

Modélisation d'un risque NaTech entraînant un effet Domino.

S. FOUNAS¹, C. CURT¹, C. GAUCHEREL², F. TAILLANDIER¹, G.K. AGUIRRE-SAMBONÍ³, S. HAAR⁴

¹ UMR RECOVER (INRAE, Aix Marseille Univ) Aix en Provence

² INRA – AMAP Montpellier

³ Centre for Computational Biology, Mines Paris, PSL University, Paris 75006, France

Institut Curie, PSL University, Paris 75005, France

INSERM, U1331, Paris 75005, France

⁴ INRIA and Université Paris-Saclay Gif-sur-Yvette

RESUME Le multirisque peut être défini comme un système complexe composé de différents aléas, qui peuvent agir en combinaison - avec ou sans coïncidence dans le temps - et avoir un impact sur des enjeux et leur vulnérabilité, potentiellement dépendants. Pour mieux comprendre et prévenir ces situations, il est essentiel de formaliser les connaissances et de les traduire en processus représentatifs. Les défis scientifiques résident dans la modélisation des interactions entre les multiples composants d'un système et la compréhension de sa dynamique. Pour y faire face, les approches basées sur les réseaux de Petri et leur dépliage offrent une solution pertinente. Elles permettent de formaliser la dynamique d'un système et de représenter exhaustivement toutes les configurations dans la limite de la conception du modèle. Dans cette communication, l'objet de la modélisation portera sur un territoire comprenant deux zones industrielles (ZI) dotées de deux usines et d'infrastructures telles qu'une digue et un pont permettant l'accès à la deuxième ZI. Une cascade d'événements est modélisée ici : (i) un événement NaTech provoqué par un incendie de forêt pouvant mener à l'explosion de l'usine de la première ZI et la destruction de digues (ii) un effet Domino induit par cette explosion, menant à l'incendie dans l'usine de la deuxième ZI, et ses conséquences comme la pollution d'un cours d'eau à proximité. Des systèmes de protection (actions de pompiers) /prévention (systèmes de sécurité dans les usines) sont inclus dans cette modélisation. Cette analyse a permis de mettre en évidence le rôle essentiel de l'enchaînement des événements dans la réalisation d'un phénomène catastrophique.

Keywords Multirisques, Réseaux de Petri, Dépliage, NaTech, Effet Domino

I. INTRODUCTION

Des événements majeurs récents, tels que les inondations de 2024 à Valence, les méga-feux de forêt dans le sud de l'Europe, au Canada, et très récemment aux États-Unis, sont représentatifs de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes climatiques, annoncée par le GIEC dans son rapport de synthèse de 2022 (*AR6 Synthesis Report: Climate Change (2023)*). L'augmentation des événements climatiques extrêmes et l'urbanisation croissante rendent les infrastructures plus vulnérables aux risques, pouvant conduire à des événements NaTech. Un événement NaTech désigne un accident technologique provoqué par un aléa naturel, illustré par l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima en 2011, déclenché par un séisme suivi d'un tsunami. De plus, la proximité entre infrastructures accroît la possibilité de propagation du risque entre installations industrielles par un effet Domino. Le risque NaTech et les effets Domino sont des types de multirisques qui peuvent être définis par « un ensemble complexe composé de différents aléas, pouvant agir

de manière combinée, avec ou sans coïncidence dans le temps, et impactant des enjeux et leur vulnérabilité, potentiellement dépendants » (Curt (2021)). Le concept de multirisque a été introduit dans l'Agenda 21, adopté lors de la conférence de Rio de Janeiro en 1992 (United Nations Department of Public Information (1993)), dans le but de mettre en évidence l'urgence de considérer les interactions entre différents types de risques.

Face à l'augmentation des événements climatiques et technologiques, le Cadre d'action de Sendai, adopté en 2015, a établi des objectifs mondiaux visant à « développer l'accès à l'innovation, au soutien technologique et à la recherche à long terme pour des solutions en gestion des risques » (*Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015 - 2030* (2015)). Des mesures de gestion du risque sont mises en place sur les territoires afin de réduire les impacts de ces événements. Toutefois, de manière classique, la gestion des risques considère les risques de façon isolée, ce qui sous-estime l'impact du risque, car les interactions entre les effets ne sont pas prises en compte ; or, ce sont souvent ces interactions qui exacerbent les effets et la vulnérabilité des enjeux sur les territoires. Les risques peuvent se combiner et l'accumulation d'événements augmente leurs impacts.

Pour mieux comprendre et prévenir ce type d'événement, un enjeu majeur réside dans la formalisation des connaissances et la représentation de processus multirisques. Les défis scientifiques concernent principalement la représentation des interactions entre les nombreuses composantes d'un système complexe, ainsi que la compréhension de la dynamique du système. Peu de travaux portant sur les événements multirisques, et encore moins sur un enjeu de modélisation, ont été recensés dans la littérature scientifique (Curt (2021); Zhou & Reniers (2017a, 2017b, 2018, 2021)), parmi les approches identifiées figurent les réseaux de Petri (Murata (1989)). De manière plus générale, cette approche a trouvé des applications dans divers domaines, notamment l'informatique, dans l'analyse de la sécurité des systèmes, dans la dynamique des automates. Ils sont particulièrement pertinents pour aborder des systèmes complexes dont les dynamiques sont peu connus, comme c'est le cas des événements multirisques (Cosme & al. (2023)). Pour ce qui concerne plus spécifiquement le multirisque, seulement quelques articles ont fait l'objet de développements basés sur des réseaux de Petri. Ils se concentrent notamment sur le contexte de modélisation d'effets dominos dans le domaine industriel (Chahrour et al. (2021) ; Dueñas Santana et al. (2021) ; Guo & Wang (2023) ; Kamil et al. (2019) ; Li et al. (2024) ; Zhou & Reniers (2017a, 2017b, 2018)). Nous n'avons pas trouvé de travaux utilisant spécifiquement le dépliage des réseaux de Petri dans la modélisation d'événements multirisques. Pourtant, cette approche semble prometteuse pour répondre à notre problématique. En effet, la méthode de dépliage des réseaux de Petri (Esparza et al. (1996) ; McMillan (1993)) permet d'explorer de manière exhaustive tous les processus possibles à l'intérieur du modèle, facilitant ainsi l'identification des trajectoires qu'un système peut emprunter. Le dépliage peut également contribuer à une analyse plus approfondie et plus précise des comportements du système étudié, notamment dans la recherche d'événements spécifiques.

Dans cet article, nous proposons donc d'utiliser les réseaux de Petri et leur dépliage pour modéliser des processus multirisques. Plus précisément, l'étude porte sur la modélisation d'un système exposé à un risque NaTech de feu de forêt menaçant une usine, ce qui, par effet domino, menace à son tour une deuxième usine et entraîne la pollution d'une rivière à proximité. L'étude du risque de pollution de la rivière permet d'explorer la propagation des multirisques dans le modèle. La question scientifique de l'article est de déterminer comment éviter le risque de pollution de la rivière ? L'objectif à travers cette question est de comprendre la dynamique et les interactions entre les variables au cours d'un événement multirisque. Cela permettra de comprendre les avantages de la méthode des déplisages des réseaux de Petri pour aborder les événements multirisques. La méthode s'articule autour de trois étapes principales :

- La conception du système : cette étape consiste à définir les composantes du système et leurs interactions.
- La formalisation du modèle : le système est traduit en réseaux de Petri, permettant leur dépliage.
- L'analyse du modèle : les informations contenues dans le système sont présentées sous forme de différents graphes, qui pourront être analysés pour en extraire des informations.

II. MÉTHODE

A. Principe de la méthode

Le logigramme de la Figure 1 présente le processus de production de graphes, ainsi que les outils nécessaires à sa réalisation. Le système est d'abord défini à l'aide d'un ensemble de règles dans l'environnement EDEN, sur la plateforme ecco (Pommereau et al. (2022)). Ces règles sont ensuite traduites en fichier exploitable sur Ecofolder développé par G.K. Aguirre-Samboní et S.Haar (Aguirre-Samboní et al., (2022, 2023) ; McMillan (1993) ; Esparza et al. (1996)).

