

LA SIMULATION NUMÉRIQUE

Guillaume Dubois

LA SIMULATION NUMÉRIQUE

Enjeux et bonnes pratiques
pour l'industrie

DUNOD

Couverture : WIP
Illustration de couverture : © Juanjo Tugores

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--



Dunod, 2016
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-074750-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

« Soyez le changement que vous voulez voir dans ce monde. »

Gandhi

Remerciements

Je remercie, pour m'avoir relu ou avoir fait des commentaires détaillés sur tel ou tel paragraphe, par ordre alphabétique : Alexis Beauvillain, Claire Casas, Laurent Di Valentin, Sébastien Dubois, Antoine Ferret, Florent Fossé, Étienne Fradet, Eric Le Dantec, Éric Noirtat, Hugues-Loup Robedat, Éric Suty, Manuel Tancrez, Éric Tomietto, Benoît Trémeau et Alexandre Zann.

Aux éditions Dunod, notamment Ronite Tubiana et Aurélie Cauvin, pour leur professionnalisme et la qualité de leur travail.

À Benoît Parmentier, pour m'avoir formé à mes débuts et à qui j'aurais voulu faire relire ce livre, si le destin ne l'avait pas violemment emporté.

À mes parents, Chantal et Xavier, pour leurs relectures, leurs encouragements, et le soutien indestructible qu'ils m'ont toujours apporté.

À Monica, sans qui ce livre n'aurait pas existé, pour avoir été la source de ma motivation et de mon énergie.

À ma famille, notamment Cécile, Sébastien, Claire, Youri, Jeannine, Gérard, Martine, Séverine, Ivan, Geneviève, Michel, pour m'avoir encouragé et fait passer des moments heureux.

Aux paysans d'Éthiopie d'il y a deux millénaires, pour avoir découvert le café et m'avoir permis de réaliser cet ouvrage en quelques semaines, lors de longues nuits sans sommeil.

Et enfin à Julien, l'ingénieur fictif que nous allons suivre dans cet ouvrage, qui, même s'il n'existe pas, m'a beaucoup aidé à écrire ce livre.

Préface

Cet ouvrage sur la simulation numérique est singulier. Il ne se concentre pas sur les techniques de résolution numérique ou sur les mises en équation de phénomènes physiques, mais sur l'expérience pratique des différents acteurs qui la mettent en œuvre dans l'industrie.

Il expose une synthèse d'enseignements très pertinents qui ont permis de déployer avec succès la simulation collaborative dans les secteurs industriels.

L'auteur applique à son livre les recettes qui ont fait ses succès en entreprise : pragmatisme, orientation résultat, sens du collectif et du collaboratif.

De la synthèse des bonnes pratiques et des erreurs courantes, il extrait une analyse simple et des recommandations pleines de bon sens. Celles qui, une fois combinées et exécutées opérationnellement avec rigueur, permettent les transformations les plus profondes, pérennes et efficaces des pratiques de simulation numérique dans l'industrie.

Manuel Tancrez
Manager R&D PSA Peugeot Citroën

Sommaire

Introduction	1
Pourquoi ce livre ?	1
Pour qui ? [à lire en premier si vous êtes pressés]	2
Quelles entreprises sont concernées par cet ouvrage ?	2
Chapitre 1 : Qu'est-ce que la simulation numérique ?	3
1.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?	3
1.2 Qu'est-ce qu'une simulation ?	6
1.3 Que sont la modélisation et la simulation numérique ?	7
1.4 Qu'est-ce qu'une représentation d'état ?	11
1.5 Quelle est l'utilité de la simulation numérique ?	12
Chapitre 2 : Un peu d'histoire	13
2.1 Avant 1940	13
2.2 De 1940 à 1960 : les premiers pas de la simulation numérique	14
2.3 De 1960 à 1980 : les évolutions de la simulation numérique	16
2.4 De 1980 à 1995 : la révolution de la simulation numérique	18
2.5 De 1995 à 2015 : l'expansion de la simulation numérique	19
2.6 Trois enseignements de l'histoire	22
Chapitre 3 : La simulation numérique dans l'industrie, pourquoi ?	23
3.1 Pourquoi déployer la simulation ?	23
3.1.1 Un outil prédictif...	23
3.1.2 ...qui est rentable	24
3.2 Les apports de la simulation	25
3.2.1 L'iceberg modélisation	26
3.2.2 Les huit leviers de création de valeur	26

