



HAL
open science

Projet “ Réacteur Numérique ” : vers un Jumeau Numérique de Réacteur Nucléaire

Benoit Levesque, David Gouyon

► **To cite this version:**

Benoit Levesque, David Gouyon. Projet “ Réacteur Numérique ” : vers un Jumeau Numérique de Réacteur Nucléaire. S-mart2021 : 17ème colloque national S-mart, Mar 2021, “S-mart Village” virtuel, France. hal-03225080

HAL Id: hal-03225080

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03225080>

Submitted on 12 May 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Projet « Réacteur Numérique » : vers un Jumeau Numérique de Réacteur Nucléaire

Benoit Levesque
EDF R&D – EDF Lab Saclay
benoit.levesque@edf.fr

David Gouyon
Université de Lorraine, CNRS, CRAN, F-54000 Nancy
david.gouyon@univ-lorraine.fr

Résumé—Le projet « Réacteur Numérique » est un projet de recherche et développement de grande ampleur, dans lequel sont impliqués les acteurs majeurs de la filière nucléaire française. Son objectif est d'aboutir à un jumeau numérique de réacteur nucléaire. Ce clone digital permettra de s'immerger virtuellement dans le fonctionnement d'un réacteur, de réaliser des études de simulation ultra-réalistes, de former tous les opérateurs et de valoriser les codes de calcul et le savoir-faire de la filière nucléaire française auprès des exploitants nucléaires étrangers. Ce jumeau pourra à terme être utilisé tout au long du cycle de vie des centrales, de la conception jusqu'à la déconstruction, en passant par l'exploitation et la maintenance. L'originalité du projet est de reposer sur des modèles multi-physiques détaillés, facilitant ainsi la spécification et la validation des exigences de sûreté, les études de fonctionnement et les requalifications fonctionnelles à la suite d'une modification de l'installation. Il améliorera la conception des moyens de conduite des centrales, ainsi que la formation.

Mots-clés—Projet de recherche, Jumeau numérique, Réacteur nucléaire, Formation

I. PRESENTATION GENERALE DU PROJET REACTEUR NUMERIQUE

Le projet Réacteur Numérique a pour but d'asseoir la compétitivité de la filière nucléaire française en construisant un « jumeau numérique » d'un réacteur nucléaire couvrant les phases de conception, d'exploitation et de déconstruction, en fonctionnement normal, incidentel ou accidentel. Au sein de la filière, l'objectif de ce jumeau numérique [1][2] est de rapprocher tous les acteurs de l'ingénierie (concepteurs, bureaux d'études, offreurs de solutions) et de l'exploitation pour simplifier les processus d'études et sécuriser les marges de sûreté en exploitation, tout en cultivant l'approche de la démonstration par la simulation. Pour l'export, il s'agit de préparer et de structurer une nouvelle offre de services basée sur la simulation numérique et le calcul intensif.

Le Projet Réacteur Numérique est un projet filière, soutenu par le GIFEN (Groupement des Industriels Français de l'Energie Nucléaire) et par le pôle de compétitivité Nuclear

Valley. Le projet contribue directement à 4 actions stratégiques du Contrat Stratégique de la Filière¹.

Le projet Réacteur Numérique réunit 9 partenaires : EDF, CEA, Framatome, ESI Group, CORYS, ANEO, AXONE, BOOST et le CNRS (Centre de Recherche en Automatique de Nancy – CRAN). Il est financé par Bpifrance dans le cadre d'un Projet de recherche et développement Structurant Pour la Compétitivité (PSPC)².

Le projet Réacteur Numérique porte à la fois des ambitions industrielles, technologiques et économiques. Le coût du projet s'élève à 28,5 M€ avec une force de travail de 186 Equivalents Temps Plein. Le projet a débuté le 1er janvier 2020 pour une durée de 4 ans.

