



HAL
open science

Modèles dynamiques probabilistes pour l'étude des séquences d'accidents sur site industriel

Farid Kadri

► **To cite this version:**

Farid Kadri. Modèles dynamiques probabilistes pour l'étude des séquences d'accidents sur site industriel. 2014. <hal-01054304>

HAL Id: hal-01054304

<https://hal.science/hal-01054304v1>

Submitted on 5 Aug 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Modèles dynamiques probabilistes pour l'étude des séquences d'accidents sur site industriel

Farid KADRI^{1,2}

¹Univ. Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

²UVHC, TEMPO Lab., "Production, Service, Information" Team, F-59313 Valenciennes, France

farid.kadri@univ-valenciennes.fr

I. Introduction

Dans le domaine des risques potentiels, les effets dominos « chaîne d'accidents » sont reconnus depuis 1947. Les accidents causés par l'effet domino sont les accidents les plus destructifs liés aux sites industriels, ce dernier, peut causer des conséquences graves sur les sites industriels, la population, les structures, l'environnement et l'économie. La probabilité d'occurrence d'effet domino est de plus en plus élevée en raison du développement de produit dans les installations industrielles, la proximité entre ces établissements, leurs stockages des substances dangereuses, l'erreur humaine, les actes de malveillance, et les catastrophes naturelles en raison du changement climatique. Malgré ça, les effets dominos /chaines en cascades, restent relativement peu étudiés, peu d'études qui fédèrent les différentes approches et méthodes disponibles dans la littérature.

Nous retrouvons de nombreux exemples d'accidents industriels et de catastrophes bien réelles dans la littérature qui ont causées des séquences (chaînes) d'accidents plus graves. Des situations (incendie, explosion, projection de fragments et de rejets toxiques) générées par un accident primaire (naturel ou technologique), ces derniers peuvent générer des accidents secondaires d'ordre plus élevés et plus graves. Cet enchaînement de processus catastrophiques successifs est appelé chaîne en cascade ou effet domino.

L'effet domino est responsable de plusieurs accidents catastrophiques dans les industries chimiques et les zones de stockage. On peut noter aussi que les accidents causés par des chaines en cascade (cascade d'événements) sont parmi les plus graves accidents relatifs aux sites industriels. Par conséquent, le risque d'effets

dominos est largement reconnu dans la législation depuis la directive « Seveso I » (*European Community Directive (82/501/EEC)*), qui exige l'évaluation des effets domino dans l'analyse de la sécurité industrielle. En outre, la deuxième directive « Seveso II » (*directive (96/82/CE)*) a étendu ses exigences à l'évaluation des effets dominos non seulement à l'intérieur du site industriel, mais aussi à proximité de ce dernier. Malgré ça, les effets dominos restent relativement peu étudiés.

En France, la base de données ARIA, a identifié 18 469 accidents de Janvier 1992 à Décembre 2008 et 1073 autres de Janvier à Décembre 2008, montre que, les incendies et les rejets de matières dangereuses sont les événements plus fréquents avec 60 % et 44 % respectivement en 2008. Ajoutant à cela, les explosions et la projection de fragments (missiles) sont les grands événements qui peuvent générer des effets domino dans les sites industriels, d'où la nécessité de prévenir et d'atténuer ces événements.

L'analyse statistique des accidents dominos, montrent que la fréquence des accidents dominos est élevée dans les usines des procédés chimiques et de transport. Récemment, l'analyse historique de 261 accidents domino impliquant les effets dominos, montre que, en plus des causes de défaillances mécaniques et les événements externes, la fréquence des accidents dominos causés par le facteur humain est relativement élevée.

Récemment, un inventaire des accidents dominos qui se sont produits sur la période de 1917 jusqu'à 2009 a montré que 30% de ces accidents sont enregistrés entre (2000-2009). Cette étude montre que les explosions sont les causes les plus fréquentes des effets dominos (57%), suivis par les incendies (43%).

