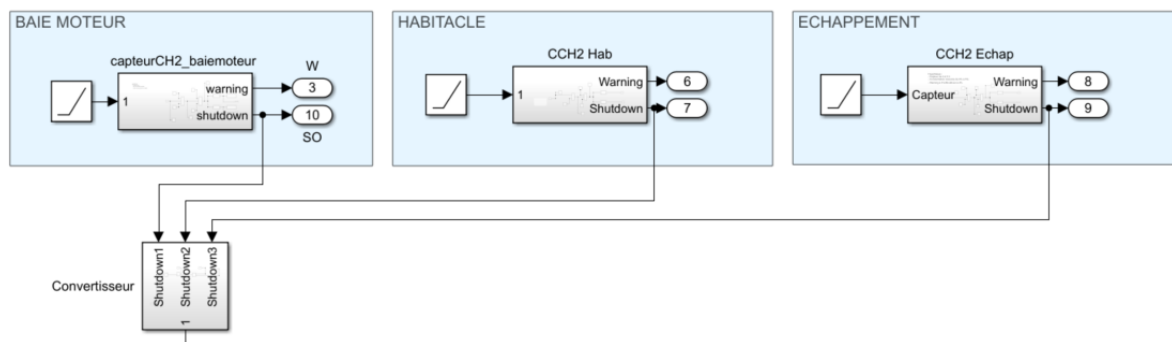


Figure 11 - Modélisation SIMULINK d'ouverture de la vanne d'arrêt automatique

Pour assurer la fermeture de la vanne pouvant provenir d'un signal de trois capteurs potentiels, nous avons alors modélisé le convertisseur suivant :

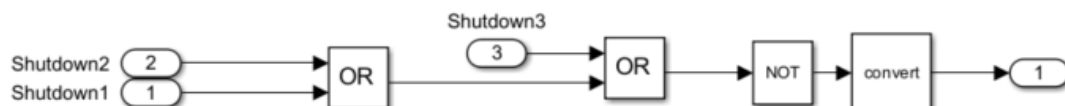


Figure 12 - Modélisation SIMULINK du convertisseur

De plus, le bloc "Gate valve" s'ouvre si on lui transmet un 1 et se ferme avec un 0. Une fois que nous arrivons à transmettre un 1 si un des trois capteurs veut le transmettre à l'aide des blocs logiques "OR", il suffit d'inverser le 0 en 1 ou inversement à l'aide du bloc "NOT".

Enfin nous convertissons ce booléen en une valeur continue entre 0 et 1 pour éviter les problèmes de discontinuités dans les calculs au sein de SIMULINK.

6.4 Vanne d'arrêt manuelle

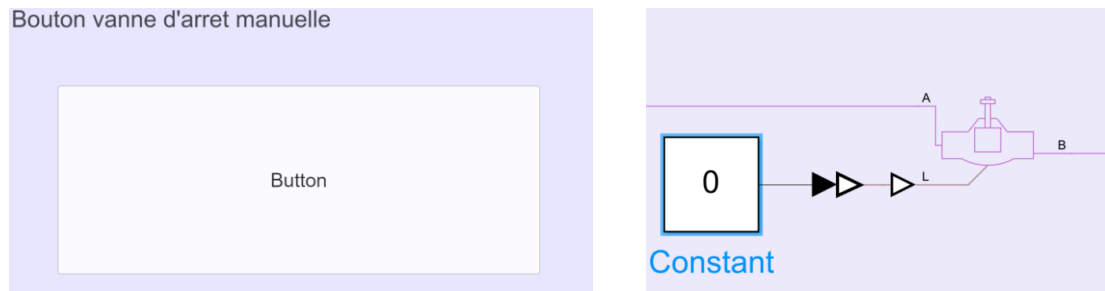


Figure 13 - Modélisation SIMULINK de la vanne d'arrêt manuelle

La vanne d'arrêt manuelle se modélise de la même manière que la vanne d'arrêt automatique. La différence est au niveau du signal transmis pour contrôler sa fermeture.

