

Proposition de Thèse CIFRE 2026

Titre : « Développement d'une méthodologie de modélisation dynamique pour la conception et l'exploitation des réacteurs de 4^{ème} génération »

Doctorant : Ingrid TULGA MARTINI

Ecole Doctorale : Ecole Doctorale IAEM-Lorraine (Informatique, Automatique, Electronique-Electrotechnique, Mathématiques)

Laboratoire d'accueil : CRAN – Nancy

Directeur de thèse : Nicolae BRINZEI et Jean-François PETIN (HDR)

Tuteurs industriels : Claudia PICOCO et Valentin RYCHKOV (EDF R&D, PERICLES)

1. Contexte

L'intérêt pour les réacteurs de quatrième génération a été bousculé avec l'arrêt du programme ASTRID et il reprend de la vigueur en partie grâce aussi au lancement de plusieurs programmes de recherche et de financement, tant en France qu'à l'international, visant le développement de concepts innovants apparentés à la 4^e génération. L'objectif de la France étant la fermeture du cycle du combustible, les Réacteurs à Neutrons Rapides (RNR), et en particulier ceux refroidis au Sodium (RNR-Na), constituent le choix historique pour le développement d'un projet de réacteur de 4^e génération.

Les réacteurs de 4^e génération se distinguent par des objectifs de sûreté supérieurs à ceux des réacteurs à eau, notamment grâce à l'intégration de systèmes passifs. Les méthodes probabilistes d'évaluation des risques, habituellement réservées aux phases de démonstration de sûreté et de licensing, pourraient jouer un rôle clé dès la phase de conception et tout au long de l'exploitation.

2. Objectifs industriels

Les approches dynamiques sont déjà exploitées en interne chez EDF pour les réacteurs du parc lorsque des analyses complémentaires pourraient être nécessaires. À ce jour, elles sont utilisées de manière ponctuelle pour :

- Réduire le conservatisme de la modélisation statique (celle intégrée aux modèles Études Probabilistes de Sûreté – EPS).
- Montrer le caractère conservateur de l'analyse probabiliste de sûreté et fournir des argumentaires solides pour les dossiers défensifs.

Le dossier de démonstration de sûreté des réacteurs de 4^e génération reste encore un sujet à développer pleinement. Les travaux réalisés sur des réacteurs existants (réacteur à eau et RNR) peuvent constituer une base de départ. Néanmoins, les spécificités propres aux réacteurs de 4^e génération, et en particulier des RNR-Na, les rendent davantage compatibles avec une modélisation dynamique que statique, en raison principalement de la plus grande inertie thermique et par conséquent des plus longs délais de grâce de chaque composant.

De plus, parce qu'elles reproduisent le comportement temporel des systèmes, les méthodes dynamiques pourraient :

- Quantifier la probabilité d'apparition de scénarios qui raccourcissent la durée de vie de la cuve ;
- Identifier les paramètres d'exploitation qui minimisent cette probabilité ;
- Être intégrées dès la phase de conception afin de comparer différentes options et choisir le design qui minimise le risque global.

Ces capacités les rendent particulièrement adaptées à la fois à la conception et à l'exploitation des installations.

Les objectifs industriels de la thèse sont donc les suivants :

- Développer une méthodologie adaptée aux réacteurs de 4^e génération pour :
 - Optimiser la conception (justifier les simplifications, réduire les conservatismes) ;
 - Optimiser l'exploitation (permettre d'ajuster les paramètres de fonctionnement, les procédures de maintenance, les consignes de conduite, etc.).
- Se réapproprier et capitaliser les études de sûreté existantes (Superphénix et les retours d'expérience associés) afin d'identifier les points en commun et ceux à réévaluer avec la démonstration de sûreté d'un réacteur de 4^e génération.
- Poursuivre l'industrialisation des méthodes dynamiques au sein des Études Probabilistes de Sûreté (EPS), pour faciliter leur utilisation en complément des études statiques.

3. Etat de l'art, objectifs de la thèse et verrous scientifiques à franchir vis-à-vis de l'état de l'art pour atteindre les objectifs de la thèse

Depuis les années '80, les méthodes statiques booléennes (Arbre de Défaillances, Arbre d'Événements) sont utilisées en support à la démonstration de sûreté des réacteurs nucléaires (WASH 1400, 1975). Ces méthodes statiques reposent sur la prise en compte des événements, jouant un rôle dans l'occurrence d'un événement redouté, à l'aide des formules logiques booléennes (sans prendre en compte une évolution dynamique). En France, la Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) a rendu obligatoire les Études Probabilistes de Sûreté (EPS) dès 2002 (RFS, 2002). L'approche EPS basée sur des méthodes statiques booléennes est aujourd'hui largement acceptée et appliquée au niveau industriel.

