



**TECHNIQUES  
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **AG1566 V1**

Date de publication :  
**10 avril 2021**

# Jumeau numérique et réalité virtuelle pour la modélisation de systèmes complexes

Cet article est issu de : **Génie industriel | Management industriel**

par **Pierre-Antoine BEAL, Cyril SEPTSEAULT,  
Matthieu AUBRY, Lise LORENZATO,  
Pierre-Armand THOMAS**

## Mots-clés

Ingénierie | aide à la décision |  
jumeau numérique | système  
complexe

**Résumé** La plupart des objets d'études en ingénierie sont aujourd'hui des concepts complexes, mobilisant des domaines d'expertise variés et trop larges pour être appréhendés dans leurs globalités par une personne seule. Les modèles utilisés mêlent l'expertise humaine, la simulation numérique, et de plus en plus souvent, l'intelligence artificielle (IA).

C'est dans ce contexte que le jumeau numérique émerge. Il est le point de convergence des technologies de simulation numérique de phénomènes physiques complexes, multi-échelles et multi-résolutions, et permettant une co-construction de l'objet d'études par un ou plusieurs humains.

## Keywords

Engineering | decision support  
system | digital twin | complex  
system

**Abstract** Today, most of the engineering study objects are complex concepts with various fields of expertise, too broad to be understood in their entirety by one person. They are represented by models including human expertise, digital simulation and more and more often, artificial intelligence (AI). Digital twins emerge in this context. They are the hub of technologies of digital simulation of complex, multi-scale and multi-resolution physical phenomena. They allow a co-construction of the study object by one or more humans.

## Pour toute question :

Service Relation clientèle  
Techniques de l'Ingénieur  
Immeuble Pleyad 1  
39, boulevard Ornano  
93288 Saint-Denis Cedex

**Par mail :**  
infos.clients@teching.com

**Par téléphone :**  
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **27/09/2022**

Pour le compte : **7200083408 - universite grenoble alpes // 130.190.247.198**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

# Jumeau numérique et réalité virtuelle pour la modélisation de systèmes complexes

par **Pierre-Antoine BEAL**  
*Directeur Général  
Cervval*

**Cyril SEPTSEAULT**  
*Directeur des activités de simulation  
Cervval*

**Matthieu AUBRY**  
*Ingénieur d'études  
Cervval*

**Lise LORENZATO**  
*Directrice Qualité  
Cervval*

et **Pierre-Armand THOMAS**  
*Président  
Tacthys – Cervval*

<b>1. Le jumeau numérique pour l'ingénierie .....</b>	<b>AG 1 566 - 3</b>
1.1 Ingénierie des systèmes complexes.....	— 3
1.2 Architecture d'un jumeau numérique .....	— 3
1.3 Développement d'un jumeau numérique .....	— 4
1.4 Les applications du jumeau numérique en ingénierie.....	— 4
<b>2. Enjeux et défis techniques .....</b>	<b>— 6</b>
2.1 Méthodes de modélisation numérique .....	— 6
2.2 Échanges de données.....	— 9
2.3 L'humain dans la boucle .....	— 9
<b>3. Application : Jumeaux numériques pour l'énergie.....</b>	<b>— 11</b>
3.1 Eolienne à axe vertical WindHouse .....	— 11
3.2 Navire de pose de pipeline.....	— 14
<b>4. Conclusion.....</b>	<b>— 16</b>
<b>5. Glossaire .....</b>	<b>— 17</b>
<b>6. Sigles, notations et symboles.....</b>	<b>— 17</b>
<b>Pour en savoir plus .....</b>	<b>Doc. AG 1 566</b>

**U**n système complexe est souvent défini par deux caractéristiques principales, d'une part l'hétérogénéité de sa structure, d'autre part sa dynamique. Du point de vue du modélisateur, un système complexe va donc présenter deux difficultés : la variété des modèles qui devront être employés et leurs capacités à retranscrire une évolution souvent non-linéaire et difficile à appréhender par l'esprit humain. Les systèmes complexes montrent les limites du réductionnisme : la connaissance du comportement des composants élémentaires n'est pas suffisante pour prédire le comportement du système global. De plus, des phénomènes supplémentaires émergent des comportements collectifs

(auto-organisation, multistationnarité, chaos, bifurcations ou boucles de rétro-action), rendent difficile l'observation des résultats et par extension l'analyse des données produites.

Le système complexe ne peut être décrit de manière monolithique : il va falloir identifier les différents composants en interaction et les répartir sur différents niveaux hiérarchiques de modélisation. Les connaissances sur lesquelles s'appuie la modélisation sont incomplètes et nécessitent alors de faire intervenir différentes disciplines : la collaboration multidisciplinaire et la co-construction. De plus, pour simuler numériquement un système complexe, il est nécessaire de pouvoir séparer les composants du point de vue sémantique et du point de vue de l'exécution : ceci entraîne des précautions particulières autour des échanges de données. Enfin, la représentation des résultats est un enjeu car elle doit s'adapter d'une part à l'aspect multidisciplinaire et multidimensionnel des données et d'autre part au caractère dynamique de leur évolution.

La simulation numérique est actuellement une activité profondément ancrée dans les processus industriels. Elle peut être appliquée à la modélisation des systèmes complexes existants mais également avec grand intérêt à la conception de nouveaux systèmes. Dans les deux cas, le résultat à obtenir est celui d'un modèle numérique qui représente fidèlement le système. Ce résultat pourra être utilisé pour faire des analyses en vue :

- de réduire les coûts et la durée d'investigation par la simulation plutôt que par l'action sur le modèle physique ;
- de simuler des modes dégradés de fonctionnement ou bien des cas qu'il serait non envisageable d'expérimenter dans la réalité ;
- de procéder à des analyses de modifications du système avant de décider de les effectuer réellement.

Lorsqu'un modélisateur conçoit un simulateur numérique, il y met ses connaissances et ses hypothèses. Ces dernières étant subjectives et contextuelles, cela trace les premières limites de validité du modèle et donc de la simulation. En effet, certaines théories vont être valides sous certaines conditions alors qu'il faudra en changer lorsque ces conditions ne seront plus remplies. Un résultat peut donc ne pas être valide quelles que soient les conditions. C'est ce qu'on appelle le domaine de validité : il existe un espace borné des paramètres d'entrée pour lequel les résultats peuvent être considérés comme valides pour l'utilisation que l'on souhaite en faire. Le problème qui peut se poser est que le domaine de validité peut ne pas être correctement appréhendé par l'utilisateur final de la simulation numérique, soit parce que le modèle simulé est trop complexe à appréhender, soit parce que les connaissances et hypothèses initiales se sont perdues avec le temps. Lorsque l'on simule un système réel, il faut aussi prendre en compte ses défauts et sa variabilité au cours de son cycle de vie. Pour cela, il faudra mesurer la réalité et réinjecter dans la simulation les nouvelles connaissances. Mais si l'on tient compte de l'existence du domaine de validité, il faudra aussi s'assurer que les modèles utilisés sont toujours valides à l'intérieur du domaine de validité. De plus, les couplages possibles entre les solveurs à cause de l'hétérogénéité des modèles rendent également la limite du domaine de validité difficile à appréhender.

La simulation numérique est un outil créé spécifiquement pour résoudre un problème donné et qui pourra se révéler totalement inadapté ou erroné s'il est employé d'une mauvaise manière ou sur le mauvais problème.

Cet article présente le jumeau numérique et ces applications pour l'ingénierie (§ 1). Il passe en revue les techniques et les enjeux des différentes approches liées à la modélisation et à la simulation numérique (§ 2.1), la problématique de l'échange de données (§ 2.2) et aborde l'importance de l'humain dans la boucle pour une interaction temps-réel, immersive et collaborative (§ 2.3). Deux exemples de jumeau numérique pour l'énergie sont ensuite donnés (§ 3). Enfin, cet article conclut sur le jumeau numérique et ses impacts sur les différentes étapes du cycle de vie de l'objet d'étude.

# 1. Le jumeau numérique pour l'ingénierie

Un jumeau numérique est une réplique numérique d'un système réel. Contrairement à une simulation numérique dont la partie statique du modèle représente l'état du système à un instant précis, le jumeau numérique évolue à l'identique du système réel et s'adapte à partir de données issues du système réel. Le jumeau numérique va donc permettre à la fois de retracer l'historique du système, d'analyser son état courant et d'anticiper l'état futur du système.

Cette section décrit comment utiliser les jumeaux numériques pour l'ingénierie des systèmes complexes, et présente les caractéristiques d'un jumeau numérique, ainsi que les différentes utilisations possibles.

## 1.1 Ingénierie des systèmes complexes

L'ingénierie est définie comme l'étude globale d'un projet industriel sous tous ses aspects (technique, économique, financier). Dans le cadre de l'étude d'un système complexe, le projet peut être segmenté en différents sous-éléments en interaction entre eux et avec leur environnement. Ces éléments vont être de natures variées et vont nécessiter des connaissances d'experts dans une multitude de domaines, au travers des différentes étapes de la vie du produit et/ou système [26].

Un système complexe peut être représenté par des méthodes de simulation numérique. Ces simulations permettent de représenter le système réel, d'étudier son comportement et ses réactions, et de déduire les performances issues des interactions entre les éléments qui le constituent. Ces éléments sont soumis à des conditions extérieures de toutes natures provenant de l'environnement dans lequel le système réel évolue. Cependant, la complexité des modèles utilisés fait qu'il est souvent nécessaire de fixer un cadre d'étude strict du système, parfois en réduisant les conditions environnementales dans lesquelles le système est étudié, parfois en se concentrant sur un des composants ou un des domaines d'études du système.

Le jumeau numérique est une réponse à ces limitations. Il ne vient pas remplacer la simulation numérique. Ce n'est pas non plus un nouveau modèle mathématique ou informatique qui permettrait de résoudre l'ensemble des problèmes ou de représenter de manière universelle l'ensemble des systèmes. Le jumeau numérique désigne un modèle numérique permettant de reproduire le plus fidèlement possible le système physique dans le but de pouvoir l'étudier sous tous ses aspects. Ce modèle numérique n'est pas figé : il va évoluer tout au long de la vie du projet afin de représenter les évolutions du système physique. Ceci va se traduire par un échange de données important entre le système réel et son jumeau numérique (§ 2.2).

Par conséquent, un jumeau numérique est un modèle numérique agrégeant l'ensemble des connaissances, des données et des simulations numériques sur un système précis. Il vient s'appuyer sur les outils existants sans les remplacer, avec plusieurs objectifs :

- couvrir au mieux l'ensemble des conditions environnementales pouvant être rencontrées par le système physique ;
- pouvoir étudier chacun des composants du système à la fois indépendamment et au sein du système ;
- pouvoir prendre en compte à la fois les aspects techniques, mais aussi économiques, industriels, ou financiers.

Une fois en possession du jumeau numérique d'un système complexe, les principaux cas d'utilisation en ingénierie peuvent être liés à :

- la réduction des coûts et de la durée d'investigation ;
- la simulation des modes dégradés de fonctionnement ou bien des cas qu'il serait non envisageable d'expérimenter dans la réalité ;

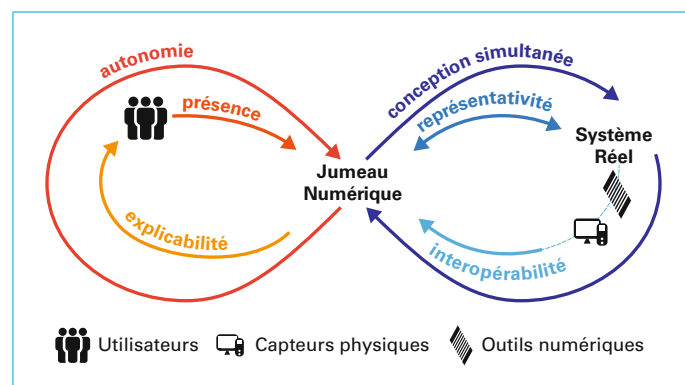


Figure 1 – Les critères du jumeau numérique

– la mise à disposition d'une plateforme pour la formation du personnel opérant le système ;

– l'aide à la décision grâce à :

- l'étude des notions de coûts et de délais de réalisation pour comparer différentes solutions de modifications ou d'exploitation du système,
- l'analyse des modifications du système avant de décider de les effectuer réellement,
- la détection des anomalies en comparant le modèle numérique et le modèle physique.

Dans le domaine de l'ingénierie, un jumeau numérique doit remplir des critères liés à son architecture (figure 1) : le critère de conception simultanée, de représentativité et d'interopérabilité (§ 1.2). Selon son utilisation, le jumeau numérique pourra développer trois autres critères tous aussi importants : l'autonomie, la présence et l'explicabilité (§ 1.3).

## 1.2 Architecture d'un jumeau numérique

Le premier critère défini correspond à la **conception simultanée**. En effet, l'architecture d'un jumeau numérique doit permettre la conception simultanée du modèle numérique et du système physique (figure 2). Il doit permettre d'optimiser le modèle réel et le modèle réel doit permettre de calibrer le modèle numérique.

L'élaboration d'un jumeau numérique n'est donc plus une tâche indépendante à la conception du système réel. Les connaissances acquises sur un modèle doivent ainsi bénéficier à la construction de l'autre modèle au sein d'un processus itératif qui permettra de garantir la bonne fidélité du modèle numérique et la bonne compréhension du modèle physique. De cette contrainte va naître le besoin de modularité de l'architecture qui va permettre de faire évoluer plus facilement les modèles au cours de la conception simultanée du jumeau numérique et du système physique.

