



HYCE

Rapport final

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

BARTHELEMY Micah - BRETECHE Quentin - NICOULEAU William - PUCHOT Axel

Sommaire

Sommaire	2
1 Remerciements	4
2 Introduction.....	5
2.1 Contexte	5
2.2 Rappel des risques liés à l'hydrogène	5
3 Organisation du projet.....	7
3.1 Planification générale.....	7
3.2 Coordination et collaboration des membres du projet	8
4 Élaboration du dossier technique ALPINE	9
4.1 Contexte et objectif	9
4.2 Modifications du moteur.....	9
4.2.1 La problématique du blow-by.....	10
4.2.2 La problématique du turbocompresseur.....	10
5 Etude de la suralimentation en 0-1D / Partie 1	12
5.1 Contexte et objectif	12
5.2 Etude de la pression de suralimentation	13
5.2.1 Extraction des données de référence du modèle essence	13
5.2.2 Calcul et tracer des courbes de suralimentation en fonction du lambda ..	14
5.2.3 Analyse des courbes	17
5.2.4 Tableau récapitulatif	20
5.2.5 Conclusion	20
6 Simulation 0-1D / Partie 2	21
6.1 Objectifs de la modélisation	21
6.2 Optimisation des réglages : La Wastegate.....	21
6.3 Analyse des courbes	22
6.3.1 Courbe de pression de suralimentation	22
6.3.2 Courbes de vitesse de rotation du turbocompresseur.....	23
6.3.3 Courbes de puissance moteur	24

6.3.4	Observation et conclusion	25
7	Conclusion.....	26
	Table des figures.....	28

1 Remerciements

Nous remercions l'ESTACA pour la mise à disposition des infrastructures et des ressources logicielles nécessaires à la réalisation de ce projet.

Nos remerciements s'adressent également à **M. Benmalek, M. Perraldi, M. Charon et M. Barbier** pour l'organisation de ce PITA et leur accompagnement pédagogique. Nous remercions également, **M. Rizoug**, notre professeur référent, pour son expertise technique et son aide précieuse tout au long de cette étude.

Enfin, nous remercions nos partenaires techniques et intellectuels : Bosch, Alpine et Lotus Engineering, pour leur soutien et les expertises apportées à cette étude.

2 Introduction

2.1 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 fin d'étude a ainsi pour objectif de présenter les principales problématiques rencontrées ainsi que les travaux réalisés au cours de cette année.

2.2 Rappel des risques liés à l'hydrogène

Avant d'exposer les résultats de nos simulations numériques, il convient de poser le cadre théorique et technique indispensable à la compréhension des défis liés à l'utilisation de l'hydrogène comme carburant. En effet, ce gaz présente des propriétés physico-chimiques radicalement différentes de celles de l'essence standard, ce qui impose une redéfinition des paramètres de combustion.

Si la grande réactivité de l'hydrogène est un atout pour la vitesse de combustion, elle s'accompagne d'une énergie d'inflammation minimale extrêmement faible. Le moindre point chaud dans la chambre de combustion (une bougie trop chaude, un dépôt de calamine ou une soupape d'échappement mal refroidie) suffit à déclencher des anomalies de combustion critiques :

- Le pré-allumage : Il s'agit du déclenchement de la combustion avant l'étincelle commandée par la bougie d'allumage. La combustion s'effectue alors pendant que le piston est encore en phase de remontée.
- Le cliquetis : Ce phénomène correspond à une auto-inflammation spontanée, brutale et non contrôlée d'une partie du mélange frais avant d'être atteint par le front de flamme normal.

Il est capital d'éviter ces deux phénomènes en raison des risques mécaniques qu'ils engendrent. Le cliquetis et le pré-allumage génèrent des ondes de choc violentes à très haute fréquence à l'intérieur du cylindre. Ces pics de pression locaux et ces vibrations peuvent briser le film d'huile protecteur sur les parois, entraînant une hausse locale instantanée de la température. À court terme, les risques se traduisent par une perte immédiate de performance, mais surtout par des avaries mécaniques irréversibles : perforation ou fusion de la tête des pistons, rupture des segments, flambement des bielles et usure prématurée des coussinets de vilebrequin.

Un autre défi technique majeur réside dans la très faible densité volumique de l'hydrogène à l'état gazeux. Afin d'embarquer une quantité d'énergie suffisante pour espérer décrocher un record sur le circuit du Nürburgring, le gaz doit être comprimé à des pressions extrêmement élevées, de l'ordre de 700 bars.

Cette haute pression, couplée à la taille infime de la molécule de dihydrogène, pose des contraintes d'étanchéité. L'hydrogène a la particularité de s'infiltrer dans les moindres porosités et peut provoquer la fragilisation des métaux. La conception du circuit d'alimentation requiert donc des composants spécialisés. La résolution des problématiques liées à la sécurité du stockage, à la gestion de la haute pression et à l'acheminement sécurisé du gaz depuis les réservoirs jusqu'au plenum d'admission du moteur est confiée à une autre partie de l'équipe (notamment le pôle Énergie du projet), dont les travaux techniques détaillés sont également consultables.

La combustion de l'hydrogène génère des températures de flamme théoriques très élevées. Pour contrer ce phénomène et repousser l'apparition du cliquetis, nos simulations intègrent systématiquement un système d'injection d'eau liquide, dont le taux a été fixé à 20% de la quantité de matière d'hydrogène injectée.

Toutes les exigences présentées dans ce rapport ne sont pas des conjectures théoriques. Ce sont des données d'entrée que nous avons obtenues et validées lors de nos propres travaux de recherche et de modélisation menés en amont de cette étude. Notre premier rapport d'étude de faisabilité et de dimensionnement initial reste entièrement accessible pour de plus amples détails sur l'origine de ces choix.

3 Organisation du projet

3.1 Planification générale

Pour structurer notre démarche et garantir le respect des jalons académiques et techniques, notre choix s'est immédiatement porté sur le diagramme de Gantt. Véritable norme au sein des projets industriels, cet outil offre une vue d'ensemble claire des dépendances entre les tâches et permet d'anticiper les aléas.