3.3 Les coûts et les limites de la simulation	40
3.3.1 Les coûts de la simulation	40
3.3.2 Les limites de la simulation	40
3.4 Décider de déployer ou non la simulation	42
Chapitre 4 : Déployer efficacement la simulation numérique, aspects techniques	45
4.1 Les types de simulation numérique	45
4.2 Les cinq étapes pour déployer la simulation numérique	47
4.3 Les huit bonnes pratiques techniques	49
4.3.1 Bonne pratique n° 1 : définir l'objectif	50
4.3.2 Bonne pratique n° 2 : inclure les phénomènes physiques nécessaires et suffisants	55
4.3.3 Bonne pratique n° 3 : mettre en équation et paramétrer le modèle	62
4.3.4 Bonne pratique n° 4 : choisir le logiciel	72
4.3.5 Bonne pratique n° 5 : gérer les problèmes numériques et informatiques	77
4.3.6 Bonne pratique n° 6 : maîtriser le niveau de validité des résultats	84
4.3.7 Bonne pratique n° 7 : produire des résultats utiles	92
4.3.8 Bonne pratique n° 8 : maintenir et archiver les modèles	96
Chapitre 5 : Déployer efficacement la simulation numérique, aspects organisationnels	101
5.1 Les acteurs concernés	101
5.2 Les huit bonnes pratiques organisationnelles	102
5.2.1 Bonne pratique n° 1 : gérer la conduite du changement lié à la simulation numérique	103
5.2.2 Bonne pratique n° 2 : définir une stratégie de déploiement de la simulation numérique	108
5.2.3 Bonne pratique n° 3 : gérer la communication liée à la simulation numérique	112
5.2.4 Bonne pratique n° 4 : mettre à disposition les moyens nécessaires à la simulation numérique	118
5.2.5 Bonne pratique n° 5 : industrialiser la simulation numérique	121

Sommaire

5.2.6 Bonne pratique n° 6 : gérer les compétences liées à la simulation numérique	128
5.2.7 Bonne pratique n° 7 : gérer la diffusion des modèles	133
5.2.8 Bonne pratique n° 8 : outiller la gestion de configuration des modèles et des résultats	143

Chapitre 6 : L'avenir de la simulation numérique dans l'industrie : début du XXI^e siècle	151
6.1 Pourquoi est-il nécessaire de prédire l'avenir?	151
6.2 Les vingt prochaines années	151
6.3 Et après?	166
Conclusion	167
Bibliographie	169
Crédits photographiques	173
Index	175

Introduction

Pourquoi ce livre ?

La simulation numérique, il y a quelques décennies, a introduit une disruption majeure dans les grands secteurs de l'industrie. Elle révolutionnait le champ des possibles, et apportait davantage de valeur que les outils en place. Elle s'est alors déployée progressivement. En ce début de XXI^e siècle, son déploiement et ses mutations sont loin d'être finis. De grands changements à réaliser sont encore devant nous.

Pourtant, force est de constater que le déploiement de la simulation numérique reste encore lent. Seuls certains leaders de l'industrie parviennent à capter son plein potentiel. Nous le verrons, cette lenteur s'explique en partie du fait d'une mauvaise diffusion du savoir. Cette inertie de diffusion du savoir lié à la simulation numérique entrave son déploiement dans l'industrie. C'est une perte de potentiel de création de valeur pour notre société.

Les questions récurrentes, qui souvent ne trouvent pas de réponse satisfaisante, sont les suivantes :

1. Qu'est-ce que la simulation numérique et quelle est sa valeur intrinsèque ?
2. Pourquoi la déployer davantage dans l'industrie ? Sous quelles conditions ? Quel niveau de confiance y accorder ?
3. Comment la déployer en entreprise ? Quels sont les écueils et les bonnes pratiques techniques ?
4. Quels sont les écueils et les bonnes pratiques organisationnelles ?
5. Quelles sont les pistes d'avenir ? Comment en être moteur ?

Cet ouvrage a pour but d'apporter les réponses les plus claires possibles à ces questions. Notre but ici est de contribuer à la diffusion du savoir et ainsi au déploiement de la simulation numérique ; pour maximiser la création de valeur pour notre société.

Remarque : l'objectif de cet ouvrage n'est donc pas de détailler des méthodes numériques et techniques adaptées à des domaines précis. En effet de nombreux ouvrages existent déjà sur ces sujets (notamment *Pratique de la simulation numérique* aux éditions Dunod).

Pour qui ? [à lire en premier si vous êtes pressé]

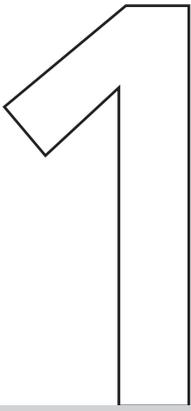
Cet ouvrage s'adresse ainsi à trois catégories de personnes :

- ▶ Directeurs, manager et chefs de projet : afin de prendre du recul sur l'intérêt de la simulation numérique, les conditions de succès à mettre en place, les limites, les impacts sur l'organisation. Vous lirez en priorité les chapitres 1, 3, 5 et 6.
- ▶ Ingénieurs simulation (au sens large, incluant notamment les experts) : afin de contribuer de l'intérieur au déploiement de la simulation, tout en ayant du recul sur ses impacts. Vous lirez en priorité les chapitres 1, 3, 4 et 6.
- ▶ Étudiants et professeurs : afin de préparer au mieux les prochaines générations qui contribueront à la simulation dans l'industrie. Vous lirez en priorité les chapitres 1, 2, 3, 4 et 6.

