

PITA 2A



**Consommation moteur à
combustion interne à
hydrogène**



ABI KHALIL Paul
BRETECHE Quentin
NICOULEAU William
PUCHOT Axel

Table des matières

1	<i>Introduction</i>	3
2	<i>Calendrier et organisation :</i>	4
3	<i>Sélection et présentation des moteurs</i>	4
3.1	Sélection des moteurs	4
3.2	Présentation des moteurs	5
4	<i>Calculs et analyse</i>	5
4.1	Présentation de la démarche calculatoire	5
4.1.1	Cycle thermodynamique	6
4.1.2	Réaction chimique.....	6
4.1.3	Calcul de puissance	7
4.1.4	Calcul consommation	8
4.1.5	Calcul des variables thermodynamiques	8
4.1.6	Rendement.....	9
4.2	Excel calculatoire	11
4.2.1	Simulation hydrogène	12
4.2.2	Simulation essence	12
4.3	Analyse des résultats	13
4.3.1	Température de flamme	13
4.3.2	Pression maximale	14
5	<i>Conclusion</i>	15
5.1	Rétrospective	15
5.2	Projection sur le futur	15
6	<i>Bibliographie</i>	17

1 Introduction

À l'horizon de la rentrée prochaine, le projet HYCE pourrait être 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 répondant concrètement à une problématique environnementale majeure :

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 rétrofit 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, et de viser le record du Nürburgring dans la catégorie "moteur hydrogène à combustion interne".

Ce PITA, intitulé "Consommation moteur à hydrogène", a pour but de travailler sur la partie rétrofit moteur du projet. En effet, une problématique importante se pose : tous les moteurs ne réagissent pas de la même manière à un rétrofit à l'hydrogène. Selon les moteurs, leur dimensionnement, leur constitution et leur cylindrée, un rétrofit peut s'avérer complexe voire impossible.

L'objectif de ce travail est donc d'identifier les caractéristiques indispensables qu'un moteur doit posséder pour envisager une conversion réussie.

Pour cela, il sera nécessaire de tester différents types de moteurs — en variant cylindrées, litrages, taux de compression — et d'analyser les facteurs limitants tels que la température de flamme, la pression maximale admissible ou encore la pression d'alimentation.

À terme, ce PITA doit nous permettre d'orienter notre choix vers un moteur optimisé pour la puissance et la fiabilité. Sur cette base, nous pourrons ensuite avancer dans notre communication avec les motoristes, leur présenter nos études et envisager une collaboration pour approfondir l'adaptation d'un moteur spécifique.

2 Calendrier et organisation :

Afin de vous présenter au mieux notre projet, il nous a semblé essentiel d'exposer notre organisation ainsi que le calendrier suivi tout au long de cette étude.

Tout a commencé le 6 mars, avec une première réunion de lancement qui nous a permis d'établir une stratégie claire pour respecter les différentes étapes du projet. La première phase consistait à collecter les données moteur nécessaires et à déterminer les formules de calcul adaptées. Pour gagner du temps, nous avons choisi de travailler sur ces deux aspects en parallèle : deux membres de l'équipe étaient en charge de la recherche des données moteur, tandis que les deux autres se consacraient à la définition des formules et à la création d'un premier tableau Excel. Une fois cette première partie achevée, nous avons pu approfondir notre approche thermodynamique.

La communication au sein du groupe a toujours été une priorité, car elle est essentielle à l'efficacité d'un projet collaboratif. Nous avons ainsi mis en place une réunion hebdomadaire chaque jeudi après-midi afin de faire le point sur les avancées et planifier les étapes suivantes. Des outils collaboratifs comme Slack et SharePoint (via Teams) nous ont permis de partager les ressources, de centraliser les informations, et de suivre en temps réel l'évolution du projet.

Enfin, le respect des échéances a été une valeur fondamentale tout au long de cette étude. L'objectif était de finaliser l'ensemble du PITA d'ici début mai, nous laissant ainsi un mois pour structurer et finaliser notre travail, comme le montre le calendrier ci-dessous.

3 Sélection et présentation des moteurs

Figure 1- Diagramme de Gantt

Taches /Semanles	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Recherches Moteurs										
Recherches formules										
Réalisation des Excels										
analyse thermodynamique approfondit										
anayse des incohérences de calcul										
Vérification de notre démarche par des experts										
Rédaction du rapport de stage										

3.1 Sélection des moteurs

La première étape de ce PITA a été de déterminer les moteurs sur lesquels nous allions travailler. Nous avons choisi trois moteurs en prenons en compte plusieurs critères :

- La compatibilité avec le projet : L'objectif de ce PITA n'était pas d'effectuer nos calculs sur des moteurs pris au hasard, mais plutôt de travailler sur des moteurs que nous serions susceptible de choisir pour notre projet.
- La performance : Notre projet ayant pour objectif d'effectuer un record, la performance du moteur est un facteur clé qui jouera un rôle majeur dans la réussite de celui-ci.
- Coût : Étant donné les coûts élevés des modifications nécessaires pour convertir un moteur à l'hydrogène, nous avons restreint notre sélection à des moteurs 4 cylindres.