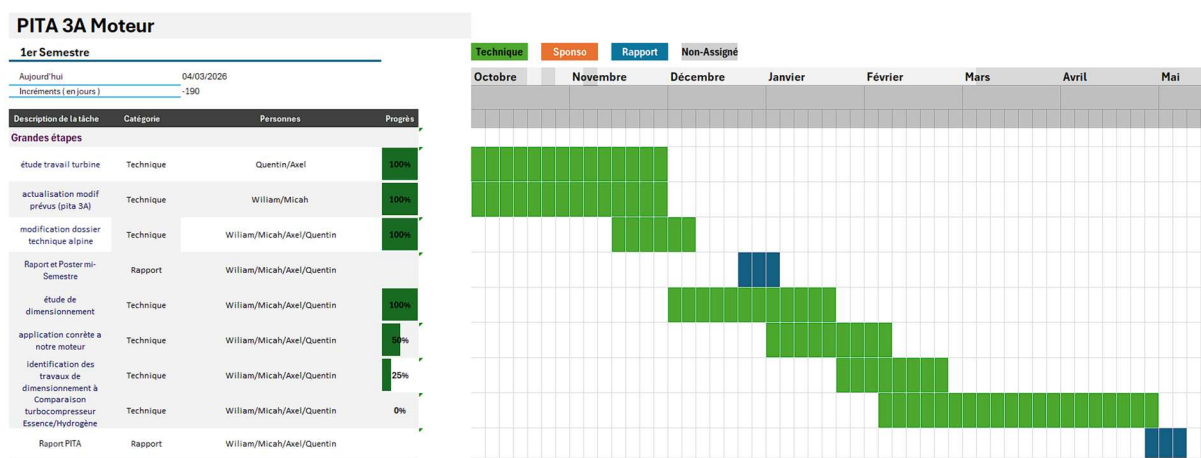


Figure 1 - Diagramme de Gantt du projet

Cependant, plutôt que d'utiliser un logiciel générique rigide, nous avons fait le choix de coder et concevoir notre propre diagramme de Gantt sur Excel. Cette approche sur-mesure nous a permis de répondre précisément aux besoins spécifiques de notre PITA : intégrer un suivi évolutif en temps réel, ajuster instantanément les charges de travail en fonction des imprévus, et conserver une flexibilité totale face aux fluctuations du calendrier de recherche. Grâce à cet outil interne et pratique, la planification n'a pas été un cadre figé, mais un véritable levier d'ajustement tout au long de l'année.

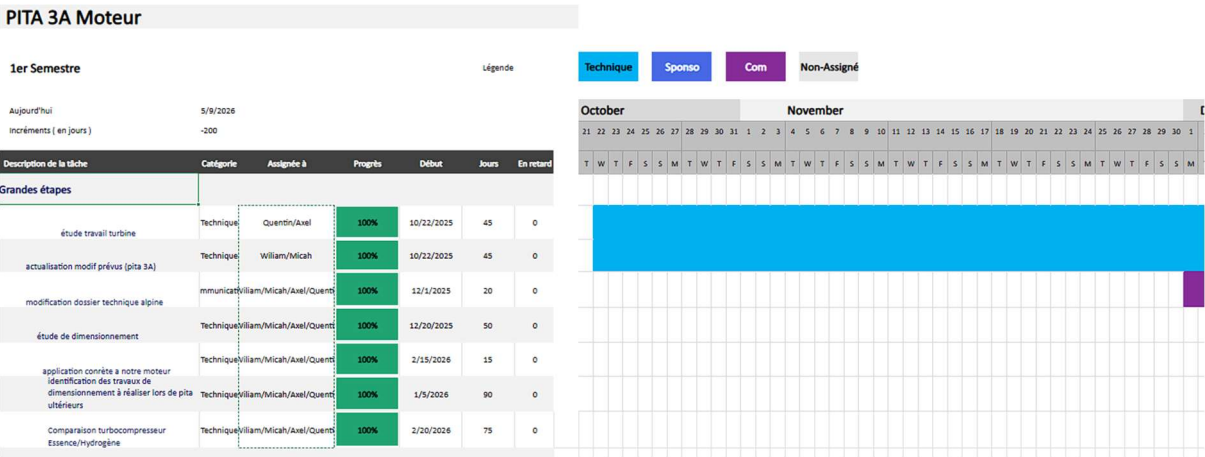


Figure 2 - Planning évolutif du projet

3.2 Coordination et collaboration des membres du projet

Le projet HYCE étant par nature pluridisciplinaire, la coordination des équipes a constitué un enjeu majeur. Nous avons centralisé notre organisation autour de deux points de communication : une coordination interne à notre pôle et des échanges transversaux avec les autres équipes.

Au sein de notre groupe de travail, la communication s'est voulue continue et réactive. Des messages s'échangeaient quotidiennement, permettant de résoudre les blocages techniques au fil de l'eau (ajustements de la démarche, corrections de modèles de calcul). À ce flux d'information continu s'ajoutaient des réunions hebdomadaires, visant à valider les avancées de chacun et à fixer les objectifs de la semaine suivante.

Par ailleurs, l'interdépendance de nos recherches avec les autres spécialités du projet rendait la coordination inter-pôle primordiale. Pour assurer la cohérence globale du projet, nous avons régulièrement planifié et mené des séances de travail inter-pôles (tous les jeudi).

4 Élaboration du dossier technique ALPINE

4.1 Contexte et objectif

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.

4.2 Modifications du moteur

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).

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

4.2.1 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).

4.2.2 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.

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 λ 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 λ 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 λ élevé entraîne une diminution de la température et de la pression de combustion, ce qui limite la quantité de travail mécanique extraite du cycle.

5 Etude de la suralimentation en 0-1D / Partie 1

5.1 Contexte et objectif

Comme détaillé précédemment, la première phase de notre travail au premier semestre a consisté à identifier les différents problèmes techniques liés au rétrofit hydrogène. Cette étape était indispensable pour anticiper l'arrivée physique du moteur au sein du projet. Parmi ces problématiques, la perte d'énergie à la turbine du turbocompresseur est un point critique qui nécessite une étude beaucoup plus poussée.

L'objectif principal de cette étude est donc de quantifier précisément ce phénomène afin de rendre une conclusion claire sur la viabilité du turbocompresseur d'origine. Nous devons déterminer si le turbo déjà en place sur le moteur est capable de supporter les contraintes de l'hydrogène et d'atteindre nos objectifs de performance, ou s'il faudra le remplacer par un modèle plus grand ou assisté électriquement (E-turbo).

Pour mener à bien ce travail, nous avons couplé deux outils numériques complémentaires:

- Le logiciel Lotus Engineering : Il s'agit d'un outil de simulation thermique et mécanique dit "0-1D". Cela signifie qu'il modélise le comportement global du moteur sous forme de réseaux de tuyaux et de volumes, sans avoir besoin de dessiner chaque pièce en 3D complexe, ce qui permet des calculs rapides et précis des flux de gaz. Nous avons eu l'opportunité d'utiliser un modèle de simulation développé par le groupe de PITA 4A Simulation. Ce modèle reproduit le plus fidèlement possible le comportement du moteur Renault MR18 de l'Alpine A110, en y intégrant les caractéristiques indispensables pour l'hydrogène.
- Microsoft Excel : Cet outil nous a servi à extraire les données brutes issues de Lotus Engineering afin de les retraiter. C'est grâce à Excel que nous avons pu appliquer nos propres formules mathématiques sur toute la plage de régime moteur et générer les courbes visuelles nécessaires à notre interprétation.

Le couplage de ces deux logiciels nous a été totalement indispensable pour analyser les besoins en pression du moteur et valider nos choix techniques.

