Etude Probabiliste de Sûreté dynamique par la méthode des réseaux de Petri

T Dosda, J.-y Brandelet, H Brunelière, P Lacaille, N. Playez, F. Aubert

► To cite this version:

T Dosda, J.-y Brandelet, H Brunelière, P Lacaille, N. Playez, et al.. Etude Probabiliste de Sûreté dynamique par la méthode des réseaux de Petri. Congrès Lambda Mu 21, “ Maîtrise des risques et transformation numérique : opportunités et menaces ”, Oct 2018, Reims, France. hal-02063616

HAL Id: hal-02063616

<https://hal.science/hal-02063616>

Submitted on 11 Mar 2019

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.

Etude Probabiliste de Sûreté dynamique par la méthode des réseaux de Petri

Dynamic Probabilistic Safety Assessment with Petri nets

T. Dosda^a, J.-Y. Brandelet^a, H. Brunelière^a, P. Lacaille^a, N. Playez^b et F. Aubert^c

^aFramatome, 1 place Jean Millier 92084 Paris La Défense cedex

^bFramatome, 10 Rue Juliette Récamier, 69006 Lyon

^cCEA, CEA Cadarache, 13115 Saint-Paul-lez-Durance

Résumé

La communication présente la méthode dynamique utilisée par Framatome pour réaliser une Étude Probabiliste de Sûreté (EPS) sur un réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium (RNR-Na).

L'objectif de cette communication est d'explorer les possibilités qu'offre un outil de modélisation dynamique qui pourrait être utilisé afin de s'affranchir de certaines limites des outils fiabilistes statiques classiques.

Dans cette communication, les techniques de modélisations permettant de lever ces limitations sont donc présentées. Cependant, l'utilisation d'un outil dynamique tel que les réseaux de Petri accroît la complexité d'un modèle EPS. Les problématiques liées à cette hausse de complexité sont aussi abordées.

Summary

The communication presents the dynamic method used by Framatome in the Probabilistic Safety Assessment (PSA) of a Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)

The purpose of this communication is to investigate the opportunities given by a dynamic approach to reduce limitations introduced by the static classical reliability tools.

In this communication, modelling techniques which reduce these limitations are presented. However, the use of a dynamic tool such Petri nets increases the level of complexity of the PSA model. Problems related to this complexity increase are discussed.

1. Introduction

La communication présente la méthode dynamique utilisée par Framatome pour réaliser une Etude Probabiliste de Sûreté (EPS) sur un réacteur à neutrons rapides à caloporteur sodium (RNR-Na).

L'objectif de cette communication est d'explorer les possibilités qu'offre un outil de modélisation dynamique qui pourrait être utilisé afin de s'affranchir de certaines limites des outils fiabilistes statiques classiques.

Dans cette communication, les techniques de modélisations permettant de lever ces limitations sont donc présentées. Cependant, l'utilisation d'un outil dynamique tel que les réseaux de Petri accroît la complexité d'un modèle EPS. Les problématiques liées à cette hausse de complexité sont aussi abordées.

résiduelle » (EPuR), pouvant mener à la ruine des structures de supportage du cœur, à une fréquence négligeable.

Pour ce type de réacteur, les difficultés d'intervention sur des circuits en sodium nécessitent des études sur des temps de scrutation plus longs que ceux considérés sur les REP. En outre, la cinétique lente de ce réacteur, grâce à l'inertie du sodium, permet de valoriser des réparations qu'il serait trop conservatif de ne pas prendre en compte. L'EPS statique ne permettant pas de les modéliser facilement, plusieurs approches dynamiques sont à l'étude.

Pour déterminer la plus adaptée à une EPS, il a été décidé de réaliser une étude comparative sur un cas d'étude simplifié. Ce cas simplifié permet de tester certaines fonctionnalités en vue de les intégrer ultérieurement dans l'EPS complète d'un RNR-Na.

2. Contexte

Les Études Probabilistes de Sûreté (EPS) développées habituellement pour des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) utilisent une méthode par arbres de défaillances associés à des arbres d'événements. Ce type de modélisation ne prend que partiellement en compte la composante temporelle. Elles peuvent être qualifiées d'EPS « statiques ». Pour les Réacteurs à Eau Pressurisée, ce type de modélisation est suffisant car le temps de scrutation est généralement assez court (un jour).

