

La démarche scientifique dans la réalisation des produits industriels

école
normale
supérieure
paris-saclay

Lionel GENDRE - Jean-Marie VIRELY

Edité le 30/01/2013

Cette ressource présente les différents aspects de la démarche scientifique appliquée à la prévision du comportement d'un produit industriel, et s'intéresse notamment à deux approches largement employées : la simulation et l'essai. L'articulation de ces deux approches est présentée dans le cadre de la conception en bureau d'études, et également dans le cadre de la formation des étudiants en sciences de l'ingénieur.

1 - Le processus de réalisation et la démarche scientifique

La réalisation des produits industriels fait largement appel à la démarche scientifique, et ce pour de nombreux aspects : techniques, économiques, organisationnels...

Dans cette ressource, nous nous intéressons principalement aux aspects techniques liés à la réalisation du produit, qui regroupent la conception et la fabrication. Schématiquement, le processus de réalisation peut être découpé de la façon suivante :

- L'élaboration du cahier des charges fonctionnel,
- L'étude,
- La réalisation de prototypes,
- la mise au point produit-process,
- l'industrialisation.

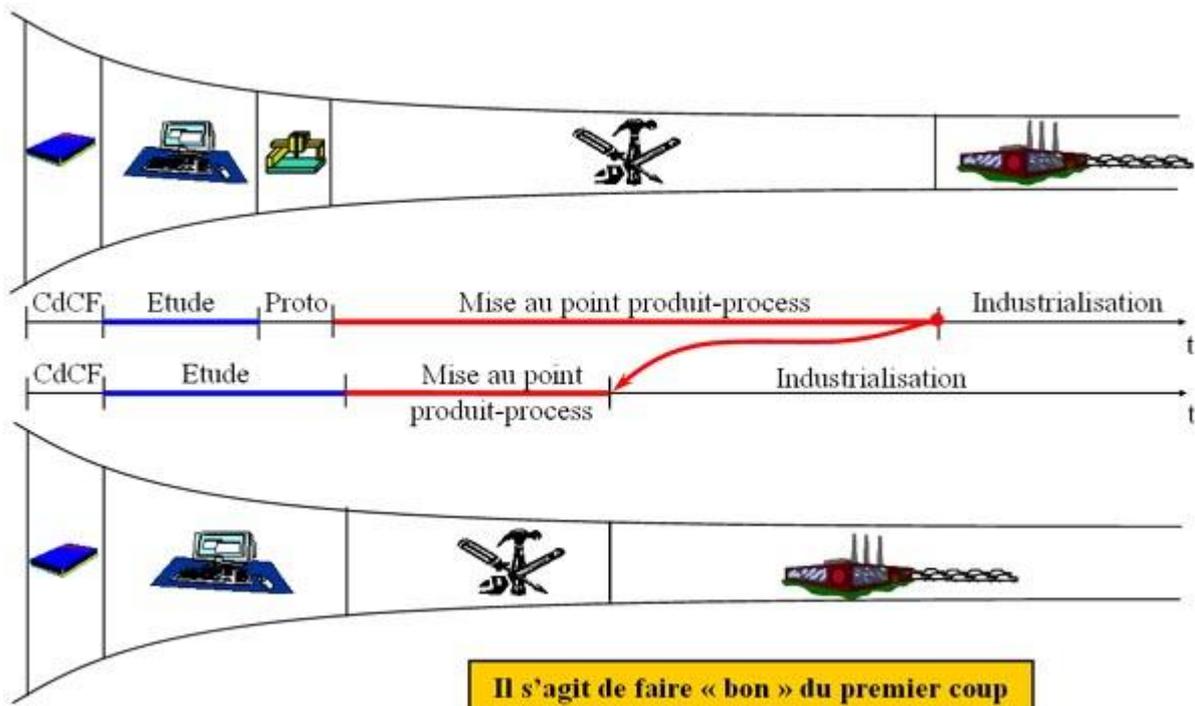


Figure 1 : Schématisation du processus de réalisation d'un produit industriel, il y a quelques décennies (en haut) et de nos jours (en bas).

La durée accordée à chacune de ces étapes a varié au cours des dernières décennies (figure 1). Avant, la réalisation de prototypes physiques était systématique, et suivie d'une longue phase de mise au point faisant appel à des essais sur ces prototypes. De nos jours, des moyens et méthodes de calcul performants permettent de remplacer une partie de ces essais par des simulations numériques. Cette évolution a aidé les industriels à satisfaire un de leurs besoins : la réduction des délais de conception afin de diminuer les coûts.

Or, essais et simulations sont des approches scientifiques. La recherche, au nom de la réduction des coûts, d'un équilibre raisonné entre ces deux approches nécessite de bien connaître leurs particularités et leur complémentarité, c'est-à-dire de bien maîtriser la démarche scientifique dans le cadre de la réalisation des produits industriels. Qui plus est, la nécessité de « faire bon du premier coup » impose de démontrer la pertinence des résultats obtenus par ces approches, et ce dès le stade de l'étude c'est-à-dire bien avant l'existence physique du produit.