En effet, cette vanne doit être contrôlable par le pilote, d'où le terme "manuelle". Nous avons alors un bloc "Constant" qui vaut 1 au repos et devient 0 lorsqu'il le bouton associé est pressé, ce qui assure l'ouverture ou la fermeture de la vanne.

6.5 TPRD (Thermal Pressure Relief Device)

Nous avons précédemment défini le TPRD comme un actionneur non contrôlé par l'ECU et qui s'active lui-même thermiquement. Nous avons souhaité tout de même le représenter dans notre architecture comme contrôlable via le capteur de température, afin de simuler son comportement. Il en résulte alors une sécurité légèrement renforcée.

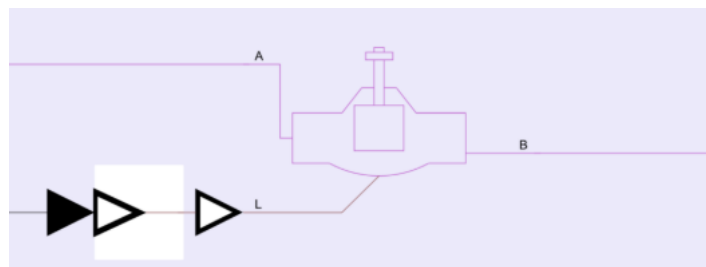


Figure 14 - Modélisation SIMULINK de la vanne du TPRD

La modélisation SIMULINK du TPRD est alors similaire à celle des vannes d'arrêt manuelles et automatique, avec seule différence son signal d'entrée. En effet cette vanne est dépendante de la valeur lue par le capteur de température qui est au sein du compartiment de stockage.

On représente celui-ci comme suivant :

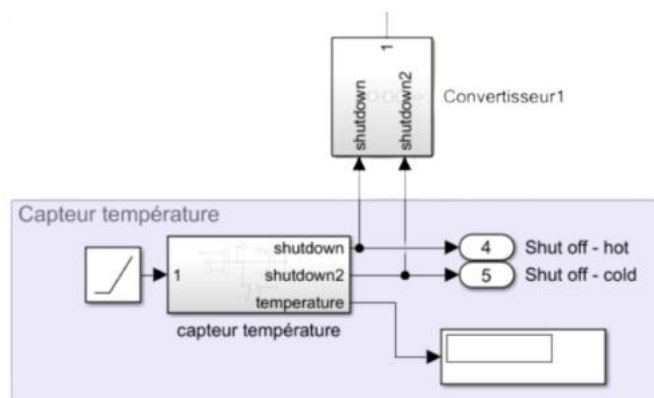


Figure 15 - Modélisation SIMULINK signal d'entrée du TPRD

La logique est alors la même que pour les capteurs de concentration en hydrogène, et la sortie est similaire à celle de la vanne d'arrêt automatique, où l'on retrouve le convertisseur ci-dessous pour assurer la fermeture de la vanne lorsque la température au sein du compartiment est $<-45^{\circ}\text{C}$ ou $>80^{\circ}\text{C}$.

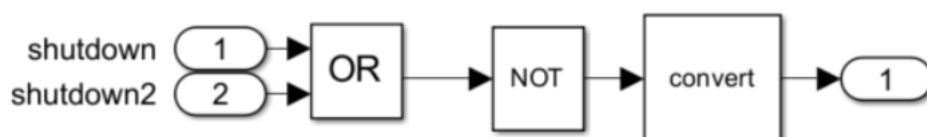


Figure 16 - Modélisation SIMULINK du convertisseur pour TPRD

6.6 Réservoir d'arrivée

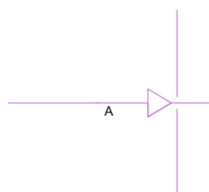


Figure 17 - Modélisation SIMULINK du réservoir de sortie

Si l'on suit la logique de reproduire l'architecture initiale, nous devons modéliser le détendeur qui fait donc passer l'hydrogène à 3 bars pour ensuite avoir un capteur de pression qui permet de vérifier la bonne détente du gaz. Nous avons fait le choix au sein de cette étude de ne pas représenter ces deux éléments malgré le fait qu'ils soient nécessaires à la sécurité de l'acheminement de l'hydrogène.

