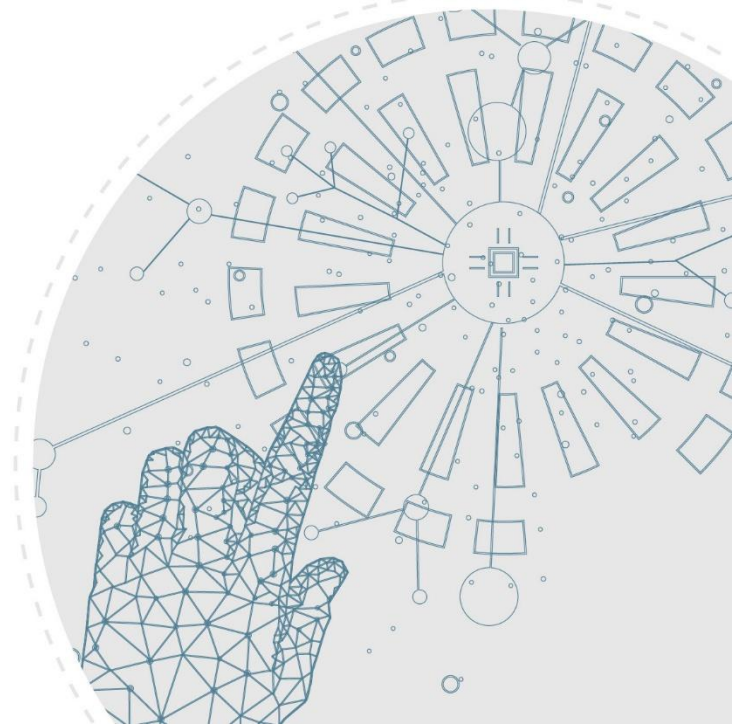




Doctrine

**Recommandations
relatives à l'usage de la simulation
numérique dans les démonstrations de
conformité aux exigences techniques et
réglementaires ferroviaires**

1^{er} février 2019



Avant-propos

Ce document est le premier édité par l'EPSF concernant la simulation numérique.

Il est le résultat d'un groupe de réflexion animé par l'établissement avec des participants du secteur ferroviaire.

Il est destiné à évoluer en fonction des avancées dans ce domaine.

Sommaire

1. Domaine d'application du présent document	6
2. Contexte.....	7
3. Termes employés dans le document.....	9
4. Principes généraux d'acceptation de la simulation numérique dans les démonstrations de sécurité et de conformité aux exigences techniques et réglementaires	10
4.1. La qualification de l'outil simulation.....	10
4.2. Aptitudes de l'utilisateur de l'outil de simulation – Processus associé	10
4.3. Validité des modèles de l'objet étudié et des modèles de son environnement	11
4.4. Reconnaissance des résultats de simulation.....	12
4.5. Contenu du dossier de démonstration dans le cas d'utilisation de la simulation numérique	12
5. Le cas particulier du recours aux outils « Hardware In the Loop »	13

En cliquant sur l'une des lignes du sommaire, vous accédez directement au chapitre ou à l'article correspondant.

1. Domaine d'application du présent document

Ce document regroupe un ensemble de préconisations relatives à l'utilisation et à la reconnaissance de la simulation (numérique, analytique, « hardware in the loop », etc.) dans les démonstrations de conformité aux exigences techniques et réglementaires applicables au domaine ferroviaire. Sa portée est générale et constitue une synthèse de réflexions menées par les acteurs du secteur ferroviaire, avant le cas échéant d'introduire ces éléments dans de futures normes afin de cadrer précisément le bon usage du recours à la simulation.

Si les démonstrations de sécurité pour la certification et les autorisations sont plus particulièrement visées, ces préconisations se veulent suffisamment larges pour être utilisées dans d'autres cadres : expertise, recherche, développement, etc.

En revanche, ce document n'a pas vocation à s'inscrire dans une démarche d'ingénierie des outils de simulation, allant de la conception à la certification, mais bien à s'assurer que l'usage qui peut en être fait offre toutes garanties d'obtenir des résultats conformes au comportement en service de l'objet simulé.

2. Contexte

Le sujet des essais à réaliser sur le matériel roulant et sur les infrastructures dans le cadre des démonstrations de sécurité afin d'obtenir une autorisation ou une certification fait l'objet de nombreuses discussions au sein du secteur ferroviaire. Leurs coûts, leurs contraintes sécuritaires, les difficultés d'organisation (notamment pour l'obtention de sillons dédiés) et parfois même leurs limitations (difficultés de tester physiquement certaines conditions extrêmes telles que la survitesse, la configuration réelle de l'infrastructure, les conditions atmosphériques, les modes dégradés, voire des risques vis-à-vis de la sécurité, etc.) conduisent les acteurs à engager des réflexions sur la minimisation de ces essais, en utilisant d'autres moyens de démonstration (essais sur banc, sur anneau dédié, simulation numérique, etc.).