2 - Analyse fonctionnelle et approches scientifiques

Dans cette ressource, nous nous plaçons dans le contexte de l'analyse fonctionnelle d'un produit industriel en cours de réalisation, effectuée dans le but de vérifier ses performances. Cette méthodologie consiste à modéliser les exigences auxquelles sont soumises les grandeurs physiques caractérisant le produit et son environnement lors de l'usage du produit, selon deux grands principes :

- Pour que le client soit satisfait, les grandeurs physiques caractérisant l'environnement du produit doivent remplir certaines conditions, modélisées par l'analyse fonctionnelle du besoin et caractérisées dans les critères des fonctions de service (voir ressource « *Analyse Fonctionnelle du besoin* »);
- Pour que le produit fonctionne, les grandeurs physiques caractérisant le produit lui-même doivent elles aussi remplir certaines conditions (les conditions de fonctionnement), modélisées par l'analyse fonctionnelle technique et caractérisées dans les critères des fonctions techniques (voir ressource « *Analyse Fonctionnelle du besoin* »).

Il faut donc déterminer, pour chacun de ces critères, les valeurs réalisées par le (futur) produit, nommées performances réalisées, et les comparer aux performances attendues ; c'est dans cette détermination que les approches scientifiques interviennent.

Dans cette ressource, nous supposons que l'analyse fonctionnelle a déjà été faite : les quantités à déterminer sont donc identifiées. Cette identification est importante car comme nous allons le voir par la suite, les activités scientifiques demandent de formuler des hypothèses, et donc d'effectuer des choix, qui dépendent en premier lieu des objectifs à atteindre. En outre, nous considérons que les études à mener ont déjà été délimitées dans l'espace et dans le temps et nous supposons donc connus :

- La partie du produit dont le comportement doit être déterminé (dont la délimitation s'appuie sur l'analyse des systèmes, qui consiste à décomposer le produit en composants) ; dans cette ressource, cette partie est simplement appelée produit dans un souci de simplicité ;
- L'intervalle de temps dans lequel le comportement doit être déterminé (dont la délimitation s'appuie sur l'analyse du cycle de vie, qui consiste à décomposer l'histoire du produit en phases de vie) ; dans cette ressource, cet intervalle est simplement appelé phase de vie dans un souci de simplicité.

En pratique, ces délimitations résultent d'un compromis entre le coût de l'étude (plus le domaine est étendu, plus l'étude est coûteuse) et l'information disponible (conformément au point de vue de l'analyse fonctionnelle, tout ce qui est antérieur ou extérieur à l'étude doit avoir été caractérisé).

3 - Utilisation réelle, essais et simulations

3.1 - Le produit dans son domaine d'utilisation

L'objectif du concepteur est de prévoir ce que sera le comportement du produit lors de son utilisation réelle (le terme « utilisation » doit être pris au sens large : il peut très bien s'appliquer à des phases de vie comme la fabrication ou la maintenance). L'environnement du produit au cours de la phase de vie considérée définit ce que l'on appelle son domaine d'utilisation ; ce domaine appartient au domaine réel (ou domaine physique), par opposition au domaine virtuel que nous définissons ci-dessous.

Le point de vue de l'analyse fonctionnelle est que le produit interagit avec son environnement, ce qui entraîne une modification de certaines grandeurs physiques pouvant caractériser soit l'environnement, soit le produit lui-même. Une telle modification est appelée réponse du produit. La tâche du concepteur est de déterminer les réponses, ou du moins celles qui font partie des objectifs de l'étude, afin de s'assurer que les performances réalisées seront bien conformes aux performances attendues.

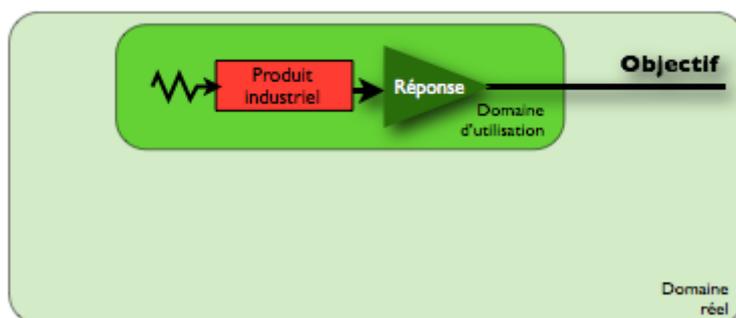


Figure 2 : L'objectif : prévoir la réponse du produit dans son domaine d'utilisation.

3.2 - Les approches scientifiques : simulations et essais

Malheureusement, au stade de l'étude, le produit et son domaine d'utilisation n'existent pas encore. Il faut donc essayer de prévoir les performances réalisées à partir des informations dont on dispose.

Il existe deux grandes approches scientifiques, complémentaires, permettant d'atteindre cet objectif : la simulation (ou « simulation virtuelle »), généralement basée sur une modélisation mathématique, et l'essai (ou mesure, ou « simulation physique »). Ces deux approches consistent à tenter de reproduire, dans des circonstances différentes, le produit et son interaction avec l'environnement, afin d'accéder à la réponse.

La simulation (dans le domaine virtuel)

Une première possibilité est de modéliser le produit et son environnement à l'aide d'objets mathématiques définis dans le cadre d'une théorie, appelés modèles. A partir de la théorie et des modèles, on peut ensuite calculer l'évolution des grandeurs physiques modifiées par le produit sous l'effet des sollicitations extérieures. Ce calcul conduit à la « réponse théorique » du produit, nommée résultat de la simulation ou encore performance simulée.