Dans le cas d'un RNR-Na, l'un des objectifs de l'EPS est d'éclairer l'approche déterministe en démontrant notamment que la situation de perte complète et prolongée de la fonction « évacuation de la puissance

3. Méthode

C'est dans ce contexte que Framatome développe une EPS dynamique par la méthode des réseaux de Petri (notés RdP dans la suite de la communication).

Les réseaux de Petri ont été définis pour la première fois dans une thèse présentée en 1962 par le mathématicien allemand Carl Adam Petri. Son but n'était pas la sûreté de fonctionnement, mais la représentation graphique du comportement d'automates à états finis.

L'utilisation de cet outil a été réadaptée pour des études de sûreté de fonctionnement. En effet, les réseaux de Petri permettent d'observer les états d'un système. Par exemple il est possible de détecter si un composant est en panne ou non. Il est alors possible de modéliser le comportement d'un système et de le simuler en générant des

« histoires » par la méthode de Monte-Carlo. Plus le nombre d'histoires générées est élevé, plus les résultats sont précis et permettent d'observer des événements rares. C'est cette méthode qu'a choisi Framatome pour réaliser des EPS dynamiques.

Les réseaux de Petri sont composés de différents éléments présentés en Figure 1.

Figure 1. Éléments de base des réseaux de Petri

Les places représentent les différents états possibles dans lesquels un système ou un composant peut se trouver.

L'évolution dynamique d'un système, c'est-à-dire l'état dans lequel il se trouve à un moment donné, est représentée par le marquage du réseau (c.-à-d. : le nombre de jetons dans chaque place).

Les transitions représentent les événements susceptibles de se produire faisant évoluer le marquage des places qui lui sont reliées par des arcs (transfert des jetons). Deux étapes sont nécessaires :

- valider la transition (l'événement attaché à la transition devient possible),
- effectuer le tir (l'événement attaché à la transition se produit effectivement).

Ces deux notions sont importantes, car à cause de certains conflits de transitions (plusieurs transitions validées au même moment), certaines transitions peuvent être validées sans être tirées.

Dans les EPS par RdP réalisées pour modéliser les systèmes de sûreté, les variables associées à des prédicats et des assertions sont très utilisées. Les prédicats sont des formules mathématiques dont il est possible de dire si elles sont vraies ou fausses. Les assertions sont des formules mathématiques permettant de mettre à jour des variables lorsque les transitions sont tirées. Ce sont les variables qui vont donner les indicateurs de fiabilité et de disponibilité. Elles sont d'autant plus importantes qu'elles vont régir le comportement des systèmes et permettre de construire le modèle de façon modulaire.

La plate-forme logicielle utilisée pour l'approche par RdP est GRIF et est développée par la société SATODEV. Cette plate-forme propose un module « Petri Net ».

4. Attendus de la méthode pour le cas applicatif

La modélisation par RdP est réalisée sur la base de documents d'ingénierie décrivant les systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle ainsi que sur un modèle d'EPS statique (par arbres de défaillances associés à des arbres d'événements) déjà existant. Elle doit permettre de simuler le comportement réel des systèmes de sûreté.

Comme évoqué précédemment, les calculs réalisés à l'aide des réseaux de Petri sont des calculs statistiques (simulation de Monte-Carlo). Ils consistent en une génération d'un nombre important « d'histoires » et le résultat obtenu est le ratio entre le nombre d'histoires ayant conduit à l'événement redouté et le nombre d'histoires total. Malgré cette différence avec le modèle statique où les calculs se font suivant une logique booléenne, le modèle par RdP doit pouvoir prendre en compte, comme le modèle statique, les indisponibilités liées :

- aux événements initiateurs,
- au fonctionnement en continu de composants,
- aux sollicitations de composants,
- aux défaillances de cause commune pouvant affecter les équipements actifs et celles relatives aux composants passifs,,
- aux dépendances entre systèmes,
- au facteur humain
- à la maintenance préventive.

Le modèle par RdP doit également permettre de lever certaines limitations liées notamment aux réparations ainsi que des conservatismes liés aux critères de découplage menant à l'événement redouté.

Enfin, le modèle développé doit permettre de conditionner les réparations à certains facteurs :

- le nombre d'agents de maintenance disponibles,
- des paramètres physiques (ici la température du sodium),
- un délai de grâce (durée entre la perte des moyens de refroidissement et l'atteinte en température de l'événement redouté) suffisant.