Le second critère est la **représentativité** du jumeau numérique. Celle-ci va être guidée par la nécessité de représenter le système dans son ensemble et de reproduire son comportement dans différentes conditions. La représentativité peut être découpée en deux critères : l'expressivité qui est la capacité du jumeau numérique à décrire plus ou moins de phénomènes (et par conséquent plus ou moins de scénarios possibles) et la précision qui représente l'écart entre les résultats simulés et la mesure réelle.

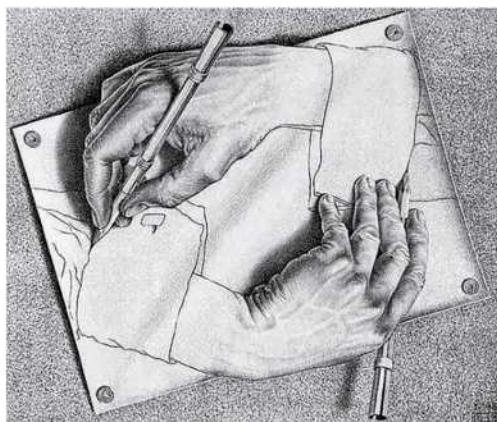


Figure 2 – Œuvre d'Escher (1948 – lithographie) illustrant la conception simultanée du jumeau numérique et du système réel

L'architecture du jumeau numérique doit permettre de couvrir le système dans son ensemble, ainsi que les interactions entre ses sous-systèmes et avec son environnement. Les modèles employés doivent être le plus précis possible afin de permettre d'obtenir le comportement le plus proche possible du système physique.

Les modèles numériques sont souvent confinés à un domaine d'étude à cause de la complexité de chacun des domaines abordés. Cette contrainte va nécessiter de mettre en place des stratégies permettant de fusionner les modèles provenant de différents domaines.

Finalement, le jumeau numérique doit être **interopérable**. Il doit permettre de s'interfacer avec d'autres applications, d'autres jumeaux numériques ou des capteurs physiques.

Ce concept est principalement développé dans le domaine de l'Internet des Objets (IoT). Avec la miniaturisation des composants électroniques, les capteurs autonomes se répandent et il devient nécessaire d'uniformiser les communications pour permettre leur interopérabilité. Le jumeau numérique d'un système peut être inséré dans cet essaim afin de remplacer un système défaillant, simuler le comportement d'un système réel, analyser le flux de données, ou encore anticiper des pannes.

### 1.3 Développement d'un jumeau numérique

Un critère supplémentaire concerne la **présence** du jumeau numérique qui peut être décomposée en deux sous-critères : l'immersion et l'interaction. L'objectif de ce critère est d'évaluer la possibilité pour un humain de percevoir et d'agir sur le jumeau numérique.

La réalité virtuelle, dans le cadre d'un environnement virtuel, est un outil qui permet de développer cette notion de présence. En effet, elle va permettre de tromper les sens de l'humain pour l'immerger dans un environnement représentant le système réel. Il va alors pouvoir interagir avec le système au moyen de différents moyens de contrôles (voix, manettes, capture de mouvements, etc.).

Un autre critère est l'**explicabilité**. Il concerne la capacité du jumeau numérique à permettre l'explication d'un comportement particulier du système. Cette explication peut passer par la mise en situation d'hypothèses et l'analyse de mesures du système qui vont permettre de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses. Le jumeau numérique ne doit donc pas être une boîte noire. Il doit être construit pour permettre l'inspection des différents composants le constituant.

Une application de monitoring est l'exemple d'un jumeau numérique qui ne développerait que cet axe d'introspection. En effet, le suivi des différents éléments du système va permettre d'aller mesurer de la manière la plus objective possible les facteurs qui ont amené à un comportement donné.

L'**autonomie** est le dernier critère à aborder. Le jumeau numérique cherche à reproduire au mieux le comportement d'un système physique. Pour cela, le périmètre d'utilisation du modèle numérique doit être le plus large possible. Plus le périmètre sera étendu, plus il sera possible au jumeau numérique de s'adapter aux conditions rencontrées par le système physique, voire à anticiper des situations exceptionnelles avant qu'elles se produisent sur le système physique.

L'utilisation d'une animation cinématique comme modèle numérique est le niveau le plus bas dans le sens où il n'est capable de s'adapter à aucun paramètre. Les simulations numériques, si elles peuvent prendre différents jeux de données en entrée et produire différents comportements, vont permettre d'un autre côté d'étendre l'autonomie du jumeau numérique.

## 1.4 Les applications du jumeau numérique en ingénierie

Les activités de recherche autour du jumeau numérique montrent un réel engouement de l'industrie pour cette notion et des applications tout le long du cycle de vie du produit [1] [27].

Même si les phases du cycle de vie sont différentes en fonction du produit, un projet peut globalement être découpé en six étapes principales (figure 3) : la conception, la réglementation, la production, la communication, la formation et la maintenance. Ces différentes étapes sont cycliques : les retours d'expériences sur une version du produit amènent souvent à la conception d'une nouvelle version de ce produit.

Cette section s'intéresse plus particulièrement aux phases de conception d'un système complexe :

- comment le jumeau numérique peut être construit dès les premières phases d'études du système complexe jusqu'à sa réalisation (§ 1.4.1) ;

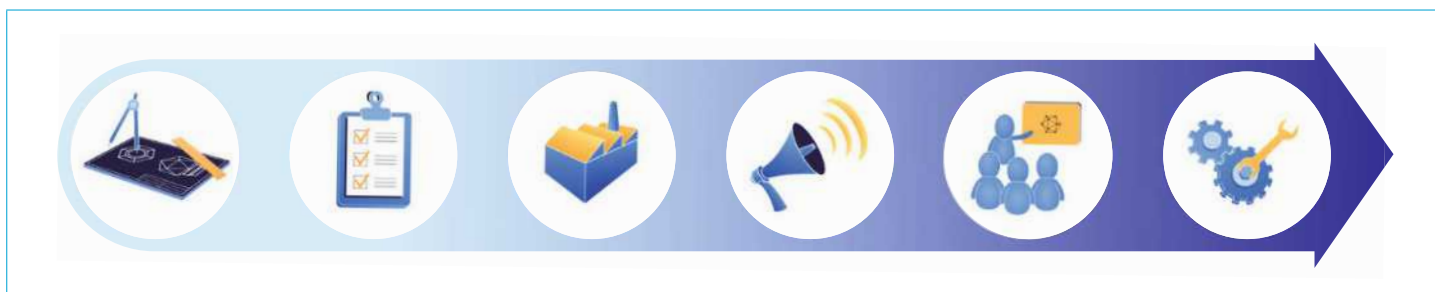
- comment s'appuyer sur le jumeau numérique ainsi construit tout au long de son cycle de vie (§ 1.4.2).

### 1.4.1 La coconstruction du modèle et sa validation

La conception simultanée du jumeau numérique est décrite comme sa capacité à s'adapter pour suivre son homologue physique. Il existe un autre axe tout aussi important : la coconstruction, qui tient compte de l'aspect multidisciplinaire du jumeau numérique.

La primo-conception d'un système complexe va découler d'un ensemble d'idées, de quelques schémas, de feuilles de caractéristiques ou d'objectifs à atteindre. Ces éléments vont alors donner lieu à la création des premiers concepts. La définition de tous les sous-ensembles du système complexe ne peut se faire que par approches successives, car ceux-ci sont influencés par la définition des sous-ensembles avec lesquels ils sont en relation. La création d'un jumeau





**Figure 3 – Principales étapes du cycle de vie d'un produit : conception, réglementation, production, communication, formation, maintenance**

numérique, dès les premières phases de conception du système, va permettre d'agglomérer l'ensemble des connaissances acquises sur le système et ses sous-systèmes. La constitution du jumeau numérique va créer la nécessité pour les experts de différents domaines de communiquer ensemble afin d'intégrer les différents modèles produits au sein du même système numérique.

Par sa capacité à faire interagir les modèles de différents domaines entre eux, le jumeau numérique va chercher à fluidifier les échanges entre les experts de différents domaines. Notamment, certaines règles de validation peuvent être prises en compte de manière automatique. Ainsi, un spécialiste peut rapidement évaluer l'impact d'un changement sur un ensemble de domaines qui peuvent lui être inconnus, ce qui permettra d'assurer une meilleure qualité du produit et d'anticiper plus rapidement les problèmes.

Cependant, il est important de noter que le jumeau numérique ne remplace pas les personnes. Il ne vient que comme un outil complémentaire de ceux déjà existants afin d'assister les experts dans leurs prises de décision. Le jumeau numérique crée cependant un lien qui permet d'ouvrir les silos propres à l'organisation des entreprises et facilite l'appréhension de systèmes de plus en plus complexes dans leur globalité.

Pour tirer pleinement parti du jumeau numérique, celui-ci ne doit pas se limiter à l'étude des aspects techniques du système complexe. En effet, une étude d'ingénierie multidisciplinaire doit prendre en compte l'ensemble des aspects du système. Il est alors possible d'introduire des notions de coûts qui seront utilisées, d'une part pour mesurer l'intérêt relatif des choix des solutions proposées, et d'autre part le coût total. Des modèles permettent de comparer très tôt l'influence sur les productibles et performances du système en gestation, en fonction des choix analysés, pour adapter le modèle en fonction des objectifs retenus.

## 1.4.2 Les applications du jumeau numérique tout au long du cycle de vie

L'objectif n'est pas de faire une liste exhaustive des applications possibles car elle est trop dépendante du système étudié, mais plutôt d'identifier des exemples typiques dans chaque phase du cycle de vie du produit et d'identifier quelles sont les caractéristiques nécessaires à développer sur le jumeau numérique en fonction de l'application ciblée.

### 1.4.2.1 Aide à la décision

La première phase du cycle de vie est la conception. Il a déjà été abordé de manière détaillée comment le jumeau numérique et le système complexe physique pouvaient se compléter l'un et l'autre pendant la phase de conception simultanée. Le jumeau numérique permet de centraliser les connaissances sur le système afin d'en améliorer sa compréhension et permet d'étudier le système dans différents scénarios afin d'assister la prise de décision.

Dans ce cadre, développer l'autonomie du jumeau numérique permettra de le confronter à un plus large éventail de scénarios. Le critère de présence permettra de faciliter la communication entre les

personnes : en effet, il est plus aisé d'expliquer face à une reproduction fidèle d'un objet en réalité virtuelle que face à un schéma [2]. L'explicabilité va être utilisée pour extraire les informations nécessaires du jumeau numérique pour comprendre son fonctionnement ou le fonctionnement d'un sous-ensemble de celui-ci.

### 1.4.2.2 Aide à la certification

Les systèmes se doivent de respecter certaines réglementations, notamment afin de respecter la sécurité physique des personnes. La certification d'un produit peut s'effectuer par différentes méthodes : application de règles de conception, vérification des caractéristiques physiques du produit, analyse du comportement du produit lors de la mise en service, étude numérique du produit, etc.

Le jumeau numérique sera en mesure d'être utilisé pour effectuer des études permettant de valider certains aspects. Une des différences entre le jumeau numérique et une simulation classique est sa multidisciplinarité : il permet d'intégrer les différents aspects du produit. Il est possible d'automatiser un scénario dès qu'une modification annexe peut avoir un impact sur le comportement global du système. La représentativité du jumeau numérique va devenir l'atout majeur pour la certification du produit. Et plus son autonomie sera développée, plus il sera possible d'explorer des scénarios spécifiques et mettre le jumeau numérique dans des conditions éloignées de son usage classique.

### 1.4.2.3 Aide à la planification

Lors de la fabrication du système physique, un planning prévisionnel permet d'en anticiper les différentes étapes. Celui-ci est régulièrement mis à jour afin de s'assurer de la bonne progression de la production. Lorsque ces plannings sont établis, il est nécessaire de multiplier les vérifications afin de s'assurer que tous les composants du système sont bien pris en compte et que le séquençage des activités peut être bien réalisé. Cependant ces vérifications sont laissées à l'appréciation du planificateur, qui malgré la qualité de son expertise et sa rigueur peut faire des erreurs.

En intégrant le planning prévisionnel et le suivi de la réalisation dans le jumeau numérique du système, il devient possible de mettre en relation les activités du planning avec les composants. Ainsi, un certain nombre de vérifications fastidieuses peuvent être effectuées automatiquement. Il est possible d'utiliser le planning 4D, concept largement développé actuellement dans le domaine du BIM dans le bâtiment, qui vient mêler le modèle 3D du système avec la composante temporelle fournie par le planning, pour effectuer de manière automatique des vérifications géométriques (par exemple sur l'encombrement des pièces à assembler ou la circulation des engins sur le chantier).

Sur des productions de masse, le jumeau numérique peut aussi être utilisé pour organiser la production. Le concept d'industrie 4.0 [3] consiste à se baser sur les données du jumeau numérique pour :

- répartir de manière intelligente la production sur différentes chaînes de production ou dans différentes usines ;
- adapter le flux de production aux aléas ;

- anticiper les ruptures de stock ;
- permettre une meilleure personnalisation des produits ou effectuer des contrôles de qualité, par exemple.

#### 1.4.2.4 Aide à la communication

Une fois le système physique construit, le jumeau numérique peut être utilisé à des fins de communication pour présenter le produit. Souvent le jumeau numérique est associé à des modèles en 3D qui permettent de produire des visuels. De plus, le jumeau numérique étant capable de reproduire le comportement du système physique, il est particulièrement adapté à la démonstration.

