

# Indicateurs d'évaluation des contributions au risque dans le cadre d'analyses probabilistes de sûreté dynamiques

## Risk contribution evaluation indicators within dynamic probabilistic safety analyses

ROUSSEAU Marcelin  
Orano Projets  
Cherbourg-en-Cotentin  
[marcelin.rousseau@orano.group](mailto:marcelin.rousseau@orano.group)

VALLEE Josselyn  
Orano Projets  
Cherbourg-en-Cotentin  
[josselyn.vallee@orano.group](mailto:josselyn.vallee@orano.group)

MOULIE Fabien  
Orano Projets  
Pierrelatte  
[fabien.moulie@orano.group](mailto:fabien.moulie@orano.group)

HERROU Anthony  
Orano Projets  
Pierrelatte  
[anthony.herrou@orano.group](mailto:anthony.herrou@orano.group)

LALANNE Olivier  
Orano Projets  
Cherbourg-en-Cotentin  
[lalanne.olivier@orano.group](mailto:lalanne.olivier@orano.group)

**Résumé** — Cette communication présente l'amélioration et le développement d'outils supplémentaires d'analyse de résultats, associés à des études probabilistes de sûreté basées sur une méthodologie de modélisation dynamique avec réseaux de Petri [1], chez Orano. Les problématiques liées à l'identification des principaux contributeurs au risque global dans le cadre des modélisations dynamiques y seront abordées.

**Mots clés** — *Analyses Probabilistes de Sûreté, Réseaux de Petri, Nucléaire, Etudes probabilistes de sûreté dynamiques.*

**Abstract** — This communication presents the improvement and development of additional result analysis tools, associated with probabilistic safety studies based on dynamic modeling methodology using Petri nets [1] at Orano. The issues related to identifying the main contributors to overall risk within the dynamic models will be addressed.

**Key words** — *Probabilistic Safety Analysis, Petri nets, Nuclear, Dynamic probabilistic safety assessment.*

---

### I. CONTEXTE DES EPS DYNAMIQUES D'ORANO

En France, les Installations Nucléaires de Base (INB), dont font partie les installations du cycle du combustible Orano, présentent des risques associés à la manipulation de substances radioactives (rejet de matières radioactives à l'environnement). Dans ce contexte, Orano s'est engagé à appliquer une méthodologie de type étude probabiliste de sûreté (EPS) sur des systèmes de sécurité/sûreté de ses procédés nucléaires [1]. Ce type d'approche se traduit, chez Orano, par l'évaluation de la probabilité d'apparition d'un accident afin de répondre aux exigences de sûreté, l'identification des points faibles des installations et de leur correction au besoin [2]. Les cinétiques accidentelles des installations d'Orano sont variables en fonction des procédés et des risques étudiés. Elles peuvent être suffisamment lentes pour valoriser la mise en œuvre de réparations ou de reconfigurations du système comme éléments contribuant à la sûreté des installations.

Dans le cadre de cet engagement, Orano a conçu une méthode d'appréciation du risque au sens probabiliste pour ses installations. Le schéma ci-dessous (Figure 1) présente la transcription du graphe d'acceptabilité pour les scénarios accidentels relatifs aux usines Orano avec des limites d'acceptabilité pour les couples probabilité d'occurrence / impact

radiologique sur le public. En particulier, trois types de situations fortement dégradées sont désignées comme accidentelles (rejets radioactifs plus ou moins importants), avec pour chacune un domaine résiduel acceptable correspondant.