Malgré cela, les chaînes en cascade restent relativement peu étudiées, peu d'attention portée sur l'étude des accidents dominos, les méthodes disponibles dans la littérature sont limitées dans leur capacité à gérer la complexité de ce phénomène. Un état de l'art sur les outils et les méthodes d'analyse des effets dominos (F. Kadri et all 2011), révèle que :

- La plupart des modèles utilise le modèle probit, méthode statistique et très simplifiée, ne prend pas en considération le système d'intervention/ mitigation,
- Modèles très spécifiques et qui ont besoin d'être complétés par d'autres méthodes,
- Ne prennent pas en considération les facteurs humains et organisationnels malgré leurs probabilités élevées,
- Peu de méthodes quantitatives qui prennent en compte à la fois les interactions entre effets physiques, systèmes, population, et le temps.
- Manque de *modèles stochastiques* dans la modélisation des effets physiques couplés par le facteur temps,

- Peut d'étude sont accordées à la modélisation des risques naturels, aussi, il ya un manque de méthodes qui prennent en compte les risques naturels (inondations, séismes, risque foudre ...) dans l'étude des chaînes en cascade en dépit de leur danger potentiel sur les installations industrielles, la population, les structures et les écosystèmes.

I.1. Définition des effets dominos et ses principales caractéristiques

Avant d'aborder le problème de séquences accidentelles (cascade d'événements), il est pertinent de définir l'effet domino et ses principales caractéristiques.

En ce qui concerne la définition des effets dominos, plusieurs auteurs ont suggéré différentes définitions selon la nature du site industriel et les effets / phénomènes physiques étudiés. Néanmoins, concernant les installations industrielles, nous proposons la définition suivante :

Les effets dominos consistent en une séquence d'événements interdépendants susceptibles de produire en chaîne des dommages importants voire d'ordre catastrophique dans une installation industrielle et son environnement. Il s'agit plus précisément d'un ou plusieurs événements dits primaires (origines) qui se propagent et provoquent des événements secondaires dont les conséquences se superposent voire amplifient celles du ou des événements primaires.

II.1.2. Principales caractéristiques des effets dominos

L'analyse des effets dominos dans la littérature et les études concernant les accidents dominos, montre que toutes les séquences accidentelles (effet domino) ont quatre caractéristiques communes :

- un scénario accidentel primaire qui initie l'effet domino (événement primaire ou initial qui déclenche la séquence accidentelle),
- l'effet de propagation qui suit l'événement principal, dû à l'effet des « vecteurs d'intensification » causés par l'événement primaire,
- un ou plusieurs scénarios d'accident secondaire, affectant la même ou d'autres unités cibles d'une installation industrielle,
- l'intensification des conséquences d'un événement primaire, due aux effets des scénarios secondaires.

La notion d'intensification correspond à un processus qui favorise la dégradation des biens et l'atteinte aux personnes au cours du développement de l'effet domino, *i.e.* qui a tendance à augmenter les dommages.

I.1.3. L'événement domino et les vecteurs d'intensification

En ce qui concerne les accidents majeurs, le mot domino implique subtilement différents sens du mot intensification. L'événement domino implique l'intensification d'un accident d'une zone ou d'un site à un autre. Donc l'événement domino est considéré comme un sous-ensemble de l'intensification, c'est-à-dire tous les événements dominos sont des exemples d'intensification, mais pas nécessairement vice versa.

Les vecteurs d'intensification sont définis comme étant des effets physiques des scénarios primaires, les principaux types d'accidents primaires qui peuvent déclencher un effet domino dans les sites industriels sont les incendies, les explosions (ondes de surpression/ choc, et la projection des fragments), les rejets ou libération toxiques, et les effets ou les impacts simultanés de ces derniers.

Ces vecteurs d'intensification se manifestent de différentes façons. Voici les principaux phénomènes conduisant à des dommages catastrophiques ou impliquant des événements dominos :

1. Incendie : boule de feu (fire ball), flash de feu (flash fire), feu de touche (jet fire), nappe de feu (pool fire). Ces phénomènes propagent de la quantité de chaleur par radiation thermique.
2. Explosion : explosion d'un nuage de vapeur (VCE), explosion confinée (de vapeur ou poussière), explosion mécanique (par surpression interne produisant une rupture mécanique), vaporisation explosive d'un liquide en ébullition (BLEVE), explosion « point source » (explosifs, produits chimiques localisés...). Ces explosions génèrent de la quantité de chaleur (radiation thermique), des projections de fragments (« missiles »), et des ondes de souffle (surpression).
3. Rejet toxique : propagation atmosphérique (émission de gaz et poussières en général par fuites, effondrements de réservoirs, etc. sous l'influence des vents et gravitaire), propagation terrestre (émission liquide puis mouvements gravitaires) voire souterraine (infiltration, diffusion puis mouvements gravitaires).

II.2. Les sources potentielles d'effets dominos

Les sources potentielles d'effets domino sont de natures diverses et aussi liées à des événements initiateurs variés. On les distingue de manière générale par la nature des risques associés, d'ordre naturel ou anthropique. Dans cette dernière catégorie, on distingue les risques technologiques et organisationnels (non intentionnels) et les risques de malveillances (intentionnels).

