



HYCE

Rapport de mi-semestre

PITA 3A : Etude de prédimensionnement pour rétrofit de
moteur hydrogène à combustion interne (H₂-ICE)

Table des matières

1	Introduction	2
1.1	Contexte	2
1.2	Rappel des problématiques liées à l'hydrogène	2
2	Les travaux réalisés.....	3
2.1	Le dossier technique	3
2.2	Problématiques identifiées	4
3	Conclusion	5

1 Introduction

1.1 Contexte

Ce projet d'ingénierie (PITA) s'inscrit dans le cadre d'une aventure innovante menée à l'ESTACA : le projet HYCE. Porté par l'association Idrogen, il a pour objectif de réaliser le retrofit d'un moteur à combustion interne afin de le faire fonctionner à l'hydrogène.



L'idée principale est de transformer un moteur thermique existant pour le rendre plus respectueux de l'environnement, tout en conservant l'émotion automobile telle qu'elle est connue depuis des décennies. Afin de démontrer la pertinence et la performance de cette technologie, le projet ambitionne de réaliser un record sur le mythique circuit du Nürburgring, lieu emblématique de l'histoire de l'automobile, où les constructeurs se confrontent pour prouver la fiabilité et l'efficacité de leurs technologies.

Dans le cadre de ce projet, de nombreuses problématiques techniques émergent. L'objectif de ce PITA est donc d'identifier ces problématiques et de proposer des solutions adaptées. Ce travail s'inscrit dans la continuité du PITA réalisé l'année précédente, qui portait sur le prédimensionnement du moteur et la vérification de la faisabilité globale du projet. Aujourd'hui, la question de la faisabilité ne se pose plus : le projet est réalisable. En revanche, il est désormais nécessaire d'identifier précisément l'ensemble des problématiques techniques et d'apporter les solutions les plus pertinentes possibles.

Ce rapport de mi-parcours a ainsi pour objectif de présenter les principales problématiques rencontrées ainsi que les travaux réalisés au cours du premier semestre.

1.2 Rappel des problématiques liées à l'hydrogène

Avant de présenter les travaux réalisés, il est important de rappeler les principales problématiques liées à l'utilisation de l'hydrogène dans un moteur à combustion interne.

L'une des contraintes majeures est directement liée aux propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène. Il s'agit d'un gaz extrêmement inflammable, possédant une plage d'inflammabilité très large. Ainsi, la combustion de l'hydrogène peut être déclenchée par un apport d'énergie très faible, ce qui augmente fortement les risques de pré-allumage et de cliquetis.

Par ailleurs, l'hydrogène possède une très faible densité volumique. Afin de pouvoir stocker une quantité suffisante d'énergie, il est donc nécessaire de le comprimer à très haute pression, pouvant aller jusqu'à 700 bars. En plus d'être peu dense, l'hydrogène est un gaz très volatile, ce qui pose d'importantes problématiques d'étanchéité, notamment au niveau du moteur.

