

LA SIMULATION PHYSIQUE SOBRE, UNE APPROCHE FRUGALE POUR DES JUMEAUX NUMÉRIQUES ?

Par **Kevin Lippera**



Kevin LIPPERA

Diplômé de l'École Nationale des Ponts et Chaussées et docteur en physique de l'École Polytechnique, Kevin est ancien chercheur de l'équipe physique de la fusion de Saint-Gobain Research Paris. Sa recherche s'est focalisée sur le développement de méthodes numériques pour des phénomènes physiques complexes. Aujourd'hui, il a cofondé DotBlocks, une startup française qui vise à démocratiser la simulation physique à l'ensemble des métiers de l'industrie, grâce à des solutions cloud basées sur des algorithmes à l'état de l'art.

Dans l'industrie, l'objectif du jumeau numérique est ambitieux : disposer d'un outil digital capable de prédire en temps réel le comportement d'un procédé ou d'un produit, avec une précision suffisante pour piloter des décisions concrètes. Mais derrière cela se cache une double contrainte : respecter la physique et calculer très vite, parfois en moins d'une seconde. C'est là qu'entre en scène la simulation physique sobre comme solution possible pour la conception de jumeaux numériques.

La tentation naturelle, lorsqu'on cherche à décrire un procédé ou un produit, est d'empiler les ingrédients physiques : plus de phénomènes, plus de détails, plus d'équations. On se dit que le modèle sera forcément meilleur et que de façon intuitive « qui peut le plus peut le moins ». Ce n'est pas complètement faux, mais c'est rarement optimal. On se retrouve alors avec des modèles lourds, coûteux à faire tourner, impossibles à utiliser en temps réel. La question clé devient donc : de quoi ai-je vraiment besoin pour répondre à mon problème industriel ?

Tout commence par un cahier des charges clair. Quelle grandeur souhaitez-on observer (température, pression, consommation énergétique, qualité produit...) ? Avec quelle marge d'erreur acceptable ? Cette étape fixe la barre : inutile de viser la précision d'un laboratoire métrologique si l'usage final tolère quelques pourcents d'écart.

Vient ensuite la modélisation physique proprement dite : quels phénomènes sont indispensables à prendre en compte pour atteindre cette précision ?

Quelle géométrie du système doit être représentée ? Certains effets devront être détaillés, d'autres pourront être simplifiés ou même négligés. Parallèlement, on dresse l'inventaire des données d'entrée disponibles : capteurs, paramètres des matériaux, conditions d'usage. Ce travail débouche sur l'écriture d'un cadre mathématique : équations, conditions aux limites et initiales, paramètres à prendre en compte.

Une fois ce cadre de modélisation établi, on obtient des équations rendant compte de la dynamique du système étudié. La question devient alors : « comment résoudre ces équations le plus efficacement possible ? ». On entre dans le domaine des mathématiques appliquées et des méthodes numériques, ces algorithmes permettant de rendre compte au plus près des solutions à des équations physiques. Il en existe une véritable boîte à outils : méthodes de type Lattice Boltzmann¹, très rapides mais adaptées à certains régimes d'écoulement, les méthodes spectrales², extrêmement précises mais limitées à des géométries plus simples, les méthodes sans maillage volumique, comme les éléments de frontière³ ou les approches SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics* ou Hydrodynamique des particules lissées)⁴, très utiles respectivement pour des géométries complexes ou des dynamiques très agitées.

Une fois le modèle implémenté, on confronte ses prédictions à la réalité. C'est un processus itératif : on vérifie si les phénomènes retenus suffisent à décrire l'observable au niveau de précision souhaité. Parfois, un effet jugé négligeable se révèle finalement crucial et doit être inclus dans un nouveau modèle. À l'inverse,

il peut arriver qu'un phénomène que l'on pensait déterminant n'apporte presque rien et puisse être simplifié, allégeant davantage le modèle. C'est ainsi que Daniel Weisz-Patrault et Quentin Dollé ont pu concevoir un modèle prédisant la microstructure des grains d'un métal en fusion tout en passant de 40 heures de calcul avec les approches traditionnelles à un résultat, de précision comparable, ne nécessitant que 0,01 seconde sur un ordinateur portable, soit un facteur d'accélération d'environ 14 millions⁵.

Mais qui construit concrètement ce jumeau numérique frugal ? Plusieurs expertises se croisent. Les responsables procédé ou produit formulent les besoins industriels et les métriques d'intérêt. Les physiciens et ingénieurs R&D traduisent ces besoins en modèles, en s'appuyant sur leur connaissance des phénomènes et des données disponibles. Les mathématiciens et spécialistes du calcul numérique peuvent alors choisir et implémenter les méthodes de résolution les plus adaptées.

Au fond, décrire un phénomène physique, que ce soit pour la conception ou pour un jumeau numérique, ressemble beaucoup à la peinture d'un paysage. La modélisation, c'est le choix du sujet et du niveau de détail : doit-on représenter chaque brin d'herbe, ou seulement les grandes masses, les reliefs, la lumière ? La résolution numérique, elle, correspond au choix des outils : gouache, aquarelle, bombe de peinture ou pinceau ultrafin selon le rendu souhaité et le temps dont on dispose. C'est aussi dans cette optique que des sociétés telles que DotBlocks souhaitent mettre à disposition des industriels les outils les mieux adaptés à leurs challenges.

Adopter une démarche de simulation physique sobre c'est accepter de ne pas tout représenter, mais de représenter ce qui compte vraiment. C'est à cette condition que les jumeaux numériques peuvent être à la fois fidèles à la réalité physique et suffisamment rapides pour s'inviter, en temps réel, au cœur des décisions industrielles. ■

Références

¹ Krüger, Timm, et al. *The lattice Boltzmann method*. Vol. 10. No. 978-3. Cham: Springer International Publishing, 2017.

² Canuto, Claudio, et al. *Spectral methods: evolution to complex geometries and applications to fluid dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.

³ Sutradhar, Alok, Glaucio Paulino, and Leonard J. Gray. *Symmetric Galerkin boundary element method*. Springer Science & Business Media, 2008.

⁴ Violeau, Damien. *Fluid mechanics and the SPH method: theory and applications*. Oxford University Press, 2012.

⁵ Dollé, Quentin, and Daniel Weisz-Patrault. «Very fast simulation of growth competition between columnar dendritic grains during melt pool solidification.» *Computational Materials Science* 243 (2024): 113112.