- Choisir des moteurs aux caractéristiques différentes, afin de pouvoir déterminer lequel conviendrait le plus à notre projet.

3.2 Présentation des moteurs

Nous avons ainsi sélectionné 3 moteurs sur lesquels nous avons réalisé nos recherches et nos calculs :

1.2 L PURETECH : L'étude de ce moteur nous a été recommandée par une entreprise, en raison de sa grande popularité, de son prix très abordable et de la facilité d'accès à ses pièces détachées. Bien que ses performances soient légèrement en deçà de nos objectifs, nous avons souhaité l'analyser afin d'évaluer son potentiel dans un châssis très léger.

MR18 1.8L Renault : Nous avons retenu ce moteur car il est également assez répandu dans les véhicules de série et offre des performances correspondant à nos attentes. Il équipe notamment plusieurs versions de l'Alpine A110, y compris l'Alpine A110 Cup.

2.0L Ford : Ce moteur est un peu moins courant que les deux précédents, car il est principalement destiné à des modèles sportifs. Il présente cependant des performances très intéressantes. C'est également le moteur utilisé dans la Radical SR3, un modèle que nous envisageons pour notre projet.

Nous avons ensuite listé les caractéristiques techniques que nous avions besoin afin de réaliser nos recherches et nos calculs, telles que la cylindrée, le nombre de cylindre, ou le taux de compression. Nous avons également relevé les matériaux des moteurs qui ne nous ont pas servi sur pour nos calculs dans ce PITA, mais qui nous seront utiles dans le projet pour des raisons de fiabilité. Les données trouvées sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Moteur	Cylindrée	NB cylindre	Matériaux	Taux de compression
1.2 L pureTech	1199 cm ³	3	Bloc et pistons en aluminium, soupapes en acier au silicium chrome	10.5:1
2.0 L Ford	1 995 cm ³	4	Bloc en aluminium	9.3:1
1.8 L Renault	1798 cm ³	4	Aluminium pour le bloc moteur et la culasse	9,0 :1

4 Calculs et analyse

4.1 Présentation de la démarche calculatoire

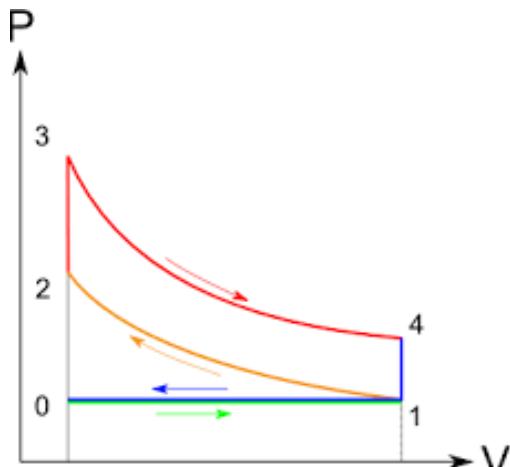
Afin d'estimer de manière réaliste la puissance maximale que notre moteur pourra délivrer une fois converti à l'hydrogène, nous avons mis en place une démarche de calcul reposant sur des bases thermodynamiques et des paramètres techniques précis variant d'un moteur à l'autre. Ces calculs doivent également nous permettre d'estimer la consommation de notre

moteur, une valeur qui sera très utile pour un autre PITA, consacré au dimensionnement des réservoirs d'hydrogène destinés à être intégrés dans le châssis.

4.1.1 Cycle thermodynamique

Pour réaliser ces calculs, nous nous sommes placés dans le cadre du cycle de Beau de Rochas (cycle d'Otto). Il s'agit du cycle thermodynamique modélisant le fonctionnement d'un moteur à combustion interne. Ce cycle, comme vous pouvez le voir, est constitué de deux transformations adiabatiques et de deux transformations isochores :

- La première adiabatique (1-2) représente la compression du mélange air/hydrogène.
- La deuxième adiabatique (3-4) correspond à la détente du piston après combustion.
- La première isochore (2-3) modélise la combustion du mélange. Elle est considérée tellement rapide que le volume est supposé constant entre le début et la fin de la combustion.
- La seconde isochore (4-1) représente le cycle d'échappement, lui aussi considéré comme infiniment court, ce qui permet de supposer que le volume reste constant durant cette phase.



C'est à partir de ce cycle théorique que nous pouvons calculer l'évolution des pressions et des températures tout au long de la réaction chimique. À noter également une partie isobare (0-1) sur les schémas, qui représente l'admission du mélange dans le cylindre. Cependant, cette phase n'intervient pas directement dans nos calculs puisque la seule information importante pour nous est de connaître la pression (P_1) et la température (T_1) au début du cycle.