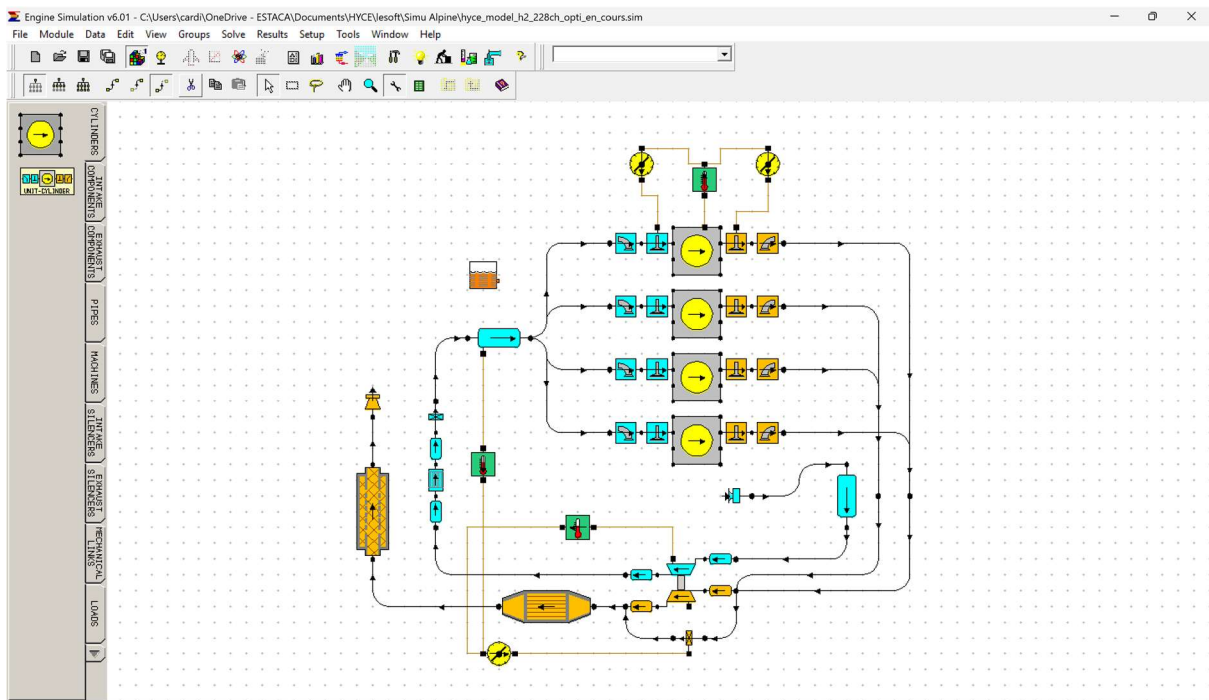


Figure 3 - Architecture moteur Lotus Engineering

5.2 Etude de la pression de suralimentation

Pour déterminer si le turbocompresseur d'origine est capable de remplir son rôle avec de l'hydrogène comme vecteur énergétique, nous avons structuré notre démarche en plusieurs étapes progressives, mêlant l'extraction de données de référence, le calcul thermodynamique et la simulation.

5.2.1 Extraction des données de référence du modèle essence

Avant de simuler le fonctionnement à l'hydrogène, il était indispensable de parfaitement connaître les performances d'origine du moteur. Notre objectif technique pour ce retrofit est de limiter au maximum la perte de puissance, en visant une baisse de 15 % maximum par rapport à la version essence d'origine. Pour construire cette base de

comparaison, nous avons extrait deux données fondamentales du modèle essence sur Lotus Engineering, pour chaque régime moteur :

- La courbe de puissance d'origine : Elle nous donne la puissance exacte délivrée par le moteur essence (en kW) sur toute sa plage de fonctionnement (de 800 à 7 000 tr/min). Cette courbe sert de cible pour calibrer notre modèle hydrogène.
- La courbe de pression absolue du turbo d'origine : Le turbocompresseur de série est dimensionné par le constructeur pour supporter une certaine vitesse de rotation et un niveau de pression précis. En extrayant cette courbe, nous obtenons la limite physique à ne pas dépasser. Elle nous permet de savoir sur quelle plage le turbo fonctionne en temps normal et quelles sont les valeurs maximales admissibles pour suralimenter notre mélange sans risquer de détruire le matériel.

Cette première étape nous a fourni le cadre de référence obligatoire pour évaluer la faisabilité mécanique et valider la viabilité du turbo d'origine.

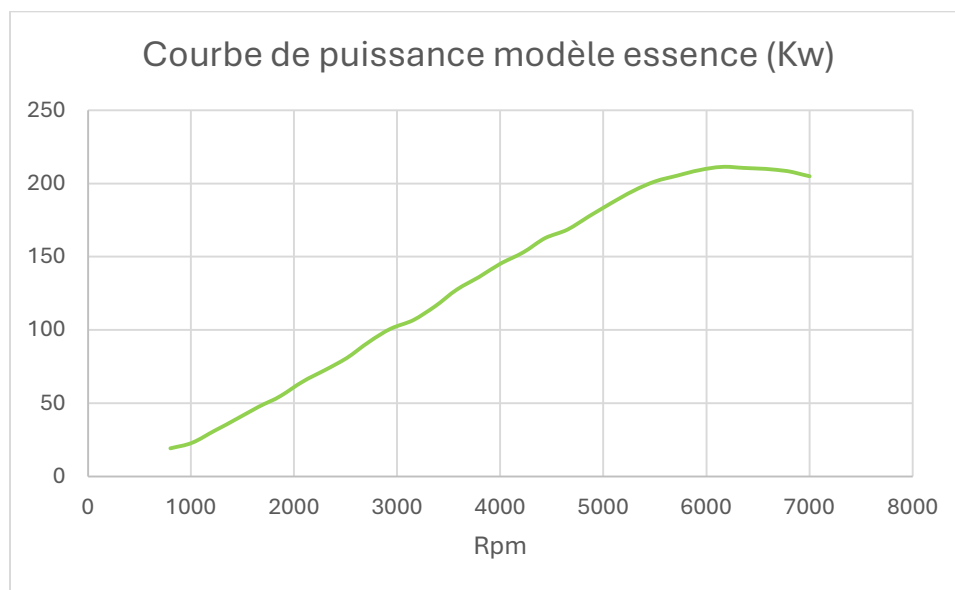


Figure 4 - Courbe de puissance du moteur essence, obtenue par simulation

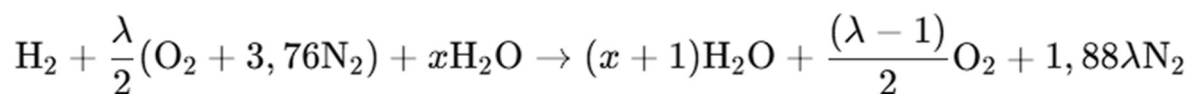
5.2.2 Calcul et tracer des courbes de suralimentation en fonction du lambda

Le raisonnement pour cette seconde phase est assez simple : nous avons fixé comme condition initiale de maintenir une puissance strictement identique entre le fonctionnement à l'hydrogène et le fonctionnement à l'essence. L'objectif étant de déterminer quelle pression de suralimentation le turbo doit fournir pour compenser la baisse d'énergie disponible du à l'hydrogène et délivrer la même puissance.

