



HAL
open science

Analyse d'Effet Domino : Méthodes et Outils

Farid Kadri, Eric Chatelet, B. Birregah

► **To cite this version:**

Farid Kadri, Eric Chatelet, B. Birregah. Analyse d'Effet Domino : Méthodes et Outils. Workshop interdisciplinaire sur la sécurité globale, 2011, pp.1-15. hal-01015142

HAL Id: hal-01015142

<https://hal.science/hal-01015142>

Submitted on 25 Jun 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.

Analyse d'Effet Domino : Méthodes et Outils

Farid Kadri, Eric Châtelet, Babiga Birregah

¹Université de technologie de Troyes, Institut Charles Delaunay, UMR CNRS N°6279

12 rue Marie Curie, BP 2060, 10010 TROYES Cedex

farid.kadri@utt.fr, chatelet@utt.fr, babiga.birregah@utt.fr

Résumé – Dans le domaine des risques, les accidents causés par les effets domino « chaîne d'accidents » 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 effet domino est de plus en plus élevée en raison du développement des complexes industriels, la proximité des installations industrielles, le stockage de substances dangereuses, les réseaux de transport et de la croissance de la population. La diversité de ces facteurs est encore plus critique qu'elles sont souvent liées à l'émergence de nouvelles menaces qui exploitent les actes de malveillance et les erreurs humaines. Bien que la littérature abonde dans plusieurs études sur les effets domino, il est nécessaire d'approfondir leur analyse, et de prêter davantage attention à leur modélisation. Cet article présente les principales méthodes existantes et des outils logiciels pour l'analyse et la modélisation des effets domino. Cet état de l'art se termine par une étude comparative des principales méthodes et outils présentés ci-dessus en mettant l'accent sur les limites rencontrées dans l'application de la présente Approches. Une conclusion et les perspectives sont également proposées.

Abstract – In the field of risks analysis, accidents caused by the domino effect (« chain of accidents») are the most destructive accidents related to industrial sites. The latters, may cause severe consequences on industrial plants, people, structures, environment and economy. The probability of domino effects occurrence is increasingly high due to development of industrial complexes, the proximity of such industrial plant, the storage of dangerous substances, the transportation networks and the population growth. The diversity of these factors is even more critical that they are often related to the emergence of new threats that exploit the malicious acts and human error. Although the literature abounds in several studies on domino effects, it is necessary to deepen their analysis, and pay more attention to their modelling. This article presents the main existing methods and software tools for analysis and modelling of domino effects. This state of art ends by a comparative study of the main methods and tools above presented with a focus on the limits encountered in the application of this approaches. A conclusion and perspectives are also proposed.

1. Introduction

Dans le domaine des risques potentiels, « les effets dominos » sont reconnus depuis 1947, 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.

L'effet domino est responsable de plusieurs accidents catastrophiques dans les industries chimiques et les zones de stockages. On peut noter aussi que les accidents causés par les effets dominos sont parmi les accidents les plus graves relatifs aux sites industriels. Par conséquent, le risque potentiel de ces scénarios d'accidents est largement reconnu dans la législation depuis la première directive « Seveso I » [1], cette dernière exige l'évaluation des effets domino dans l'analyse de la sécurité industrielle. En outre, la deuxième directive «Seveso II» [2] 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.

En France, la base de données ARIA [3], 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 [4], montrent que la fréquence des accidents dominos est élevée dans les usines des procédés chimiques et de transport. Récemment, l'analyse historique des accidents domino [5] où ils ont étudié 261 accidents impliquant les effets dominos, montre que, en plus des causes de défaillances mécaniques et les événements externes, la fréquence des accidents dominos causés par facteur humain est relativement élevée, d'où l'importance d'intégrer les facteurs humains et organisationnels dans l'étude des chaînes en cascades.

Malgré cela, des catastrophes en cascade restent relativement peu étudiés, peu d'attention portée sur l'étude des vecteurs d'intensification des effets domino, les méthodes disponibles dans la littérature sont limitées dans leur capacité à gérer la complexité de ce phénomène [6].

L'objectif de cet article est de présenter les principales méthodes existantes et des outils logiciels pour l'analyse des effets domino, la deuxième partie de cet article est consacrée à la définition d'effet domino et ses principales caractéristiques. La troisième partie est dédiée à la modélisation de l'effet domino et la classification des différentes méthodologies et des outils logiciels et, en conclusion, des perspectives sont suggérées.

2. Définition des effets dominos

En ce qui concerne la définition des effets dominos, plusieurs auteurs [7-9] 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.

2.1 Principales caractéristiques des effets dominos

On distingue quatre éléments fondamentaux pour caractériser un effet domino:

- 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. Les auteurs intéressés par les sources, les cibles et le processus de propagation des effets dominos, peuvent consulter [10,11] où un travail principale a été réalisée dans le cadre de projet DISC « Détermination des Impacts de Sinistre en Cascade » qui vise à développer des méthodes et un outil de simulation pour étudier les effets domino impliquant installations industrielles et des structures sensibles.

3. Modélisation des effets dominos

Plusieurs modèles 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, ainsi que, les risques naturels. Nous trouvons des modèles qui servent à évaluer :

- 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 [12,13].

- 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 scénarios accidentels responsables de la projection des fragments sont i) l'explosion due à la déflagration confinée, et ii) BLEVE (boiling liquid expanding vapor explosion) [14,15].
- Effet domino causé par les risques naturels comme tremblement de terre, inondation, tempête, et la foudre [16].

3.1 Méthodes et outils d'évaluation des effets dominos

Pour résoudre le problème posé par l'évaluation et / ou l'analyse des effets domino dans les sites industriels, plusieurs méthodes et outils logiciels ont été développés sur le marché. Généralement, chaque méthode traite un cas spécifique d'effet domino.