Figure 2 - Cycle de Beau de Rochas

4.1.2 Réaction chimique

La réaction chimique que nous avons utilisée est la suivante :

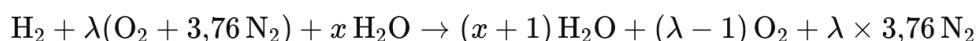


Figure 3 - Équation de réaction chimique

Cette réaction est la plus couramment utilisée pour modéliser chimiquement ce qu'il se passe dans un moteur à combustion hydrogène. Ici, nous ne faisons pas apparaître les différentes espèces de NOx (oxydes d'azote) que peut produire la combustion. Bien qu'ils soient dangereux pour la santé, leur impact est négligeable pour les calculs thermodynamiques liés à la combustion dans notre cylindre.

Concernant la variable lambda (λ), qui représente le rapport entre le rapport air/carburant réel et le rapport air/carburant stoechiométrique, nous avons fixé sa valeur à 2,5. Après de nombreuses recherches et discussions avec des spécialistes du milieu, il a été unanimement conseillé de se baser sur cette valeur dans un premier temps.

$$\lambda = \frac{\text{(rapport air/carburant réel)}}{\text{(rapport air/carburant stoechiométrique)}}$$

Un λ de 2,5 signifie que nous injectons 2,5 fois plus d'air que ce qui serait nécessaire pour brûler exactement la quantité d'hydrogène injectée dans notre cylindre en condition stoechiométrique. Ce facteur influence deux points très importants pour notre moteur : la puissance délivrée et la température de flamme.

En effet, plus le lambda est élevé, moins le moteur pourra développer de puissance, car le mélange sera plus pauvre en carburant (hydrogène). Pour comparaison, un moteur essence fonctionne généralement avec un lambda compris entre 0,8 et 1,1, afin d'optimiser la puissance. De plus, si nous abaissons la valeur de lambda, nous pourrions injecter davantage d'hydrogène dans notre cylindre, ce qui augmenterait théoriquement la puissance. Cependant, cela entraînerait aussi une élévation importante de la température de flamme, ce qui crée des risques thermiques.

Bien que cette température de flamme élevée ne soit pas directement un problème pour les matériaux moteurs modernes, elle favoriserait la formation de points chauds dans la chambre de combustion, ce qui peut provoquer de l'auto-allumage (plus communément appelé cliquetis). Le cliquetis est une combustion non contrôlée du mélange avant même l'arrivée de l'étincelle d'allumage, ce qui peut endommager gravement le moteur.

À noter que ce problème est beaucoup plus marqué avec l'hydrogène qu'avec l'essence, car l'hydrogène possède une plage d'inflammabilité beaucoup plus large.

Concernant l'eau présente dans notre cylindre, elle nous est utile pour abaisser la température du mélange et éviter le cliquetis au sein du moteur. Pour nos calculs, nous avons fixé cette valeur à 20 % d'eau par rapport à la quantité d'hydrogène injectée lors d'une utilisation maximale. En pratique, cela signifie que si nous injectons 1 mole d' H_2 , nous devrons ajouter 0,2 mole d'eau dans notre mélange.

4.1.3 Calcul de puissance

Une fois le cycle thermodynamique établi et la réaction de combustion étudiée, nous nous sommes penchés sur la partie calculatoire, en étudiant les différentes formules existantes permettant de calculer notamment la puissance mécanique délivrée par un moteur et sa consommation.

Concernant le calcul de la puissance, nous avons fait le choix de la déterminer à partir de la quantité d'hydrogène brûlée et de son pouvoir calorifique.

$$P_{\text{mécanique}} = \dot{m}_{H_2} \times PCI_{H_2} \times \eta$$

Avec :

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

En effet, ces deux données sont fiables, facilement accessibles, et permettent d'obtenir une estimation réaliste. Dans cette formule intervient également la notion de rendement moteur, dont la détermination est détaillée plus loin dans ce document.

4.1.4 Calcul consommation

Pour le calcul de la consommation, notre objectif était d'obtenir des données en kilogrammes par heure (kg/h) afin de pouvoir dimensionner nos futurs réservoirs d'hydrogène. Nous sommes donc partis d'une formule simple nécessitant uniquement de connaître le nombre de moles d'hydrogène injectées par cycle, ainsi que la durée d'un cycle moteur.

$$\dot{m}_{\text{H}_2} = \frac{n_{\text{H}_2} \times M_{\text{H}_2} \times N_{\text{rpm}}}{2 \times 60}$$

Avec :

- \dot{m}_{H_2} : consommation d'hydrogène (en kg/h)
- n_{H_2} : quantité de H_2 injectée par cycle par cylindre (en mol/cycle)
- M_{H_2} : masse molaire de l'hydrogène (en kg/mol)
- N_{rpm} : régime moteur (en tr/min)

Bien entendu, la durée d'un cycle dépend du régime moteur (en tr/min - rpm). Pour rester cohérents avec l'utilisation prévue sur le Nürburgring, où le moteur sera fréquemment sollicité à haut régime, nous avons choisi de baser nos calculs sur le régime moteur correspondant à la puissance maximale délivrée. Ce choix permet d'obtenir des valeurs de consommation et de puissance représentatives de l'utilisation réelle en conditions de piste.