Au niveau industriel, l'ambition est d'améliorer la performance de la filière nucléaire (exploitant, architecte-ensemblier, bureaux d'études et équipementiers) par l'utilisation de services de simulation avancée. Il a également pour objectif d'identifier les conservatismes de conception pour retrouver des marges en exploitation et faciliter la justification de conformité de l'installation.

Au niveau technologique, le projet est structurant car il intègre de nombreux savoir-faire en matière de simulation. Son ambition est de développer deux produits innovants basés sur 3 plateformes technologiques, 23 briques logicielles et au moins 9 modèles physiques préexistants. Pour ce faire, les avancées techniques visées ont pour objectif :

- d'adapter et d'accélérer les couplages entre des codes de calculs multi-physiques multi-échelles existants au sein de la filière nucléaire française, en développant leur interopérabilité ;
- de rapprocher, de façon aisément qualifiable, les modélisations physiques issues des études d'expertise, celles issues des simulateurs de fonctionnement et la grande richesse

¹ <https://www.conseil-national-industrie.gouv.fr/comites-strategiques-de-filiere/la-filiere-nucleaire> (page visitée le 15/03/2021)

² <https://www.bpifrance.fr/A-la-une/Appels-a-projets-concours/Projets-de-recherche-et-developpement-structurants-pour-la-competitivite-PSPC-22882> (page visitée le 15/03/2021)

de données d'exploitation avec près de 2100 années réacteurs d'exploitation sûre ;

- de bénéficier des progrès des technologies de visualisation avancée (dont réalité virtuelle, réalité mixte et augmentée), de la puissance des supercalculateurs, du traitement en ligne des données de résultats de calcul haute performance couplé au traitement des données d'exploitation.

Au niveau économique, le projet est structurant pour assoir la compétitivité de la filière dans le domaine numérique et pour bâtir de nouvelles offres à l'export par la vente de produits et de services aux exploitants, aux ingénieries et aux spécialistes simulation en mettant à disposition les moyens de simulation de la filière nucléaire française.

II. ANALYSE DES BESOINS ET IDENTIFICATION DES CAS D'USAGE

Une analyse des besoins de la filière au niveau national et international a permis d'identifier plusieurs phases de vies dans lesquelles le réacteur numérique aurait un intérêt : en ingénierie, en formation, en exploitation pour l'aide à la décision, et pour le démantèlement. Les deux produits innovants développés par le projet Réacteur Numérique, décrits dans les paragraphes suivants, sont :

- Une plate-forme SaaS (Software as a Service) de services de simulation avancée de la physique du réacteur basée sur le couplage de codes spécialisés couvrant toutes les phases de la vie d'un réacteur ;

- Un simulateur d'entraînement pour les exploitants nucléaires permettant de s'entraîner via un ordinateur banalisé sur un simulateur numérique représentatif de l'état physique du réacteur sur lequel il travaille, couplé aux données process, et à des visualisations avancées des phénomènes physiques complexes.

A. Vers un banc d'intégration utilisé en ingénierie

L'un des objectifs du projet est de définir et déployer une plate-forme d'intégration commune pouvant accueillir, d'une part, les grands outils de calcul développés dans le cadre de l'activité de la filière nucléaire française et, d'autre part, les services support à la réalisation de tout type d'études (études de conception, études de dimensionnement, expertises diverses, ...). Il s'agit d'une plate-forme de co-développement faisant intervenir plusieurs partenaires, spécialisés dans des domaines complémentaires. Elle permettra de réaliser des simulations « high-fidelity » multi-échelles multi-physiques (neutronique, thermo hydraulique, chimie, thermomécanique crayon) couplées sous forme de services web sécurisés en ligne.

