

Analyse comparative d'outils de modélisation d'effets domino

Comparative analysis of domino effect modeling tools

MORADMAND-NIA Niki
Laboratoire de Génie Chimique
Toulouse
niki.moradmandnia@toulouse-inp.fr

OLIVIER-MAGET Nelly
Laboratoire de Génie Chimique
Toulouse
nelly.olivier@ensiacet.fr

PRATS Franck
INERIS
Verneuil-en-Halatte
franck.prats@ineris.fr

1 **Résumé** — Les effets domino désignent des chaînes d'accidents à faible fréquence ayant des conséquences dévastatrices. Modéliser et
2 évaluer leur sécurité représente un défi considérable en raison de leur rareté, de leur complexité et du manque de données disponibles.
3 Différentes approches de modélisation existent, mais aucune n'est largement reconnue. Le choix de la méthode dépend du contexte et des
4 résultats attendus. Les méthodes graphiques sont toutefois prometteuses car elles sont visuelles et peuvent inclure des aspects temporels,
5 probabilistes et dynamiques. Ces travaux visent dans un premier temps à réaliser une étude comparative de ces méthodes afin de tirer les
6 avantages et inconvénients de chacune. L'utilisation conjointe de différentes méthodes pourra alors être mise en exergue afin de combiner au
7 mieux leurs avantages.

8 **Mots-clefs** — effets domino, analyse des risques, réseaux, simulation

9 **Abstract** — Domino effects are low-frequency accident chains with devastating consequences. Modeling and assessing their safety
10 represent a considerable challenge, due to their rarity, complexity and lack of available data. Various modeling approaches exist, but none is
11 widely accepted. The choice of method depends on the context and the expected results. However, graphical methods are promising, as they
12 are visual and can include temporal, probabilistic and dynamic aspects. The initial aim of this work is to carry out a comparative study of
13 these methods in order to identify the advantages and disadvantages of each. The joint use of different methods can then be highlighted in
14 order to best combine their advantages.

15 **Keywords** — domino effect, risk assessment, network, simulation

16 I. INTRODUCTION

17 Un effet domino, dans le contexte des accidents industriels, est une séquence d'événements accidentels où un premier incident
18 en déclenche d'autres de manière consécutive. Bien que rares, les accidents avec effets dominos peuvent avoir des conséquences
19 catastrophiques. Cette propagation peut se produire par différents mécanismes, tels que des explosions, des incendies, des fuites
20 de substances dangereuses, etc. Elle implique le déclenchement d'une série d'accidents secondaires dans des installations
21 voisines, aggravant considérablement les conséquences de l'incident initial. La catastrophe de la raffinerie de Feyzin (France) en
22 1966 ou l'accident du port de Tianjin (Chine) en 2015 en sont des parfaits exemples (BARPI, 2006, 2017).

23 Prévoir ces effets dominos est donc un enjeu pour la protection des biens et des personnes et permettre en cas d'accidents
24 une réponse adaptée à la gestion de crise. En France, la directive Européenne SEVESO III est notamment transposée par l'arrêté
25 du 26 mai 2014. Cet arrêté indique la démarche à suivre pour les exploitants concernant le stockage de matières dangereuses,
26 l'établissement d'un plan d'opération interne (POI) et la constitution d'une étude de danger. L'exploitant doit *a minima* fournir
27 « la description sommaire de l'environnement immédiat du site, en particulier les éléments susceptibles d'être à l'origine ou
28 d'aggraver un accident majeur par **effet domino**, ainsi que les informations disponibles sur les sites industriels et établissements
29 voisins, zones et aménagements pouvant être impliqués dans de tels **effets domino** » (Arrêté du 26 mai, 2014). De fait, l'étude
30 des effets dominos est obligatoire mais reste traitée de façon sommaire et peut n'être détaillée que dans certains cas spécifiques.
31 Il est donc crucial de développer des outils de modélisation afin d'aider les industriels dans cette prise en compte. La modélisation
32 des effets dominos représente cependant un défi majeur pour plusieurs raisons : (i) le manque de données issues du retour
33 d'expérience qui rend difficile l'élaboration de modèles statistiques par l'absence, l'incomplétude ou l'imprécision de
34 l'information, (ii) la complexité des phénomènes et interactions mis en jeu entre les différents éléments d'une zone industrielle
35 (équipements, environnement...) qui sont souvent non linéaires et difficile à prendre en compte.

36 On trouve dans la littérature de nombreuses méthodes permettant la modélisation des effets dominos (Reniers & Cozzani,
 37 2013). Cependant, la littérature comparative de ces méthodes est peu, voire pas, existante (Weber et al., 2012). Souvent, les
 38 chercheurs appliquent leur méthode nouvellement développée à des cas d'étude théoriques, ou à une nouvelle situation n'ayant
 39 pas encore fait l'objet d'étude. L'objectif de cet article est de comparer différentes méthodes de modélisation des effets dominos
 40 dans les accidents industriels. Cette analyse permettra de déterminer les avantages et les inconvénients de chaque méthode et
 41 d'identifier les meilleures pratiques pour la prévention et la gestion de ce type de risque. Dans une première partie, nous réalisons
 42 un état de l'art. Nous définissons les concepts d'effets dominos et d'effets cascades puis présentons les différentes méthodes pour
 43 modéliser les effets dominos. Le cas d'études utilisé est exposé. La méthodologie pour réaliser une comparaison de ces méthodes
 44 est présentée. Les premiers résultats obtenus sont dévoilés. Des conclusions et perspectives de ces travaux sont enfin énoncés.