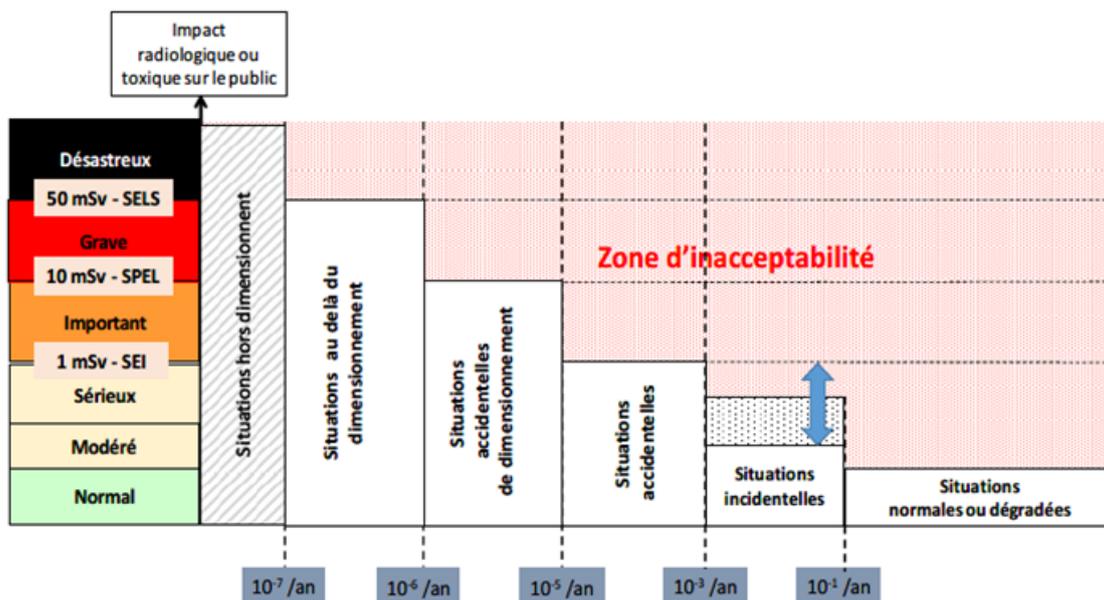


Figure 1 : Graphe de Farmer Orano - Couple "Probabilité/Impact"

Le but des analyses probabilistes de sûreté menées par Orano est de quantifier les risques associés aux installations étudiées par une évaluation de leur fréquence d'occurrence annuelle et de leur conséquence associée (impact). Cette quantification des risques résiduels est ensuite comparée au Graphe de Farmer Orano (Figure 1) afin d'évaluer l'acceptabilité. Les risques étudiés sont généralement très rares ( $<10^{-7}/\text{an}$ ), par conséquent, peu observables.

À ce jour, les méthodologies dites « booléennes », utilisant des modélisations statiques telles que les arbres de défaillances et arbres d'évènements, sont très utilisées et bien acceptées dans le secteur nucléaire [2]. Cependant, celles-ci sont mal adaptées pour répondre aux contraintes de certaines installations d'Orano et à certains risques spécifiques. En effet, la méthode de quantification des scénarios accidentels avec arbres d'évènements ou de défaillance trouve rapidement des limites lorsque les observations dépendent du temps ou que l'atteinte d'un état accidentel passe par un état dégradé intermédiaire [1]. Un saut qualitatif a donc été nécessaire, imposant l'utilisation d'une approche d'évaluation probabiliste dynamique.

Dans ce cadre, Orano a fait le choix de développer une méthodologie dynamique utilisant une modélisation avec réseaux de Petri (RdP) sous le logiciel GRIF. En effet, leur flexibilité d'utilisation est utile pour modéliser des systèmes dans lesquels les interactions sont importantes. Les modélisations par RdP développées par Orano permettent d'intégrer des demandes diverses et parfois difficiles à prendre en compte à l'égard de la complexité des procédés étudiés, comme notamment :

- L'évolution des systèmes selon des états plus ou moins dégradés, pouvant nécessiter des reconfigurations ;
- La prise en compte des capacités de réparation compte-tenu des cinétiques accidentelles lentes. Cette spécificité liée aux installations d'Orano permet notamment de mettre en avant des marges supplémentaires liées à la temporalité des évènements étudiés ;
- La survenue d'un évènement interne ou externe et des pratiques d'exploitation le plus fidèlement possible [3].

Les résultats sont obtenus à l'aide de simulations de Monte-Carlo permettant d'animer le modèle en RdP, représentant le système et son comportement (basé sur un paramétrage probabiliste), sur un très grand nombre d'histoires. Chaque histoire correspond à une évolution possible du système au cours de son cycle de vie. Le calcul se fait par approche statistique pour évaluer les fréquences moyennes des situations accidentelles.

## II. SPECIFICITÉS DES ÉVÈNEMENTS REDOUTÉS OBSERVÉS

La méthodologie développée par Orano a été mise en pratique lors d'une EPS sur un système permettant la concentration, par évaporation, de solutions de produits de fission (déchets nucléaires ultimes) avant leur vitrification, voir [1]. L'objectif de l'étude est d'évaluer la fréquence d'atteinte des seuils d'impact à l'environnement due à des rejets liés à des défaillances du système (au regard des valeurs limites de référence du graphe de la Figure 1).

Ces rejets à l'environnement sont susceptibles d'apparaître en cas de perte combinée et durable de différents systèmes de refroidissement : refroidissement de l'évaporateur et refroidissement du condenseur des gaz de sortie. Plusieurs barrières de prévention existent afin de fiabiliser ces fonctions et prévenir la survenue d'une situation dégradée pouvant conduire à un rejet. Si la situation dégradée se présente malgré tout, des barrières complémentaires de limitation des conséquences peuvent alors être mises en œuvre afin de limiter la quantité de rejet émis en phase accidentelle.

Les Evénement Redoutés (ER) étudiés correspondent au dépassement de plusieurs seuils de rejets, dont l'atteinte dépend de la quantité de rejet émise dans le temps. Ces ER dépendent des éléments suivants :

- De l'état des différents systèmes de refroidissement et des barrières de prévention et protection ;
- Du temps passé dans une situation dégradée.