Les différents codes de calculs (parmi lesquels figurent Cathare [1], Cocagne [4], Apollo3® [5], Neptune CFD [6], Alcyone [7], ...) qui permettent chacun des simulations dans un domaine de la physique spécifique (neutronique, thermo-hydraulique ...) dépendent de bibliothèques différentes ou ayant des versions différentes. Ils reposent sur des mécanismes de configuration disparates. La gestion de telles hétérogénéités constitue une véritable difficulté technique, en particulier dans les environnements HPC (High Performance Computing [8]). Il

s'agit donc d'élaborer une plateforme de couplages multi-physiques avec des interfaces, des modèles de données et des structures d'échanges standardisées. L'architecture du banc doit permettre une interopérabilité de l'ensemble des codes de la filière ainsi qu'une substitution aisée d'un code par un autre autorisant des remontées d'échelle (concept de Plug and Play). Leur exécution, massivement parallélisée, devra garantir des contraintes temps-réel. La supervision des calculs doit être définie ainsi que le mode de couplage des codes, via une bibliothèque d'algorithmes dédiés permettant d'adapter l'utilisation du banc d'intégration au scénario traité et aux contraintes matérielles associées.

Cette plate-forme permettra aux ingénieurs de mieux appréhender et de mieux comprendre certains phénomènes physiques existant lors de transitoires d'exploitation via le couplage de codes spécialisés. Elle permettra également de former les nouveaux ingénieurs dans le domaine nucléaire en couplant les études de fonctionnement normal ou incidentel à une visualisation avancée en leur permettant de mieux maîtriser les phénomènes physiques complexes en jeu (Figure 1).

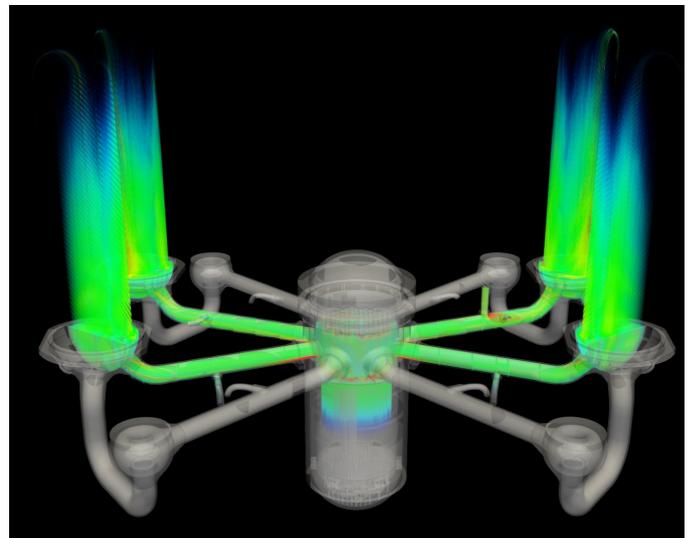


Figure 1. EXEMPLE DE REPRESENTATION DE SIMULATION DANS LE CADRE DES ETUDES

B. Vers un banc utilisé en exploitation pour l'entraînement

Actuellement, les simulateurs de centrale nucléaire (réplique de la salle de commande d'un réacteur) constituent la base pour aller vers un premier « jumeau numérique », représentant le fonctionnement d'un réacteur nucléaire à l'échelle d'un palier (c'est-à-dire d'un type de centrale). Cette plate-forme de simulation de fonctionnement du réacteur, basée actuellement sur des modélisations des principaux composants d'un réacteur nucléaire, est utilisée pour la formation des opérateurs au pilotage ou pour les études de fonctionnement normal ou accidentel.

L'innovation est ici d'enrichir le dispositif actuel de plate-forme de simulation par un simulateur d'entraînement, voire à terme d'aide à la conduite.

Ce simulateur d'entraînement est un « jumeau numérique » d'une installation représentatif de l'état physique d'un réacteur donné (et non du palier, c'est-à-dire du type de réacteur), et pouvant être couplé dynamiquement aux données réelles du site. Ce simulateur du réacteur utilisé pour l'entraînement des exploitants disposera de visualisations avancées pour faciliter la compréhension des phénomènes physiques complexes, simulera les différentes stratégies de conduite dans toute situation de fonctionnement à partir des données temps réel et sera accessible pour tout opérateur sur un poste banalisé. Comme pour les simulateurs actuels, le simulateur d'entraînement doit fonctionner en temps réel pour satisfaire aux usages.