Quelles entreprises sont concernées par cet ouvrage ?

La simulation numérique est utilisée dans un nombre croissant de secteur d'activités. Néanmoins, le présent ouvrage se concentre sur son utilisation dans l'industrie, à savoir notamment l'aéronautique, l'énergie, l'automobile, le spatial, les transports, l'agroalimentaire et la chimie.

Les autres secteurs qui y font appel (notamment la finance, les systèmes d'information ou la recherche fondamentale) ont des spécificités qui leur sont propres, qui ne sont pas couvertes ici (les chapitres 1 et 2 restent néanmoins applicables).



Qu'est-ce que la simulation numérique ?

Un modèle est une représentation testable d'un système et la simulation est l'action d'utiliser ce modèle. Les calculs émanant de ces simulations étant souvent complexes, les outils numériques sont utilisés pour les exécuter ; on parle alors de simulation numérique. Cette technique offre un potentiel immense, utile à toutes les entreprises de l'industrie.

Le lecteur averti pourra passer directement au chapitre suivant.

1.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?

Un modèle d'un **système** en est une **représentation testable**.

Commençons par définir ce qu'est un **système**. Il s'agit d'un objet, ou d'un ensemble d'objets, que l'on cherche à étudier (qu'il soit réel ou abstrait). C'est une notion très vaste : un système peut par exemple être un avion, un moteur ou encore un injecteur. À noter qu'il peut contenir des sous-systèmes, qui sont donc eux aussi des systèmes. Dans l'industrie, les équipes travaillent donc quotidiennement sur des systèmes (qui seront tout ou partie des produits vendus par l'entreprise), que ce soit pour les concevoir, les développer ou les produire.

Il y a une multitude de **représentations** possibles pour un même système. Dans cet ouvrage, nous nous intéresserons aux représentations mathématiques, c'est-à-dire celles qui visent à le décrire par des équations qui régissent son comportement. Souvent, ces équations découlent des lois physiques connues (comme les lois des forces de gravité ou le principe fondamental de la dynamique). La représentation d'un système peut donc être vue comme une simplification de sa réalité, ou encore une vision prise à travers un certain prisme.

Dans l'industrie, une multitude de systèmes sont sans cesse **testés**, *via* des essais physiques. On peut par exemple tester un moteur d'avion pour évaluer quelles températures ses parois peuvent atteindre, ou encore tester un injecteur pour

savoir quel débit de carburant il peut fournir. De même, on peut tester une représentation que l'on a faite d'un système. Ce test sera donc virtuel.

Illustrons cette notion par un exemple, représenté sur le schéma ci-dessous. Supposons que notre objectif soit d'estimer la durée de fonte d'un glaçon dans un verre d'eau.

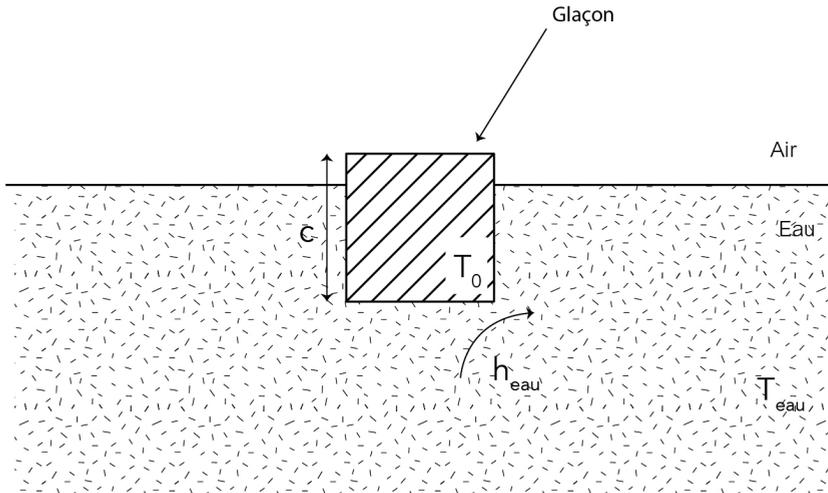


Figure 1.1 Le système étudié : un glaçon flottant dans un verre d'eau

Le système étudié ici sera donc le glaçon, c'est-à-dire le volume d'eau renfermé initialement dans le glaçon. Le reste de l'eau, contenu dans le verre, sera l'environnement du système. Nous allons construire une représentation du glaçon, en le simplifiant.