4.1.5 Calcul des variables thermodynamiques

Comme dit précédemment, la température de flamme et la pression maximale atteinte dans notre cylindre sont des facteurs limitants pour la réalisation de notre rétrofit, il convient donc d'être en capacité de les calculer théoriquement. Pour cela, nous avons besoin d'avoir accès à notre pression (P_2) et température (T_2) avant la combustion du mélange. Pour ce faire, nous avons utilisé les lois de Laplace, car la compression est adiabatique.

$$P_2 = P_1 \times r^\gamma$$

- P_1 : Pression initiale avant compression (souvent la pression atmosphérique).
- r : Rapport de compression (ratio de volume entre PMB et PMH).
- γ : Indice adiabatique ou coefficient adiabatique, qui dépend du gaz (pour l'air et l'hydrogène, $\gamma \approx 1.4$).

$$T_2 = T_1 \times r^{(\gamma-1)}$$

- T_1 : Température initiale avant compression (température de l'air ou du mélange avant qu'il ne soit comprimé).

Pour calculer P_2 et T_2 , une nouvelle donnée entre en jeu : le rapport de compression (r). Il s'agit du rapport entre le volume occupé par le mélange quand le piston est au point mort bas (PMB) et le volume occupé quand le piston est au point mort haut (PMH). Ce rapport varie selon les moteurs, mais dans le cas d'un moteur à essence, il est souvent compris entre 8 et 10. Pour les moteurs à diesel, par exemple, ce rapport est plus élevé, car le but est de

compresser plus fort le mélange afin qu'il s'enflamme tout seul, sans l'aide d'une bougie d'allumage.

Voici quelques exemples de taux de compression de moteurs connus :

- **Moteur 1,2L PureTech (Peugeot)** : 10,5
- **Moteur 1,8L Renault (Alpine A110)** : 9
- **Moteur 2,0L Ford (Mitjet)** : 9,3

La température de flamme (T_3) peut être calculée en fonction de l'énergie libérée par la réaction chimique (Q) et de la capacité calorifique (C_v) en utilisant une approche thermodynamique, en supposant que le mélange d'air et d'hydrogène est idéalement un gaz parfait.

La relation est la suivante :

$$T_f = T_i + \frac{Q}{\sum n_i C_{v,i}}$$

où :

- T_i = température initiale du mélange (avant combustion),
- Q = énergie libérée par la réaction chimique (en J),
- n_i = nombre de moles du gaz i après la combustion,
- $C_{v,i}$ = capacité calorifique molaire à volume constant du gaz i .

En appliquant cette formule, nous pouvons estimer T_3 (température de flamme) en fonction de la quantité d'énergie libérée par la combustion et des propriétés thermiques du gaz résultant (ici, un mélange air/hydrogène).

Pour calculer la pression maximale P_3 dans le cylindre, nous utilisons la loi des gaz parfaits. Cette pression survient après la combustion, lorsque le volume reste presque constant (isochore) pendant une fraction de la détente.

La loi des gaz parfaits pour un gaz idéal est :

$$P_3 = \frac{nRT_3}{V}$$

- n : Nombre de moles de gaz dans le cylindre (dérivé de la quantité d'hydrogène injectée par cycle).
- R : Constante des gaz parfaits.
- T_3 : Température de flamme calculée dans la section précédente.
- V : Volume de la chambre de combustion au PMH (point mort haut).

4.1.6 Rendement

Le rendement est un facteur clé qui influe directement sur la puissance que notre moteur peut délivrer. Dans un cycle thermodynamique de type Otto, le rendement théorique η peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

Où :

- r est le rapport de compression.
- γ est l'exposant adiabatique, qui est le rapport des capacités calorifiques à pression constante (C_p) et à volume constant (C_v) : $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$.

Cependant, cette formule de rendement est une estimation théorique basée sur un cycle idéal et ne prend pas en compte les nombreuses pertes inhérentes à un moteur réel. Parmi celles-ci, on compte :

- Les pertes mécaniques par frottement entre les pièces mobiles du moteur (pistons, segments, vilebrequin, etc.).
- Les pertes thermiques liées à la dissipation de chaleur dans les gaz d'échappement, les parois du moteur, et d'autres composants internes.