On peut donc proposer la décomposition (non disjointe) de la nature des risques et donc de la classification des événements initiateurs suivante [1] :

1. **Risque naturels** (origines géologiques et/ou atmosphériques principalement)

- a. **Origine climatique** : feux de forêt, inondations, crues et ruissellements, avalanches, cyclones et tornades, tempêtes, orages, effets de changements climatiques;
- b. **Origine géologique** : mouvements de terrain et séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, autres émanations naturelles (gaz, etc.);
- c. **Origine extraterrestre (très rares)** : météorites.

2. **Risques anthropiques** (origines humaines)

- a. **Origine technologique et organisationnelle** : défaillances d'ordres technologiques et/ou humains, défauts de conception, de procédures et/ou organisationnels;
- b. **Origine malveillante** : vols, sabotages actions revendicatives ou de vengeances, dégradations diverses (dont occasionnelles), attentats. Ces actions peuvent viser les matériels, mais aussi les informations sensibles ou les personnels.

Ces risques peuvent être combinés ce qui complique notablement les analyses, ce d'autant que leurs natures parfois très différentes impliquent des processus de propagation variés. Cela conduit également à l'exploitation de méthodes d'analyse de natures également diverses (déterministes, probabilistes voire possibilistes et de natures qualitatives).

II.3. Les processus de propagation

Les processus de propagation sont directement liés à la source potentielle et l'événement initiateur associé, mais aussi à son environnement immédiat (appelé aussi « champ de danger »). Il est donc décrit par un processus physico-chimique mais aussi informationnel dont les conditions d'évolution sont « guidées » par les caractéristiques : physiques (atmosphérique, géologique, hydrologique) et matérielles (bâtiments, installations, voiries...), écologiques (végétations, animaux),

informationnelles (détections et observations, systèmes d'information) et humaines (comportements individuels, organisation et logistique, démographie locale...).

Les processus issus de risques naturels sont souvent générateurs de modes communs dès leur origine, comme des défaillances technologiques voire organisationnelles ou humaines simultanément à différents niveaux sans que ceux-ci n'aient de relations physiques ou fonctionnelles directes, et les processus d'origines technologiques et organisationnelles induisent la propagation d'effets domino qui généralement relèvent des phénomènes suivants : incendie, explosion et rejet toxique, ainsi que leurs combinaisons.

Les processus d'origines technologiques et organisationnelles induisent la propagation d'effets domino qui généralement relèvent des phénomènes suivants : incendie, explosion et rejet toxique, ainsi que leurs combinaisons. Des propagations plus subtiles comme les transports de flux de chaleur ou de matière via des réseaux naturels ou artificiels, ou encore par systèmes / réseaux d'informations ne sont pas exclus des scénarios, mais déplacent les phénomènes catastrophiques cités ci-dessus. Du point de vue des facteurs humains, la propagation des mouvements de panique, de la rumeur, du stress et leurs conséquences organisationnelles sont également des éléments essentiels à prendre en compte.

II. Modélisation des effets dominos

Plusieurs modèles qui ont été développés pour l'évaluation et l'analyse des effets dominos dans les sites industriels causés par les incendies, les explosions et la projection des fragments. Pour résoudre le problème posé par l'évaluation et/ou l'analyse des effets dominos dans les sites industriels, plusieurs méthodes et outils logiciels ont été développés. Généralement, chaque méthode traite un cas spécifique d'effet domino. Un état de l'art des ces méthodologies et les outils logiciels est présenté dans [2]. Ainsi qu'une étude comparative des principales méthodes et outils logiciels en mettant l'accent sur les limites rencontrées dans l'application de ces approches. Nous trouvons des modèles qui servent à évaluer [3] :

- Effet domino causé par un incendie et / ou par la surpression; peuvent être classés en deux modèles dont on trouve les premiers modèles (approches très simplifiés) qui reposent sur des valeurs seuils, et les modèles probabilistes qui utilisent le modèle probit pour évaluer les dommages causés aux équipements industriels.
- Effet domino causé par la projection des fragments générés. La génération des fragments est généralement suivie des ruptures catastrophiques des équipements de procédé industriel, les deux

scenarios accidentels responsables de la projection des fragments sont i) l'explosion due à la déflagration confinée, et ii) BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion).

