

La simulation du comportement des produits industriels

La simulation du comportement d'un produit industriel dans son environnement a pour objectif de prévoir le niveau de satisfaction du besoin. Pour cela, elle consiste à calculer l'évolution d'une ou plusieurs grandeur(s) physique(s), localisée(s) dans une partie donnée du produit, au cours d'une phase de vie donnée.

Conformément au cadre de la démarche scientifique en sciences de l'ingénieur (voir ressource « *La démarche scientifique dans la réalisation des produits industriels* ») nous supposons avoir préalablement identifié :

- Les objectifs de la simulation, c'est-à-dire les quantités physiques à calculer (qui définissent les performances à simuler),
- L'étendue spatiale de la simulation, c'est-à-dire la région matérielle dont le comportement doit être simulé. Dans la réalité, cette région peut se limiter à une partie du produit et/ou inclure une partie de son environnement (par exemple, lorsque l'on simule l'effet de l'écoulement de l'air sur une aile d'avion). Pour simplifier le propos, nous considérerons ici que cette région coïncide avec le produit, et l'appellerons donc simplement produit ;
- L'étendue temporelle de la simulation, c'est-à-dire l'intervalle de temps (qui coïncide généralement avec une ou plusieurs phase(s) de vie) au cours duquel le comportement doit être simulé.

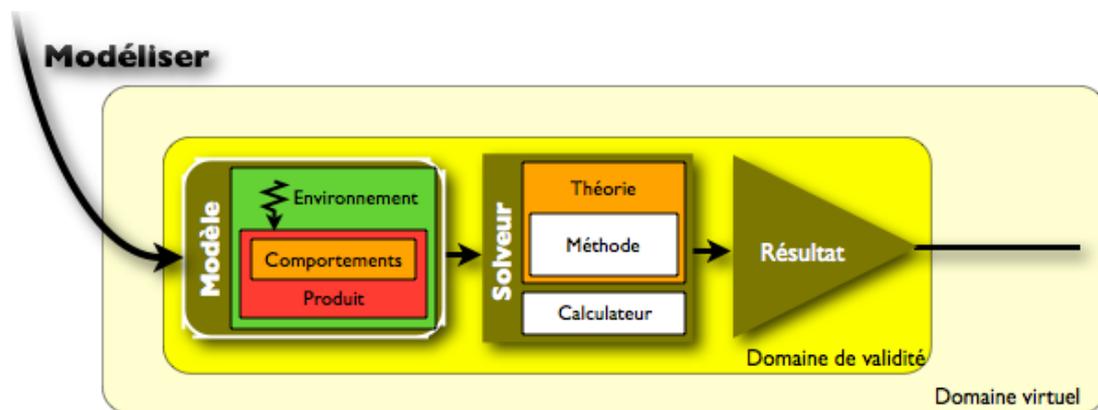


Figure 1 : Schéma synthétique des différentes étapes et des différents éléments d'une simulation.

Une fois ces éléments connus, la démarche suivie pour réaliser une simulation peut être formalisée en sept points (figure 1) :

1. Identifier les phénomènes physiques.
2. Choisir une théorie et des modèles de comportements.
3. Choisir un solveur.
4. Modéliser le produit selon la théorie.
5. Modéliser l'environnement du produit selon la théorie.
6. Calculer et en déduire le résultat.
7. Valider ou diagnostiquer.

Cette ressource décrit et illustre chacune de ces étapes.

1 - Identifier les phénomènes physiques

La simulation du comportement des produits industriels s'appuie sur des modèles. Pour choisir ces modèles, il faut avoir identifié les phénomènes physiques qui se produisent lors du fonctionnement. La liste de ces phénomènes étant potentiellement infinie, il est impossible de « tous » les modéliser et il faut donc les sélectionner en ne retenant que ceux qui peuvent avoir un effet sur la quantité physique recherchée.

Par conséquent, avant toute modélisation ou tout calcul, il faut se poser la question suivante : parmi tous les phénomènes physiques susceptibles de se produire au sein du produit, dans la phase de vie concernée, quels sont ceux qui peuvent avoir une influence sur la performance à déterminer ?

Généralement, une réponse partielle à cette question est donnée par l'objectif même de la simulation. Supposons par exemple que l'on cherche à calculer une contrainte ; nous savons que les contraintes sont une représentation des efforts intérieurs à la matière qui apparaissent lorsque celle-ci se déforme et qui, comme tout effort, s'équilibrent. Le simple énoncé de cet objectif (calculer une contrainte) permet donc de sélectionner des phénomènes qui seront modélisés soit par des lois d'une théorie, soit par des modèles de comportements (ces notions seront définies à l'étape suivante).