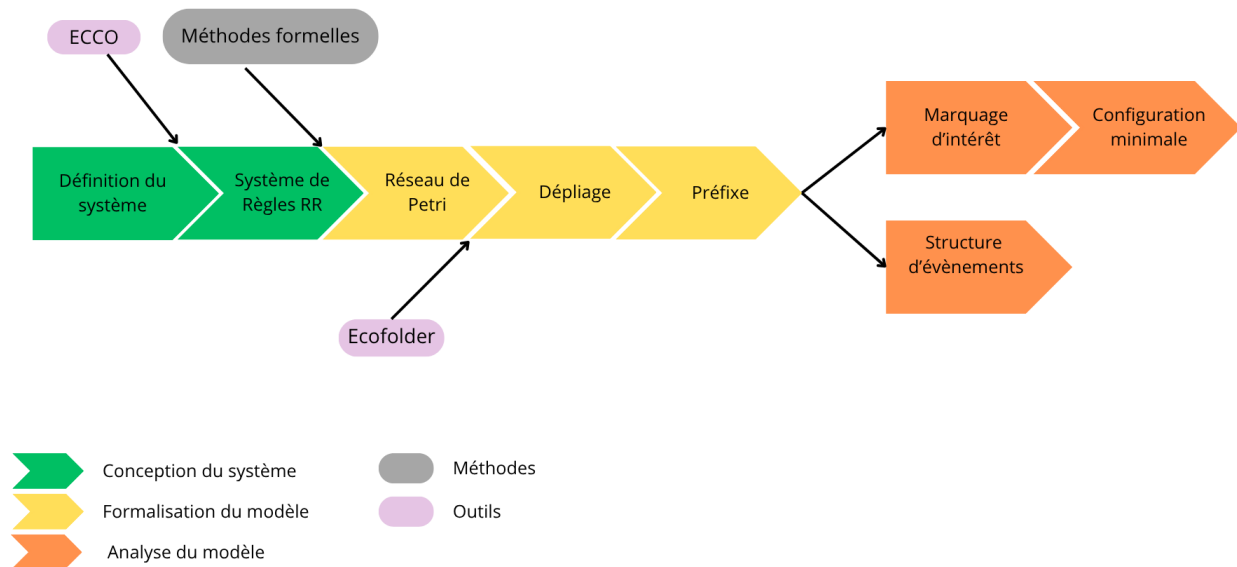


FIGURE 1. Logigramme indiquant les différentes étapes de l'approche, ainsi que les outils et méthodes utilisés (dans les cases grises) et les résultats obtenus

B. Définition du système

Le territoire étudié est constitué d'une forêt et de deux zones industrielles (ZI), chacune contenant une usine. Ce territoire est exposé à un risque de feu de forêt initié par une cigarette allumée, suivi de la propagation d'un risque NaTech dans la première ZI, puis d'un effet Domino dans la seconde ZI. Les composants inclus dans le modèle sont : une cigarette, une forêt, une caserne avec deux unités de pompiers (chaque unité étant

une équipe mobile motorisée non divisible), deux usines avec leurs systèmes de sécurité et un pare-feu, une rivière, ainsi que des infrastructures telles qu'un pont et des digues.

À partir des composants du système, des variables sont associées selon des caractéristiques et des rôles tels que : un rôle de protection avec des caractéristiques de déplacements pour les variables des unités de pompiers (leur nombre doit rester constant lors du processus), le pare-feu évite la propagation du feu entre la forêt et la ZI 1, les digues protègent la rivière de la pollution, et les systèmes de sécurité sont des moyens de prévention contre le feu pour les usines. Les enjeux sont la forêt, les usines, la rivière et les infrastructures (digués, pont). Les aléas sont les feux dans différents sites tels que la forêt, la ZI 1 et ZI 2. Les usines par la modélisation des risques NaTech et l'effet Domino auront aussi un rôle d'aléas lorsque ceux-ci seront impactés. L'aléa initial est une cigarette allumée dans une forêt.

Les variables sont binaires qualitatives de type présence/absence (notées « + » pour présence et « - » pour absence) (Cosme et al. (2023) ; Gaucherel & Pommereau (2019)). Les arêtes sont dans $\{0 ; 1\}$: absentes égales à 0 et présentes égales à 1. Les règles sont de la forme Conditions » Réalisations, où les Conditions correspondent aux combinaisons des états des variables nécessaires à l'activation de la règle et les Réalisations désignent les changements d'états des variables suite au déclenchement de la règle. L'environnement EDEN sous la plateforme ecco (Pommereau et al. (2022)), a permis, de produire un fichier de règles RR (Reaction rules) (Cosme & al. (2023)). Ce fichier répertorie l'état initial de chaque variable, noté M_0 : « marquage initial », ainsi que le tableau des règles représentant les relations entre les états des variables. Le modèle, présenté dans cette étude, comporte 18 variables et 48 règles. Par exemple, la règle R2 du modèle est :

$$R2 : BuF-, Cig+ \gg BuF+, Cig-$$

- $BuF-$: la variable "BuF" représente le risque de feu de forêt sur le territoire modélisé, l'état "-" le feu est inactif ;
- $Cig+$: la variable "Cig" du composant "cigarette" dans l'état "+" désigne une cigarette allumée ;
- $BuF+$: la variable "BuF" passe à l'état "+" suite au déclenchement de la règle R2, le feu est actif, la forêt prend feu ;
- $Cig-$: la variable "Cig" passe à l'état "-" suite au déclenchement de la règle R2, la cigarette est consommée.

Si la règle R2 est déclenchée, elle permet à une cigarette allumée de causer un feu de forêt et d'être consommée.

C. Méthodes formelles - Réseaux de Petri (RdP)

Les réseaux de Petri (RdP) permettent de représenter de façon formelle les systèmes dynamiques sous la forme d'un graphe (Figure 2a.). Un RdP, noté $N = (P, T, F, M_0)$ (Murata, 1989), est composé de :

- P : l'ensemble des places $\{P_i\}_i$.
- T : l'ensemble des transitions $\{T_j\}_j$.
- F : l'ensemble des arcs orientés entre les transitions et les places.
- M_0 : le vecteur de marquage initial, plus précisément, la position des jetons présents initialement dans le système.

Le système de variables donne l'ensemble des places du réseau de Petri. Chaque variable est représentée par un couple de places. Par exemple, la variable Cig est représentée par les places Cig+ et Cig-. Ces places sont complémentaires : si l'une produit un jeton lors du déclenchement d'une règle, alors la seconde la consomme. Il existe une bijection entre les règles $\{R_i\}_i$ du système et les transitions $\{T_j\}_j$ dans le RdP.

Lorsque toutes les places qui précèdent une transition sont marquées, la transition est activée et elle peut être tirée. Plusieurs transitions peuvent être activées en même temps. Lorsque plusieurs transitions sont activées, si le tirage d'une des transitions empêche le tirage d'une autre, alors ces deux transitions sont en conflit. Si deux transitions activées peuvent être tirées l'une indépendamment de l'autre, les transitions sont dites concurrentes.