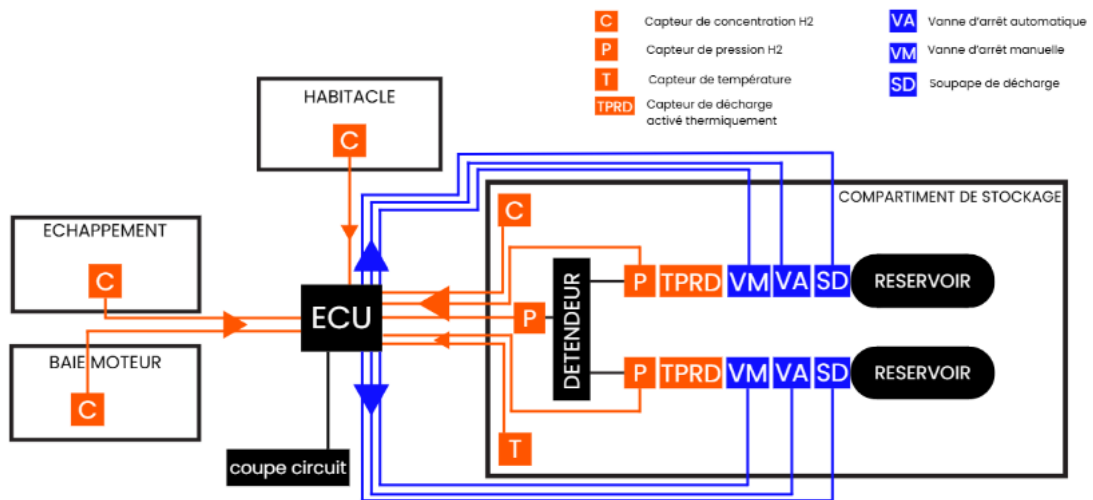
2 Les travaux réalisés

2.1 Le dossier technique

Le dossier technique s'inscrit dans la volonté du projet HYCE de se rapprocher d'industriels et de renforcer la crédibilité technique du projet. Il était donc essentiel de réaliser un dossier aussi précis et rigoureux que possible, regroupant l'ensemble des modifications prévues sur le véhicule, ainsi que leur justification, afin d'assurer un retrofit performant et sécurisé.

Ce dossier a été réalisé en étroite collaboration avec le pôle Énergie du projet HYCE, ainsi qu'avec le second PITA consacré aux systèmes embarqués.

Le pôle Énergie s'est chargé de présenter les modifications liées au stockage de l'hydrogène et à son acheminement jusqu'au moteur, à l'aide de schémas fonctionnels et d'une description détaillée des composants ajoutés. La réglementation FIA concernant les véhicules hydrogène a également été étudiée en profondeur afin de garantir que tous les aspects liés à la sécurité soient pris en compte.



Le PITA systèmes embarqués s'est quant à lui concentré sur la réalisation d'un schéma architectural du système de communication, indispensable à la sécurité et au bon fonctionnement du véhicule.

Notre contribution principale a porté sur la présentation des modifications apportées au moteur, ainsi que sur leur justification technique. Ce travail a principalement consisté en des recherches bibliographiques, des phases de réflexion et des échanges avec des industriels. L'objectif du mois d'octobre a été d'identifier l'ensemble des modifications nécessaires, tandis que le mois de novembre a été consacré à leur justification.

Les principales modifications prévues sont les suivantes :

- **Implémentation d'une injection indirecte d'hydrogène :** l'hydrogène étant un gaz, le système d'injection doit être entièrement repensé. L'injection directe d'hydrogène reste aujourd'hui une technologie complexe et coûteuse. D'après les études menées l'an dernier et les échanges avec des professionnels, l'injection indirecte a été retenue comme la solution la plus adaptée dans le cadre de ce projet étudiant.

- Ajout d'une injection d'eau : bien que peu répandue, l'injection d'eau devient essentielle dans un fonctionnement à l'hydrogène. Elle permet de réduire la température et la pression dans la chambre de combustion, avec pour objectif principal de limiter les phénomènes de cliquetis.
- Modification du système d'allumage : en raison des propriétés de l'hydrogène, le système d'allumage doit être adapté. Cela implique notamment l'utilisation de composants spécifiques à l'hydrogène, tels que des bougies froides et un système d'allumage individuel par bobine (coil-on-plug), afin de limiter les risques de cliquetis et de pré-allumage.
- Modification de l'étanchéité du moteur (développée ultérieurement).
- Modification du turbocompresseur (développée ultérieurement).

2.2 Problématiques identifiées

Lors de l'étude de ces modifications, plusieurs problématiques majeures ont été identifiées et ont fait l'objet d'un travail spécifique.

La problématique du blow-by

L'une des problématiques principales identifiées est celle du blow-by. Ce phénomène, déjà présent dans les moteurs thermiques conventionnels, est accentué dans un fonctionnement à l'hydrogène. En effet, la pression en chambre de combustion est plus élevée et l'hydrogène, du fait de sa très forte diffusivité, s'échappe plus facilement entre les segments de piston. L'étanchéité du cylindre devient alors moins efficace. Plusieurs pistes ont été étudiées afin de limiter ce phénomène. Une solution consisterait à repenser entièrement l'étanchéité du moteur, par exemple en utilisant des segments de piston revêtus de DLC. Toutefois, cette solution est trop coûteuse pour un projet étudiant.

Nous nous sommes donc orientés vers des solutions visant à limiter les conséquences du blow-by, n'étant pas dangereux s'il est correctement maîtrisé. Parmi les solutions envisagées :

- La mise en place de vidanges plus fréquentes, solution simple et peu coûteuse mais contraignante ;
- La modification du système de ventilation du carter à l'aide de valves PCV (Positive Crankcase Ventilation), solution largement utilisée par les constructeurs actuels (**Solution retenue pour notre projet**).