Néanmoins, il est nécessaire d'en savoir davantage : afin de choisir les lois et les modèles appropriés parmi tous ceux que l'on connaît, il faut avoir caractérisé les phénomènes de façon suffisamment précise. Par exemple, on est souvent amené à se poser quelques-unes des questions suivantes :

- Ces quantités physiques évoluent-elles au cours du temps ?
- Ces quantités physiques varient-elles dans l'espace ?
- Si oui, observe-t-on des particularités ou invariances géométriques, comme des symétries, des allures « planes » ou « de révolution » ... ?
- Observe-t-on une relation de proportionnalité entre deux ou plusieurs quantités physiques ?
- De quel « ordre de grandeur » sont les quantités physiques impliquées dans ces phénomènes ?
- ...

La réponse à toutes ces questions permettra de choisir une théorie et des modèles (définis aux étapes suivantes) pertinents. Pour y répondre, il faut obtenir suffisamment d'informations sur le fonctionnement du produit, et l'origine de ces informations dépend du cadre dans lequel la simulation est effectuée :

- Dans le cadre de la conception en bureau d'études, le produit n'existe pas encore, et ces informations proviennent donc de simulations ou d'essais antérieurs, ou de sources indirectes comme le retour d'expérience ;
- Dans le cadre de l'enseignement des sciences de l'ingénieur, les informations nécessaires sont généralement données à l'élève, sauf dans le cas d'un TP où il peut directement observer les effets des phénomènes concernés.

2 - Choisir une théorie et des modèles de comportements

Une fois les phénomènes identifiés, il faut les modéliser. Cela s'effectue dans le cadre d'une théorie, généralement complétée par des modèles de comportements.

2.1 - Choisir une théorie

Toutes les simulations s'appuient sur une théorie, c'est-à-dire un ensemble de postulats, lois, principes, théorèmes ... permettant de construire un modèle à partir de données et d'hypothèses initiales, puis d'exploiter ce modèle pour déterminer le résultat (notamment par le calcul). En sciences de l'ingénieur, cette théorie est généralement un domaine de la physique ou des sciences de l'information (ou un ensemble de domaines, dans le cas des simulations multi-physiques, voir ressource « *La simulation multi-physique* »).

Le choix d'une théorie est fortement lié à l'identification des phénomènes physiques, et obéit aux mêmes principes. Ainsi, ce choix dépend en premier lieu de l'objectif de la simulation : le calcul d'une contrainte nécessite une théorie appartenant à la mécanique des milieux continus, car c'est dans le cadre de cette théorie que cette grandeur est définie.

En outre, chaque théorie peut se décliner en plusieurs variantes caractérisées par la présence d'hypothèses simplificatrices plus ou moins nombreuses, qui permettent de simplifier les calculs mais réduisent leur domaine de validité. Par exemple, la mécanique des milieux continus peut être (quasi)statique ou dynamique, linéarisée en petites perturbations ou non, adaptée en 2D ou 1D de diverses façons... Le choix de ces hypothèses doit être effectué avec soin, en s'appuyant sur la caractérisation des phénomènes réalisée à l'étape précédente (en réalité, ces deux étapes sont généralement imbriquées, plutôt que séparées). Une simplification abusive conduit à un résultat non pertinent ; une complication inutile conduit à une simulation trop coûteuse.

Techniquement, chaque théorie définit un formalisme, c'est-à-dire une représentation mathématique des grandeurs physiques impliquées dans les phénomènes que l'on a identifiés ; les lois de la théorie modélisent ces phénomènes à l'aide de relations entre ces objets mathématiques. Le tout repose sur certaines hypothèses et possède des limitations, qui constituent le domaine de validité de la théorie.

