



PROJET PITA 2A

Etude des systèmes de stockage d'hydrogène, leur adaptabilité dans un véhicule de course et leur influence sur le comportement dynamique de celui-ci

Jules Couprie

Helie Saillard Lepage

Micah Barthelemy

Yohan Roy



Introduction.....	3
Organisation.....	4
I) Comment stocker de l'hydrogène et quelles sont les solutions existantes ?.....	5
I.1) Le stockage Gazeux :	5
I.2) Le stockage liquide :	6
I.3) Le stockage Solide.....	7
I.4) Tableau récapitulatif :	8
II) Integration des reservoirs dans le véhicule	9
II.1) Homologation	9
II.2) Consommation	11
II.3) Influence comportement dynamique	12
II.3.1) Centre de gravité et répartition des masses	13
II.3.2) Transfert de masse en virage	13
II.3.3) Conséquences pratiques pour notre projet.....	13
II.4) Cas concret : La Mitjet 2.0L	14
III) Implémentation en CAO des réservoirs dans l'habitacle	14
III.1) Modélisation des réservoirs.....	15
III.2) Scanner 3D	16
Conclusion.....	17

Introduction

À l'horizon de la rentrée prochaine, le projet HYCE sera officiellement annoncé aux élèves Estaciens. Ce projet étudiant, lancé au sein de l'association Idrogen de l'ESTACA, vise à réunir des étudiants passionnés autour d'une démarche technique innovante et engagée.

Le projet HYCE est né d'une volonté commune : concevoir un projet qui se démarque des initiatives et projets existants, tout en apportant une réponse concrète la problématique environnementale suivante :

Dans le contexte écologique actuel, comment le sport automobile peut-il s'inscrire dans une démarche durable, associant performance et écoresponsabilité ?

Après de nombreux débats, réflexions et réunions impliquant l'ensemble de l'équipe, nous avons défini les valeurs et les ambitions que doit porter ce projet. De ces échanges est né le PROJET HYCE.

Notre objectif est clair : Démontrer qu'une motorisation alternative aux énergies fossiles, propre, performante et crédible dans un contexte sportif, est possible en combinant des choix techniques novateurs et des bases mécaniques existantes. Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi de travailler avec l'hydrogène comme vecteur énergétique. L'hydrogène, grâce à ses propriétés (pouvoir calorifique élevé, disponibilité croissante, émission nulle de CO₂ en combustion), représente selon nous l'une des énergies les plus prometteuses pour l'avenir du sport automobile.

Concrètement, pour démontrer le potentiel de cette énergie, nous voulons réaliser le retrofit d'un moteur thermique initialement conçu pour fonctionner à l'essence, en le convertissant à l'hydrogène.

L'objectif final est d'intégrer ce moteur dans un châssis fonctionnel et performant de type prototype, et de battre le record du Nürburgring dans la catégorie "moteur hydrogène à combustion interne".

Dans le cadre de ce PITA intitulé « *Etude des systèmes de stockage d'hydrogène, leur adaptabilité dans un véhicule de course et leur influence sur le comportement dynamique de celui-ci* » notre objectif est d'évaluer la faisabilité du projet HYCE sous l'angle du stockage de l'hydrogène. Il s'agit d'étudier quelle méthode de stockage serait la plus adaptée à notre projet, en tenant compte des contraintes techniques spécifiques à un véhicule de course, telles que l'espace limité disponible à bord, ainsi que des exigences en matière de sécurité et de réglementation.



Nous devons également estimer la quantité d'hydrogène nécessaire pour atteindre nos objectifs de performance, en collaboration avec l'équipe du PITA moteur (intitulé : « *Consommation moteur à hydrogène* »).

Pour répondre à cette problématique, nous commencerons par analyser les différentes méthodes existantes de stockage de l'hydrogène. Nous étudierons ensuite les contraintes associées à leur intégration dans un véhicule de course, avant de proposer une solution de stockage adaptée, illustrée par un cas concret : l'implantation d'un système de stockage sur une Mitjet 2.0L.

Organisation

La première étape dans la réalisation de notre projet PITA fut d'identifier les données nécessaires, les tâches à réaliser ainsi que leur répartition dans le temps.

Lors de notre première réunion de groupe, tenue le 27 février, nous avons donc défini et planifié ces différentes tâches. Celles-ci ont été renseignées et organisées dans le diagramme de Gantt ci-dessous, afin d'optimiser la gestion des délais et des étapes clés du projet.

Tâches/Semaine	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4	Semaine 5	Semaine 6	Semaine 7	Semaine 8
Recherches comportement dynamique								
Recherche réglementations								
Recherche/Réalisation Réservoirs								
Recherches projets existants								
Recherche doc techniques des châssis								
Recherches Fichiers CAO Chassis								
Scan 3D								
Implémentation des réservoirs dans les châssis								
Rédaction du compte rendu								

La mise en place d'une réunion hebdomadaire s'est révélée être une solution efficace pour assurer une bonne circulation des informations entre les membres du groupe. Ces réunions permettaient à la fois de faire le point sur les avancées de la semaine écoulée et de planifier les actions à mener pour la semaine suivante. De plus, nous avons créé un groupe Slack et un SharePoint sur Teams toujours dans l'objectif de centraliser un maximum nos informations.

