



HYCE

Rapport

Développement d'un outil de simulation et d'un moteur
hydrogène à combustion interne

Axel Calus – Adrien Deglorie – Lucien Tanasoiu

1. Introduction et contexte du projet

Le projet HYCE s'inscrit dans une démarche globale de décarbonation du secteur automobile, en mettant en avant, à travers le sport automobile, une technologie alternative aux chaînes de traction 100% électriques : le moteur à combustion interne alimenté à l'hydrogène. Ce type de motorisation repose sur une architecture proche de celle d'un moteur à combustion interne conventionnel fonctionnant à l'essence, ce qui permet d'envisager la réutilisation de bases mécaniques existantes. Cette approche offre ainsi la possibilité de convertir des véhicules thermiques vers une solution à plus faible impact environnemental.

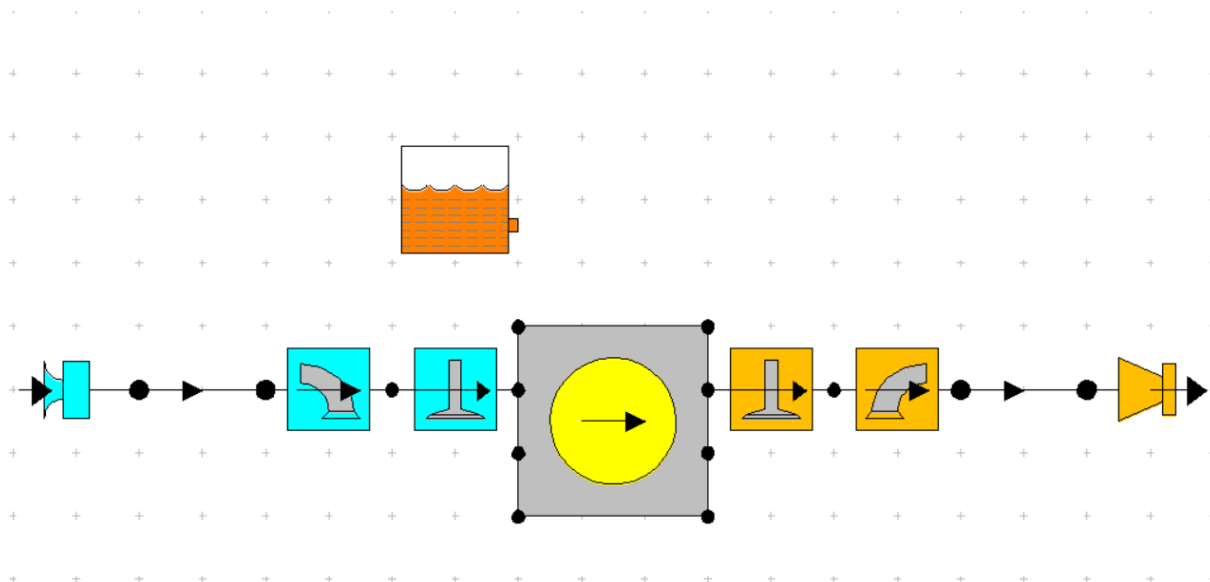
Dans ce contexte, notre contribution vise à assurer la faisabilité technique et les performances du projet. Le travail réalisé consiste, dans un premier temps, à modéliser et simuler le moteur thermique d'origine du véhicule. Ce modèle servira de référence pour l'adaptation ultérieure du moteur à un fonctionnement à l'hydrogène. Une comparaison des deux configurations sera alors menée afin d'identifier et de quantifier les modifications nécessaires permettant d'atteindre des niveaux de performance comparables à ceux du véhicule initial.

Introduction et Objectifs

Faisant suite à la validation du "jumeau numérique" du moteur fonctionnant à l'essence lors du premier semestre, l'objectif de cette seconde phase était d'opérer la conversion virtuelle de ce groupe motopropulseur au dihydrogène (H₂) sous l'environnement *Lotus Engine Simulation* (LES). La démarche a été incrémentale, débutant par une validation thermodynamique sur une architecture mono cylindre, avant d'évoluer vers un modèle 4 cylindres atmosphérique, pour aboutir finalement au modèle complet turbocompressé intégrant les systèmes de déphasage variable d'arbre à cames (VVT) et de post-traitement.