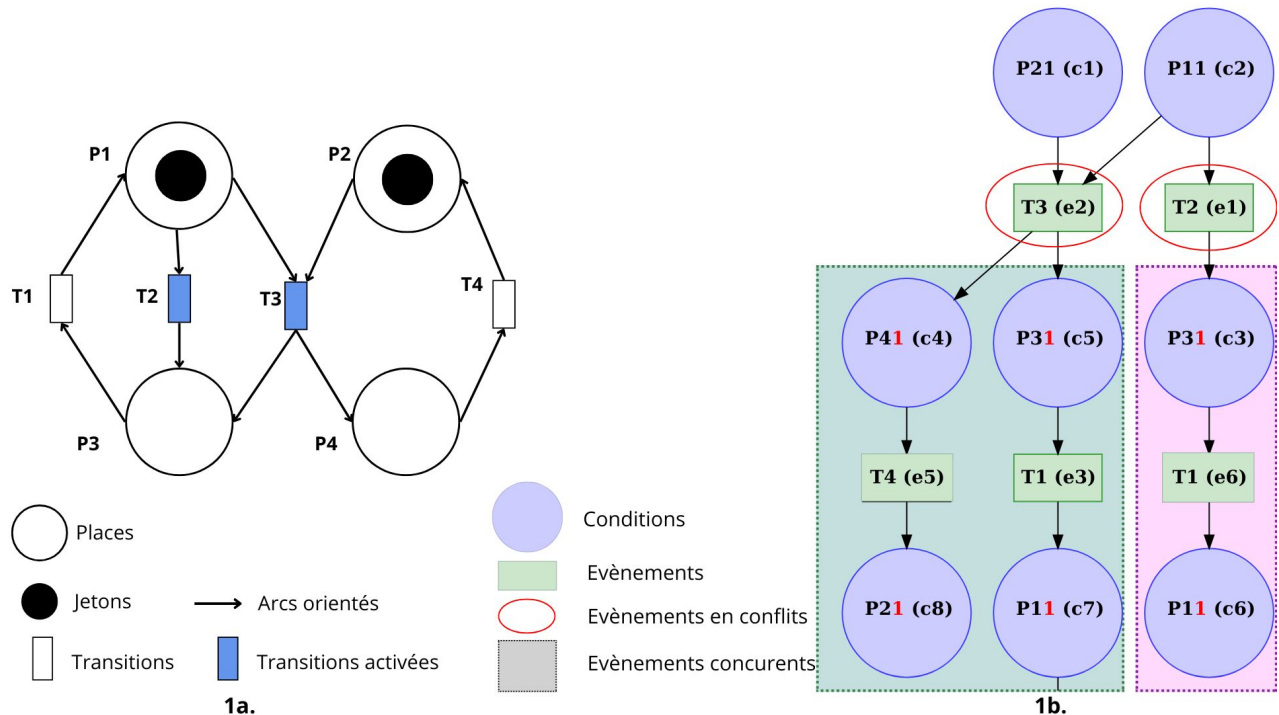


FIGURE 2. 2a. : Exemple d'un réseau de Petri, 2b. : Dépliage du réseau de Petri

Dans l'exemple (Figure 2a.), $P = P1, P2, P3, P4$, $T = T1, T2, T3, T4$, $F = (P1, T2), (P1, T3), (P2, T3), (P3, T1), (P4, T4), (T1, P1), (T2, P3), (T3, P3), (T3, P4), (T4, P2)$ et $M_0 = (1, 1, 0, 0)$. Les transitions T2 et T3 sont activées au marquage initial M_0 . Lorsque T2 est tirée, le jeton P1 est consommé et un jeton est produit en P3. Il n'y a, alors, plus de jeton en P1 et la transition T3 n'est plus activée donc T2 et T3 sont en conflit.

Il existe plusieurs types de RdP, ceux utilisés sont dits « saufs », c'est à dire qu'ils contiennent au maximum un jeton par place et les jetons sont non différenciés (Murata (1989)).

Les réseaux de Petri ont trouvé des applications dans divers domaines, notamment en informatique, en automatique, en biologie des systèmes, en écologie, etc... Ils sont particulièrement pertinents pour aborder des systèmes complexes dont les dynamiques sont peu connues, comme c'est le cas des événements multirisques.

D. Dépliage des réseaux de Petri

Pour tenir compte des possibles occurrences des transitions du RdP, nous utiliserons la sémantique de dépliage en ordre partiel. Elle donne, en une structure de réseau acyclique, les événements (occurrence des transitions) et les conditions nécessaires créées par ces événements. Comme le dépliage complet peut être infini, nous allons chercher des préfixes finis qui sont *complets*, dans le sens que tous les états accessibles du réseau y sont représentés. Les critères de McMillan (McMillan (1993)) et Esparza (Esparza et al. (1996)) permettent de définir les limites du dépliage dans un préfixe. Le dépliage est composé :

- des conditions $\{c_i\}_i$
- des événements $\{e_j\}_j$
- des relations causales entre les conditions et les événements.

La structure de données générée par le dépliage est un réseau d'occurrences noté $O = (B, E, G)$. Les ensembles B et E sont les sommets du graphe et sont disjoints. Avec B l'ensemble des conditions $\{c_i\}_i$ représentées par des cercles et E l'ensemble des événements $\{e_i\}_i$ représentés par des rectangles. L'ensemble G est l'ensemble des arêtes reliant un élément de B à un élément de E ou un élément de E à un élément de B .

On note F^+ la fermeture transitive de G , c'est à dire, pour tous sommets $\{v, w, x\} \in (E \cup B)$ tels que, $(v, w), (w, x) \in G$, alors (v, x) est dans G^+ par fermeture transitive. Dans le réseau d'occurrence O , G^+ est irréflexive, c'est à dire, si $(v, w) \in G^+$ alors $(w, v) \notin G^+$ et pour tout sommet $c \in (E \cup B)$, on a $(c, c) \notin G^+$. Dans le réseau d'occurrence, chaque condition ne peut avoir au plus qu'un événement qui la précède. Pour tout $e \in E$, il existe c_i et $c_j \in B$ tels que (c_i, e) et $(e, c_j) \in G$.

Les conditions minimales sont les conditions telles qu'il n'y ait pas eu d'événement les précédant. Les conditions maximales sont les conditions à partir desquelles aucun événement ne peut intervenir. Trois types de relations peuvent être définis entre deux sommets:

- Noeud x précède causalement y , noté $x \leq y$, s'il existe un chemin d'arcs du RdP menant de x à y , c'est à dire $\leq := G^+$.
- Événements e et e' sont en conflit immédiat, noté $e \#_i e'$, si $e \neq e'$ et il existe $b \in B$ tel que $G(b, e)$ et $G(b, e')$;
Noeuds x et y sont en conflit, noté $x \# y$, s'il existe e_x, e_y tels que $e_x \#_i e_y$ et $e_x \leq x$ ainsi que $e_y \leq y$.
- Finalement, x et y sont concurrents s'ils ne sont reliés ni par \leq ni par $\#$.

Pour construire le dépliage d'un réseau de Petri $N = (P, T, F, M_0)$, il est nécessaire dans un premier temps de créer les conditions minimales. Dans le RdP, pour chaque place marquée par un jeton dans M_0 , on associe une condition minimale représentée par un cercle sur le dépliage. Dans la Figure 2, l'ensemble des conditions C1 et C2 forment les conditions minimales et sont associées aux places marquées P1 et P2 dans le marquage initial du RdP.

Le dépliage se développe par itération des occurrences d'événements successifs possibles et des mises à jour des conditions.

Par exemple (Figure 2a.), la transition T1 est tirée à l'événement e3 et e6 et la place P2 est marquée aux conditions C1 et C8. Les arcs entre les conditions et les événements sont créés si les conditions sont nécessaires à l'occurrence de l'événement, et ces conditions ne sont plus utilisées dans les événements causaux.

Si une condition est liée à plusieurs événements, ces événements sont considérés comme étant en conflit, et les événements qui en découlent sont également en conflit par héritage. Dans l'exemple de la Figure 2, C2 permet l'occurrence de e1 et e2 ; ils sont alors en conflit et les événements qui les succèdent sont également en conflit, par exemple, les événements e3 et e5 sont en conflit avec e6.

Les arcs entre les événements et les conditions représentent les mises à jour des conditions, avec au plus un événement précédant chaque condition.

Dans le RdP, chaque transition activée est associée à un événement représenté par un rectangle. Dans la Figure 2, les événements e1 et e2 sont respectivement associés aux transitions actives T2 et T3.