- Effet domino causé par les risques naturels comme tremblement de terre, inondation, tempête, et la foudre. Un état de l'art sur les outils et les méthodes d'analyse des effets dominos, révèle que peu d'études sont accordées à la modélisation des risques naturels, aussi, il ya un manque de méthodes qui prennent en compte les risques naturels et des catastrophes (inondations, séismes, risque foudre et ...).

III. Méthodologies proposées :

Dans cette partie nous proposons deux méthodologies, la première méthode est une méthode quantitative qui prend en compte les effets physiques qui peuvent être générés par un incendie (charge thermique) et par des explosions (ondes de surpression et la projection des fragments), ainsi que les effets de ces derniers sur la vulnérabilité humaine. Cette méthodologie ne prend pas en considération l'intervention d'urgence.

L'intégration du système de sécurité et d'intervention (intervention d'urgence), la fiabilité et la disponibilité des systèmes de détection et de mitigation, ainsi que l'aspect organisationnel est l'objet de la deuxième méthodologie qui utilise les RdP stochastiques (couplage des modèles physiques avec des modèles discrets).

III.1. Première méthode

Un site industriel et/ou zones de stockage contient de nombreuses unités et/ou des équipements de stockage sous pression, ces derniers peuvent être des cibles d'un événement ou incident externe et/ou interne (exemple de surpression). Les vecteurs d'intensification générés après la rupture (défaillance) de l'unité cible, peuvent affecter les installations / équipements environnants. Si les cibles affectées sont endommagées, ces dernières, peuvent également s'exploser et générer d'autres menaces à d'autres installations environnantes et ainsi de suite. Cette chaîne d'accident est un effet domino et peut conduire à des conséquences catastrophiques dans une installation industrielle. Pour cela nous avons proposé une procédure simplifiée pour l'étude des séquences accidentelles dans les sites industriels (voir la figure 1). Cette procédure se compose des étapes suivantes :

1. Etablir une base de données :

Toutes les connaissances et les informations permettant de regrouper les informations pertinentes concernant la zone, le site à étudier et son environnement. Donc, toute information qui peut nous aider à comprendre et à étudier le site et son environnement doit être recensée. Par conséquent, il est utile de résumer les

principales informations qui sont nécessaires pour l'évaluation quantitative de l'effet domino dans un site industriel.

1.1. Présentation de la zone étudiée :

Le but de cette étape est de fournir toutes les informations utiles et nécessaires qui peuvent nous aider dans notre étude, ces informations (données) sont:

- Les données géographiques sur la localisation de l'usine, réseaux de transports, centres de vulnérabilité (hôpitaux, les centres de commerce, les universités, écoles, parcs,...),
- Des données sur la population, toutes les informations concernant la densité et la distribution de la population autour du site industriel (résidents, touristes, travailleurs, étudiants, etc.),
- Les données météorologiques sur les conditions atmosphériques (la distribution du vent, vitesse du vent, classe de stabilité...).