Ainsi nous prenons comme fin d'acheminement de l'hydrogène un réservoir d'hydrogène avec une pression fixée à 3 bars (pour simuler l'état de sortie du détendeur).

6.7 Acheminement

Simulink modélise les actionneurs comme “branchés en contact” si l’on ne modélise pas l’acheminement d’hydrogène par des tuyaux, ce qui amène des soucis de calculs sur le logiciel. Ainsi notre architecture présente entre chaque actionneurs le système suivant :

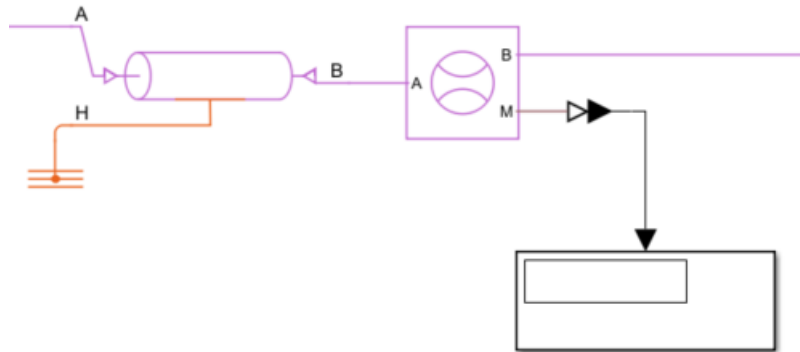
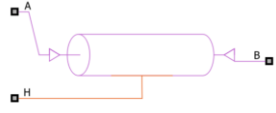
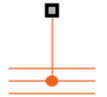
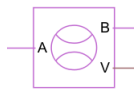


Figure 18 - Modélisation de l'acheminement de l'hydrogène

Les blocs utilisés sur Simulink et leur signification au sein de ce système sont les suivants :

BLOC SIMULINK	Nom	Représentation et utilité
	Gas pipe	Permet à SIMULINK de pouvoir calculer les équations du gaz entre tout l'acheminement
	Thermal Reference	Permet de mettre des hypothèses sur des références thermiques du gaz lors de l'acheminement
	Flow Rate Sensor	Permet de mesurer le débit massique du gaz qui circule
	Display	Permet de visualiser lors des test le débit sortant des différentes vannes

6.8 Dashboard

Comme expliqué dans l'introduction, le pilote doit être capable de se rendre compte de tout mauvais fonctionnement afin d'y remédier et de conserver son intégrité et celle de la voiture. C'est la raison pour laquelle un Dashboard recensant l'état des différents capteurs est primordial pour la sécurité de tous.