Ces deux derniers points, ainsi que la réduction des conservatismes liés aux critères de découplage, nécessitent le développement d'un module permettant de suivre l'évolution de la température du sodium primaire en tenant compte de l'état de l'installation à chaque instant. L'intérêt est de supprimer le découplage engendré par l'utilisation des critères de succès en fonction d'un nombre de systèmes de sûreté disponibles en scrutant directement le comportement réel de l'installation (évolution de la température primaire), ce qui permet d'établir un délai de grâce plus réaliste vis-à-vis de l'événement redouté (dépassement de la température limite) et vis-à-vis des conditions d'intervention.

5. Application sur un cas d'étude

Afin de faciliter la compréhension des prédicats des réseaux de Petri présentés dans cette partie, un tableau de correspondance est donné en fin de communication.

5.1. Description du cas d'étude

L'outil est utilisé sur un cas simplifié mettant en jeu des systèmes permettant d'évacuer la puissance résiduelle

d'un réacteur refroidi au sodium ainsi que leurs systèmes supports (électriques, ventilation et contrôle-commande).

Pour ce cas, il existe deux systèmes d'évacuation de la puissance résiduelle (EPuR) redondants et diversifiés. La Figure 2 présente le principe d'un de ces systèmes. Le sodium chaud qui sort du réacteur est refroidi dans un échangeur intermédiaire et est ensuite réinjecté dans le cœur. L'échangeur intermédiaire est lui refroidi par une boucle sodium dont la circulation est assurée par une pompe (ou en convection naturelle selon le système considéré) et le refroidissement par un échangeur sodium/air. Les registres d'air sont fermés en fonctionnement normal et ouverts lorsque la puissance résiduelle doit être évacuée.

Figure 2. Schéma de principe d'un système d'évacuation de la puissance résiduelle

L'évènement redouté est la situation de perte complète et prolongée de la fonction « évacuation de la puissance résiduelle » (EPuR) pouvant mener à la ruine des structures de supportage du cœur.

5.2. Description des différents types de réseaux de Petri

Le modèle RdP est construit de façon modulaire avec principalement deux types de réseaux :

1. Les réseaux « observateurs » correspondent généralement à un évènement redouté faisant intervenir une combinaison de défaillances (avec une logique booléenne ET/OU). Les réseaux observateurs des systèmes EPuR sont comparables aux portes logiques des arbres de défaillances et sont, pour la plupart très simples : ils sont composés de deux places et de deux transitions. Pour une meilleure maintenabilité du modèle lors des corrections de bugs et des mises à jour de configuration, des noms équivalents sont utilisés afin de garantir une cohérence entre le modèle par RdP (Figure 3) et le modèle par arbres de défaillances (Figure 4).

Figure 3. Réseau de Petri observateur d'un système S1

Figure 4. Schéma de principe d'un système d'évacuation de la puissance résiduelle

2. Les réseaux « de modes de défaillance de composants » correspondent aux modes de panne d'un composant ou d'un groupe de composants (équivalent aux évènements de base des arbres de défaillances). Ce type de réseau est composé de générateurs de défaillances (et de réparations) ainsi que de RdP modifiant les variables d'états des composants. Leur modélisation peut varier selon le type de défaillance (en fonctionnement ou à la sollicitation) ou si le composant fait partie d'un groupe de défaillances de cause commune.

Pour ce deuxième point, du fait de la nature différente des calculs avec le modèle par arbre de défaillances, une temporalité est introduite dans le modèle par RdP. Par exemple :

- La défaillance en fonctionnement (Figure 5) d'un composant se fera avec une transition stochastique paramétrée suivant un taux de défaillance. La défaillance est considérée à un instant t lorsqu'un jeton a été tiré par la transition à cet instant.

Figure 5. Modélisation d'une défaillance en fonctionnement

- La défaillance à la sollicitation d'un composant pourra arriver uniquement lorsqu'un évènement nécessitant la sollicitation du composant en question se produit (par exemple le signal d'arrêt du réacteur ou la panne d'un autre composant à un instant t). Cette défaillance est plus complexe et est différente à modéliser suivant les cas. Elle nécessite une transition réalisant un test aléatoire avec un prédicat nécessaire à valider (Figure 6).

Figure 6. Transition réalisant un test à la sollicitation d'une vanne

5.3. Les défaillances de cause commune

La prise en compte des défaillances de cause commune (DCC) est un enjeu majeur dans la sûreté nucléaire. Dans ce cas d'étude, ces défaillances sont prises en compte par la méthode du facteur Beta. Ultérieurement, suivant les équipements considérés, la prise en compte des modes communs pourra être réalisée avec des méthodes moins pénalisantes. La modélisation par réseaux de Petri de cette méthode demande l'ajout d'un graphe supplémentaire par rapport aux défaillances indépendantes.

