

C-FOX

Comprendre et modéliser une chaîne de propulsion solide

Fiche du projet

Nature	Synthèse scientifique publique
Périmètre	Thermochimie, scénarios de pression et démarche de caractérisation non opérationnelle
Version	2 août 2026
Responsabilité	Projet CHEMIX en collaboration avec Space & Technology Sorbonne

Document autonome de présentation scientifique. Les résultats correspondent au système, aux hypothèses et aux méthodes explicités dans le texte.

Table des matières

1	Résumé scientifique	1
2	Système physique et question scientifique	1
2.1	De l'énergie chimique à la poussée	1
3	Méthodologie de modélisation	2
3.1	Masse volumique idéale	2
3.2	Scénario fermé par la loi des gaz parfaits	2
3.3	Équilibre thermochimique avec NASA CEA	2
4	Résultats consolidés	3
5	Limites scientifiques	3
6	Perspectives	4
7	Conclusion	4

Périmètre public et sécurité

C-FOX porte sur un système énergétique. Cette synthèse présente uniquement les principes physiques, la méthode de calcul et des résultats non opérationnels déjà confirmés. Elle ne publie ni composition, ni proportion, ni procédure de préparation, ni condition d'initiation ou d'essai. Toute activité expérimentale relève d'une infrastructure autorisée, d'une analyse de risques institutionnelle et d'un encadrement professionnel.

1 Résumé scientifique

C-FOX est un projet collaboratif étudiant consacré à la compréhension d'une chaîne de propulsion solide, depuis la thermochimie d'un matériau énergétique jusqu'aux grandeurs utiles à la conception d'un système propulsif. CHEMIX développe la composante chimie et caractérisation en lien avec Space & Technology Sorbonne.

Le travail documenté comprend trois blocs : un calcul de masse volumique idéale, un scénario de pression en volume fermé par la loi des gaz parfaits et des calculs d'équilibre thermochimique avec NASA CEA. Deux résultats numériques sont suffisamment définis pour être publiés : une masse volumique idéale de mélange d'environ 1.85 g/cm^3 et une pression théorique d'environ 1.52 MPa, soit 15.2 bar, dans le scénario fermé étudié. Ces valeurs sont des sorties de modèle ; elles ne constituent ni une pression de chambre mesurée, ni une performance moteur validée.



Figure 1 – Équipe du projet C-FOX, collaboration entre CHEMIX et Space & Technology Sorbonne.

2 Système physique et question scientifique

2.1 De l'énergie chimique à la poussée

Dans un moteur-fusée solide, une réaction exothermique produit des gaz chauds. La pression établie dans la chambre entraîne leur accélération à travers une tuyère ; l'éjection de quantité de mouvement produit la poussée. Le fonctionnement résulte d'un couplage entre chimie, transfert thermique, cinétique de combustion, géométrie, écoulement compressible et structure.

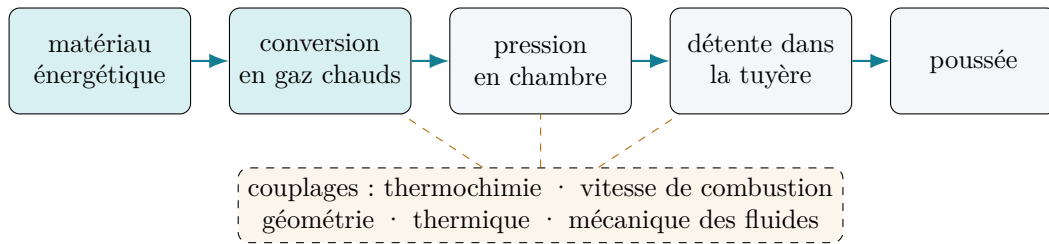


Figure 2 – Chaîne fonctionnelle simplifiée. Une sortie thermochimique ne suffit pas à prédire seule la poussée ou la pression réelle.

La question scientifique du projet est de construire une chaîne de preuve qui sépare clairement :

1. les propriétés calculées à partir d’hypothèses de composition ;
2. les états d’équilibre thermodynamique calculés ;
3. les propriétés cinétiques et les mesures expérimentales ;
4. la réponse intégrée d’un dispositif propulsif.

3 Méthodologie de modélisation

3.1 Masse volumique idéale

Pour un mélange idéal sans porosité ni variation de volume au mélange, la masse volumique peut être estimée par la règle des volumes additifs :

$$\rho_{\text{mix}} = \left(\sum_i \frac{w_i}{\rho_i} \right)^{-1}, \quad (1)$$

où w_i et ρ_i sont respectivement la fraction massique et la masse volumique du constituant i . Cette relation fournit un plafond idéal : la porosité, les défauts et l’incertitude sur les matières conduisent généralement la masse volumique réelle à s’en écarter.

Le calcul interne conduit à $\rho_{\text{mix}} \approx 1.85 \text{ g/cm}^3$. La composition détaillée utilisée pour ce calcul est volontairement exclue de la présente synthèse.

3.2 Scénario fermé par la loi des gaz parfaits

Un second calcul traite les produits gazeux comme un gaz parfait dans un volume fermé :

$$P = \frac{nRT}{V}. \quad (2)$$

Le nombre de moles n , la température T et le volume V proviennent du scénario défini dans le dossier de calcul. La sortie est $P \approx 1.52 \text{ MPa}$, soit environ 15.2 bar.

Cette estimation répond à une question limitée : quelle pression donnerait un inventaire gazeux supposé, à température et volume imposés ? Elle ignore ou simplifie les pertes thermiques, la cinétique, les fuites, la présence de phases condensées, la variation temporelle du volume et l’écoulement par une tuyère. Elle ne doit donc pas être utilisée comme pression maximale de fonctionnement.