Un exemple de dynamique accidentelle entre les pertes des systèmes de refroidissement et des différentes barrières et l'émission de rejet est présentée sur la Figure 2.

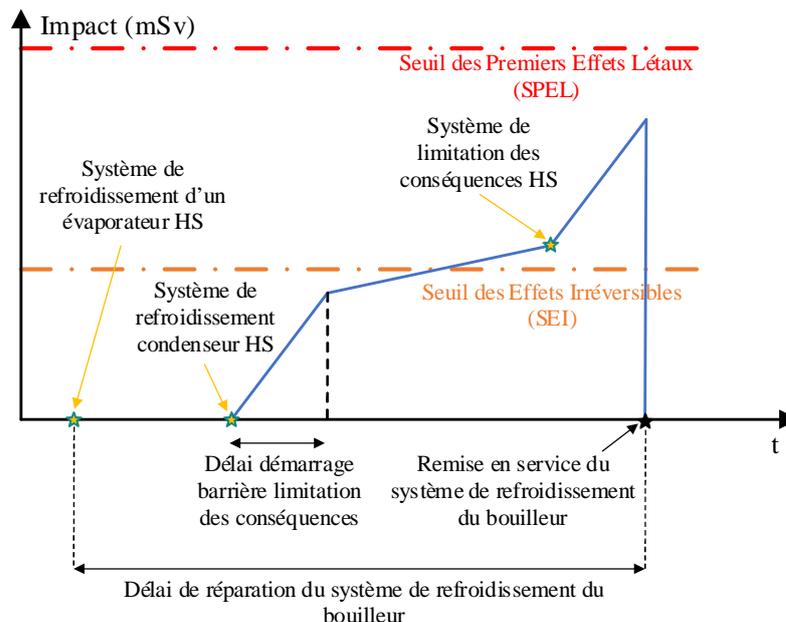


Figure 2 : Comportement dynamique simplifié des rejets modélisés

La méthodologie développée par Orano a été construite et améliorée dans le cadre d'une instruction en lien direct avec les autorités de sûreté nucléaire.

### III. NÉCESSITÉ D'UNE ÉVOLUTION MÉTHODOLOGIQUE

#### A. Origines de l'évolution

Les modélisations par réseaux de Petri d'Orano permettent de quantifier aisément les probabilités d'apparition des événements observés, mais l'identification exhaustive des principaux contributeurs à ces événements n'est pas directement calculée. L'atteinte et la gravité des événements observés, dans le cadre de ces modélisations dynamiques, évolue en fonction du temps passé dans des états dégradés. Cet aspect temporel rend alors difficile, l'identification des événements menant à un accident parmi les multiples événements/pannes/réparation/etc. qui peuvent survenir durant la vie du système. Pour améliorer la lisibilité et la compréhension des modélisations par RdP, Orano a développé des outils d'analyse des résultats afin d'améliorer et compléter sa méthodologie d'EPS dynamiques par RdP.

Contrairement aux outils de modélisation statiques, l'obtention d'indicateurs à la contribution au risque sous forme de coupes minimales ou de facteurs d'importance [2] n'est pas immédiate/directe. En effet, les résultats d'un calcul par réseaux de Petri sont obtenus sous forme d'une moyenne des résultats de chaque simulation, résultant de l'évolution de l'état du système au cours du temps. Les outils classiques des modélisations booléennes sont définis de façon statique [3], avec pour hypothèse un système dont les composants sont binaires et dont l'architecture est définie a priori [4]. Le choix a été fait par Orano de se tourner vers une adaptation des outils existants dans les approches statiques. En effet, le niveau de confiance dans ces indicateurs est élevé dans le secteur du nucléaire, et ils font partie d'une base méthodologique de démonstration des points faibles d'une installation proposée par les autorités de sûreté [2]. Cependant, la transposition de ces outils analytiques aux modèles dynamiques tels que les réseaux de Petri n'est pas triviale.

## B. Outils existants

Des méthodes de calcul des facteurs d'importance pour les systèmes dynamiques ont été étudiées dans le document [4]. Elles sont axées sur la transposition des formules de calcul théorique des facteurs d'importance statiques dans le cadre de modèles analytiques dynamiques, notamment les modèles de Markov. La comparaison de plusieurs méthodes de calcul de ces facteurs met en avant des points faibles pour chacune des méthodologies.

- Les méthodologies permettant d'obtenir un calcul rigoureux des facteurs ne peuvent être mises en place lors de la modélisation de systèmes complexes. En effet, le nombre d'états impliqués dans le calcul rend impossible l'utilisation de ces méthodologies. D'autre part, la prise en compte de systèmes réparables et/ou de dépendance entre les composants peut être délicate ;
- La méthodologie d'approximation des facteurs présentée est moins précise et l'erreur tend à augmenter lorsque les temps de mission s'allongent. D'autre part, la réparabilité des systèmes ne peut pas être prise en compte dans cette méthodologie.