Si deux événements sont ni causaux ni en conflit, alors ils sont concurrents.

E. Structure d'événements

La structure d'événements (Figure 3b.) est la réduction du préfixe d'un dépliage de réseau de Petri (Figure 3a.). Dans les structures d'événements, les conditions ne sont pas mentionnées, seuls les événements et leurs relations sont visibles. De manière formelle, une structure d'événements est caractérisée par l'ensemble $(E, \leq, \#)$ avec :

- E : l'ensemble des événements,
- \leq : la relation d'ordre sur E appelée dépendance causale,
- $\#$: la relation de conflit.

Tels que :

- Pour tout événement $e \in E$, l'ensemble d'événements $[e] = \{f \in E \mid f \leq e\}$ est clos par causalité, c'est à dire que l'ensemble $[e]$ est fini.
- Pour tout événement $d, e, f \in E$, si $d \leq e$ et $d \# f$, alors $e \# f$.

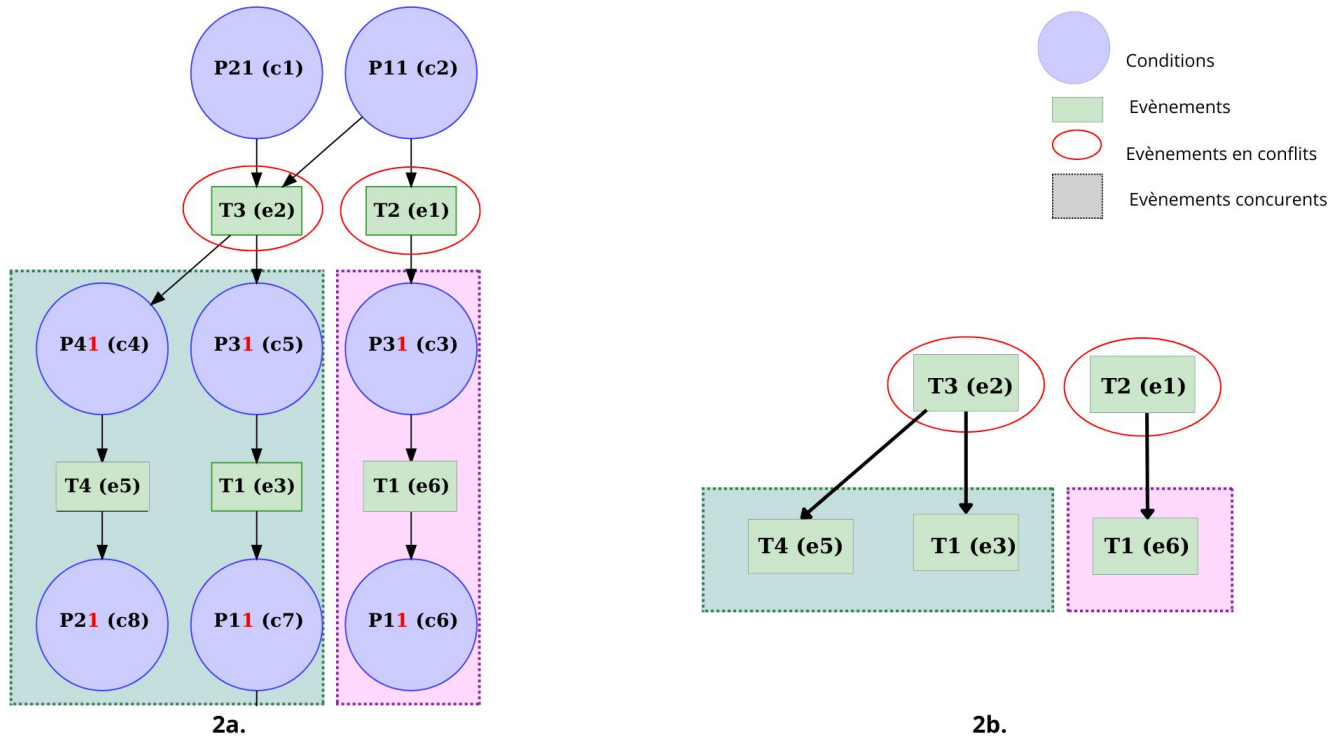


FIGURE 3. 3a. : Exemple du dépliage d'un RdP, 3b. : Structure d'événements

Le préfixe d'une structure d'événements est un sous-ensemble de l'ensemble des événements qui est clos par précédence, c'est à dire qu'avec chaque événement qui est dans le préfixe, tous ses prédecesseurs causaux doivent l'être aussi. Une configuration dans une structure d'événements est un préfixe dans lequel il n'y a pas de conflit entre les événements. De même, le préfixe et les configurations d'un réseau d'occurrence sont le préfixe et les configurations d'une structure d'événements dans lesquels les places sont représentées.

F. Présentation du cas d'étude

L'étude a pour objectif de modéliser des événements multirisques sur un territoire composé d'une forêt et de deux zones industrielles (Figure 4.) : l'une avec un pare-feu et un système de sécurité, l'autre avec un système de sécurité et un réservoir de produit chimique. Une caserne de pompier avec deux unités est située de l'autre côté de la rivière. Les unités de pompier peuvent se déplacer d'une usine à l'autre, à condition que le pont soit praticable. La rivière est équipée de digues. Ces composants sont modélisés par des variables qui, pour les besoins de la méthode, seront binaires avec les valeurs « + » et « - ». Les moyens de prévention sont un pare-feu (Wal) et deux systèmes de sécurité (Se1 et Se2) à l'intérieur des usines, appartenant respectivement aux usines 1 et 2. L'usine 1, à proximité de la forêt, peut exploser si les flammes parviennent à :

- Franchir le pare-feu,
- Mettre le système de sécurité automatique (sprinkler) hors fonctionnement (Khakzad et al., 2017).

Par ailleurs, la rivière peut être polluée si tous les événements suivants se produisent :

- Un feu se déclare en ZI 2 et les digues sont endommagées lors de l'explosion de l'usine 1,
- Le système de sécurité Se2 et les unités de pompiers ne parviennent pas à éteindre le feu.

Les deux unités de pompiers pourront intervenir sur les zones en feu, i.e. la Forêt, la ZI 1 et la ZI 2.