Recalé dynamiquement à partir des données remontant du site, le Réacteur Numérique pourra apporter à terme aussi une aide à la conduite pour anticiper l'évolution d'un point de fonctionnement et surveiller le respect des marges de pilotage. Un tel outil accompagne la montée et le maintien en compétence d'une population d'exploitants qui a significativement rajeuni ces dernières années, en fournissant des services de formation étendus et une aide à l'exploitation (simulation accélérée d'une situation de fonctionnement).

Le simulateur d'entraînement ou d'exploitation permet ainsi de réaliser des simulations dynamiques, avec des modèles qualifiés (issus du banc d'intégration des études) et conformes à la tranche avec laquelle il est « apparié ».

En s'appuyant sur les modules de réduction de modèles (module défini dans le cadre du banc d'intégration utilisé en ingénierie) et de visualisation avancée, le but est de spécifier le simulateur d'entraînement à destination des opérateurs de conduite et des exploitants, ainsi que le banc d'intégration support à sa réalisation. Les activités du projet en ce sens sont la définition des fonctionnalités du simulateur d'entraînement, de l'architecture support au cadencement/co-exécution des modèles à distance, le développement du Banc d'Intégration pour l'Exploitation et de ses nombreuses passerelles, le processus support de conception et de paramétrage du Réacteur Numérique pour l'Exploitant.

C. Visualisation avancée et interactive des phénomènes physiques complexes

Couplé au simulateur d'entraînement (cf. § précédent), les travaux entrepris se focalisent sur les moyens de visualisation avancée (Figure 2) pour faciliter la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu lorsque l'opérateur effectue une action de pilotage en situation normale ou incidentelle. L'objectif est de permettre à toute personne de mieux « maîtriser ce qu'il ne voit pas » dans les domaines de la thermo-hydraulique, neutronique, mouvements d'eau ...

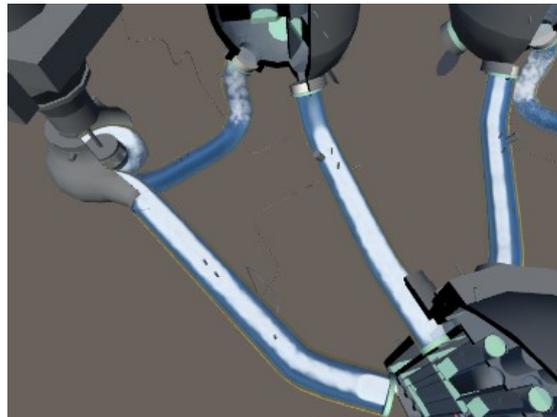


Figure 2. EXEMPLE DE VISUALISATION AVANCÉE – ECOULEMENT DE FLUIDE DANS LE CIRCUIT PRIMAIRE D'UN REACTEUR NUCLEAIRE

Pour ce faire, le projet bénéficie des progrès dans le domaine du traitement interactif de grandes masses de données par les techniques de réalité virtuelle et de réalité augmentée pour pouvoir interagir en ligne avec le calcul et restituer ce qu'il se passe du point de vue de la simulation multi-physique et de la conduite des réacteurs.

III. VERROUS SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

Le projet Réacteur Numérique est un Projet de recherche et développement Structurant Pour la Compétitivité (PSPC) ayant pour objectif principal de réaliser des activités de Développement Expérimental. Pour la filière nucléaire française, le principal avantage de ce projet réside dans la mutualisation des efforts de développement et la mise en commun des outils (modèles numériques) et des plateformes pour accélérer les études. La mutualisation des efforts de développement permet de lever des verrous scientifiques et technologiques existant, permettant à terme l'industrialisation des innovations citées ci-dessus.