Il est important de noter que, bien que la formule de rendement de l'Otto soit utile pour une estimation théorique, elle ne représente pas exactement le rendement réel d'un moteur. En effet, nous ne sommes pas en mesure de prévoir ou d'approximer précisément ces pertes mécaniques et thermiques pour chaque moteur. Ces données sont généralement obtenues par les constructeurs via des simulations numériques approfondies et des tests sur banc.

Dans le cadre de notre projet de rétrofit à l'hydrogène, nous avons donc choisi de fixer un rendement nominal pour chaque moteur, variant entre 0,3 et 0,4. Ce choix repose principalement sur des valeurs de rendement observées lors de l'utilisation des moteurs à essence. Les pertes thermiques et mécaniques ne devraient pas varier de manière significative lors du rétrofit, car bien que l'hydrogène ait une température de flamme inférieure à celle de l'essence, la nature des pertes internes ne changera pas de manière substantielle (nous négligeons dans un premier temps l'impact de la température de flamme sur les pertes thermiques, qui est effectivement un paramètre important mais difficile à quantifier sans simulation avancée).

Que ce soit pour la puissance ou la consommation d'hydrogène, il est essentiel d'avoir accès à la quantité exacte d'hydrogène que nous pouvons injecter dans notre cylindre. Cette donnée est cruciale et dépend directement du débit maximal des injecteurs et de la pression fournie par le turbo. Ces deux éléments limitent la quantité d'hydrogène que nous pouvons introduire dans le moteur à un moment donné. Pour mieux comprendre ces relations et optimiser l'injection, nous avons mené une série de simulations.

L'objectif de ces simulations est de déterminer quels facteurs seront limitants ou non dans le processus d'injection, et d'accéder ainsi aux données souhaitées. Concrètement, nous avons cinq variables principales sur lesquelles nous pouvons agir directement :

1. **Le rendement** : Il affecte la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique et influe sur la puissance et la consommation d'hydrogène.
2. **Le débit des injecteurs** : Nous avons choisi d'utiliser deux injecteurs par cylindre. Le débit d'hydrogène injecté par ces injecteurs peut être un facteur limitant important.

3. **La pression du turbo** : Plus la pression est élevée, plus le débit d'air et d'hydrogène dans les cylindres sera important. Cela affecte directement la quantité d'hydrogène que l'on peut injecter.
4. **Le pourcentage d'eau dans le mélange** : L'injection d'eau dans le mélange aide à contrôler la température de flamme et à éviter les risques de cliquetis. Cependant, un excès d'eau pourrait réduire la quantité d'hydrogène injectée.
5. **Le régime moteur** : Le régime moteur (en tours par minute - RPM) détermine la durée des cycles de combustion, ce qui influence également la quantité d'hydrogène injectée par minute.

Les autres paramètres sont plus difficiles à modifier et leur impact est moindre comparé aux cinq variables citées ci-dessus. Par conséquent, nous avons décidé de concentrer nos efforts sur ces cinq paramètres, en les faisant varier dans le cadre de simulations pour obtenir des résultats fiables et exploitables.

4.2 Excel calculatoire

Afin de réaliser ces simulations de manière efficace et rapide, nous avons créé un fichier Excel fonctionnel. Ce fichier nous permet de faire varier les cinq variables de notre choix et de simuler une multitude de scénarios. Il offre une flexibilité totale pour adapter les paramètres aux spécifications du moteur que nous étudions. Cela nous permet d'explorer différents réglages et de trouver la combinaison optimale entre les différents facteurs, afin de maximiser les performances du moteur tout en maintenant une consommation d'hydrogène optimale.

Elements chimiques	n(mol)	nf(mol)	V (m3)	Cpm (J/k*mol)	Cvm (J/k*mol)	Δrf (J/mol)
Hydrogène (H2)	0,006566515	0	6,96505E-05	28,8	20,5	0
Eau (H2O)	0,001313303	0,0078798	1,39301E-05	33,6	28,8	-241800
Oxygène (O2)	0,008208144	0,0049249	8,70631E-05	29,4	21,1	0
Azote (N2)	0,030862623	0,0308626	0,000327357	29,1	20,8	0

Résultats		Données		Variables	
%remplissage	99,60016218	γ	1,4	%eau	20
T3 (k)	2377,829616	λ	2,5	N(tr/min)	6300
P3 (Pa)	16402157,27	Nc	4	Pression turbo (Pa)	250000
Pem (Pa)	1454160,787	Cylindré (L)	2	Débit injecteur (g/s)	1,39
Conso (kg/h)	10,008	r	9,5	η	0,4
Puissance (ch)	181,4276003	ArU (J)	-1567,405092		
Couple (N.m)	202,3657871	Arh * avancement (J)	-1587,783447		
P1 (Pa)	237500	T souape (s)	0,004761905		
T1(K)	303	PCI (J/kg)	120000000		
n1(mol)	0,046950586	Q (J)	-1587,783447		
P2 (Pa)	5552347,784				
T2 (k)	745,6449324				
n (mol/s)	1,378968254				
netto	0,593640368				

Figure 4 - Excel des calculs pour l'injection indirecte

Dans le fichier Excel que nous avons créé, vous trouverez toutes les données essentielles que nous manipulons. Ces données sont organisées de manière à ce que nous puissions facilement ajuster les variables pour optimiser notre simulation. Ces variables sont clairement indiquées dans le tableau bleu ciel.