Ces représentations mathématiques évoluent dans ce que l'on nomme le domaine virtuel, par opposition au domaine réel, ou domaine de la simulation.

L'essai (dans le domaine réel)

L'autre possibilité est de réaliser un prototype ou une maquette du produit, de le placer dans des conditions reproduisant au mieux l'environnement réel du produit dans la phase de vie considérée, et d'équiper le tout d'instruments de mesure (ce que l'on appelle « concevoir une expérience »). Il est alors possible de mesurer les grandeurs physiques caractéristiques de la réponse, et ainsi de déterminer la performance mesurée.

L'expérience s'effectue dans le domaine réel, mais hors du domaine d'utilisation : l'environnement expérimental et l'environnement d'utilisation ne sont pas les mêmes, et la maquette n'est pas non plus identique au (futur) produit industrialisé, ni dans l'état qui sera le sien lors de la phase de vie considérée.

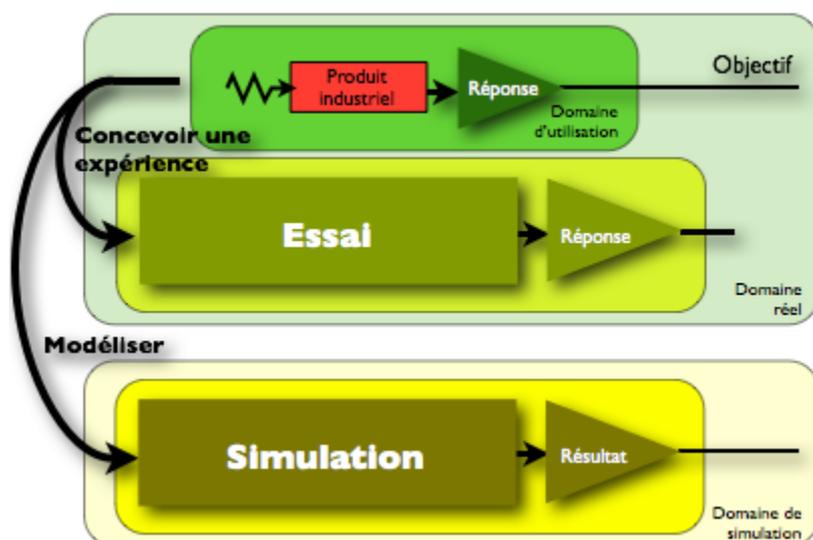


Figure 3 : Les différents domaines : réel (utilisation et expérimentation) et virtuel (simulation).

3.3 - Valider la performance... et valider la simulation

L'objectif du concepteur est de valider une performance du produit, c'est-à-dire de s'assurer que la performance réalisée sera bien conforme à la performance attendue. Parmi les moyens permettant d'atteindre cet objectif, les entreprises tendent à privilégier les simulations par rapport aux essais afin de réduire les délais et les coûts de conception. Le concepteur va donc déterminer l'écart entre la performance simulée et la performance attendue (en rouge sur la figure 4) : si cet écart est suffisamment faible, la performance est dite validée.

Cependant, cette démarche présuppose que les résultats de la simulation sont pertinents, c'est-à-dire proches de la réponse qu'aura le produit industriel dans son domaine d'utilisation. Puisque le produit n'existe pas encore, la seule source d'informations dont dispose le concepteur est l'expérimentation sur des maquettes ou prototypes. Le concepteur est donc amené à réaliser des essais pour valider les simulations correspondantes par rapport à ces essais, en déterminant l'écart entre la performance simulée et la performance mesurée (en bleu sur la figure 4). Naturellement, cette démarche présuppose à son tour que les conditions de l'essai sont représentatives de l'utilisation réelle...

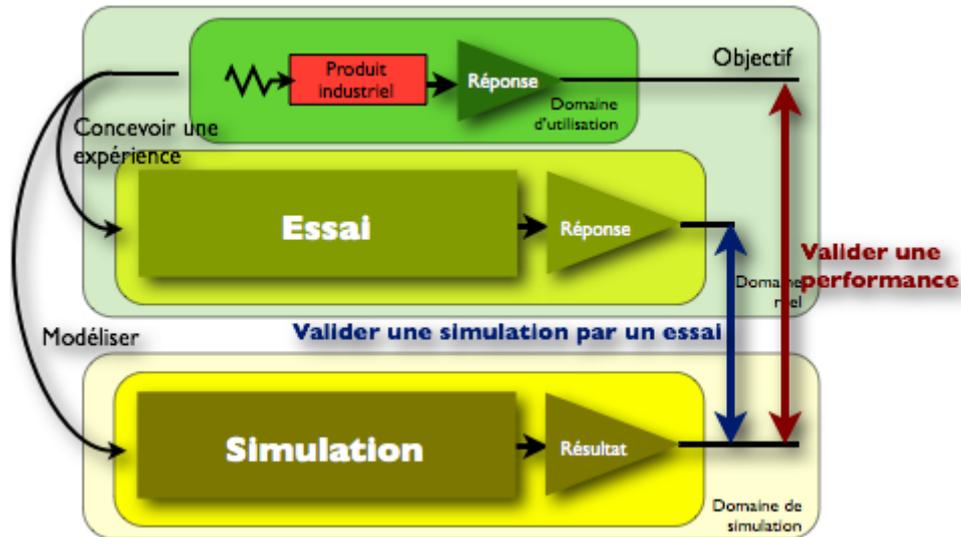


Figure 4 : Ecart, diagnostic et validation.