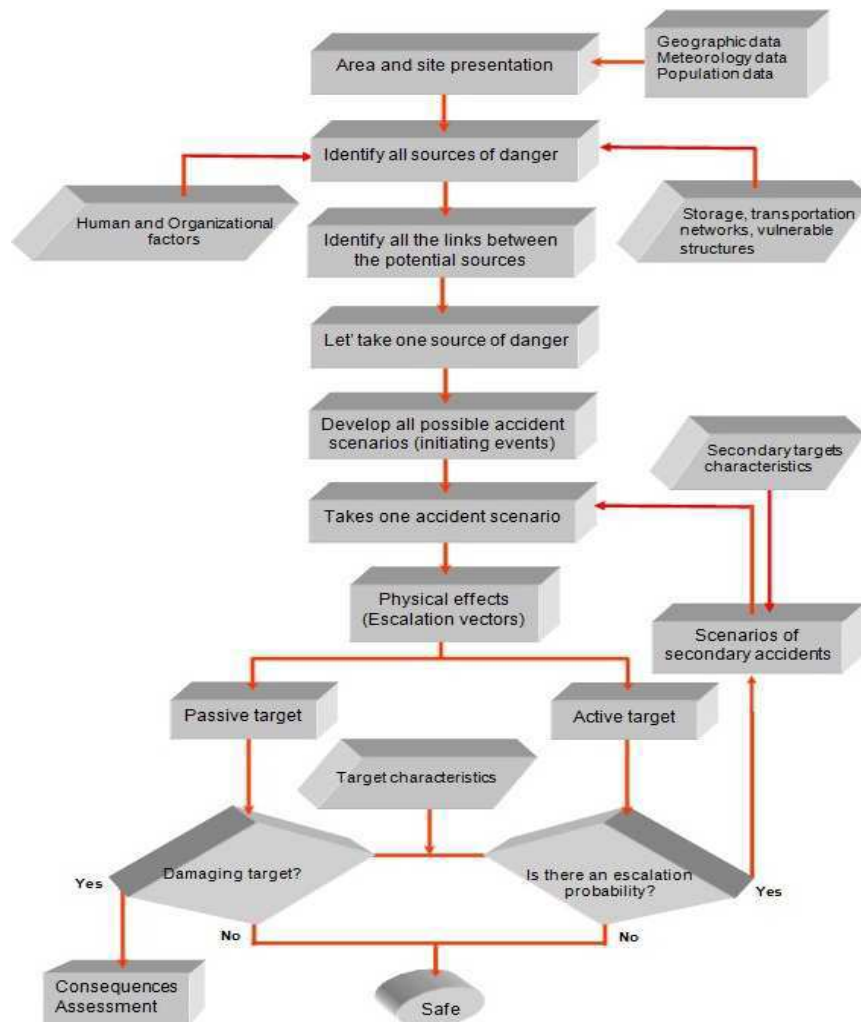


Fig.1 : Procédure simplifiée pour l'étude des séquences accidentelles dans les sites industriels [4].

1.2. Présentation du site :

- La cartographie de l'usine et de son entourage (autres sites, les bâtiments, les écosystèmes,...),
- La description de procédé industriel (les données sur la matière constitutive des équipements sensibles),
- Les produits chimiques et les conditions d'exploitation (température, pression, capacité de l'unité, caractéristiques/ propriétés chimiques...),
- L'emplacement de chaque unité en termes de caractéristiques de terrain et de distance avec les autres unités (ainsi que les équipements),
- Les systèmes de sécurité, et les moyens d'intervention.

2. Identifier toutes les sources de dangers :

En se basant sur les informations présentées dans la première étape, on peut identifier toutes les sources potentielles internes et externes par rapport au site industriel :

- le stockage,
- le procédé industriel (les soupapes de sécurité, les chaudières et turbine, les compresseurs...),
- transport des substances dangereuses par route, par chemin de fer, pipelines et des navires (connaissances détaillées des flux annuels sur toutes les activités de transport), et
- réseaux de support de la vie (réseaux électriques, communications, gaz, eaux).

Pour la sélection des sources de danger, il faut prendre en considération quelques critères comme :

La caractérisation des potentiels de dangers :

- nature et dangers du produit contenu, conditions de transfert (pression, température, état du fluide, débit), et
- nature de la tuyauterie : diamètre, longueur, matériau, type de raccords avec les capacités (nature des contraintes).

Tracé de la tuyauterie :

- présence d'agresseurs externes,
- passage à proximité d'installations à fort potentiel de dangers, et
- situation géographique sur le site (proximité des tiers).

Cette étape est très importante car les dangers qui ne sont pas identifiés ne seront pas quantifiés, ce qui conduit à un risque sous-estimé. Les sources de danger sont dus généralement à la défaillance matérielle et/ ou logicielle, le facteur humain et organisationnel, et l'acte de malveillance soit dans le site ou en dehors du site industriel.

3. Identifier les liens entre les sources potentielles et les systèmes sensibles environnants :

En ce basant sur la base de données établie dans la première étape, et les sources potentielles identifier précédemment, on peut identifier tous les liens (interdépendance et dépendance) entre :

- les sources elles même, et les installations/ équipements sensibles du site,
- les sources potentielles et les réseaux de support de la vie, et
- les sources, les structures et les écosystèmes.

Le but de cette étape est de donner une près-sélection des scénarios d'accident potentiels, qui vont être confirmé par la suite d'une analyse détaillée.

4. Développer tous les scénarios d'accidents possibles (événements initiateurs) :

On se basant sur les étapes 2 et 3 (données opératoires, les défaillances, les caractéristiques chimiques des substances, et le voisinage), on peut développer tous les scénarios d'accident possibles dans n'importe quel site industriel, ainsi, les scénarios d'accidents peuvent être classés selon qu'ils soient d'origine :

- Technologiques (dysfonctionnement, défaillance matérielle/ logicielle),
- Humains (facteur humain et organisationnel, erreur, et acte malveillant),
- Naturels (séisme, foudre, inondation, vent, tempête et neige).