En faisant varier la richesse du mélange, nous avons pu tracer les courbes de "pression turbo nécessaire". Cela nous a permis d'identifier théoriquement pour quelles valeurs de lambda le turbocompresseur d'origine reste suffisant, et à partir de quel seuil il devient obligatoire de le remplacer le turbo ou de réduire nos ambitions de performance.

Pour générer ces courbes sur l'ensemble de la plage de régime, nous avons mis en place la démarche calculatoire suivante au sein de notre fichier Excel :

Notre démarche se base sur l'utilisation de l'équation de combustion de l'hydrogène suivante :



Les conditions initiales de l'étude ont été déterminés à l'aide notamment des précédents travaux réalisés l'année dernière par le PITA moteur, les données sont retrouvées dans le tableau ci-dessous :

Données	
γ	1.4
λ	2.5
Nc	4
Cylindrée (L)	0.45
PCI (J/kg)	120000000
rendement	0.4
Tadmission	340

Figure 5 - Conditions initiales de nos calculs

Pour atteindre la puissance cible du moteur essence, nous utilisons la relation entre la puissance mécanique, le pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'hydrogène et le rendement global du moteur (fixé ici à 0,4):

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = \frac{P_{\text{mécanique}}}{\text{PCI}_{\text{H}_2} \times \eta}$$

- $\dot{m}_{H_2}$: débit massique d'hydrogène brûlé (en kg/s)
- $P_{mécanique}$: puissance mécanique délivrée par le moteur (en watts, W)
- PCI_{H_2} : pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène (en J/kg)
- η : rendement global du moteur (sans unité)

Pour réaliser ce calcul, on s'est basé sur le débit massique trouvé précédemment. Notre moteur étant un moteur 4 temps, on injecte une fois tous les 2 tours de vilebrequin. De plus nous devons convertir les tours par minute en tours par seconde. Ainsi, on obtient la formule suivante :

$$n_{H_2} = \frac{60 \times 2 \times \dot{m}}{N_{cyl} \times N}$$

- n_{H_2} : quantité de matière d'hydrogène (en mol)
- $\dot{m}$: débit molaire d'hydrogène (en mol/s)
- N_{cyl} : nombre de cylindres du moteur
- N : régime moteur (en tr/min)

En s'appuyant sur l'équation de la réaction chimique de combustion de l'hydrogène, la quantité d'oxygène et d'azote nécessaire dépend directement du facteur Lambda (lambda) choisi :

$$n_{O_2} = \frac{\lambda}{2} \times n_{H_2}$$

$$n_{N_2} = 3,76 \times \frac{\lambda}{2} \times n_{H_2}$$

La somme de ces deux valeurs nous donne la quantité de matière totale d'air (n_{tot}) à admettre dans le cylindre pour brûler l'hydrogène selon la richesse voulue.

Enfin, en appliquant la loi des gaz parfaits, nous déterminons la pression absolue à laquelle l'air doit être envoyé par le compresseur dans le volume du cylindre, pour une température d'admission donnée (fixée à 340 K) :

$$P_{turbo} = \frac{n_{tot} \cdot R \cdot T_{adm}}{V_{cyl}}$$

Une fois ce modèle mathématique validé, nous l'avons codé sous Excel afin d'automatiser les calculs sur tous les régimes et d'obtenir nos graphiques comparatifs..

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
	RPM	remplissage	Remplissage LE	Puissance cible cv	Puissance Kw	débit H2	n(H2)	n(O2)	n(N2)	ntot(mol)	Pturbo H2 (Pa)	Pturbo H2 (bar)	Pturbo essence LE (bar)
1	800	100.00	56.81	26.23	19.30	0.19945	0.00748	0.00935	0.03515	0.04	294256.8472	2.942568472	1.60000002
2	1014	100.00	56.51	31.19	23.10	0.23873	0.00706	0.00883	0.03319	0.04	277864.6542	2.778646542	1.70000005
3	1228	100.00	51.05	42.54	31.30	0.32345	0.00790	0.00988	0.03714	0.05	310888.9121	3.108889121	1.70000005
4	1441	100.00	57.58	59.41	39.30	0.40613	0.00846	0.01057	0.03974	0.05	332650.2347	3.326502347	1.79999995
5	1655	100.00	64.22	64.69	47.60	0.49190	0.00892	0.01115	0.04191	0.05	350806.9707	3.508069707	1.79999995
6	1869	100.00	66.45	74.75	55.00	0.56837	0.00912	0.01140	0.04388	0.05	358932.3989	3.589323989	1.89999998
7	2083	100.00	71.54	88.06	64.80	0.66964	0.00964	0.01206	0.04533	0.06	378441.6762	3.784416762	1.89999998
8	2297	100.00	76.20	98.66	72.60	0.75025	0.00980	0.01225	0.04605	0.06	385509.3271	3.855093271	1.89999998
9	2510	100.00	77.36	110.08	81.00	0.83705	0.01000	0.01251	0.04702	0.06	398614.0307	3.986140307	2
10	2724	100.00	76.26	124.89	91.80	0.94969	0.01046	0.01307	0.04816	0.06	411497.862	4.11497862	2
11	2938	100.00	75.22	137.26	101.00	1.04373	0.01066	0.01332	0.05009	0.06	419303.8555	4.193038555	2
12	3152	100.00	78.40	145.14	106.80	1.10367	0.01050	0.01313	0.04937	0.06	419279.9436	4.192799436	2.09999999
13	3366	100.00	79.71	157.92	116.20	1.20081	0.01070	0.01338	0.05030	0.06	421067.0704	4.210670704	2.09999999
14	3579	100.00	76.61	173.54	127.70	1.31965	0.01106	0.01383	0.05199	0.07	435199.5745	4.351995745	2.09999999
15	3793	100.00	77.12	185.23	136.30	1.40852	0.01114	0.01393	0.05236	0.07	438300.8331	4.383008331	2.09999999
16	4007	100.00	74.76	197.73	145.50	1.50360	0.01126	0.01407	0.05291	0.07	442897.1895	4.428971895	2.09999999
17	4221	100.00	73.21	208.06	153.10	1.58218	0.01124	0.01406	0.05385	0.07	442424.2878	4.424242878	2.09999999
18	4435	100.00	73.21	221.25	162.80	1.66237	0.01138	0.01423	0.05349	0.07	447733.9822	4.477339822	2.09999999
19	4648	100.00	73.05	229.13	168.60	1.74231	0.01125	0.01406	0.05285	0.07	442436.2878	4.424362878	2.09999999
20	4862	100.00	77.31	241.49	177.70	1.83635	0.01133	0.01416	0.05325	0.07	445791.4548	4.457914548	2.00000005
21	5076	100.00	79.11	253.59	186.60	1.92832	0.01140	0.01425	0.05356	0.07	448383.1807	4.483831807	2.00000005
22	5290	100.00	79.06	265.14	195.10	2.01616	0.01143	0.01429	0.05374	0.07	449842.9144	4.498429144	2.00000005
23	5504	100.00	81.70	273.84	201.50	2.08230	0.01135	0.01419	0.05334	0.07	446535.4047	4.465354047	2.00000005
24	5717	100.00	84.33	279.27	205.50	2.13944	0.01114	0.01393	0.05238	0.07	438432.6691	4.384326691	2.00000005
25	5931	100.00	87.82	284.44	209.30	2.18291	0.01094	0.01368	0.05142	0.07	430428.0683	4.304280683	2.09999999
26	6145	100.00	83.82	287.43	211.50	2.18564	0.01067	0.01334	0.05015	0.06	419805.146	4.19805146	2.09999999
27	6359	100.00	85.44	286.48	210.80	2.17841	0.01028	0.01285	0.04830	0.06	404334.7439	4.043347439	2.09999999
28	6572	100.00	89.31	283.39	210.00	2.17014	0.00991	0.01239	0.04656	0.06	389745.4137	3.897454137	2.09999999
29	6786	100.00	90.82	283.35	208.50	2.15464	0.00953	0.01191	0.04477	0.06	374758.4875	3.747584875	2.09999999
30	7000	100.00	92.23	278.73	205.10	2.11950	0.00908	0.01135	0.04269	0.05	357377.2532	3.573772532	2