#### 1.4.2.5 Aide à la formation

Le jumeau numérique peut être associé à un environnement de Réalité Virtuelle ou de Réalité Augmentée. Un utilisateur peut être immergé dans un environnement sécurisé dans lequel il est possible de reproduire des scénarios critiques qui auraient pu représenter des risques pour lui ou pour le système physique.

Ces environnements sont particulièrement intéressants pour la formation [4]. Des assistants pédagogiques peuvent venir exploiter les informations contenues dans le jumeau numérique pour accélérer l'apprentissage en guidant l'apprenant [5].

#### 1.4.2.6 Suivi en temps réel, maintenance, support

Finalement, le jumeau numérique suit le système physique tout au long de sa vie. Les données issues de capteurs du système peuvent être injectées dans le jumeau numérique pour faire du suivi en temps réel ou de l'archivage. Le suivi du système physique par le jumeau numérique a de nombreuses applications en maintenance et support.

Les données extraites du système physique permettent de suivre l'utilisation du système physique pour permettre de planifier de manière plus précise la maintenance sur le système. Une application innovante est la prédiction de panne [6]. Les données issues des capteurs vont être comparées aux données produites par le jumeau numérique. En détectant les déviations entre les données réelles et les données théoriques, il est possible d'anticiper les pannes ou les dysfonctionnements du système.

Le jumeau numérique peut aussi être utilisé pour faire du retour d'expérience en permettant de rejouer et d'analyser le comportement du système à partir des données archivées. Finalement, comme dans le cas de la conception, le jumeau numérique peut être utilisé pour évaluer une modification sur le système physique avant de la mettre en œuvre.

#### À retenir

- Un jumeau numérique contient l'ensemble des connaissances et données d'un système physique. Il évolue en même temps que son jumeau réel.
- Il remplit des critères liés à son architecture : conception simultanée, représentativité et interopérabilité.
- Selon son utilisation, il développe trois autres critères : présence, explicabilité et autonomie.
- Il est co-construit pour tenir compte de l'aspect multidisciplinaire du système.

## 2. Enjeux et défis techniques

Certains choix sont cruciaux en ce qui concerne l'élaboration d'un jumeau numérique :

- la méthode de modélisation et les techniques de simulation qui devront permettre l'autonomie, la représentativité et la conception simultanée (§ 2.1) ;

- l'architecture et la gestion des flux de données qui impacteront l'interopérabilité (§ 2.2) ;
- les modes d'interaction avec les utilisateurs pour fournir présence et explicabilité (§ 2.3).

## 2.1 Méthodes de modélisation numérique

La complexité des systèmes industriels actuels fait qu'une seule personne ne peut plus appréhender avec précision l'ensemble des domaines impliqués. Pour cela, la participation de spécialistes provenant de différents domaines est nécessaire (co-construction). Chacun apportant ses connaissances sur une partie du système. Aussi, le système peut être constitué de sous-ensembles intervenant à des échelles différentes qu'il va falloir consolider au sein du même modèle.

Cependant, il est peu courant qu'une étude dans un domaine puisse être entièrement isolée. En effet, les résultats dans un domaine deviendront alors les données d'entrée dans un autre. Ce processus d'échange peut d'ailleurs fonctionner de manière itérative, jusqu'à la convergence des spécialistes sur un résultat commun.

Dans le cadre d'un projet multidisciplinaire, un des rôles du jumeau numérique est de permettre la synthèse des connaissances dans les différents domaines et sur les différents systèmes en prenant en compte les interactions à différentes échelles.

### 2.1.1 Approches Top-down et Bottom-up

Lors de la construction d'un modèle physique numérique, plusieurs approches peuvent être utilisées : l'approche descendante (*Top-down*) et l'approche ascendante (*Bottom-up*) (figure 4). Cette section présente les deux approches et leur avantages respectifs.

La différence principale des deux approches se situe au niveau de ce que l'on sait sur le système. Dans l'approche *Top-down*, le comportement du système pour un jeu de paramètres donné est

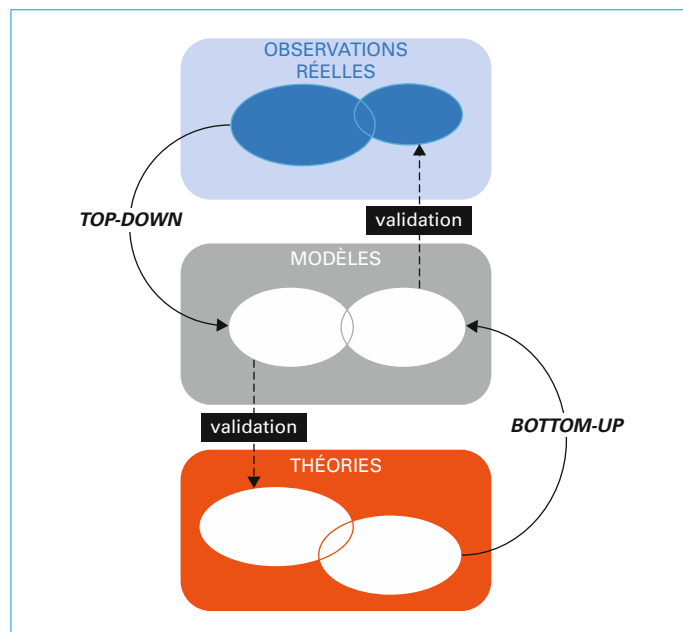


Figure 4 – Approche *TOP DOWN* : structure à partir de laquelle les résultats obtenus correspondent aux données observées prévues. Approche *BOTTOM UP* : structure dans laquelle tout énoncé d'une théorie est vrai

connu. Dans l'approche *Bottom-up*, seul est connu un ensemble de théories que l'on considère capable d'expliquer le comportement du système [7].

### 2.1.1.1 L'approche Top-down

Le terme d'approche descendante (*Top-down*) dans le domaine de la modélisation fait référence au fait de partir des observables (données de sorties) et chercher à les expliquer par une simplification (ou réduction).

Le plus simple **exemple** est l'outil mathématiques de la régression linéaire par lequel est déterminé un coefficient de proportionnalité entre les entrées et les sorties.

Dans cette approche, la construction du modèle se fait par raffinement successif, le plus souvent par décomposition en sous-parties. Cela nécessite une phase importante d'analyse du système afin de déterminer le niveau de décomposition qui répondra le mieux au périmètre d'utilisation du modèle. Un écueil de cette approche est que certains phénomènes, s'ils n'ont pas été identifiés lors de cette phase d'analyse, vont être oubliés et ainsi le périmètre d'utilisation du modèle sera restreint.

Prenons l'**exemple** de la modélisation de la chute d'une bille. Un modèle très simplifié serait celui ne possédant qu'un seul phénomène, celui de la gravité, sans tenir compte de la friction avec le milieu. Ce modèle ne sera valide que tant que la friction avec le milieu est négligeable et donc que la vitesse est faible. Son périmètre est donc plus restreint qu'un modèle auquel un phénomène de friction aurait été ajouté. Tout dépend alors du cadre d'utilisation.

Cependant, un des avantages de l'approche descendante est d'associer ensemble différents niveaux et types de modélisation, et ainsi faire interagir par exemple des modèles mécaniques de dynamique des fluides tout en permettant des interactions utilisateurs. La construction du modèle devra se faire en restant focalisé sur les données d'entrée disponibles et la problématique liée au système.

### 2.1.1.2 L'approche Bottom-up

Dans le cas de l'approche ascendante (*Bottom-up*), des théories de base indépendantes du système à modéliser sont mises en relation entre elles afin de construire le modèle complet.

Pour la chute d'une bille dans l'air, un **exemple** d'approche *Bottom-up* est l'utilisation des équations de la mécanique des fluides (CFD) associées à un maillage de l'espace et l'intégration dans le temps des lois de Newton.

L'avantage par rapport à la précédente approche est que la résistance de l'air sera implicitement prise en compte de même que des phénomènes supplémentaires non triviaux tels que la masse ajoutée ou les turbulences aérodynamiques.

L'inconvénient d'une telle approche est que certains paramètres nécessaires aux briques de base (par exemple les paramètres de la CFD) ne sont pas connus d'un point de vue système, ou sans rapport avec ses entrées (taille du maillage, paramètres de sous relaxation, coefficient de turbulence...).

### 2.1.1.3 L'approche mixte

Finalement, il est aussi possible de composer avec les deux approches. Dans ce cas, deux modèles vont être construits en parallèle : un modèle *Bottom-up* et un modèle *Top-down*.

La modélisation *Top-down* nécessite de faire des hypothèses pour permettre de faire la décomposition du problème. Il est parfois difficile de déterminer certains paramètres ou même de savoir si la décomposition choisie est valide.

Le modèle *Bottom-up* permettra de fournir des valeurs clefs et d'affiner les paramètres de certains phénomènes complexes du modèle *Top-down*.

Par **exemple**, un logiciel de mécanique des fluides va calculer les coefficients de traînée et la masse ajoutée d'un corps flottant en prenant en compte son environnement (profondeur de l'eau, présence d'autres corps flottants). Ensuite, ces coefficients vont pouvoir être utilisés dans l'application d'une force de résistance. La masse ajoutée pourra être prise en compte lors du calcul de l'accélération par le principe fondamental de la dynamique.

Cet exemple combine une approche *Bottom-up* consistant à combiner les théories de la mécanique des fluides et du principe fondamental de la dynamique, avec une méthode *Top-down* décomposant le problème en forces élémentaires de traînée, portance et masse ajoutée. L'intérêt est de tirer parti de la prédictibilité de l'approche *Bottom-up* tout en conservant l'efficacité de calcul et la modularité de l'approche *Top-down*.

## 2.1.2 Différentes formes de modélisation

Afin de simuler physiquement le fonctionnement d'un système complexe, il est nécessaire de choisir le type de modèle le mieux à même de représenter la dynamique de chaque sous-système ou phénomène ayant une influence notable.

■ Dans un premier temps, il faudra **déterminer si l'on souhaite employer un modèle déterministe ou stochastique**. Un modèle déterministe donnera toujours le même résultat si les mêmes paramètres d'entrée sont fournis, alors que le modèle stochastique contiendra une part d'aléatoire qui fera varier les résultats en fonction d'une distribution de probabilités donnée. Ceci peut être utile pour reproduire des phénomènes eux-mêmes stochastiques ou lorsque les connaissances du modélisateur sur le système sont probabilistes.

Il ne faut d'ailleurs pas confondre le modèle stochastique avec le modèle probabiliste qui donnera de manière certaine la distribution de probabilités des résultats.

■ Ensuite, il convient de **déterminer si le modèle sera analytique ou numérique**. Le modèle analytique a la capacité de relier directement les paramètres d'entrée aux résultats par une fonction mathématique. Ils ont souvent l'avantage d'être très efficaces en temps de calcul car, contrairement au modèle numérique, ils ne vont pas nécessiter d'itérations. Ce type de modèle a l'intérêt de pouvoir être utilisé dans des simulations qui nécessitent d'avoir des résultats rapidement, tels que les simulations interactives. Ils peuvent donc être particulièrement intéressants pour la construction de jumeaux numériques.

L'existence de modèle analytique exact est plutôt rare et il faut faire attention au domaine de validité des approximations des modèles analytiques approchés. Paramétrer et valider le modèle est donc important. Pour ce faire, le modélisateur doit vérifier les résultats de simulation aux conditions limites et comparer les résultats obtenus à des données expérimentales ou à des résultats de modèles supposés valides.

Lorsqu'un modèle analytique cherche à représenter la réalité par des fonctions mathématiques, le modèle numérique va chercher à le représenter par des nombres. Ces nombres, scalaires ou vecteurs, vont être associés à des objets dans les modèles discrets et associés à des mailles dans les modèles continus. Souvent, ces modèles numériques reposent sur des équations aux dérivées partielles décrivant les variations des variables. La principale difficulté de ces équations est de choisir correctement les conditions limites pour initialiser la simulation.



### Exemples

- Un **exemple de modèle discret** est la mécanique lagrangienne dans laquelle chaque objet est représenté par ses vecteurs de position, vitesse et accélération. Ce type de modèle n'est intéressant que si le nombre d'éléments discrets reste raisonnable : pour le coût du calcul d'une part, et d'autre part dû au nombre de paramètres à fixer pour obtenir un comportement correct dans le domaine de validité défini.
- Un **exemple de modèle continu** est l'approche eulérienne de la mécanique des fluides. Ce type de modèle nécessite obligatoirement une discrétisation pour pouvoir être simulé sur un ordinateur : la discrétisation est également appelée « mailles ». Cette discrétisation peut se faire par différentes méthodes : approximation par différences finies [8], par volume finis ou par éléments finis [9].

### 2.1.3 Solution pour le multimodèles et le multi-échelles

La simulation d'un système complet peut faire appel à différentes disciplines physiques, que ce soit la physique du solide, la mécanique des fluides, la thermodynamique, ou la chimie. Le modélisateur doit alors intégrer dans un même simulateur des modèles de nature différentes. Plusieurs termes peuvent être employés pour nommer ce type de simulation : simulation multimodèles, multiphysiques, ou multi-méthodes.

On parle également de fédération de modèles lorsque l'on met en place un environnement standard et une architecture de communication commune entre les modèles. Ceci permet d'assurer par conception la synchronisation, l'intégrité et la sécurité des données échangées.