Désormais largement utilisée en conception et en pré-validation des sous-systèmes, la simulation numérique¹ reste encore relativement marginale en validation (aux fins de certification et d'autorisation), où les essais en ligne demeurent largement utilisés pour apporter les éléments de preuve nécessaires à l'évaluation de la conformité.

En particulier, les spécifications techniques d'interopérabilité (STI) fixent des objectifs de résultats à atteindre, sans prescrire les moyens à utiliser, sauf à faire référence explicitement aux normes ou aux parties de normes applicables dans chaque domaine technique (freinage, comportement dynamique, captage, etc.). Le contenu de ces normes est hétérogène en termes de moyens acceptables pour démontrer la conformité aux exigences applicables : le corpus réglementaire peut, selon les cas, rendre les essais obligatoires, ou laisser une place importante à l'usage de simulation, ou encore ne rien préciser.

Afin d'anticiper la tendance au recours plus important à d'autres moyens que les essais en ligne pour démontrer la conformité aux exigences applicables, ce document a pour objectif de préciser les conditions d'acceptation d'éléments de preuve autres que les rapports d'essais, fournis dans les dossiers de certification ou d'évaluation finale.

La simulation numérique peut améliorer la compréhension des phénomènes en permettant d'étudier un nombre de cas plus vaste que ceux faisant l'objet d'essais (temps, périmètre géographique et configurations limités). La simulation permet par exemple de simuler des combinaisons de défauts qui ne sont pas forcément couverts lors d'un essai, d'investiguer un comportement en mode dégradé, de préciser les conditions aux limites d'un composant ou d'un sous-système. Pour autant, l'objectif principal n'est pas de couvrir toujours plus de scénarii qui ne sont pas pris en compte dans les essais réalisés actuellement mais de contribuer à une optimisation du process et une sécurisation des risques industriels.

L'usage le plus couramment rencontré chez les industriels est un large recours à la simulation numérique et aux essais en laboratoire pour valider des choix de conceptions et de pré-industrialisation, puis un usage plus orienté de la simulation pour préparer, orienter et minimiser les essais qui sont réalisés « en ligne ». Par exemple, dans le domaine du captage, un industriel disposant d'un outil jugé

¹ entendue dans la présente note comme le remplacement d'un processus de décision reposant sur la mesure de paramètres *in situ* par la production de résultats issus de la modélisation du comportement d'un système.

mature dans un processus maîtrisé utilise la simulation pour discriminer les cas de charge qui ne donnent pas lieu à interprétation / interrogation en matière de résultats, et établit son plan d'essais en ligne sur les cas identifiés critiques par la simulation, ainsi que les cas présentant des singularités auxquelles il sait que la simulation n'apportera pas une réponse avec un niveau de confiance suffisant quant au comportement à analyser.

De façon générale, un nombre d'essais (en ligne, sur anneau ou banc) minimal est indispensable pour consolider des modèles numériques intègres, au travers de corrélations entre ces modèles et les mesures et constats obtenus lors des essais et, in fine, pour obtenir un niveau de confiance acceptable dans les résultats.

3. Termes employés dans le présent document

Hardware in the Loop (HIL) : simulation numérique du fonctionnement d'un système pour laquelle l'environnement matériel est simulé : les entrées et sorties du système testé (hardware) sont reliées à un ordinateur qui reproduit le fonctionnement de l'environnement.

Exigences techniques et réglementaires : ensemble des conditions décrites dans les spécifications techniques d'interopérabilité que les demandeurs d'autorisations doivent satisfaire.

Outil de simulation : l'ensemble des moyens matériels et logiciels qui vont permettre de simuler le comportement ou le fonctionnement d'un objet étudié.

Modèle de l'objet étudié : représentation dans l'outil de simulation de l'objet étudié, (peut être l'objet proprement dit dans le cas d'une simulation HIL).

Modèle de l'environnement de l'objet étudié : représentation dans l'outil de simulation, de l'environnement d'utilisation de l'objet étudié.

Résultat de simulation : produit de sortie de l'outil de simulation, associant un modèle de l'objet étudié, dans l'environnement modélisé.

4. Principes généraux d'acceptation de la simulation numérique dans les démonstrations de sécurité et de conformité aux exigences techniques et réglementaires

4.1. La qualification de l'outil de simulation

Le développement et la qualification d'un outil de simulation doit s'inscrire dans une démarche qualité (par exemple ISO 9000) mise en place par les éditeurs et les utilisateurs.

