



HYCE

Rapport de mi-semestre

PITA 3A : Intégration des systèmes embarqués pour
véhicule hydrogène

Période : Septembre 2025 – Janvier 2026

Équipe Projet : Yohan Roy, Lucas Buzeau, Paul Abi Khalil, Jules Couprie, Thomas Renou

I. INTRODUCTION ET CONTEXTE DU PROJET

Le projet HYCE s'inscrit dans une démarche de transition énergétique appliquée au sport automobile. L'objectif principal est la conversion d'un véhicule à moteur à combustion interne (MCI) classique vers une propulsion à l'hydrogène. Dans ce cadre, les systèmes embarqués jouent un rôle critique : ils ne sont pas seulement des outils de performance, mais les garants de la sécurité absolue du pilote et de l'environnement extérieur.

L'enjeu majeur réside dans la gestion de l'hydrogène, un gaz hautement inflammable et stocké à très haute pression (70 MPa). L'équipe "Systèmes Embarqués" a pour mission d'identifier, de dimensionner et d'intégrer l'architecture électronique capable de surveiller en temps réel l'état du véhicule, de détecter toute fuite et d'assurer les communications internes et externes (Pit Wall, commissaires, pilote).

II. ÉTUDE RÉGLEMENTAIRE ET CAHIER DES CHARGES

2.1 Analyse des normes FIA (Article 253 et 266)

La première phase du projet a consisté en une étude approfondie de la réglementation de la Fédération Internationale de l'Automobile (FIA). Deux documents de référence ont été analysés :

- **L'Article 253 de l'Annexe J :** La référence pour la sécurité des véhicules de compétition.
- **L'Article 266 de l'Annexe J (2025) :** Une évolution spécifique aux énergies nouvelles, incluant l'hydrogène liquide et gazeux.

L'étude comparative a révélé que l'Article 266 est quasiment identique au 253 pour les systèmes hydrogène (à une exception près : l'exigence d'une pureté d'hydrogène de 95 %).

2.2 Définition des besoins et contraintes techniques

L'analyse réglementaire a permis d'établir un cahier des charges rigoureux, centré sur la maîtrise des risques liés à l'hydrogène. La contrainte structurelle majeure repose sur une **Pression Nominale de Service de 70 MPa**, imposant une surveillance constante de l'intégrité du système.