Il est important de noter que :

- Le choix éclairé d'une théorie demande une connaissance approfondie de son domaine de validité, et notamment de ses hypothèses et limitations. Par exemple, la mécanique des solides indéformables ne permet de calculer des efforts de liaison que lorsqu'on l'applique à des modèles isostatiques : si l'objectif est un effort de liaison et si le modèle s'avère être hyperstatique, alors il faudra changer de théorie. De même, en mécanique des milieux continus, le choix d'une théorie volumique, des plaques/coques ou des poutres ne peut pas être fait de façon judicieuse en se basant uniquement sur la géométrie du produit : il doit tenir compte des hypothèses cinématiques et de la représentation des efforts propres à ces théories.
- Les techniques de discrétisation des milieux continus (éléments finis, différences finies...) introduisent elles aussi des hypothèses sur l'allure des champs, entraînant une modification de certaines lois physiques (par exemple, l'équilibre au sens des éléments finis n'est pas équivalent à l'équilibre d'un milieu continu). Elles peuvent donc entraîner des écarts importants avec la réalité si ces hypothèses ne sont pas pertinentes ;
- Pour les problèmes dépendant du temps, les techniques de discrétisation temporelles peuvent poser le même type de difficultés ;
- Toutes ces techniques de discrétisation ne se valent pas ; pour un problème donné, certaines techniques sont plus pertinentes (voir ressource « *Une technique de discrétisation dédiée à la simulation des vibrations moyennes fréquences* ») que d'autres et conduisent ainsi à des résultats plus précis et/ou des calculs moins coûteux.

2.2 - Choisir des modèles de comportements

Les lois de la théorie sont généralement complétées par des modèles de comportements. Il s'agit également de relations mathématiques qui modélisent des phénomènes. Cependant, contrairement aux lois, ces relations ne sont pas universelles : elles modélisent toujours le comportement d'un objet ou d'un élément particulier, et ont donc un domaine de validité bien plus restreint que celui de la théorie auxquelles elles appartiennent. On peut donner de nombreux exemples (figure 2) :

- En mécanique des milieux continus, on modélise le comportement d'un matériau par une relation entre contraintes et déformations (figure 2a) ;
- En mécanique des solides indéformables, on modélise le comportement d'une liaison par la forme du torseur cinématique admissible et/ou des actions mécaniques transmissibles (figure 2b) ;
- Dans un schéma électrique, on modélise le comportement d'un composant par une relation entre tension et intensité (figure 2c) ;
- Dans un schéma-bloc, on modélise le comportement d'une « boîte » par sa fonction de transfert, c'est-à-dire l'expression de la sortie en fonction de l'entrée (figure 2d)...

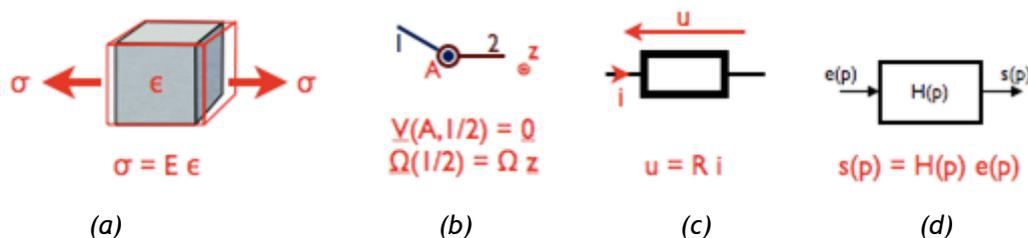


Figure 2 : Exemples de modèles de comportements : (a) d'un matériau en mécanique, (b) d'une liaison en cinématique, (c) d'un composant électrique, (d) d'une « boîte » dans un schéma-bloc.

Comme les théories, les modèles de comportements doivent être soigneusement choisis parmi tous ceux que l'on connaît, en fonction des phénomènes que l'on a préalablement caractérisés. Pour cette raison, le choix des modèles de comportements est généralement étroitement imbriqué avec l'identification des phénomènes décrite à l'étape précédente, de la même façon que pour le choix d'une théorie.

Remarquons que le formalisme employé ici distingue les « modèles de comportements » des « lois », mais qu'en pratique les deux termes sont souvent confondus : la « loi de Hooke », la « loi d'Ohm », la « loi des gaz parfaits » ... s'appliquent sous certaines limites à des milieux ou à des composants particuliers et sont donc, dans la terminologie de ce site, des modèles de comportements plutôt que des lois. Par ailleurs, la distinction entre ces deux concepts est parfois subjective : pour un étudiant n'utilisant que des modèles de matériaux élastiques, la « loi de Hooke » est une loi et l'élasticité est une théorie, tandis que pour un concepteur s'intéressant au comportement des matériaux au-delà de leur limite d'élasticité, la « loi de Hooke » n'est qu'un modèle parmi d'autres.