Tout outil doit avoir fait l'objet d'un plan de validation² menant à sa qualification pour l'usage visé par l'utilisateur, en relation avec l'éditeur.

Le processus de validation usuel consiste à démontrer que les résultats de simulation obtenus avec des scénarios de référence – objets de référence, de nature et de complexité différente, avec des environnements de référence – sont conformes à la réalité physique du phénomène simulé. Cette démarche permet de définir le périmètre de représentativité de l'outil de simulation par rapport à l'usage visé.

Le plan de validation intègre aussi les tests de non-régression des outils lors de changements de version, de système d'exploitation ou de machine-hôte.

Les objets et les environnements de références, nombre et représentativité, doivent être documentés dans le plan de validation de l'outil de simulation.

Un retour d'expérience relatif à l'outil utilisé doit être tenu à jour³.

4.2. Aptitudes de l'utilisateur de l'outil de simulation – Processus associé

L'utilisateur doit vérifier l'adéquation de l'outil avec la finalité de la simulation, la représentativité des modèles, l'évaluation (qualitative et quantitative) des incertitudes, et la sensibilité des modèles. De plus, l'utilisateur a la responsabilité d'interpréter de manière critique les résultats obtenus (pertinence, complétude) et le cas échéant de lancer des vérifications complémentaires de l'outil de simulation utilisé.

L'entité qui utilise les outils de simulation a la responsabilité d'établir et de mettre en œuvre des procédures qualité pour les activités concernées.

Elle dispose de processus garantissant la capacité à effectuer des simulations, le maintien des compétences des utilisateurs, l'indépendance entre les concepteurs et les valideurs. Plus précisément,

² Référence : site de l'Association française d'ingénierie système (AFIS) : <https://www.afis.fr>.

³ Ce type de démarche est précisée dans certaines normes, comme par exemple la norme EN 50128, relative aux logiciels pour systèmes de commande et de protection ferroviaire et qui s'adresse principalement aux concepteurs, impose un « Plan d'assurance qualité du logiciel ». Plus précisément, en termes de validation, la notion de « Plan de vérification du logiciel » est introduite. Notons que la norme EN50128 impose qu'un « chargé d'évaluation du logiciel indépendant » prenne en charge ces actions.

l'entité doit définir un processus de validation interne des simulations effectuées, qui désigne les vérificateurs et les approbateurs distincts qui y interviennent.

À titre d'exemple, cela peut être démontré par une certification ISO associée au respect des dispositions de la norme EN ISO/IEC 17025 relative aux exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais.

4.3. Validité des modèles de l'objet étudié et des modèles de son environnement

Les simulations doivent faire l'objet d'une note récapitulant à *minima* les éléments suivants :

Cadre général :

- objet de la simulation ;
- normes de référence (le cas échéant).

Validité du modèle numérique :

- éléments constitutifs du modèle de l'objet étudié (par exemple, pour une modélisation en mécanique : hypothèses de représentativité des modèles (périodicité, symétries, etc.), modèles de comportement, type d'éléments utilisés, finesse du maillage dans le cas où des éléments finis sont utilisés, type d'intégration, modélisation des liaisons, modélisation du comportement du matériau algorithmes de résolution, etc.) ;
- les données physiques constituant le modèle de comportement et leur méthode d'identification/évaluation le cas échéant ;
- éléments constitutifs du modèle de l'environnement de l'objet étudié (Conditions aux limites, application des cas de charge), interactions et liaisons internes, etc.) ;
- méthode de calcul (type de résolution numérique et algorithme) ;
- analyse de sensibilité des paramètres caractéristiques du modèle et domaine de validité de celui-ci.

Simulations et analyses :

- données d'entrée (source des données, incertitude, modélisation de la variabilité, etc.) ;
- méthode d'analyse des résultats et justification de celle-ci ;
- preuve du bon déroulement de la simulation (convergence numérique) ;
- corrélation calculs-essais de référence.

Si plusieurs modèles sont associés, ces informations sont précisées pour chacun d'entre eux. La gestion des interfaces entre chaque modèle (par exemple entre matériel roulant et infrastructure) est également détaillée.

D'une manière générale, la validation des modèles doit s'appuyer sur une corrélation avec un ou plusieurs essais réels. Dans ce cas, la note accompagnant la simulation doit préciser la méthodologie ayant menée à cette corrélation, par exemple : conditions d'essais, précision/incertitudes de mesures d'une part, représentativité des conditions aux limites d'autre part.

4.4. Reconnaissance des résultats de simulation

Si l'outil de simulation est qualifié, l'aptitude de l'utilisateur démontrée, et les modèles de l'objet étudié (et le cas échéant ceux de son environnement) validés, alors les résultats de simulation sont réputés représentatifs du comportement réel de l'objet étudié pour le domaine de validité précisé dans le dossier de simulation numérique.