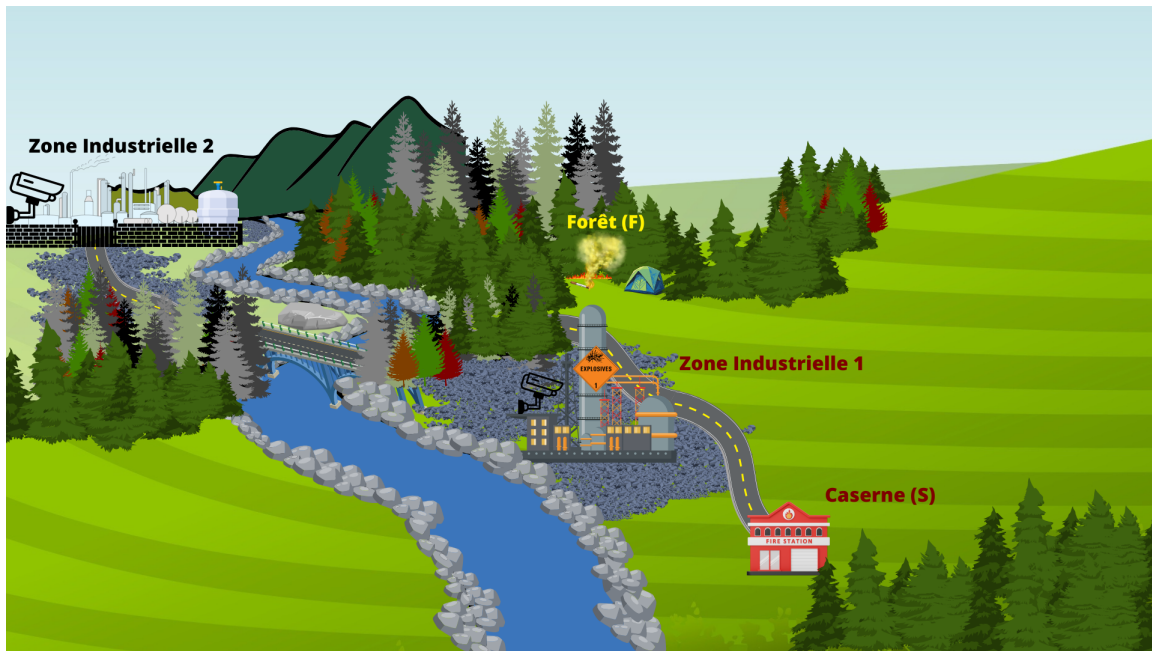


FIGURE 4. Illustration du Territoire étudié, à l'état initial

Les événements considérés dans le système se dérouleront dans une durée de quelques heures à quelques jours. Cela permet de ne pas prendre en compte la reforestation et des événements en dehors du cas d'étude. Le système est estimé stable (pas d'évolution) et l'étude pourra prendre fin lorsque les feux seront éteints sur l'ensemble du territoire. La dynamique de ce territoire sera restreinte à l'interaction entre ses composants. Pour cela, un système de règles doit être établi à partir de faits non-contestables ou provenant de la littérature (Gaucherel and Pommereau, 2019). Pour définir le système de règles, on définit une question qui reflète l'intérêt de l'étude. La question est ici : peut-on éviter la propagation du risque NaTech et l'effet Domino sur le territoire et ainsi éviter la pollution de la rivière ?

III. RÉSULTATS

A. Système de règles

Une fois le territoire défini, les composants sont traduits en variables (Tableau 1). Dans cette étude, il y a 10 composants et 18 variables. Les variables sont à valeur binaire, soit « + » pour présence, soit « - » pour absence. Pour conserver des variables binaires, certains composants qui ont plus de 2 états possibles seront représentés par plusieurs variables telles que la position de l'unité de pompiers (valeurs spatiales) : l'unité peut en effet être à la caserne (Station), dans la forêt (Forêt) ou dans les ZI 1 et ZI 2.

TABLE 1. Correspondance Composants - Variables - Marquages M_0 , M_{Pol+}

Composants	Variables	M_0	M_{Pol+}
Cigarette (aléa initial)	Cig	Cig+	Cig-
Unités de pompiers (protections)	Fi• (avec • ∈ {S2, S1, F, 1, 2})	FiS2+, FiS1+, FiF-, Fi1-, Fi2-	FiS2+, FiS1+, FiF-, Fi1-, Fi2-
Pare-feu (prévention)	Wal	Wal+	Wal-
Systèmes de sécurité (préventions)	Se1, Se2	Se1+, Se2+	Se1-, Se2-
Feux (aléas)	Bu• (avec • ∈ {F, 1, 2}) (F: Forêt; 1, 2 : ZI 1 et ZI 2)	BuF-, Bu1-, Bu2-	BuF-, Bu1-, Bu2-
Usines (enjeu, puis aléas)	Fa1, Fa2 (réservoir)	Fa1+, Fa2+	Fa1-, Fa2-
Forêt (enjeu)	For	For+	For-
Pont (enjeu)	Bri	Bri+	Bri+
Digues (prévention)	Lev	Lev+	Lev* (avec * ∈ {+, -})
Rivière (enjeu, puis aléa)	Pol	Pol-	Pol+

Un système de règles donne les interactions entre les états des variables du système (Tableau 2). Le modèle se compose de 48 règles. L'état initial du modèle est le marquage M_0 (Cig+, For+, BuF-, Bu1-, FiS1+, FiS2+, FiF-, Fi1-, Fi2-, Wal+, Se1+, Fa1+, Bu2-, Pol-, Fa2+, Se2+, Lev+, Bri+), M_0 correspond à l'état du territoire au début de la modélisation dont l'interprétation est :

- Une cigarette est allumée dans une forêt intacte à plus de 80% de sa surface,
- Le feu n'est pas actif dans la forêt ni dans les zones industrielles (ZI 1 et ZI 2),
- Les usines sont intactes et les systèmes de sécurités sont fonctionnels,
- Le pare-feu est efficace,
- Le pont et les digues sont en bon état,
- Les 2 unités de pompiers sont à la caserne.

Le système de règles complété du marquage initial permet d'obtenir le réseau de Petri du système modélisé, il compte 1029 états. Cependant, la représentation complète du préfixe devient rapidement difficile à comprendre en raison du problème d'explosion combinatoire, où le nombre de configurations possibles augmente de manière exponentielle.

Afin de rendre l'analyse plus lisible, cet article propose l'utilisation de sous-graphes pour se concentrer sur des parties spécifiques du préfixe. L'approche de la recherche d'un marquage d'intérêt permet d'extraire du préfixe tous les processus menant à un marquage particulier. Le choix de ce marquage est motivé par la question que l'on souhaite aborder. La question du cas d'étude est de comprendre comment éviter la pollution de la rivière. En effet, le risque de pollution de la rivière représente la dernière étape dans la chaîne de propagation du risque sur le territoire. Ainsi, cette question permet de couvrir plusieurs objectifs : utiliser les dépliages de réseaux de Petri pour comprendre la propagation d'un multirisque NaTech et l'effet domino sur le territoire, et identifier un levier pour éviter la pollution de la rivière.

B. Marquage d'intérêt M_{Pol+}

Dans la partie suivante de l'article, on propose de s'intéresser à la pollution de la rivière et d'analyser ses configurations.

Le marquage d'intérêt de l'étude, noté M_{Pol+} (Cig-, For+, BuF-, Bu1-, FiS1+, FiS2+, FiF-, Fi1-, Fi2-, Wal-, Se1-, Fa1-, Bu2-, Pol+, Fa2-, Se2-, Lev*, Bri+) (Tableau 1), est utilisé afin d'étudier la propagation du risque NaTech suivi d'un effet Domino, son interprétation est :

- Une cigarette est consommée dans une forêt intacte à plus de 80% de sa surface,
- Le feu n'est pas actif dans la forêt ni dans les zones industrielles (ZI 1 et ZI 2),
- Les usines sont endommagées et les systèmes de sécurités sont hors d'usage,
- Le pare-feu a été franchi,
- Le pont est en bon état,
- L'état des digues est non défini et la rivière est polluée,
- Les 2 unités de pompiers sont à la caserne.

La recherche de marquage d'intérêt M_{Pol+} permet d'étudier le risque de pollution de la rivière, qui représente le dernier risque dans notre modèle. La pollution de la rivière implique la propagation de tous les risques, y compris le risque NaTech et l'effet Domino. Pour observer une situation stabilisée, le marquage M_{Pol+} impose que les feux soient éteints et les unités de pompiers soient retournées en caserne. Le marquage M_{Pol+} permet d'étudier le risque de pollution de la rivière, qui représente le dernier risque de notre modèle.

Il est important de souligner que le choix de ce marquage ne couvre pas toutes les possibilités de pollution dans le système, car la pollution de la rivière peut survenir dans d'autres configurations non incluses dans cette étude. Cependant, M_{Pol+} représente la situation de pollution de la rivière la moins indésirable du système. Cela permet de comprendre dans les circonstances les plus favorables comment la pollution de la rivière se produit.

Ce marquage prend en compte la propagation des risques NaTech et Domino dans le système, ainsi que l'accessibilité des unités de pompiers à l'ensemble du territoire (Bri+), et également la conservation de la forêt à plus de 80% de sa surface.

Le choix de conserver la forêt intacte n'a pas de conséquence sur le reste du processus. Il s'agit d'un enjeu environnemental indépendant, qui ne génère aucun risque supplémentaire.

Le choix de maintenir le pont franchissable, dans la recherche de marquage d'intérêt, permet de visualiser les déplacements des unités de pompiers sur le territoire sans en entraver l'accessibilité.