Chaque modèle est utilisé pour déterminer la dynamique d'une composante du système global. La plus grosse problématique se situe au niveau des interactions entre modèles.

Lorsque les modèles sont faiblement couplés, c'est à dire lorsqu'il y a peu ou pas d'interaction entre eux, la manière de les intégrer pour simuler le système global s'en trouve facilitée. Ce couplage peut se faire par exemple lors du calcul de l'accélération d'un objet en sommant les forces calculées par chaque modèle et en utilisant le principe fondamental de la dynamique.

Dans les cas les plus défavorables, les modèles sont fortement couplés. Il faut alors utiliser des mécanismes de couplage existants tel que des méthodes de *splitting* [10] ou bien même des algorithmes *ad hoc*.

De plus, il arrive également que certains modèles ne soient disponibles que sous forme de « boîtes noires » pour des raisons de propriété intellectuelle ou industrielle.

Soit  $S_n$  l'état dans lequel est le système au temps actuel (t),

$S_{n+1}$  l'état au pas de temps suivant (t+1),

$M_m$  distribution représentant l'action du modèle m sur l'état du système.

Lorsque les modèles sont faiblement couplés ou linéaires, la méthode de *splitting* additive est utilisée (équation (1)). Lorsque les modèles sont fortement couplés, plusieurs méthodes peuvent être utilisées :

- méthodes asynchrones consistant à appliquer séquentiellement un modèle à partir de l'état d'un autre (équation (2)). La méthode est asynchrone et chaotique lorsque l'ordre d'application des modèles est choisi aléatoirement [11] ;
- moyenne (équation (3)) ;
- utilisation d'un modèle *ad hoc* qui saura intégrer le résultat des deux modèles (équation (4)) lorsque la physique et les

périmètres d'utilisation de chaque modèle sont connus par le modélisateur.

$$S_{n+1} = M_1(S_n) + M_2(S_n) \quad (1)$$

$$S_{n+1} = M_1(M_2(S_n)) \text{ ou } S_{n+1} = M_2(M_1(S_n)) \quad (2)$$

$$S_{n+1} = \frac{1}{2}M_1(M_2(S_n)) + \frac{1}{2}M_2(M_1(S_n)) \quad (3)$$

$$S_{n+1} = M_3(M_1(S_n), M_2(S_n)) \quad (4)$$

Le modélisateur devra vérifier que le couplage de deux modèles ne produit pas de biais ou un biais assez faible pour garder une validité raisonnable par rapport au besoin du jumeau numérique.

Dans les méthodes proposées (eq (1), (2), (3) et (4)), le pas de temps utilisé est le même pour tous les modèles. Mais, en pratique, c'est une simplification qui n'est pas toujours vraie. De plus, outre l'aspect temporel, le couplage a également des effets sur l'aspect spatial. En effet certains phénomènes critiques nécessitent une définition fine de la discrétisation temporelle et une définition fine du maillage spatial.

Afin de garder des temps de simulation raisonnables, le modélisateur à accès à différentes méthodes :

- la décomposition de domaine, qui va faciliter le parallélisme [12] ;
- les méthodes de *splitting* qui permettent de calculer séparément les phénomènes, si besoin avec des pas de temps différents ;
- l'utilisation de maillages adaptatifs, où le maillage dépendra de la magnitude des vitesses et de leurs variations.

### 2.1.4 Le « surrogate model »

Dans certains cas, une simulation peut mettre plusieurs minutes, plusieurs heures, voire plusieurs jours à calculer le résultat. Ceci rend difficile, voire impossible, l'utilisation de la simulation pour de l'aide à la conception. Durant ce processus, l'espace des paramètres est parcouru pour analyser leurs sensibilités et, pour cela, il est nécessaire d'exécuter un grand nombre (des milliers, des millions...) de scénarios en simulation.

Une solution peut être le recours à la parallélisation qui permet, soit d'accélérer le temps de calcul d'une simulation, soit de lancer plusieurs simulations en parallèle, mais parfois cela n'est pas suffisant. Il va parfois falloir changer radicalement de niveau de complexité pour être en mesure de donner à l'utilisateur l'interactivité nécessaire. En faisant cela, le domaine de validité est obligatoirement restreint mais la méthode du *surrogate model* permet de faire un compromis en adaptant le domaine de validité à l'espace des paramètres d'entrée parcourus par l'utilisateur.

L'objectif est de mettre en place un modèle qui se contente de reproduire le fonctionnement d'un modèle plus complexe [13]. Pour cela des méthodes data-centrées sont utilisées : elles vont corrélérer les entrées et les sorties, le plus souvent en utilisant des méthodes de régression, d'interpolation ou d'apprentissage [14].

Les méthodes les plus connues sont :

- le *kriging* [15] ;
- les fonctions à base radiale (RBF) [16] ;
- la méthode des surfaces de réponse (RSM) [17] ;
- les réseaux de neurones [16] ;
- les forêts d'arbres décisionnels [18] ;
- la réduction d'ordre [29].

L'**exemple** le plus simple d'un *surrogate model* est une base de cas précalculée. Les résultats sont calculés pour différents points clés puis, lorsque l'utilisateur interroge le modèle, celui-ci va fournir une réponse soit en interpolant les résultats des deux cas les plus proches, soit directement en donnant le résultat du cas le plus pertinent.

Outre sa capacité à accélérer les temps de réponse d'un modèle, l'intérêt du *surrogate model*, dans le cas du jumeau numérique, est également son aptitude à évoluer en fonction des nouvelles données disponibles et à s'adapter aux changements.

## 2.2 Échanges de données

La notion de jumeau numérique suppose que le cycle de vie de l'outil numérique va suivre le cycle de vie système réel de la conception jusqu'au démantèlement, en passant par la phase d'opération/exploitation.

Pour ce faire, des canaux de communication doivent être créés entre le système et son jumeau. En fonction de la nature des données échangées, cette tâche sera plus ou moins aisée. Les applications sont nombreuses :

- **modélisation pour l'aide à la décision et l'optimisation** : le jumeau numérique permettra de tester virtuellement des scénarios (opération compliquée ou en conditions dégradées, remplacement d'un système, paramétrage, etc.) et de choisir le meilleur ;
- **monitoring** : dans ce cas, le jumeau numérique pourra servir de véritable tableau de bord et pourra même proposer des assistants intelligents pour la maintenance prédictive par exemple ;
- **automatisation** : grâce à l'utilisation de systèmes cyber-physiques ;
- **valorisation de la data** : le jumeau numérique est aussi une manière de structurer la donnée pour la rendre intelligible ce qui permet d'imaginer de nouveaux « *business model* ».

### 2.2.1 La modélisation assistée par l'IA

Lors du processus de modélisation, le modélisateur va devoir choisir un certain nombre de paramètres. Ces paramètres peuvent avoir une signification dans le problème visé et donc être reliés à des métriques réelles. D'autres, en revanche, ne vont pas avoir de sens directement en rapport avec l'objectif recherché. C'est le cas par exemple des paramètres suivants : coefficients de relaxation, coefficients de forme, pas de temps, taille de la maille, etc. ... appelés alors « hyperparamètres ».

Lorsque des données réelles sont disponibles, des algorithmes de *machine learning* peuvent déterminer ces hyperparamètres permettant de représenter au mieux le système. Pour ce faire, il va être nécessaire de lancer une grande quantité de simulations en faisant varier légèrement les hyperparamètres. Les résultats seront évalués à l'aide d'une fonction de fitness, qui, souvent, représente la distance entre les résultats numériques et les données réelles. L'objectif est de minimiser cette distance encore appelée « score ».

Pour limiter le nombre de simulations à exécuter, l'utilisation de métaheuristiques permet d'explorer l'espace des hyperparamètres de manière structurée (descente de gradient, algorithmes génétiques, recuit simulé, GRASP, etc.) [19] [20].

Cet apprentissage peut se faire « hors-ligne » lors de la conception du jumeau numérique, mais il est également possible d'appliquer ce procédé en phase d'exploitation/opération. L'objectif sera alors d'ajuster en permanence les hyperparamètres pour représenter au mieux les données opérationnelles.

Lorsque les données réelles montrent une dérive significative par rapport au modèle initial, cela peut également traduire la présence d'un phénomène non pris en compte par le modélisateur. Ceci peut être un simple oubli ou l'emploi d'une hypothèse trop simplificatrice, mais cela peut aussi traduire l'apparition d'un problème de fonctionnement sur le système. Il est alors possible de mener une analyse plus poussée et de mettre à profit l'explicabilité du jumeau numérique pour déterminer s'il s'agit d'un signal faible nécessitant le déclenchement d'une opération de maintenance prédictive.

### 2.2.2 Les données issues de capteurs

À l'ère de l'internet des objets (IoT), les systèmes fournissent des données en temps réel et sont pilotables à distance à l'image des systèmes domotiques. Ces données donnent une représentation dynamique de l'état du système, mais souvent elles ne représentent que le sommet de l'iceberg et ne sont pas suffisantes pour déterminer l'état complet du système et prendre une décision.

Le jumeau numérique, alimenté par ces données temps-réel, va pouvoir donner du sens aux données observées. Les modèles numériques vont contraindre l'espace des possibilités et il sera possible d'extrapoler les inconnues non mesurées en fonction des prédictions du jumeau. Il s'agit, en fait, de simuler des scénarios opérationnels complets pour déterminer lequel amènerait aux mêmes mesures. Parfois, plusieurs scénarios sont possibles, des analyses statistiques (type Monte Carlo) peuvent être faites, ou encore il est possible de faire intervenir l'expérience humaine pour affiner la prédiction.

Une fois que l'on réalise ce travail d'interprétation des données, elles vont pouvoir être utilisées pour prendre une décision. Cette décision peut elle-même être humaine ou automatique. En effet, les systèmes de « contrôle commande » qui effectuent des actions de régulation ou de protection vont pouvoir tirer parti du jumeau numérique pour augmenter leur capacité décisionnelle.

Les décisions ainsi prises et leurs impacts sur le comportement du système seront réinjectés dans le jumeau numérique pour tenir à jour sa représentativité.

### 2.2.3 Création de données pour le big data

La problématique du « *machine learning* » est de disposer d'une base de données annotée. Il s'agit de milliers de cas à analyser manuellement pour pouvoir donner à l'algorithme d'intelligence artificielle les informations nécessaires pour faire son apprentissage. La limite se situe donc à la fois dans la disponibilité de la donnée sur le système réel et dans le temps nécessaire pour annoter ces données.

Si l'on dispose d'un jumeau numérique fiable, il pourra alors être utilisé pour créer un nombre de données importantes sur l'ensemble de son domaine de fonctionnement. En plus de la possibilité de générer de manière quasi-illimitée de la donnée, le jumeau numérique a plus de sémantique que le *big data*. En effet, il ne s'agit pas d'une masse de données mais d'un modèle construit par des spécialistes, basé sur des données d'entrée intelligibles par des spécialistes. La base de données sera donc automatiquement annotée en fonction des paramètres choisis.

## 2.3 L'humain dans la boucle

L'humain doit pouvoir se confronter au jumeau numérique. C'est la notion de présence.

Cela peut se limiter à de simples interfaces homme-machine classiques et aller jusqu'à l'immersion complète de l'utilisateur dans un environnement virtuel.

Différents moyens de créer cette sensation de présence pour l'humain existent, mais actuellement, la plus courante est d'utiliser les technologies de Réalité Virtuelle avec une représentation 3D du système étudié.

Une application de réalité virtuelle est caractérisée par des axes : immersion, interaction et autonomie (figure 5) [21].

La présence se traduit par un critère d'immersion et un critère d'interaction.

L'**immersion** correspond à la capacité de représenter les choses de la façon la plus réaliste possible. C'est la capacité de l'application à donner les informations les plus complètes possibles à l'utilisateur.

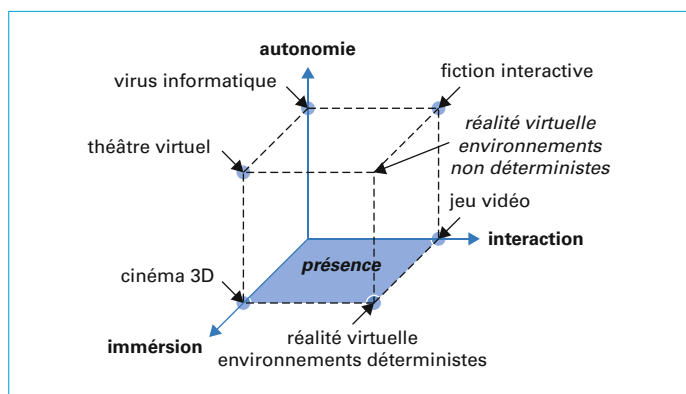


Figure 5 – Les axes de la réalité virtuelle

Alors que **l'interaction** est la capacité du système à recevoir les informations de la manière la plus aisée ou la plus transparente pour l'utilisateur.

L'**autonomie** pour sa part va dénoter de la capacité de l'application à s'adapter aux stimuli extérieurs et à l'état du monde. L'autonomie va être apportée par les simulations numériques qui vont faire évoluer le jumeau numérique.

### 2.3.1 Enjeux du temps réel : la simulation interactive

Dans le cadre d'un jumeau numérique, pouvoir approcher le temps réel est important pour différentes raisons.