Pour les défaillances en fonctionnement, l'idée de cette modélisation, représentée en Figure 7, est de confronter deux processus : le premier de défaillance individuelle régi par une loi exponentielle de paramètre :

$$\lambda_{Ind} = (1 - \beta) \times \lambda_{Tot} \quad \{1\}$$

et le deuxième de défaillance de cause commune régi par une loi exponentielle de paramètre :

$$\lambda_{DCC} = \beta \times \lambda_{Tot} \quad \{2\}$$

Figure 7. Réseaux de Petri modélisant un groupe DCC de composants en fonctionnement

Avec :

- λ_{Ind} ; le taux de défaillance du composant par défaillance indépendante ;
- λ_{DCC} ; le taux de défaillance du composant par défaillance dépendante ;
- λ_{Tot} ; le taux de défaillance total du composant ;
- β ; le paramètre de défaillance de cause commune.

Pour chaque composant, un réseau observateur composé de deux chemins (pour passer de l'état de bon fonctionnement à l'état de panne) est construit. Le premier chemin correspond à la défaillance individuelle et est représenté par une transition stochastique (transitions S1TR1PG1DF et S1TR2PG1DF), paramétrée avec le taux de défaillance modifié (équation {1}). Le deuxième chemin correspond à la défaillance de cause commune et est modélisé par une transition déterministe de délai nul et avec comme condition la validation de la variable du groupe DCC. Cette variable sera validée dans le RdP situé en bas lorsque le jeton passera la transition de défaillance (paramétrée avec l'équation {2}). Ce RdP permet de changer l'état de tous les modes de défaillance d'un groupe de DCC.

Des réseaux de Petri sont également utilisés pour prendre en compte les causes communes de défaillances à la sollicitation. Cette modélisation est plus complexe et n'est pas détaillée dans cette communication.

5.4. Prise en compte des événements initiateurs

Un événement initiateur est un événement qui perturbe le fonctionnement normal de l'installation, conduisant à une dérive de certains paramètres de l'installation (température, réactivité...) à partir duquel une séquence accidentelle peut se développer.

Dans l'approche statique par arbres de défaillances et d'événements les indisponibilités liées à l'évènement initiateur sont propagées à l'aide d'« House Event » et la contribution de chaque initiateur est directement obtenue à la fin des calculs en multipliant la probabilité d'échec de la fonction de sûreté par la fréquence de l'évènement initiateur.

Pour l'approche dynamique par RdP, l'approche est différente car les calculs sont réalisés de manière statistique : une génération d'un nombre important d'histoires est réalisée et le résultat obtenu est le ratio entre le nombre d'histoires ayant conduit à l'évènement redouté et le nombre total d'histoires. Le résultat obtenu à la fin des calculs doit être interprété ainsi : « *en cas d'initiateur, la probabilité que la séquence accidentelle conduite à la perte de la fonction EPUr est égale à XXX* ». Il est donc nécessaire de post-traiter les résultats pour obtenir des fréquences par calculs statistiques.

La première étape consiste à construire un RdP permettant de définir l'évènement initiateur associé à l'histoire courante. Ce RdP est présenté en Figure 8 pour les initiateurs arrêt intempestif du réacteur (AUI), perte de tension externe (PTE), perte des 3 pompes primaires (PP3) et vidange intempestive des 4 boucles secondaires (VI4). Un jeton initial est présent dans la place du haut et sera distribué dans une des places en aval de la transition « tirage EI ». Cette transition effectue un tirage aléatoire avec comme allocation les fréquences des initiateurs divisées par la somme des fréquences des initiateurs (ceci pour avoir des probabilités comme paramètres de la transition).

Figure 8. RdP définissant l'EI associé à l'histoire courante

La seconde étape est de répercuter les impacts des évènements initiateurs sur la disponibilité des systèmes EPUr. Pour cela, des variables sont utilisées dans les prédicats modélisant les défaillances. En effet, il est préférable d'impacter les effets d'un initiateur au niveau des composants pour limiter le nombre de transitions à modifier et pour être sûr que les conséquences soient bien propagées. Par exemple, pour l'évènement initiateur « perte de tension externe (PTE) », les transformateurs qui distribuent l'électricité aux tableaux haute tension sont impactés.