2. Phase 1 : Modélisation Monocylindre et Calibration du Carburant H2

La première étape a consisté à isoler un unique cylindre pour valider le modèle de combustion et les propriétés physiques du nouveau carburant.



2.1. Résolution des contraintes logicielles (Limitation "Zéro Carbone")

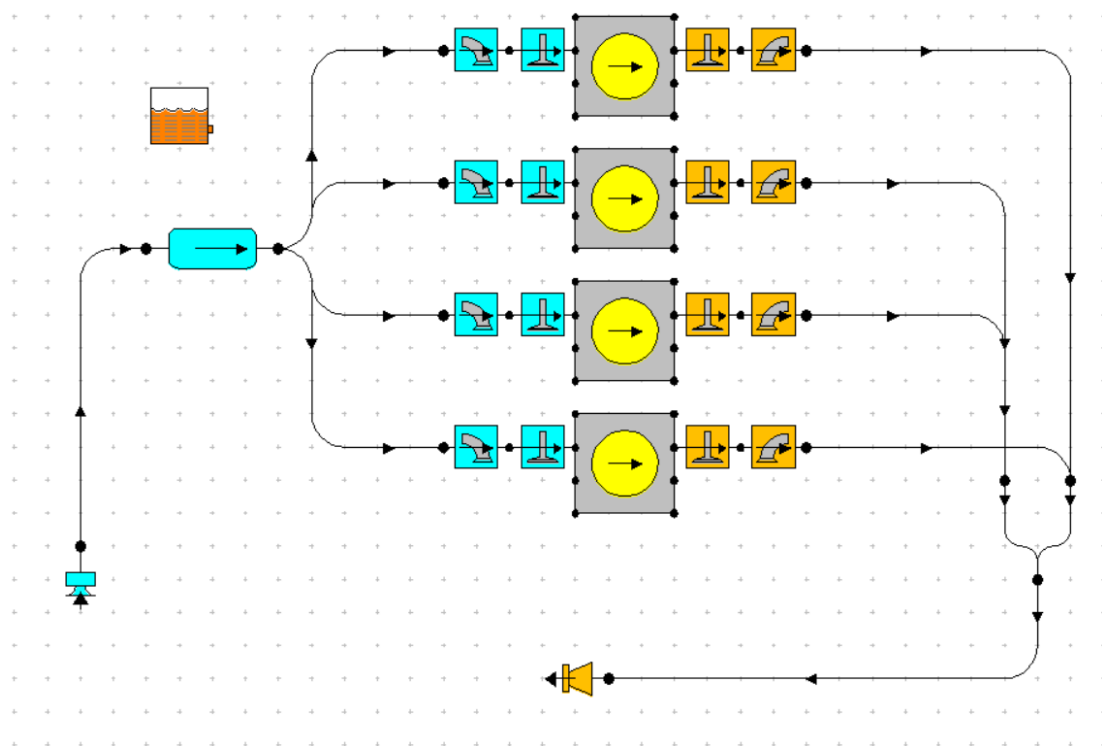
Dès les premières itérations, une limitation structurelle du solveur de LES a été identifiée : le logiciel générait des erreurs critiques ("Run-time Error 410") lorsqu'un carburant dépourvu de carbone était renseigné. Pour contourner cette instabilité mathématique sans fausser la thermodynamique du cycle, une fraction massique résiduelle a été introduite. Le carburant a été défini avec 99,9917% de dihydrogène et 0,0083% de carbone, permettant au solveur de converger tout en conservant les propriétés énergétiques de l'hydrogène pur.