Il nous a également paru important d'identifier les qualités de chacun afin de répartir le travail de manière optimale. En effet, certains membres étaient plus à l'aise que d'autres pour s'exprimer lors des appels téléphoniques, tandis que d'autres avaient de meilleures compétences en modélisation 3D. Nous avons donc attribué les tâches en fonction de ces différentes appétences et préférences.

I) Comment stocker de l'hydrogène et quelles sont les solutions existantes ?

Dans un contexte de transition énergétique et de lutte contre le réchauffement climatique, la recherche de sources d'énergie propres et durables est devenue une priorité mondiale. L'hydrogène, en tant que vecteur énergétique, suscite un intérêt croissant en raison de ses propriétés intéressantes : il est léger, abondant dans l'univers, et ne rejette que de la vapeur d'eau lorsqu'il est utilisé comme carburant. Cependant, pour que son utilisation soit réellement envisageable à grande échelle, il est essentiel de maîtriser une problématique de taille : son stockage.

En effet, l'hydrogène est un gaz très léger, dont les molécules sont extrêmement petites, ce qui le rend difficile à contenir et à transporter sans pertes. De plus, il possède une faible densité énergétique par volume, ce qui implique la nécessité de techniques spécifiques pour en augmenter la concentration. Aujourd'hui, plusieurs méthodes de stockage ont été développées, que ce soit sous forme gazeuse, liquide, ou encore solide. Chacune de ces solutions présente des avantages, mais aussi des contraintes techniques, économiques et sécuritaires.

I.1) Le stockage Gazeux :

Le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse est actuellement la méthode la plus utilisée, notamment en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son coût relativement faible comparé à d'autres formes de stockage. Cependant, l'hydrogène est le gaz le moins dense connu, ce qui implique qu'il doit être fortement comprimé afin d'augmenter sa densité énergétique volumique et ainsi optimiser son stockage. Malgré cette compression, il est important de noter que même à une pression élevée de 70 MPa, la densité énergétique volumique de l'hydrogène gazeux reste inférieure à celle obtenue par stockage liquide ou solide (voir tableau récapitulatif en I.4). Le principe consiste donc à stocker l'hydrogène sous pression dans des réservoirs spécifiquement conçus à cet effet, classés en différentes catégories appelées « types » (de Type I à Type IV), selon leur matériau et leur résistance à la pression. Malgré des matériaux et des conceptions variables selon le type, ces bonbonnes présentent toutes une structure commune composée de trois éléments principaux :

- **Une enveloppe interne étanche** (aussi appelé liner). Cette enveloppe a pour rôle de rendre le réservoir étanche à l'hydrogène et doit également répondre à une certaine élasticité.
- **Une couche de renfort**. Généralement constituée de fibre de verre ou fibre de carbone, c'est elle qui va être amenée à supporter la pression au sein du réservoir.

- **Une couche de protection.** Elle peut être de plusieurs matériaux différents (fibre de carbone, fibre de verre, polymères, structure en mousse, résines...). Cette couche ne sert pas à retenir l'hydrogène mais à protéger le réservoir de l'environnement extérieur.

Dans le cadre de notre projet, et en prenant en compte les contraintes liées à la consommation d'hydrogène de nos véhicules (voir PITA Moteur Hydrogène), l'espace limité disponible pour l'intégration des réservoirs mais également la disponibilité des solutions sur le marché, notre attention s'est portée sur les réservoirs de Type IV.

Un réservoir de type IV est composé d'une enveloppe interne en polymère thermoplastique. Celle-ci est entièrement recouverte d'un enroulement filamentaire en fibres de carbone, parfois complété par des fibres de verre. Aucun élément métallique n'entre dans la composition structurelle du réservoir ce qui assure un rapport masse d'hydrogène transportée / masse du réservoir, optimal.

Ces réservoirs permettent donc de stocker l'hydrogène comprimé à 70 MPa dans un volume réduit, tout en offrant un excellent rapport poids/résistance grâce à l'utilisation de matériaux composites de pointe.

I.2) Le stockage liquide :

Bien que le stockage gazeux reste la méthode la plus répandue en raison de sa simplicité et de son coût modéré, le stockage de l'hydrogène sous forme liquide constitue une alternative intéressante dans certains cas, notamment lorsque la densité énergétique volumique devient un critère essentiel. En effet, l'hydrogène liquide permet de stocker une plus grande quantité d'hydrogène dans un volume réduit comparé au stockage gazeux. Par conséquent, cette solution apparaît comme la plus appropriée pour des applications dans les secteurs de l'aérospatial ou du transport.

Le passage de l'hydrogène de l'état gazeux à l'état liquide s'effectue par refroidissement à très basse température, à environ -253 °C, ce qui représente un défi technique majeur. Cette liquéfaction nécessite non seulement une importante dépense énergétique, mais impose également l'utilisation de réservoirs cryogéniques capables de maintenir ces températures extrêmes tout en évitant les pertes par évaporation.