Enfin, toutes ces méthodes sont présentées dans le cadre de modélisations sous forme de modèles de Markov qui sont différentes des modélisations par réseaux de Petri d'Orano. Par conséquent, la transposition à des modèles stochastiques tels que les réseaux de Petri, n'est pas directe. C'est la raison pour laquelle Orano s'est tournée vers d'autres méthodes. La suite du document détaille une réalisation technique d'outils empiriques, basés sur les modélisations dynamiques des EPS développées par Orano, permettant d'identifier le poids des différents éléments du système dans l'apparition d'un évènement redouté (ER) et ainsi de cibler les éléments les plus critiques.

## IV. DÉVELOPPEMENT D'OUTILS D'ANALYSE

Dans les modèles statiques classiques, les facteurs d'importance sont des indicateurs visant à évaluer les contributions relatives des différents composants du système au risque global. La nature statique de ces facteurs d'importance [3] leur permet d'être définis mathématiquement sous forme de probabilité. Les facteurs d'importance statiques dont Orano s'est inspiré pour le développement de ses indicateurs sont présentés ci-après.

### A. Facteurs d'importance statiques

Lors des explications suivantes, ER désignera l'évènement redouté tel que l'émission d'un rejet à l'atmosphère (par exemple) et EB désignera un évènement de base tel que la défaillance d'un composant. Alors, les facteurs d'importance statiques sont définis au moyen de :

- La probabilité d'apparition de l'évènement redouté  $p(ER)$  ;
- La probabilité conditionnelle d'apparition de l'évènement redouté en sachant que l'évènement de base est survenu  $p(ER|EB)$
- La probabilité conditionnelle d'apparition de l'évènement redouté en sachant que l'évènement de base n'est pas survenu  $p(ER|\overline{EB})$ .

Le *Facteur d'Importance de Birnbaum* (ou facteur d'importance marginale), noté  $MIF(ER, EB)$ , est défini comme suit :

$$MIF(ER, EB) = p(ER|EB) - p(ER|\overline{EB}) \quad (1)$$

Ce facteur d'importance se traduit par la probabilité qu'un ER apparaisse, sachant qu'un équipement (EB) est dysfonctionnel. Sa variation permet donc d'estimer le taux avec lequel la fréquence de l'ER est diminuée avec la réduction de l'indisponibilité du composant EB.

Le *Facteur d'Importance Critique*, noté  $CIF(ER, EB)$ , est défini comme suit :

$$CIF(ER, EB) = \frac{p(EB)}{p(ER)} MIF(ER, EB) \quad (2)$$

Il peut être interprété comme la probabilité qu'un équipement (EB) soit en panne sachant qu'un ER est apparu. Il permet d'identifier quel composant (EB) est critique, c'est-à-dire à l'origine de l'ER.

Le *Facteur de Diminution du Risque*, noté  $RRW(ER, EB)$ , est défini comme suit :

$$RRW(ER, EB) = p(ER)/p(ER|\overline{EB}) \quad (3)$$

Il traduit la réduction du risque d'apparition de l'ER avec la fiabilisation d'un composant critique (EB).

## B. Facteurs d'importance Orano

Les trois facteurs d'importance statiques présentés sont basés sur la probabilité d'apparition d'un ER. Ils répondent à un besoin, pour Orano, d'identifier les contributeurs aux ER sur ses installations. Dans le cadre des EPS dynamiques d'Orano, les événements redoutés ne sont pas définis uniquement par une combinaison de défaillances menant à la perte d'un système. En effet, le système peut d'une part se trouver dans plusieurs états dégradés ne conduisant pas tous au même événement redouté. D'autre part, le temps passé dans chacun des états dégradés est une donnée importante pour l'apparition de ces événements redoutés. Par conséquent, le calcul de la probabilité conditionnelle d'apparition d'un événement redouté sachant qu'un événement de base est survenu ne peut être traité selon les définitions précédentes.

Le principal frein de la méthodologie par réseaux de Petri, vis-à-vis de l'obtention des contributeurs, réside dans le fait que les résultats sont présentés sous forme d'une moyenne de fréquences (fréquence d'apparition d'un événement redouté, fréquence de panne d'un équipement, ...). Or, il n'est pas possible post simulation de calculer les facteurs d'importance selon les formules analytiques présentées ci-dessus sur des données moyennes.