Dans les deux cas, l'échec d'une validation appelle un diagnostic : si l'écart est trop élevé pour être acceptable, il faut en rechercher les causes puis les corriger. Dans cette ressource, nous nous intéressons tout particulièrement au diagnostic d'un écart entre une simulation et un essai. Cette démarche est en effet très employée dans la conception des produits industriels, et également dans un contexte pédagogique pour l'apprentissage des sciences de l'ingénieur. Ces deux usages sont différents et sont expliqués plus en détail dans la suite de cette ressource.

4 - La modélisation et la simulation

Ce paragraphe donne un aperçu de la démarche suivie lors de la modélisation et de la simulation ; un exposé plus détaillé en est donné dans la ressource « *La simulation du comportement des produits industriels* ».

Comme nous l'avons vu précédemment, nous supposons ici que l'objectif de l'étude est connu, et que l'étendue spatiale (composants) et l'étendue temporelle (phases de vie) des phénomènes à simuler sont eux aussi connus. La modélisation et la simulation constituent alors une démarche hypothético-déductive, qui comporte les étapes suivantes :

1. Identifier les phénomènes physiques mis en œuvre dans le produit qui ont une influence sur le résultat demandé.
2. Choisir une théorie et des modèles de comportement permettant de modéliser ces phénomènes pour atteindre le résultat demandé.
3. Choisir un solveur (i.e. un logiciel ou une méthode de simulation) compatible avec les deux points précédents.
4. Modéliser le produit sous la forme demandée par le solveur.
5. Modéliser l'environnement du produit au cours de la phase de vie concernée, sous la forme demandée par le solveur et le modèle du produit.
6. Calculer (ou lancer le calcul) et en déduire le résultat.
7. Valider ou diagnostiquer, c'est-à-dire estimer l'écart avec la performance "réellement" réalisée et, si nécessaire, analyser les causes de cet écart et agir pour le réduire.

Les différents choix faits au cours des étapes 2 à 5 conduisent à introduire de nombreuses hypothèses plus ou moins explicites. Il est important de s'assurer que ces hypothèses sont pertinentes vis-à-vis de la réalité (étape 1) d'une part, et non contradictoires d'autre part, faute

de quoi le résultat a peu de chances d'être représentatif de la réalité. Le choix des différents éléments est donc soumis à un ensemble de restrictions, nommé domaine de validité de la simulation.

D'autre part, le calcul (étape 6) est déductif, et doit donc obéir à des règles logiques : si ces règles ne sont pas respectées, le résultat sera « faux ». Cela peut arriver aussi bien dans les calculs informatiques que dans les calculs manuels.

Dans le cas (le plus fréquent) où l'on ne dispose pas d'un résultat expérimental de référence, il faudra donc estimer les contributions du domaine de validité et des erreurs de calculs à l'écart entre simulation et réalité. Cette estimation peut prendre la forme d'un intervalle de confiance, d'un écart-type ... bien que dans les faits, les bureaux d'études manquent de méthodes simples et fiables permettant de fournir des estimations chiffrées. Souvent, les concepteurs se contentent donc de fournir un résultat « nominal » et, conscients des limites de cette approche, de se donner des coefficients de sécurité généralement issus du retour d'expérience.

La figure 5 schématise l'ensemble des étapes et des constituants de la simulation.

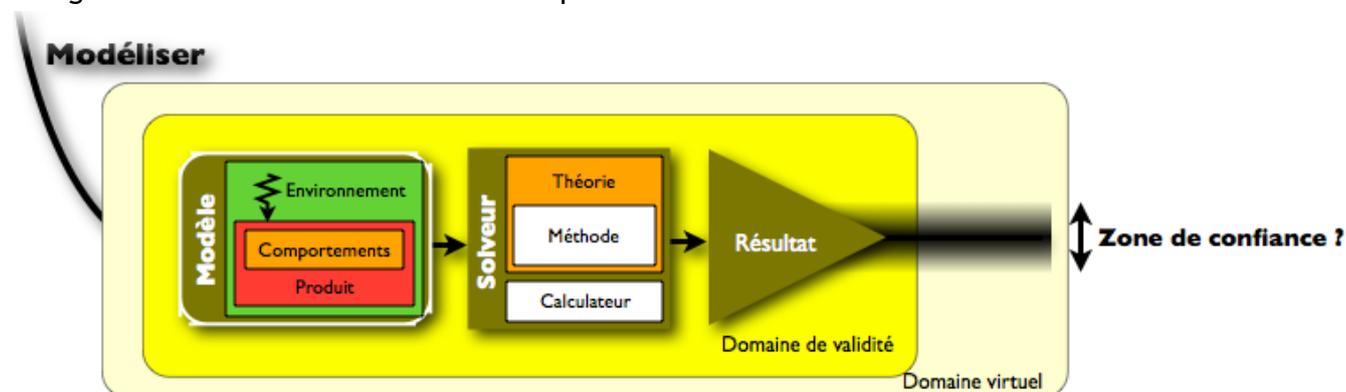


Figure 5 : Les étapes et les constituants d'une simulation.

Le formalisme de la figure 5 présente l'avantage que les différents constituants du processus y apparaissent de façon claire et concise, ce qui permet une communication simple ; l'inconvénient est que cette concision entraîne naturellement l'impossibilité de tout retranscrire.