Ces réservoirs cryogéniques ont une structure bien spécifique, adaptée aux exigences thermiques et mécaniques liées au stockage d'un fluide aussi froid :

- **Un réservoir intérieur étanche**
 - Le réservoir intérieur a pour objectif de contenir l'hydrogène liquide sans fuites. Il est généralement composé d'acier inoxydable ou aluminium.
- **Un système d'isolation thermique performant**

- Il réduit les échanges de chaleur avec l'extérieur pour limiter l'évaporation du liquide.
- Technologies utilisées :
 - Isolation sous vide (double paroi avec vide d'air)
 - Mousse isolante (souvent en polyuréthane)
 - Revêtements réflecteurs (feuilles multicouches de type MLI)
- **Une structure externe de protection**
 - Fonction : Protège l'ensemble contre les chocs mécaniques, l'humidité, et les variations de température extérieure. Elle est généralement constituée d'acier, composites, ou polymères robustes selon les applications.

Malgré ses performances en termes de densité énergétique, le stockage liquide reste plus complexe et plus coûteux à mettre en œuvre que le stockage gazeux, en raison des contraintes thermiques, du besoin en infrastructures spécialisées et du maintien de la température cryogénique sur la durée.

Au vu de la complexité et du coût de cette solution technique, nous avons pris la décision de mettre de côté cette technologie de stockage qui nous paraît hors de portée. Cependant, l'intégration d'un système de stockage liquide peut être une évolution technique très intéressante de notre projet une fois l'objectif du Nurburgring atteint.

I.3) Le stockage Solide

Outre les formes gazeuse et liquide, il existe une troisième voie de stockage : le stockage de l'hydrogène sous forme solide. Cette méthode repose sur la capacité de certains matériaux à absorber ou adsorber l'hydrogène dans leur structure à l'état atomique ou moléculaire. L'hydrogène n'est donc plus libre, mais retenu par des liaisons physiques ou chimiques, ce qui permet d'atteindre des densités de stockage intéressantes tout en améliorant la sécurité, puisque l'hydrogène n'est pas stocké sous haute pression ni à très basse température.

Parmi les matériaux étudiés pour ce type de stockage, on distingue plusieurs grandes familles :

- **Les hydrures métalliques**
 - Principe : Certains métaux ou alliages (magnésium, titane, lanthane, etc.) forment des composés appelés hydrures en réagissant avec l'hydrogène.
 - Avantages : Très bonne sécurité, fonctionnement à température et pression modérées, réversibilité du processus.
 - Inconvénients : Masse importante du matériau, cycles de charge/décharge parfois lents, efficacité limitée par la température.

- **Les matériaux nanostructurés et composites**
 - Fonction : Adsorption physique de l'hydrogène à la surface ou dans les pores du matériau.
 - Avantages : Légèreté et potentiel de stockage élevé en théorie.
 - Inconvénients : Technologies encore expérimentales, efficacité réelle en conditions d'usage à démontrer.
- **Les hydrures complexes et organométalliques (MOFs)**
 - MOFs : Metal Organic Frameworks, structures poreuses capables de piéger l'hydrogène.
 - Avantages : Très grande surface de stockage, réglable selon la structure.
 - Inconvénients : Coût élevé, stabilité thermique parfois limitée.

Le stockage solide ne nécessite pas de réservoir à haute pression ou cryogénique, mais des conteneurs adaptés aux matériaux utilisés, avec contrôle de la température, capteurs de sécurité, et parfois un système de chauffage pour favoriser la libération de l'hydrogène.

En conclusion, si le stockage solide d'hydrogène offre de réels avantages en matière de sécurité, son usage reste peu adapté à l'univers de la compétition automobile notamment dû à la masse de ce système de stockage. Toutefois, les avancées dans les matériaux composites et les technologies nanostructurées pourraient, à terme, ouvrir la voie à de nouvelles applications compétitives dans ce domaine.

I.4) Tableau récapitulatif

Système de stockage	Densité énergétique volumique
Gazeux à 350 MPa	<u>~5.6 MJ/L</u>
Gazeux à 70 MPa	<u>~8.5 MJ/L</u>
Liquide	<u>~8.5 à 10 MJ/L</u>
Solide	<u>~11 à 17 MJ/L</u>

II) Integration des reservoirs dans le véhicule

La molécule de dihydrogène est instable et peut représenter des dangers si elle est mal utilisée, c'est pourquoi l'utilisation de cette technologie dans le domaine des transports, pour le bien de tous, est fortement réglementé et encadré.

De plus, pour la bonne conduite de notre projet il nous est nécessaire de savoir quelle masse d'hydrogène devons-nous emporter au sein du véhicules. D'une part afin de dimensionner précisément ce dont nous avons besoin et d'une autre part pour étudier l'influence de ces rajouts de stockage hydrogène sur le comportement dynamique de notre véhicule.

Ainsi une grande partie de notre projet de recherche lié à l'utilisation de systèmes de stockage hydrogène doit aborder ces trois problématiques.

II.1) Homologation

Avant toute démarche d'homologation, il faut savoir exactement à quoi nous devons nous conformer. Ce travail préliminaire s'est traduit par des appels téléphoniques et des recherches de contact de personnes qualifié pouvant nous guidés. Pour la suite de cette partie, nous nous sommes alors basés majoritairement sur le règlement de la *FIA Appendix J*, *Article 253*, lui-même basé sur le règlement *CEE-ONU R134*.