Dans tous les cas, le choix d'une théorie et de modèles de comportements est un premier pas vers la construction d'un problème mathématique dont la résolution, si elle est possible, conduira au résultat cherché.

3 - Choisir un solveur

La théorie et les modèles de comportements ne seront utilisables pour la simulation que si l'on dispose :

- D'une méthode, c'est-à-dire d'une liste d'opérations à effectuer, dont l'application permet de construire et de résoudre le problème mathématique défini par la théorie et les modèles, et conduit au résultat ;
- Et d'un calculateur, qui peut être un ordinateur ou un individu, qui applique la méthode et effectue les calculs.

L'ensemble constitué de la méthode et du calculateur qui l'applique est appelé solveur ; ce terme, synonyme de « logiciel de simulation », est étendu aux méthodes manuelles dans cette ressource, par souci de généralité.

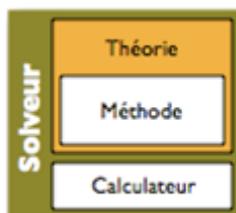


Figure 3 : Le solveur : une méthode définie dans le cadre de la théorie, et appliquée par un calculateur (i.e. un logiciel installé sur un ordinateur, ou un individu).

Pour mener la simulation, le concepteur doit choisir un solveur parmi ceux dont il dispose. Le solveur retenu doit être :

1. Compatible avec les objectifs de l'étude : certains solveurs ne permettent pas d'obtenir certains résultats (par exemple, certains logiciels de mécanique par éléments finis ne peuvent pas fournir les efforts de liaison avec le bâti) ;
2. Compatible avec la théorie et les modèles employés : par exemple, si l'on utilise une théorie et des modèles implicites (c'est-à-dire tels que l'objectif de la simulation soit une inconnue « non triviale » d'un système d'équations), alors il faudra choisir un solveur capable de résoudre ce système d'équations. Si de plus ces équations sont non-linéaires, alors il faudra choisir un solveur capable de résoudre des systèmes non-linéaires ...
3. D'usage peu coûteux pour la simulation envisagée, ce qui concerne aussi bien les solveurs informatiques (le coût dépend alors essentiellement des temps de calcul, de l'ergonomie et du prix des logiciels et matériels eux-mêmes) que les méthodes manuelles (le « coût » dépend alors surtout de la durée des calculs).

En outre, certains solveurs possèdent des paramètres réglables par l'utilisateur. Cela peut être le cas lorsque la théorie comporte :

- Une discrétisation temporelle : il faut alors choisir des pas de temps ;
- Des équations non-linéaires : sauf cas très particuliers, ces équations sont toujours résolues par des techniques itératives (méthodes de Newton, du point fixe...) et il faut alors choisir des seuils de convergence.

Les valeurs proposées par défaut conviennent généralement à la plupart des usages. Si néanmoins l'utilisateur est amené à régler lui-même ces paramètres, il est clair que cela demande quelques notions sur le fonctionnement des techniques concernées. Un mauvais choix peut mener à des résultats non pertinents et/ou à des coûts excessifs.

Enfin, certaines théories ne possèdent pas de méthode de résolution, et donc de solveur, qui soit valable dans leur domaine de validité entier. C'est par exemple le cas des différentes physiques des milieux continus : ces théories conduisent à des problèmes mathématiques dont la solution ne peut pas être « calculée », mais uniquement « devinée » dans certains cas, puis vérifiée. Dans le cas général, ces théories ne permettent pas d'aboutir à un résultat ; elles doivent donc être adaptées, par exemple par l'ajout d'une discrétisation.

4 - Modéliser le produit

Une fois le solveur choisi, il faut modéliser le produit et son environnement sous la forme requise par le solveur. Le point de vue retenu ici est celui de l'analyse des systèmes : le produit et son environnement sont vus comme un système, c'est-à-dire un ensemble de composants entre lesquels existent des interactions (figure 4).

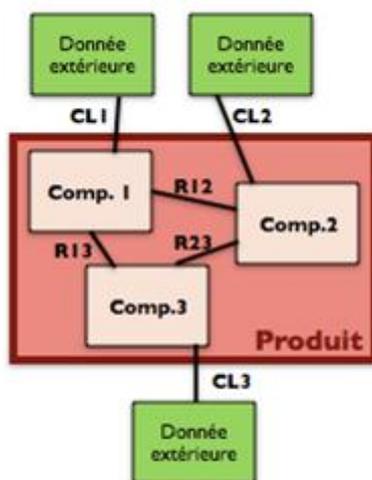


Figure 4 : Modélisation d'un produit et de son environnement par un système.