#### ■ En phase de conception

Pour pouvoir faire des analyses de sensibilité, il est nécessaire de lancer un grand nombre de simulations en faisant varier les paramètres. Si le temps de calcul de chaque cas est trop important, cela rendra cette analyse trop fastidieuse.

La création d'un scénario complet en mode « *batch processing* » (traitement par lots) n'est pas toujours le plus pratique pour étudier un système. Parfois, l'objectif est simplement de tester les réactions du système en fonction de différents stimuli en mode interactif.

#### ■ En phase de production/exploitation ou maintenance du système

Le jumeau numérique sera utilisé comme outil de prédiction. Il doit alors être plus rapide que le temps réel, pour pouvoir prendre en compte les données capteurs et pouvoir anticiper les comportements que va avoir le système dans un futur proche, ou pour prédire quel est l'état actuel du système au vu des données capteurs accumulées. En somme, il faut que le résultat arrive avant le moment où l'on doit prendre la décision.

#### ■ Pour la formation

Pour la formation, une interaction rapide entre l'utilisateur et la simulation est essentielle pour l'assimilation du contenu pédagogique.

Il faut mettre en œuvre des simulateurs qui permettent de simuler rapidement le système, et ceci malgré la complexité des phénomènes et de leurs interactions. La solution à adopter se fait au cas par cas, et n'implique pas forcément d'acheter des machines de calcul toujours plus chères ou d'utiliser des clusters de calcul, car parfois cela ne suffit pas pour satisfaire cette contrainte du temps réel [28].

Plusieurs méthodes permettent d'améliorer les performances de vitesse du simulateur :

- construire le modèle en utilisant une approche *Top-down* : cela va permettre de choisir le niveau de granularité de chaque phénomène indispensable à la bonne simulation du système (cf § 2.1.1) ;
- utiliser des « *surrogate model* » (cf § 2.1.4 et exemple Wind-House) ;

- utiliser des méthodes de « *splitting* » permettant la parallélisation des calculs [22].

L'enjeu sera de trouver le bon compromis entre vitesse d'exécution et représentativité du jumeau numérique.

### 2.3.2 Enjeux de l'immersion : la présence face à la complexité

Qui dit système complexe, dit résultats complexes à analyser. Les métriques sont souvent multidimensionnelles et dynamiques. L'œil et le cerveau d'un expert sont entraînés à analyser les comportements du système et à les comparer avec son expérience. C'est pourquoi, il est très utile de pouvoir mettre en présence l'expert avec le jumeau numérique. Cela permet de prendre une décision d'expert sans nécessairement analyser un ensemble important de courbes.

La perception du monde pour un humain est basée sur la vision et le mouvement [23], mais pour reproduire cela dans un outil numérique, il est nécessaire d'avoir :

- une bonne représentativité du jumeau numérique au risque de décrédibiliser l'ensemble des résultats. Pour cela, deux choses sont nécessaires : valider les modèles employés en comparaison de données extérieures et impliquer un ou des experts dans le processus de conception du jumeau numérique pour valider pas à pas le comportement global de l'outil ;
- un temps de réponse très court pour éviter les désagréments (vertiges, mal des transports, pertes d'équilibre) ;
- un réalisme visuel suffisant pour permettre de calquer les modes de fonctionnement du jumeau numérique sur la réalité.

Dans les cas les plus poussés, il est possible d'avoir recours aux techniques de la réalité virtuelle. Les progrès sur les casques de réalité virtuelle/augmentée et les cartes graphiques permettent maintenant d'avoir un niveau d'immersion important. Ces nouvelles technologies peuvent être utilisées pour faire vivre une nouvelle expérience de présence aux utilisateurs de jumeaux numériques.

### 2.3.3 Enjeux de la collaboration

La présence est un critère essentiel dans un jumeau numérique, mais l'idéal est de permettre à plusieurs utilisateurs de manipuler collaborativement le jumeau numérique :

- pendant la phase de conception pour **permettre à différents experts métier de communiquer autour d'un même objet avant même qu'il existe**. Cela permet de faire des hypothèses et d'analyser les impacts sur les autres disciplines et le comportement global du système ;
- pour **faire de la formation autour de l'objet lorsqu'il est trop coûteux ou dangereux de le faire en conditions réelles**. Il est ainsi possible d'immerger simultanément des utilisateurs apprenants et des formateurs pour faire du transfert d'expertise en conditions simulées.

Les techniques mises en œuvre ici sont celles des systèmes informatiques répartis et le concepteur devra résoudre les problèmes de :

- la **quantité de données échangées et des temps de latence** : il faudra limiter les données transmises aux variations dynamiques et transmettre toutes les données statiques au démarrage de l'application. Des techniques de compression semblables à celles utilisées pour le « *streaming* » ou à des méthodes d'extrapolation tels que le « *dead reckoning* » (navigation à l'estime) pourront être utilisées ;
- la **sécurisation des échanges** : la première sécurité sera de ne pas échanger sur le réseau de données sensibles. Si toutefois cela s'avère irréalisable, il est recommandé d'utiliser des algorithmes de cryptage tels que ceux utilisés dans le protocole TLS/SSL ;
- la **synchronisation et les exclusions mutuelles** : l'objectif est la construction d'un état cohérent. En effet, dans un système informatique réparti, compte tenu que les messages peuvent être perdus et

mettre des temps variables pour arriver à destination, deux ordinateurs peuvent avoir, au même instant, une vision différente de l'état du système. C'est principalement pour cela qu'il est recommandé, dans la plupart des cas de jumeau numérique, d'avoir une architecture avec un serveur centralisé.

Ces pratiques sont assez classiques et largement implémentées dans les moteurs de jeux vidéos massivement collaboratifs.

#### À retenir

- Pour augmenter la performance du jumeau numérique, le modélisateur doit faire le choix des méthodes de simulation à utiliser suivant l'objectif à atteindre.
- Le jumeau numérique doit être capable d'échanger des données avec le système réel : des canaux de communication doivent être créés entre le système et son jumeau.
- Intégrer l'humain dans la boucle est primordial. Un jumeau numérique doit être capable de répondre aux enjeux de l'interaction, de l'immersion et de la collaboration.

## 3. Application : Jumeaux numériques pour l'énergie

Le domaine des énergies est un domaine d'avenir où les jumeaux numériques apportent réponses, gain de temps et de ressources.

Cette section présente deux exemples de jumeaux numériques pour l'énergie :

- le premier, jumeau numérique de l'éolienne WindHouse, met en évidence la conception simultanée des systèmes (§ 3.1) ;
- le deuxième, jumeau numérique du bateau de pose DeepBlue, illustre comment un jumeau numérique permet l'optimisation des procédures d'un système réel (§ 3.2).

### 3.1 Eolienne à axe vertical WindHouse

L'énergie cinétique du vent est transformée et utilisée depuis des siècles. Que ce soit pour la propulsion des bateaux grâce à l'utilisation de voiles, ou bien pour moulin des céréales dans des moulins par rotation d'ailes soumises au vent, l'Homme a su tirer parti des avantages du vent. De nos jours, l'énergie éolienne est communément transformée en énergie électrique par des aérogénérateurs. Elle est devenue progressivement une alliée dans la lutte contre le changement climatique.

Il est courant d'associer le concept d'énergie éolienne aux éoliennes horizontales (ou tripales) installées çà et là sur nos mers et territoires. Mais ces éoliennes présentent de nombreuses limites connues : encombrement, maintenance et exploitation contraignantes, plage d'utilisation restreinte, faible intégration paysagère. Pour contrer ce phénomène, de plus en plus de concepts d'éolienne verticale émergent : les éoliennes verticales, plus petites, moins bruyantes, avec une meilleure captation du vent, connaissent un essor grandissant. Elles présentent de nombreux avantages pour une implantation urbaine, périurbaine, côtière ou même maritime. Les jumeaux numériques s'avèrent être un outil idéal pour étudier un concept innovant comme celui d'une éolienne verticale.

Le projet WindHouse est né d'une idée de Pierre-Armand THOMAS, son inventeur. Il consiste en l'étude d'une éolienne à axe vertical et volets mobiles, et repose sur deux concepts principaux de simplification de l'objet : simplifier le design et simplifier les opérations (maintenance, installation, démantèlement)

pour une production juste et un retour sur investissement optimisé.

L'éolienne WindHouse est étudiée en simulation depuis 2014 grâce à la technologie du jumeau numérique. Développé par Cervval, ce jumeau numérique est intervenu très tôt dans le processus de conception du système. C'est la définition de la conception simultanée : concevoir en parallèle le concept de base et la simulation associée pour l'étude du concept.

Ce chapitre traite du processus de conception simultanée associé au projet WindHouse ainsi que l'approche utilisée pour la simulation numérique. L'apport du jumeau numérique WindHouse est démontré dans toutes ses applications.

#### 3.1.1 La conception simultanée appliquée à une éolienne innovante

L'éolienne WindHouse était au commencement un système complexe d'autant plus difficile à appréhender car existant uniquement sur croquis et feuilles de calcul. À cette époque, seul l'inventeur pouvait visualiser la globalité du système et se rendre compte de la diversité des domaines à étudier pour concevoir cette éolienne. Tout l'enjeu de la conception simultanée d'un tel système repose sur la communication entre les acteurs : l'inventeur, les experts, ainsi que les développeurs et les investisseurs.

Comme le montre la figure 6, la visualisation du concept pouvait se résumer à :

- une embase fixe au sol (partie bleue sur la figure 6) abritant les équipements de transformation de l'énergie ;
- un manège tournant autour d'un mât circulaire vertical fixe ;
- des volets mobiles (représentés en rouge sur les parties extérieures et vert sur les parties intérieures).

Ces simples éléments faisaient déjà de l'éolienne WindHouse un système complexe regroupant plusieurs éléments à prendre en considération :

- des éléments de structure métallique avec des matériaux à définir ;
- des éléments divers de mécanique pour capter la force ou transformer l'énergie cinétique du vent ;
- des génératrices électriques à choisir et leurs lois de pilotage à maîtriser ;
- de l'analyse aérodynamique des écoulements de l'air autour des volets et à l'intérieur de la structure ;
- des systèmes mécaniques pour s'adapter à l'incidence du vent ; etc.

Tous ces éléments font intervenir plusieurs domaines de compétence tels que la science des matériaux, l'aérodynamique, l'étude de structure, les technologies et équipements électriques, la transmission, la mécanique, etc. Outre ces aspects techniques, il est aussi nécessaire de considérer le cycle de vie du système (coût initial de la construction, maintenabilité, rentabilité au cours du temps) dès les premières phases du projet.

Afin de définir le système virtuel, ou en d'autres mots, construire la simulation numérique associée au jumeau numérique, l'approche

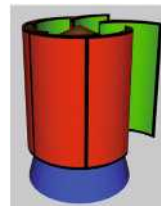


Figure 6 – Modèle numérique 3D de l'éolienne WindHouse



mixte s'est avérée le meilleur choix. En effet, l'approche mixte présente dans ce cas deux avantages précis :

- le modèle *Top-Down* est essentiel pour identifier tous les phénomènes nécessaires à la modélisation de l'éolienne WindHouse et la validation des résultats. Chaque phénomène du modèle *Top-Down* applique des forces sur les éléments de l'éolienne. Ces forces sont ensuite intégrées pour obtenir la vitesse puis la position des volets et du mât ;
- le modèle *Bottom-Up* est primordial pour les études de dynamique des fluides. Afin de déterminer les effets du vent sur la structure, les calculs d'écoulement de l'air ont été délégués au logiciel Open Foam [24] [25]. Différents composants du logiciel sont utilisés afin de mailler l'espace autour de l'éolienne, effectuer les calculs de dynamique des fluides et extraire les forces appliquées par le modèle *Top-Down* sur les différents éléments de la structure.

La simulation WindHouse a été construite pour être capable de déterminer à n'importe quel moment si un calcul de dynamique des fluides est nécessaire. En effet, chaque calcul est dépendant de la position des éléments de l'éolienne : chacun des cinq volets peut avoir un angle d'ouverture différent et le mât possède également une orientation. Chaque configuration créée par la combinaison de ces six valeurs correspond à un calcul de dynamique des fluides pour des caractéristiques de vent données. Autant dire que le nombre de calculs nécessaires est très élevé, pouvant mener à un temps d'exécution très coûteux. Afin de limiter le temps de calcul, une base de cas a été créée : elle regroupe les cas déjà calculés et un moteur de recherche permettant d'obtenir quasi instantanément le résultat d'un calcul déjà effectué. De cette façon, la simulation garde une interaction fluide et en temps réel.

En parallèle, la simulation numérique de l'éolienne WindHouse est associée à une plateforme numérique de visualisation collaborative de scènes dynamiques en 3D et réalité virtuelle (<https://www.digitwin.fr>). Elle permet de plonger les utilisateurs dans un environnement virtuel collaboratif construit autour de l'éolienne WindHouse.

■ La première étape de conception simultanée de l'éolienne peut être définie tel que schématisée sur la figure 7.

Les croquis et feuilles de calculs de pré-conception, sur lesquels se basent les réflexions, permettent à la fois d'avancer dans la conception du système réel, et de définir le système virtuel (tel que décrit ci-dessus). Le système virtuel du jumeau numérique permet de visualiser le comportement du système réel et d'améliorer ce qui doit l'être. Une boucle visualisation / amélioration est alors entreprise jusqu'à la conception d'un système performant (figure 8).

