



HAL
open science

Étude des effets dominos sur un bassin industriel

N. Alileche, J. Buvat, L. Estel, Damien Olivier, V. Cozzani

► **To cite this version:**

N. Alileche, J. Buvat, L. Estel, Damien Olivier, V. Cozzani. Étude des effets dominos sur un bassin industriel. 19ème Congrès de la maîtrise des risques et de la sûreté de fonctionnement, 2014, Dijon, France. hal-02314374

HAL Id: hal-02314374

<https://normandie-univ.hal.science/hal-02314374>

Submitted on 12 Oct 2019

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.

ÉTUDE DES EFFETS DOMINOS SUR UN BASSIN INDUSTRIEL

STUDY OF DOMINO EFFECT ON AN INDUSTRIAL AREA

N. Alileche, J. Buvat, L. Estel
Normandie Université
LSPC (EA 4704) INSA de
Rouen.
Avenue de l'Université 76801
Saint-Étienne du Rouvray,
Cedex, France.

D. Olivier
Normandie Université
LITIS (EA 4108) Université
du Havre.
25 rue Ph. Lebon 76058
Le Havre Cedex, France.

V. Cozzani
Alma Mater Studiorum,
Università di Bologna. DICMA.
Via Terracini 28, 40131,
Bologna, Italy.

Résumé

Un Effet Domino (ED) peut être initié par plusieurs types d'accidents primaires, qui sont souvent causés par une Perte de Confinement (PDC). Cette dernière peut être considérée comme l'événement initiateur des séquences accidentelles le plus récurrent dans l'industrie chimique. Dans cet article, nous clarifions la notion d'ED sur la base d'une solide étude bibliographique. Ensuite, nous citons brièvement les travaux innovants qui proposent des méthodes pour l'étude et la prévention des EDs. Enfin, nous expliquons notre approche pour l'évaluation des risques d'EDs initiés par des PDCs, basée sur la modélisation des scénarios d'accidents, visant à faciliter la prise de décision pour l'aménagement du territoire et la protection des populations.

Summary

Domino Effect (DE) can be initiated by several types of primary accidents, which are often caused by loss of containment (LOC). LOC can be considered as the most recurrent initiating event of accident sequences in the chemical industry. In this paper we clarify the concept of domino effect based on a solid literature research; we quickly go through the latest developments that study and propose to prevent DE. Then we explain our approach based on modelling of accident scenarios triggered by LOC, aimed at DE risk estimation for land use planning purpose and protection of populations.

Introduction

La survenue d'un effet domino lors d'un accident augmente considérablement la gravité de ce dernier, conduisant le plus souvent alors à un accident majeur. L'accident se propage à la fois dans l'espace et le temps, provoquant l'extension de la zone impactée. Les législateurs aussi bien nationaux qu'européens dans un souci de protection des populations à travers l'aménagement du territoire à proximité des sites industriels dangereux, et la maîtrise des risques technologiques, ont imposé la prise en compte des accidents à EDs lors des études de dangers au travers d'une directive. Ainsi, les sites industriels tombant sous les obligations de l'article 8 de la directive (96/82/CE) "Seveso-II" amendée par l'article 9 de la directive (2012/18/UE) "Seveso-III", doivent pouvoir identifier les scénarios dominos à leurs frontières et/ou impliquant des installations voisines.

Néanmoins l'absence de procédures bien définies permettant la prévention de risque d'accident à EDs reste une lacune importante et laisse les gestionnaires désarmés face à ce phénomène, lors de l'élaboration des rapports de sécurité par les entreprises et leur évaluation par les autorités. Des tentatives concernant le développement de méthodes ont été proposées pour répondre aux exigences réglementaires, celles-ci restent cependant inefficaces face à la complexité de ce phénomène, régi par une forte propension probabiliste.

Dans ce qui suit, nous expliquons notre approche pour l'étude des accidents en chaîne, provoqués par des PDCs au sein d'une zone industrielle. Nous nous intéressons principalement, aux installations industrielles chimiques, où de grandes quantités de substances dangereuses sont stockées ou manipulées. La méthode que nous proposons, est implémentée sous Matlab® et utilise Visual Basic pour Applications (VBA) afin de faciliter l'entrée des données, et l'analyse des résultats dans Microsoft Excel. La procédure permet de déterminer le plus grand nombre de scénarios d'accident à EDs possibles (chemins de propagation) ainsi que leurs fréquences d'occurrence.