Le modèle du produit contient donc, entre autres, une information topologique : il caractérise une organisation en composants et en interactions. En fonction de la théorie et du solveur utilisés, il peut avoir plusieurs significations. Dans le cas d'une simulation de physique appliquée, le modèle du produit modélise généralement une géométrie : par exemple, un maillage d'éléments finis, une ligne moyenne pour un calcul de RdM, ou encore un ensemble de solides indéformables (figure 5).

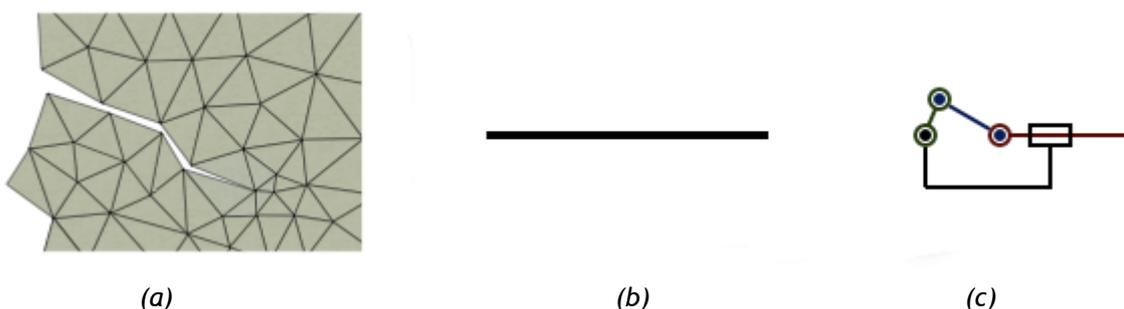


Figure 5 : Quelques exemples de modèles de produits en mécanique appliquée : (a) un maillage d'éléments finis, (b) la ligne moyenne d'une poutre, (c) un système de solides indéformables.

Dans d'autres cas (circuits électriques ou hydrauliques, simulations d'automatique, par exemple), il modélise plutôt une architecture : un réseau de « boîtes » reliées par des « fils » (figure 6).

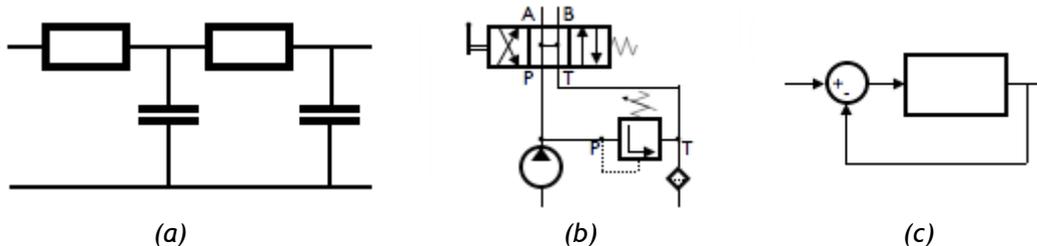


Figure 6 : D'autres exemples de modèles de produits :
 (a) circuit électrique, (b) circuit hydraulique, (c) schéma-bloc d'un asservissement.

Les composants du produit peuvent correspondre à des objets techniques « connus » (schémas électriques ou hydrauliques ...) ou à une délimitation choisie par le concepteur, géométrique (solides indéformables ...) ou logique (schémas-blocs ...). Ils sont généralement en nombre fini, sauf dans le cas particulier des théories des milieux continus où l'on considère une infinité de volumes infinitésimaux de dimensions très petites devant celles du produit.

Techniquement, la théorie affecte un certain nombre de grandeurs mathématiques à chaque composant. Les lois et les modèles de comportement se traduisent donc par des relations mathématiques entre plusieurs grandeurs qui, selon la théorie, peuvent caractériser :

- Soit un composant (exemples : relation de comportement d'un élément fini ou d'un volume infinitésimal, d'un composant électrique ou hydraulique, indéformabilité d'un solide, fonction de transfert dans un schéma-bloc...);
- Soit une interaction entre composants (exemples : équilibre des efforts et continuité des déplacements, liaison entre deux solides indéformables, lois des nœuds et des mailles, liens entre blocs...).