Les résultats qui nous importent le plus, à savoir les éléments essentiels pour évaluer la faisabilité de chaque configuration, se trouvent dans le tableau orange. Ce tableau nous permet d'obtenir un aperçu rapide et précis de l'impact des différents réglages sur la performance du moteur et sur la consommation d'hydrogène. En fonction des valeurs obtenues dans ce tableau, nous pouvons immédiatement déterminer si la configuration

simulée est réaliste et pratique, ou si des ajustements sont nécessaires pour atteindre nos objectifs.

4.2.1 Simulation hydrogène

Lors de nos simulations, nous avons rapidement constaté que la puissance obtenue était bien inférieure à celle attendue. Peu importe les variables que nous ajustions, les pertes de puissance étaient systématiquement trop élevées. Cette constatation a conduit à une réflexion plus approfondie et à une consultation avec des experts du domaine, qui nous ont indiqué que, dans le cadre de la conversion à l'hydrogène, une perte de puissance de l'ordre de 10% par rapport à un moteur fonctionnant à l'essence était raisonnablement attendue.

Les pertes de puissance de l'ordre de 10 % annoncées par les experts sont obtenues dans des conditions optimales, avec des moyens techniques avancés et un travail de calibration très poussé. En effet, ils parviennent à faire fonctionner les moteurs avec un lambda proche de 1,4, à minimiser l'injection d'eau dans le mélange, et à optimiser finement les paramètres d'injection, de distribution et de combustion. Ces conditions sont très éloignées de notre cadre étudiant et des moyens dont nous disposons.

Dans notre configuration, en conservant un lambda à 2,5 et un taux d'eau de 20 % pour garantir la fiabilité du moteur et limiter les risques de cliquetis, une perte de puissance bien plus importante est attendue. Nos simulations confirment une perte d'environ 40 %, ce qui reste raisonnable et cohérent avec notre approche conservatrice visant à protéger le moteur tout en assurant un fonctionnement stable.

Après avoir réalisé nos calculs, nous nous sommes retrouvés avec des pertes de puissance de 35% dans le cas d'une injection directe et de près de 45% en indirecte, ce qui relativement cohérent avec ce que nous avions envisagé.

Résultats		Résultats	
%remplissage	100	%remplissage	99,52054574
T3 (k)	2361,87676	T3 (k)	2361,87676
P3 (Pa)	18506757,2	P3 (Pa)	15422297,65
Pem (Pa)	1685052,17	Pem (Pa)	1410975,124
Conso (kg/h)	10,6	Conso (kg/m)	9
Puissance (ch)	195,78518	Puissance (ch)	163,1543168
Couple (N.m)	218,380346	Couple (N.m)	161,9836215

Figure 5 - Comparaison de nos puissances en direct (à gauche) et en indirect (à droite)

Pour mieux être certains de la véracité de notre raisonnement, nous avons décidé de réaliser la même démarche de calcul, mais cette fois en utilisant de l'essence comme carburant de référence. L'objectif était de vérifier si nous obtenions bien la puissance initiale du moteur, sans la perte attendue, afin d'évaluer la fiabilité de nos modèles.

4.2.2 Simulation essence

Le tableau Excel ci-dessous regroupe toutes nos données pour le calcul avec de l'essence. Ce fichier nous permet de comparer les résultats obtenus avec l'hydrogène et ceux de l'essence, et de mettre en évidence les sources d'erreur dans notre simulation.

Elements chimiques	n1(mol)	nf(mol)	V (m3)	Cpm (J/k*mol)	Cvm (J/k*mol)	Δf (J/mol)
Octane (C8H18)	0,0007	0	7,42484E-06	28,8	20,5	-5470000
Eau (H2O)	0	0,0063	0	33,6	28,8	-241800
Oxygène (O2)	0,00875	0	9,28105E-05	29,4	21,1	0
Azote (N2)	0,0329	0,0329	0,000348967	29,1	20,8	0
CO2	0	0,0056			28,5	-393500
<hr/>						
Résultats	Données			Variables		
%remplissage	99,822843	Y	1,4	%eau	0	
T3 (k)	4463,9903	X	1	N(tr/min)	6300	
P3 (Pa)	29097074	Nc	4	Pression turbo (Pa)	250000	
Pem (Pa)	0	Cylindré (L)	1,8	Débit injecteur (g/s)	0,9	
Conso (kg/h)	1,0668672	r	9	η	0,3	
Puissance (ch)	303,48954					
Couple (N.m)	338,51465					
P1 (Pa)	237500	T soufflage (s)	0,004761905			
T1(K)	303	PC1 (J/kg)	44400000			
n1(mol)	0,04235	Q(J)	-3829			
P2 (Pa)	5147580,3					
T2 (k)	729,69208					
n (mol/s)	0,147					
netto	0,5847564					