Figure 6 - Valeurs finales implémentées dans Excel

5.2.3 Analyse des courbes

Pour analyser l'impact de la richesse sur la suralimentation, nous avons fait varier le facteur Lambda (λ) de 1 à 2,5 avec un pas de 0,3. Cette plage spécifique a été choisie en cohérence avec les contraintes physico-chimiques de l'hydrogène expliquées en amont : ce gaz nécessitant de fonctionner en mélange pauvre pour éviter le cliquetis. Les calculs automatisés sur Excel nous ont permis de tracer le graphique comparatif suivant :

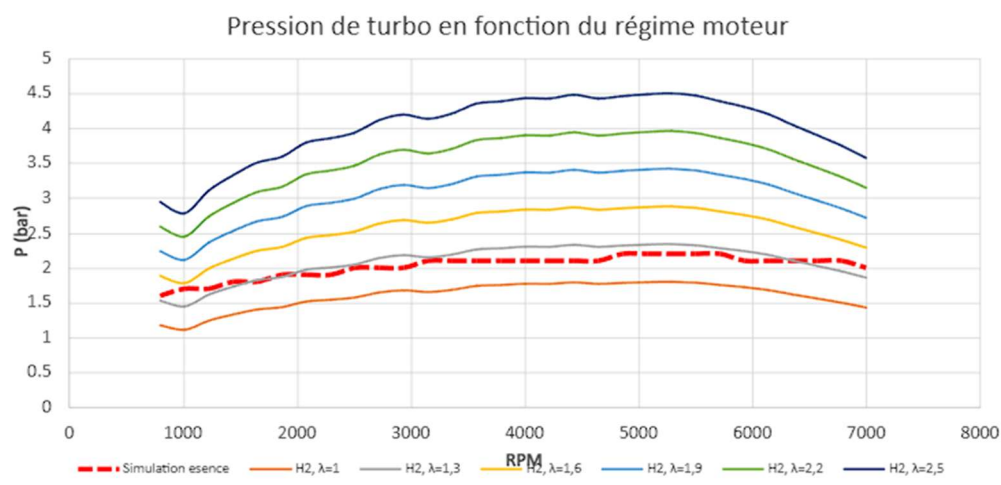


Figure 7 - Comparaison des pressions absolues de turbocompresseur Essence/H2

En étudiant ces résultats, plusieurs constats s'imposent :

- La courbe de référence essence (rouge pointillée) : Directement extraite de notre modèle de simulation sur Lotus Engineering, elle représente le fonctionnement d'origine du moteur. On remarque que la pression absolue maximale culmine à 2,2 bar aux alentours de 5 000 tr/min. Dans une utilisation routière classique, cette valeur est la limite haute à ne pas dépasser pour préserver la durée de vie du turbocompresseur. Néanmoins, l'objectif de notre projet est de réaliser une performance ciblée pour un record sur le Nürburgring, et non de concevoir un système prévu pour durer des dizaines de milliers de kilomètres. Nous pourrions donc nous autoriser à dépasser légèrement cette valeur de 2,2 bar sans pour autant mettre en danger la faisabilité technique du projet.
- L'allure générale des courbes hydrogène : Un point très positif ressort de ce graphique ; toutes les courbes calculées pour l'hydrogène adoptent sensiblement la même allure que la courbe de référence de l'essence. Le pic de pression nécessaire se situe systématiquement autour de 5 000 tr/min, quel que soit le λ choisi.

Cette similitude simplifie grandement notre étude. Elle montre que le comportement global du moteur reste stable d'un carburant à l'autre. La validation du turbocompresseur d'origine ne se jouera donc pas sur l'évolution intrinsèque des courbes, mais uniquement sur les valeurs absolues de pression que le matériel devra encaisser.

Pour déterminer concrètement si le turbocompresseur de série est capable de maintenir la puissance d'origine, nous avons analysé les résultats courbe par courbe en commençant par les mélanges les plus riches de notre plage:

- **Mélange stœchiométrique ($\lambda = 1$)** : Pour cette configuration où l'hydrogène et l'air sont injectés dans des proportions stœchiométrique , nous remarquons que la courbe de pression requise se situe en tout point en dessous de la courbe de référence essence. Avec un maximum de seulement 1,8 bar atteint , ce λ est théoriquement compatible avec les contraintes de puissance et de pression maximale que nous avons fixées au préalable.
- **Mélange pauvre modéré ($\lambda = 1,3$)** : En appauvrissant légèrement le mélange pour passer à un λ de 1,3, la courbe obtenue reste du même ordre de grandeur que notre courbe de référence essence. Elle affiche un pic maximal de 2,3 bar. Bien que cette valeur dépasse de 0,1 bar la limite nominale du constructeur (2,2 bar), cet écart reste minime et s'avère largement tolérable pour notre cahier des charges axé sur une performance de courte durée sur le Nürburgring.