La délimitation des composants doit naturellement faire apparaître les grandeurs physiques que l'on souhaite calculer (si par exemple on veut calculer le couple fourni par un moteur au sein d'une transmission hydraulique complète, il est clair que la transmission ne pourra pas être modélisée d'un seul bloc). En outre, dans le cas des problèmes physiques discrétisés (par éléments finis, différences finies, volumes finis...), le choix du découpage influe sur la précision du résultat, et également sur le coût des calculs : il résulte donc d'un compromis qui doit être abordé avec soin.

5 - Modéliser l'environnement

Une fois le produit modélisé, il est nécessaire de modéliser l'interaction du produit avec l'extérieur car c'est de cette interaction que résulte le fonctionnement. Par « extérieur », on entend ce qui se trouve en dehors des limites spatiales de la simulation et, le cas échéant, ce qui se trouve avant le début de la simulation (effet de l'histoire).

Ces interactions sont modélisées par des relations entre des grandeurs mathématiques caractérisant le produit et des grandeurs caractérisant l'extérieur ou l'état initial. Conformément au point de vue de l'analyse fonctionnelle, les grandeurs extérieures sont supposées partiellement connues. Le formalisme employé est celui de la théorie utilisée, et ces relations peuvent prendre des formes très diverses. Par exemple (figure 7) :

- Dans un calcul de mécanique des milieux continus, il s'agira de conditions aux limites (écrites en contraintes et/ou en déplacements), de chargements volumiques et, le cas échéant, de conditions initiales ;

- Dans un calcul de mécanique des solides indéformables, il s'agira d'efforts extérieurs (écrits sous forme de torseurs), d'éventuels mouvements imposés, et de liaisons avec le « bâti » (c'est-à-dire le référentiel de l'étude, supposé extérieur) ;
- Dans un calcul d'asservissements ou de logique séquentielle, il s'agira d'entrées telles que des commandes, des perturbations... ainsi que d'états initiaux, le cas échéant.

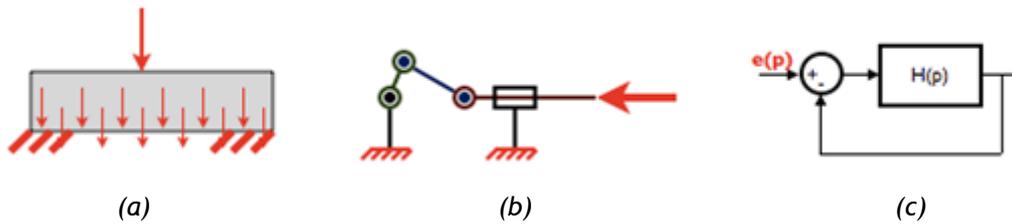


Figure 7 : Exemples de modèles de l'extérieur : (a) en mécanique des milieux continus, (b) en mécanique des solides indéformables, (c) dans un schéma-bloc.

La valeur des données extérieures et initiales peut être issue d'essais, de simulations précédentes, ou avoir été spécifiée dans l'analyse fonctionnelle (par la caractérisation des EME et des phases de vie). Une fois ces données connues, il devient possible de mener la simulation indépendamment de tout ce qui se passe autour et de tout ce qui a pu se passer avant : c'est grâce à l'emploi de conditions aux limites et de conditions initiales que l'on peut modéliser les produits industriels par des modèles simples. Signalons néanmoins que la modélisation de l'extérieur est généralement une tâche ardue, et est souvent une cause essentielle des écarts observés entre les résultats de la simulation et la réalité.

6 - Calculer

Une fois la modélisation terminée, la phase de calcul proprement dite commence : au cours de cette phase, le solveur applique la méthode pour calculer le résultat demandé à partir des modèles. Toutes les méthodes de simulation comportent trois grandes étapes (figure 8) :

1. Pré-traitement : le solveur lit les données correspondant aux modèles du produit, de l'extérieur et des comportements, les traduit dans le bon formalisme si nécessaire, et construit un problème mathématique à partir de ces données (en général, un ou plusieurs systèmes d'équations) ;
2. Résolution : le solveur résout les équations ; le résultat est une représentation mathématique brute de l'état du produit sous l'effet de l'extérieur, dans le formalisme de la théorie ;
3. Post-traitement : à partir de la solution mathématique, le solveur déduit les résultats demandés par l'utilisateur et les lui communique.