Les différents événements qui peuvent conduire à la défaillance d'une unité industrielle peuvent être calculés par les techniques d'arbre de défaillance. La figure 2 représente les principaux événements qui peuvent causer la défaillance de l'unité cible.

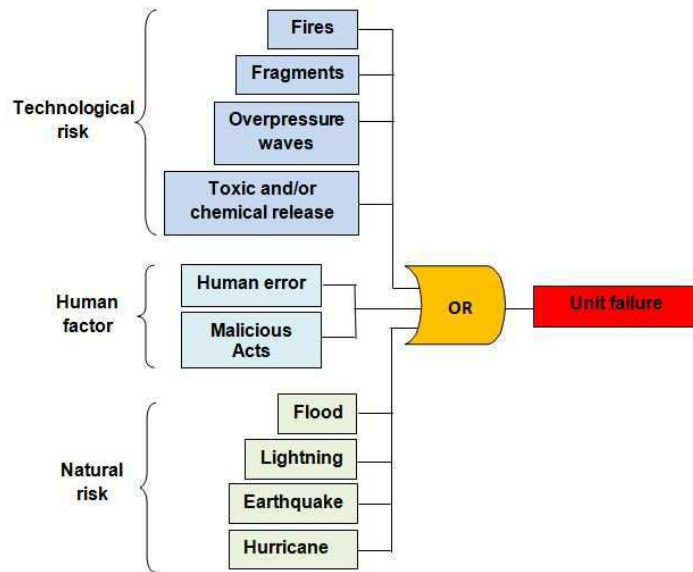


Fig.2 : Les principaux événements qui peuvent causés la défaillance d'une unité cible

5. L'unité cible :

Dans le cadre d'analyse des effets dominos, nous définissons deux types de cibles potentielles, cibles des objectifs active et passive comme suit :

- Cible active : sa défaillance peut générer un danger / risque qui peuvent affecter les autres cibles environnantes (réservoirs de stockage, les équipements, les soupapes de sûreté, de la chaudière, turbine, de compresseurs, des pipelines, de gaz et de réseaux électriques).
- Cible passive: tout équipement ou structure qui peut être endommagé, mais sa défaillance ne génère pas un danger ou une menace pour les autres cibles (personnel, structures non explosif).

6. Evaluation des conséquences :

L'évaluation des conséquences implique différents modèles mathématiques, dynamiques, et des modèles physiques couplés avec des modèles probabilistes.

- Les modèles physiques d'explosions [4,5] pour prédire les caractéristiques des explosions qui dépendent de plusieurs paramètres aléatoires (l'efficacité et l'énergie d'explosion, la masse du fuel impliquée dans l'explosion...) et l'impact sur les cibles/zones endommagées en fonction des catégories des cibles et leurs valeurs seuils (dommages causés par zones) dus aux effets physiques (surpression et fragments) générés par ces explosions. En ce qui concerne la projection des fragments on a utilisé les modèles dynamiques et probabilistes pour caractériser la

masse, la vitesse et l'angle de projection de chaque fragment, et les équations de mouvement [6,7,8].

- Les modèles physiques des incendies sont utilisés pour quantifier les effets thermiques sur les équipements cibles [9,10,11].
- Les modèles de vulnérabilité humaine aux effets de thermiques et les ondes de surpression sont développés pour quantifier la réponse humaine aux différents niveaux d'exposition. Les effets des vecteurs d'intensification peuvent affecter non seulement sur les équipements industriels mais aussi sur la population et l'environnement. Nous avons proposé deux modèles simplifiés pour quantifier les effets des radiations thermiques et la surpression sur la vulnérabilité humaine.
- L'utilisation des valeurs seuils proposées dans la littérature pour les effets thermiques, de surpression, et les fragments sur les équipements industriels et la population [12].

IV.2. Deuxième méthodologie :

Dans le cadre de l'analyse des effets dominos dans des sites industriels la défaillance de l'unité cible dépend de sa résistance à un incident interne et/ou externe, les caractéristiques dynamiques des vecteurs d'intensification, la distance, des valeurs seuils, et des facteurs d'influence, mais aussi du temps, il est donc nécessaire de déterminer les temps moyen avant la défaillance d'une cible affectée par les effets physiques.

Le temps de défaillance (t_{ff}) des équipements qui sont exposés à un incident interne ou bien externe est un paramètre fondamental dans l'analyse des accidents dominos [13].

