Rédigé le 07 octobre 2026

3 minutes de lecture

Actualités

Recherche fondamentale

Physique du transfert et du transport

Thermodynamique / Modélisation moléculaire

Mécanique des fluides

Le Real-Fluid Model (RFM) développé à IFPEN est une approche de mécanique des fluides compressibles destinée à décrire les écoulements de fluides réels dans des conditions thermodynamiques complexes : hautes pressions, régimes sous-critiques, supercritiques[1] et transcritiques[2] et ainsi que les changements de phase. Son intérêt repose sur le couplage entre une description compressible et multicomposant de l'écoulement, une équation d'état[3] de fluide réel (EoS) et un calcul d'équilibre liquide–vapeur (VLE).

Historique et évolution du RFM

Le développement du RFM (Figure 1) s'est initialement inscrit dans le contexte de la modélisation des **injections à haute pression et transcritiques**, notamment pour les applications aux moteurs à combustion interne. Une étape fondatrice a consisté à développer un modèle diphasique entièrement compressible à quatre équations, fondé sur les bilans de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et d'espèces, sous hypothèses d'équilibre mécanique, thermique et thermodynamique. De plus, la fermeture thermodynamique, procédure de calcul VLE permettant de déterminer les propriétés thermodynamiques et la composition des phases, repose sur une EoS de fluide réel [1].

Cette approche a ensuite été rendue plus rapide grâce à **une formulation tabulée du RFM**. Les propriétés thermodynamiques et de transport sont pré-calculées dans des tables puis interpolées au cours du calcul CFD[4]. Cette stratégie permet de conserver une description réaliste des fluides tout en réduisant fortement le coût associé aux calculs répétés d'équilibre thermodynamique. Elle a notamment permis d'étendre le RFM à des mélanges multicomposants et à des simulations «?Large-Eddy Simulation?» (LES)[5] dans le code CFD CONVERGE [2, 3].

Du domaine des moteurs au CCUS

Les propriétés thermodynamiques du CO_2 deviennent particulièrement importantes dans les procédés de **Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)**, où le CO_2 est transporté en pipeline sous forme dense ou supercritique. La présence d'impuretés et les phénomènes de dépressurisation sont des facteurs critiques dans la mesure où ils peuvent modifier les équilibres de phase et la dynamique de l'écoulement. Le RFM fournit **alors** un cadre adapté pour coupler les phénomènes de dynamique compressible et de thermodynamique des fluides réels.
Dans le premier travail consacré à cette problématique, Bhatia and Habchi [4] ont appliqué le RFM à l'étude de **la condensation du CO_2 dans une tuyère** soumise à une détente avec onde de choc, en considérant l'effet d'impuretés. L'étude montre l'intérêt de cette approche pour décrire simultanément la dynamique d'un fluide complètement compressible, les changements de phase et l'influence de la composition du fluide.
Le second travail étend cette démarche aux **fuites de CO_2 supercritique dans les pipelines de transport CCUS** [5]. Le RFM tabulé, implémenté dans CONVERGE, est utilisé pour étudier la dépressurisation transitoire et la propagation des ondes de décompression, en examinant notamment l'influence du choix de l'**équation d'état, des impuretés et du diamètre de l'orifice de fuite**. Les simulations considèrent notamment des impuretés telles que N_2, CH_4 et Ar et sont confrontées à des données expérimentales disponibles. Une configuration de pipeline à plus grande échelle, représentative de conditions industrielles, est également étudiée.