45 II. ÉTAT DE L'ART

46 A. Effets Domino et cascades

47 Il existe de nombreuses définitions du concept d'effet domino établies au cours de décennies de travail, qui sont regroupées
 48 et discutées notamment par Alileche (2015) et Reniers & Cozzani (2013). Les effets domino décrivent : « une séquence
 49 d'accidents (...) dans laquelle un accident primaire, généralement un incendie ou une explosion, déclenche d'autres accidents
 50 avec une escalade globale des conséquences de l'événement » (Li et al., 2017). Dans cette définition, il est important de préciser
 51 que la propagation depuis l'accident primaire doit être physique : soit thermique (incendie, feu), soit de surpression (explosion),
 52 soit de missiles (fragments projetés à forte vitesse). En effet, dans une étude sur les effets domino, les effets toxiques sont
 53 rarement pris en compte comme événement primaire car ils ne peuvent pas directement provoquer de dégâts sur une autre
 54 structure. Les conséquences d'effets toxiques sont possiblement humaines et s'ils sont vecteur d'aggravation, les notions d'effets
 55 domino *indirects* ou d'*effets cascades* sont privilégiées (Chen et al., 2020; Reniers & Cozzani, 2013).

56 Bien que souvent utilisés indistinctement (Balouin et al., 2015; Kadri et al., 2011; Khan & Abbasi, 1998; Laurent, 2019), les
 57 effets dominos sont à dissocier des effets cascades. En effet, le terme de cascade est à utiliser lorsque la propagation est non
 58 dimensionnelle, immatérielle : elle se fait de manière fonctionnelle plutôt que physique et l'origine de la perturbation est
 59 nécessairement externe au lieu de survenue de l'accident. Des situations telles que le chaos engendré par une perte des
 60 communications, un glissement de terrain qui entrave le déploiement des équipes d'interventions, une perte de la salle de contrôle
 61 ou son évacuation à cause de rejets toxique, ou encore une perte des systèmes de sécurité suite à une coupure d'électricité, sont
 62 des exemples d'effets cascade (Carre et al., 2017; Pescaroli & Alexander, 2015).

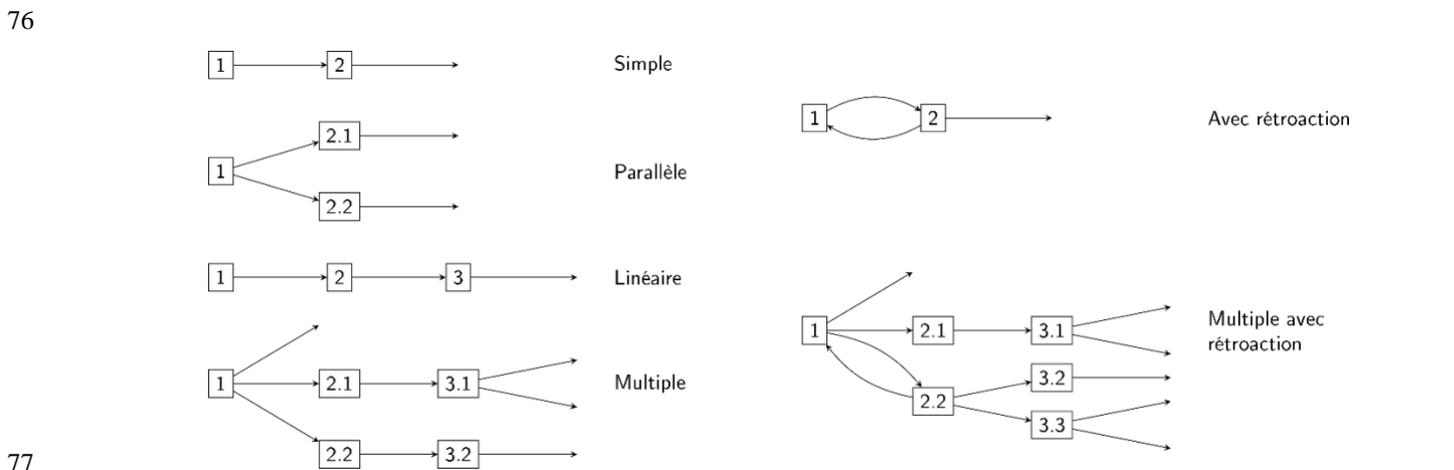
63 La Fig. 1 illustre les différents modes de propagation d'événements dans une situation d'effets dominos. D'un point de vue
 64 élémentaire la propagation peut être :

- 65 • simple ou en série, un événement primaire ne déclenche qu'un événement secondaire;
- 66 • en parallèle un événement primaire déclenche plusieurs événements secondaires.

67 La propagation peut aussi être une composition de ces briques élémentaires, cette propagation à plusieurs niveaux peut être :

- 68 • en chaîne ou linéaire, une succession de propagations simples;
- 69 • multiple, une combinaison de propagations simple et en parallèle.

70 Il existe un cas particulier de propagation, celui où un événement agit sur un événement d'ordre inférieur : une rétroaction
 71 qui aggrave l'événement initiateur et peut déclencher des événements supplémentaires. Si dans une propagation multiple on
 72 retrouve une boucle de rétroaction, la situation devient extrêmement difficile à gérer car il se forme un cercle vicieux où les deux
 73 événements s'alimentent et peuvent créer de nouvelles escalades. Ce qui est représenté en Fig. 1 avec l'événement 3.3 qui résulte
 74 de cette synergie. Afin de simplifier le problème, le cas d'une modification des effets d'un événement primaire par la présence
 75 simultanée d'autre scénarios n'est souvent pas pris en compte (Necci et al., 2015).