Une fois axé sur ces règlements, nous avons alors étudié point par point les problématiques auxquelles nous allons être confronté, afin d'analyser leurs enjeux et leur solution techniques applicables.

Sous-ensemble	Contenants	Valeur	Importance	Norme	Règlement / Article	Respect	Commentaires
Général	Pression nominale de service maximale	10 MPa	Élevée	R134	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.1	<input type="checkbox"/>	
	Niveau d'hydrogène transporté maximale	5 %	Élevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.2	<input type="checkbox"/>	
	Température de fonctionnement	40°C < t < +60°C	Élevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.3	<input type="checkbox"/>	Au sein du compartiment de stockage ?
Compartiment stockage	Compartiment stockage hydrogène obligatoire		Élevée	R134	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.4	<input type="checkbox"/>	Intégrer à la cellule de sécurité / Châssis tubulaire, "voir règlement"
	Contraintes en matière de séchage		Élevée	ISO 19419 / ISO 19881	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.1	<input type="checkbox"/>	Le matériel doit être compatible avec l'hydrogène, compatible avec l'environnement de fonctionnement et résistant à la corrosion.
	Arrêt de la fuite vers le système de ventilation	1 Pa.cm ³ /s	Élevée	EN 60068-2-17	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.2	<input 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 CHSD avec un débit volumétrique constant de 118 NL/min.
	Ventilation reliée à l'extérieur		Élevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.3	<input type="checkbox"/>	
	Intégration de vannes d'arrêt automatique		Élevée	R134 / ISO 21206-1:20	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.1	<input type="checkbox"/>	Montée directement sur 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.
	Intégration de soupapes anti-retour pour l'alimentation des réservoirs	au - 2 vannes en série	Élevée	R134	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.2	<input type="checkbox"/>	La première directement connectée aux réservoirs et la seconde au niveau de l'embout de remplissage.
	Intégration de soupapes de décharge		Élevée	ISO 21206-1	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.3	<input type="checkbox"/>	Une soupape de décharge doit être installée sur ou dans chaque réservoir pour contrôler la fuite de gaz en cas de débit anormal.
	Intégration d'une vanne manuelle sur chaque réservoir		Élevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.4	<input type="checkbox"/>	Vanne manuelle fixée au réservoir qui doit permettre d'isoler le gaz sous pression de la vanne d'arrêt automatique.
	Embout de remplissage	Secondaire			ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.1	<input type="checkbox"/>	Il ne doit pas être installé dans les par-chocs, doit être protégé de l'eau et de la poussière. Il doit être équipé d'un filtre et doit pouvoir supporter une charge minimale de 3000N dans n'importe quelle direction sans que ça affecte leur étanchéité.
	Dispositif de purge		Élevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.6	<input type="checkbox"/>	Prévoir un système anti-givage à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule pour purger les tuyauteries basse pression et moyenne pression (de 0,1 MPa à 3,0 MPa).
Équipement électronique	Protocole de ravitaillage		Élevée	ISO 19880-1	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.1	<input type="checkbox"/>	Doit être conforme à la norme ci-jointe.
	Équipement électrique		Élevée	CEI 60079	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.1	<input type="checkbox"/>	Les boîtiers électriques situés dans des zones potentiellement inflammables doivent être reliés au châssis électrique. L'équipement doit être conçu de telle manière à ce qu'il n'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 plaques de l'équipement qui pourraient être des sources d'information ne soit possible que dans des conditions non actives ou par des systèmes de verrouillage appropriés. La valve doit être reliée à la terre lors du ravitaillage.
	Dispositif de décompression active thermiquement (TPRD)	1 par réservoir	Élevée	R134	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.1	<input type="checkbox"/>	Il doit être situé le plus loin possible des sources de l'inflammation. L'orifice d'évacuation de TPRD doit être orienté de manière à laisser le pilote en sécurité. La sortie de la ou des conduites de mise à l'air libre, pour l'évacuation de l'hydrogène gazeux du ou des TPRD du système de stockage, doit être protégée par un bouchon.
	Système contre l'explosion du gaz dans le compartiment, supporter la surpression		Facultative		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.4	<input type="checkbox"/>	doivent la surpression (en cas d'échec de la ventilation ou grosse fuite)
	Captteur chute de pression	1 par réservoir	Élevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.1	<input type="checkbox"/>	Les réservoirs doivent être équipés de capteurs de chute de pression afin de vérifier que celle-ci soit bien maintenue à sa valeur nominale. Ils permettent également de vérifier qu'aucun TPRD ne soit ouvert accidentellement. Si cela se produit, il faut qu'un signal soit envoyé au pilote.
	Protection contre les sur pressions en aval d'un régulateur	1 par réservoir	Élevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.3	<input type="checkbox"/>	En cas de défaillance du régulateur et pression, un système contre la surpression doit être prévu pour réguler la pression. La pression de réglage doit être inférieure ou égale à la PDS de la section appropriée du système hydrogène.
	Système anti-démarrage		Élevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.5.2	<input type="checkbox"/>	Système anti-démarrage qui s'active lorsque la buse de ravitaillage de carburant est connectée à la valve.
Interface de communication	Interface de transmission de données pour le ravitaillage		Élevée	SAE J2710	ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.6	<input type="checkbox"/>	Le véhicule doit être équipé d'une interface de transmission de données afin de communiquer avec le poste de ravitaillage en carburant (ex. écran). Doit être communiqué : température et pression dans le réservoir, tout débordement.
	Indicateurs de sécurité		Élevée		ANNEXE J / APPENDIX J - ARTICLE 203 - 10.17	<input type="checkbox"/>	En permettant de signaler une présence de danger, la transmission des signaux doit être visible et audible. Ces indicateurs doivent être visibles par le pilote lorsque le véhicule est en condition de marche, par le personnel qui entoure le véhicule ou le secourt extérieur. Les diodes extérieures doivent être reconnaissables parmi les autres diodes et visibles pour imposer les conditions d'usage. Ces indicateurs doivent également se déclencher lorsque les différentes concentrations d'alarmes sont atteintes (art 13). Elles doivent également être qu'un TPRD s'ouvre. Les voyants doivent être à sécurité intégrée, dotés d'au moins deux circuits indépendants montés de sorte qu'ils ne puissent pas être endommagés en cas d'accident.