Nous pouvons en déduire que si les conditions thermodynamiques réelles (notamment la gestion des points chauds et du cliquetis) nous permettent de faire fonctionner le moteur avec un mélange compris entre $\lambda = 1$ et $\lambda = 1,3$, le turbocompresseur d'origine est amplement suffisant pour atteindre nos objectifs. Aucune modification lourde du système de suralimentation ne serait alors requise sur cette plage.

Lorsque l'on continue d'appauvrir le mélange pour augmenter le facteur λ on observe :

- **Mélange à $\lambda = 1,6$:** Pour ce palier, la courbe de pression nécessaire se situe en tout point au-dessus de notre courbe de référence essence. Elle atteint une valeur maximale de **2,9 bar** au pic de son fonctionnement.
- **Mélange à $\lambda = 1,9$:** Le phénomène s'accroît nettement avec ce niveau de richesse. La pression absolue requise grimpe alors jusqu'à un maximum de **3,4 bar**.

Face à de telles valeurs, le turbocompresseur d'origine n'est plus du tout dimensionné pour fournir le débit d'air nécessaire. Une modification du système de suralimentation devient donc indispensable. Deux solutions techniques sont alors envisageables : remplacer le turbo de série par un modèle de plus grande dimension, ou lui adjoindre une assistance électrique via l'installation d'un *E-turbo*. Bien que contraignante, cette option reste techniquement faisable, car compenser le surplus de pression requis — qui est de l'ordre de 1 bar maximum par rapport à l'origine — entre tout à fait dans les cordes d'un système de suralimentation hautes performances modifié.

Pour les mélanges les plus pauvres de notre étude, on remarque :

- **Mélange à $\lambda = 2,2$:** La courbe se situe intégralement au-dessus de la référence et exige une pression absolue maximale de **4 bar**.
- **Mélange à $\lambda = 2,5$:** Configuration la plus extrême, elle demande une pression de suralimentation culminant à **4,5 bar**.

Tout comme les précédents, ces graphiques sont en tout point supérieurs à notre courbe de référence essence. Seulement, ici, le delta de pression requis est bien trop élevé. Même en modifiant l'alimentation ou en remplaçant le turbocompresseur d'origine, le matériel ne pourra pas compenser une telle augmentation de pression de manière fiable et réaliste pour un moteur de cette taille. Par conséquent, faire fonctionner le moteur à ces niveaux de richesse entraînera une perte de performance inévitable, qu'il nous faudra quantifier par la suite via des simulations physiques plus poussées.

5.2.4 Tableau récapitulatif

Lambda	Pression absolue de turbo	Décision
$1 < \lambda < 1.5$	Inférieure ou égale à 2.7 bar	On conserve le turbo d'origine
$1.5 < \lambda < 2$	Entre 2.7 et 3.5 bar	Changement de turbo : Mise en place d'un turbo plus gros ou d'un E-turbo
$2 < \lambda < 2.5$	Supérieur à 3.5 bar	Impossible à mettre en place, contrainte mécanique trop élevée

5.2.5 Conclusion

Cette étude démontre qu'un facteur λ supérieur à 2 est à exclure, la pression de turbo devenant insuffisante pour atteindre la puissance visée. Bien qu'une valeur comprise entre 1,5 et 2 soit théoriquement envisageable, elle nécessiterait un changement de turbocompresseur. La solution optimale consiste donc à retenir un λ situé entre 1 et 1,5. De plus, nous avons remarqué que la courbe obtenue avec $\lambda = 1,3$ s'avère très proche de la courbe de référence essence. En partant de ce constat et après avoir échangé avec des industriels, nous en avons décidé d'effectuer nos simulations à $\lambda = 1,3$.

6 Simulation 0-1D / Partie 2

6.1 Objectifs de la modélisation

Maintenant que nous avons analysé nos courbes de suralimentation théoriques et défini les plages de Λ à viser pour maintenir au mieux les performances du moteur, il nous reste un point critique à vérifier. Jusqu'à présent, notre étude sur Excel nous a uniquement permis de valider que les pressions demandées entraient dans les valeurs atteignables par le turbocompresseur lorsque ce dernier reçoit un le travail de la combustion d'un mélange air-essence ou air-hydrogène. Cependant, une inconnue subsiste : le turbocompresseur d'origine peut-il physiquement tourner à la vitesse requise par l'hydrogène pour fournir la pression de suralimentation demandée ?

En effet, nos recherches théoriques indiquent que la combustion de l'hydrogène génère un volume et une enthalpie de gaz d'échappement différents de l'essence, ce qui fournit globalement moins de travail à la turbine. Pour compenser ce manque d'énergie et réussir à fournir la pression de suralimentation nécessaire à l'admission, le turbocompresseur va devoir modifier son régime de rotation.

Cette donnée est capitale pour notre étude : une vitesse de rotation trop élevée (surrégime du turbo) entraîne des forces centrifuges et des contraintes thermiques extrêmes sur les paliers et les ailettes, ce qui augmente drastiquement le risque de casse mécanique.

Pour vérifier si le matériel de série est capable de supporter ce mode de fonctionnement, nous avons donc réalisé une simulation numérique. Pour cela, nous avons utilisé le même modèle numérique du moteur Renault MR18 fonctionnant à l'hydrogène sur le logiciel Lotus Engineering, introduit au début de cette étude.

6.2 Optimisation des réglages : La Wastegate

Pour faire en sorte que le turbocompresseur tourne à des vitesses de rotation respectant le cahier des charges initial du matériel de série, un organe de contrôle est indispensable : la soupape de décharge, plus communément appelée *Wastegate*.

Rappel technique : La *Wastegate* est une valve située sur le collecteur d'échappement, juste avant la turbine. Son rôle est de dériver (by-passer) une partie des gaz d'échappement afin qu'ils ne passent pas par la turbine. En configuration d'origine, lorsque la pression

d'admission atteint la valeur cible, la *Wastegate* s'ouvre pour stabiliser la pression et éviter d'endommager le moteur ou le turbo.

Pour vérifier concrètement sur quelle plage de régime notre turbo peut tourner sans danger, nous avons extrait de Lotus Engineering la courbe de vitesse de rotation du turbocompresseur issue du modèle essence d'origine. Cette courbe de référence est cruciale, car elle nous donne une information fondamentale : le régime maximal de rotation (en tr/min) que les paliers et les roues du turbo peuvent encaisser en conditions réelles.

C'est sur cette base de comparaison, et en fixant notre simulation sur un mélange à $\lambda = 1,3$ (le meilleur compromis identifié lors de l'étape précédente), que nous avons pu évaluer le comportement du système.

6.3 Analyse des courbes

Sur les simulations que nous devons réaliser, nous devons regarder, analyser et extraire trois courbes :

- La courbe de puissance sortie par le moteur,
- La courbe de pression de suralimentation,
- La courbe de vitesse de rotation du turbocompresseur.