78 Fig. 1. Schéma des différents types de propagation d'un effet domino, d'après (Laurent, 2019; Reniers & Cozzani, 2013).

79 B. Différents modèles

80 Les effets domino constituent un sujet d'intérêt pour la communauté de la chimie industrielle. L'étude bibliométrique de Li
81 et al. (2017), montre effectivement une tendance à la hausse des publications scientifiques concernant les effets domino en chimie
82 durant les dernières décennies. L'analyse exhaustive de la littérature faite par Chen et al. (2020) recense 132 articles; desquels
83 deux sujets de recherches se dégagent : la modélisation des effets domino d'une part (76 articles) et leur gestion d'autre part (56
84 articles).

85 Bien que moins de dix pays concentrent la majorité des recherches sur le sujet des effets domino, les recherches se font de
86 manière assez indépendante. Les méthodes développées ou choisies par les chercheurs dépendent du contexte d'application et
87 des résultats attendus. De ce fait, chaque groupe de chercheurs s'intéresse à une facette de la propagation d'un accident sans
88 qu'une méthodologie ne se démarque des autres et ne fasse consensus (Li et al., 2017; Necci et al., 2015). Cette approche plutôt
89 individualisée de la recherche a des limites, notamment lorsqu'il s'agit de comparer les modèles développés.

90 Parmi les différents travaux en matière d'évaluation des risques et de modélisation de l'évolution pour les effets domino, les
91 méthodes graphiques sont particulièrement attrayantes car plus visuelles et pouvant inclure des aspects analytiques ou
92 probabilistes ; l'aspect temporel ou dynamique des phénomènes peut aussi être pris en compte (Chen et al., 2020).

93 Les réseaux bayésiens (RB), les réseaux de Petri (RP) et les processus de Markov (PM) suscitent une attention croissante
94 de la part des chercheurs.

95 1) Réseaux Bayésiens

96 Le RB est un modèle probabiliste qui représente les relations de dépendance entre différentes variables aléatoires dans un
97 graphe acyclique dirigé. Fig. 2 (a) est un exemple de réseau très simple. Chaque nœud peut avoir plusieurs états qui
98 caractérisent l'installation i . Elle peut, par exemple, être dans un état normal $Si1$ ou dans un état endommagé $Si2$, et ce sont les
99 états des nœuds parents qui détermineront les probabilités de propagation. Une table de probabilité conditionnelle est annexée
100 à chaque nœud pour calculer les probabilités. Les RB sont particulièrement sollicités pour leur flexibilité, leur prise en compte
101 des incertitudes et leur possibilité de mise à jour des probabilités. En effet, à l'aide du théorème de Bayes, les probabilités
102 peuvent être actualisées aisément en considérant une évolution des observations. Ainsi est-il possible de détecter les causes et
103 les conséquences les plus probables (Khakzad et al., 2011, 2013; Weber et al., 2012).

104 Initialement, les réseaux bayésiens ne sont pas en mesure de traiter les probabilités dépendant du temps, mais les réseaux
105 bayésiens dynamiques sont une version améliorée qui peut calculer l'escalade temporelle en plus de l'escalade spatiale
106 (Khakzad, 2015).



107
108 Fig. 2. (a) Réseau bayésien élémentaire (b) Réseau de Pétri élémentaire.

109 2) Réseaux de Pétri

110 Dans les RP, les transitions sont un nouveau type d'élément présent sur le graphe. Représentées par un rectangle et placées
111 entre les nœuds, elles matérialisent les conditions nécessaires à l'évolution de la situation. Une transition peut être déterministe,
112 probabiliste ou aléatoire. Faire figurer les transitions facilite la compréhension du système et permet de voir rapidement
113 comment les composants du système interagissent (Murata, 1989). Sur la Fig. 2 (b), deux nœuds p1 et p2, qui représentent deux
114 états ou deux objets, sont reliés par une transition t1. Le point noir dans le cercle traduit la situation actuelle, l'état du système;
115 il s'agit d'un jeton (*token*), qui signale ici, comme il est en amont de t1, que la transition de p1 vers p2 est possible. Si la
116 condition à la transition est atteinte, alors la transition est franchie et entraîne le marquage de la place aval, ici p2. Généralement,
117 le franchissement d'une transition détruit le jeton de la place amont mais dans certaines conditions d'utilisation des RP, il peut
118 être conservé (Zhou & Reniers, 2017).

119 Pour les RP, l'estimation des scénarios et la quantification du cas le plus probable sont nécessairement réalisées à l'aide de
120 simulations, par exemple des simulations de Monte-Carlo (Weber et al., 2012).

121 3) Processus de Markov

122 Les processus de Markov sont des processus stochastiques où la probabilité future dépend uniquement de l'état présent et non
123 de l'historique complet (Cox, 2017). Elles sont largement utilisées pour modéliser des systèmes dynamiques avec des transitions
124 probabilistes entre différents états. Par ailleurs, les Processus Markoviens Déterministes par Morceaux (PDMP) sont une classe
125 spécifique de processus de Markov qui combine les éléments déterministes et stochastiques du modèle de Markov. Ils associent
126 des sauts aléatoires à des instants donnés avec une évolution déterministe régie par une équation entre ces instants (Fearnhead et
127 al., 2018). Les propriétés physiques peuvent être représentées par la partie déterministe du processus, tandis que les incertitudes
128 peuvent être représentées par la partie stochastique. Ainsi, cette dualité rend les PDMP adaptés à l'évaluation des risques.