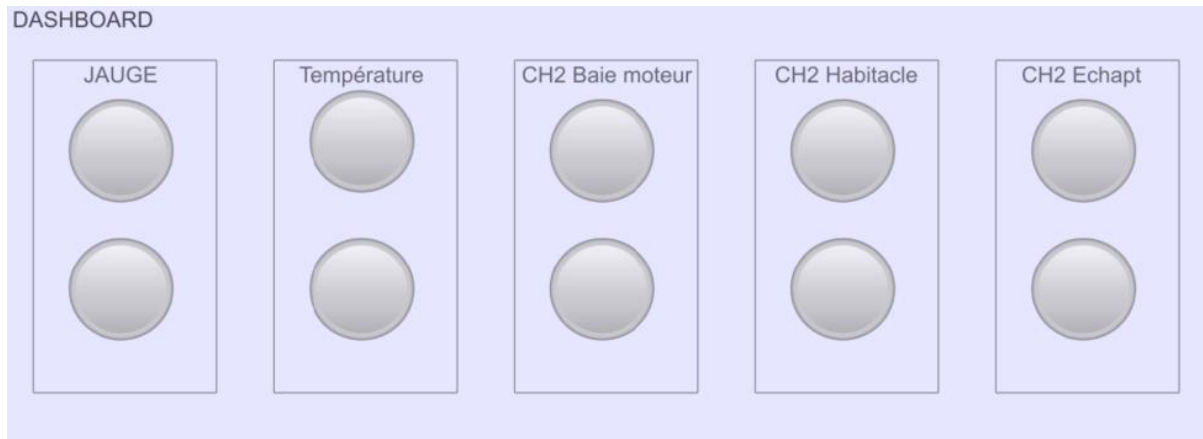


Figure 19 - Modélisation SIMULINK du Dashboard

6.9 Tests

Nous avons balayé l'ensemble de l'architecture, il faut désormais s'assurer que l'entièreté de l'architecture soit cohérente et fonctionnelle.

Étant encore au stade théorique du projet, il est compliqué de savoir exactement tous les paramètres nécessaires à une simulation SIMULINK précise et représentante de notre système (longueur de tuyaux, diamètre de section des valves, etc..). Nous souhaitons alors, à travers ces tests, vérifier le bon fonctionnement des capteurs avec des valeurs transmises. C'est la raison pour laquelle nous retrouvons le bloc "Ramp" en entrée de tout capteurs, il nous permet de simuler des datas virtuelles et vérifier que le système réagit tel qu'on le souhaite, c'est à dire des voyants jaune ou rouge sur le Dashboard.

Un outil permettant de nous aider sont les bloc "Display" qui permettent sur l'interface SIMULINK lors des simulations d'afficher en temps réelles les données physiques des différents capteurs, et ainsi une cohérence globale.

Voici alors un Dashboard par suite d'une simulation :

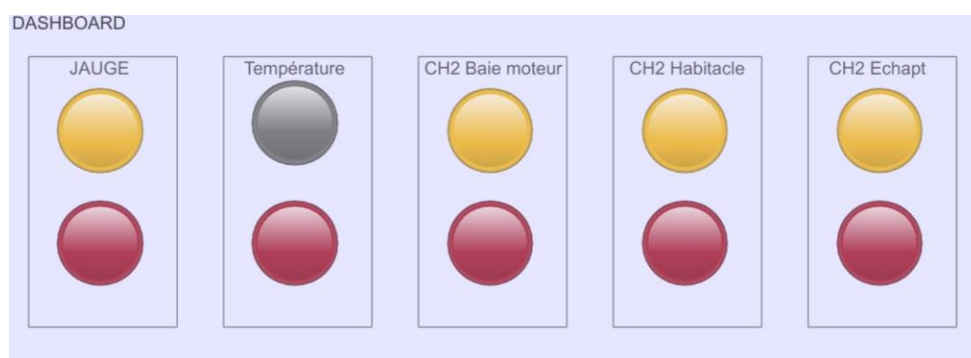


Figure 20 - Dashboard à la suite d'une simulation

L'objectif est d'alors effectuer de multiples tests de manière à isoler chaque capteur et pouvoir valider le fonctionnement de tous les composants un à un.

7. Perspectives d'évolution

Bien que notre architecture SIMULINK soit opérationnelle, elle nécessite l'ajout de certains capteurs pour garantir des simulations plus conformes à la réalité. Un travail de recherche sur les caractéristiques physiques du système, notamment les paramètres des tuyaux et des valves, sera donc indispensable pour augmenter la fidélité du modèle. Cette phase de modélisation n'étant toutefois qu'une première étape, l'année prochaine sera consacrée au passage au matériel réel. Conformément aux recommandations techniques, nous allons réaliser un faisceau dédié, séparé du système d'origine du véhicule. Ce défi technique implique le choix de connecteurs répondant aux normes de compétition. Par ailleurs, le code développé sous MATLAB/SIMULINK devra être implémenté sur une carte STM32 afin de permettre le pilotage réel des capteurs et actionneurs du système.