Enfin, la dernière étape consiste à post-traiter les résultats. Il s'agit de multiplier le risque global par la somme des fréquences des initiateurs. Il est à noter que par le biais d'un graphe supplémentaire, il est possible de connaître la contribution de chaque initiateur au risque global. À noter également qu'il est nécessaire de s'assurer que le nombre d'histoires simulées est suffisant pour assurer la convergence sur la fréquence de tous les initiateurs. Ce point est traité ultérieurement dans la communication.

5.5. Modélisation de la température

Le modèle par RdP est composé d'un module de suivi de l'évolution de la température du sodium de la cuve principale en fonction de la capacité d'EPUr instantanée, c'est-à-dire du nombre de trains de systèmes EPUr disponibles. Ce module est directement couplé et intégré à l'EPS par opposition aux critères de succès, découplés, utilisés dans l'EPS statique.

Ainsi, l'évènement redouté, « perte de la fonction EPUr » est supposé vrai lorsqu'une température moyenne de 650°C du sodium est atteinte. Ce module permet ainsi de mieux valoriser les délais de grâce (délais avant atteinte d'une situation inacceptable suite à la perte d'un ou plusieurs systèmes défaillants) en n'utilisant plus de critères de succès découplés.

La modélisation de ce module vient en partie de la résolution du bilan thermique sur la cuve à l'aide d'une équation différentielle qui peut se résumer ainsi :

$$T^{\circ}\text{C}(t + \Delta t) = T^{\circ}\text{C}(t) + \frac{P_{\text{res}}(t) - P_{\text{évacuée}}(t)}{I_{\text{moy}}} \times \Delta t \quad \{3\}$$

Avec :

- $T^{\circ}\text{C}$; la température moyenne du sodium
- $P_{\text{res}}(t)$; la puissance résiduelle dégagée par le cœur à un instant t
- $P_{\text{évacuée}}(t)$; la puissance évacuée par les systèmes EPUr disponibles à un instant t
- I_{moy} ; l'inertie thermique moyenne mise en jeu

Cette équation, et celles mettant à jour les valeurs des puissances résiduelles et évacuées, sont insérées dans une transition. Celle-ci est tirée de manière régulière suivant un pas de temps défini à l'avance. Ce pas de temps doit être suffisamment petit pour que la température calculée soit réaliste mais également assez grand pour ne pas trop pénaliser les temps de calcul.

La Figure 9 montre un exemple d'une courbe obtenue pour une histoire où la température du sodium est scrutée.

Figure 9. Exemple d'une courbe d'évolution de la température obtenue avec les RdP

Au début du transitoire, la température augmente car la puissance résiduelle est élevée. Puis lorsqu'elle décroît, la température baisse également si le nombre de systèmes EPUr est suffisant.

Vers 400 heures le nombre de systèmes est insuffisant mais les délais de grâce sont assez longs pour réparer un système puis redescendre en température. Comme la température de 650°C n'est pas atteinte, l'histoire est un succès sur le temps de scrutation défini.

5.6. Prise en compte des réparations

Le modèle par RdP permet de lever les limitations liées aux réparations. Mais, pour qu'il soit réaliste, il faut que ces réparations soient conditionnées à certains facteurs, par exemple :

- le nombre d'agents de maintenance disponibles,
- des paramètres physiques (ici la température du sodium),
- un délai de grâce (durée entre la perte des moyens de refroidissement et l'atteinte en température de l'événement redouté) compatible avec le temps de réparation du composant.

La Figure 10 donne un exemple d'un composant qui peut être réparé si le nombre de réparateurs disponibles est supérieur à 0 et si la température du sodium est inférieure à 300°C. Si ces conditions ne sont pas respectées, alors le composant reste bloqué dans l'état de panne. Le nombre de réparateurs disponibles à un instant t est modélisé dans un graphe à part.

Figure 10. Exemple d'un composant réparable sous certaines conditions

6. Résultats

6.1. Précautions pour les calculs statistiques

Pour calculer la probabilité d'un risque, plus le nombre d'histoires générées est grand, plus le résultat sera représentatif du risque réel. Pour un événement rare, ce nombre d'histoires peut être plus élevé ce qui engendre une hausse du temps de calcul. Ainsi, il faut trouver le bon compromis sur le nombre d'histoires à simuler pour que les résultats soient représentatifs tout en limitant le temps de calcul.