Pour chaque verrou scientifique et technologique, un état de l'art a été fait, ainsi qu'une définition des développements prévus dans le cadre du projet et les critères de réussite permettant de juger la levée de ce verrou.

Sur le plan scientifique, plusieurs avancées sont visées : simulations multi-échelles, multi-physiques couplées high fidelity, massivement parallélisées ; interopérabilité des modèles physiques au sein de la filière nucléaire ; réduction de modèles et intelligence artificielle ; moyens de calcul haute performance ; propagation d'incertitudes à travers les calculs couplés ...

Sur le plan technologique, nous pouvons citer : étendre le périmètre de simulation actuellement disponible ; rendre la visualisation interactive en physique nucléaire ; fournir des solutions généralisables ...

Ces verrous peuvent être liés au développement du banc d'études ou du banc d'exploitation ou de l'ensemble du projet.

A. Verrous liés au banc d'étude

1) Distribution des calculs paramétriques.

Il s'agit de pouvoir réaliser des calculs multi-physiques indépendants dans des environnements massivement parallèles et massivement distribués sans perte de données. Pour cela, il faut réduire la pression sur le système de fichiers en utilisant des données directement accessibles depuis les autres nœuds de calcul, faire varier le nombre de machines utilisées au cours de l'exécution, et intégrer des mécanismes de tolérance aux pannes. Cela implique également de mettre en place des protocoles de communication dynamiques qui soient compatibles avec des codes tolérants aux pannes et avec l'équilibrage dynamique dans les différents codes utilisés.

2) Qualification de codes couplés.

Jusqu'à présent pour qualifier des codes de calculs couplés, la pratique était de qualifier chacun des codes (aussi appelés Outil de Calcul Scientifique - OCS) mis en jeu et de vérifier le bon fonctionnement des interfaces. Le guide ASN 28 [9] de l'Autorité de Sûreté Nucléaire indique qu'il faut désormais qualifier le couplage des codes en considérant l'ensemble comme un OCS à part entière. La définition de standards d'interopérabilité permettra de simplifier la démarche de qualification.

3) Propagation des incertitudes lors de calculs couplés.

Une représentativité améliorée des modélisations conduisant à une meilleure connaissance du système, il devient alors possible de réduire les marges prises pour l'exploitation des réacteurs. Cette réduction des marges ne peut être acceptée que si elle est associée à une connaissance des incertitudes sur les grandeurs dimensionnantes. La connaissance de ces incertitudes est obtenue par une évaluation des incertitudes en entrée de calcul (incertitudes sur les valeurs et incertitudes de modèle) et de leur effet sur les résultats du calcul. Le banc d'intégration doit donc permettre le couplage avec les outils de caractérisation des incertitudes disponibles.

4) Remontée d'échelles.

En pratique, des remontées d'échelles sont souvent réalisées : elles permettent de passer d'une échelle « fine » à une échelle « grossière », en fonction des besoins, à des fins de validation de code ou de développement de modèles. On distingue différents types de remontée d'échelle : géométrique, de maillage et de modélisation. Il est donc nécessaire de maîtriser les liens complexes entre les différentes échelles de simulation pour être à même d'exploiter correctement une solution numérique.

B. Verrous liés au banc d'exploitation

1) Interactivité des modèles physiques et de la visualisation avancée.

En phase d'exploitation, les utilisateurs du réacteur numérique (opérateurs exploitants ou en formation) vont être amenés à prendre des décisions qui dépendent de leur perception de l'état courant du réacteur, pour mettre en place des actions de conduite. Pour cela, ils ont besoin de visualiser

les phénomènes physiques en cours, selon une ergonomie qui leur soit adaptée. Il faut donc développer une méthodologie outillée pour disposer, d'une part, d'un jumeau numérique « interactif » à la main de l'opérateur, et, d'autre part, de vues des phénomènes satisfaisant des principes d'ergonomie et de facteurs humains adaptés aux exploitants.