3.2 Les méthodologies

3.2.1 Méthodologie d'analyse d'effet domino (DEA)

La procédure d'analyse d'effet domino (DEA) proposée par [17], cette méthode comprend deux niveaux d'étude. Le niveau « I » est une analyse détaillée afin d'identifier les unités qui peuvent être considérées comme des cibles d'effets domino. Pour cela les valeurs seuils des différents effets physiques sur les équipements (cibles) sont utilisées (surpression de 0,7 atm, charge thermique de 37 kW/m^2 , et une vitesse de fragment supérieure à 75 m / s à condition qu'il rentre en collision avec une cible). Si les valeurs estimées de ces paramètres sont plus élevées que les valeurs seuils, une deuxième étude (niveau II) est nécessaire. A ce niveau « II », une analyse détaillée doit être faite pour vérifier l'existence d'effet domino, en utilisant les dommages potentiels de l'événement primaire et les caractéristiques de l'unité secondaire. Les caractéristiques à prendre en considération sont :

- la forme et le matériau de construction de l'unité cible,
- le procédé industriel et les conditions opératoires,
- propriétés et quantités des substances chimiques utilisées,
- la localisation de l'unité cible en termes de distance et le degré de liaison,
- la météorologie et surtout la direction dominante du vent.

3.2.2 Méthodologie MCAS

La méthodologie MCAS (*Maximum-Credible Accident Scenarios*), développée par [18] permet d'évaluer tous les scénarios d'accidents crédibles dans une unité industrielle. La première étape de cette méthodologie est de développer tous les scénarios d'accident possibles. Dans la deuxième étape, les rayons de dommage sont calculés pour chaque scénario, pour cela on peut utiliser les indices proposés par les auteurs [19,20]; indice de dommage d'explosion et d'incendie (*FEDI*, Fire and Explosion Damage Index) pour les substances inflammables, et indice de dommage toxique (*TDI*, Toxic Damage Index) pour les substances toxiques. Dans l'étape suivante, la probabilité de chaque scénario est estimée, cela peut être réalisé en utilisant les données industrielles spécifiques (taux de défaillance des différents composants (équipements) utilisés dans l'unité concernée ou les données disponibles dans la littérature (fréquence d'occurrence de même événement dans les des conditions similaires). Si l'accident est jugé crédible, une estimation plus précise de sa probabilité d'occurrence doit être faite dans les étapes qui suivent.

3.2.3 Méthodologie SCAP

La méthodologie « SCAP » (Safety, Credible Accidents, and PFTA (Probabilistic Fault Tree Analysis) est le fruit d'une combinaison de deux approches [21,22]; la méthode MCAA (Maximum Credible Accident Analysis) et la méthode PFTA dans le but de développer une nouvelle méthodologie pour une approche plus réaliste et plus fiable pour l'évaluation efficace des mesures sécurité et de contrôle des risques. Les caractéristiques de chacune des étapes de l'algorithme SCAP sont :

- l'identification des dangers en utilisant les indices; *FEDI* (Fire and Explosion Damage Index) et *TDI* (Toxic Damage Index),
- l'évaluation quantitative des risques: *MCAA* et *MAXCRED*, et
- l'analyse probabiliste par arbre de défaillance et l'outil automatisé *PROFAT*.

3.2.4 Méthodologie ORA

Pour l'analyse des risques dans les industries pétrochimiques, les auteurs [23] ont proposé une méthode d'analyse optimale de risques *ORA* « Optimal Risk Analysis », elle comporte 4 étapes principales :

- identification et sélection des dangers,
- évaluation des risques (qualitative et probabiliste),
- quantification des risques / l'analyse des conséquences, et
- estimation des risques.

Pour maîtriser les risques dans les unités industrielles cette procédure (*ORA*) exige :

- l'utilisation des réservoirs de petite capacité dans le stockage des substances chimiques,
- l'inspection régulière et approfondie des équipements, et des installations, et
- un espace suffisant devant être maintenu entre les réservoirs de stockage (distance de sécurité), et installés dans les locaux de stockage et les zones sensibles.

3.2.5 Méthodologie ARAMIS

La modélisation des dommages causés par les explosions et les incendies aux équipements industriels en raison des différents vecteurs d'intensification (radiation thermique, surpression et la projection des fragments) et les modèles spécifiques de vulnérabilité issus de plusieurs catégories d'équipements de procédés ont été utilisés dans la méthodologie *ARAMIS* [24, 25] pour l'analyse d'effets dominos.

ARAMIS permet l'identification des risques d'accidents majeurs. Elle est fondée principalement sur l'utilisation de diagramme «noeud papillon» composé d'un arbre de défaillance et d'un arbre d'événement. L'apport majeur d'*ARAMIS* est de définir en précisant la structure de noeud papillon: la liste des équipements, les événements potentiels critiques et leurs conséquences. Les événements critiques ont été définis soit par une perte de confinement pour les fluides ou une perte d'intégrité physique pour les matières solides et la description du site industriel, y compris les substances chimiques utilisées, produites ou stockées.

3.2.6 Modèle de propagation de la panique

L'auteur dans [26] a étudié le module de la panique des automobilistes lors d'une inondation comme « effet de dominos ». Pour modéliser la diffusion de la panique à l'intérieur d'une population, il a inspiré son modèle de celui de *W. Kermack et de A. McKendrick*. Ce modèle créé en 1927 permet d'étudier la propagation d'une maladie infectieuse à l'intérieur d'une population. Et il est possible d'établir une série de points de rapprochement entre les deux phénomènes d'épidémie et de panique :

- chacun est susceptible de contracter et propager la maladie (la panique),
- il y a une nécessité de contact entre un malade (émetteur de la panique) et un individu sain (récepteur), et
- chaque individu a des chances de contact identiques.

Le modèle de base de *W. Kermack et de A. McKendrick* se compose de deux stocks, la population susceptible d'être infectée (*Sp*) et la population infectée (*I*), variant l'un l'autre selon un taux de contact. Le flux de contagion représente la population qui est atteinte par la maladie. Cette population quitte le stock *Sp* pour alimenter le stock *I*. L'épidémie se développe par effet de contact. Il en va de même de la panique. D'où ce choix initial.

3.2.7 Méthode d'évaluation quantitative des risques sismiques

La méthodologie analytique pour l'évaluation quantitative des risques industriels dus aux accidents générés par les événements sismiques a été développée par [27]. Le point de départ de la procédure est l'utilisation des données disponibles pour l'évaluation de la fréquence et la magnitude des événements sismiques. Les modèles de probabilité de défaillance des équipements disponibles (courbes de vulnérabilité ou de fragilité) ont été aussi utilisés pour évaluer la probabilité de dommages causés aux équipements.