5 - L'expérimentation

Ce paragraphe est un aperçu de la démarche suivie lors de l'expérimentation. Là encore, les grandeurs physiques à déterminer et l'étendue spatiale et temporelle de l'expérience sont supposés connus.

Contrairement à la simulation, la démarche n'est pas hypothético-déductive à proprement parler : la construction d'un dispositif expérimental repose bien sur une forme d'hypothèses, mais le résultat est obtenu à l'aide d'une observation dans le domaine physique (la mesure), au lieu d'être issu d'un raisonnement déductif dans le domaine virtuel (le calcul). Il est cependant possible d'établir un parallèle entre les deux démarches, et cela peut s'avérer très utile comme nous le verrons dans la suite de cette ressource.

Nous proposons donc les étapes suivantes :

1. Identifier les phénomènes physiques mis en œuvre dans le produit qui ont une influence sur le résultat demandé.
2. Choisir un principe expérimental, c'est-à-dire un ensemble de phénomènes similaires qui auront le même effet tout en permettant de mesurer la réponse.

3. Choisir une instrumentation (i.e. des capteurs et le reste de la chaîne d'acquisition) compatible avec les deux points précédents.
4. Réaliser le produit, généralement sous la forme d'une maquette ou d'un prototype, conformément aux exigences de l'expérience.
5. Réaliser l'environnement, c'est-à-dire mettre en place l'ensemble des excitateurs, capteurs... autour du produit et les mettre en marche.
6. Mesurer (ou lancer l'acquisition) et en déduire la réponse.
7. Valider ou diagnostiquer, c'est-à-dire estimer l'écart avec la réponse dans le domaine d'utilisation et, si nécessaire, analyser les causes de cet écart et agir pour le réduire.

Tout comme pour les simulations, la confiance que l'on accordera au résultat dépend :

- De la pertinence des choix effectués aux étapes 2 à 5 vis-à-vis des conditions d'utilisation réelles (identifiées à l'étape 1) ainsi que de la compatibilité des divers éléments : l'expérience possède elle aussi un domaine de validité ;
- Des erreurs de mesures (étape 6), et notamment celles qui sont inhérentes à l'instrumentation ; celles-ci sont généralement non négligeables.

Là encore, le concepteur est généralement amené à estimer l'impact de ces 2 facteurs sur l'écart entre la réponse mesurée et la réponse en cours d'utilisation. Cette estimation, qui prend généralement la forme d'intervalles de confiance, est une pratique fréquente chez les expérimentateurs, beaucoup plus que chez les théoriciens.

Comme pour les simulations, cette démarche est formalisée par un schéma qui regroupe tous les constituants de l'expérience, voir figure 6.

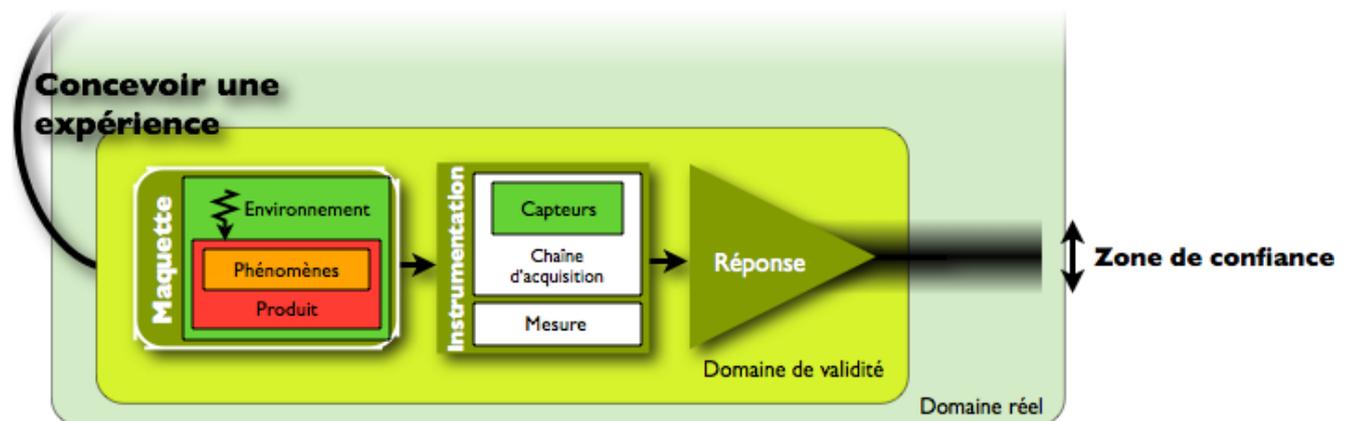


Figure 6 : Les étapes et les constituants d'un essai.

6 - L'articulation des simulations et des essais : validations et diagnostics

Comme indiqué précédemment, les approches présentées aux deux paragraphes précédents sont couramment associées : des essais ciblés sont réalisés pour valider les résultats des simulations et, en cas d'échec, analyser et corriger les causes des écarts observés. L'intérêt de cette pratique provient du fait que l'essai et la simulation sont des démarches :

- Comparables, en ce sens que tous deux consistent à construire une représentation du réel reposant sur des hypothèses et à en tirer un résultat,
- Mais aussi complémentaires car l'essai repose sur une observation (physique) tandis que la simulation repose sur une déduction logique (virtuelle) : les données de départ et les points de vue ne sont pas les mêmes.