Quelques éléments sont primordiaux et doivent être retenues. Tout d'abord pour des raisons de sécurité, l'entière des systèmes liés aux stockages hydrogène se doivent d'être contenu dans un caisson, devant répondre à un bon nombre de normes (étanchéité, ventilation, ignifuge ...). Ce caisson, en plus d'avoir une taille non négligeable et qui sera un problème évoqué dans la partie 3 de ce compte rendu, est surtout un merveilleux casse-tête de dimensionnement.

Premièrement ce compartiment hydrogène doit faire partie intégrante de la cellule de survie ou de l'arceau de sécurité/châssis tubulaire selon la catégorie de véhicule concernée.

De plus, pour éviter d'avoir une concentration d'hydrogène trop élevé au sein du compartiment pouvant représenter des dangers d'inflammation du véhicule en marche ou à l'arrêt, il est nécessaire d'avoir un système de ventilation. Cette ventilation se doit de garantir que la concentration en hydrogène dans l'air à l'intérieur du compartiment ne soit pas supérieure à 1 % en volume en considérant toute fuite du système de stockage avec un débit volumétrique constant de 118 NL/min.

Calculons alors de manière littérale pour l'instant le débit volumique de la capacité du ventilateur que nous devrons installer :

Tout d'abord, 118 NL/min représente un débit volumique à température $T = 0^{\circ}\text{C}$ et pression $P = 0,1 \text{ MPa}$, or nous le voulons à température ambiante 25° . Comme nous approximations le dihydrogène à un gaz parfait, nous utilisons la formule $PV = nRT$.

On considère que ni le nombre de mole, ni la pression ne change dans notre cas, a alors le volume est directement proportionnel à la température absolue : $V \propto T$

Soit le débit volumique représentant un Volume sur une période $Q = V / t$ est aussi proportionnel à la température (pour une durée t similaire).

$$\text{Donc } Q(T= 25^{\circ}\text{C}) = Q(T=0^{\circ}\text{C}) * ((T=25^{\circ}\text{C})/(T=0^{\circ}\text{C}))$$



Ainsi $Q(T=25^{\circ}\text{C}) = 128.81 \text{ L/min}$

Ou $Q(T=25^{\circ}\text{C}) = 2.15 \text{ L/s}$

Ensuite, nous devons considérer un nombre n fuite, lié au nombre de réservoirs que nous mis au sein du compartiment de volume V . Sachant qu'il ne faut pas une concentration en hydrogène de plus d'un pourcent de volume du compartiment :

On pose :

- V = volume du compartiment [m^3]
- Q_{H_2} = débit de fuite d'hydrogène [m^3/min]
- Q_{air} = débit d'extraction du ventilateur [m^3/min]
- C_{max} = concentration maximale admise = $1\% = 0.01$

On impose que le volume d'hydrogène accumulé ne dépasse 1 % du volume total V :

$$Q_{H_2} \cdot t \leq C_{\text{max}} \cdot V$$

Maintenant que nous pouvons déterminer t , nous voulons que le ventilateur ait la capacité de remplacer le volume V dans ce temps imparti.

Formule du débit Q_{air} : $Q_{\text{air}} = V/t$

$$Q_{\text{air}} = \frac{V}{\frac{C_{\text{max}} \cdot V}{Q_{H_2}}} = \frac{Q_{H_2}}{C_{\text{max}}}$$

En somme, nous avons $Q_{\text{air}} = 100 \cdot N \cdot Q_{H_2}$, car il ne faut pas oublier que la fuite d'hydrogène se traduit par $N_{\text{réservoirs}} \cdot 118 \text{ NL/min}$. Ainsi nous pouvons une fois que le nombre de réservoirs d'hydrogène sera déterminé, dimensionner le ventilateur nécessaire en conséquence.