2.2. Validation des propriétés et Modèle de Combustion

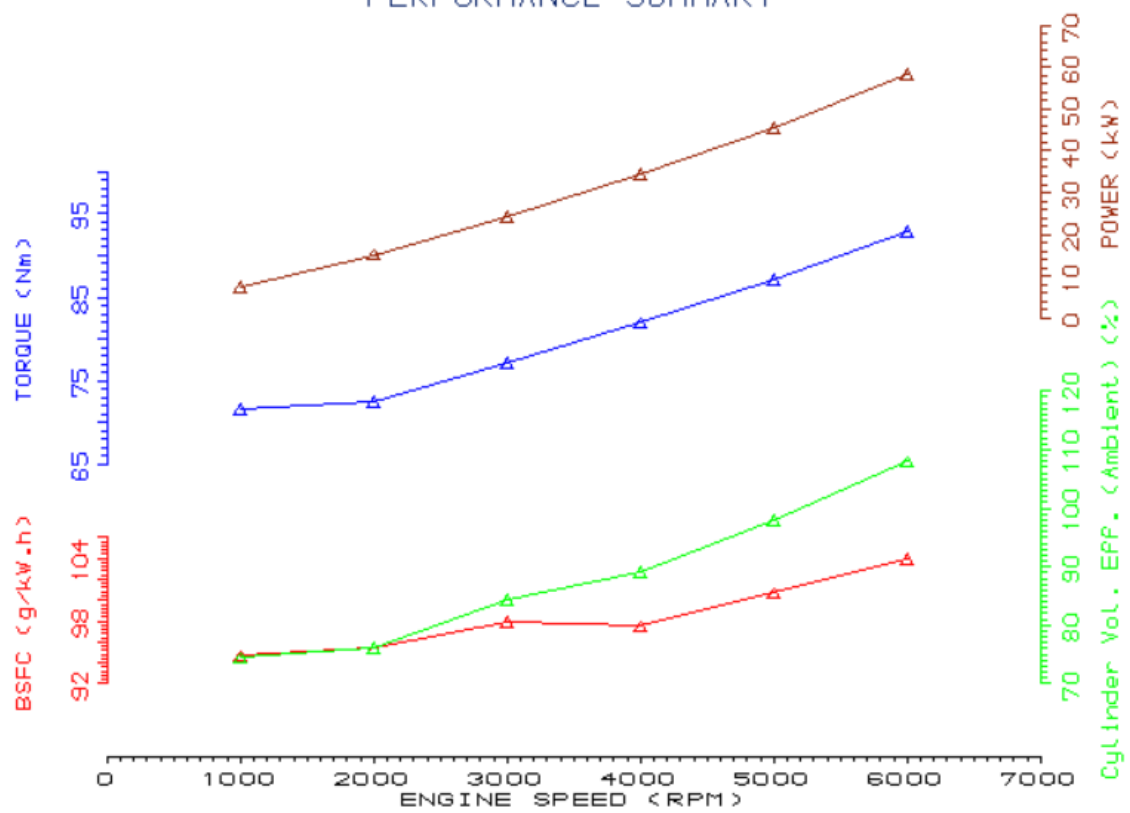
Afin de garantir la validité de notre paramétrage, nous avons échangé avec un ancien ingénieur motoriste de chez Alpine. Cette consultation a permis de fiabiliser :

- **Les propriétés physico-chimiques** : Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) et rapport stœchiométrique spécifique à l'hydrogène.
- **Le phasage de combustion (Loi de Wiebe)** : La vitesse de déflagration de l'hydrogène étant nettement supérieure à celle de l'essence, les paramètres du modèle de *Single Wiebe* (durée de combustion et coefficient de forme) ont été réajustés pour refléter ce dégagement de chaleur extrêmement rapide.
- **Stabilité de calcul** : Pour modéliser précisément cette combustion rapide, le pas de temps de la simulation a été affiné.