129 C. Comparaison théorique de ces modèles

130 Il convient maintenant de comparer succinctement et théoriquement ces méthodes que nous venons de décrire.

131 Les réseaux bayésiens représentent les probabilités d'occurrence des événements et de leurs interactions (probabilité
 132 conditionnelle). Grâce au développement des réseaux bayésiens dynamiques, ils permettent également de représenter les
 133 dépendances temporelles dans l'enchaînement des événements. Les réseaux bayésiens couvrent l'ensemble des possibilités des
 134 enchaînements des événements et permettent ainsi de souligner les enchaînements critiques. Néanmoins leurs mises en œuvre
 135 nécessitent une expertise probabiliste et l'élaboration du réseau peut s'avérer complexe. En effet dans le cas des effets dominos,
 136 il n'existe pas ou peu de données : il n'est donc pas possible de faire évoluer automatiquement les réseaux et d'ainsi compléter
 137 le modèle comme c'est le cas pour d'autres domaines. Dans notre cas d'application, il est nécessaire d'avoir prévu l'ensemble
 138 des possibles enchaînements d'événements.

139 Les réseaux de Petri modélisent les états du système (comportement dynamique) et simulent ainsi la propagation des
 140 événements. Ils permettent la simulation du déclenchement simultané des événements. La représentation visuelle est intuitive et
 141 la modélisation relativement facile. Il est toutefois nécessaire de modéliser différentes configurations afin de modéliser
 142 l'ensemble des possibles. En effet, il y a un risque d'explosion combinatoire si la destruction et la création de jetons sont mal
 143 paramétrées.

144 Les processus de Markov simulent l'évolution probabiliste d'un système en fonction de son état initial. Il représente les
 145 processus séquentiels mais la représentation sous chaîne de Markov est plus délicate lors d'interactions complexes. L'évolution
 146 du système dans le temps peut être représentée.

147 TABLE I. COMPARAISON DE MODELES MATHÉMATIQUES APPLIQUES A L'ANALYSE D'EFFETS DOMINO

| Critères | Modèles | | |
|---|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| | Réseaux bayésiens | Réseaux de Pétri | Processus de Markov |
| Visualisations des états | Oui | Oui | Non |
| Réalisme de la propagation | Uniquement probabiliste | Très réaliste car hybride | Très réaliste car hybride |
| Gestion de l'incertitude ou de l'inconnu | Partielle | Partielle | Totale |
| Quantité de simulations nécessaire | Unique | Importante (Monte Carlo) | Importante (Monte Carlo) |
| Ressource informatique nécessaire | Faible | Dépendante du nombre de simulations | Dépendante du nombre de simulations |
| Nombre d'états | Fixé | Explosion combinatoire possible | Explosion combinatoire possible |
| Prise en compte d'éléments d'observation | Oui | Non | Non |
| Capacité à représenter les interactions complexes | Oui | Oui | Oui |
| Difficulté d'utilisation et de modélisation | Assez aisée | Intermédiaire | Assez complexe |

148
 149 0 répertorie l'ensemble des avantages et inconvénients de chaque méthode. Il est à noter qu'aucune méthode ne semble avoir
 150 uniquement des avantages. Le développement de nouvelles méthodes et outils hybrides (couplage de méthodes) est un domaine
 151 de recherche prometteur pour la modélisation des effets dominos. Cette analyse reste une comparaison générale des méthodes.
 152 Un examen plus approfondi est nécessaire pour comparer leur performance sur des cas d'études spécifiques. Cette étude fait
 153 l'objet de la suite de ces travaux.

154 III. METHODOLOGIE

155 Dans le cadre de cette étude, le choix des méthodes se restreint aux réseau bayésien dynamique, réseau de pétri et processus
 156 markovien déterministe par morceau, dont l'intérêt vient d'être exposé. Afin de les comparer, il convient d'établir un cas d'étude
 157 et des critères de comparaisons précis.

158 A. Cas d'étude

159 La situation à modéliser est représentée en Fig. 3 et est inspiré de l'étude faite par Khakzad et Khan dans le chapitre 3 du
 160 livre de Cozzani & Reniers (2021). Cinq réservoirs à toit fixe, identiques sont alignés et équidistants. Ils contiennent un même
 161 composé liquide, inflammable. Si l'un des réservoirs s'enflamme sans rompre, la chaleur affecte les réservoirs directement
 162 adjacents et peut les enflammer. La chaleur émise est considérée constante, uniforme. Les réservoirs ont un seuil de résistance à
 163 la chaleur, considéré lui aussi constant et uniforme. Les conditions de propagation sont déterminées par une relation dose-réponse
 164 relativement primaire. Les réservoirs n'ont que deux états : en feu ou non ; ils ont donc soit le rôle d'agresseur, soit celui
 165 d'agressé.

166 La probabilité de propagation du feu du réservoir i au réservoir j est donnée par ci-dessous.

167

$$P = 1 - \frac{Q_T}{Q_{ij}} \quad (1)$$

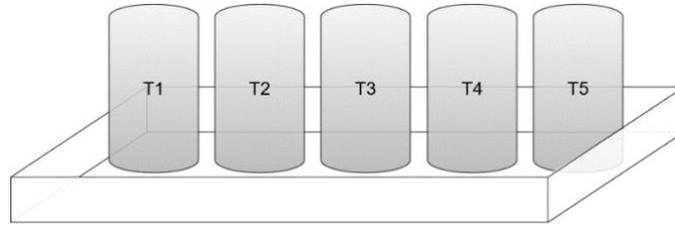
168

Avec Q_T le seuil de résistance thermique du réservoir j et Q_{ij} la chaleur émise du réservoir j vers le réservoir i .