On considère que le glaçon échange par convection avec le reste de l'eau contenue dans le verre. En utilisant les lois physiques classiques de la thermique, nous pouvons supposer que la puissance thermique échangée sera

$$P_{\text{échangée}}(t) = 5h_{\text{eau}}(T_{\text{eau}} - T_0)c^2(t).$$

Avec : t le temps, h_{eau} le coefficient de convection thermique entre l'eau et le glaçon, T_{eau} la température d'eau, T_0 la température du glaçon et $c(t)$ la largeur du glaçon qui est encore gelée. Nous faisons ici l'hypothèse, entre autres, que les échanges thermiques avec l'air (face supérieure du glaçon) sont négligeables par rapport aux échanges avec l'eau; et nous simplifions le problème en supposant que les autres faces du glaçon sont entièrement en contact avec l'eau.

1.1 Qu'est-ce qu'un modèle ?

L'énergie thermique contenue dans le glaçon peut être approximée en

$$E_{\text{glaçon}}(t) = E_0 - L_{\text{fusion eau}} \rho_{\text{glace}} c^3(t).$$

Avec : E_0 l'énergie du glaçon une fois qu'il est fondu, $L_{\text{fusion eau}}$ l'enthalpie massique de changement d'état de l'eau de l'état liquide à solide, ρ_{glace} la masse volumique de la glace. Les lois physiques classiques nous permettent de dire que la puissance échangée totale va être égale à la variation d'énergie du système. Ainsi, nous pouvons écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{échangée}}(t) = 5h_{\text{eau}} (T_{\text{eau}} - T_0) c^2(t) \\ E_{\text{glaçon}}(t) = E_0 - L_{\text{fusion eau}} \rho_{\text{glace}} c^3(t) \\ \frac{\partial E_{\text{glaçon}}}{\partial t}(t) = P_{\text{échangée}}(t) \\ c(t_{\text{final}}) = 0 \end{array} \right.$$

Cet ensemble d'équations :

- ▶ est une représentation du système (le glaçon);
- ▶ est testable car il a une solution que nous pourrions calculer.

C'est un modèle !

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{\text{échangée}}(t) = 5h_{\text{eau}} (T_{\text{eau}} - T_0) c^2(t) \\ E_{\text{glaçon}}(t) = E_0 - L_{\text{fusion eau}} \rho_{\text{glace}} c^3(t) \\ \frac{\partial E_{\text{glaçon}}}{\partial t}(t) = P_{\text{échangée}}(t) \\ c(t_{\text{final}}) = 0 \end{array} \right.$$



Figure 1.2 Modèle mathématique vs réalité

Pour illustrer jusqu'au bout notre exemple, nous pouvons tester ce modèle sur une situation précise. Le modèle se résout analytiquement, et la solution de l'ensemble d'équations est (nous passons les détails du calcul au lecteur) :

$$t_{final} = \frac{3L_{fusion\ eau} \rho_{glace} c(t=0)}{5h_{eau} (T_{eau} - T_0)}$$

Avec t_{final} , le temps au bout duquel le glaçon est entièrement fondu.

Détaillons la situation que nous voulons tester :

$$\left\{ \begin{array}{l} c(t=0) = 2cm \\ T_{eau} = 20^\circ C \\ T_0 = 0^\circ C \\ h_{eau} = 250W / K / m^2 \\ L_{fusion\ eau} = 334\ kJ / kg \\ \rho_{glace} = 917\ kg / m^3 \end{array} \right.$$

Nous obtenons alors comme résultat à ce test $t_{final} \approx 12\ mn$

Nous avons réalisé l'essai réel pour le lecteur, et le temps trouvé est de 9 minutes, ce qui signifie que notre modèle présente un écart de +33 % par rapport à la réalité. Rien de surprenant ici, notre modélisation a été très simple, et nous avons négligé de nombreux facteurs.

Un corollaire important découlant de cette définition d'un modèle, est qu'il en existe toujours une infinité possible pour un même système. Si nous reprenons l'exemple du glaçon, le lecteur remarquera que nous aurions pu complexifier davantage la représentation du système (nous aurions alors un résultat *a priori* plus précis sur la durée de fonte). Nous aurions pu prendre en compte l'effet de la diminution et du changement de forme de la surface du glaçon sur la valeur de la puissance échangée entre l'eau et le glaçon, ou encore les phénomènes radiatifs entre le glaçon et les autres éléments environnants, qui sont non négligeables. Nous avons fait un *choix* de niveau de simplification de la réalité pour construire ce modèle. Ce choix doit dépendre de plusieurs facteurs que nous étudierons au chapitre 3.

1.2 Qu'est-ce qu'une simulation ?

Une **simulation** est l'action de faire un test avec un modèle.

En théorie, les notions de modèle et de simulation sont distinctes, puisque le modèle est un outil et la simulation est l'acte d'utiliser cet outil. Néanmoins ces