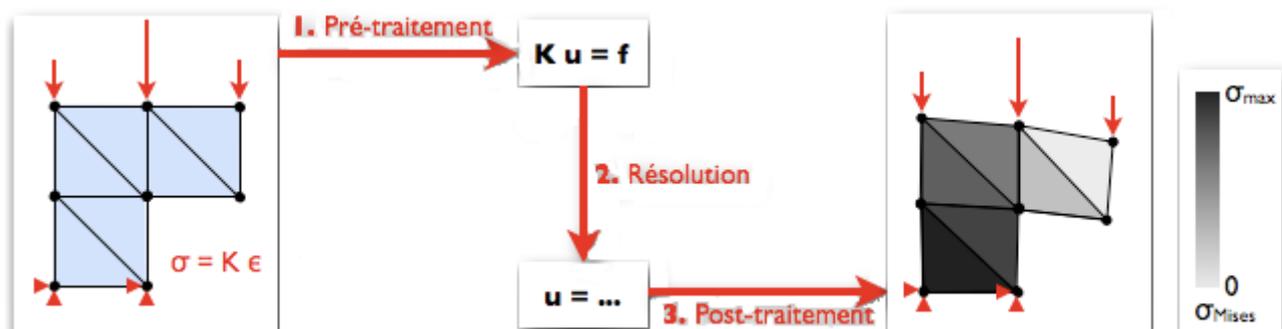


Figure 8 : Les trois étapes des calculs dans une simulation : pré-traitement, résolution et post-traitement.

Dans les simulations informatiques, ces trois étapes sont généralement bien distinctes ; il est d'ailleurs possible, à un niveau avancé, d'utiliser des logiciels différents pour chacune de ces trois étapes. Par exemple, dans une simulation par éléments finis, la réalisation du maillage, le calcul proprement dit et la visualisation des contraintes peuvent très bien faire appel à trois logiciels différents (bien qu'en formation il soit beaucoup plus pratique de n'en utiliser qu'un seul !).

Dans les simulations manuelles, ces étapes sont généralement adaptées car les concepteurs expérimentés (ou les bons élèves !) peuvent choisir, parmi les différents théorèmes basés sur les lois de la théorie, celui qui amènera le plus rapidement au résultat. Ainsi, on ne calcule pas forcément la solution complète du problème mathématique, mais uniquement ce qui est nécessaire pour arriver au résultat : les étapes 2 et 3 sont en quelque sorte regroupées. L'utilisation des théorèmes énergétiques en mécanique (mécanique des solides indéformables, RdM ...) et des théorèmes de l'électricité sont deux exemples courants.

7 - Diagnostiquer

La dernière étape, essentielle, est de s'interroger sur la pertinence du résultat, en se demandant si celui-ci correspond bien à la réalité. Cela vaut aussi bien pour les simulations en bureau d'études que pour les applications pédagogiques.

Pour cela, l'idée est de calculer l'écart par rapport à un résultat de référence, réputé plus fiable, que l'on a obtenu d'une autre manière (figure 9). Ce résultat peut être obtenu :

- Sur le produit en utilisation réelle (ce qui s'effectue généralement a posteriori, dans le cadre du retour d'expérience),
- Par un essai,
- Ou par une autre simulation.

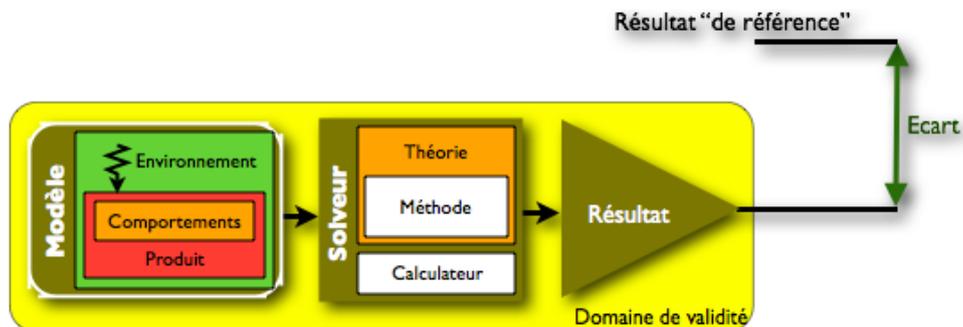


Figure 9 : La validation ou le diagnostic d'une simulation à l'aide d'une référence.