3. Phase 2 : Mise à l'Échelle vers un 4 Cylindres Atmosphérique



PERFORMANCE SUMMARY



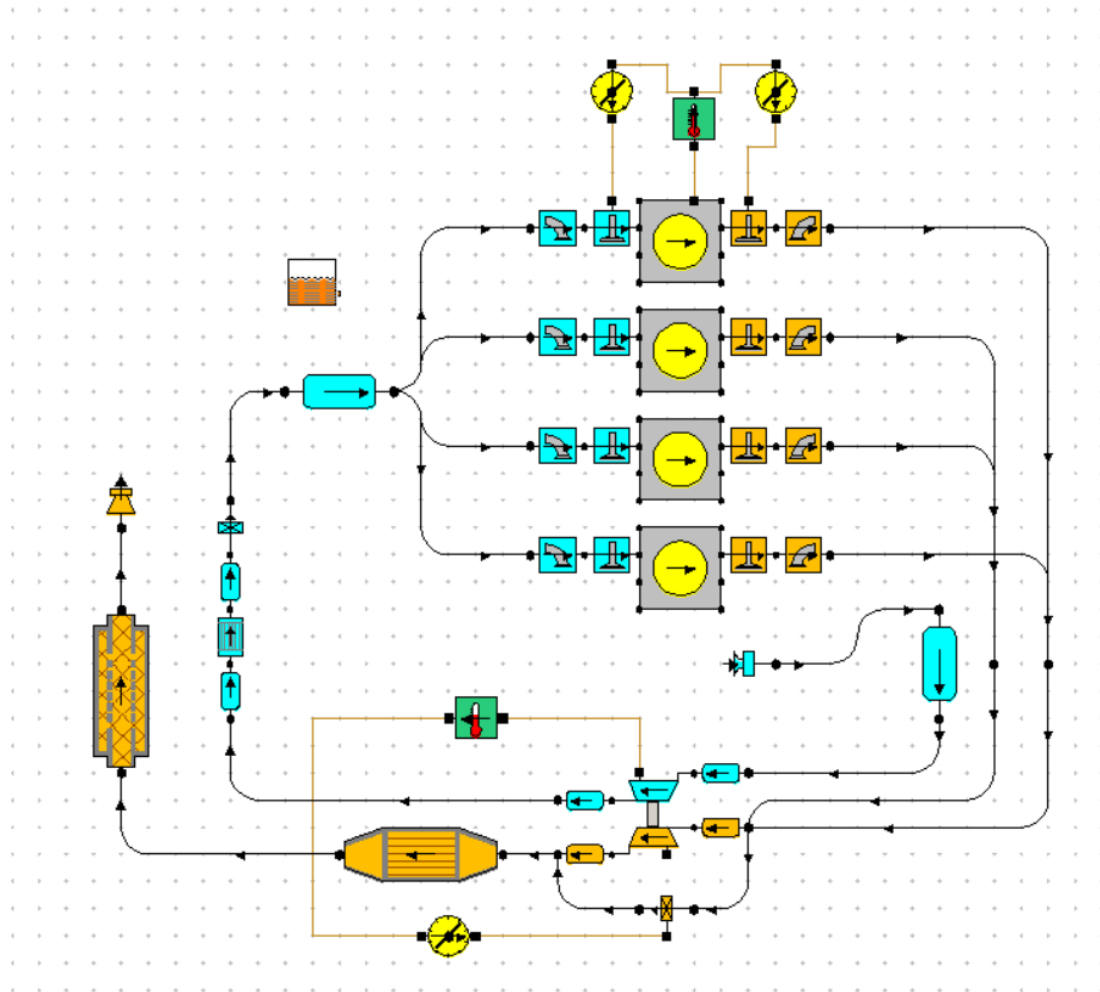
Une fois la thermodynamique du cylindre unitaire validée, le modèle a été étendu à une architecture 4 cylindres (ordre d'allumage 1-3-4-2). Afin d'isoler les potentiels problèmes d'interactions acoustiques et de dynamique des fluides, cette étape transitoire a été réalisée en configuration atmosphérique (sans turbocompresseur).