169

La modélisation est discrétisée avec à l'instant initial une probabilité d'inflammation spontanée des réservoirs. Cette inflammation spontanée traduit l'accumulation sur le temps long d'un risque de défaillance du système. Fixée ici à 10%, elle n'est pas prise en compte par la suite dans la probabilité de propagation car le pas de temps est réduit de plusieurs ordres de grandeurs. Fig. 4 est une représentation schématique de la situation.

173



174

175

Fig. 3. Etude de cas avec 5 réservoirs, équidistants, placés dans un bac de rétention, pouvant interagir avec les réservoirs directement adjacents.

176

177

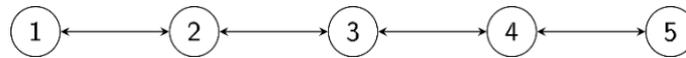


Fig. 4. Représentation schématique de l'étude de cas où cinq réservoirs sont alignés et peuvent interagir avec leur plus proche voisin.

178

B. Critères de comparaison

179

Afin de comparer les méthodes, il est important de définir des critères de comparaison. Ceux-ci peuvent être divisés en trois grandes catégories : ceux qui concernent les données d'entrée, ceux qui concernent le modèle lui-même et ceux qui concernent les données de sortie.

182

Les données d'entrée ne sont pas toujours accessibles et certaines informations peuvent être inconnues ou incertaines. L'exhaustivité et la précision des données d'entrée nécessaires au fonctionnement du modèle peuvent être limitées. Certains modèles attendent toutes les données pour fonctionner, tandis que d'autres peuvent gérer ce facteur d'incertitude.

185

L'accessibilité de l'outil est un autre point à prendre en compte. Le temps nécessaire à un nouvel utilisateur pour prendre en main et maîtriser l'outil est important pour une diffusion étendue du modèle au sein des entreprises. Même pour un utilisateur aguerri, une méthode permettant une modélisation plus rapide est préférable. Outre la maniabilité pour l'utilisateur, la capacité de ce dernier à accéder aux équations et à modifier la méthode elle-même doit aussi être étudiée, qu'il s'agisse de mettre à jour une étape pour la rendre plus précise ou d'ajouter de nouvelles options.

190

La sensibilité est un autre indicateur à considérer. Il s'agit de la capacité de la méthode à produire des scénarios les moins probables avec des conséquences importantes. Certains modèles pourraient juger inutile de mentionner des séries d'événements inconcevables. Ce serait une problématique, car l'essence même de l'analyse des effets domino est d'examiner des situations improbables, ayant des effets catastrophiques.

194

De même, une analyse de l'accessibilité doit être effectuée. En particulier, l'accessibilité des états, qui détermine si un état particulier ou un ensemble d'états dans un système peut être atteint à partir d'un autre état. Elle peut être utilisée pour comparer la cohérence des simulations au sein d'une exécution et entre les méthodes.

197

En outre, la durée de calcul est un indicateur évident à comparer qui est intimement corrélé à la puissance de calcul nécessaire pour faire fonctionner le modèle. Il est crucial pour les infrastructures complexes. Dans notre cas d'étude, le temps de calcul peut ne pas être pertinent car négligeable compte tenu de la simplicité des situations considérées. Enfin, la nature des résultats, leur précision et leur exactitude doivent être comparées.

201

C. Logiciels utilisés

202

Pour modéliser les RB, le choix s'est d'abord porté sur GeNIe 4.1 développé par BayesFusion puis sur la librairie Python pyAgrum (BayesFusion, LLC, 2023; Ducamp et al., 2020). Pour les RP, la librairie Python SNAKES est utilisée (Pommereau, 2015) ; pour les PM, la librairie Python PyCATSHOO, développée par EDF R&D (Chraïbi, 2018).

205

La mutualisation du langage python pour les différentes méthodes de modélisation a été privilégiée dans une optique de faciliter l'analyse des résultats.