Cahier des charges				X			
Sous-ensemble	Contenues	Niveau	Importance	Référence	Règlement / Article	Requis	Commentaires
Général	Pression nominale de service maximale	70MPa	Elevée	R104	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Pression d'hydrogène maximale	85	Elevée	R104	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	
Compartment stockage	Compartiment stockage hydrogène obligatoire	0,75% warning, 0% shut down	Elevée	R104	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Intégrée à la cellule de survie / Niveau de sécurité / Chassis tubulaire / Voir règlement
	Constat en maintenance infégré	ULM V0 HED 10001	Elevée	R104	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Absolument étanche aux fuites hormis le système de ventilation	1 Pa.cm ³ /s	Elevée	EN 60068-2-17	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le matériel doit être compatible avec l'hydrogène, compatible avec l'environnement de fonctionnement et résister à la corrosion.
	Irrigation de vannes d'arrêt automatique		Elevée	R104 / ISO 22696-10	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Elle doit maintenir la concentration de l'hydrogène dans l'air à l'intérieur du compartiment ne soit supérieure à aucun moment à 1% en volume en considérant toute fuite du système CHES avec un débit volumétrique constant de 10 l/min.
	Capteur de température	40°C < t < 49°C	Elevée	R104	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Montée déclencheur fait ou dans le réservoir. Elle doit se déclencher en cas de détection de fuite d'hydrogène dans l'habitacle de chute de pression anormale, concentration d'hydrogène trop élevée dans l'échappement, une collision avec le milieu extérieur ou un arrêt d'urgence.
	Irrigation de soupapes anti-retour pour l'alimentation des réservoirs	90° - 2 vannes en série	Elevée	R104	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Ne pas sortir de l'intervalle durant l'utilisation et le remplissage.
	Irrigation de soupapes de décharge	ISO 2266-1	Elevée	ISO 2266-1	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	La première décharge connecté aux réservoirs et la seconde au niveau de l'embout de remplissage.
	Irrigation d'une vanne manuelle sur chaque réservoir		Elevée		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Une soupape de décharge doit être installée sur ou dans chaque réservoir pour contrôler la fuite de gaz en cas de défaut anormal.
	Embout de remplissage		Secondaire		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le matériel doit être compatible avec l'hydrogène, compatible avec l'environnement de fonctionnement et résister à la corrosion.
	Dispositif de purge		Elevée		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le matériel doit être compatible avec l'hydrogène, compatible avec l'environnement de fonctionnement et résister à la corrosion.
Conduite	Protocole de suralimentation		Elevée	ISO 18880-1	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Prévoir un système anti-ajug à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule pour purger les hydrogènes basse pression et moyenne pression (de 0MPa à 3,0 MPa)
	Concentration en H2	0,2% warning, 0,4% shut down	Elevée		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Doit être conforme à la norme ci-citée.
Motorisation	Concentration en H2 dans l'échappement	3% warning, 4% shut down	Elevée		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	
	Concentration en H2 dans la baie moteur	0,75% warning, 1% shut down	Elevée		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	
Equipement électronique	Equipement électronique		Elevée	CEI 60079	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Les boîtiers électroniques situés dans des zones potentiellement inflammables doivent être reliés au châssis électrique. L'équipement doit être conçu de telle manière à ce qu'il empêche l'apparition de sources d'inflammation. Attention aux températures maximales que peuvent supporter les composants. L'équipement doit être conçu de manière à ce que l'ouverture des portes de l'équipement qui pourraient être des sources d'inflammation ne soit possible que dans des conditions non actives ou par des systèmes de ventilation appropriés. La source doit être reliée à la terre lors du ravitaillement.
	Dispositif de décompression activé thermiquement (TPFD)	1 par réservoir	Elevée	R104	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le réservoir doit être équipé de capteurs de chute de pression afin de vérifier que celle-ci soit bien maintenue à la valeur nominale. Un premier équipement de vérification (TPFD) ne doit pas se déclencher accidentellement. Il doit se produire si un quelconque signal est envoyé au pilote.
	Système contre l'explosion du gaz dans le compartiment, supporte la surpression		Facultatif		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le réservoir doit être équipé d'un système contre la surpression pour protéger le réservoir contre la surpression en cas d'échec de la ventilation ou gazes fuites.
	Capteur chute de pression	1 par réservoir	Elevée	R104	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le réservoir doit être équipé de capteurs de chute de pression afin de vérifier que celle-ci soit bien maintenue à la valeur nominale. Un premier équipement de vérification (TPFD) ne doit pas se déclencher accidentellement. Il doit se produire si un quelconque signal est envoyé au pilote.
	Protection contre les sur pressions en aval d'un régulateur	1 par régulateur	Elevée		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le réservoir doit être équipé d'un système contre la surpression pour protéger le réservoir contre la surpression en cas d'échec de la ventilation ou gazes fuites.
Interface de communication	Système anti-démarrage		Elevée		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le système anti-démarrage qui s'active lorsque la baie de ravitaillement de carburant est connectée à la voiture. Le véhicule doit être équipé d'une interface de communication de données afin de communiquer avec le poste de ravitaillement en carburant (en cas d'arrêt). Doit être communiqué: température et pression dans le réservoir, leur dérivés.
	Interface de transmission de données pour le ravitaillement		Elevée	SAE J2795	ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le système anti-démarrage qui s'active lorsque la baie de ravitaillement de carburant est connectée à la voiture. Le véhicule doit être équipé d'une interface de communication de données afin de communiquer avec le poste de ravitaillement en carburant (en cas d'arrêt). Doit être communiqué: température et pression dans le réservoir, leur dérivés.
	Indicateurs de sécurité		Elevée		ANNEXE J1 APPENDIX J - ARTICLE 251 - D.3.1	<input checked="" type="checkbox"/>	Le pilote doit être informé de la présence de gaz dans le compartiment de stockage de l'hydrogène. Les indicateurs doivent être visibles par le pilote lorsque est en condition de marche, par le personnel qui entoure le véhicule ou le secours extérieur. Les données relatives doivent être accessibles par les autres données et visibles pour impacter les conditions d'éclairage. Ces indicateurs doivent également se déclencher lorsque les différentes concentrations d'alertes sont atteintes (0,4, 1,4, 4,4) mais également lorsque un TPFD s'ouvre. Les voyants doivent être à sécurité intégrée, dotés d'un moyen de circuits indépendants montés de sorte qu'ils ne puissent pas être éteints simultanément en cas d'accident.