De plus, la situation décrite par M_{Pol+} est stable, ce qui signifie que le risque d'incendie est éteint et que les unités de pompiers sont retournées à la caserne. Par conséquent, peu d'évolution est attendue à partir de ce marquage.

La variable « Lev » représentant la composante des digues est laissée indéfinie dans la recherche des configurations afin d'observer leur implication dans la propagation des risques jusqu'à la pollution de la rivière.

C. Configurations en structure d'événements menant à M_{Pol+}

La Figure 5. est la représentation graphique en structure d'événements de l'ensemble des configurations possibles dans le modèle menant à M_{Pol+} , elle compte 11 configurations. Les cut-off sont les derniers événements avant d'atteindre le marquage d'intérêt.

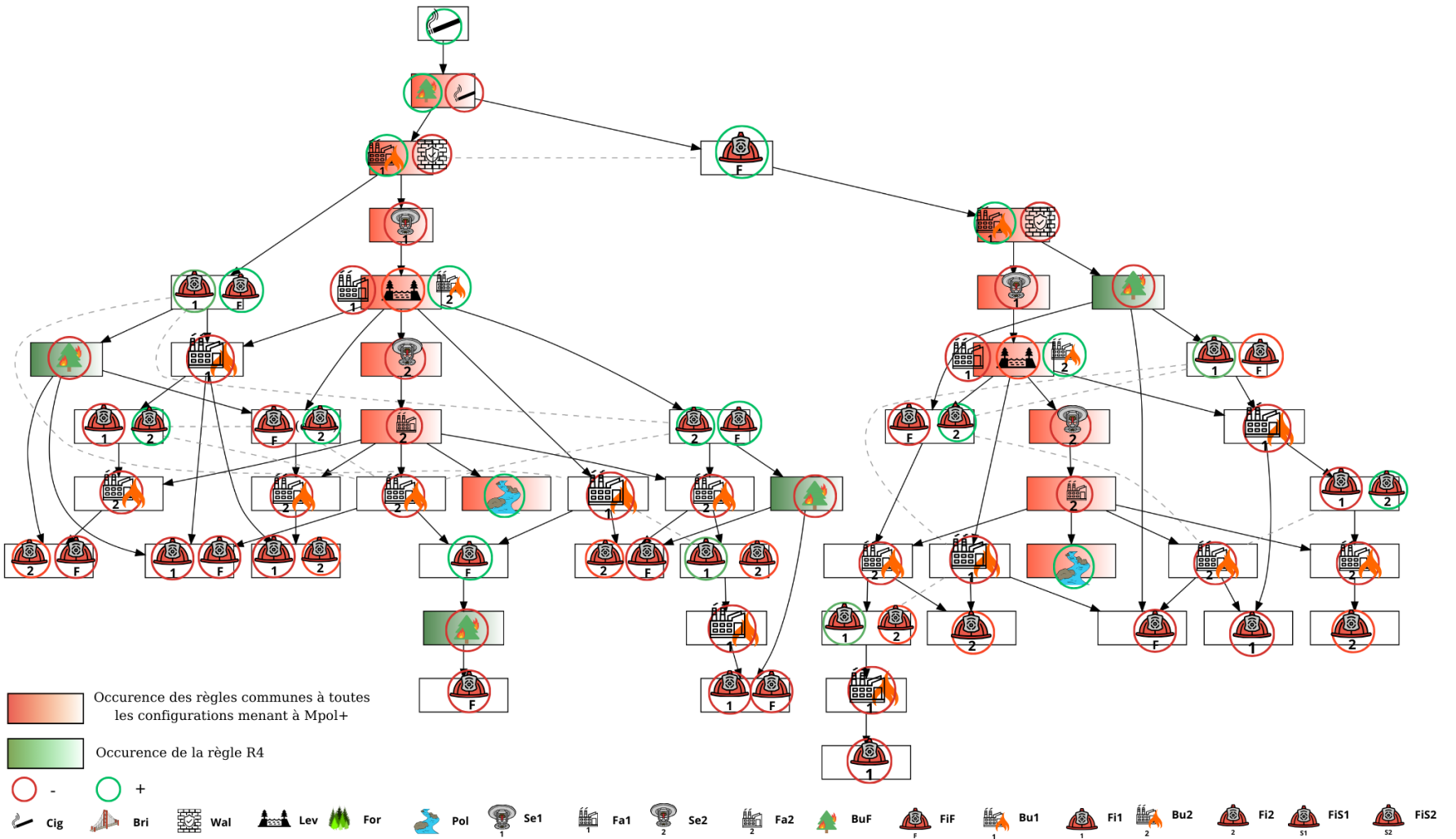


FIGURE 6. Structure d'événements formée par les configurations menant à M_{Pol+} , avec les pictogrammes inscrits dans les événements

Le choix du marquage M_{Pol+} est motivé par le fait que la pollution de la rivière n'a pas de lien direct avec l'aléa initial (la cigarette allumée) dans la modélisation du territoire. La pollution résulte de la propagation du risque NaTech sur ZI1 et de l'effet Domino sur ZI2, générant ainsi une cascade de risques. L'état de M_{Pol+} est stable, avec les feux éteints et les unités de pompiers retournées en caserne. Avant d'analyser comment réagir à un scénario où le territoire est dans sa configuration la plus défavorable, il est judicieux de se concentrer sur un cas moins critique (accessibilité à ZI2 et forêt intacte à plus de 80%) afin de mieux comprendre les dynamiques et les leviers d'action disponibles.

TABLE 2. Règles communes à toutes les configurations menant à M_{Pol+}

Règles	Interprétations
R2 : BuF-, Cig+ » BuF+, Cig-	La cigarette allumée peut mettre le feu à la forêt, et elle se consume.
R5 : Bu1-, BuF+, Wal+ » Bu1+, Wal-	Le feu de forêt peut franchir le pare-feu et mettre le feu en ZI 1.
R7 : Bu1+ » Se1-	Le feu en ZI 1 peut mettre le système de sécurité de l'usine 1 en panne.
R16 : Bu1+, Fa1+, Se1- » Bu2+, Fa1-, Lev-	Le feu en ZI 1 et le système de sécurité en panne peuvent provoquer l'explosion de l'usine 1, le départ de feu en ZI 2 et la détérioration des digues de la rivière.
R19 : Bu2+ » Se2-	Le feu en ZI 2 peut mettre le système de sécurité de l'usine 2 en panne.
R20 : Bu2+, Se2- » Fa2-	Le feu en ZI 2 et le système de sécurité de l'usine 2 peuvent causer des dommages au réservoir de produit chimique.
R25 : Fa2-, Lev- » Pol+	Les dommages au réservoir et aux digues peuvent provoquer la pollution de la rivière.
R4 : BuF+, FiF+ » BuF-	Le feu de forêt peut être éteint avec la présence de l'unité de pompiers.

Les résultats mettent en évidence des règles communes à toutes les configurations. La séquence des règles R2, R5, R7, R16, R19, R20 et R25 est commune à toutes les configurations menant au marquage M_{Pol+} . Cette séquence décrit le déroulement suivant : une cigarette allumée met le feu à la forêt et se consume. Le feu franchit le pare-feu et déclenche un incendie en zone industrielle 1, entraînant la propagation du risque NaTech. Le feu en ZI 1 menace le système de sécurité de l'usine, ce qui conduit à l'explosion de l'usine 1. Cela provoque un incendie en zone industrielle 2 et endommage les digues de la rivière. Par effet domino, le feu en ZI 2 met en panne le système de sécurité de l'usine 2, entraînant des dommages aux réservoirs. Les réservoirs défectueux, combinés aux digues endommagées, causent la pollution de la rivière. La propagation du risque NaTech puis de l'effet Domino est incluse dans les occurrences des règles communes à toutes les configurations.