2) Génération automatique des observateurs

L'un des objectifs du jumeau numérique est de permettre la détection de l'occurrence de sorties de plages de valeurs sur les variables caractérisant les phénomènes physiques. Les plages de fonctionnement sont définies à partir de la documentation d'exploitation et de la configuration courante de la tranche. Pour surveiller la sortie de ces plages de fonctionnement, il faut donc générer des observateurs (modélisables à l'aide de logiques temporelles [10]), et les utiliser en temps-réel de manière à générer des alarmes, ce qui impose des contraintes sur les temps de calcul.

3) Réduction de modèles et encapsulation dans les simulateurs de fonctionnement.

Les choix de modélisation pourront être adaptés en fonction du niveau de modélisation souhaité. Ces modèles pourront être dégradés (réduits) afin de satisfaire des temps de calculs compatibles avec les besoins des simulateurs (en lien avec le temps réel) tout en maîtrisant les biais associés. Dans le cadre de ce projet, les approches non intrusives de réduction de modèles seront considérées [11][12], les approches intrusives pouvant par ailleurs être prises en charge directement par les codes de calcul.

C. Verrous communs aux études et à l'exploitation

1) Visualisation pédagogique de phénomènes physiques complexes.

Que ce soit en phase d'ingénierie, pour le dimensionnement ou la vérification, ou en phase d'exploitation pour l'aide à la décision ou la formation, l'information relative à l'état courant de l'installation doit être transmise de manière qu'elle soit comprise, c'est-à-dire adaptée aux capacités cognitives et aux pratiques des utilisateurs. Pour cela, les visualisations devront faire appel à des métaphores représentant les phénomènes physiques en jeu. Ces métaphores ne seront pas les mêmes s'il s'agit d'un ingénieur avec un profil scientifique ou s'il s'agit d'un futur opérateur en cours de formation. L'un des verrous est donc de transformer ces métaphores d'un domaine d'utilisation à l'autre, tout en garantissant leur cohérence.

IV. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A. Actions en cours

Le projet Réacteur Numérique a débuté le 1^{er} janvier 2020, dans un contexte relativement difficile du fait de la pandémie de Covid-19, qui a empêché toute réunion physique des partenaires du projet depuis son lancement. Les travaux techniques sont cependant engagés par tous les partenaires du projet. Les précisions sur les spécifications des produits

innovants et la définition des feuilles de route pour lever les différents verrous technologiques et scientifiques ont fait l'objet des premiers échanges entre partenaires.

En parallèle, à l'image des « Business Aspects » mis en avant dans [2], un travail sur la (ou les) proposition(s) de valeur des produits et services développés dans le cadre du projet Réacteur Numérique a été initié entre les partenaires avec les futurs utilisateurs. L'objectif est de s'assurer que les développements réalisés répondent à leurs attentes.

B. Vers une utilisation du réacteur numérique ...

Le Réacteur Numérique est un outil important pour l'amélioration continue de la sûreté. Il va permettre de disposer d'un clone digital intégrant toutes les particularités de chaque réacteur nucléaire. De plus, en organisant et en assemblant les briques de simulation, il va faciliter la mise à jour ou le remplacement des codes de calcul par d'autres, intégrant les dernières avancées de la physique par exemple. Ceci sera important pour les études de conception qui utilisent beaucoup la simulation pour faire la preuve de la sûreté des installations dans toutes les situations normales, incidentelles ou accidentelles. En y intégrant les données spécifiques de chaque installation, en facilitant le remplacement des briques logicielles, les études vont gagner en représentativité et en précision.

Le réacteur numérique va faire progresser les modèles de calcul en y intégrant de nouvelles données. Ces données réelles permettront de réduire les incertitudes de nos modèles, de renforcer la validation, de les rendre plus robustes et plus prédictifs.

En développant des plates-formes numériques, le projet va permettre d'offrir des services beaucoup plus souples aux clients de la filière nucléaire, français comme internationaux.