Prenant l'exemple d'un incendie, le t_{ff} d'un équipement exprime la résistance de ce dernier à cet incident externe (ex : radiations thermiques). Considérant t_{ff} est le temps de défaillance (rupture) de l'équipement cible, et t_{int} le temps d'intervention /mitigation. Dans ce cas, on peut stopper l'intensification si on arrive à intervenir avant la défaillance de l'unité cible en comparant le temps de défaillance avec le temps d'intervention. Ce qui est l'objet de cette deuxième méthodologie qui utilise les RdP Stochastiques couplés avec des modèles physiques.

IV.2.1. Les étapes de la méthodologie

Pour limiter l'intensification des effets domino, la disponibilité et l'efficacité des systèmes d'intervention est un facteur très important pour minimiser/limiter les dommages, atténuer la propagation. Pour atteindre cet objectif, on s'intéresse non seulement à l'étude des chaînes en cascade mais aussi comment il serait possible d'intervenir à temps réel, et à quel niveau on peut minimiser ou stopper la séquence

accidentelle, et ainsi aider les décideurs dans leur gestion de crise. Un travail important a été déjà réalisé en utilisant un modèle de Réseau de Petri stochastique (RdPS) (couplage de modèle physiques continus avec des modèles discrets).

Dans cette partie nous présentons les principales étapes de la méthodologie sans rentrer dans les détails.

a. Représentation des états du système :

Un système industriel se compose de plusieurs sous-système ou unités (U_1, U_2, \dots, U_n). Dans le cadre d'analyse des effets domino, ce qui nous intéresse c'est le premier événement qui initie ou cause la défaillance d'une unité, sachant que selon le danger (menace) généré par ce dernier l'unité cible peut être endommagée et/ou détruite. Dans ce cas, chaque unité/ équipement d'un site industriel peut être caractérisé par trois états principaux :

- 1) **Etat 1:** état de fonctionnement normal, les valeurs estimées sont inférieures aux valeurs seuils. L'unité peut être affectée par un vecteur d'intensification(s) généré par un événement primaire.
- 2) **Etat 2:** l'unité cible est affectée/ touchée, dans cet état, la valeur de l'effet physique estimée est supérieure ou égale à sa valeur seuil correspondante. La défaillance de cette dernière dépend principalement de la nature de vecteur d'intensification (menace) et de système d'intervention (de la détection à la rétention). Dans cet état, nous supposons que le temps d'intervention est inférieur au temps de défaillance.
- 3) **Etat 3 :** défaillance de la cible, alors que la valeur estimée de vecteur d'intensification menace(s) est supérieure à sa valeur seuil correspondante, et le temps de défaillance est inférieur au temps d'intervention. Donc la défaillance de cette cible peut générer d'autres menaces qui peuvent à leur tour causer la défaillance des équipements environnants.

b. Transitions entre des états du système :

Prenant le cas de deux unités, les transitions peuvent avoir lieu de l'état 1 à l'état 2 et/ou l'état 3 dans une même unité, et de l'état 3 de la première unité à l'état 2 et /ou l'état 3 de la deuxième unité. La figure ci-dessous représente les transitions possibles dans une même unité et entre deux unités.

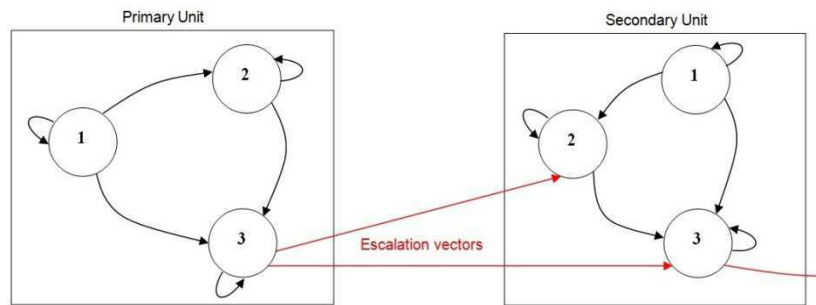


Fig.4 : Transition entre les états

c. Le temps de défaillance :

Le temps de défaillance d'un sous-système cible exposé à un incident interne ou externe est un paramètre très important dans l'évaluation quantitative des accidents en chaîne. Dans notre cas, si on considère que le *tff* est le temps de défaillance (rupture catastrophique) de l'unité cible, ce dernier dépend de:

- La catégorie de chaque équipement;
- La nature de la substance manipulés ou stockée;
- L'intensité et la nature de la menace reçue par le sous-système cible;
- Le lien géographique et les conditions météorologiques;
- L'intervention d'urgence et les caractéristiques du système d'intervention (disponibilité et fiabilité);

d. Le système d'intervention et de sécurité:

La disponibilité et l'efficacité du système d'intervention/ mitigation sont très importantes pour minimiser les dommages et d'atténuer l'intensification. Ces caractéristiques sont prises en compte dans notre étude.