L'occurrence de la règle R4 intervient systématiquement dans les configurations menant à M_{Pol+} , mais sa position varie. La règle R4 correspond à l'extinction du feu de forêt par les pompiers. Il est alors intéressant de noter que l'occurrence de R4 avant R5 n'est observée dans aucune configuration. Cela revient à l'extinction du feu de forêt avant le franchissement du pare-feu. Donc l'ordonnement des occurrences est donc déterminant dans la propagation et par la même dans la gestion d'événements multirisques. En effet, la position de l'occurrence de R4 avant R5 aurait été déterminante dans l'atteignabilité de M_{Pol+} . La condition "FiF+" est nécessaire à l'occurrence de R4, donc tant que les unités n'ont pas effectué de déplacement vers la forêt, le feu ne pourra être éteint avant sa propagation en ZI 1. Dans les configurations des Figures 7a., 7c., 7d., les déplacements des unités de pompiers n'interviennent pas avant l'occurrence de la règle R5, ainsi les pompiers interviennent après la propagation du feu dans la ZI 1. L'extinction du feu de forêt n'empêchera donc pas la pollution de la rivière. La rapidité d'intervention des pompiers est en autre un levier de la gestion de la propagation du feu de forêt dans ZI 1.

Dans la Figure 7b. l'intervention des unités de pompiers interviennent avant le franchissement du feu de

forêt l'activation de R4 est alors possible. Pourtant, l'occurrence de R5 avant R4 montre la situation dans laquelle malgré la présence des unités de pompiers, ceux-ci n'ont pas pu empêcher le feu de traverser le pare-feu. Ces configurations révèlent l'importance de l'efficacité des pompiers et de l'évaluation de la situation pour contrôler un feu de forêt.

La représentation exhaustive des configurations menant à M_{Pol+} a mis en évidence le comportement du système dans la recherche de marquage d'intérêt. La propagation des événements multirisques a été révélée dans les configurations sous la forme d'une séquence d'occurrences commune à toutes les configurations. Les leviers ont été recherchés dans le comportement des occurrences et l'importance de la chronologie des événements a été démontrée. Certains événements peuvent être déterminants selon leur position dans la configuration. Plus précisément, la position de l'occurrence d'une règle déterminante peut être interprétée comme la conséquence de la gestion du risque : la rapidité d'intervention ou l'efficacité des moyens mis à disposition. Par conséquent, l'évaluation de la situation et les moyens d'interventions adaptés peuvent être les leviers de la gestion multirisque.

L'approche possibiliste et à événements discrets fournit une surapproximation des comportements possibles. Certaines configurations représentées dans le modèle peuvent ne jamais se manifester dans un cas d'étude réel, faute de conditions de réalisation suffisantes. L'adaptation de cette approche à un contexte réel nécessite donc un affinage du modèle, afin de mieux refléter les contraintes spécifiques du terrain. La validation des configurations du modèle pourra être réalisée au travers de cas réels d'accident.

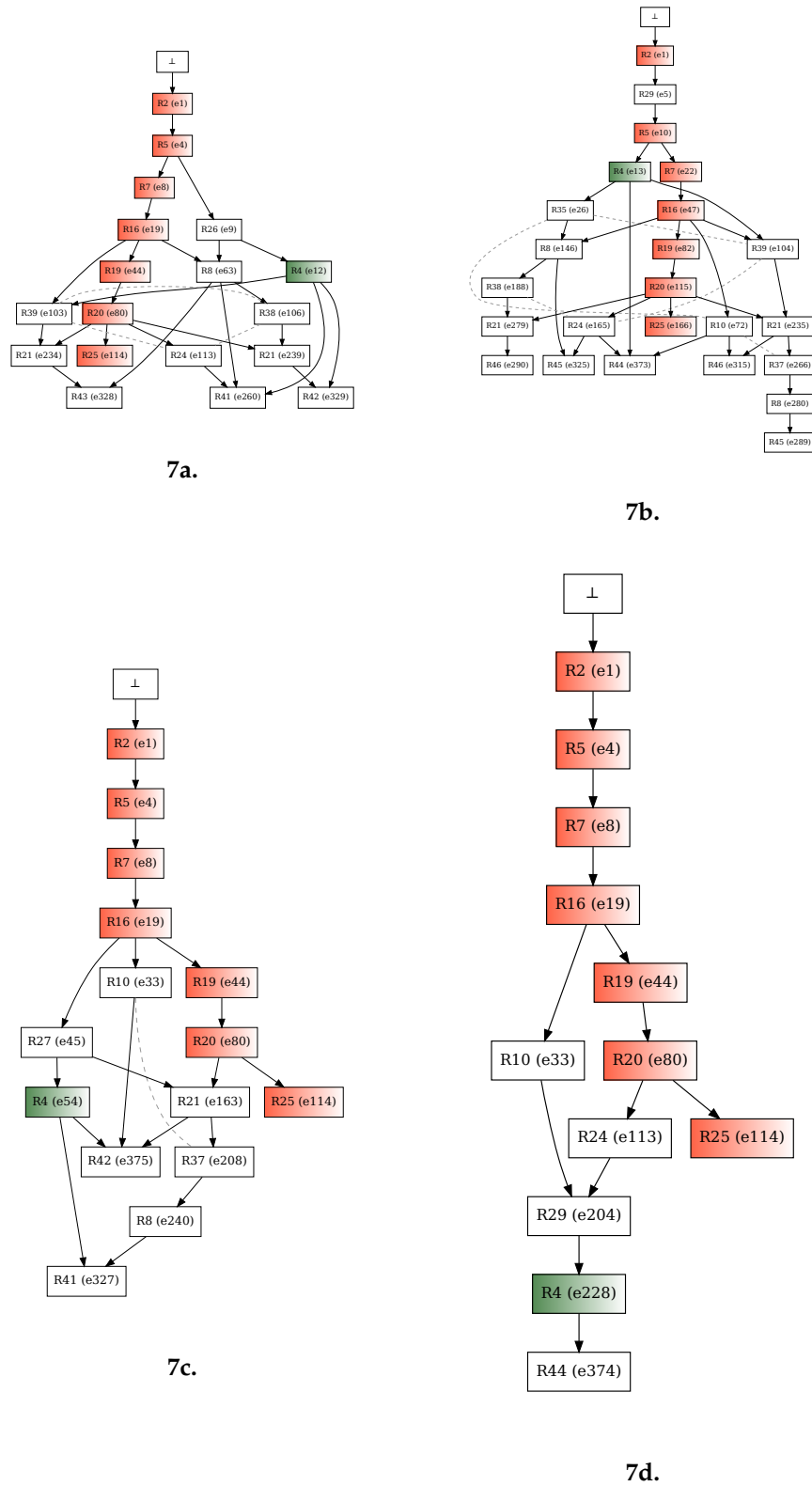


FIGURE 7. Graphes des configurations possibles menant à M_{Pol+} selon la position de l'occurrence de R4.
 (Les occurrences des règles communes à toutes les configurations sont colorées, en rouge pour celles avec un ordonnancement unique et en vert pour R4 (extinction du feu de forêt par les unités de pompiers)).

IV. CONCLUSION

Dans cette communication, nous avons modélisé la propagation d'un événement NaTech, suivi d'un effet Domino, sur un territoire. Tout d'abord, les fichiers RR de règles ont facilité la transformation des informations relatives aux relations entre les composants du territoire en une méthode formelle et accessible. Ensuite, l'utilisation des réseaux de Petri a permis de formaliser ce territoire et de générer des événements causaux, en concurrence et en conflit. Puis, le dépliage des réseaux de Petri a fourni une représentation graphique, sous forme de préfixe, de l'ensemble des processus possibles. Cette approche permet, par exemple, l'exploitation de ces graphes lors de la recherche de marquages d'intérêt.