La problématique du turbocompresseur :

L'hydrogène occupant un volume important, l'installation d'un turbocompresseur est particulièrement intéressante afin d'augmenter la puissance du moteur par une suralimentation plus importante. Cependant, les échanges avec des industriels ont mis en évidence une diminution du travail disponible à la turbine par rapport à un fonctionnement essence. Il a donc été nécessaire de comprendre les causes de cette perte afin de pouvoir la quantifier et, à terme, prédimensionner correctement le turbocompresseur.

Les travaux du premier semestre se sont concentrés sur la compréhension de ce phénomène. Plusieurs paramètres influencent le travail fourni à la turbine :

- Le débit massique des gaz d'échappement
- Leur température
- Leur pression.

Le débit des gaz d'échappement est le paramètre le plus influent. Si le moteur admet moins d'air, la masse de gaz expulsée est plus faible, ce qui réduit l'énergie disponible à la turbine. La température des gaz joue également un rôle important, car elle est directement liée à l'enthalpie du mélange : plus les gaz sont chauds, plus l'énergie disponible est élevée.

$$H = m \cdot C_p \cdot T$$

- H : Enthalpie totale (en Joules, J). Elle représente l'énergie thermique totale contenue dans le fluide.
- m : Masse du gaz (en kg).
- C_p : Capacité thermique massique à pression constante (en $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$). C'est une constante qui dépend de la nature du gaz.
- T : Température absolue (en Kelvin, K).

Enfin, la pression des gaz d'échappement influe sur le travail extrait, celui-ci dépendant du rapport de pression à la turbine. Dans un fonctionnement à l'hydrogène, plusieurs phénomènes expliquent la diminution de l'énergie disponible :

- L'hydrogène occupant un volume important, la masse d'air admise est réduite, ce qui diminue le débit des gaz d'échappement.
- Le moteur fonctionne avec un lambda élevé afin de limiter le cliquetis, ce qui conduit à une combustion plus pauvre et donc à une température d'échappement plus faible.
- La combustion de l'hydrogène produit une grande quantité de vapeur d'eau, ce qui augmente la capacité calorifique du mélange et contribue à réduire encore la température des gaz.

Le rendement thermique effectif (BTE) influence également l'énergie disponible à l'échappement. Un BTE élevé signifie qu'une plus grande fraction de l'énergie chimique du carburant est convertie en puissance mécanique utile, ce qui réduit l'énergie rejetée sous forme thermique dans les gaz d'échappement. À l'inverse, une diminution du BTE se traduit par une augmentation de l'énergie dissipée, notamment vers l'échappement et les parois.

Dans un fonctionnement à l'hydrogène, le BTE est fortement conditionné par l'utilisation de mélanges pauvres à lambda élevé. Ce mode de fonctionnement permet une combustion rapide et stable, favorisant le transfert d'énergie vers le vilebrequin, en particulier à charge partielle. Toutefois, à forte charge, le lambda élevé entraîne une diminution de la température et de la pression de combustion, ce qui limite la quantité de travail mécanique extraite du cycle. Une partie de l'énergie chimique n'est alors pas convertie efficacement, sans pour autant se traduire par une énergie exploitable accrue dans les gaz d'échappement.

Maintenant que ce phénomène a été compris, l'objectif du second semestre sera de quantifier précisément cette perte d'énergie afin de dimensionner le turbocompresseur de manière optimale.

Une réflexion a d'ores et déjà été engagée sur la méthodologie à adopter pour répondre à cette problématique.

3 Conclusion

Le travail réalisé au cours de ce premier semestre a été particulièrement important et révélateur des nombreuses problématiques techniques liées au projet HYCE. Il a permis d'identifier des difficultés majeures, mais également de proposer des premières solutions concrètes et réalistes.

La suite du projet consistera à quantifier précisément la perte d'énergie disponible à la turbine afin de dimensionner le turbocompresseur de la manière la plus adaptée possible et de déterminer si l'ajout d'un turbocompresseur électrique sera nécessaire en complément.

Une autre partie du PITA est dédiée à la prise de contact avec les entreprises du milieu. Une première étape a été réalisée pour contacter des industriels comme Bosch ou Alpine. L'entreprise Bosch pourrait être d'une grande aide pour valider nos calculs et nous accompagner sur le redimensionnement du turbocompresseur.