Cependant, l'approche statique qui est déployée reste très conservative lorsque les scénarios accidentels analysés sont caractérisés par un fort impact de la physique et de la temporalité des événements, ou encore si la cinétique est lente et la réparation des composants pourrait être valorisée. Cela est le cas des réacteurs de 4^e génération pour lequel la première application d'une méthode dynamique remonte à 1982 (Lanore, 1982), en raison, entre autres, de la plus importante capacité thermique du caloporteur.

Pour réduire ces conservatismes, les méthodes dites dynamiques ont été développées (Wiltbank, 2021). Les méthodes dynamiques permettent de modéliser des changements d'état ou de configuration d'un système selon des règles internes ou des interactions. Elles offrent une analyse plus réaliste des scénarios accidentels : elles reproduisent le comportement réel du système lorsqu'interviennent défaillances, maintenances, réparations, actions des opérateurs et phénomènes physiques.

EDF R&D, au sein du Département PERICLES, a une longue expérience dans l'utilisation et le développement de ces méthodes, par exemple (Rychkov et al., 2025), (Massoulier et al., 2023). Dans les dernières années, en particulier, le choix s'est orienté sur l'utilisation des statecharts (Harel, 1986) et plusieurs études et publications ont été réalisées en appliquant cette méthode. Le département MPSI (Modélisation, Pilotage des Systèmes Industriels) du CRAN possède également une solide expérience dans l'élaboration de méthodes dynamiques et leur mise en

œuvre en contrôle-commande et en sûreté de fonctionnement, par exemple (Babykina *et al.* 2016) qui utilise des automates stochastiques hybrides ou (Gouyon *et al.* 2020) qui utilise des automates temporisés. Les statecharts étendent le formalisme des automates à états finis avec des mécanismes d'hierarchie, d'orthogonalité et de communication entre les états permettant une modélisation plus concise des systèmes complexes. Ces méthodes dynamiques ne modélisent pas l'indisponibilité d'un système, mais elles modélisent le vrai comportement d'un système lorsque différents événements, notamment la défaillance, la maintenance et la réparation de ses composants, surviennent. De plus, ces méthodes permettent également de prendre en compte les actions opérateurs en utilisant des temps plus proches de la réalité ainsi que l'évaluation physique du système. A date, elles s'appliquent pour l'analyse d'un scénario ou de quelques scénarios donnés et pas à l'échelle de tous les scénarios accidentels possibles (au contraire des EPS). Cela permet d'estimer plusieurs indicateurs sur l'état du réacteur dans son ensemble et notamment la probabilité de fusion du cœur.

Dans les réacteurs de 4^e génération (comme dans les réacteurs à eau), l'apparition de certains événements peuvent réduire la durée de vie de la cuve et donc de la centrale (Prêle, 2017). Il s'agit, par exemple, des scénarios avec arrêt d'urgence avec forts gradients de température.

En modélisant le comportement de l'ensemble des systèmes, les méthodes dynamiques permettraient de :

- Quantifier la probabilité d'apparition de ces scénarios ;
- Identifier les causes de leur apparition (défaillances, procédures de maintenance, actions opérateur) ;
- Optimiser l'exploitation afin de réduire ces probabilités.

Bien que la littérature mentionne l'usage de l'analyse de risque comme aide à l'exploitation (Siu, 2021 ; Cetiner, 2015), aucune mise en pratique concrète ne semble avoir encore été rapportée, ni avec les méthodes classiques ni avec les méthodes dynamiques.

Grâce à la petite taille et à la compacité de leurs systèmes, les réacteurs de 4^e génération (et notamment les RNR-Na) devraient bien se prêter à la construction d'un modèle dynamique « à large périmètre » qui intègre bien plus que quelques sous-systèmes isolés, ouvrant ainsi la voie à une analyse intégrée de l'ensemble de l'installation.