En effet, nous devons vérifier que la pression de turbo ne dépasse pas de manière significative celle du modèle essence, mais aussi que la vitesse de rotation du turbo ne la dépasse pas non plus. Enfin, nous devons vérifier que la puissance sortie par le moteur après ajustement de la *wastegate* est conforme à notre cahier des charges, c'est-à-dire qu'elle permet de limiter les pertes.

Après la réalisation de dizaines de simulations et un ajustement par tâtonnement, nous avons obtenu les courbes suivantes :

6.3.1 Courbe de pression de suralimentation

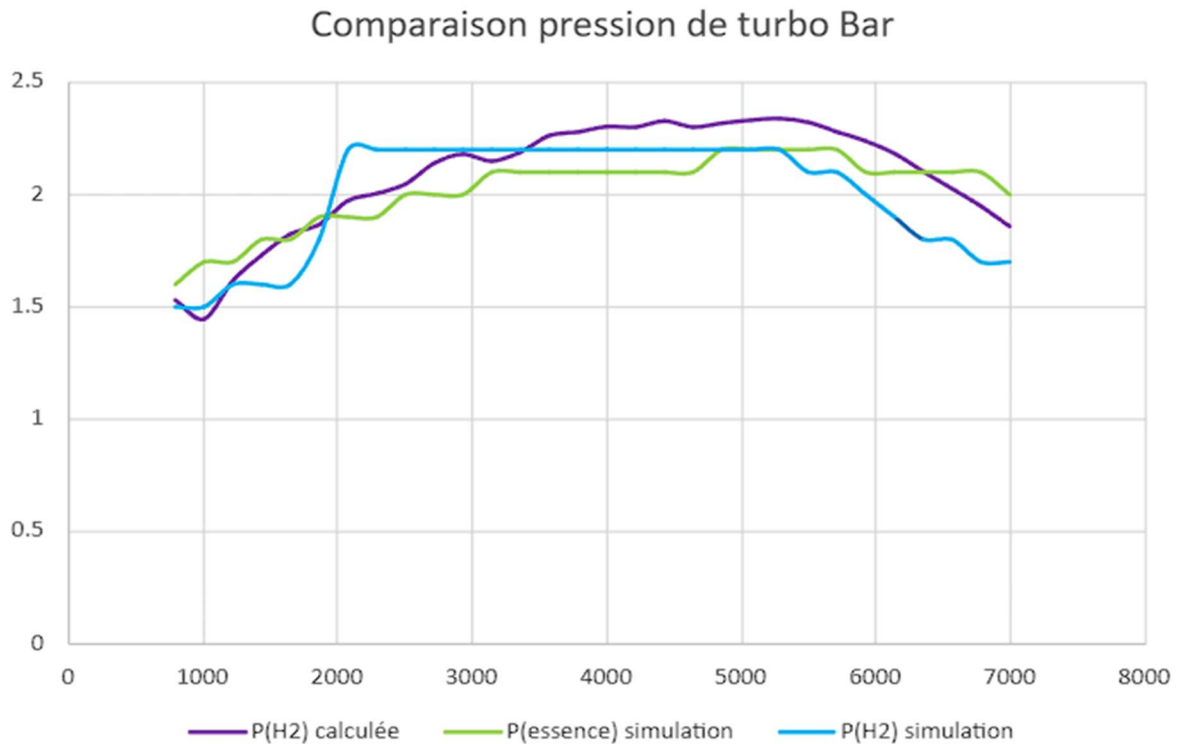


Figure 8 - Comparaison des pressions absolues de turbocompresseur ($\lambda=1.3$)

Sur le graphique ci-dessus, nous pouvons observer trois courbes distinctes :

- Tout d'abord, celle sortie via la simulation du modèle essence en vert,
- En violet, celle obtenue avec un lambda de 1,3 lors de nos simulations via la méthode calculatoire dans la première partie,
- En bleu, celle obtenue après tâtonnement et optimisation de la *wastegate*.

Nous remarquons dans un premier temps que la pression de suralimentation ne dépasse pas les 2,3 bar après l'optimisation. Cela est bon signe car nous restons en dessous de la pression maximale pouvant être supportée par le turbo d'origine.

Nous remarquons de plus sur la courbe bleu les moments où nous faisons varier l'ouverture de la *wastegate*. Ces zones sont observables avec les paliers de la courbe. Ce palier, nous l'observons à partir de 2 200 tr/min jusqu'à 5 200 tr/min : ici, nous ajustons l'ouverture de la *wastegate* pour maintenir la pression du turbo constante.

Cette analyse nous permet donc de valider les conditions de pression de suralimentation.

6.3.2 Courbes de vitesse de rotation du turbocompresseur

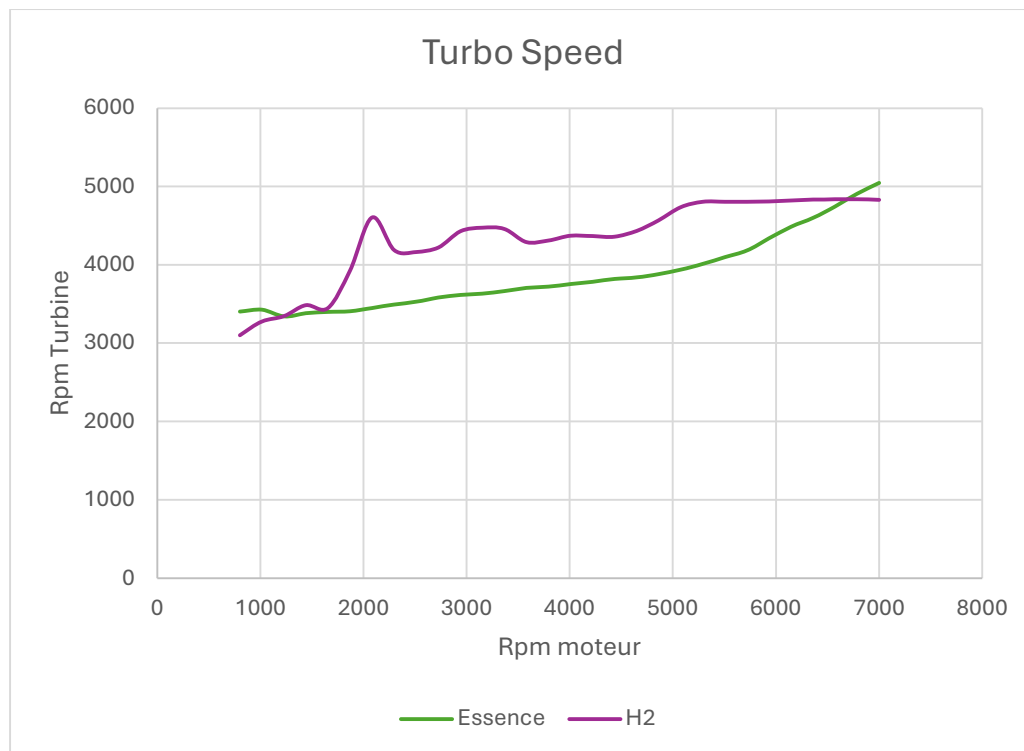


Figure 9 - Vitesse de rotation de la turbine en fonction du régime

Sur le graphique ci-dessus, nous pouvons observer dans un premier temps en vert la courbe sortie via la simulation du modèle essence. Nous remarquons que la vitesse de rotation augmente progressivement pour atteindre un maximum de 5 000 tr/min atteint pour un régime moteur de 7 000 tr/min.