Après avoir identifié les événements sismiques crédibles et les équipements critiques, qui sont susceptibles de causer des accidents majeurs comme conséquences causées par le tremblement de terre, les scénarios de références doivent être

associés à chaque équipement critique, En se basant sur les scénarios de référence identifiés pour chaque équipement, une procédure spécifique doit être appliquée pour l'identification de tous les scénarios possibles. Afin de tenir compte du fait que plus d'un scénario de référence peut avoir lieu simultanément en raison des dommages de plus d'une unité, l'évaluation des conséquences des scénarios résultants doit être effectuée en combinant les conséquences de chacun des événements accidentels identifiés. Enfin, une procédure de recombinaison classique des risques peut être appliquée pour calculer la contribution des scénarios accidentels induits par les événements sismiques sur le risque individuel et social.

L'objectif de cette procédure est de :

- Identifier les scénarios d'accident (événement secondaire) qui peuvent suivre l'événement sismique,
- Evaluer la crédibilité des événements accidentels,
- Evaluer les conséquences des scénarios possibles.

La procédure a été implémentée sur le logiciel GIS (Geographic Information System), pour faciliter l'évaluation des séquences d'événements qui sont susceptibles d'être générées par les dégâts d'un événement sismique dans une installation industrielle. Le logiciel permet également le calcul et la représentation des courbes de risque individuel et social dû aux accidents industriels déclenchés par un événement sismique.

3.2.8 Méthode d'évaluation quantitative des risques générés par la foudre

Cette procédure est développée par [28], les auteurs ont proposé une approche sous forme d'un organigramme pour l'évaluation quantitative des scénarios d'accidents générés par la foudre sur les sites industriels. La foudre peut causer des dommages sur les sites industriels causés par la libération de grandes quantités de composés dangereux. Le risque dû à la foudre semble être en augmentation à cause de changement climatique causant une augmentation de la fréquence des orages violents.

Les principales étapes de la méthodologie est :

- la caractérisation des événements externes (fréquence et gravité),
- l'identification des équipements cibles, et les scénarios de référence,
- l'estimation de la probabilité des dommages, et évaluation des conséquences pour les événements,
- évaluation de la fréquence / probabilité pour chaque combinaison d'événements.

3.2.9 Méthodologie SIGALEA

L'INERIS [29,30] a développé un outil de cartographie des risques, SIGALEA (Outil d'analyse cartographique des risques), qui permet à l'inspection des Installations Classées (DRIRE et STIIC) de cartographier les aléas technologiques dans le cadre des Plans de Prévention des Risques Technologiques (PPRT). Cet outil permet :

- de réaliser la cartographie des zones d'effets des phénomènes dangereux, que doit comporter réglementairement l'Étude De Dangers (EDD) ;
- d'évaluer l'impact d'une installation ou d'un établissement sur la cartographie des aléas d'un site PPRT.

SIGALEA est une application SIG «Système d'Information Géographique» qui permet de géo-localiser des phénomènes dangereux, d'analyser et de cartographier leurs zones d'effets et les aléas technologiques. Ce logiciel est mis à la disposition de l'administration depuis 2005. La version 2 (novembre 2006) de SIGALEA intègre le retour d'expérience des premiers utilisateurs.

Le logiciel SIGALEA contient deux modules principaux :

- 1) Module de géo-localisation des phénomènes dangereux: permet de localiser géographiquement les phénomènes dangereux sur une base de données en associant pour chacun d'eux le un type d'effet (thermique, toxique ou surpression), les distances d'effets selon les seuils réglementaires associés, un niveau de probabilité, et la cinétique.
- 2) Module d'analyses spatiales et de cartographie, ce deuxième module permet d'élaborer grâce à des analyses spatiales, les cartographies des phénomènes dangereux avec les zones d'effets et les aléas technologiques

intégrant les dimensions probabilistes dont les résultats sont ; la cartographie des effets des phénomènes dangereux, et la cartographie des aléas technologiques.

3.2.10 Méthodologie HAZWIM

La combinaison de l'analyse Hazop, What-If et Risque Matrix dans le cadre Hazwim [31,32] permet de constituer un outil de méta-technique pour optimiser l'organisation des performances d'analyse des dangers dans les sites industriels. Ce dernier vise à concevoir un système de prévention des accidents dominos externe (External Domino Accident Prevention, EDAP)

L'objectif de ce dernier (cadre de prévention des accidents domino externes) est de faciliter la structuration de la coopération pour prévenir les effets dominos hors site entre les installations industrielles et / ou de stockage de substances dangereuses. Le cadre devrait inclure une solide analyse des risques externes d'effet domino constitué de deux étapes fournissant des informations clés sur la gestion de risque domino externes:

- identification des dangers externes, et
- évaluation des risques dominos externes.

3.2.11 Algorithme FREEDOM (FREquency Estimation of DOMino accidents)

FREEDOM est une nouvelle méthodologie pour évaluation de la fréquence d'effet domino développé par [6]. Pour simuler le comportement réel des systèmes multi-unités qui peuvent subir des effets dominos, ce dernier, repose sur plusieurs expériences hypothétiques. Dans ce contexte, le système est défini comme la combinaison des équipements présents dans une unité d'un site industriel qui peuvent influencer sur la défaillance les uns et des autres.

L'algorithme examine la défaillance ou non de chaque équipement, cet algorithme se compose de deux boucles interne et externe, la boucle interne représente la durée de vie moyenne des équipements, qui est sélectionnée en se basant sur les taux de défaillance des équipements. L'ordre de la durée de vie de simulation pour l'équipement est choisi en fonction du temps moyen entre les défaillances MTBF (Inverse du taux de défaillance). La boucle externe qui représente le nombre d'itérations (expériences) qui sont effectuées.