Pour la reconnaissance des résultats de simulation en tant que preuves de conformité, il existe deux cas de figure :

- les référentiels et/ou normes applicables définissent les modalités de recours à la simulation ;
- les référentiels et normes applicables ne traitent pas explicitement du recours à la simulation.

Dans le premier cas, le respect des exigences normatives et/ou réglementaires entraîne la reconnaissance des résultats de simulation.

Dans le second cas :

- soit il existe des règles de l'art concernant des domaines où la connaissance et les outils disponibles donnent un niveau de confiance suffisant pour s'affranchir d'essais physiques, et entraînent la reconnaissance des résultats de simulation ;
- dans les autres cas, une analyse de risque doit être conduite, en tenant compte notamment des éléments suivants :
 - portée de la simulation : la simulation couvre-t-elle l'ensemble des démonstrations de conformité à apporter dans le domaine considéré ou complète-t-elle des résultats d'essais pour des configurations complexes à réaliser (modes dégradés, survitesse, les grandeurs mesurées, etc.),
 - criticité de la simulation : il s'agit de préciser les enjeux de sécurité liés à chaque démonstration. S'il n'en demeure pas moins que la preuve apportée doit être conforme au référentiel applicable, le niveau de confiance attendu d'une simulation pour, à titre d'exemples, établir un niveau de bruit, des indicateurs de performance du système ou un comportement pantographe/caténaire pourra être différent de celui attendu d'une simulation pour valider un comportement dynamique ou le freinage d'un véhicule.

4.5. Contenu du dossier de démonstration dans le cas d'utilisation de la simulation numérique

Outre les éléments relatifs à la simulation numérique effectuées (paragraphe 4.3), les éléments suivants seront précisés dans le dossier de demande :

- synthèse du plan de validation de l'outil de simulation ;
- déclaration de l'utilisateur relative au respect du plan de validation de l'outil utilisé ;
- synthèse explicitant le processus garantissant la capacité à effectuer des simulations, le maintien des compétences des utilisateurs, l'indépendance entre les concepteurs et les valideurs.

5. Le cas particulier du recours aux outils « Hardware In the Loop »

Le concept de simulation de type « hardware-in-the loop » (HIL) est strictement relié à l'utilisation de composants ou éléments réels en interface directe avec des modèles de simulation informatique. C'est un cas particulier de mise en œuvre de la simulation.

Dans le cas d'une mise en œuvre classique, l'objet étudié est modélisé ainsi que son environnement. Lors du déroulement de la simulation, le modèle d'environnement fournit des stimuli au modèle de l'objet étudié. Ce dernier, en retour, met à jour ses sorties qui agissent sur le modèle d'environnement. Le système est bouclé et séquencé, les résultats de simulation sont actualisés par un solveur numérique à chaque « pas de temps ». Le référentiel « temps » n'étant pas critique, la durée d'un « pas de temps » est variable et s'adapte à la puissance de calcul de l'ordinateur sur lequel s'exécutent les modèles.

Les limitations de la simulation classique sont dues principalement à la disponibilité du modèle et à la fidélité de son comportement par rapport à l'objet réel. Si l'objet étudié est un système complexe, tel un calculateur embarqué, intégrant électronique et logiciel, il est alors très difficile de modéliser son comportement dans sa globalité sans devoir faire des choix de simplifications.

La technique HIL apporte une solution en utilisant l'objet réel plutôt que son modèle. Seul reste simulé l'environnement, les échanges entre les deux mondes – virtuel et physique – étant assurés par des interfaces réalisant les conversions entre données numériques et signal électrique. Le « pas de temps » de la simulation devant être adapté à la vitesse de réaction de l'objet étudié, la simulation HIL est dite « temps réel ».

Vue d'un autre angle, la simulation HIL est une technique permettant de leurrer l'objet étudié en lui faisant croire qu'il est dans son environnement réel. Il est ainsi possible de le soumettre à toutes les situations imaginables, nominales ou dégradées, ce qui assure l'exhaustivité des tests.

Le principe d'acceptation des résultats de la simulation HIL ne devrait pas être fondamentalement différent de celui de la simulation numérique « classique » :

- l'outil de simulation devra être qualifié selon les mêmes principes ;
- la validation des modèles ne portera que sur le modèle d'environnement ;
- synthèse explicitant le processus garantissant la capacité à effectuer des simulations, le maintien des compétences des utilisateurs, l'indépendance entre les concepteurs et les valideurs.



Établissement public de sécurité ferroviaire – Direction des Autorisations
60 rue de la Vallée – CS 11758 – 80017 AMIENS Cedex