Plusieurs critères sont à regarder pour trouver ce bon compromis :

- Vérifier la représentativité des événements initiateurs. On s'assure que l'initiateur le moins fréquent est tiré un nombre suffisant de fois. Par exemple, pour ce cas d'étude il faut simuler 100 millions (1E08) d'histoires pour s'assurer de la représentativité de l'Ei VI4 (voir Figure 11).
- Vérifier que l'intervalle de confiance (IC) en sortie de simulation est petit.
- Modifier le nombre d'histoires. Si les résultats sont proches d'une simulation à l'autre, on peut garder le nombre d'histoires le plus petit pour réaliser les simulations.
- Modifier la graine (1^{er} numéro du générateur de nombre aléatoire). Si les résultats sont proches d'une simulation à l'autre, on peut garder le même nombre d'histoires pour réaliser les simulations.

6.2. Résultats obtenus

Des simulations réalisées sans réparations et avec les mêmes critères de découplage que le modèle par arbre de défaillances ont montré des résultats équivalents entre les deux méthodes. Un graphe a été ajouté dans le modèle RdP pour vérifier, à partir d'une liste de coupes minimales choisies, que les contributions au risque des composants étaient les mêmes quelle que soit la méthode. Les résultats obtenus pour les coupes étaient également équivalents.

Les premiers résultats donnés par la méthode RdP en prenant en compte les réparations et l'évolution de la température montrent que l'apport des fonctionnalités dynamiques permet de limiter l'accroissement du risque de perte de la fonction EPuR pour les scénarios longs termes.

Figure 11. Étude de la convergence de la fréquence de l'initiateur VI4

Les temps de calcul pour réaliser ces simulations sont relativement longs surtout du fait du module de suivi de l'évolution de la température du sodium car la transition comportant l'équation différentielle est tirée un grand nombre de fois durant la simulation. Des optimisations sont donc à réaliser sur cette modélisation.

Il est également à noter que les simulations ont été réalisées sur un unique PC. L'utilisation de calculs distribués sur plusieurs ordinateurs ou d'un serveur de calcul permettant d'effectuer un grand nombre d'opérations rapidement permettrait de considérablement réduire le temps de simulation.

7. Conclusion

L'avancement actuel du modèle EPS par réseaux de Petri permet, lorsque les réparations ne sont pas prises en compte, de le comparer à un modèle EPS statique. Les fonctionnalités liées à la modélisation des défaillances sont donc développables avec la méthode des RdP et permettent d'obtenir des résultats similaires. Mais à l'inverse des modèles statiques, cette approche reste encore limitée pour être utilisée en tant qu'aide à la conception car elle ne permet pas d'obtenir des coupes minimales directement ni de facteurs d'importances.

En revanche, dans le cadre d'une démonstration de sûreté avec une cible probabiliste, les améliorations sont encourageantes pour continuer à développer cette méthode qui pourra être appliquée ultérieurement dans différentes EPS. Ces limitations ont pu être levées notamment avec la prise en compte des réparations ainsi qu'avec la suppression du découplage engendré par l'utilisation des critères de succès en fonction d'un nombre de systèmes de sûreté disponibles en scrutant directement le comportement réel de l'installation (évolution de la température primaire), ce qui permet d'établir un délai de grâce plus réaliste vis-à-vis de l'évènement redouté (dépassement de la température limite).

Il est à noter que des précautions ont été prises pour que le modèle EPS soit le plus réaliste possible par exemple en conditionnant certaines réparations à un critère de température du sodium ou à un nombre de réparateurs disponibles.

8. Tableau de correspondance

Table 1. Tableau de correspondance des variables

Nom de la variable	Description
C2S1TRPG1_DF	Défaillance de cause commune en fonctionnement des pompes de circulation du système 1
EI_AUI	Évènement initiateur arrêt intempestif du réacteur
EI_PP3	Évènement initiateur perte des 3 pompes primaires
EI_PTE	Évènement initiateur perte de tension externe
EI_VI4	Évènement initiateur vidange intempestive des 4 boucles secondaires
S1_TOUS	Indisponibilité de tous les trains du système 1
S1_TR1	Indisponibilité du train 1 du système 1
S1_TR1_6	Démarrage du train 1 du système 1
S1_TR2	Indisponibilité du train 2 du système 1
S1TR1_PG1_DF	Défaillance en fonctionnement de la pompe de circulation du train 1 du système 1
S1TR2_PG1_DF	Défaillance en fonctionnement de la pompe de circulation du train 1 du système 1