La courbe violette issue de la simulation du modèle H2 suite à l'optimisation de la *wastegate* ne dépasse en aucun point les 5 000 tr/min. Alors oui, de 1 500 à 6 500 tr/min, elle est supérieure en vitesse à celle de l'essence, mais cela n'est pas un problème car elle ne dépasse pas la valeur maximale de rotation de l'essence. Le matériel de série est dimensionné pour atteindre ces valeurs de rotation. Le critère de vitesse de rotation est donc respecté ici, et le système peut fonctionner de manière fiable.

6.3.3 Courbes de puissance moteur



Figure 10 - Comparaison des courbes de puissance Essence et H2

Maintenant que nous savons nos deux critères de viabilité respectés, qu'en est-il de la performance que notre moteur peut sortir dans ces conditions ? Car, en effet, si les performances ne sont pas satisfaisantes, un changement de turbo sera nécessaire pour satisfaire toutes nos conditions de performance.

Les résultats sont très encourageants. Nous obtenons une courbe de puissance suivant de manière similaire la courbe essence jusqu'à 5 000 tr/min. Puis, les courbes se différencient avec un pic à 183 kW en H2, contre 210 kW en version essence (à 6 400 tr/min). Cela représente une perte de puissance de l'ordre de 15 %. Au vu des ambitions du projet HYCE et du choix d'un fonctionnement en mélange $\lambda = 1,3$, ce résultat est largement satisfaisant.

6.3.4 Observation et conclusion

La conversion à l'hydrogène nécessite, comme attendu, une sollicitation accrue du système de suralimentation. Cependant, nos travaux montrent qu'il est possible d'atteindre des performances très proches de l'origine (85 % de la puissance conservée) en optimisant simplement la gestion de la Wastegate.

Le turbocompresseur d'origine s'avère donc capacitaire et suffisant pour assurer les performances cibles sans compromettre sa fiabilité. Par conséquent, l'installation d'un turbo plus imposant ou d'une assistance électrique (E-Turbo) n'est pas nécessaire, permettant ainsi de limiter les coûts et la complexité technique du retrofit.

7 Conclusion

Au terme de cette année de projet, nos travaux de recherche et d'ingénierie nous ont permis d'établir une feuille de route précise pour la conversion à l'hydrogène du moteur Renault MR18. Ce passage de l'essence à l'hydrogène a nécessité une redéfinition complète de plusieurs systèmes critiques du moteur. Nous avons notamment identifié et listé les modifications indispensables suivantes :

- Système d'injection : Adaptation pour l'injection directe d'hydrogène gazeux.
- Système d'allumage : Optimisation des bougies pour répondre aux propriétés de combustion de l'H₂.
- Gestion thermique : Révision du refroidissement pour prévenir les points chauds.
- Renforcement mécanique : Adaptation des sièges de soupapes et segmentation.

Parmi ces points, le système de suralimentation est apparu comme la difficulté majeure de ce retrofit. En raison de la faible densité volumique de l'hydrogène et du fonctionnement en mélange pauvre, le turbo doit fournir un effort de compression bien supérieur à l'origine tout en recevant moins d'énergie à l'échappement. C'est pourquoi nous avons consacré la seconde moitié de l'année à une étude approfondie de ce composant afin de déterminer s'il restait capacitaire.

Les résultats de nos simulations 0-1D sur Lotus Engineering sont concluants : en optimisant la gestion de la *wastegate*, nous parvenons à maintenir des performances proches de l'origine (environ 85 % de la puissance nominale) sans dépasser les limites de fiabilité du matériel. Nous pouvons donc affirmer qu'un changement de turbocompresseur n'est pas nécessaire, le modèle d'origine étant apte à supporter les contraintes de cette nouvelle combustion.

Cette étude théorique et numérique pose des bases solides pour la suite du projet HYCE. L'année prochaine marquera une étape décisive : le passage de la simulation à la réalité. Les modifications identifiées seront appliquées physiquement sur le moteur réel avant son passage au banc d'essai. Cette phase de tests sera cruciale pour vérifier la corrélation entre nos modèles numériques et la réalité physique, car si la simulation est un outil de prédiction puissant, seule la confrontation au banc permettra de valider définitivement la viabilité et les performances de notre moteur hydrogène.

Ce projet de prédimensionnement pour le retrofit hydrogène du moteur HYCE constitue une étude allant de la gestion des risques spécifiques à la validation technique par simulation. La première phase du projet a permis d'établir un cadre sécuritaire et

organisationnel rigoureux, indispensable lors de la manipulation d'un carburant aussi complexe que l'hydrogène. L'analyse des risques (inflammabilité, diffusion, fragilisation des matériaux) a conduit à l'élaboration d'un dossier technique et au choix d'une architecture moteur adaptée.

L'étude de simulation en 0-1D a ensuite permis de lever les verrous techniques liés à la faible densité volumique de l'hydrogène. La démarche adoptée, s'appuyant sur l'extraction de données via Lotus Engineering et une modélisation thermodynamique précise, a démontré la viabilité du passage à l'hydrogène. Le choix d'un mélange pauvre $\lambda = 1,3$ s'est imposé comme le compromis optimal : il permet de conserver 85 % de la puissance nominale tout en maintenant une pression de suralimentation inférieure à 2,7 bar, assurant la compatibilité avec le turbocompresseur de série. En intégrant également des solutions innovantes comme l'injection d'eau pour contrer le cliquetis, ce rapport propose une solution de retrofit cohérente, performante et économiquement viable. Ce travail fournit désormais une base de données précieuse pour la future mise au point sur banc moteur, marquant une étape clé dans l'avancée du projet HYCE.

Table des figures

Figure 1 - Diagramme de Gantt du projet.....	7
Figure 2 - Planning évolutif du projet.....	8
Figure 3 - Architecture moteur Lotus Engineering	13
Figure 4 - Courbe de puissance du moteur essence, obtenue par simulation.....	14
Figure 5 - Conditions initiales de nos calculs	15
Figure 6 - Valeurs finales implémentées dans Excel	17
Figure 7 - Comparaison des pressions absolues de turbocompresseur Essence/H2.....	17
Figure 8 - Comparaison des pressions absolues de turbocompresseur ($\lambda=1.3$).....	23
Figure 9 - Vitesse de rotation de la turbine en fonction du régime.....	24
Figure 10 - Comparaison des courbes de puissance Essence et H2	25



HYCE

//////////
Merci pour votre attention