C. ... en formation

Dans le cadre du projet Réacteur Numérique, l'expertise du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN), qui est une unité mixte de recherche (UMR 7039) commune à l'Université de Lorraine (UL) et au CNRS, porte à la fois sur les approches d'Ingénierie Système Basée sur les Modèles, avec en particulier l'architecture système et la cosimulation, et à la fois sur la prise en compte dans les modèles de simulation d'un ensemble de caractéristiques complémentaires, historisées dans les outils de PLM, liées à la physique, aux dysfonctionnements, au vieillissement et la dégradation, ainsi qu'au contrôle-commande. L'innovation apportée par le projet Réacteur Numérique réside d'une part dans la définition d'un cadre de cosimulation reposant sur des briques existantes qui seront paramétrables en fonction des services requis par les utilisateurs de la plateforme. Elle réside, d'autre part, dans le couplage de modèles dysfonctionnels et de vieillissement du réacteur, avec son contrôle-commande.

D'un point de vue académique, plusieurs catégories d'utilisateurs et plusieurs cas d'utilisation du jumeau numérique sont envisagés. En premier lieu, du côté « recherche », le jumeau numérique est un contexte industriel d'étude dans

lequel les travaux sur l'Ingénierie Système Basée sur les Modèles et sur la Sûreté de Fonctionnement pourront être menés. Il s'agit notamment de ceux en cours sur la capitalisation et la réutilisation du savoir-faire d'ingénierie (c'est-à-dire les actifs d'ingénierie) [13] et ceux portant sur la prise en compte des dégradations liées au vieillissement des matériels [14].

D'un point de vue de la « formation », l'idée est de transférer ces résultats, principalement au niveau master. Le réacteur numérique vient comme un cas d'étude sur lequel les étudiants des masters et des écoles d'ingénieurs de l'Université de Lorraine (notamment ceux du master en Ingénierie des Systèmes Complexes³ et de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique⁴) pourront appliquer les approches de spécification de modèles de simulation.

Pour l'exploitant, le Réacteur Numérique permettra aux opérateurs de mieux s'entraîner aux gestes courants et de s'adapter aux évolutions de nos pratiques. En aidant les opérateurs à mieux se représenter ce qui se passe physiquement dans les pompes et les tuyaux, à visualiser précisément les échanges thermiques, le Réacteur Numérique améliorera la qualité d'exploitation.

D. ... en dehors de la filière nucléaire française

Plusieurs briques logicielles développées dans le cadre projet Réacteur Numérique auront des retombées pour certains partenaires en dehors du domaine nucléaire.

L'utilisation du réacteur numérique pourra être portée à l'export du fait de la similarité des technologies employées dans les différents réacteurs au niveau mondial.

E. Conclusions

Le projet Réacteur Numérique contribue directement au Contrat Stratégique de la Filière Nucléaire. Il vise à garantir le maintien des compétences et l'expertise de la filière nucléaire française, et à structurer la démarche d'innovation grâce au numérique.

Il valorise, fait savoir et fait partager le meilleur de la simulation numérique dans le nucléaire. Chaque réacteur du parc nucléaire français disposera ainsi d'un clone numérique représentatif de son fonctionnement et qui évoluera au rythme de l'usine, sur tout son cycle de vie. Tout ce savoir-faire accumulé par la filière pourra être mis au service des autres exploitants. Enfin, ce projet accélère la différenciation avec la concurrence internationale par l'innovation et la fédération des principaux acteurs du domaine de la simulation numérique pour la physique des réacteurs.