3.2.12 Méthode d'évaluation l'effet des projectiles

Les auteurs [33-36] ont étudié l'effet de la portée des projectiles engendrés après l'explosion d'un réservoir cylindrique. Les caractéristiques des projectiles sont considérées comme aléatoires. Ils ont proposé un modèle qui permet de décrire le mouvement de projectile en considérant sa forme et sa taille. Ceci permet d'évaluer la probabilité d'impact entre un projectile et une cible. Ils ont adopté un modèle mécanique afin d'estimer la profondeur de pénétration de la cible impactée, puis parvenir à l'estimation du risque global. Cette méthodologie permet de dégager une vue globale de l'effet domino. Elle se compose de trois étapes principales :

- 1) Modélisation probabiliste des termes source: probabilité d'occurrence de la première explosion et donc le nombre, la masse, la vitesse, les angles de départ, la forme géométrique, les dimensions et les propriétés des matériaux de construction sont décrits avec des distributions probabilistes.
- 2) Modélisation probabiliste de la cible (d'abord des cibles touchées): nombre de projectiles (nombre de projectiles qui affectent la cible), vitesse, les angles, l'énergie au moment de l'impact, les matériaux de construction, les dimensions des cibles touchées et les profondeurs de pénétration des projectiles dans les cibles sont aussi décrits avec des distributions probabilistes.
- 3) Evaluation des risques de deuxième scénario d'explosion qui peut avoir lieu dans les cibles affectées.

Les auteurs ont démontré que i) la réduction d'énergie cinétique pendant le mouvement dépend à la fois de la distance entre la source des fragments et la cible, et la forme de fragment, ii) la probabilité d'impact dépend à la fois de la distance entre la source des fragments et la cible, et la taille des fragments, iii) le type de fragment qui peut impacter et / ou causer la défaillance de la cible dépend de l'angle entre les axes de la source d'explosion et la cible, mais elle ne dépend pas de la distance entre la source et la cible.

3.3 Les outils automatisés et logiciels

Certains outils automatisés ont été développés pour l'analyse des effets dominos et l'évaluation des risques d'accidents dans les industries de traitement chimique et les complexes industriels.

Pour l'évaluation rapide des risques (*RRA*, Rapid Risk Assessment) dans les industries de transformation chimique les auteurs [37] ont développé un logiciel *MAXCRED* (MAXimum CREDdible accident analysis). *MAXCRED* est un logiciel développé par (Risk Assessment Division of Centre for Pollution Control and Bio-Waste Energy, 1994). Ce dernier permet la simulation des accidents et l'estimation de leurs dommages potentiels. Il a été développé pour effectuer une analyse quantitative des risques. Cet outil génère différents scénarios d'accident crédibles et quantifie les dommages qu'ils peuvent causer. Cette information peut alors être utilisée dans le développement des stratégies pour la prévention des accidents et d'atténuation leurs effets d'impacts.

Le logiciel comprend quatre modules principaux :

- 1) Module de génération de scénarios : Il permet le développement de scénarios d'accidents en fonction des propriétés de produits chimiques, les conditions de fonctionnement et les façons probables des dysfonctionnements qui pourraient provoquer des rejets accidentels,
- 2) Module d'analyse des conséquences : Il utilise les scénarios d'accidents développés précédemment (premier module) et des modèles avancés de la thermodynamique, transfert de chaleur et la dynamique des fluides pour prévoir la nature des accidents et leurs potentiels de causer des dommages. Ce module permet également l'estimation des rayons de dommages et les probabilités de degré de dommages,
- 3) Le module « fichier » : Permet à l'utilisateur de gérer facilement les informations entrée / sortie et les graphiques, et
- 4) Le module graphique : Il génère des scénarios visuels des accidents.

Les mêmes auteurs [38] ont proposé une nouvelle version *MAXCRED-II* (version améliorée du logiciel *MAXCRED*). Le logiciel est constitué de quatre modules principaux : les données, génération des scénarios, l'analyse des conséquences et le traitement des dossiers. L'option de données gère les informations générales relatives aux propriétés des différentes substances chimiques, les opérations et leur environnement nécessaire à l'exécution des différents modèles.

Comme ce dernier ne prend pas en considération les effets dominos, ils ont (Khan et Abbasi, 1998) [33,40] développé un outil automatisé « *DOMIno eFFECT* », qui succède *MAXCRED*. Le logiciel *DOMIFTECT* est codé en C++. Il se compose de six modules principaux : module des données d'entrée, scénario d'accident, module d'analyse, module de domino, graphiques et l'interface utilisateur. Chaque module est constitué de plusieurs sous-modules et des fonctions. Cet outil permet d'estimer :

- les risques d'incendie, d'explosion, intoxication et la combinaison de ces derniers,
- la probabilité d'un deuxième accident qui peut être déclenché par un accident primaire, et
- les scénarios de deuxième accident, leurs dommages potentiels et la probabilité de causer un troisième accident.

Une dernière version du logiciel *MAXCRED-III*, proposé par les mêmes auteurs [41], a été développée dans le but de fournir une approche plus souple et un outil précis pour l'évaluation rapide des risques. Cet outil est plus sophistiqué, il a des capacités nettement supérieures par rapport aux versions précédentes, il prend en considération l'effet domino (cascade d'événements). *MAXCRED-III* a cinq modules essentiels :

- Module de génération des scénarios,
- Module d'analyse des conséquences,
- Module de domino,
- Module de documentation, et
- Module graphique.

Pour évaluer les conséquences des événements accidentels qui peuvent se produire dans des sites de stockage, un logiciel *ATLANTIDE* [42] a été développé. L'application d'*ATLANTIDE* est appropriée pour le stockage de GPL et les

installations de transformation (les rejets liquides, la dispersion des gaz et d'autres phénomènes tels que le BLEVE et la boule de feu). Ce code utilise des arbres d'événement pour évaluer tous les scénarios possibles, depuis l'événement accidentel initial, en tenant compte des conditions météorologiques, les différentes libérations, le mode et d'autres caractéristiques typiques aux installations du site.

Pour l'application de la méthodologie RRA (Rapid risk Assessment) dans les raffineries pétrolières et les industries pétrochimiques, les auteurs dans [43] ont développé un logiciel *TORAP* (TOol for Rapid risk Assessment in Petroleum refinery and Petrochemical industries) (outil pour l'évaluation rapide des risques dans les raffineries de pétrole et les industries pétrochimiques), ce dernier est codé en C++. Le logiciel est compatible avec l'environnement d'exploitation WINDOWS. Il est utilisable sur des ordinateurs avec un minimum de 8 Mo de RAM et 32 Mo de ROM.