Un autre objectif qui pourrait poursuivre ce projet PITA concerne le développement d'un système de communication entre le véhicule et le Pitwall ainsi qu'avec les commissaires de pistes. L'objectif d'une télémétrie en temps réel est d'anticiper des défaillances afin de réagir au plus vite pour la sécurité du pilote et des commissaires.

Enfin, l'enregistrement et l'exploitation de ces données télémétriques pourront également constituer un axe de travail intéressant afin d'analyser le comportement du système du véhicule et d'optimiser ses performances futures.

8. Retour d'expérience

Ce projet PITA a constitué une expérience enrichissante sur le plan technique et organisationnel. Travailler sur un problème concret a permis d'aborder de véritables enjeux en développant des compétences en systèmes embarqués et en modélisation avec Simulink et Matlab.

Sur le plan technique, le fait d'avoir développé l'architecture en sous-systèmes était efficace. Cette méthode nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement de chaque capteurs et actionneurs et leurs interactions en simplifiant l'identifications des différentes erreurs que nous avons pu avoir lors de leurs modélisations et des tests réalisés.

Cependant, nous avons rencontrés plusieurs difficultés au cours de la modélisation notamment sur le travail collaboratif. Nous avons dû instaurer une gestion rigoureuse des versions et des fichiers pour maintenir une organisation cohérente et assurer un suivi précis de nos avancées. De plus, l'apprentissage de la librairie Simscape Fluids et de certains blocs spécifiques de Simulink a exigé un temps d'apprentissage important.

Enfin, ce projet nous a permis de développer des compétences importantes comme la gestion de projet, de communication et la répartition des tâches sur le long terme en fonction des domaines de chacun. Nous avons également dû mener un travail de recherche approfondi pour assimiler les contraintes réglementaires de la FIA et pour comprendre le fonctionnement du système étudié.

Ainsi, nous devons prendre compte de ces points positifs et négatifs afin d'améliorer notre efficacité pour les prochaines phases du projet.

9. Conclusion

Ce projet PITA s'est concentré sur la conception et la modélisation d'une architecture de sécurité embarqué pour un véhicule de course fonctionnant à l'hydrogène. L'objectif principal était d'établir un système embarqué capable de garantir l'intégrité du pilote et de la voiture en répondant aux exigences de la réglementation FIA. Cette étude a permis de définir les différents capteurs, actionneurs et a conduit à la définition précise des seuils critiques pour l'hydrogène dans les différents compartiments, permettant ainsi d'assurer la sécurité du pilote et le fonctionnement du système.

La phase de modélisation sur SIMULINK a été le cœur de ce projet, elle nous a permis de mettre des exigences théoriques en un système. Ainsi nous avons pu réaliser une architecture cohérente en intégrant plusieurs scénarios critiques (les fuites d'hydrogènes, la surpression et la surchauffe). Le fonctionnement en sous-système et le Dashboard réalisé nous a également permis de vérifier le comportement du système.

Bien que ce projet ait montré la cohérence de l'architecture, il nous faudra prendre en compte pour avoir une étude plus réaliste les différentes conditions des câbles (diamètre, longueurs, étanchéité ...) mais également la façon dont nous devons procéder afin d'introduire ce faisceau à notre véhicule.

Ce travail constitue donc une base solide sur laquelle nous pourrons continuer de travailler cet été afin d'assurer le bon fonctionnement du véhicule.