Dans le cadre de la conception simultanée de l'éolienne WindHouse, cette première étape s'est traduite par diverses études portant sur la répartition des masses dans les volets, les études des mécanismes permettant de refermer le volet, l'analyse des éléments permettant de transmettre le couple, l'étude de l'orientation du mât, les études permettant de déterminer les meilleures lois de génératrices, etc. Cette première étape est très importante : elle définit le mode de

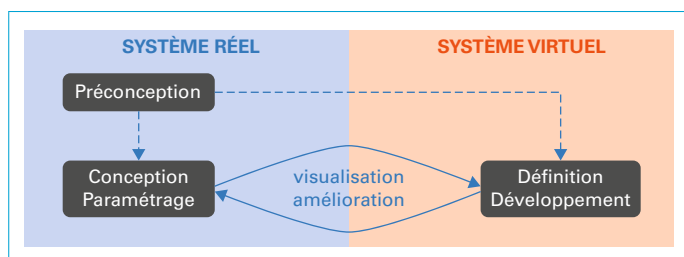


Figure 7 – Première étape de conception simultanée de l'éolienne WindHouse

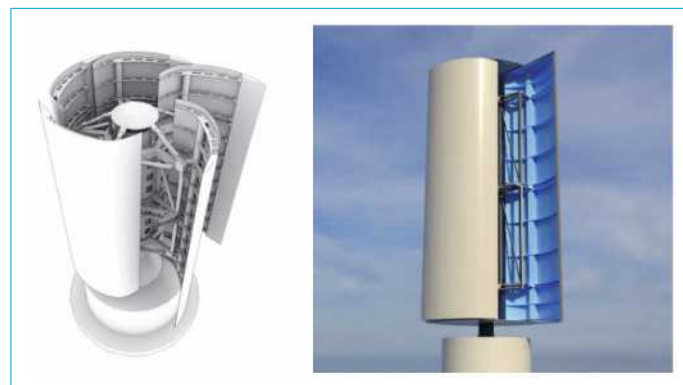


Figure 8 – Croquis et représentation 3D de l'éolienne WindHouse après la première étape de conception simultanée

communication entre les acteurs et permet l'acquisition par tous de la connaissance et compréhension du système.

■ Une deuxième étape fondamentale dans la conception simultanée de l'éolienne WindHouse est la fabrication de maquettes permettant de tester le système réel et valider le système virtuel (figure 9).

Les études de conception du système réel vont permettre de définir les mécanismes les plus pertinents à tester (par exemple dans le cas de l'éolienne WindHouse les mécanismes pour refermer le volet). Le jumeau numérique développé grâce à l'étape 1 va permettre de définir un modèle numérique de maquette.

La construction de la maquette est ensuite pensée en étroite collaboration avec les résultats de simulation et grâce à l'observation du comportement du système dans l'environnement virtuel. Enfin, les résultats des essais effectués sur le système réel (dans ce cas, test en soufflerie) sont comparés aux prévisions issues du jumeau numérique.

Dans le cadre de l'éolienne WindHouse, cette étape a permis la construction de trois maquettes de différentes tailles, menant à la détermination du comportement optimal de l'éolienne et à la validation des mécanismes importants. La figure 10 montre la dernière maquette réalisée (volets de deux mètres de hauteur) en

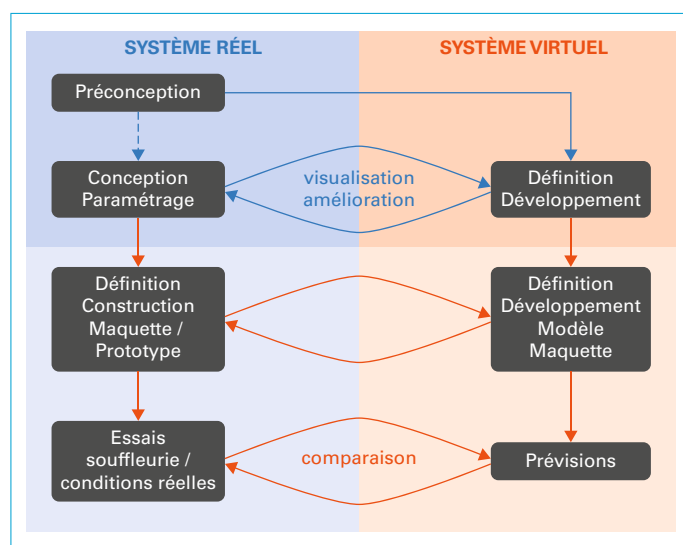


Figure 9 – Deuxième étape de conception simultanée de l'éolienne WindHouse



Figure 10 – Illustration issue du jumeau numérique (à gauche) et dernière maquette de l'éolienne WindHouse (à droite)

comparaison avec son jumeau numérique. Un prototype avec des volets de neuf mètres de hauteur est à l'étude.

■ Une **troisième étape fondamentale dans la conception simultanée de l'éolienne WindHouse**, qui apparaît à chaque réalisation de maquette, est la calibration du jumeau numérique (figure 11).

La comparaison des résultats d'essais (ou tests en conditions réelles) et de simulation permet la calibration et l'ajustement des paramètres flexibles de la simulation. Il s'agit de se servir de toutes les données d'observation pour optimiser les résultats issus de la simulation, si cela s'avère nécessaire. L'optimisation de la modélisation de la maquette mène inévitablement à l'optimisation de la modélisation du concept. Cette étape peut également mener à une nouvelle boucle de visualisation / amélioration du concept jusqu'à obtenir un nouveau système performant.

■ **Pour résumer**, dans le contexte de conception simultanée de l'éolienne WindHouse, l'approche mixte de la simulation numérique a apporté plusieurs avantages dans la construction du jumeau numérique, comme s'appuyer sur des logiciels connus présentant des connaissances dans des domaines théoriques précis, tout en gardant la validation des résultats obtenus par comparaison aux données observées.

Le couplage de la simulation avec un logiciel externe comme le logiciel Open Foam présente l'inconvénient de ralentir la simulation. Il faut trouver des méthodes pour garder un système interactif performant, comme la base de cas calculés de dynamique

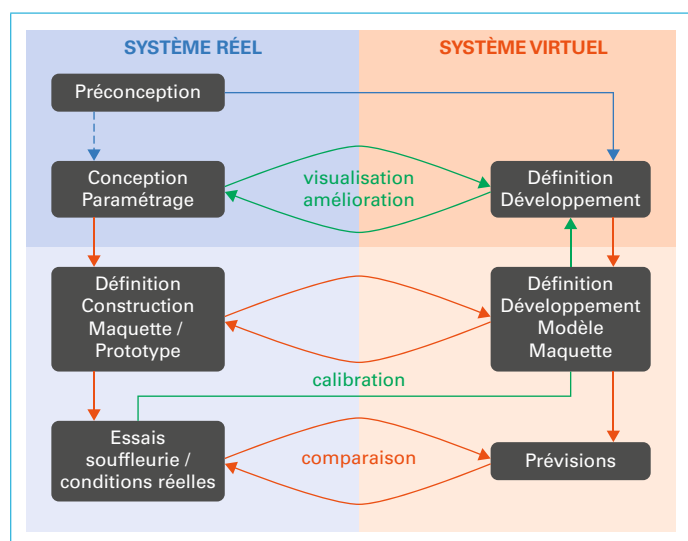


Figure 11 – Troisième étape de conception simultanée de l'éolienne WindHouse

des fluides, définie dans le cadre de l'étude WindHouse. Garder une simulation interactive permet à l'utilisateur, plongé dans l'environnement virtuel par le jumeau numérique, de modifier en direct les paramètres de simulation (comme les paramètres de structure de l'éolienne WindHouse ou les conditions de vent) afin d'observer directement et sans délai l'influence sur le comportement global de la structure et les résultats de prévision (valeurs de production dans ce cas).

C'est de cette façon que l'éolienne WindHouse et son jumeau virtuel ont été conçus. Le jumeau numérique a été pensé pour évoluer en même temps que le système réel en termes de conception, mais il est et sera utile également pour d'autres applications.

### 3.1.2 Utilisation du jumeau numérique

Comme vu précédemment, le jumeau numérique de l'éolienne WindHouse a été un véritable atout pour suivre l'évolution du système tout au long de sa phase de conception.

Dans un premier temps, il a permis des modifications d'ordre mécanique sans fabrication afin d'étudier par exemple l'influence du nombre de volets de l'éolienne. En effet, grâce à la manière dont la simulation numérique a été construite, choisir six, cinq ou quatre volets signifie pour le modèle numérique uniquement une variation d'un paramètre. L'adaptation du modèle est ensuite automatique. De nombreuses variations ont pu ainsi être faites et testées numériquement durant la phase de conception. Dans la réalité, faire varier le nombre de volets sur une maquette physique, demande bien plus d'investissement en termes de temps, de ressources matérielles et humaines, ou de budget.

Dans un second temps, le jumeau numérique a permis de définir des maquettes dédiées à l'étude de mécanismes particuliers et propres à l'éolienne. Les modèles numériques des maquettes ont permis d'anticiper les éventuelles difficultés et d'identifier les points faibles de la maquette physique afin de pouvoir prévoir de les renforcer. L'observation du comportement de l'éolienne, ainsi que les prévisions de production obtenues grâce au jumeau numérique dans cette phase, ont guidé la conception de l'objet, orienté les experts, et ont permis de faire de nombreux choix.

Le jumeau numérique permet de plonger une éolienne WindHouse dans un environnement particulier donné. Il est possible de recréer cet environnement numériquement en ajoutant les caractéristiques du vent. En utilisant les statistiques de vent d'un site précis, il devient alors possible d'étudier la production d'une éolienne sur ce même site. Cette extrapolation du productible permet de faire des prévisions précises sur la production, mais aussi de calculer finement le retour sur investissement. En effet, à partir de ces résultats et en intégrant le coût de fabrication, d'installation, de maintenance, de mise en réseau, en tenant compte du tarif de l'énergie, il est possible de connaître l'amortissement de l'installation d'une éolienne WindHouse dans l'environnement donné.

De plus, les études de sites permettent d'adapter la structure aux conditions réelles que l'éolienne va rencontrer.

Par **exemple**, pour un site plus exposé avec un vent de plus grande force, il sera possible de régler les mécanismes pour que la production soit optimale. Le jumeau numérique de l'éolienne WindHouse permet cette étude sans besoin de tests préliminaires en conditions réelles. Une éolienne WindHouse sera en quelque sorte programmée pour le site où elle sera installée.

Pour augmenter la connaissance du système, des conditions environnementales exceptionnelles que pourraient rencontrer l'éolienne, peuvent être simulées pour observer le comportement de la structure. Cela permet par exemple de prévoir des équipements supplémentaires nécessaires en termes de stockage de l'énergie, ou de modifier la mise en sécurité.



Figure 12 – Le jumeau numérique permet un voyage dans une dimension virtuelle

Les casques de réalité virtuelle font du jumeau numérique un outil de communication inhabituel et attractif. Il permet au présentateur de proposer à son auditoire un véritable voyage dans une autre dimension : la visualisation ou la mise en situation est immédiate. Que ce soit pour informer, toucher, convaincre le grand public, la communauté scientifique, ou d'éventuels investisseurs, la fascination que procure un jumeau numérique plonge l'utilisateur dans un autre monde, voire le projette dans un avenir proche (figure 12).

Le jumeau numérique de l'éolienne WindHouse permet de visualiser la structure dans un environnement choisi, de contrôler la simulation tout en observant le comportement de l'éolienne face au vent, mais également de manipuler la structure.

Par exemple, l'utilisateur a la possibilité d'ouvrir et de fermer les volets de l'éolienne, comme il le ferait en réalité en attrapant de sa main le bord d'un volet. Cette interactivité avec la structure est précieuse quelle que soit la phase de cycle de vie du projet. L'utilisateur peut avoir la possibilité de montrer ou de sélectionner une pièce de la structure, de la dissocier de l'ensemble pour la montrer et discuter autour en mode collaboratif avec les acteurs du projet.

Ces modes interactifs et collaboratifs seront profitables et très enrichissants pour dispenser les formations d'installation, d'exploitation ou de maintenance de l'éolienne WindHouse. Les apprenants pourront s'exercer aux manipulations nécessaires et/ou délicates en toute sécurité et sans monopolisation de la structure.

Les applications jusqu'ici décrites concernent les phases qui précèdent presque toutes l'implantation d'une éolienne WindHouse : la conception, la communication et la vente, la prévision pour le paramétrage d'une éolienne sur un site précis, la formation. Le jumeau numérique de l'éolienne WindHouse sera également très utile une fois la structure implantée sur site. En effet, le jumeau numérique permet de suivre la vie de la structure, de monitorer la maintenance, d'en prévoir les interventions, et de détecter une anomalie de comportement afin de prévenir les pannes.

Le jumeau numérique de l'éolienne WindHouse est indissociable de son jumeau réel. Il fait vivre le concept depuis l'émanation de l'idée et continuera de suivre chaque éolienne dans son étude, dans son implantation et tout au long de son exploitation jusqu'à son démantèlement. Pouvoir suivre le cycle de vie complet d'un projet innovant telle qu'une éolienne verticale WindHouse, enrichir jour après jour le concept et les connaissances de tous les acteurs

réunis autour du projet, toucher et informer le grand public ou convaincre des investisseurs, telle est la réussite de ce jumeau numérique.