Pour garantir cette sécurité, le cahier des charges définit des besoins précis en capteurs et actionneurs :

- **Surveillance multi-zones** : Intégration de capteurs de pression, température et concentration d'H2 répartis (stockage, habitacle, baie moteur et échappement).
- **Isolation et contrôle des flux** : Sécurisation du stockage par vannes d'arrêt automatiques et manuelles sur les réservoirs, circuit de remplissage équipé de clapets anti-retour.
- **Sécurité du ravitaillement et alertes** : Système de ravitaillement adapté aux standards de sécurité, incluant un dispositif anti-démarrage. Indicateurs visuels et sonores servant à informer immédiatement le pilote et les secours extérieurs.

III. SÉLECTION DES COMPOSANTS ET ARCHITECTURE SYSTÈME

Pour répondre aux exigences de sécurité et de performance définies dans le cahier des charges, nous avons établi une liste exhaustive de composants (capteurs et actionneurs) et défini leur architecture d'intégration. Cette architecture est conçue pour être modulaire, redondante et pilotée par un calculateur central (ECU).

	Sous-ensemble	Emplacement	Type de capteur / actionneurs	Quantité	Article
Capteurs	Motorisation	Baie Moteur	Concentration H2	1	D.4
		Echappement	Concentration H2	1	D.4
	Cockpit	Habitacle	Concentration H2	1	D.4
	Stockage	Compartment	Concentration H2	1	D.4
		Sur réservoir	TPRD	1/Réservoir	D10.1
		Sur réservoir	Chute de pression	1/Réservoir	D10.3
		Compartment	Température	1	D.4
Actionneurs	Stockage	Réservoir	Vanne d'arrêt automatique	1/Réservoir	D9.1
		Embout de repl.	Soupape anti-retour	2 en série	D9.2
		Réservoir	Soupape de décharge	1 / Réservoir	D9.3
		Réservoir	Vanne manuelle	1 / Réservoir	D9.4
		Régulateur	Pression	1/Régulateur	D.10.3

3.1 Capteurs : Surveillance et Acquisition de données

Afin de surveiller l'intégrité du système en temps réel, nous avons sélectionné une série de capteurs stratégiques. Ils constituent la première barrière de sécurité en informant le calculateur de toute anomalie :

- **Capteurs de concentration H2** : C'est le composant critique pour la détection de fuites. Ils sont disposés dans quatre zones clés : le compartiment de stockage, l'habitacle, la baie moteur et la ligne d'échappement (pour détecter des imbrûlés ou une fuite).
- **Capteurs de pression (Haute Pression)** : Ils surveillent la pression dans les réservoirs (jusqu'à 700 bars) et dans les lignes d'alimentation pour détecter toute chute brutale synonyme de rupture.
- **Capteurs de température** : Placés au niveau des réservoirs, ils surveillent l'échauffement lors des phases de ravitaillement et de décharge, garantissant que le système reste dans les plages thermiques admissibles.
- **Capteurs de statut TPRD** : Ces capteurs surveillent en continu l'état des dispositifs de décharge thermique (*Thermal Pressure Relief Device*). En cas d'incendie, le TPRD s'ouvre mécaniquement (fusible thermique) pour évacuer l'hydrogène et éviter l'explosion du réservoir.

3.2 Actionneurs : Dispositifs de Sécurité Active

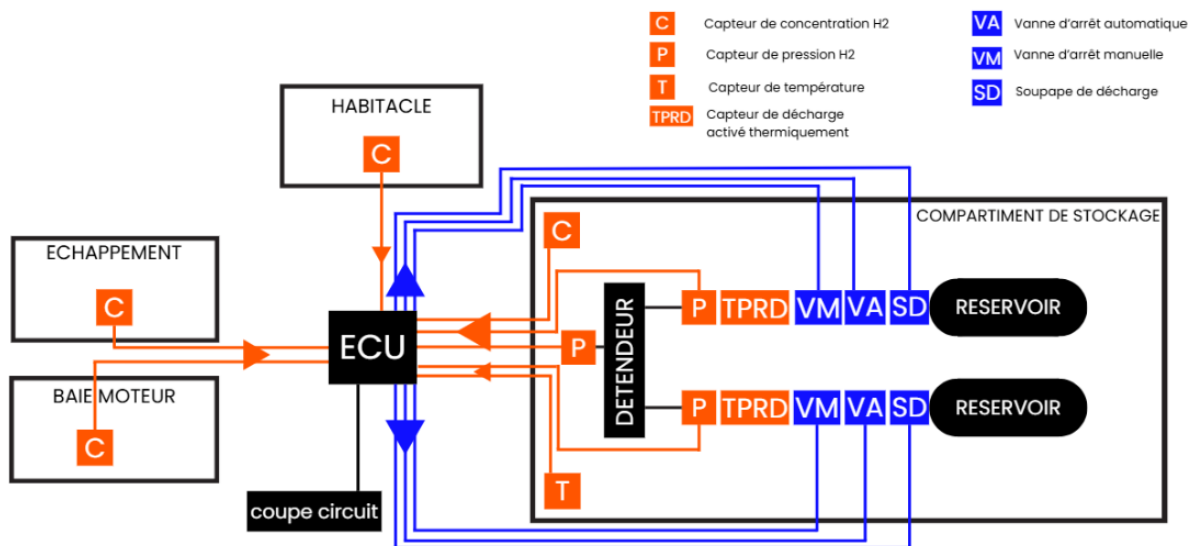
Une fois le danger détecté par les capteurs, le système doit pouvoir agir physiquement pour isoler le stockage d'hydrogène. Nous avons retenu les actionneurs suivants :