La thèse se donne donc comme objectif d'explorer l'utilisation des statecharts (méthodes dynamiques) pour optimiser l'exploitation des réacteurs de 4^e génération (et en particulier des RNR-Na). D'un point de vue scientifique, cela vise à répondre à trois points de développement par rapport aux méthodes classiques et à l'utilisation des méthodes dynamiques à l'état de l'art :

1. **Exploitation** : les méthodes dynamiques sont aujourd'hui réservées à la sûreté ; la thèse vise à les appliquer au domaine de l'exploitation pour les RNR-Na.
2. **Cible technologique** : aucune étude n'a encore porté sur les réacteurs de 4^e génération - une première tentative a été réalisée sur ASTRID. (Aubert et al., 2018).
3. **Échelle du modèle** : les modèles dynamiques existants ne couvrent que les systèmes directement impliqués dans l'accident étudié ; la thèse vise à développer un modèle dynamique qui intègre l'ensemble de l'installation.

Si le premier objectif est atteint, la thèse pourra également tester le même modèle pour des applications de sûreté. Cela répondra à un second défi : concevoir un modèle unique exploitable à la fois pour l'optimisation de l'exploitation et pour les études de sûreté.

Ce travail ouvrira également la voie à une veille technologique accrue sur la démonstration de sûreté des réacteurs de 4^e génération.

En résumé, les caractères innovants de ce projet sont :

- **Modèle à périmètre élargi** : contrairement aux modèles existants, qui se limitent à un périmètre réduit souvent aux composants ou aux systèmes sollicités par l'accident analysé, le modèle proposé couvrira, dans la limite du possible, l'ensemble des sous-systèmes pertinents.
- **Application à l'exploitation** : dans l'industrie nucléaire, les modèles dynamiques ont jusqu'ici été utilisés exclusivement pour la sûreté ; le projet les transpose à l'optimisation de l'exploitation.

Le premier cas d'étude sera le réacteur Superphénix (SPX). Une fois la méthodologie validée sur SPX, elle pourra être appliquée à un design plus actuel à condition de disposer d'un niveau de détails suffisant pour une modélisation réaliste, par exemple un RNR de grande taille (choix conditionné à la disponibilité des données).

Les principaux verrous identifiés sont :

- **Verrou scientifique – Applicabilité des méthodes dynamiques** : Les méthodes dynamiques, développées pour l'analyse de sûreté, pourraient se révéler non adaptées à d'autres types d'applications (ex. : optimisation de l'exploitation).
- **Verrous scientifique – Exploration de scénarios critiques** : Il faut générer les scénarios qui peuvent impacter la durée de vie de la cuve et, par conséquent, la disponibilité du réacteur.
- **Verrou technique – Périmètre de modélisation** : La modélisation dynamique doit couvrir un périmètre suffisamment large (nombre, taille et complexité du système) tout en restant *calculable* dans des délais compatibles avec une pratique industrielle.
- **Verrou technologique – Capacité de l'outil** : l'outil choisi (statechart – itemis CREATE) n'a pas été conçu à l'origine pour des modèles de cette ampleur ; il faut donc vérifier s'il peut gérer la complexité requise.
- **Verrou technique – Disponibilité et qualité des données** : Les données nécessaires à l'application de la méthodologie sur un design actuel ne sont pas toujours accessibles. Dès qu'elles seront disponibles, il sera possible d'exploiter le modèle déjà en phase de conception afin de guider les choix de design.

4. Programme technique et tâches détaillées de la thèse

Pour répondre à ces objectifs, les étapes de la thèse consisteront à :

- Étudier la documentation SPX : recenser les scénarios susceptibles d'impacter la durée de vie de la centrale et déterminer les leviers d'optimisation de la conception et de l'exploitation.
- Construire le modèle dynamique à l'aide des statecharts capable de représenter le comportement de SPX et l'interaction des différents systèmes ;
- Simuler le modèle afin d'estimer les probabilités d'apparition de chaque scénario critique et identifier les paramètres d'exploitation qui permettent de réduire ces probabilités ;
- Evaluer la possibilité d'étendre le périmètre du modèle pour inclure l'analyse de sûreté ;
- Analyser les résultats, enseignements qualitatifs et quantitatifs ;
- Reproduire le processus pour un réacteur autre que SPX (selon la disponibilité des données) avec la possibilité d'étendre l'application du modèle à la conception.