Enfin, ce ventilateur doit être relié à l'extérieur du véhicule, amenant une autre problématique nécessitant de dimensionner, prévoir et analyser quelle solution est la meilleure pour avoir la place et le droit de trouer une partie du véhicule afin de placer un ventilateur et le relier au compartiment.

II.2) Consommation

L'un des paramètres clés pour dimensionner notre système de stockage est la consommation d'hydrogène prévue. Il serait tentant de surcharger le véhicule afin de ne pas risquer une panne sèche, mais le coût élevé des réservoirs et la complexité des capteurs associés nous obligent à optimiser à la fois le nombre et la taille des réservoirs embarqués.

Notre objectif ici est de déterminer la quantité d'hydrogène nécessaire pour réaliser un certain nombre de tours du Nürburgring. Sur la base des estimations obtenues auprès de l'équipe PITA moteur, 3 à 4 tours d'autonomie devraient suffire pour tenter le record. Nous nous appuyerons donc sur leur résultat de consommation maximale pour établir notre dimensionnement.

Pour estimer la consommation sur un tour, nous utilisons la « méthode de la puissance moyenne » :

Cette méthode, bien que moins précise qu'une intégration instantanée, reste la plus pertinente au stade actuel du projet, compte tenu du peu de données disponibles. Nous appliquerons alors une marge de sécurité de 5 % pour couvrir les incertitudes.

D'après nos échanges avec des ingénieurs de course du championnat GT4 France et des motoristes, la puissance moyenne développée sur un tour du Nürburgring représente environ 35 % de la puissance maximale du moteur. Avec notre marge, nous utiliserons 40 % de la puissance maximale pour le calcul.

Nous obtenons alors la formule suivante pour la quantité d'hydrogène requise :

$$Q_{H_2} = N \times T \times \frac{P_{\text{moy}}}{P_{\text{max}}} \times C_{\text{max}} \times \frac{1}{60}$$

où :

- Q_{H_2} (kg) est la quantité d'hydrogène nécessaire,
- N est le nombre de tours à effectuer,
- T (min) est le temps moyen par tour,
- $\frac{P_{\text{moy}}}{P_{\text{max}}} = 0,40$ est le ratio puissance moyenne / puissance maximale (35 % + 5 % de marge),
- C_{max} (kg/h) est la consommation d'hydrogène à puissance maximale (donnée PITA moteur),
- $\frac{1}{60}$ convertit la consommation de kg/h en kg/min.

II.3) Influence comportement dynamique

Notre projet s'inscrivant dans le domaine du sport automobile, où la recherche de performance et d'équilibre du véhicule est primordiale, il est essentiel de comprendre l'impact que peut avoir l'implantation de réservoirs d'hydrogène sur le comportement dynamique. Ces réservoirs, relativement lourds, influencent de manière significative la position du centre de gravité (CG) du véhicule ainsi que la répartition des masses entre l'avant et l'arrière. Une mauvaise répartition pourrait altérer les performances en virage en accentuant le sous-virage

ou le survirage. Cette partie vise donc à analyser les principes de base du comportement dynamique et à anticiper les effets du stockage d'hydrogène sur la stabilité et l'agilité de notre voiture de course.

II.3.1) Centre de gravité et répartition des masses

Le centre de gravité (CG) représente le point où l'on peut considérer que toute la masse du véhicule est concentrée. Plus ce point est bas et proche du centre du châssis, plus la voiture sera stable et performante en virage. Le positionnement des réservoirs d'hydrogène, qui sont à la fois lourds et volumineux, peut entraîner un déplacement du CG, soit longitudinalement (vers l'avant ou vers l'arrière), soit verticalement (plus haut si mal intégré). Si le CG est déplacé vers l'avant, la charge sur les roues avant augmente, ce qui provoque une tendance au sous-virage : le véhicule élargira la trajectoire en virage et deviendra moins agile. À l'inverse, si le CG est déplacé vers l'arrière, la charge sur les roues arrière augmente, ce qui favorise le survirage : l'arrière de la voiture décroche plus facilement, ce qui peut rendre le véhicule instable en virage.

II.3.2) Transfert de masse en virage

Lorsqu'un véhicule subit une accélération latérale, comme lors d'un virage, la masse se déplace vers l'extérieur du virage. Ce transfert de masse réduit l'adhérence des roues situées à l'intérieur du virage tout en augmentant celle des roues extérieures. Si le CG est situé plus haut, le transfert de masse est amplifié, ce qui accentue le risque de perte d'adhérence et rend le comportement du véhicule plus instable. Pour un véhicule de course, qui évolue souvent à la limite d'adhérence, ces effets sont critiques et doivent être pris en compte lors de l'implantation des réservoirs. L'objectif est donc de maintenir le CG aussi bas que possible afin de limiter ces transferts de masse.