Annexes

	A	B	C	D	E	F
1	Cahier des charges					X
2						
3	Sous ensemble	Contraintes	Valeur	Importance	Norme	Règlement / Article
4	Général	Pression nominale de service maximale	70 MPa	Elevée	R134	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.1
5		Masse d'hydrogène transportée maximale	8 Kg	Elevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.2
6		Pureté de l'hydrogène	95%	Secondaire		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.3
7	Compartment stockage	Compartment stockage hydrogène obligatoire		Elevée	R134	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.4
8		Concentration en H2 maximale	0,75% warning, 1% shut down	Elevée	R134	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.5
9		Construit en matériaux ininflammables		Elevée	UL94 V0 / ISO 19881	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.6
10		Absolument étanche aux fuites hormis le système de ventilation	< 1 Pa.cm³/s	Elevée	EN 60068-2-17	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.7
11		Ventilation reliée à l'extérieure		Elevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.8
12		Intégration de vannes d'arrêt automatique		Elevée	R134 / ISO 21266-1:20	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.9
13		Capteur de température	-40°C < t < +85°C	Elevée	R134	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.10
14		Intégration de soupapes anti-retour pour l'alimentation des réservoirs	au - 2 vannes en série	Elevée	R134	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.11
15		Intégration de soupapes de décharge		Elevée	ISO 21266-1	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.12
16		Intégration d'une vanne manuelle sur chaque réservoir		Elevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.13
17		Embout de remplissage		Secondaire		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.14
18		Dispositif de purge		Elevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.15
19		Protocole de ravitaillement		Elevée	ISO 19880-1	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.16
20	Cockpit	Concentration en H2	0,3% warning, 0,4% shut down	Elevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.17
21	Motorisation	Concentration en H2 dans l'échappement	3% warning, 4% shut down	Elevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.18
22		Concentration en H2 dans la baie moteur	0,75 % warning, 1% shut down	Elevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 253 - D.5.19

Figure 21 - Extrait cahier des charges

Emplacement	Capteurs	Valeurs Critiques	Actionneurs	Action	Communication
Baie Moteur	Concentration H2	0,75 % -> Warning 1% -> Shut Down	X Vanne automatique rés (VA) + coupe circuit (CC) + Vanne manuelle (VM)	Affiche l'alerte (intérieur + extérieur) Affiche l'alerte (int + ext) + Coupe le moteur + coupe l'acheminement + si possible: Ventilation moteur à fond	Diode Jaune Diode Rouge + Alerte sonore
Echappement	Concentration H2	3 % -> Warning 4 % -> Shut down	X VA + CC + VM	Affiche l'alerte (intérieur + extérieur) Affiche l'alerte (int + ext) + Coupe le moteur + coupe l'acheminement	Diode Jaune Diode Rouge + Alerte sonore
Habitacle	Concentration H2	0,3 % -> Warning 0,4% -> shutdown	X VA + CC + VM	Afficher l'alerte (intérieur/extérieur) Afficher l'alerte + coupe le moteur + coupe l'amechinement	Diode jaune Diode rouge + Alerte sonore
stockage	Concentration H2	0,75% -> warning 1% -> Shut Down	X VA + CC + VM	Afficher l'alerte (intérieur/extérieur) Afficher l'alerte + coupe le moteur + coupe l'amechinement	Diode jaune Diode Rouge + Alerte sonore
stockage	capteur température	-40°C<=T<=85°C	VA + CC + VM	Afficher l'alerte + coupe le moteur + coupe l'amechinement	Diode Rouge + Alerte sonore
Emplacement	Actionneurs	Valeurs Critiques	Capteurs	Action	Communication
stockage	TPRD (mécanisme s'ouvrant en cas d'une température trop forte)	P=700 bars	capteur température (détecter une ouverture par erreur) + capteur de chute de pression	Afficher ouverture TPRD jusqu'à retour à pression normale, afficher possible ouverture par erreur	Diode Rouge + Alerte sonore
stockage	soupape de décharge	débit limite H2 P=700 bars; concentration H2	capteur de pression -> calcul du débit par l'ECU	Afficher l'utilisation de la soupape jusqu'au retour à un débit normal	Diode jaune
stockage	Vanne d'arrêt automatique	échappement	capteur de pression, capteur de concentration	Afficher l'actionnement de la vanne	Diode Rouge + Alerte sonore
stockage	Vanne manuelle	X	capteur de position de la vanne d'arrêt automatique	Afficher le non fonctionnement de la VA	Diode bleue (assurer fermeture de VM)
stockage	soupape anti-retour	0,75% de H2	capteur de concentration H2 (juste après l'embout de remplissage)	Afficher le non fonctionnement de la soupape + coupe le moteur et l'acheminement	Diode rouge + Alerte sonore