Ce logiciel peut être appliqué dans l'évaluation des risques d'accidents (incendies, explosions et les rejets toxiques) dans les raffineries pétrolières et les industries pétrochimiques, *TORAP* est composé des étapes essentielles suivantes :

- génération des scénarios d'accident,
- analyse des conséquences,
- vérifier les degrés les plus élevés d'accidents, et
- caractérisation du scénario d'accident le plus pire.

En 1999, les auteurs ont développé une méthodologie *ASM* « Analytical Simulation Methodology » [44]. Cette méthodologie utilise les arbres de défaillance pour l'analyse et l'évaluation probabiliste des risques dans les industries chimiques. La méthodologie *ASM* est basée sur :

- le développement de tous les événements par l'arbre de défaillance,
- la détermination de l'ensemble de coupes minimales ou le chemin le plus court en partant de l'événement initiateur (dysfonctionnement) à l'événement top (l'accident majeur),
- l'analyse de probabilité, et
- l'élaboration de valeurs d'indice d'amélioration.

Sur la base de cette méthodologie (*ASM*), (Faisal I. Khan, S.A. Abbasi, 2000) [45] ont développé un progiciel *PROFAT* (*PRO*babilitistic *fault tree analysis*) afin de faciliter l'utilisation rapide et efficace de la méthodologie. *PROFAT* est codé en C++, il se compose de Six modules principaux suivants :

- données,
- analyse des coupes minimales,
- analyse de probabilité,
- analyse de l'amélioration des facteurs, et
- les modules d'objectif général.

Ce dernier permet à l'utilisateur de connaître :

- l'événement initiateur qui peut éventuellement conduire à un accident majeur,
- les coupes minimales et la combinaison des événements qui peuvent avoir lieu,
- les probabilités d'occurrence des accidents,
- la contribution relative de chaque événements initiateurs, et
- l'identification des événements initiateurs qui ont le plus grand potentiel de causer l'événement top pour que les stratégies de prévention d'accidents et les plans d'intervention d'urgence puissent se concentrer sur eux.

Afin d'énumérer tous les effets dominos possibles qui peuvent conduire à des accidents domino internes et externes, le logiciel *DOMINOXL* a été développé par [46] pour les zones d'équipement dangereux dans un groupe d'installations chimiques d'un site industriel sont déterminés en additionnant le nombre de effets domino primaire par installation conduisant à un facteur de dangerosité (DF). De même, les zones les plus vulnérables sont également déterminées en additionnant le nombre des effets dominos d'une installation, puis l'examen d'une installation secondaire d'un niveau de protection donné. Ce calcul aboutit à un facteur de vulnérabilité (VF).

Dans le but de développer un outil méthodologique pour gérer les accidents majeurs dus à l'effet domino, le logiciel « *GeOsiris* » développé dans [47, 48], ce dernier est un outil de simulation des accidents industriels impliquant des effets dominos. *GeOsiris* est un couplage de deux logiciels *Osiris* et *Geoconcept* : i) *OSIRIS* est un Outil de Simulation des RISques, ce dernier simule différents types d'accidents tels que la libération/ rejet des substances toxiques et gaz, explosions et incendies, et ii) *Geoconcept* est un système d'information géographique (SIG) qui permet le traitement des

informations géographiques. Une méthodologie est proposée pour prendre en compte l'effet domino selon les valeurs seuil.

STARS Domino (Software Toolkit for Advanced Reliability and Safety analysis Domino) développé par [49], ce dernier se compose de quatre modules: la base de données, modèle du système, l'arbre de défaillance et l'arbre d'événements. Dans le module arbre d'événements, il existe des outils disponibles pour créer un arbre d'événements et exécuter des modèles de calcul externes, ce dernier, est utilisé pour construire les scénarios accidentels et de simuler les événements phénoménologique.

Le logiciel MiniFFECT (MINImization of domino eFFECT) est un développé par [50], qui permet de déterminer la position des unités ou / et installations chimiques et la position optimale afin de minimiser le l'effet domino dans les installations industrielles en utilisant des approches de programmation non linéaire. Le logiciel MiniFFECT montre la position de chaque unité en coordonnées cartésiennes. Lorsque les unités explosives sont placées dans la première étape, les n unités explosives peuvent être répartir de telle manière à minimiser les effets dominos en tenant compte de taille arbitraire du site. Cette méthode prend en compte trois principaux facteurs d'effet domino: thermique, suppression effet des missiles.

Egalement un logiciel (*GIS, geographical information system*) a été développé par (Valerio Cozzani et al, 2006)[51] pour l'évaluation quantitative d'effet domino en se basant sur les valeurs seuils disponibles dans la littérature, le modèle probit et les catégories des équipements. Cette procédure est basée sur une méthodologie systémique pour l'identification des scénarios dominos, l'évaluation des conséquences et les fréquences probables des événements d'intensification. Cette méthodologie permet :

- une analyse quantitative des scénarios dominos,
- l'évaluation du risque individuel et social, et
- l'identification des cibles dominos possibles par le calcul des effets physiques ayant une influence sur les équipements de site industriel et la comparaison avec des valeurs seuils.

Pour déterminer par ordre de priorité les effets dominos dans une zone industrielle, sur un seul ou bien plusieurs niveaux dans le site, les auteurs [52] ont proposé un outil informatique automatisé *DomPrevPlanning*, qui se base sur trois documents principaux : Instrument Domino Effects (IDE), the Manual for failure frequency figures et Guidelines for quantitative risk assessment. Cette stratégie permet :

- l'analyse des risques dominos,
- la comparaison des installations d'une zone industrielle, et
- la classification des d'installations chimiques qui sont susceptibles de provoquer les effets d'intensification, cette classification peut être alors utilisée pour prendre des décisions dans les zones complexes d'effets dominos et la hiérarchisation des risques.

3.4 Discussion

Les méthodologies et logiciels revue de la littérature, montre que ces derniers sont très spécifiques d'où le manque des études qui fédèrent ces différentes approches. Les méthodologies proposées ne prennent pas en considération le facteur humain qui peut influencer et / ou aggraver la situation [5], d'où l'importance d'intégrer les facteurs humains et organisationnels dans l'étude des chaînes en cascades.