Le diagnostic est donc un bon moyen de « nourrir » la simulation en confrontant les modèles à la réalité afin de les rendre plus représentatifs. A ce titre, il est couramment utilisé dans le cadre de la conception en bureau d'études, ainsi que dans le cadre de l'apprentissage des sciences de l'ingénieur. Les deux démarches sont distinctes.

6.1 - Le diagnostic dans la conception d'un produit industriel

Dans le cadre de la conception d'un produit industriel, l'objectif des activités scientifiques est d'obtenir un résultat correct, c'est-à-dire une performance simulée représentative de la réalité, afin de la confronter à la performance attendue (figure 7). L'entreprise s'appuie pour cela sur les savoirs et les savoir-faire des concepteurs. La principale difficulté de la tâche est que le produit et son environnement n'existent pas encore, et les phénomènes mis en œuvre peuvent être compliqués : il n'est pas donc pas évident d'obtenir les informations permettant de choisir des théories et des modèles représentatifs de la réalité.

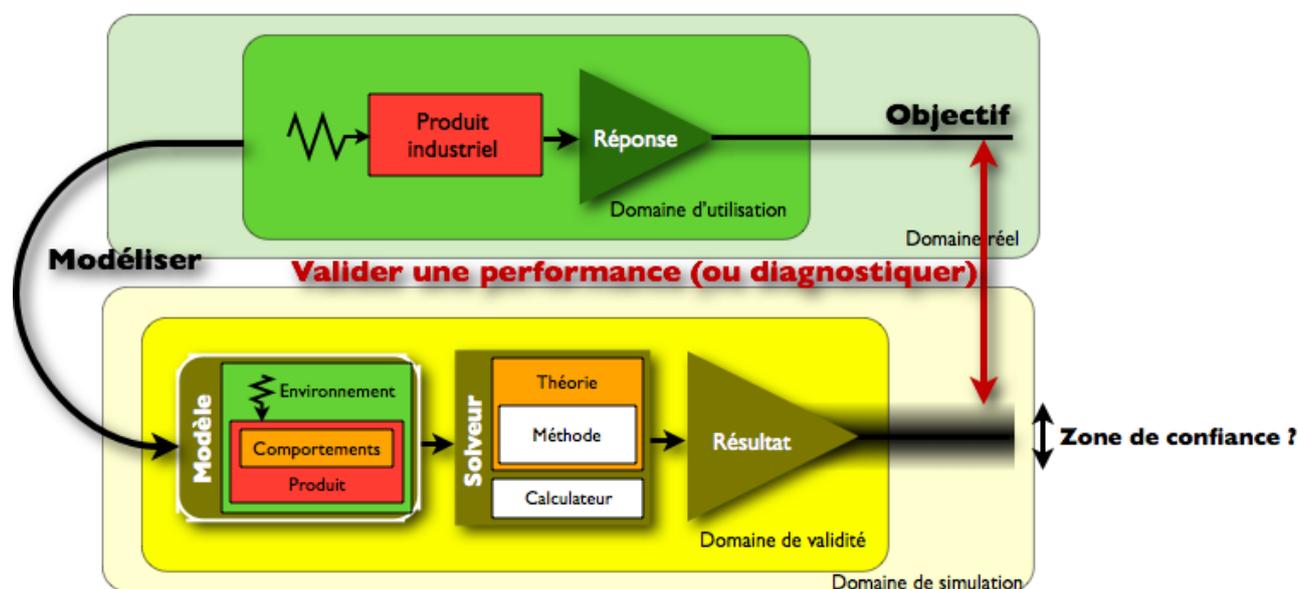


Figure 7 : Le diagnostic dans la conception d'un produit industriel : l'objectif est de réduire l'écart entre la performance attendue et la performance réalisée, prédite par la simulation.

Dans ce contexte, l'expérimentation est utilisée avec un double objectif :

- Comme source d'informations a priori, permettant de guider la modélisation ;
- Comme moyen de contrôle a posteriori, permettant de vérifier la pertinence des simulations (validation) et de l'améliorer si besoin (diagnostic).

Compte tenu du caractère onéreux des essais, et afin de remplir ces deux objectifs à moindre coût, les industriels définissent des campagnes d'essais ciblées selon des stratégies guidées par le retour d'expérience, la réglementation...

De façon générale, une tendance largement suivie de nos jours est de multiplier les essais locaux sur les matériaux, les composants, les assemblages simples... afin de bien caractériser le comportement de ces derniers dans toutes leurs phases de vie, puis d'en tirer des modélisations robustes permettant d'effectuer des simulations globales dignes de confiance, et donc de « faire bon du premier coup ».

La validation finale est ensuite effectuée a posteriori, sur le produit industriel lui-même : elle peut reposer sur des essais imposés par la réglementation (comme en aéronautique ou en génie civil) voire sur l'utilisation réelle du produit (comme dans le cas d'un lanceur spatial).

6.2 - Le diagnostic pour l'apprentissage des sciences de l'ingénieur

Le diagnostic est également utilisé en formation, avec un objectif différent, et dans un contexte lui aussi différent. En effet, en formation, la détermination d'une performance simulée n'est pas une fin, mais un moyen ; de façon générale, l'objectif est d'amener les élèves à être capables de simuler le comportement d'un produit, et les essais et simulations sont utilisés au sein d'activités pédagogiques visant cet objectif (ou, plus précisément, une des compétences intermédiaires qui le composent).