Figure 6- Excel de nos calculs avec l'essence

Pour la comparaison entre les résultats obtenus avec l'essence et l'hydrogène, les calculs ont été réalisés sur un moteur Renault 1,8L, 4 cylindres, notamment utilisé dans les Alpine A110. Ce moteur a été choisi car il fait partie des moteurs faciles à rétrofiter, ce qui le rend particulièrement pertinent pour notre projet.

Le moteur Renault 1,8L délivre une puissance initiale de 300 chevaux lorsqu'il fonctionne avec de l'essence, une valeur que nous avons retrouvée sans difficulté lors de nos calculs sur le fichier Excel dédié à l'essence.

4.3 Analyse des résultats

4.3.1 Température de flamme

En étudiant nos résultats, nous nous sommes rendu compte qu'indépendamment du carburant utilisé ou du mode d'injection adopté, la température de flamme calculée restait bien trop élevée. Par exemple, dans le cas d'un moteur essence, la température de flamme attendue est généralement de l'ordre de 2500 K. Or, nos calculs ont conduit à une température d'environ 4500 K, soit quasiment le double.

Après plusieurs recherches et analyses, nous avons identifié l'origine de cette incohérence : les pertes thermiques ne sont pas prises en compte dans notre calcul basé sur la loi de Kirchhoff. Cette loi, bien qu'efficace pour estimer l'évolution de l'énergie interne dans une réaction chimique, suppose un système fermé sans pertes, ce qui n'est pas représentatif du comportement réel d'un moteur thermique. Dans un moteur en fonctionnement, une partie importante de l'énergie produite est dissipée sous forme de chaleur par les parois du cylindre, le système de refroidissement ou encore les gaz d'échappement.

Ces pertes thermiques sont malheureusement très difficiles à quantifier sans disposer de simulations numériques avancées ou d'essais réels sur banc moteur. Ce manque de données constitue un véritable facteur limitant dans notre étude, car la température de flamme est une grandeur clé à surveiller dans le cadre d'un rétrofit à l'hydrogène. En effet, si cette température dépasse 1600 K, nous risquons d'atteindre des zones critiques pouvant entraîner de l'auto-allumage (cliquetis), notamment à cause de la grande plage de détonation de l'hydrogène.

4.3.2 Pression maximale

La pression P3 est par conséquent elle aussi surestimée, car elle est calculée à partir de la température de flamme théorique et non réelle. Étant donné que la température T3 sert directement de base pour le calcul de P3 via l'équation des gaz parfaits, une température exagérée induit mécaniquement une pression trop élevée. Cette pression maximale atteinte dans le cylindre est un paramètre critique pour le dimensionnement mécanique du moteur.

Dans notre cas, les pressions obtenues par calcul dépassent largement celles que les composants d'un moteur essence standard peuvent encaisser. Cela pose un problème majeur car, au-delà d'un certain seuil, il est impératif de remplacer ou renforcer plusieurs pièces internes du moteur, telles que les pistons, les bielles ou encore les segments. Ces modifications impliquent un coût important et complexifient largement le processus de rétrofit.

À notre niveau, et sans données expérimentales précises ou outils de simulation avancés, nous ne sommes pas en mesure d'émettre des hypothèses réalistes sur le comportement mécanique du moteur soumis à ces pressions exagérées. Cela constitue un frein supplémentaire dans l'interprétation de nos résultats et dans l'évaluation de la faisabilité du rétrofit hydrogène dans les conditions réelles d'utilisation.

Résultats		Résultats	
%remplissage	100	%remplissage	99,52054574
T3 (k)	2061,87676	T3 (k)	2361,876764
P3 (Pa)	18506757,7	P3 (Pa)	15422297,65
Pem (Pa)	1685052,17	Pem (Pa)	1410975,124
Conso (kg/h)	10,8	Conso (kg/h)	9
Puissance (ch)	195,78518	Puissance (ch)	163,1543168
Couple (N.m)	218,380346	Couple (N.m)	181,9836215

Figure 7- comparaison de nos pressions

5 Conclusion

5.1 Rétrospective

Malgré les limites de nos modèles et les aléas rencontrés, nos calculs nous ont permis d'identifier plusieurs facteurs limitants qui auront un impact direct sur notre rétrofit.