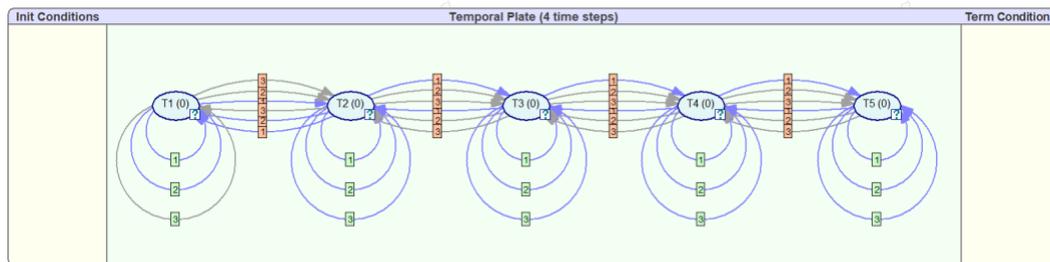
207

IV. RESULTATS

208

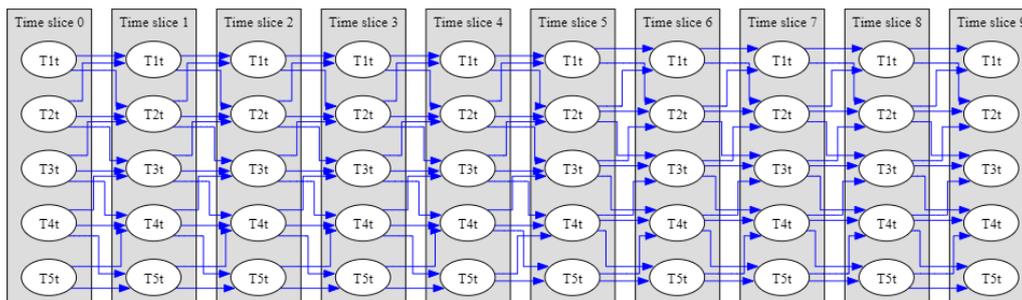
Dans un premier temps, la situation a été modélisée en RB à l'aide de GeNIe 4.1 pour reproduire les résultats de Khakzad et Khan (Cozzani & Reniers, 2021). Les mêmes probabilités ont été obtenues. De plus, pour tirer profit des options du logiciel, le système a aussi été modélisé sous forme dynamique (Fig. 5). Après avoir placé les cinq nœuds, les liens entre eux sont effectués et les interactions aux différents pas de temps sont spécifiées par les numéros sur les arcs. Pour chaque arc, il est nécessaire de compléter une table de probabilité conditionnelle. La probabilité qu'un nœud soit dans un certain état étant définie par l'état des

213 nœuds parents selon ci-dessus. Les résultats obtenus en RBD (Réseaux Bayésien Dynamiques) sont identiques à ceux obtenus
 214 avec un RB classique tel que réalisé par les auteurs.



215
 216 Fig. 5. RBD de l'étude de cas avec 5 réservoirs alignés, avec 4 pas de temps, réalisé avec GeNIe 4.1.

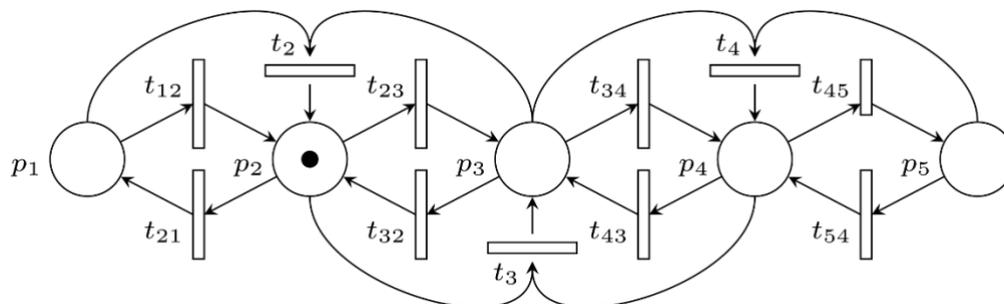
217 Néanmoins, bien que visuel et instinctif dans la réalisation des réseaux, l'implémentation des tables de probabilités avec
 218 GeNIe, dans le cas dynamique, est particulièrement laborieuse à mettre en œuvre. En effet, tous les états précédents sont à
 219 considérer et pas uniquement l'instant juste précédent. Il en résulte $2^{1+t(v+1)}$ cases à remplir avec t l'instant considéré et v le
 220 nombre de voisins de la cuve en question. Ce nombre s'explique parce qu'il y a deux états possibles et que l'état d'une cuve est
 221 dépendant de son état antérieur et de l'état antérieur des cuves voisines. Cette valeur croît très rapidement avec le pas de temps.
 222 De ce fait, le logiciel a été délaissé au profit de la librairie python pyAgrum. Moins visuelle lors de la conception, elle offre, en
 223 revanche, une plus grande liberté et des automatisations plus faciles à mettre en place à l'aide de boucles. Les tables de
 224 probabilités sont notamment remplies plus rapidement, en suivant le même raisonnement que précédemment. De plus, il est aisé
 225 d'augmenter la durée de l'étude et la Fig. 6 montre le RBD avec 10 pas de temps, généré automatiquement par le code une fois
 226 que les liens entre les réservoirs sont définis. Le code fournit aussi les probabilités associées à chaque état pour chaque cuve et
 227 chaque pas de temps. Ces probabilités sont concordantes avec celles calculées par GeNIe. L'intégration de l'observation est
 228 réalisable à l'aide d'une commande pour établir les états passés et futurs les plus probables.



229
 230 Fig. 6. RBD de l'étude de cas avec 5 réservoirs alignés, avec 10 pas de temps réalisé avec pyAgrum, T_{it} représente le réservoir i .

231 Le RP pour modéliser le système est un peu plus complexe (Fig. 7). Les conditions des transitions sont probabilistes et
 232 répondent à la relation ci-dessus. Les réservoirs sont représentés par les nœuds p_i , la propagation du feu d'un réservoir i à un
 233 réservoir j , par les transitions t_{ij} . Les jetons décrivent les positions en feu. Il est nécessaire de prendre en compte les cas où deux
 234 réservoirs en feu encadrent un réservoir qui n'est pas encore en feu ; cela est matérialisé par les transitions t_i .

235 Par ailleurs, plusieurs feux initiaux peuvent survenir, il faut donc effectuer un tirage aléatoire pour fixer la position initiale
 236 des jetons. Le nombre de simulations à réaliser doit être suffisamment important pour couvrir toutes les situations initiales
 237 possibles.



238
 239 Fig. 7. Schéma du RP de l'étude de cas avec 5 réservoirs alignés, p_i représente le réservoir i , t_{ij} représente la transition (propagation d'un feu) du réservoir i
 240 vers le réservoir j , et t_i , les transitions (propagations d'un feu) lors que les deux réservoirs adjacents à i sont atteints.

241 Les résultats obtenus avec le RP sont proches de ceux obtenus avec les RB. Ils nécessitent néanmoins une durée de calcul
 242 plus importante et ne prennent pas encore en compte l'aspect temporel que permet le RBD. L'application du cas d'étude au
 243 PDMP n'a pas encore fourni de résultat permettant de comparer la méthode avec les autres.