Si cet écart est suffisamment faible, on dit que la simulation est validée par rapport à la référence ; si cet écart est trop important, il faut alors poursuivre le diagnostic en analysant les causes de cet écart et en agissant pour les corriger. Pour cela, il faut passer en revue tous les éléments de la simulation afin de localiser les sources potentielles de l'écart (figure 10).

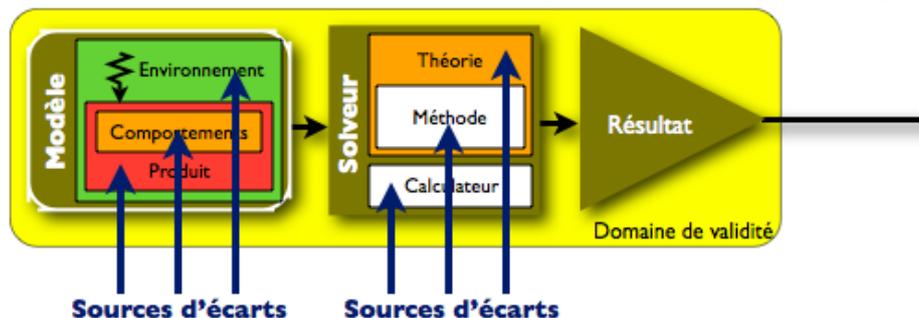


Figure 10 : Le diagnostic des sources potentielles d'écart dans une simulation.

Ces sources d'écarts peuvent provenir d'un élément de la simulation ou, plus fréquemment, d'un conflit entre plusieurs éléments, entraînant un non-respect du domaine de validité de la simulation. Les principales causes pouvant conduire à des écarts excessifs sont :

- Une mauvaise identification des phénomènes impliqués dans le fonctionnement ;
- Une modélisation non pertinente vis-à-vis des phénomènes identifiés ; cela peut concerner le choix de la théorie, ou le choix des modèles au sein de cette théorie (comme dans l'exemple des écarts dus à la discrétisation) ;
- Des contradictions entre les différents éléments, c'est-à-dire le choix d'un modèle non compatible avec les hypothèses de la théorie (par exemple, un modèle ne pouvant être en équilibre dans le cadre de la statique des solides), ou d'une méthode non compatible avec la modélisation (c'est-à-dire incapable de trouver la solution du problème mathématique) ;
- Des erreurs de calcul, informatiques (bugs, erreurs de troncature...) ou manuelles.

Les deux premières causes sont inductives et découlent le plus souvent d'un manque d'expérience et/ou de connaissances, tandis que les deux dernières sont déductives et découlent d'une mauvaise application de règles logiques.

8 - Bilan

La figure 11 récapitule l'ensemble des éléments intervenant dans la simulation.

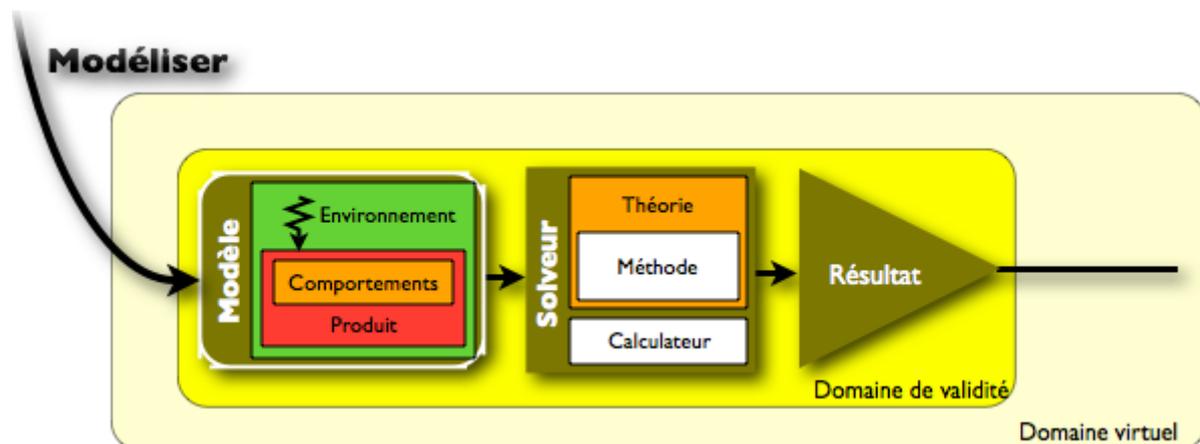


Figure 11 : Récapitulatif des différents éléments intervenant lors d'une simulation.