³ <http://fst.univ-lorraine.fr/formations/master-ingenierie-des-systemes-complexes> (page visitée le 15/03/2021)

⁴ <https://ensem.univ-lorraine.fr/> (page visitée le 15/03/2021)

V. REFERENCES

- [1] Sharma, A., Kosasih, E., Zhang, J., Brintrup, A., & Calinescu, A., "Digital Twins: State of the Art Theory and Practice, Challenges, and Open Research Questions". 2020. *arXiv preprint arXiv:2011.02833*
- [2] Lim, K.Y.H., Zheng, P. & Chen, C. "A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives". *Journal of Intelligent Manufacturing* 31, 2020, 1313–1337.
- [3] Mauger, G., Tauveron, N., Bentivoglio, F., & Ruby, A., "On the dynamic modeling of Brayton cycle power conversion systems with the CATHARE-3 code". *Energy*, 168, 2019, 1002-1016.
- [4] Brosselard, C., Ansar Calloo, David Couyras, François Févotte, Matthieu Guillo, Coline Brosselard, Bertrand Bouriquet, Alexandre Dubois, Enrico Girardi, Fabrice Hoareau, Marie Fliscounakis, Hadrien Leroyer, Etienne Noblat, Yann Pora, Laurent Plagne, Angélique Ponçot, Nadine Schwartz, "COCAGNE: EDF new neutronic core code for ANDROMÈDE calculation chain, &C 2017", International Conference on Mathematics & Computational Methods Applied to Nuclear Science & Engineering, Jeju, Korea, April 16-20, 2017
- [5] Faure, B., Archier, P., Vidal, J. F., Palau, J. M., & Buiron, L. "Neutronic calculation of an axially heterogeneous ASTRID fuel assembly with APOLLO3®: Analysis of biases and foreseen improvements". *Annals of Nuclear Energy*, 115, 2018, 88-104.
- [6] Guelfi, A., Bestion, D., Boucker, M., Boudier, P., Fillion, P., Grandotto, M., ... & Péturaud, P., "NEPTUNE: a new software platform for advanced nuclear thermal hydraulics". *Nuclear Science and Engineering*, 156(3), 2007, 281-324.
- [7] Marelle, V., Goldbronn, P., Bernaud, S., Castelier, É., Julien, J., Nkonga, K., ... & Ramière, I., "New developments in ALCYONE 2.0 fuel performance code". Top Fuel 2016 – Light Water Reactor (LWR) Fuel Performance Meeting, 2016, Boise, United States.
- [8] Shams, A., De Santis, D., Padee, A., Wasiuk, P., Jarosiewicz, T., Kwiatkowski, T., & Potemski, S., "High-Performance Computing for Nuclear Reactor Design and Safety Applications". *Nuclear Technology*, 206(2), 2020, 283-295.
- [9] ASN, "Guide N°28 : Qualification des outils de calcul scientifique utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire – 1re barrière", <https://www.asn.fr/>, version du 25/07/2017.
- [10] Rapin N., "ARTiMon monitoring tool – The time domains", RV-CuBES 2017, International Workshop Competitions, Usability, Benchmarks, Evaluation, and Standardisation for Runtime Verification Tools. Kalpa Publications in Computing, Volume 3, 2017, Pages 106–122
- [11] da Silva, F. "Méthodologies de réduction de modèles multiphysiques pour la conception et la commande d'une chaîne de traction électrique". 2015. Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay
- [12] Besselink, B., Tabak, U., Lutowska, A., van de Wouw, N., Nijmeijer, H., Rixen, D. J., ... & Schilders, W. H. A. (2013). "A comparison of model reduction techniques from structural dynamics, numerical mathematics and systems and control". *Journal of Sound and Vibration*, 332(19), 4403-4422.
- [13] Wu, Q., Gouyon, D., Levrat, E., & Boudau, S., "Use of patterns for know-how reuse in a model-based systems engineering framework". *IEEE Systems Journal*. 14(4), pp. 4765-4776, doi: 10.1109/JSYST.2020.2975116, 2020
- [14] Boyer, G., Brinzei, N., Camerini, J., Ndiaye, M., Pétrin, J-F., "Dynamic dependability assessment of industrial control systems using colored stochastic Petri nets". 30th European Safety and Reliability Conference and 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference, ESREL 2020 PSAM 15, Nov 2020, Venice, Italy