Pour pallier ce problème, Orano a développé des indicateurs, sous forme de variables, au sein de sa modélisation, permettant de repérer les événements d'intérêt. Alors, les facteurs d'importance sont calculés grâce à la moyenne de ces indicateurs en sortie de simulation. Ceux-ci sont modélisés, programmés et appliqués à l'ensemble des éléments que l'utilisateur souhaite étudier. Les facteurs d'importance développés par Orano sont détaillés à la suite.

### 1) Définitions

Pour bien comprendre les développements d'Orano conduisant à l'obtention des facteurs d'importance dynamiques, il convient de distinguer deux éléments :

**Indicateur** : Il s'agit d'une variable programmée pour chaque fonction dans la modélisation par RdP, évoluant au fur et à mesure de l'histoire en court. L'indicateur de chaque fonction possède une valeur en fin d'histoire.

**Facteur d'importance (FI)** : Il permet d'observer la tendance de l'impact d'une fonction sur l'ER pour l'ensemble des histoires jouées. Il est obtenu par la moyenne des valeurs de chaque indicateur entre toutes les histoires.

### 2) Facteur d'importance de défaillance

Ce facteur d'importance est inspiré du facteur d'importance de Birnbaum. Il a pour but d'identifier l'ensemble des fonctions indisponibles à chaque apparition d'un ER. Les ER observés étant inscrits dans le temps, deux scénarios de pannes peuvent être observés :

- Une fonction indisponible pouvant conduire à l'apparition d'un ER (voir Figure 3) ;
- Une fonction disponible lors de la survenue d'un ER, contribuant à la prolongation dans cet état accidentel suite à une panne postérieure (voir Figure 4).

Par conséquent, l'indicateur de défaillance a été développé de façon à prendre en compte ces deux types de panne.

Les Figure 3 et Figure 4 ci-dessous illustre la séquence d'activation de l'indicateur de défaillance lors de la panne d'une fonction, dans les deux scénarios évoqués plus haut :

- La survenue de l'ER est indiquée par la courbe jaune. La partie haute indique qu'un ER est en cours ;
- La panne de la fonction étudiée est indiquée par la courbe bleue. La partie haute indique de la fonction est indisponible ;
- Les cercles rouges indiquent les instants de déclenchement de l'indicateur.

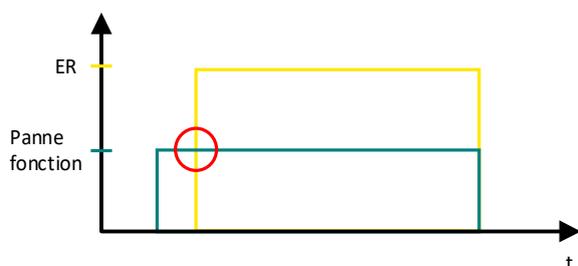


Figure 3 : Indicateur associé au facteur de défaillance pour une panne pré-accidentelle

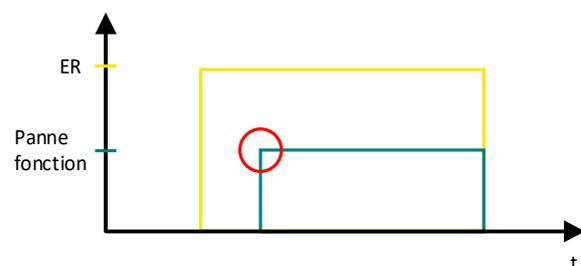


Figure 4 : Indicateur associé au facteur de défaillance pour une panne post-accidentelle

Lorsque les deux évènements coïncident temporellement (représenté par le rond rouge sur les Figure 3 et Figure 4), cela signifie qu'un ER est en cours et que la fonction est en panne. L'indicateur est alors activé durant toute la durée de coïncidence des évènements. Lors des simulations de Monte-Carlo, l'indicateur de chaque fonction à une valeur propre à la fin de chaque histoire, correspondant au nombre de fois où il a été activé (fréquence d'apparition de l'ER et de défaillance de la fonction). Ces valeurs de fréquence par histoire sont alors moyennées entre toutes les histoires.

Il est donc possible de définir le facteur d'importance de défaillance de la façon suivante :

$$FID(ER, F) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{n_k(ER|F_{def})}{n_k(ER)} \quad (4)$$

Avec :

- $ER$  : Un évènement redouté ;
- $F$  : Une fonction du système ;
- $N$  : Le nombre d'histoires simulées ;
- $n_k(ER|F_{def})$  : Le nombre de défaillances de la fonction  $F$  pendant l'évènement redouté  $ER$  dans l'histoire numéro  $k$  ;
- $n_k(ER)$  : Le nombre d'occurrence de l'évènement redouté  $ER$  dans l'histoire numéro  $k$ .

Nota :

Si une histoire  $k$  ne comprend aucun ER, alors le terme  $\frac{n_k(ER|F_{def})}{n_k(ER)}$  vaut 0.