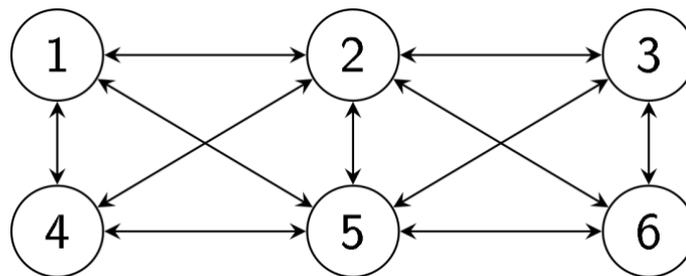
245 Afin de gagner en réalisme, l'étude de cas peut être progressivement complexifiée. Tout d'abord, des mesures de mitigation
 246 peuvent être ajoutées au modèle. Ces mesures sont des barrières qui réduisent la probabilité d'escalade. Le rayonnement
 247 thermique reçu est diminué ou le seuil de résistance est augmenté, ce qui entraîne une diminution globale de la probabilité de
 248 propagation. En outre, les mesures d'atténuation peuvent retarder la propagation de l'incendie, protégeant complètement un
 249 réservoir pendant un certain temps. Toutefois, les barrières peuvent également être défectueuses et leur fonctionnement est
 250 soumis à une certaine probabilité.

251 L'étape suivante consisterait à modifier la disposition des réservoirs. L'introduction des distances séparant les réservoirs dans
 252 les équations permet d'obtenir un modèle plus réaliste. Les réservoirs n'étant plus nécessairement équidistants, des géométries
 253 plus complexes peuvent être étudiées. La disposition représentée Fig. 8 peut, par exemple, être modélisée avec davantage
 254 d'interactions entre les réservoirs et d'éventuels effets cumulatifs.

255 Dans les usines chimiques réelles, les réservoirs en rétention afin de limiter spatialement les déversements en cas de fuite.
 256 Une illustration d'une cuvette de rétention est visible en Fig. 3. Cependant, un scénario envisageable est la rupture d'un réservoir
 257 lors de, ou suite à, son inflammation. Dans ce cas, avec le déversement du liquide inflammable, un feu de nappe serait à considérer
 258 et il affecterait non pas un mais tous les réservoirs simultanément. Les probabilités de propagation sont alors à revoir. Un autre
 259 risque est que l'un des réservoirs explose en raison de l'augmentation de pression interne dans le ciel gazeux causée par la chaleur,
 260 phénomène non pris en considération jusque-là.

261 Enfin, les équations peuvent à nouveau être mises à jour pour plus de réalisme, en prenant en compte des aspects temporels
 262 de la propagation d'un incendie. Les travaux de Landucci et al. (2009) établissent des équations probit avec leurs constantes pour
 263 différentes natures de réservoirs. Leur modèle inclut le temps d'intervention des secours comme paramètre pouvant influencer
 264 l'escalade.

265 La finalité est de développer un outil de modélisation qui puisse être utilisé par un industriel, dans le cadre d'études de danger
 266 et de l'identification des situations d'escalades dans le cadre de l'élaboration de plans d'urgence, pour prévenir la survenue
 267 d'effets domino. Néanmoins le RB a l'avantage de pouvoir prendre en compte l'observation pour déterminer le chemin pris.
 268 Cette capacité présente de fait un intérêt pour l'aide à la décision et l'utilisation de la modélisation en temps réel pour guider les
 269 démarches à suivre ou éviter.



270
 271 Fig. 8. Représentation schématique de l'étude de cas où six réservoirs sont disposés en rectangle et peuvent interagir avec leurs voisins.

272

273

VI. CONCLUSION

274 L'étude des effets dominos dans les accidents industriels est un domaine crucial pour la sécurité des populations et la
 275 protection de l'environnement ainsi que pour la préservation de l'outil industriel en situation incidentelle. L'analyse comparative
 276 des méthodes de modélisation d'effets dominos permet d'améliorer la compréhension de ce phénomène complexe. Cette
 277 comparaison permet de lister et de démontrer les avantages des différentes méthodes. La suite de ces travaux consiste en la
 278 combinaison des différentes méthodes afin de tirer profit de chacune d'elle. L'outil de modélisation des effets dominos permettra
 279 de tester et proposer des solutions concrètes pour prévenir les accidents industriels en identifiant les points de vulnérabilité des
 280 installations et en préconisant des mesures de maîtrise des risques adéquates. Cette modélisation permet d'anticiper les
 281 conséquences éventuelles des accidents et peut être un moyen d'optimiser l'élaboration des plans d'urgence en testant les
 282 différentes approches.

283

REMERCIEMENTS

284 Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour le financement du projet RESCUE (ANR-21-
 285 CE39-0021).

286

REFERENCES

287

288 Alileche, N. (2015). *Étude des effets dominos sur une zone industrielle*. INSA de Rouen.

289 Arrêté du 26 mai 2014 relatif à la prévention des accidents majeurs dans les installations classées mentionnées à la section 9,
 290 chapitre V, titre Ier du livre V du code de l'environnement, DEVP1316983A NOR 0019 (2014).
 291 <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2014/5/26/DEV1316983A/jo/texte>

292 Balouin, T., Kribi, S., & Prats, F. (2015). *OMEGA 9—Étude de dangers d'une installation classée* (DRA, Numéros 15-148940-
293 03446A, p. 114).