Les outils logiciels ne résolvent pas le problème d'effet domino que partiellement, et ne prennent la complexité de ce phénomène au sérieux, la plupart d'entre eux sont spécifiques à l'étude de certains vecteurs d'intensification sans aborder les notions de dépendance entre ces effets physiques et d'autres qui peut conduire à des conséquences très graves.

Les principales causes d'accidents domino sont les interdépendances et les interactions entre les installations (équipements) d'un site industriel, l'environnement, facteurs humains et organisationnels. Cela, peut générer de nombreuses séquences d'accident (chaînes d'accidents) qui propagent la dégradation d'un système (site industriel) à l'autre. Comme tous ces phénomènes sont des phénomènes physiques qui dépendent d'un certain nombre de paramètres physiques (variables) (comme la température, pression, concentration ...) et la variable temps. Par conséquent, on peut considérer que les effets domino comme des systèmes dynamiques.

Par conséquent, le phénomène d'effet domino peut être modélisé comme un système dynamique qui prend en compte non seulement la dépendance des paramètres physiques mais aussi, le système d'intervention / mitigation et le facteur humain et organisationnel, la logistique, et aussi, l'intervention (matérielles et humaines) en temps réel.

Les tableaux 1 et 2 résument les limites des principales méthodes et logiciels proposés dans la littérature.

Tableau 1. Etude comparée des méthodes et de leurs limites

Méthodes	Domaine d'application	Objet /principe	Limites
Méthodologie DEA	Industrie (chimique)	D'une unité à une autre si possible	- reste assujéti à la pertinence du découpage du système en unités, - besoin de valeurs seuils plus génériques, - ne prend pas en considération le facteur humain.
Méthode MCAS	Industrie chimique matières toxiques et inflammables	Local à l'unité Classification des scénarios	- ne prend pas en considération la propagation d'effet domino inter-unités, - se limite à la classification des scénarios primaires sans étudier les scénarios de degré plus élevés, - ne prend pas en considération le facteur humain comme un paramètre qui peut influencer le processus, - n'explique pas le processus de génération des scénarios.
Procédure ORA	Industrie (pétrochimique)	Estimation de risques	- spécifique à l'analyse des risques, - ne traite pas à proprement parler des effets dominos.
Méthodologie SCAP	Industrie	Evaluation des risques et mesure de sécurité	- reste dépendant d'autres approches (MCAS, PFTA, ...).
Méthodologie ARAMIS	Industrie chimique et stockage	Identification des risques (nœud papillon)	- ne traite l'aspect d'effet domino que partiellement, - ne prend pas en considération les risques d'origine naturels, - n'intègre pas le facteur humain.
Modèle de propagation de la panique	Risque naturelle (Inondation)	Paniques des automobilistes	- limitée au module de la panique, sans prendre en considération les autres facteurs qui peuvent favoriser ou modérer l'effet domino.
Méthode d'évaluation quantitative des risques sismiques	Risque naturel (sismique)	Evaluation de PGA (Peak Ground Acceleration)	- manque de données pour caractériser l'événement initiateur, - méthode analytique très générale qui n'intègre pas le facteur humain.
Méthode d'évaluation quantitative des risques générés par la foudre	Risque naturel (foudre)	Risques causés aux équipements par la foudre	- méthode très simplifiée. - manques de données concernant les valeurs seuils, - ne prend pas en compte l'intensification des événements (cascade).
Méthodologie SIGALEA	Industrie	Analyse et cartographie des risques	- ne prend en considération les effets en cascades que partiellement, - l'aspect humain et organisationnel n'est pas pris en compte.
Méthodologie HAZWIM	Industrie	Analyse des dangers	- spécifique au traitement des accidents dominos externes au site industriel, - dépendant d'autres approches (Hazop what-it,...)
Algorithme FREEDOM (FREquency Estimation of DOMino accidents)	Industrie (système)	Comportement de système multi-unité, défaillance d'un équipement	- traite les effets domino qu'en interne par rapport au site, - ne prendre en considération les autres systèmes environnant, - ne prend comme critère que la défaillance des composants.

Tableau 2. Etude comparée des outils logiciels et de leurs limites

Logiciels	Domaine d'application	Object / fonctionnement	Limites
<i>MAXCRED</i>	Industrie de transformation chimique	Simulation et estimation des dommages	- seule la dernière version (<i>MAXCRED-III</i>) traite partiellement de la cascade d'événements.
<i>DOMIno eFFECT</i>	Industrie (chimique et pétrochimique)	Simulation et estimation des risques inflammables et toxiques	- ne traite que les scénarios inflammables et toxiques sans prendre en considération les risques naturels, - ne prend pas en considération le facteur humain comme des événements primaires qui peuvent influencer la chaîne d'accident.
<i>ATLANTIDE</i>	Stockage de GPL et les installations de transformation	Evènements accidentels dans des sites de stockage	- outil spécifique au risque de stockage, - ne traite pas proprement les effets dominos, se limite à l'étude de danger à l'intérieur de même site.
TORAP	Raffineries pétrolières et les industries pétrochimiques	Risques dans les installations pétrochimiques et pétrolières	- spécifique à l'industrie pétrolière, - prise en compte partielle des accidents dominos, - n'intègre pas les accidents d'origine naturelle et humaine.
DOMINOXL	Industrie (chimique)	Zones / installations vulnérables, énumération des effets dominos	- se limite à traiter l'effet domino dans une seule installation, - ne prendre pas en considération l'intensification des effets dans d'autres installations environnantes.
GeOsiris	Industrie chimique et transformation	Simulation des accidents domino	- ne traite que les scénarios avec substances inflammables et toxiques, - prend en considération les risques naturels, - ne prend pas en considération les facteurs humains et organisationnels.
MiniFFECT	Industrie (chimique)	Minimisation les effets des risques dominos	- ne prend en compte que les unités d'une installation industrielle, - ne prendre pas en compte les structures environnantes et les écosystèmes.
<i>DomPrevPlanning</i>	Industrie (zones industrielles)	Risques domino, classification des installations	- évaluation des effets dominos limitée à l'intérieur du site industriel, - ne prend pas en considération la propagation des effets hors sites, - ne prend pas en considération les facteurs humains et organisationnels.