Pour fonctionner, cette méthodologie nécessite la programmation d'un indicateur spécifique pour chaque fonction et chaque ER étudié. D'autre part, l'activation de l'indicateur tient compte uniquement des pannes intrinsèques de chaque fonction. En sortie de calcul, les valeurs associées aux indicateurs sont comparées pour classer les fonctions par rapport à leur impact sur les différents ER.

Ce facteur d'importance ne permet pas une analyse complète des contributeurs aux ER. En effet, la fréquence de panne seule ne permet pas la prise en compte de l'aspect temporel des scénarios accidentels. L'indicateur de défaillance ne permet donc pas de préjuger de la corrélation entre la perte d'une fonction et la durée de l'ER.

### 3) Facteur d'importance d'indisponibilité

Ce second indicateur est inspiré des facteurs d'importance critiques et de diminution du risque. Il a pour but d'identifier les fonctions dont le retour en fonctionnement, suite à une perte, permet la sortie d'une situation d'ER. La méthode employée consiste à quantifier la durée commune entre la perte des fonctions et l'ER.

Les Figure 5 et Figure 6 ci-dessous illustre la séquence d'activation de l'indicateur d'indisponibilité lors de la panne d'une fonction :

- La survenue de l'ER est indiquée par la courbe jaune. La partie haute indique qu'un ER est en cours ;
- La panne de la fonction étudiée est indiquée par la courbe bleue. La partie haute indique de la fonction est indisponible ;
- Les hachures rouges indiquent la temporalité durant lesquelles l'indicateur est activé.

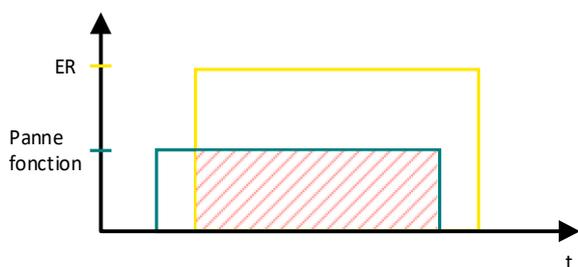


Figure 5 : Indicateur associé au facteur d'indisponibilité pour une panne pré-accidentelle

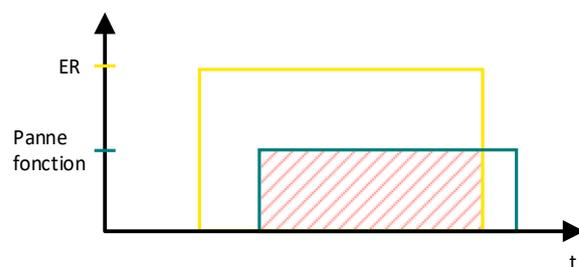


Figure 6 : Indicateur associé au facteur d'indisponibilité pour une panne post-accidentelle

Lorsque les deux évènements coïncident temporellement (représenté par les hachures rouges sur les Figure 5 et Figure 6), c'est-à-dire lorsque les 2 courbes sont à l'état haut simultanément, cela signifie qu'un ER est en cours et que la fonction est en panne. L'indicateur est alors activé pendant toute la durée de coïncidence des évènements. Lorsque la fonction est à nouveau disponible (voir Figure 5) ou que l'ER est stoppé (voir Figure 6), l'indicateur est désactivé. Lors des simulations, l'indicateur de chaque fonction est égal à une durée pour chaque histoire. Ces durées sont alors moyennées entre toutes les histoires.

Il est donc possible de définir le facteur d'importance d'indisponibilité de la façon suivante :

$$FII(ER, F) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{d_k(ER|F_{def})}{n_k(ER)} \quad (5)$$

Avec :

- $ER$  : Un évènement redouté ;
- $F$  : Une fonction du système ;
- $N$  : Le nombre d'histoires simulées ;
- $d_k(ER|F_{def})$  : La durée commune entre la perte de la fonction  $F$  et l'évènement redouté  $ER$  ;
- $n_k(ER)$  : Nombre d'occurrence de l'évènement redouté  $ER$ .

Nota :

Si une histoire  $k$  ne comprend aucun  $ER$ , alors le terme  $\frac{d_k(ER|F_{def})}{n_k(ER)}$  vaut 0.

Ce facteur d'importance, couplé au précédent, permet d'avoir une connaissance des évènements menant à l'apparition d'un  $ER$  et son maintien dans la durée.

#### 4) *Limites des facteurs d'importance Orano*

Certaines limites peuvent être imaginées pour les indicateurs du fait de l'apparition de « faux contributeurs ». (par exemple une fonction en panne mais sans impact direct sur le scénario d'ER en cours pourrait être comptabilisée à tort dans les indicateurs). Ce phénomène est marginalisé par l'approche statistique des facteurs d'importance qui se base sur les simulations de Monte-Carlo. Ainsi, une fonction peut apparaître ponctuellement dans un indicateur mais sera lissée sur la moyenne de l'ensemble des histoires jouées.