294 BARPI. (2006). *BLEVE dans un dépôt de GPL en raffinerie, Le 4 janvier 1966 Feyzin (69) – France* (1; ARIA). Ministère
295 chargé de l'environnement. https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/A1_ips00001_002.pdf

296 BARPI. (2017). *Explosions dans une entreprise de matières dangereuses 12 août 2015 Tianjin, Chine* (46803; ARIA).
297 Ministère de la Transition écologique et solidaire. [https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-](https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/A46803_a46803_fiche_impel_001.pdf)
298 [content/files_mf/A46803_a46803_fiche_impel_001.pdf](https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/A46803_a46803_fiche_impel_001.pdf)

299 BayesFusion, LLC. (2023). *GeNIe Modeler Programmer's Manual* (Software Manual Version 4.1.R0).
300 <https://support.bayesfusion.com/docs/>

301 Carre, F., Prats, F., Willot, A., Cherkaoui, A., Salmon, R., D'osterlinck, T., Edjossan-Sossou, A. M., Sannels, M., Tripelli,
302 G., & Lönnemark, A. (2017). *CascEff: Methodology for creating a model of an incident with cascading effects for future*
303 *threats* (p. 123). INERIS.

304 Chen, C., Reniers, G., & Khakzad, N. (2020). A thorough classification and discussion of approaches for modeling and
305 managing domino effects in the process industries. *Safety Science*, 125, 104618. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104618>

306 Chraïbi, H. (2018). *Getting started with PyCATSHOO V1.2.2.8 Document version V1.* (Software Manual V1.1). EDF R&D.
307 <http://pycatshoo.org/Getting%20started%20with%20PyCATSHOO-PYCV1228.pdf>

308 Cox, D. R. (2017). *The Theory of Stochastic Processes* (First edition). CRC Press.

309 Cozzani, V., & Reniers, G. (Eds.). (2021). *Dynamic risk assessment and management of domino effects and cascading events*
310 *in the process industry*. Elsevier.

311 Ducamp, G., Gonzales, C., & Wuillemin, P.-H. (2020). aGrUM/pyAgrum : A toolbox to build models and algorithms for
312 probabilistic graphical models in python. *10th international conference on probabilistic graphical models*, 138, 609-612.
313 <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03135721>

314 Fearnhead, P., Bierkens, J., Pollock, M., & Roberts, G. O. (2018). Piecewise Deterministic Markov Processes for Continuous-
315 Time Monte Carlo. *Statistical Science*, 33(3). <https://doi.org/10.1214/18-STS648>

316 Kadri, F., Chatelet, E., & Birregah, B. (2011). Analyse d'Effet Domino : Méthodes et Outils. *Workshop interdisciplinaire sur*
317 *la sécurité globale*, 1--15.

318 Khakzad, N. (2015). Application of dynamic Bayesian network to risk analysis of domino effects in chemical infrastructures.
319 *Reliability Engineering & System Safety*, 138, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.02.007>

320 Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2011). Safety analysis in process facilities : Comparison of fault tree and Bayesian
321 network approaches. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(8), 925-932. <https://doi.org/10.1016/j.res.2011.03.012>

322 Khakzad, N., Khan, F., Amyotte, P., & Cozzani, V. (2013). Domino Effect Analysis Using Bayesian Networks : **Domino Effect**
323 **Analysis**. *Risk Analysis*, 33(2), 292-306. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2012.01854.x>

324 Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1998). Models for domino effect analysis in chemical process industries. *Process Safety Progress*,
325 17(2), 107-123. <https://doi.org/10.1002/prs.680170207>

326 Landucci, G., Gubinelli, G., Antonioni, G., & Cozzani, V. (2009). The assessment of the damage probability of storage tanks
327 in domino events triggered by fire. *Accident Analysis & Prevention*, 41(6), 1206-1215.
328 <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.05.006>

329 Laurent, A. (2019). Évaluations qualitative et quantitative des risques d'effet domino dans l'industrie. *Techniques de*
330 *l'Ingénieur, SE-4064*, 1--20. <https://doi.org/10.51257/a-v1-se4064>

331 Li, J., Reniers, G., Cozzani, V., & Khan, F. (2017). A bibliometric analysis of peer-reviewed publications on domino effects in
332 the process industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 49, 103-110.
333 <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.06.003>

334 Murata, T. (1989). Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, 77(4).
335 <https://doi.org/10.1109/5.24143>

336 Necci, A., Cozzani, V., Spadoni, G., & Khan, F. (2015). Assessment of domino effect : State of the art and research Needs.
337 *Reliability Engineering & System Safety*, 143, 3-18. <https://doi.org/10.1016/j.res.2015.05.017>

338 Pescaroli, G., & Alexander, D. (2015). A definition of cascading disasters and cascading effects : Going beyond the “toppling
339 dominos” metaphor. *Planet@ Risk*, 3, 58--67.

340 Pommereau, F. (2015). SNAKES : A Flexible High-Level Petri Nets Library (Tool Paper). In R. Devillers & A. Valmari (Éds.),
341 *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency* (Vol. 9115, p. 254-265). Springer International Publishing.
342 https://doi.org/10.1007/978-3-319-19488-2_13

343 Reniers, G., & Cozzani, V. (Éds.). (2013). *Domino effects in the process industries : Modeling, prevention and managing*.
344 Elsevier.

345 Weber, P., Medina-Oliva, G., Simon, C., & Iung, B. (2012). Overview on Bayesian networks applications for dependability,
346 risk analysis and maintenance areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(4), 671-682.
347 <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.06.002>

348 Zhou, J., & Reniers, G. (2017). Petri-net based cascading effect analysis of vapor cloud explosions. *Journal of Loss Prevention*
349 *in the Process Industries*, 48, 118-125. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.04.017>