### 3.2 Navire de pose de pipeline

L'exploitation de champ pétroliers ou gaziers nécessite la construction de navires capables de poser des pipelines dans des zones géographiques de plus en plus éloignées des côtes et atteignant des profondeurs de plus en plus élevées. Cela pose deux problèmes : être capable de construire un navire capable d'avoir une vitesse de transit élevée et être en mesure de supporter une quantité de pipeline très importante, allant de la sortie du navire au fond de l'océan.

C'est le défi auquel Technip a été confronté lors de la conception de leur dernier bateau de pose de pipeline le Deep Energy. Dans le cadre de ce projet, Cervval a développé un jumeau numérique du navire.

Ce chapitre aborde tout d'abord l'importance d'une approche multidisciplinaire, puis s'intéresse à comment le jumeau numérique peut être construit, quels sont ses intérêts et comment il peut être exploité tout au long de la vie du navire.

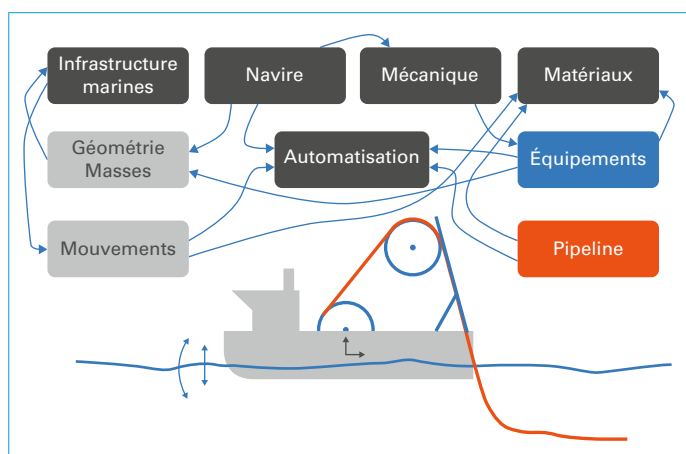
#### 3.2.1 Étude d'un navire de pose de pipeline

La conception d'un navire tel que le Deep Energy nécessite d'étudier un grand nombre de domaines. En se concentrant uniquement sur ceux impliqués dans les opérations de pose de pipeline, peuvent être citées : les infrastructures marines, l'ingénierie mécanique, l'ingénierie des matériaux, l'automatisation.

Le schéma de la figure 13 synthétise les différents échanges entre les domaines. Il est assez aisé de constater que tous les domaines sont étroitement liés et qu'il est nécessaire de trouver un compromis permettant de satisfaire les exigences de chacun, tout en obtenant les meilleures performances possibles afin d'obtenir le navire le plus compétitif possible.

Les infrastructures marines vont permettre d'étudier le comportement du bateau en mer. Pour cela, elles vont avoir besoin de connaître la géométrie du navire, mais surtout la répartition des charges sur celui-ci. Cette répartition sera fonction des différents équipements à disposition sur le navire (grue, bobines contenant le pipeline, tour de pose).





**Figure 13 – Mise en évidence des différents domaines mis en œuvre dans l'étude du processus de pose de pipeline à partir d'un navire. Les échanges entre les différents domaines sont représentés par les flèches bleues**

L'ingénierie mécanique consiste à déterminer les équipements nécessaires et leur dimensionnement afin que le bateau puisse remplir sa fonction avec les meilleures performances possibles. La définition des équipements doit se faire avec des contraintes de place liées à la morphologie du navire. Il est aussi nécessaire de s'assurer que ces équipements garantissent l'intégrité du pipeline lors des opérations.

Le rôle de l'ingénierie des matériaux consiste à s'assurer de l'intégrité du pipeline en étudiant les efforts et les contraintes appliquées au pipeline. En effet, celui-ci va subir un certain nombre de déformations depuis la sortie de sa bobine de stockage, en passant par la tour de pose, puis lors de sa tenue à la sortie du navire et finalement lors de sa pose sur le fond marin. Les mouvements du bateau vont aussi avoir un impact sur les caténaires formées par le pipeline au cours de sa pose.

L'automatisation va consister à mettre en place un processus capable de synchroniser les différents équipements du navire et à mesurer et reporter un maximum d'information permettant aux opérateurs de s'assurer du bon déroulement de la procédure. L'aspect sécurité est aussi important pour pouvoir garantir tout d'abord l'intégrité du personnel à bord et ensuite celle du matériel.

### 3.2.2 La construction du jumeau numérique

Étudier un navire de pose de pipeline nécessite la mise en œuvre de nombreux domaines de compétences. Afin de pouvoir synthétiser ses connaissances sur le Deep Energy, la société Technip a souhaité développer un jumeau numérique du navire. Cette section revient sur le processus de construction de ce jumeau numérique.

La construction du modèle numérique du navire a été réalisée en utilisant une approche *Bottom-up*, c'est à dire en décomposant le problème en plusieurs phénomènes interagissant entre eux. Ce travail était simplifié car les différents domaines étaient connus et leurs interactions déjà bien identifiées.

■ **Le premier phénomène concerne les mouvements du navire.** Ceux-ci sont modélisés en utilisant des résultats synthétiques produits par un logiciel d'architecture navale. Les mouvements sont appliqués au navire en fonction de la houle choisie pour le cas étudié. Cela a pour conséquence d'appliquer une accélération au navire, à ses équipements et au pipeline (notamment la partie suspendue entre la roue et la tour).

■ **Le second phénomène important est la physique du pipeline.** Celle-ci a été modélisée par un ensemble de réactions physiques

aux efforts externes appliqués sur celui-ci : l'élongation, la flexion, la plastification, l'accélération due à la gravité et aux mouvements du navire et les contacts avec les composants externes (bobine et équipements de la tour de pose). La résolution de la physique du pipeline, compte tenu des efforts importants mis en œuvre, a nécessité la mise en œuvre de modèles de calculs spécifiques afin de garantir la stabilité du simulateur.

■ **Ensuite des modèles numériques des équipements constituant la chaîne de pose ont été créés** afin de reproduire leurs limites mécaniques, par exemple le couple maximum pouvant être exercé, l'inertie ou la vitesse maximum atteignable. Un travail de recherche documentaire est nécessaire afin de pouvoir paramétrer au mieux le modèle de chaque équipement.

■ **Finalement, une partie des systèmes d'automatisation a été reproduite.** Le modèle numérique proposé permet de reproduire la durée des cycles de calcul et le temps de propagation des informations des différents capteurs sur le réseau. Ici, un travail conséquent avec les équipes chargées de la conception a été nécessaire afin de bien paramétrer les modèles numériques. Des sessions de travail à bord du navire ont été organisées afin de permettre d'effectuer des mesures sur les installations réelles.

Une représentation du navire (figure 14) a été couplée au modèle numérique afin de faciliter la compréhension des couplages entre les différents phénomènes. Cette visualisation vient en complément de graphiques permettant d'extraire des mesures au sein du modèle numérique.

L'utilisation d'une approche *Bottom-up* pour la conception du jumeau numérique a joué un rôle primordial dans le cadre de ce projet. En effet, le jumeau numérique a été construit alors que le navire était encore en cours de finition. Il n'existait donc pas encore de données permettant de valider celui-ci.

La méthode choisie a donc été d'associer les spécialistes de chaque domaine au développement du jumeau numérique. Le découpage en phénomènes a permis d'isoler certains comportements afin de recréer des cas de validations pour chaque domaine. Le simulateur a ainsi pu être validé par étapes successives en complexifiant de plus en plus les cas étudiés.

Une des raisons du succès de la création de ce jumeau numérique a été l'implication d'ingénieurs expérimentés de Technip, ayant déjà participé à la conception de navires de pose de pipeline auparavant. Ils ont permis d'effectuer une analyse critique et constructive du comportement et des résultats obtenus avec le jumeau numérique. Le jumeau numérique a permis en ce sens de réunir les experts de différents domaines et de faciliter le partage autour d'un point d'intérêt commun.



**Figure 14 – Jumeau numérique du navire de pose de pipeline « Deep Energy » développé par Technip. Image issue du simulateur développé par Cervva**



### 3.2.3 Utilisation du jumeau numérique

Différents cas concrets d'utilisations ont été mis en œuvre à partir du jumeau numérique du navire de pose de pipe.

■ Le jumeau numérique a été outil précieux afin **d'appréhender le comportement du navire avant la fin de la construction**.

Ainsi, il a été possible de visualiser le comportement du navire dans certains scénarios critiques. Un des avantages évident du jumeau numérique est qu'il permet d'analyser et de rejouer des scénarios en très grand nombre et cela à moindre coût comparé à des opérations réelles. Ainsi, des études paramétriques ont été réalisées afin d'étudier la sensibilité du navire à certains paramètres. En ayant pu expérimenter les réactions du navire avant les premiers essais, les équipes en charge de la mise en marche du navire ont pu gagner du temps dans les réglages lors des premiers essais en mer.

■ Mais le jumeau numérique n'est pas qu'une source de données. En effet, lorsque les premières données enregistrées à bord du navire ont été disponibles, il a été possible de les utiliser en entrées du jumeau numérique pour **améliorer sa calibration**. Le processus utilisé est de comparer à conditions identiques les résultats obtenus avec le modèle numérique à des données issues des capteurs du navire.

Grâce à une analyse des différences et à l'aide des connaissances acquises sur le comportement du navire, il est alors possible d'identifier les paramètres du simulateur à modifier. Ce processus permet, si besoin est, de raffiner les modèles ou bien d'ajuster des dimensions physiques comme par exemple les couples maximums sur certains équipements qui peuvent aller au-delà des limites théoriques prévues par le constructeur.

Ce processus de calibration du modèle numérique permet d'acquérir une plus grande confiance dans les résultats obtenus.

■ Le jumeau numérique peut être utilisé pour **effectuer de grandes quantités de tests à moindre coût**. Ainsi, il peut être utilisé pour préparer un projet de pose de pipeline en étudiant un ensemble de scénarios et anticiper au mieux les opérations.

Sa flexibilité en fait aussi un support d'apprentissage des plus intéressants dans le cadre de la formation du personnel à la pose de pipeline. Il est en effet possible de déclencher des scénarios critiques sans aucun risque humain ou matériel afin de mettre l'apprenant en situation.

Le jumeau numérique peut aussi être utilisé comme un moyen de communication, notamment grâce à l'outil de visualisation en réalité virtuelle. Ainsi, il est possible de faire la démonstration des opérations à venir sur un nouveau projet.

■ Finalement, **le jumeau numérique n'est pas un modèle statique et définitif**. Par exemple il peut être utilisé pour étudier le remplacement d'un équipement. Il est alors possible de comparer le comportement du navire avec ou sans les nouveaux équipements.

En effet, le modèle numérique du navire de pose de pipeline peut être adapté pour étudier des améliorations technologiques sur un autre navire.

Dans le cadre de cette étude, le jumeau numérique a permis de répondre aux questions suivantes. Est-on toujours en mesure d'obtenir des performances similaires ? Quel est le gain en termes de performance ? Existe-t-il des scénarios dans lesquels les nouveaux équipements sont un inconvénient ?

La possession d'un jumeau numérique permet de répondre à cet ensemble de questions simplement en spécifiant les scénarios à tester et les critères d'analyse. Le modèle numérique permet d'ajuster

certains paramètres à moindre coût au plus tôt dans le processus de décision.

#### À retenir

- Les jumeaux numériques permettent une aide durant la phase de conception grâce à la conception simultanée des systèmes réels et virtuels (exemple : éolienne WindHouse).
- Ils permettent l'optimisation des procédures durant la phase d'activité (exemple : bateau de pose DeepEnergy).

## 4. Conclusion

Un système complexe est difficile à appréhender par l'esprit humain. En effet, il présente deux difficultés principales pour qui-conque souhaite comprendre son fonctionnement : il contient une variété de phénomènes qui interagissent entre eux et avec l'environnement et il évolue dans le temps souvent de façon non-linéaire.

Les modèles numériques décrivant les phénomènes en jeu dans un système complexe doivent être capables de retranscrire à la fois ces interactions et cette évolution temporelle du système. Un jumeau numérique est un modèle numérique fidèle à un système physique précis et agrégeant l'ensemble des connaissances, des données et des simulations numériques depuis sa conception. Coconstruit avec les experts des domaines impliqués, il s'avère être un outil précieux dans la compréhension d'un système complexe, ce qui peut expliquer en partie l'intérêt grandissant du domaine de l'ingénierie pour ces jumeaux numériques.

Un jumeau numérique performant se traduit par plusieurs critères essentiels liés à son architecture et à son développement : la conception simultanée, la représentativité, l'interopérabilité, la présence, l'explicabilité et l'autonomie. Lorsque tous ses critères sont respectés, les applications du jumeau numérique sont nombreuses tout au long du cycle de vie d'un projet. Que ce soit au niveau de la conception, de la réglementation, de la production, de la communication, de la formation ou de la maintenance, le jumeau numérique permet des gains de temps, de ressources, d'apprentissage et de connaissances. Il devient très vite indispensable à la compréhension de la globalité du système.

Les nouvelles méthodes de simulation, les nouvelles technologies d'intelligence artificielle ou de réalité virtuelle et/ou augmentée permettent sans cesse des performances améliorées pour des jumeaux numériques qui répondent aux enjeux du temps réel, de l'immersion et de la collaboration. Ainsi, les jumeaux numériques trouvent aisément une place dans le domaine du *big data* en offrant une réponse spécifique pour la création facilitée de base de données annotées.