Cette phase nous a permis de :

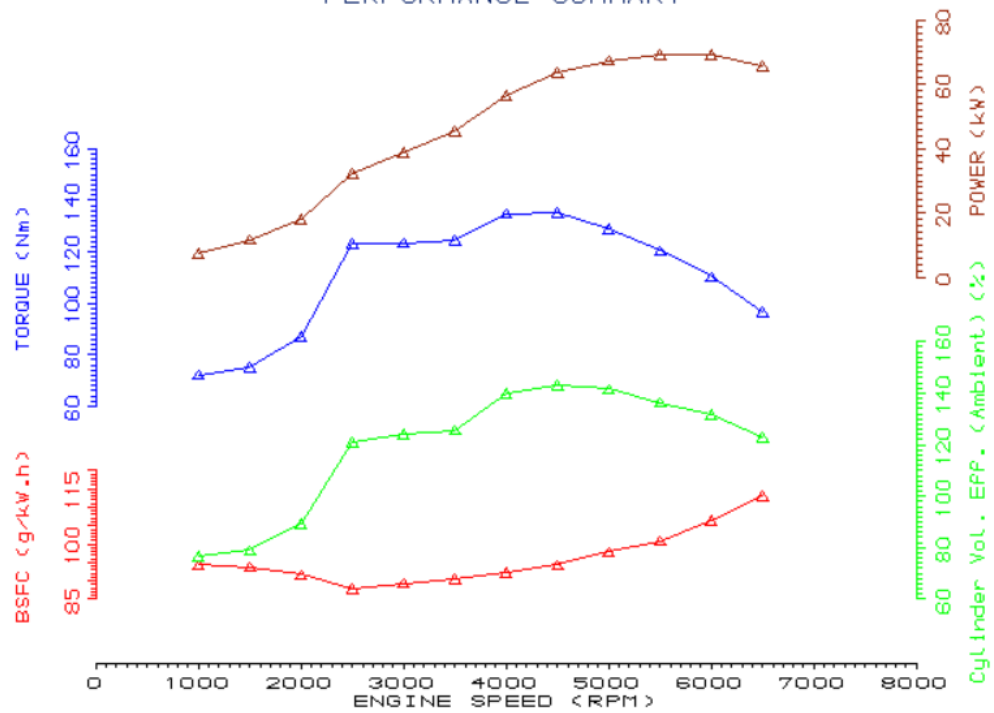
- Valider la topologie complète des collecteurs d'admission et d'échappement avec le nouveau fluide.
- Vérifier l'homogénéité du remplissage entre les cylindres.

4. Phase 3 : Intégration du Système Complet (Moteur 1.8 TCe H2)

La dernière étape a été la réintégration de tous les composants périphériques pour correspondre à l'architecture exacte du moteur M5P de l'Alpine A110.



PERFORMANCE SUMMARY



4.1. Stratégie de Combustion en Mélange Pauvre ($\lambda = 2$)

Contrairement au modèle essence validé précédemment, le fonctionnement stœchiométrique à l'hydrogène sous forte charge a été proscrit. Pour des impératifs liés au cliquetis (auto-inflammation destructrice très fréquente avec l'hydrogène) et aux émissions de NOx, nous avons défini une stratégie de combustion en mélange très pauvre.

- **Objectif** : Atteindre et stabiliser la simulation avec un coefficient d'excès d'air $\lambda = 2$.
- Bien que des instabilités numériques soient apparues au-delà d'un AFR de 35 lors des premiers tests, le raffinement du maillage temporel et l'ajustement itératif des contrôleurs ont permis de fiabiliser le modèle à $\lambda = 2$.

4.2. Intégration Suralimentation, VVT et Catalyseur

Le fonctionnement en mélange ultra-pauvre nécessite un débit d'air massique considérable. Le turbocompresseur original perd donc de son efficacité et devra être remplacé par un modèle plus performant à l'avenir. Les cartographies VVT ont été modifiées pour optimiser le balayage des gaz brûlés.

5. Conclusion

Ce semestre a été marqué par un travail de modélisation intense, nécessitant de contourner des verrous logiciels et de repenser la stratégie de contrôle moteur pour s'adapter à la chimie de l'hydrogène. Le projet dispose désormais d'un "jumeau numérique" complet et fonctionnel du 1.8 TCE fonctionnant à l'hydrogène en mélange pauvre. Ce modèle permet d'ores et déjà d'étudier l'interaction complexe entre la suralimentation et les limites de cliquetis, constituant une base solide pour la future calibration du moteur sur banc d'essai physique.