3.3 Équilibre thermochimique avec NASA CEA

NASA CEA calcule la composition à l’équilibre ainsi que des propriétés thermodynamiques et de transport pour des mélanges complexes. Le logiciel résout l’état d’équilibre par minimisation de l’énergie libre de Gibbs et propose notamment des problèmes à pression ou volume imposé et des calculs de performance théorique de fusée [1-3].

Dans C-FOX, CEA a été utilisé pour générer des sorties d’équilibre à partir d’un jeu d’entrée défini. Ces sorties servent à identifier les produits dominants et à estimer les températures et propriétés idéales utiles aux étapes suivantes. Leur exactitude dépend directement de la composition d’entrée, des espèces autorisées, de la base thermodynamique et des hypothèses d’équilibre.

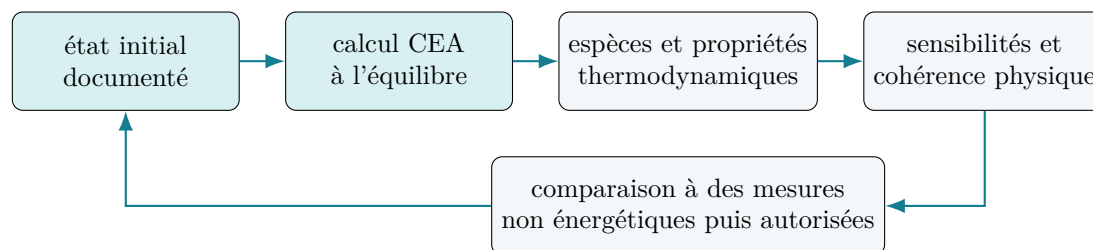


Figure 3 – Boucle de modélisation : les sorties n’acquièrent une portée prédictive qu’après analyse de sensibilité et confrontation à une mesure adaptée.

4 Résultats consolidés

Table 1 – Résultats publiables et interprétation correcte.

Objet	Résultat	Signification
Masse volumique idéale	1.85 g/cm ³	valeur issue de la règle de mélange, avant porosité et défauts
Pression en volume fermé	1.52 MPa, soit 15.2 bar	scénario gaz parfait ; pas une pression de chambre mesurée ni une limite de sécurité
Calcul NASA CEA	sorties d’équilibre obtenues	preuve que la chaîne thermochimique a été exécutée ; prédiction idéale dépendante des entrées
Banc de caractérisation	dispositif fabriqué, phase de qualification en cours dans le corpus	capacité instrumentale en développement ; aucune courbe de combustion consolidée publiée
Essai moteur	aucune série de pression, poussée ou impulsion consolidée	aucune performance propulsive expérimentale revendiquée

Ces résultats accomplissent le premier objectif du projet : établir des ordres de grandeur et une chaîne de calcul. Ils ne démontrent pas encore le comportement transitoire du matériau ni la réponse d’un moteur. La distinction est essentielle, car l’équilibre thermochimique décrit un état final idéal tandis que la combustion réelle dépend de vitesses, de gradients et d’échanges avec les parois.

5 Limites scientifiques

- Idéalité du mélange.** La masse volumique calculée ne décrit ni porosité ni hétérogénéité réelle.
- Modèle gaz parfait.** Le scénario fermé ne reproduit pas une chambre ouverte sur une tuyère ni un transitoire de combustion.
- Équilibre versus cinétique.** CEA détermine un état thermodynamique idéal ; il ne calcule pas la vitesse de réaction ou de régression du solide.
- Traçabilité numérique.** Une sortie n’est reproductible que si version du logiciel, unités, options, espèces admises et fichiers d’entrée sont archivés.
- Validation expérimentale.** Aucune courbe consolidée de vitesse de combustion, pression, poussée ou impulsion n’est disponible dans le corpus public examiné.

6 Perspectives

La priorité scientifique est de consolider les modèles avant toute interprétation de performance : contrôle dimensionnel et métrologique avec matériaux inertes, tests de sensibilité des hypothèses, conservation des entrées/sorties CEA et bilans d'incertitude. La comparaison à la littérature doit porter sur des grandeurs définies dans le même cadre thermodynamique.

L'étape expérimentale énergétique ne peut être envisagée qu'après qualification institutionnelle du dispositif, revue HSE, procédures d'arrêt et encadrement spécialisé. Les résultats destinés au public doivent rester agrégés et non opérationnels : courbes et incertitudes utiles à la compréhension scientifique, sans formulation ni paramètres permettant de reproduire un essai.

7 Conclusion

C-FOX a construit une première passerelle entre chimie et propulsion : un modèle de masse volumique, un scénario de pression et une chaîne d'équilibre NASA CEA. Les nombres obtenus sont utiles comme ordres de grandeur, à condition de respecter leur domaine : 1.85 g/cm^3 est une densité idéale de mélange et 15.2 bar une pression de scénario fermé, non une mesure moteur. La perspective centrale est maintenant de transformer ces calculs en modèles traçables, assortis d'incertitudes et validés progressivement dans un cadre de sécurité institutionnel.

Références

- [1] Sanford GORDON et Bonnie J. MCBRIDE. *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications. Part I : Analysis*. RP-1311. NASA, 1994. URL : <https://ntrs.nasa.gov/citations/19950013764> (visité le 02/08/2026).
- [2] Bonnie J. MCBRIDE et Sanford GORDON. *Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions and Applications. Part II : Users Manual and Program Description*. RP-1311-P2. NASA, 1996. URL : <https://ntrs.nasa.gov/citations/19960044559> (visité le 02/08/2026).
- [3] NASA GLENN RESEARCH CENTER. *Chemical Equilibrium with Applications*. URL : <https://www.nasa.gov/glenn/research/chemical-equilibrium-with-applications/> (visité le 02/08/2026).