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons identifié les principales méthodes existantes et les outils logiciels utilisés pour l'étude et l'analyse des effets dominos (chaînes en cascade). La revue de la littérature montre, qu'il existe quatre vecteurs par lesquels un effet domino peut se propager d'une unité (ou d'un site) à un autre. Ces vecteurs sont l'incendie, l'explosion, le rejet de matières toxiques et les autres rejets dangereux.

Malgré de nombreuses études dans la littérature, les méthodes disponibles sont en général basées sur des techniques d'analyse qui sont limitées dans leur capacité à gérer la complexité du phénomène d'effets dominos. Ces modèles sont, en général, très simplifiés et très spécifiques pour certains types de vecteurs d'intensification. En effet, à ce jour, il n'existe pas de modèle générique qui prend en compte les effets des accidents dominos en raison de leurs complexités associées à leur caractère émergent. Nous pouvons également remarquer qu'il n'existe pas de méthodologies qui prennent en compte les risques des catastrophes naturelles (risque inondation, sismique, et foudre...) qui peuvent générer une chaîne d'accidents en dépit de leur danger potentiel sur les sites industriels, les populations, les infrastructures et les écosystèmes. Les outils logiciels ne fournissent pas de réponses homogènes aux problèmes des accidents dominos dans les complexes industriels. Ainsi, les efforts supplémentaires sont nécessaires pour déterminer les causes des effets dominos et comment prévenir et atténuer leurs conséquences

Une caractéristique importante de nombreux systèmes industriels est leurs aspects dynamiques dus aux changements qu'ils supportent en fonction du temps en raison des interactions entre leurs composants et/ou avec leur environnement. Chaque comportement donné du système est défini par les lois physiques propres et le passage par un mode dû aux conditions atmosphériques, à une intervention humaine, à l'action de l'organe de contrôle, etc.

Par conséquent, ces phénomènes peuvent être modélisés comme des systèmes dynamiques qui, en plus des vecteurs d'intensification, doivent prendre en compte, les facteurs humains et organisationnels comme des paramètres qui peuvent initier, influencer ou aggraver le phénomène, ainsi que la logistique, et l'intervention en temps réel (matérielles et humaines). Pour remédier à cela, on peut utiliser des modèles qui prennent en compte les aspects déterministes et probabilistes, ou le couplage des deux.

Références

- [1] European community directive (82/501/ EEC).
- [2] Council directive 96/82/ec on the control of major-accident hazards involving dangerous substances.
- [3] Ministre de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire. « Inventaire 2009 des accidents technologiques », 19 pages, 2009.
- [4] B. Abdolhamidzadeh, D. Rashtchian, M. Morshedi, Statistical survey of domino past accidents, in: 8th world congress of chemical engineering, Montreal 317, 6 pages, 2009.
- [5] F. Clini, R. M. Darbra, J. Casal, Historical analysis of accidents involving domino effect, in: Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali. Universit di Bologna.Via Terracini, 28. 40126. Bologna (Italy). Centre d'Estudis del Risc Tecnolgc (CERTEC). Department of Chemical Engineering. Universitat Politcnica de Catalunya. Diagonal 647, 08028-Barcelona. Spain, 2009.
- [6] A. Bahman, A. Tasneem, D. Rashtchian, S. Abbasi, A new method for assessing domino effect in chemical process industry, *Journal of Hazardous Materials* 182 (2010) 416-426.
- [7] F. P. Lees, *Loss prevention in the process industries* (2nd Edition), Butterworth-Heinemann, 1996.
- [8] D. F. Bagster, R. M. Pitblado, The estimation of domino incident frequencies - an approach, part B, *Trans IChemE* 69 (1991) 195-199.
- [9] J. Gledhill, I. Lines, Development of methods to assess the significance of domino effects from major hazard sites, Tech. rep., CR Report 183, Health and Safety Executive (1998).

- [10] E. Châtelet, F. Kadri, P. Laclémence, P. Lallement, Ph. Aubert, M. Eid, P. Gilibert, Détermination des Impacts de Sinistres en Cascade: état de l'art et méthodes d'analyse, WISG 2010, Troyes, France, 26-27 Janv. (2010).
- [11] F. Kadri et E. Chatelet, Domino Effect Analysis and Assessment of Industrial Sites: A Review of Methodologies and Software Tools, *International Journal of Computers and Distributed Systems*, (2013), vol. 2, n° 3, p. 1-10.
- [12] F. Kadri, P. Lallement, et E. Chatelet, The Quantitative Risk Assessment of domino effect on Industrial Plants Using Colored Stochastic Petri Nets, in *PSAM11 & ESREL Conference.*, Helsinki, Finland, (2012), p. 1-10.
- [13] F. Kadri, E. Chatelet, et G. Chen, Quantitative Risk Assessment of Domino Effect Caused by Heat Load, *International Journal of Systems Control*, (2012), vol. 3, p. 42-48.
- [14] F. Kadri et E. Chatelet, P. Lallement, The Assessment of Risk Caused by Fire and Explosion in Chemical Process Industry: A Domino Effect-Based Study. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, (2013) 3, 66–76.
- [15] F. Kadri et E. Chatelet, G. Chen, Method for quantitative assessment of the domino effect in industrial sites. *Process Safety and Environmental Protection* (2013) 91, 452–462.
- [16] F. Kadri et E. Chatelet, B. Birregah, Natural Disaster Impacts on Critical Infrastructures: A domino effect-based study. *Journal of Homeland Security and Emergency Management* [Accepted, May 2014].
- [17] F. I. Khan, S. A. Abbasi, An assessment of the likelihood of occurrence, and the damage potential of domino effect (chain of accidents) in a typical cluster of industries, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 14 (2001) 283-306.
- [18] F. I. Khan, Use Maximum-Credible Accident Scenarios for realistic and reliable risk assessment, *Cepmagazine.org* (2001) 50-63.
- [19] F. Khan, S. Abbasi, Hazard identification and ranking (HIRA): A multiattribute technique for hazard identification, *Proc. Safety Progress* 17 (3) (1998) 16.
- [20] F. Khan, S. Abbasi, Techniques for risk analysis of chemical process industries, *J. of Prevention in Proc. Ind* 11(2) (1998) 91.
- [21] F. I. Khan, I. Asad, N. Ramesh, S. A. Abbasi, SCAP: a new methodology for safety management based on feedback from credible accident probabilistic fault tree analysis system, *Journal of Hazardous Materials A87* (2001) 23-56.
- [22] F. I. Khan, T. Husain, S. A. Abbasi, Design and evaluation of safety measures using a newly proposed methodology "SCAP", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 15 (2002) 129-146.
- [23] S. A. Abbasi, Faisal I. Khan, Risk analysis of a typical chemical industry using ORA procedure. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 14 (2001) 43–59.
- [24] S. Olivier, D. Bruno, A global view on ARAMIS, a risk assessment methodology for industries in the framework of the seveso-II directive, *Journal of Hazardous Materials* 130 (2006) 187-199.
- [25] D. Christian, F. Cécile, P. Aurore, D. Bruno, ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries, *Journal of Hazardous Materials* 130 (2006) 200-219.
- [26] P. Damienne, Un exemple d'effets de dominos : la panique dans les catastrophes urbaines, Tech. rep., Cybergeog :European Journal of Geography [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 328, mis en ligne le : 29 novembre 2005.
- [27] G. Antonioni, G. Spadoni, V. Cozzani, A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events, *Journal of Hazardous Materials* 147 (2007) 48-59.