D'autre part, il est possible d'obtenir, pour chaque facteur d'importance, l'écart-type associé à son indicateur. Il est alors possible de déduire qu'un indicateur dont l'écart-type est élevé correspond à une fonction dont l'impact sur l'ER varie fortement. A contrario, un indicateur dont l'écart-type est faible correspond à une fonction dont l'impact sur l'ER est constant. Dans ce second cas, cela peut concerner les fonctions qui sont soit fortement soit faiblement corrélées à l'ER.

## V. EXPLOITATION INDUSTRIELLE À L'EPS ORANO

Les facteurs d'importance présentés ci-dessus ont été appliqués à l'EPS dynamique initiale développée par Orano présentée au §II. Les résultats obtenus sont détaillés ci-après. Ils représentent les valeurs obtenues grâce aux indicateurs paramétrés pour l'observation d'un évènement sélectionné spécifiquement pour le présent document.

Les facteurs d'importance issus des indicateurs ont été comparés sur la Figure 7. Les résultats obtenus par l'intermédiaire des indicateurs sont sous forme d'une grandeur sans unité pour l'indicateur de défaillance, et sous la forme d'une durée pour l'indicateur d'indisponibilité. Un traitement a été réalisé pour les exprimer sous forme de probabilité en divisant respectivement par le nombre d'ER et leur durée moyenne. Pour chaque indicateur, la lecture est donc la suivante :

- Le facteur d'importance de défaillance permet d'estimer la probabilité (entre 0% et 100%) pour chaque fonction d'être en panne lorsque l'évènement étudié est en cours ;
- Le facteur d'importance d'indisponibilité permet d'estimer la proportion (entre 0% et 100%) de recouvrement entre chaque fonction et les scénarios d'apparition de l'évènement étudié.

## A. Facteurs d'importance avant modification

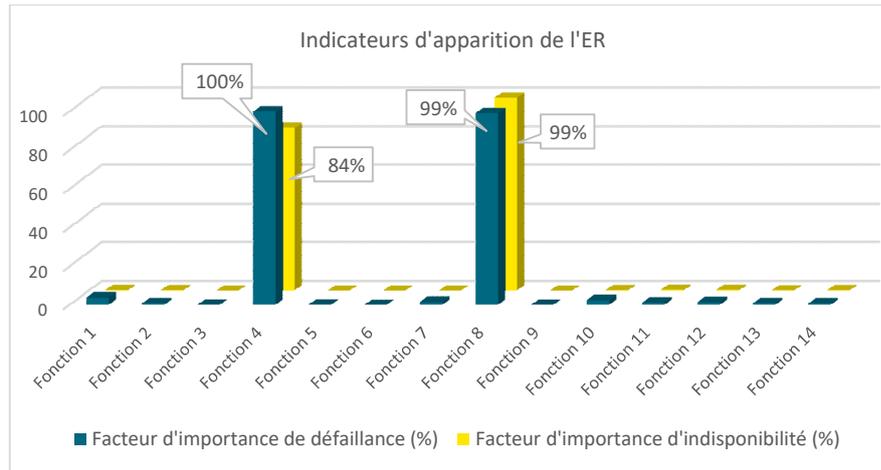


Figure 7 : Facteurs d'importance de défaillance et d'indisponibilité sur l'ensemble des fonctions étudiées

Les facteurs d'importance ont permis de mettre en évidence l'importance de deux fonctions prépondérantes vis-à-vis de l'évènement étudié : les fonctions 4 et 8.

L'analyse de chaque indicateur pour ces deux fonctions permet de déduire que :

- Dans l'intégralité des scénarios conduisant à l'apparition de l'évènement, la fonction 4 est indisponible. De plus, pendant toute la durée d'apparition de l'évènement, environ 84% est couverte par l'indisponibilité de la fonction 4 ;
- La fonction 8 est indisponible dans presque tous les scénarios conduisant à l'évènement (99%), et sa couverture est de 99%, par conséquent, sa panne est systématiquement observée lorsque l'évènement est en cours.

La conclusion est alors la suivante : les fonctions 4 et 8 sont fortement prépondérantes sur les aspects fréquentiels et temporels associés à l'évènement étudié. Suite à ces résultats, la démarche d'amélioration est portée sur plusieurs aspects :

- Un travail sur les hypothèses de calcul prises sur les fonctions 4 et 8 afin de les ajuster au plus proche de la réalité et d'en limiter les marges ;
- Une modification du design et des technologies de ces fonctions afin de permettre une meilleure robustesse face à l'évènement étudié ;
- Une amélioration dans la gestion de la maintenance de ces fonctions et de son organisation.