Le temps d'intervention d'une cible spécifique peut être estimé par l'analyse de système de sécurité (systèmes d'automatique, moyens humains). Un système de sécurité robuste peut être modifié pendant la durée de vie de site industriel certains sont destinés à inhiber le développement d'un incident primaire afin d'empêcher sa propagation à d'autres unités. D'autres sont conçus pour réduire les effets.

La détermination du temps d'intervention peut se baser sur l'évaluation des plans d'intervention d'urgence spécifiques et des mesures d'atténuation disponibles sur le

site (nombre et la position des équipes d'urgence, la disponibilité du personnel et de la chaîne d'urgence, etc.). Pour cela nous proposons trois temps qui sont très importants dans l'intervention d'urgence:

- Le temps de détection : c'est le temps nécessaire pour détecter l'incident, il dépend de la fiabilité du système de détection (instruments de mesure, capteurs, le facteur humains (opérateurs), l'erreur humaine et de la météorologie),
- Le temps de réaction (atténuation) : c'est le temps nécessaire pour déterminer les actions et les mesures de mitigation/d'atténuation dans le plan d'urgence, puis démarrez les actions et les mesures d'atténuation.
- Le temps de contrôle : Le temps nécessaire pour maîtriser l'incident et de stopper la propagation ou l'aggravation du phénomène physique. Il dépend des moyens matériels et humains (le nombre et la position des équipes de secours, la disponibilité du personnel et de la chaîne d'urgence, etc.),

Références

- [1] Kadri, F., Birregah, B., Châtelet, E., 2014. Natural Disaster Impacts on Critical Infrastructures: A domino effect-based study. *J. Homel. Secur. Emerg. Manag.*, 11(2) : 217-241.
- [2] Kadri F., and Châtelet E., 2013, Domino effect analysis and assessment of industrial sites: A review of methodologies and software tools, *International Journal of Computers and Distributed Systems*, 2(3) :1-10.
- [3] Kadri, F., Châtelet, E., Chen, G., 2013. Method for quantitative assessment of the domino effect in industrial sites. *Process Saf. Environ. Prot.* 91, 452–462.
- [4] Kadri, F., Châtelet, E., Chen, G., 2011. Method for quantitative assessment of domino effect caused by overpressure, in: Soares, C. (Ed.), *Advances in Safety, Reliability and Risk Management*. CRC Press, pp. 1360–1367.
- [5] Crowl., D., Louvard, J.F., *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications*, Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences, Seconde Edition, 2002.
- [6] Holden, P., Reeves, A.B., *Fragment hazards from failures of pressurized liquefied gas vessels*, *IchemE Symposium Series 93* (1985) 205-220.

- [7] Mebarki, A., Nguyen, Q. B., Mercier, F., Structural fragments and explosions in industrial facilities: Part II - Projectile trajectory and probability of impact, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22(4) (2009) 417-425.
- [8] Hauptmanns, U., A Monte-Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosion, *Probabilistic Engineering Mechanics* 16(4) (2001) 307-312.
- [9] Kadri, F., Châtelet, E., Chen, G., 2011. Method for Quantitative Assessment of Domino Effect Caused by Heat Radiation in Industrial Sites. Presented at the International Conference on Risk Analysis (ICRA4), Limassol, Cyprus, pp. 1–8.
- [10] Kadri, F., Chatelet, E., Chen, G., 2012a. Quantitative Risk Assessment of Domino Effect Caused by Heat Load. *Int. J. Syst. Control* 3, 42–48.
- [11] Van den Bosh, C.J.H. and Weterings, R.A.P.M., *Methods for the Calculation of Physical Effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases) Yellow Book*, The Hague. Third edition First print 1997. Third edition Second revised print 2005.
- [12] Cozzan.,i, V and Salzano, E., Threshold values for domino effects caused by blast wave interaction with process equipment, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17(6), 2004, 437- 447.
- [13] Kadri, F., Lallement, P., Châtelet, E., 2012. The Quantitative Risk Assessment of domino effect on Industrial Plants Using Colored Stochastic Petri Nets, in: PSAM11 & ESREL Conference. Presented at the PSAM11 & ESREL Conference. Helsinki, Finland, p. 10.