- **Vannes d'arrêt automatiques** : Installées directement sur chaque réservoir, ces vannes sont de type *Fail-safe* (normalement fermées). Elles isolent automatiquement les réservoirs en cas de coupure électrique ou d'absence de signal du calculateur.
- **Vannes manuelles** : Elles permettent une isolation physique et mécanique des réservoirs, indispensable pour sécuriser le véhicule lors des opérations de maintenance.
- **Soupapes de décharge** : Elles agissent comme une sécurité ultime en relâchant la pression vers l'extérieur en cas de surpression critique.
- **Système anti-démarrage** : Ce dispositif verrouille le démarrage du véhicule tant que la trappe est ouverte ou que la buse de ravitaillement est connectée.

3.3 Architecture électronique et positionnement géographique

L'ensemble de ces composants est relié à l'ECU central. L'implantation a été pensée par zones fonctionnelles pour couvrir l'intégralité du véhicule :

- **Zone Stockage** : Cette zone haute pression regroupe les réservoirs, les vannes de sécurité (manuelles et automatiques), ainsi que les capteurs de surveillance de l'état du gaz.
- **Zone Habitable** : Dédiée à la protection du pilote, elle intègre un capteur de concentration H2 spécifique ainsi que l'interface homme-machine (IHM).
- **Zone Moteur** : Elle accueille le calculateur (ECU) qui traite l'ensemble des données, ainsi que les capteurs de fuite situés au niveau de la baie moteur et de l'échappement.



IV. ORIENTATIONS TECHNIQUES ET EXPERTISE (COURS MR. KHENFRI)

Pour valider la faisabilité de l'architecture, un cours a été mené avec M. Khenfri, expert en systèmes embarqués. Ses recommandations ont été déterminantes pour la suite du projet.

5.1 Choix du calculateur et environnement de développement

Le choix s'est porté sur une carte de type **STM32**.

- **Avantages** : Compatibilité totale avec le langage C et intégration fluide avec l'environnement **MATLAB / Simulink**.
- **Méthodologie** : Nous utiliserons la génération automatique de code C à partir de Matlab et de modèles Simulink, ce qui permet de tester la logique de contrôle en simulation avant l'implémentation matérielle.

5.2 Recommandations sur la structure de l'équipe

M. Khenfri a conseillé de diviser l'équipe en deux pôles distincts :

1. **Pôle Capteurs & Architecture** : Focus sur le câblage, le conditionnement des signaux et le réseau de communication (Bus CAN).
2. **Pôle Calculateur & Logique** : Focus sur l'algorithme de décision, la hiérarchisation des priorités de données et le filtrage des signaux pour éviter les fausses alertes.

5.3 Faisceau électrique indépendant

Une recommandation majeure est la création d'un **faisceau électrique dédié**, totalement indépendant du faisceau d'origine de la voiture. Cela évite les interférences et simplifie le diagnostic en cas de panne, tout en assurant que la partie sécurité n'est pas compromise par d'autres systèmes du véhicule.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

À ce stade, l'étude théorique et le choix des composants sont finalisés. L'architecture a été validée par une expertise technique. Les prochaines étapes (Février - Mai 2026) se concentreront sur :

- La modélisation complète du système sous MATLAB.
- La conception et la réalisation du faisceau électrique spécifique.
- Les phases de tests "grandeur nature" pour valider la réactivité des vannes de sécurité en fonction des seuils de concentration H2.

Cette validation architecturale et normative marque ainsi l'achèvement de la phase d'étude, permettant d'engager sereinement les prochaines étapes de modélisation et d'intégration physique pour faire du prototype HYCE une réalité opérationnelle.