Figure 22 - Tableau des interactions capteurs/actionneurs

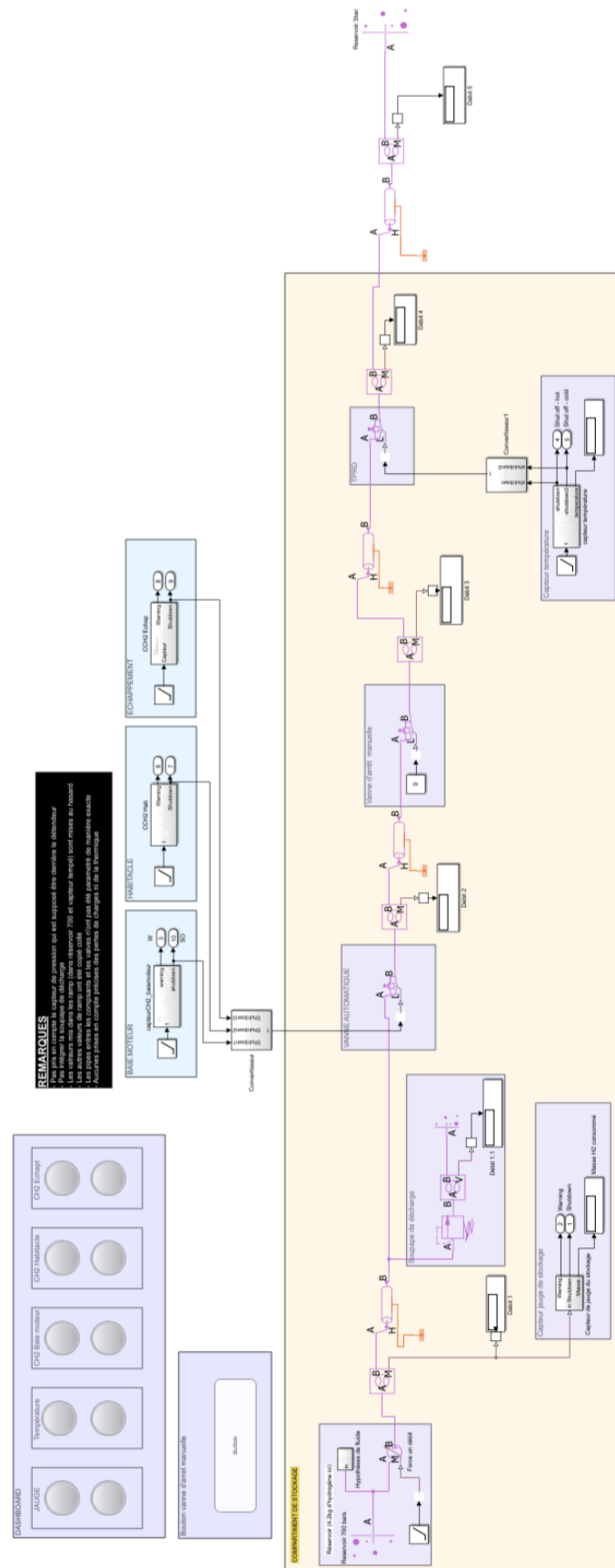


Figure 23 - Architecture SIMULINK Complète