Le diagnostic est typiquement employé dans des activités de travaux pratiques. Ces TP consistent à réaliser un essai et une simulation portant sur la même grandeur physique, et à comparer les deux résultats en menant une analyse critique des écarts (voir figure 8).

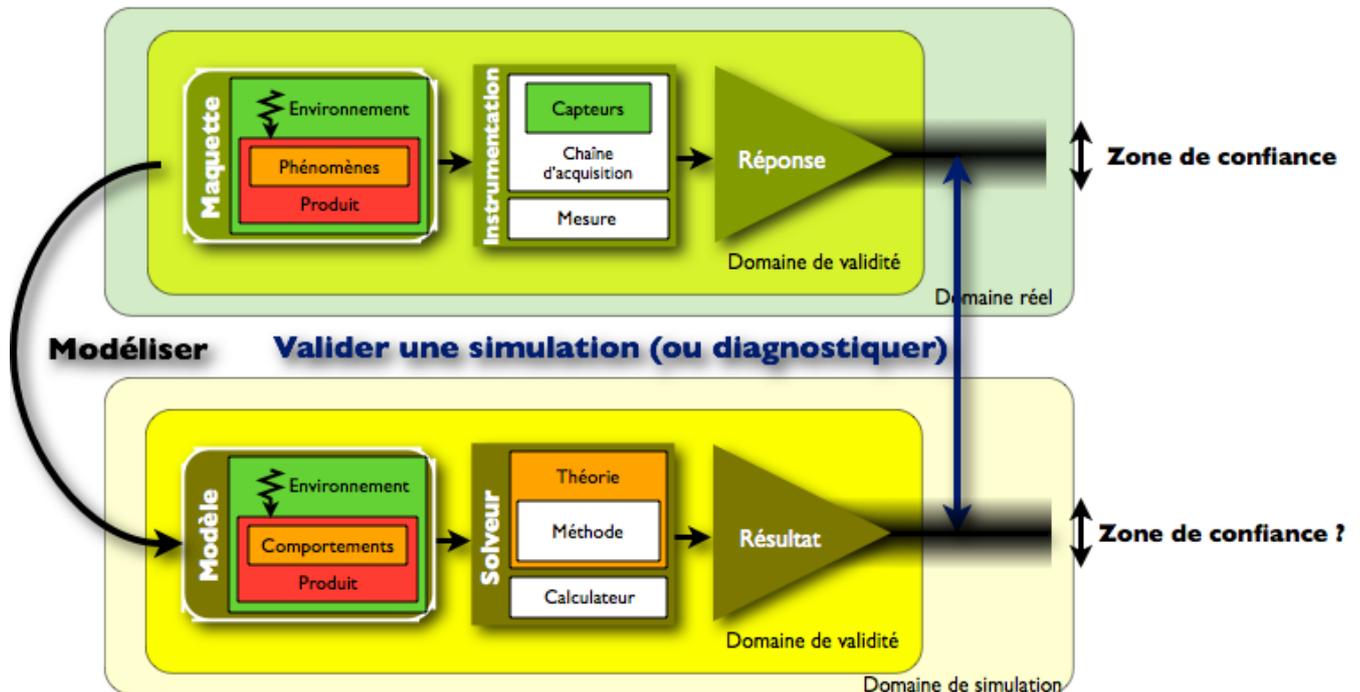


Figure 8 : Le diagnostic dans les activités de TP : l'objectif est d'enseigner la simulation aux élèves en leur faisant analyser l'écart entre performances mesurées et performances simulées.

Cela permet aux élèves de contrôler leur travail (validation) et, en cas d'écart significatif entre les résultats de l'essai et de la simulation, les conduit à rechercher les causes de cet écart (diagnostic). Celles-ci peuvent être classées en trois catégories (la liste n'est pas exhaustive !!!) :

1. Les causes dues à la modélisation, ou l'adéquation entre modèle et maquette :
 - Une théorie et/ou des modèles de comportements non représentatifs des phénomènes qui se produisent durant l'essai et influent sur le résultat (en orange sur la figure 8),
 - Un modèle du produit incapable de représenter le comportement de la maquette (en rouge),
 - Un modèle de l'environnement non représentatif de l'effet de l'environnement expérimental, sans oublier les capteurs (en vert),
2. Les erreurs de mesures, ou de traitement des mesures,
3. Les erreurs de calculs, ou d'utilisation d'un logiciel de simulation.

Les deux dernières sources d'écarts sont les plus simples à analyser : une fois le modèle et le banc d'essais mis en place, la mesure et le calcul consistent simplement à appliquer des règles (d'utilisation du matériel, du logiciel et/ou de logique déductive). Si les élèves possèdent les

règles, ils peuvent mener ces activités de façon autonome et détecter eux-mêmes leurs erreurs, ce qui leur permettra de progresser dans ces domaines.

Concernant la modélisation, le principe est différent car il s'agit de choisir des modèles en fonction d'un objectif et de contraintes, ce qui demande un certain recul. Pour cette raison, les modèles sont souvent fournis. Si l'on demande aux élèves de choisir ou de mettre en place une partie d'un modèle, on les invitera généralement à baser leur choix sur l'observation du montage expérimental, puis à le valider ou à le critiquer en confrontant les résultats. Cela leur permet de développer leur esprit critique et les forme, petit à petit, à la modélisation ; deux exemples sont proposés dans les ressources « *Un exemple d'application pédagogique du diagnostic* » et « *Exemple de diagnostic d'une simulation : Déformations d'un portique* ».