Les jumeaux numériques existent depuis longtemps. À défaut d'être associées au terme « jumeau », les maquettes numériques de systèmes complexes proposaient déjà des services similaires. L'évolution des mentalités, les progrès des nouvelles technologies, les effets de mode, ont permis d'accélérer l'acceptation des jumeaux numériques dans les domaines de l'industrie et de l'ingénierie. Ils apportent une nouvelle vision, plus moderne, avec des objectifs précis soucieux de l'économie des ressources et de la prévention des risques.

Les jumeaux numériques permettent de donner une nouvelle vision sur la façon de concevoir, de piloter, d'optimiser. Par la multitude d'applications qu'ils permettent et la multitude de domaines qu'ils peuvent étudier, ils pourraient être la solution pour donner vie aux innovations de demain.

## 5. Glossaire

### Auto-organisation ; *self-organization*

L'auto-organisation, également appelée (en sciences sociales) « ordre spontané », est un processus dans lequel une forme d'ordre général découle d'interactions locales entre des parties d'un système initialement désordonné.

### Bifurcations ; *bifurcation*

La théorie des bifurcations étudie certains aspects des systèmes dynamiques multi stationnaires. Une bifurcation intervient lorsqu'un petit changement d'un paramètre produit un changement dans l'organisation du système.

### CFD ; *Computational Fluid Dynamics*

La mécanique des fluides numériques, plus souvent désignée par le terme anglais *CFD*, consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide.

### Chaos ; *chaos*

Un système est dit « chaotique » si une très faible variation des conditions initiales entraîne une forte variation des résultats observables. Il est souvent illustré par l'« effet papillon ».

### Coconstruction ; *co-operative design*

La coconstruction renvoie à la participation de plusieurs locuteurs dans la production d'un énoncé ou dans la construction de sens.

### Conditions limites ; *boundary condition*

En mathématiques, une condition aux limites est une contrainte sur les valeurs que prennent les solutions des équations aux dérivées ordinaires et des équations aux dérivées partielles sur une frontière.

### Couplage ; *coupling*

Le couplage est une métrique indiquant le niveau d'interaction entre deux ou plusieurs composants logiciels. Deux composants sont dits couplés s'ils échangent de l'information. On parle de couplage fort ou couplage serré si les composants échangent beaucoup d'informations.

### Déterministe ; *determinist*

Terme pour désigner un système pour lequel les mêmes entrées produisent toujours exactement les mêmes sorties.

### Distribution ; *distribution*

En analyse mathématique, une distribution (également appelée « fonction généralisée ») est un objet qui généralise la notion de fonction et de mesure.

### IoT ; *Internet of Things*

L'*Internet of Things* décrit le réseau d'appareils physiques, les « objets », qui intègrent des capteurs, des logiciels et d'autres technologies en vue de se connecter à d'autres dispositifs et systèmes sur Internet et d'échanger des données avec eux. (définition Oracle)

### Itération ; *iteration*

En informatique, procédé de calcul répétitif qui boucle jusqu'à ce qu'une condition particulière soit remplie.

### Métaheuristique ; *metaheuristic*

Les métaheuristiques sont des stratégies de haut niveau qui guident une heuristique plus spécifique au problème, pour plus de performance.

### Monte-Carlo ; *Monte-Carlo*

La simulation de Monte-Carlo est une méthode d'estimation d'une quantité numérique qui utilise des nombres aléatoires. Stanislaw Ulam et John von Neumann l'appelèrent ainsi, en référence aux jeux de hasard dans les casinos.

### Multistationnarité ; *multi stationnarity*

La multistationnarité est une propriété de certains systèmes non-linéaires pouvant avoir plusieurs états stationnaires possibles, le système arrivant dans l'un d'eux en fonction des conditions initiales.

### Navigation à l'estime ; *dead reckoning*

Technique utilisée en cas de latence importante dans les systèmes informatiques distribués consistant à simuler le comportement le plus probable des acteurs basé sur les dernières informations connues.

### Rétroaction ; *feedback*

Les boucles de rétroaction sont des interactions au sein des systèmes dont les conséquences viennent agir sur les causes qui lui ont donné naissance.

### Signal faible ; *weak signal*

Les signaux faibles sont les éléments de perception de l'environnement, opportunités ou menaces, qui doivent faire l'objet d'une écoute anticipative, appelée « veille », dans le but de participer à l'élaboration de choix prospectifs en vue d'établir une stratégie, et de réduire l'incertitude.

### Simulation numérique ; *computer simulation*

Technique du domaine de l'informatique consistant à exécuter un processus ou programme sur un ordinateur en vue de reproduire un phénomène réel dans le but de prédire son évolution.

### Stochastique ; *stochastic*

Terme pour désigner un système pour lequel les mêmes entrées peuvent produire différentes sorties.

### Système cyber-physique ; *cyber-physical system*

Un système cyber-physique est un système où des éléments informatiques collaborent pour le contrôle et la commande d'entités physiques.

### Temps réel ; *real time*

En informatique, un système temps réel est un système pour lequel le résultat d'une requête est délivré suivant un délai certain. En particulier pour la simulation numérique, une application temps réel est capable de calculer les résultats au même rythme ou plus rapidement que la réalité simulée.

### Traitement par lots ; *batch processing*

Le terme batch désigne en informatique l'automatisation d'une suite de commandes exécutées en série sur un ordinateur sans qu'il soit nécessaire qu'un opérateur intervienne pour réaliser cette opération.

## 6. Sigles, notations et symboles

Symboles	Descriptions	Unités
$S_n$	État dans lequel est le système au temps actuel $t$	–
$S_{n+1}$	État du système au pas de temps suivant $t+1$	–
$M_m$	Distribution représentant l'action du modèle $m$ sur l'état du système	–
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>	
IoT	<i>Internet Of Things</i>	

# Jumeau numérique et réalité virtuelle pour la modélisation de systèmes complexes

par **Pierre-Antoine BEAL**

Directeur Général  
Cervval

**Cyril SEPTSEAULT**

Directeur des activités de simulation  
Cervval

**Matthieu AUBRY**

Ingénieur d'études  
Cervval

**Lise LORENZATO**

Directrice Qualité  
Cervval

et **Pierre-Armand THOMAS**

Président  
Tachys – Cervval

## Sources bibliographiques

- [1] LIM (K.Y.H.), ZHENG (P.) et CHEN (C.-H.). – *A state-of-the-art survey of Digital Twin : techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives*. J Intell Manuf 31, 1313-1337 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>
- [2] FUCHS (P.), MOREAU (G.) et BURKHARDT (J.-M.) et al. – *Le traité de la réalité virtuelle volume 2 : L'interfaçage et l'interaction en environnement virtuel*, Les Presses, Ecole des Mines de Paris (2003).
- [3] SCHWEICHHART (K.) (Dr.). – *Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*, Plattform Industrie 4.0 (2018).
- [4] LOURDEAUX (D.). – *Réalité virtuelle et formation : conception d'environnements virtuels pédagogiques* – Ecole Nationale Supérieure des Mines Paris, tel-00006475 (2001).
- [5] BUCHE (C.), QUERREC (R.) et CHEVAILLIER (P.) et al. – *Apports des systèmes tutoriaux intelligents et de la réalité virtuelle à l'apprentissage de compétences*, In Cognito, INPG (2006).
- [6] AIVALIOTIS (P.), GEORGOULIAS (K.) et ARKOULI (Z.) et al. – *Methodology for enabling Digital Twin using advanced physics-based modelling in predictive maintenance*, 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (2019).
- [7] CRESPI (V.), GALSTYAN (A.) et LERMAN (K.). – *Top-down vs bottom-up methodologies in multi-agent system design*. Autonomous Robots, 24(3), 303-313, (2008).
- [8] LANGTANGEN (H.P.) et LINGE (S.). – *Finite Difference Computing with PDEs*, Springer International Publishing, (2017). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-55456-3>
- [9] DEMIRDZIC (I.). – *Finite volumes vs finite elements. There is a choice*, Coupl. Syst. Mech., 9(1/2), 1-31, (2020).
- [10] GLOWINSKI (R.), OSHER (S.) et YIN (W.). – *Splitting Methods in Communication and Imaging*, Science and Engineering, Springer (2016).
- [11] LE YAOUNQ (S.). – *Co-simulation redondante d'échelles de modélisation hétérogènes pour une approche phénoménologique*, Université de Bretagne occidentale – Brest (2016).
- [12] DOLEAN (V.), JOLIVET (P.) et NATAF (F.). – *An introduction to domain decomposition methods: algorithms, theory, and parallel implementation*, Society for Industrial and Applied Mathematics (2015).
- [13] ISHAN (B.) et FARUQUE (H.). – *Effective Sampling, Modeling and Optimization of Constrained Black-box Problems*, 26th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, in Computer Aided Chemical Engineering (2016).
- [14] BAGHERI (S.), KONEN (W.) et BACK (T.). – *Comparing Kriging and Radial Basis Function Surrogates*, Conference, Dormund Germany (2017).
- [15] KLEIJNEN (J.P.C.). – *Kriging metamodeling in simulation : A review*, European Journal of Operational Research, 192(3), 707-716 (2009).
- [16] KONONENKO (I.) et KUKAR (M.). – *Machine Learning and Data Mining*, Book ISBN 978-1-904275-21-3 (2007).
- [17] MYERS (R.H.), MONTGOMERY (D.C.) et ANDERSON-COOK (C.M.). – *Response surface methodology ; process and product optimization using designed experiments*, John Wiley & Sons (2016).
- [18] ROKACH (L.). – *Decision forest : twenty years of research*, Information Fusion, 27, 111-125 (2016).

- [19] YANG (X.-S.). – *Engineering Optimization : An introduction with Metaheuristic Applications*, Wiley, ISBN : 978-0-470-58246-6 (2010).
- [20] DREO (J.), PETROWSKI (A.) et SIARY (P.) et al. – *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*, EYROLLES, pp.356, Algorithmes, 978-2-212-11368-6 (2003).
- [21] FUCHS (P.), MOREAU (G.) et TISSEAU (J.). – *Le traité de la réalité virtuelle volume 3 : Outils et modèles informatiques des environnements virtuels*, Les Presses, Ecole des Mines de Paris, p 249 (2006).
- [22] COLE (M.I.). – *Algorithmic skeletons : structured management of parallel computation*, London : Pitman, (1989).
- [23] BIDET\_ILDEI (C.), ORLIAGUET (J.-P.) et COELLO (Y.). – *Rôle des représentations motrices dans la perception visuelle des mouvements humains*, L'année psychologiques 2011/2 (Vol. 111), p 409-445, (2011).
- [24] URBINA RIVAS (O.A.). – *Numerical simulation of the flow around a wind turbine using OpenFOAM*, Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure (2014).
- [25] JOAHINDY (P.). – *Modélisation des systèmes éoliens verticaux intégrés aux bâtiments : modélisation du couple production / Bâtiment*, Energie électrique. Université de la Réunion, tel-01612744v2 (2012).
- [26] JULIEN (N.) et MARTIN (E.). – *Le jumeau numérique – De l'intelligence artificielle à l'industrie agile*. Editions Dunod (2020).
- [27] GREGORIO (J.-L.). – *Contribution à la définition d'un jumeau numérique pour la maîtrise de la qualité géométrique des structures aéronautiques lors de leurs processus d'assemblage*, Université de Paris-Saclay (2020).
- [28] COLIN DE VERDIERE (G.). – *A la recherche de la haute performance pour les codes de calcul et la visualisation scientifique*, Université de Reims Champagne-Ardenne (2019).
- [29] AVERSANO (G.). – *Development of physics-based reduced-order models for reacting flow applications*, Université de Paris-Saclay (2020).

## À lire également dans nos bases

PIECHOWIAK (S.). – *Intelligence artificielle et diagnostic*. [S 7 217], Automatique et ingénierie système (2020).

ZWINGELSTEIN (G.). – *La maintenance prédictive intelligente pour l'industrie 4.0*. [MT 9 572], Maintenance (2019).

DEVALAN (P.). – *Simulation numérique dans le processus de conception de systèmes mécaniques* [BM 5 013], Fonctions et composants mécaniques (2009-2018).

VETIL (J.-Y.) et FLASQUIN (D.). – *Le BIM pour la structure – Une pratique collaborative*. [C 3 201], Industrie du futur (2017).

BOSCH-MAUCHAND (M.) et CHEUTET (V.). – *Usine Numérique*. [AG 3 810], Conception et Production (2014).

## Brevets

Dispositif de conversion d'énergie éolienne en énergie mécanique ou électrique FR2996606 – 2014-04-11



# GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre**, **leurs compléments et mises à jour**, et bénéficiez des **services inclus**.



RÉDIGÉE ET VALIDÉE  
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR  
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE  
SUR TOUS SUPPORTS  
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS  
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- ☐ Automatique - Robotique
- ☐ Biomédical - Pharma
- ☐ Construction et travaux publics
- ☐ Électronique - Photonique
- ☐ Énergies
- ☐ Environnement - Sécurité
- ☐ Génie industriel
- ☐ Ingénierie des transports
- ☐ Innovation
- ☐ Matériaux
- ☐ Mécanique
- ☐ Mesures - Analyses
- ☐ Procédés chimie - Bio - Agro
- ☐ Sciences fondamentales
- ☐ Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,  
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

**[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)**

**CONTACT :** Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)

# LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

## ACCÈS



### Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



### Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



### Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

## SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



### Questions aux experts\*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



### Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



### Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



### Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



### Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



### Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

\*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

## ILS NOUS FONT CONFIANCE



**www.techniques-ingenieur.fr**

**CONTACT :** Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)