- [28] E. Renni, G. Antonioni, S. Bonvicini, S. Gigliola, C. Valerio, A novel framework for the quantitative assessment of risk due to major accidents triggered by lightning, *Chemical Engineering Transactions* 17 (2009) 311-316.
- [29] Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement. Le plan de prévention des risques technologiques (PPRT), Guide méthodologique, 160 pages.
- [30] <http://www.ineris.fr/fr/ressources/recherche/sigalea>.
- [31] G. Reniers, W. Dullaert, K. Soudan, B. Ale, The use of current risk analysis tools evaluated towards preventing external domino accidents, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18 (2005) 119-126.
- [32] G. Reniers, W. Dullaert, B. Ale, K. Soudan, Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 15 (2005) 127-138.
- [33] Q. Nguyen, Fiabilité des installations industrielles sous impacts de fragments de structures-effet domino, Ph.D. thesis, Université de Paris-Est Laboratoire MSME (FRE3160 CNRS). Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (2009).
- [34] A. Mebarki, F. Mercier, Q. Nguyen, R. Ami Saada, Structural fragments and explosions in industrial facilities. part I: Probabilistic description of the source terms, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22 (2009) 408-416.
- [35] A. Mebarki, Q. Nguyen, F. Mercier, Structural fragments and explosions in industrial facilities: Part II - projectile trajectory and probability of impact, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22 (2009) 417-425.
- [36] Q. Nguyen, A. Mebarki, R. Ami Saada, F. Mercier, M. Reimeringer, Integrated probabilistic framework for domino effect and risk analysis, *Advances in Engineering Software* 40 (2009) 892-901.
- [37] F. I. Khan, S. A. Abbasi, Maxcred: A software package for quantitative risk analysis, report n cpce/r&d 519k, Tech. rep., Pondicherry University, Pondicherry (1994); Environmental software (1996).
- [38] F. I. Khan, S. A. Abbasi, MAXCRED-II: An advanced version of MAXCRED," report n. cpce/r&d 14/96, Tech. rep., Pondicherry University, Pondicherry (1996).
- [39] F. I. Khan, S. A. Abbasi, Models for domino effect analysis in chemical process industries, *Process Safety Progress-AIChE* 17(2) (1998) 107-113.
- [40] F. I. Khan, S. A. Abbasi, DOMIno EFFECT (domino effect): A new software for domino effect analysis in chemical process industries, *Environment Modelling and Software* 13 (1998) 163-177.
- [41] F. I. Khan, A. Iqbal, S. A. Abbasi, Rapid risk assessment of a fertilizer industry using recently developed computer-automated tool torap, *J. Loss Prevention* 14 (2001) 413-427.
- [42] D. Sabatino, C. Massimiliano, M. Gianluca, S. Simberto, Consequence analysis in LPG installation using an integrated computer package, *Journal of Hazardous Materials* 71 (2000) 159-177.
- [43] F. I. Khan, A. Iqbal, S. A. Abbasi, Rapid risk assessment of a fertilizer industry using recently developed computer-automated tool TORAP, *J. Loss Prevention* 14 (2001) 413-427.
- [44] F. I. Khan, S. A. Abbasi, PROFAT: A user friendly system for probabilistic fault tree analysis, *Spring. Process Safety. Progress* 18(1) (1999) 42-49.
- [45] F. I. Khan, S. A. Abbasi, Analytical simulation and profat II: a new methodology and a computer automated tool for fault tree analysis in chemical process industries, *Journal of Hazardous Materials A75* (2000) 1-27.
- [46] C. Delvosalle, C. Fievez, S. Brohez, A methodology and a software (DOMINOXL) for studying domino effects, in: *Chisa 2002, 15th International Congress of Chemical and Process Engineering, Praha, Czech Republic, 25-29, 2002.*

- [47] J. Tixier, S. Rault-Doumax, A. Dandrieux, J. P. Dimbour, G. Dusserre, Geosiris : Domino effects software. gosiris : Logiciel de gestion des effets domino, in: $\lambda\mu 13$ - ESREL European Conference, 2002.
- [48] J. Tixier, G. Dusserre, S. Rault-Doumax, J. Ollivier, C. Bourely, Orisis: Software for the consequence evaluation of transportation of dangerous goods accidents, *Environmental modelling & software* 17 (2002) 627-637.
- [49]: G. Balloco, A. Carpignano, G. Di. Figlia, J.-P. Nordvik, L. Rizzuti, Development of new tools for the consequence assessment of major accidents, Joint Research Centre of the European Communities, Ispra (Italy), 2000.
- [50] J. Y. Lee, J. W. Lee, J. Ko, En Sup Yoon, Optimization for allocating the explosive facilities in order to minimize the domino effect using nonlinear programming., *Korean J. Chem. Eng* 22(5) (2005) 649-656.
- [51] V. Cozzani, G. Antonioni, G. Spadoni, Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19 (2006) 463-477.
- [52] G. L. L. Reniers, W. Dullaert, Dompvplanning : User-friendly software for planning domino effects prevention, *Safety Science* 45 (2007) 1060-1081.