Les gains apportés par les modifications proposées ci-dessus ont pu être évalués à l'aide de la modélisation par RdP et quantifiés via les indicateurs. Les résultats sur les évènements résiduels sont présentés sur la Figure 8 ci-dessous.

## B. Facteurs d'importance après modifications

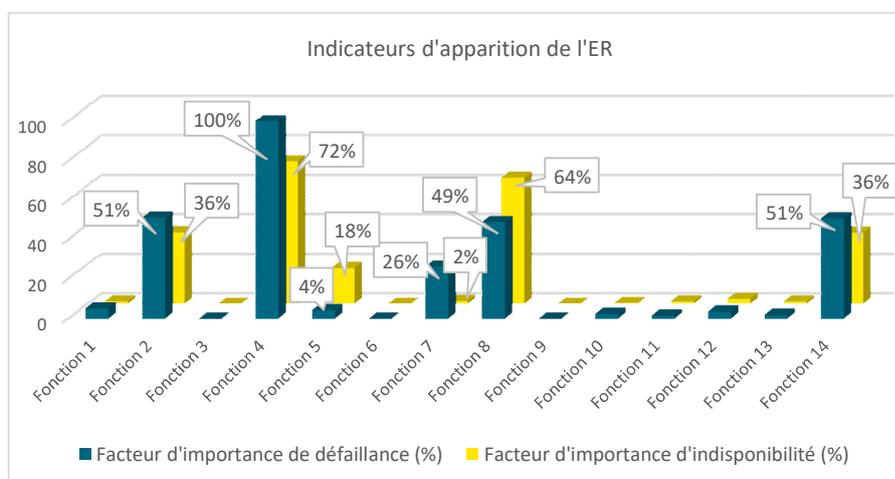


Figure 8 : Facteurs d'importance de défaillance et d'indisponibilité sur l'ensemble des fonctions étudiées après modifications

Les facteurs d'importance permettent d'observer une nouvelle répartition de la contribution à l'évènement étudié entre plusieurs fonctions. La fonction 4 est toujours prépondérante, mais son impact global est fortement réduit puisque d'autres fonctions apparaissent via les indicateurs. La fonction 8 est quant à elle moins prépondérante puisque sa contribution en fréquence avoisine les 50% et que sa contribution temporelle est de 64%. D'autre part, la réduction significative de la fréquence d'apparition de l'évènement étudié (non présentée dans ce document) avant et après mise en place des modifications permet de conclure sur les gains de sûreté apportés au système.

Les éléments prépondérants du système vis-à-vis de l'évènement étudié ont donc pu être identifiés à l'aide des facteurs d'importance. Ces derniers ont également aidé à la quantification du gain en sûreté apporté au système via les modifications proposées, puisque la nouvelle configuration du système a permis une réduction significative des fréquences d'atteinte de l'évènement étudié (non présentées dans ce document).

### C. Application aux évènements redoutés de l'EPS dynamique Orano

La démarche présentée précédemment a été appliquée à l'ensemble des évènements redoutés de l'EPS dynamique menée par Orano, voir §II. Les valeurs des facteurs d'importance ont permis une analyse fine de la contribution de chaque fonction dans les scénarios d'ER. L'utilisation de cette méthodologie dans un cadre industriel a permis de consolider les analyses de l'étude initiale et de renforcer le système en conséquence.

## VI. CONCLUSION

Les outils d'analyse des résultats développés par Orano, dans le cadre de ses EPS dynamiques par réseaux de Petri, viennent renforcer la méthodologie initiale [1]. Ces outils offrent une approche la plus exhaustive possible sur la contribution de l'ensemble des fonctions du système étudié. Ils permettent l'identification et la quantification des points faibles à travers 2 facteurs d'importance développés par Orano. Il est alors possible de proposer des modifications du design et/ou des pratiques d'exploitation (maintenance préventive/corrective, délai de réparation, ...) ajustées au bon niveau afin de maîtriser les faiblesses des systèmes.

En outre, cette méthodologie impose le traitement d'un grand nombre de données et Orano travaille à la mise en place d'un traitement automatique avec des outils de Data Science.

## REFERENCES

- [1] Moulie, F., Vallee, J., Herrou, A. & Lalanne, O. (2022). *Analyse Probabilistes de Sûreté innovantes avec modélisations dynamiques*. Institut pour la Maitrise des Risques, Congrès Lambda Mu 23.
- [2] Bribois, J. (1995). Etudes Probabilistes de Sûreté. *Techniques de l'ingénieur*, B3831.
- [3] Signoret, J-P. & Leroi, A. (2021). *Reliability Assessment of Safety and Production Systems*. Springer.
- [4] Do, P., Berenguer, C. & Dieulle, L. (2012). *Comparaison et évaluation des méthodes de calcul des facteurs d'importance fiabilistes pour les systèmes dynamiques*. Archive HAL émise par l'UTT.