Parmi les résultats, nous obtenons une vue complète de toutes les configurations possibles (dans les limites de la conception du modèle). Par exemple, les résultats montrent une configuration dans laquelle les unités de pompiers interviennent en 8ème position, permettant à la plupart des risques de se propager sans leur intervention. Bien que ce phénomène soit rare, il peut survenir lorsque les unités de pompiers rencontrent des problèmes d'accessibilité. Cela met en évidence la manière dont le modèle représente de manière équivalente les phénomènes rares et courants.

Lors de la recherche des configurations d'un marquage d'intérêt, certaines variables peuvent être laissées indéterminées, ce qui permet de révéler les informations contenues dans le modèle. Dans cet article, la variable des digues, « Lev », a été laissée non définie, ce qui a permis de constater que cette variable prend systématiquement la valeur Lev- avant la pollution de la rivière. Cette observation indique que la dégradation des digues est nécessaire pour atteindre M_{Pol+} . Toutefois, cela ne signifie pas que cette dégradation est directement liée à la pollution, en effet, cela peut impliquer d'autres variables du marquage M_{Pol+} . Toutefois, au regard des connaissances du modèle, cette observation met bien en évidence le rôle protecteur des digues contre la propagation du risque de pollution.

Enfin, en observant les règles spécifiques à toutes les configurations menant à M_{Pol+} , certains comportements ont été identifiés. Certaines règles sont présentes dans toutes les configurations, ce qui montre que ces règles sont essentielles à l'atteignabilité du marquage d'intérêt. Parmi ces règles, certaines suivent une hiérarchie précise, tandis que d'autres offrent différentes possibilités de réalisation.

Une progression dans la généralisation de l'analyse des résultats serait intéressante pour rendre l'étude indépendante des connaissances liées à la conception du modèle. Cela permettrait de développer une méthode dans laquelle les spécialistes (de différentes études et spécialités) et les concepteurs pourraient partager et confronter leurs analyses des résultats. Enfin, une adaptation du modèle à des terrains plus spécifiques, comme dans certaines études de réseaux temporels, permettrait de récupérer des informations plus adaptées à un cas réel. Enfin, adapter le modèle à des contextes plus spécifiques, comme dans certaines études de réseaux temporels, permettrait de recueillir des informations mieux adaptées à des situations réelles. Une telle approche pourrait ainsi compléter les outils d'aide à la décision utilisés dans l'élaboration des plans d'aménagement du territoire.

References

Aguirre-Sambon, G. K. (2023), Reset Petri Net Unfolding Semantics for Ecosystem Hypergraphs, in 'PNSE 2023 - International Workshop on Petri Nets and Software Engineering'.

URL: <https://univ-evry.hal.science/hal-03750233>

Aguirre-Samboní, G. K., Haar, S., Paulevé, L., Schwoon, S. & Würdemann, N. (2022), 'Avoid One's Doom: Finding Cliff-Edge Configurations in Petri Nets', *Electronic Proceedings in Theoretical Computer Science*

370, 178–193. arXiv:2209.10323 [cs].

URL: <http://arxiv.org/abs/2209.10323>

AR6 Synthesis Report: Climate Change (2023).

URL: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>

Cadre d'action de Sendai pour la réduction des risques de catastrophe 2015 - 2030 (2015).

Chahrour, N., Tacnet, J.-M. & Berenguer, C. (2021), Cascade Effect Analysis in Torrential Context for Prioritizing Check Dams Maintenance Strategies, in '67TH ANNUAL RELIABILITY & MAINTAINABILITY SYMPOSIUM (RAMS 2021)', Reliability and Maintainability Symposium. ISSN: 0149-144X.

Cosme, M. & al. (2023), 'Risk assessment and recovery trajectories of a social-ecological system with a discrete-event model after a volcanic eruption', *INTERNATIONAL JOURNAL OF DISASTER RISK REDUCTION* **92**.

Cosme, M., Bernardoff, O., Hély, C., Tiberi, C., Parat, F., Gautier, S., Treydte, A., Colombo, G., Ceppi, S., Pommereau, F. & Gaucherel, C. (2023), 'Risk assessment and recovery trajectories of a social-ecological system with a discrete-event model after a volcanic eruption', *International Journal of Disaster Risk Reduction* **92**, 103741.

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420923002212>

Curt, C. (2021), 'Multirisk: What trends in recent works? - A bibliometric analysis', *The Science of the Total Environment* **763**, 142951.

Dueñas Santana, J. A., Orozco, J. L., Febles Lantigua, D., Furka, D., Furka, S. & García Cruz, A. (2021), 'Using integrated Bayesian-Petri Net method for individual impact assessment of domino effect accidents', *Journal of Cleaner Production* **294**, 126236.

URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965262100456X>

Esparza, J., Römer, S. & Vogler, W. (1996), An improvement of McMillan's unfolding algorithm, in G. Goos, J. Hartmanis, J. Leeuwen, T. Margaria & B. Steffen, eds, 'Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems', Vol. 1055, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 87–106. Series Title: Lecture Notes in Computer Science.

URL: http://link.springer.com/10.1007/3-540-61042-1_40

Gaucherel, C. & Pommereau, F. (2019), 'Using discrete systems to exhaustively characterize the dynamics of an integrated ecosystem', *Methods in Ecology and Evolution* **10**(9), 1615–1627.

URL: <https://besjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/2041-210X.13242>

Guo, L. & Wang, Z. (2023), 'Analysis of uncertainty propagation path of fire-induced domino effect based on an approach of layered fuzzy Petri nets', *Chemical Engineering Science* **268**, 118410.

URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0009250922009952>

Kamil, M. Z., Taleb-Berrouane, M., Khan, F. & Ahmed, S. (2019), 'Dynamic domino effect risk assessment using Petri-nets', *Process Safety and Environmental Protection* **124**, 308–316.

URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582018313284>

- Li, P., Wang, T. & Qie, Z. (2024), 'Collaborative Relationship Modeling and Analysis of Natech Emergency Response Organizations Based on Stochastic Petri Net', *Natural Hazards Review* **25**(2), 04024009.
URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/NHREFO.NHENG-1920>
- McMillan, K. L. (1993), Using unfoldings to avoid the state explosion problem in the verification of asynchronous circuits, in 'Computer Aided Verification: Fourth International Workshop, CAV'92 Montreal, Canada, June 29–July 1, 1992 Proceedings 4', Springer, pp. 164–177.
- Murata, T. (1989), 'Petri nets: Properties, analysis and applications', *Proceedings of the IEEE* **77**(4), 541–580.
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/24143/>
- Pommereau, F., Thomas, C. & Gaucherel, C. (2022), Petri Nets Semantics of Reaction Rules (RR): A Language for Ecosystems Modelling, in L. Bernardinello & L. Petrucci, eds, 'Application and Theory of Petri Nets and Concurrency', Vol. 13288, Springer International Publishing, Cham, pp. 175–194. Series Title: Lecture Notes in Computer Science.
URL: https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-06653-5_10
- United Nations Department of Public Information (1993), *Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development, Rio Declaration on Environment and Development, Statement of Forest Principles: The Final Text of Agreements Negotiated by Governments at the United Nations Conference on Environment and Development (UNCED), 3-14 June 1992, Rio de Janeiro, Brazil*, United Nations, New York. On cover: Earth Summit, Agenda 21, the United Nations programme of action from Rio.
- Zhou, J. & Reniers, G. (2017a), 'Analysis of emergency response actions for preventing fire-induced domino effects based on an approach of reversed fuzzy Petri-net', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **47**, 169–173.
URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950423016304764>
- Zhou, J. & Reniers, G. (2017b), 'Petri-net based cascading effect analysis of vapor cloud explosions', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **48**, 118–125.
URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950423017302413>
- Zhou, J. & Reniers, G. (2018), 'Petri-net based evaluation of emergency response actions for preventing domino effects triggered by fire', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **51**, 94–101.
URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950423017309361>
- Zhou, J. & Reniers, G. (2021), 'Petri net simulation of multi-department emergency response to avert domino effects in chemical industry accidents', *Process Safety and Environmental Protection* **146**, 916–926.
URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582020319236>