L'intérêt du TP par rapport à d'autres types d'activités est que le produit, l'environnement et les phénomènes à modéliser se trouvent directement sous les yeux des élèves. Ceux-ci peuvent donc les observer autant que nécessaire pour les modéliser en toute connaissance de cause. Cela est particulièrement vrai lorsque les maquettes sont sous une forme didactisée facilitant l'observation, voir figure 9.



(a) Une maquette didactisée ;
(b) une modélisation par éléments finis de cette maquette et des phénomènes qui s'y déroulent.

Naturellement, il faut éviter de mettre les élèves face à des situations trop compliquées pouvant les bloquer dans leur progression.

Dans ce type de TP, l'enseignant s'efforce donc généralement de :

- Choisir des supports suffisamment simples pour que la modélisation et l'identification des causes d'écart soient d'une difficulté adaptée ;
- Limiter les activités à la boucle « essais/simulation » ou, s'il doit être fait allusion au produit réel dans son domaine d'utilisation, extraire les informations utiles depuis les cahiers des charges et les donner aux élèves. Toutes les autres informations doivent pouvoir être directement observées sur la maquette. C'est pourquoi le domaine d'utilisation est absent de la figure 8.

7. Bilan

La figure 10 récapitule les principales activités scientifiques utilisées en sciences de l'ingénieur, ainsi que leur articulation dans le cadre de la prévision du comportement d'un produit industriel.

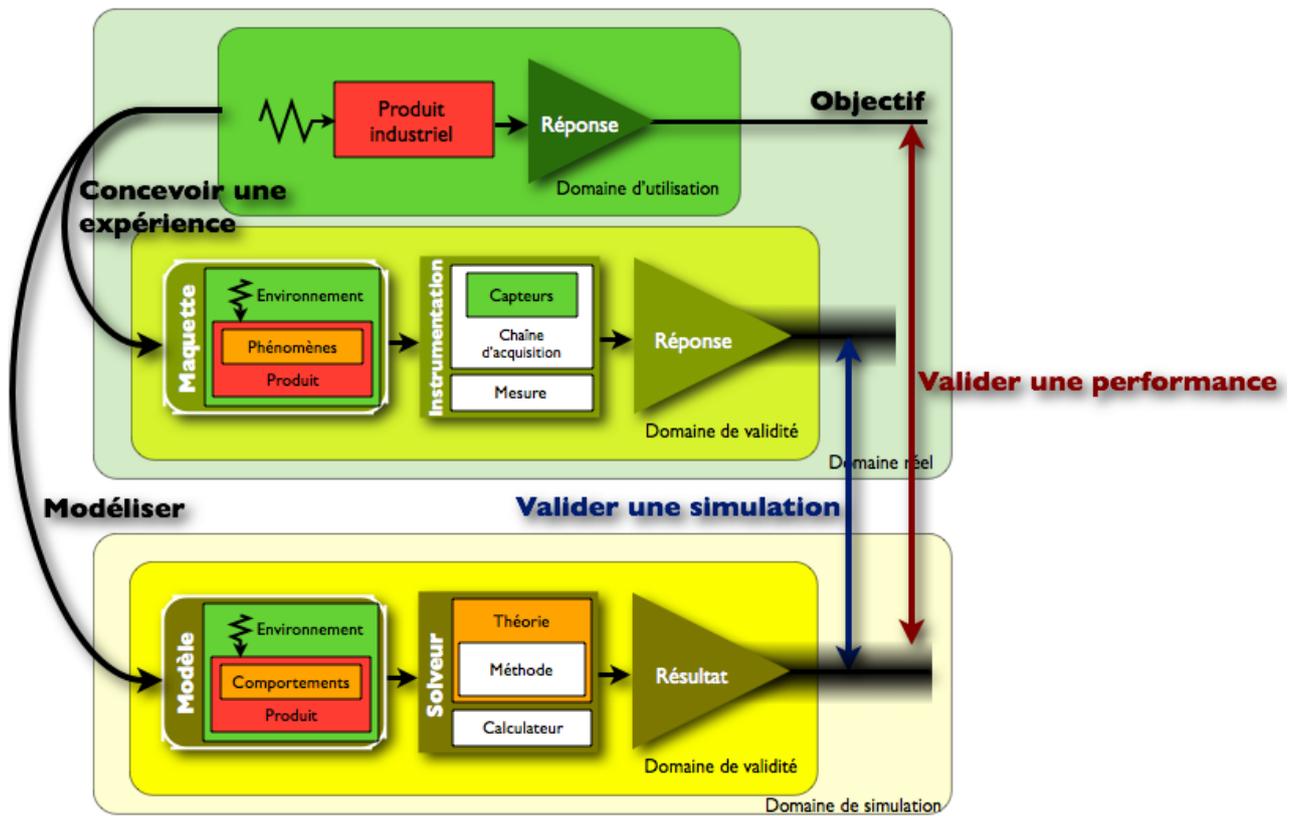


Figure 10 : Bilan de la démarche scientifique en sciences de l'ingénieur.