II.3.3) Conséquences pratiques pour notre projet

Pour notre projet, un positionnement inadapté des réservoirs pourrait entraîner des conséquences significatives sur le comportement dynamique du véhicule. Si les réservoirs sont placés trop en avant, le véhicule risque de devenir sous-vireur, ce qui réduira son agilité dans les enchaînements de virages et limitera ses performances sur circuit. À l'inverse, un placement trop en arrière accentuerait le survirage, rendant la voiture plus difficile à piloter à haute vitesse et nécessitant un pilotage plus précis. La solution optimale consisterait à intégrer les réservoirs le plus près possible du centre du véhicule et à la hauteur la plus basse, tout en respectant les contraintes d'homologation et de sécurité. Cette répartition équilibrée permettra de préserver les qualités de tenue de route, essentielles pour atteindre nos objectifs de performance sur circuit.

II.4) Cas concret : La Mitjet 2.0L

Dans le cas où nous devons dimensionner un compartiment contenant un réservoir de 2.1kg, les simulations SolidWorks montrent que le volume à l'intérieur serait d'environ 500L. A l'aide de l'étude préalablement faite en partie 2, nous voulons alors un ventilateur de capacité

$$Q_{\text{air}} = 100 * 128.8 = 12880 \text{ L/min}$$

$$Q_{\text{air}} = 778 \text{ m}^3/\text{h}$$

Nous pouvons alors nous référencer sur ce débit de ventilateur, reste à étudier quelle technologie de ventilateur est la plus adaptée pour notre utilisation, sachant que les ventilateurs doivent être sélectionnés pour répondre aux exigences en matière d'incendie, d'explosion et de corrosion. La norme correspondante est celle-ci : ATEX (Directive 2014/34/UE).

Concernant la consommation, l'objectif étant de réaliser un record sur le circuit du Nürburgring, il est essentiel d'estimer précisément la quantité d'hydrogène nécessaire à embarquer pour accomplir les tours requis. Après analyse et échanges avec des professionnels du sport automobile, nous avons jugé qu'une autonomie de 4 tours serait suffisante pour atteindre notre objectif.

Afin de déterminer la quantité d'hydrogène à emporter, nous utilisons la formule développée précédemment

$$Q_{\text{hydrogène}} = 4 \times 10 \times 0,4 \times 10,8 \times 0,0167$$

$$Q_{\text{hydrogène}} \approx 2,88 \text{ kg}$$

Ici, 10.8 kg/h représente la consommation maximale déterminée par le Pita Moteur hydrogène.

En conclusion, l'étude de la consommation d'hydrogène pour la Mitjet nous a permis de définir un besoin d'environ 2,9 kg pour réaliser quatre tours du Nürburgring. Ce résultat a guidé le choix des réservoirs Hexagone Purus de 2,1 kg et 3,1 kg pour notre projet. Ces éléments serviront de base pour la suite de notre travail, notamment lors de l'étude d'implémentation via modélisation CAO et analyse du volume disponible à bord.

III) Implémentation en CAO des réservoirs dans l'habitacle



III.1) Modélisation des réservoirs

Dans cette section, nous étudions l'implémentation des réservoirs à hydrogène dans l'habitacle à l'aide de la conception assistée par ordinateur (CAO). Cette démarche permet d'évaluer précisément le volume occupé par les caissons nécessaires à leur intégration.

Pour notre étude, nous avons sélectionné deux réservoirs de la marque HEXAGON PURUS comme modèles de référence : le H2-70-440X1050 et le H2-70-368X878. Le premier a une capacité de 3,1 kg et des dimensions de 440 mm de diamètre pour 1050 mm de longueur, tandis que le second a une capacité de 2,1 kg, avec un diamètre de 368 mm et une longueur de 878 mm.

Nous avons modélisé ces réservoirs en CAO, en y intégrant également les composants associés tels que les vannes anti-retours, les vannes de décharge, ainsi que les dispositifs de coupure automatique. Le choix et la configuration de ces vannes ont été guidés par l'analyse de la réglementation technique de la FIA concernant les systèmes de stockage d'hydrogène en compétition.

Cela nous a permis de créer deux assemblages distincts :

- Un premier contenant uniquement le réservoir de 3,1 kg,
- Un second contenant deux réservoirs de 2,1 kg.



Lors de la conception finale des caissons de réservoirs, il sera essentiel de prendre en compte leur aérodynamique intérieure. La forme interne devra permettre un écoulement optimal de l'air, sans générer de turbulences ni de zones de stagnation. Cet aspect est particulièrement important pour garantir un débit de 118 NL/min (normaux litres par minute). Ce débit correspond au volume d'air nécessaire pour assurer l'évacuation rapide de toute fuite éventuelle d'hydrogène vers l'extérieur. Toute obstruction ou conception inadéquate du caisson pourrait compromettre cette évacuation et, par conséquent, nuire à la sécurité du système.

III.2) Scanner 3D

Une fois les plans CAO des réservoirs réalisés, nous avons souhaité confronter notre travail théorique à la réalité physique afin de valider la faisabilité de notre intégration dans un véhicule existant. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser le scanner 3D ROMER HEXAGON mis à disposition dans notre laboratoire. Cet outil de numérisation permet d'obtenir un modèle précis de la géométrie d'un objet ou d'un environnement, ce qui s'avère particulièrement utile pour comparer nos modélisations avec un châssis réel.

Avant de pouvoir réaliser le scan, nous avons dû nous former à l'utilisation de cet appareil, qui demande une certaine maîtrise. Plusieurs séances d'entraînement ont été nécessaires pour comprendre le fonctionnement du logiciel associé, calibrer correctement le bras articulé et apprendre les bonnes pratiques de numérisation.