Tâches	Année 1				Année 2				Année 3			
Synthèse bibliographique	X	X										
Analyse de la documentation réacteur 4 ^e génération (SPX): <ul style="list-style-type: none"> - Détails de la démonstration de sûreté (comment était-elle réalisée ?) - Quels étaient les systèmes principaux (étude d'ingénierie système) ? - Autres études (scénarios accidentels, étude thermo-hydraulique, conduite et étude EPFH, etc.) - Scénarios impactant la durée de vie de la cuve 			X	X								
Réalisation d'un modèle en statechart pour l'estimation de la probabilité d'apparition des scénarios impactant la durée de vie de la cuve			X	X	X							
Simulation du système					X	X						
Analyse et post-traitement des résultats						X	X					
Développement d'une méthode pour la minimisation de la probabilité d'apparition des scénarios impactant la durée de vie de la cuve							X	X				
Analyse de la possibilité d'utiliser le modèle tel quel pour une analyse de sûreté. Si non, analyse des modifications nécessaires.							X	X				
Publication						X		X		X		X
Choix d'un design actuel								X				
Application de la méthode et réalisation d'un modèle pour l'analyse de sûreté et de l'exploitation d'un réacteur de 4 ^{eme} génération									X			
Extension, si possible, du modèle à l'application pour l'utilisation en phase de conception									X			
Simulation du système										X		
Analyse et post-traitement des résultats										X		
Rédaction de la thèse											X	X
Gestion du projet : <ul style="list-style-type: none"> - Comités de pilotage - Rapports d'avancement 		X		X	X		X	X		X		X

5. Références bibliographiques

- Rasmussen, « Reactor safety study. An assessment of accident risks in U. S. commercial nuclear power plants. Executive Summary. [archive] », WASH-1400 (NUREG-75/014), Rockville, MD, USA, Federal Government of the United States, U.S. Nuclear Regulatory Commission, octobre 1975
- J.-M. Lanore, C. Villeroux-Lombard, F. Bouscatie, and A. Pavret de la Rochefordiere, “Probabilistic analysis of the loss of the decay heat removal function for Creys-Malville Reactor,” Proceedings International Conference on the Safety of Fast Liquid Metal Reactors, Lyon, France, December 19-23, 1982
- Règle fondamentale de sûreté (RFS) n° 2002-01, <https://www.asn.fr/information/archives-des-actualites/regle-fondamentale-de-surete-rfs-n-2002-01>
- N. E. Wiltbank, C. J. Palmer, Dynamic PRA Prospects for the Nuclear Industry, Frontiers in Energy Research, Volume 9 - 2021, 2021, <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2021.750453>
- N. Siu, I. Gifford, Z. Wang, M. Carr, and J. Kanney, Qualitative PRA insights from operational events: an exploratory study (public), <https://www.nrc.gov/docs/ML2108/ML21081A038.pdf>
- S.M. Cetiner, et al, Level-0 PRA: Risk-informing the nuclear power plant I&C system, Nuclear News, pp. 48-52, February 2015
- G. Prêle, J. Guidez, BOOK-Superphenix-D305916002662 [B], 2017
- D. Harel, Statecharts: a visual formalism for complex systems, Science of Computer Programming, Volume 8, Issue 3, 1987, Pages 231-274, ISSN 0167-6423
- V. Rychkov, C. Picoco, A. Terfloth, 2025, Statechart Based Dynamic PRA Tool, 236-243. 10.13182/xyz-46584
- C. Massoulier, R. Roy, V. Rychkov, C. Picoco, 2023, Statecharts as a Dynamic Method for Risk Assessment. 10.13182/PSA23-41115
- F. Aubert, B. Baude, P. Gauthé, M. Marquès, N. Pérot, F. Bertrand, C. Vaglio-Gaudard, V. Rychkov, M. Balmain, Implementation of probabilistic assessments to support the ASTRID decay heat removal systems design process, Nuclear Engineering and Design, Volume 340, 2018, Pages 405-413, ISSN 0029-5493
- G. Babykina, N. Brînzei, J.F. Aubry, G. Deleuze, “Modeling and simulation of a controlled steam generator in the context of dynamic reliability using a Stochastic Hybrid Automaton”, *Reliability Engineering and System Safety*, 152, (2016) 115-136.
- D. Gouyon, J.-F. Pétin, T. Cochard et C. Devic, “Architecture assessment for safety critical plant operation using reachability analysis of timed automata”, *Reliability Engineering and System Safety*, t. 199, 2020.