Le premier facteur est la pression du turbo, qui constitue une contrainte importante : en effet, nous ne pouvons pas exploiter pleinement le débit maximal de nos injecteurs, car la quantité de mélange admis dans le cylindre reste insuffisante, que ce soit en injection directe ou indirecte. Cela limite donc le remplissage et par conséquent, la puissance potentielle du moteur.

Le deuxième facteur limitant est constitué par la température (T3) et la pression (P3) en fin de compression, qui sont étroitement liées. Même si nous ne pouvons pas les déterminer de manière exacte à ce stade, l'étude comparative entre les résultats théoriques et les mesures réelles sur d'autres moteurs similaires montre que ces grandeurs atteignent des valeurs élevées, susceptibles d'impacter la stabilité de la combustion, la tenue des matériaux, et l'efficacité globale du système.

À l'aide de nos différentes simulations, réalisées sur plusieurs types de moteurs, nous avons pu établir un ensemble de caractéristiques que le moteur choisi devra impérativement respecter.

Tout d'abord, une grande cylindrée, supérieure à 1,8 L, est nécessaire. En dessous de ce seuil, la puissance délivrée serait insuffisante pour permettre à notre véhicule d'être légitime dans la tentative de record visée. Une cylindrée plus importante permettra également de compenser partiellement les limitations d'injection et de remplissage évoquées précédemment.

Ensuite, les matériaux constituant le moteur devront présenter une résistance élevée aux hautes températures générées par la combustion de l'hydrogène, en particulier dans la chambre de combustion et autour de la soupape d'échappement. Cela implique l'usage d'alliages spécifiques ou de traitements thermiques adaptés.

Enfin, les composants mécaniques devront être capables de supporter des pressions nettement supérieures à celles rencontrées dans les moteurs thermiques classiques. Le bloc moteur, les pistons, les bielles et la culasse devront ainsi être renforcés ou repensés, pour résister aux pressions de crête plus élevées et à la vitesse de montée en pression propre à l'hydrogène.

5.2 Projection sur le futur

Pour conclure, ce PITA nous a permis de mieux cerner le type de moteur que nous devons viser ainsi que les caractéristiques techniques qu'il doit impérativement intégrer. Il nous a également permis de prendre conscience des limites des calculs théoriques que nous sommes actuellement en mesure de réaliser, tout en soulignant les progrès envisageables, notamment grâce à la création d'un outil de simulation capable de modéliser le comportement d'un moteur fonctionnant à l'hydrogène. Ce simulateur nous permettra, à terme, d'obtenir des estimations plus précises et plus fiables.

Ce travail a aussi été l'occasion de consolider notre argumentaire technique, en vue de contacter des experts du domaine. En effet, nous sommes pleinement conscients que la réussite de ce projet de rétrofit ne pourra se faire sans leur collaboration, qu'elle soit technique, matérielle ou stratégique.

La prochaine étape pour nous est donc de définir la suite de notre PITA pour l'année prochaine et de prendre contact avec des motoristes en vue d'établir de potentiels partenariats, qui nous permettront de faire avancer concrètement ce projet ambitieux.

6 Bibliographie

Les alpinistes, article : <https://lesalpinistes.com/quel-est-le-moteur-qui-equipe-la-pine-a-110/>

Pipo moteurs, infos techniques : <https://pipo-moteurs.fr/moteur-a-combustion-interne-a-hydrogene/>

Moteur Peugeot 2.0L DW10 caractéristiques :

<http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXB117/Peugeot-MoteurDw10%282%2C0LHdi%29.pdf>

Cycle de Beau de Rochas : <http://barreau.matthieu.free.fr/cours/thermo/thermo6.pdf>

Fonctionnement moteur à combustion interne : <https://fsa.univ-tiaret.dz/doc/COURS/moteur.pdf>

Fonctionnement MCI : <https://www.univ-oeb.dz/fssa/wp-content/uploads/2020/03/Cours-et-Exercices-d'Applications-Corrigés.pdf>

Power point infos comportement moteur : https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/barkat-belkacem/files/0005-presentation_mci_source_pierre_duysinx.pdf

Analyse des courbes de puissances : <https://blogautomobile.fr/puissance-couple-courbes-137910>

Formules thermodynamiques :

<https://repository.enp.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/1476/1/MALEK.Mohamed%20Raouf.pdf>

Comportement thermodynamique des machines : <https://fsa.univ-tiaret.dz/doc/COURS/machines.pdf>

Comportement moteur : https://elearning.centre-univ-mila.dz/a2024/pluginfile.php/70368/mod_resource/content/0/0.%20Chapitre%20II.%20La%20thermodynamique%20des%20cycles%20moteurs.pdf

...



HYCE