Nous nous sommes ensuite rendus dans un garage partenaire, qui nous a gentiment prêté une Mitjet 2L pour l'occasion. Nous avons installé le matériel sur place et procédé au scan du côté passager du véhicule, découpé en quatre parties afin de faciliter l'acquisition des données et garantir une meilleure couverture des zones à étudier.

Toutefois, cette étape ne s'est pas déroulée sans difficultés. Nous avons été confrontés à plusieurs problèmes techniques. Premièrement, les matériaux constituant la carrosserie du véhicule posaient un problème : leur finition brillante ou transparente compliquait la lecture par le scanner, même avec l'application d'un spray matifiant prévu à cet effet. Deuxièmement, l'espace restreint dans l'habitacle nous a considérablement limités dans nos mouvements. Certaines zones étaient difficilement accessibles avec le bras du scanner, ce qui a parfois compromis la qualité ou la continuité des données relevées.

Malgré ces contraintes, cette expérience s'est révélée très formatrice. Elle nous a permis non seulement de tester la compatibilité entre nos conceptions numériques et les contraintes réelles d'un véhicule de course.

La dernière étape de notre travail a consisté à assembler les différents fichiers issus du scanner 3D afin de reconstituer une modélisation complète de l'intérieur du véhicule. Chaque partie scannée a été alignée et fusionnée à l'aide du logiciel associé, ce qui nous a permis d'obtenir une vue globale et précise de l'habitacle de la Mitjet 2L.



Grâce à cette modélisation, nous avons pu analyser les volumes disponibles de manière réaliste et fiable. Après étude, nous en avons conclu que, compte tenu de l'espace très restreint dans le cockpit, il ne serait possible d'intégrer qu'un seul réservoir de 2,1 kg à l'intérieur de l'habitacle. Le réservoir de 3,1 kg, plus encombrant, ne peut être logé sans modifier de manière significative la structure du véhicule ou compromettre l'ergonomie du poste de pilotage.

Il nous faudra désormais connaître avec précision la consommation réelle en hydrogène de notre moteur afin de déterminer si un seul réservoir de 2,1 kg est suffisant pour répondre aux besoins de l'application envisagée. Dans le cas contraire, plusieurs scénarios devront être étudiés.

Le premier consisterait à relocaliser un second réservoir ailleurs dans le véhicule, en dehors de l'habitacle, ce qui impliquerait une analyse plus poussée de l'architecture et des contraintes de sécurité.

Le second scénario serait de changer de véhicule pour un modèle offrant un volume intérieur plus important, permettant une intégration plus simple et plus sûre de deux réservoirs. Cette décision dépendra donc directement des résultats finaux de l'étude de consommation, qui orienteront la suite du projet.

Conclusion

Ce projet de recherche intitulé : *“Etude des systèmes de stockage d'hydrogène, leur adaptabilité dans un véhicule de course et leur influence sur le comportement dynamique de celui-ci”* nous a été d'une grande richesse d'apprentissage. Non seulement nous avons appris des compétences techniques tel que le scan 3D ou bien l'utilisation des technologies hydrogène, mais nous avons aussi appris en tant qu'équipe en travaillant ensemble.

Tout d'abord l'étude des différentes technologies des méthodes de stockage hydrogène nous a bel et bien confirmé que l'hydrogène était un secteur d'avenir et que la technologie qui nous était la plus adaptée était l'hydrogène gazeux comprimé à 70 MPa. Nous aurons alors besoin de réservoirs dit de “type IV” ayant une résistance toute particulière.

Par la suite, l'étude de l'article 19 du règlement FIA auquel nous devons nous fier pour homologuer le véhicule, nous a particulièrement aidé à nous rendre compte des enjeux de la sécurité quant à l'utilisation des systèmes de stockage. Il est nécessaire



d'être rigoureux et consciencieux afin de simultanément dimensionner un système de stockage et d'acheminement d'hydrogène tout en s'assurant de le faire en toute sécurité.

Le dimensionnement d'un compartiment est alors un point clé dans ce projet. Nous avons alors eu à pré-dimensionner un ventilateur capable d'extraire toute fuite d'hydrogène venant des réservoirs. La détermination de la consommation du véhicule et l'influence dynamique nous a indiqué que le choix des réservoirs et du positionnement au sein du véhicule est primordial pour les performances en vue du record au circuit du Nürburgring dans la catégorie hydrogène.

Ces études préalables nous ont permis d'avoir le bagage technique pour savoir si oui ou non il est possible d'implémenter un réservoir d'hydrogène dans un véhicule de course. Nous avons eu l'occasion de scanner l'intérieur d'une Mitjet 2.0L, ce qui nous a permis d'arriver au résultat suivant :

Il est possible d'implémenter des réservoirs hydrogène au sein d'un véhicule de sport. Les perspectives sont multiples, nous n'avons scanné qu'un seul véhicule parmi une liste que nous avons en tête, le choix des réservoirs et son nombre n'est donc pas fixé mais cette étude confirme la faisabilité du projet HYCE.