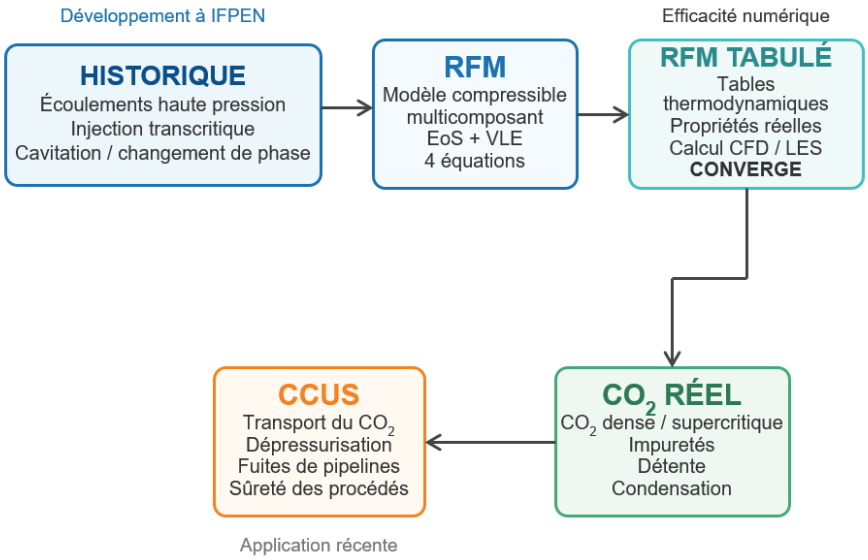

Figure 1 : Évolution conceptuelle du Real-Fluid Model (RFM), depuis son développement pour les écoulements haute pression et transcritiques jusqu'à son application au CO2 dans les procédés de transport et de stockage du carbone (CCUS).

Conclusion et perspective

Ces travaux illustrent l'évolution du RFM, depuis un modèle destiné aux écoulements complexes de fluides réels à haute pression vers **une méthodologie de simulation applicable aux infrastructures pour le CCUS**. L'association d'une thermodynamique réaliste, de la compressibilité, des changements de phase et de la prise en compte des impuretés constitue un outil pertinent pour analyser les phénomènes transitoires rencontrés dans le transport du CO_2 et contribuer à l'étude du dimensionnement et de la sûreté de ces infrastructures.

[1] État d'un corps pur lorsque sa pression ou bien sa température excède celle du point critique (point du diagramme température-pression où s'arrête la courbe d'équilibre liquide-gaz). Dans le cas contraire, il est dans un état sous-critique.
[2] Condition générée lorsqu'un fluide sous-critique est injecté dans un fluide supercritique.
[3] A l'équilibre thermodynamique, l'EoS (Equation of State) est une relation entre différents paramètres physiques (pression, volume, température) qui déterminent son état.
[4] Mécanique des Fluides Numérique (Computaitional Fluid Dynamics)
[5] Méthode utilisée en modélisation de la turbulence

Références :

[1] Songzhi Yang, Ping Yi, Chaouki Habchi, and Rafael Lugo. A multicomponent real-fluid fully compressible four-equation model for two-phase flow with phase change. Physics of Fluids, 31(3), 2019.
>> DOI : https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2019.103145.

[2] Sajad Jafari, Hesham Gaballa, Chaouki Habchi, Jean-Charles De Hemptinne, and Pascal Mougin. Exploring the interaction between phase separation and turbulent fluid dynamics in multi-species supercritical jets using a tabulated real-fluid model. The Journal of Supercritical Fluids, 184 :105557, 2022.
>> DOI : https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105557

[3] Hesham Gaballa, Chaouki Habchi, and Jean-Charles de Hemptinne. Modeling and LES of high-pressure liquid injection under evaporating and non-evaporating conditions by a real fluid model and surface density approach. International Journal of Multiphase Flow, 160 :104372, 2023.
>> DOI : https://10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104372

[4] Harshit Bhatia and Chaouki Habchi. Real fluid modeling and simulation of the structures and dynamics of condensation in co2 flows shocked inside a de laval nozzle, considering the effects of impurities. Applied Sciences, 13(19) :10863, 2023.
>> DOI : https://doi.org/10.3390/app131910863

[5] Krishna Kant, Chaouki Habchi, Martha Hajiw-Riberaud, Al-Hassan Afailal, and Jean-Charles de Hemptinne. Study of supercritical co2 pipeline flow leaks: Effects of equation of state, impurity, and outlet diameter. Fluids, 11(4) :96, 2026.
>> DOI : https://doi.org/10.3390/fluids11040096

Contacts scientifiques : Chaouki Habchi, Jean-Charles de Hemptinne

Le Real-Fluid Model (RFM) : de la modélisation des fluides réels aux applications CCUS
07 octobre 2026

Lien vers la page web :