Effet domino

Définitions

Le terme effet domino, est utilisé dans son sens le plus simple dans plusieurs domaines, pour décrire un événement qui en cause un autre. L'origine du terme provient du jeu de renversement des dominos. Basée sur cette analogie, le terme ED décrit un phénomène, habituellement indésirable, qui est à l'origine de l'occurrence d'autres événements indésirables. Il est aussi communément employé par les politologues et les économistes, pour décrire l'impact d'une action qui a la propension de causer ou qui cause une crise après une autre. (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2011). Plusieurs définitions sont disponibles dans la littérature scientifique pour décrire l'effet dans le contexte de l'évaluation des risques industriels. Aucune d'entre elles n'est actuellement unanimement retenue par les scientifiques pour décrire ce phénomène malgré l'intérêt d'une formalisation non polysémique. Toutefois la plupart d'entre elles se rejoignent sur le principe de base, qui est la propagation d'un accident et l'aggravation de ses conséquences.

La table 1 récapitule quelques définitions, parmi les plus courantes dans la littérature, notamment en ce qui concerne l'industrie chimique. Si l'on retient la définition donnée par le CCPS et celle de Kourniotis *et al.*, pour une analyse approfondie, on s'aperçoit que pour Kourniotis *et al.*, l'aggravation des conséquences causée par l'ED ne concerne que l'extérieur du site. Une restriction dans la définition des EDs, apparaît parfois au sein de l'union européenne, elle est due à l'article 8 de la Directive (96/82/CE) Seveso-II (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2011). Elle entraîne une fausse compréhension du phénomène en le limitant aux accidents qui se propagent en dehors de l'établissement où l'accident initiateur a eu lieu; tandis que le CCPS, sans évoquer les conséquences de l'ED, le définit comme étant une propagation d'accidents d'une unité à une autre. Toutes ces définitions sont correctes, car elles reposent sur des bases scientifiques et techniques, mais incomplètes. Une définition commune, qui englobe à la fois l'aspect propagation et aggravation des conséquences, choisie par la communauté scientifique afin d'uniformiser l'ED, est d'une importance cruciale pour l'étude de ce phénomène.

Auteur(s)	Définitions
(Bagster <i>et Pitblado</i> , 1991)	Perte de confinement sur un équipement d'une installation, engendré par un incident majeur sur une installation voisine.
(Delvosalle, 1998)	Cascade d'événements dans laquelle les conséquences d'un accident primaire sont accrues à la fois spatialement et temporellement par les suivants, conduisant à un accident majeur.
(Khan <i>et al.</i> , 1998)	Chaîne d'accidents; une situation, où une explosion, un projectile, un incendie ou encore un produit toxique, générés par un accident dans une unité, causent d'autres accidents plus sévères dans d'autres unités.
(Kourmiotis <i>et al.</i> , 2000)	Situation, où un accident chimique devient la cause d'un ou plusieurs autres accidents, ce qui mène à l'aggravation des conséquences en dehors du site.
Center for Chemical Process Safety (CCPS 2000)	Accident qui survient dans une unité et qui affecte les unités voisines (Ex : réservoirs de stockages de matière dangereuses), par radiations thermique, souffle, projectiles.
Council Directive 2003/105/CE (2003)	Perte de confinement dans une installation Seveso, qui est le résultat (direct et indirect) d'une perte de confinement dans une installation Seveso voisine. Les deux événements doivent avoir lieu simultanément ou avec un intervalle de temps très court, et les conséquences de l'ED doivent être plus graves que celles de l'événement initial.
(Cozzani <i>et al.</i> , 2006)	Séquences accidentelles ayant au moins trois caractéristiques communes : <ul style="list-style-type: none"> • Un événement primaire initiateur ; • L'événement primaire se propage à cause d'un vecteur d'escalade (flux physique), qui entraîne des préjudices pour une ou plusieurs cibles secondaires ; • Un ou plusieurs scénarios secondaires d'accidents, impliquant des unités similaires ou différentes se déroulent éventuellement sur le même schéma.
Circulaire du 10 Mai 2010 (Ministère français de l'Écologie, du Développement durable)	Action d'un phénomène dangereux affectant une ou plusieurs installations d'un établissement, qui pourrait déclencher un autre phénomène sur une installation ou un établissement voisin, conduisant à une aggravation générale des effets du premier phénomène.
(Reniers <i>et Cozzani</i> , 2013)	Accident où un événement indésirable initiateur se propage au sein d'un équipement (temporellement) et/ou aux équipements voisins (spatialement), séquentiellement ou simultanément, déclenchant ainsi un ou plusieurs événements indésirables secondaires, qui à leur tour peuvent provoquer d'autres événements indésirables (tertiaires et/ou plus), entraînant ainsi des conséquences globales plus graves que ceux de l'événement initial.

Table 1. Définitions de l'effet domino

Cette divergence s'accroît considérablement quand on se rapproche des experts industriels¹ qui proposent d'inclure les séquences accidentelles selon le modèle de Reason (Swiss cheese model) dans la définition des EDs pour la généraliser. Ce qui complique d'avantage la convergence vers une définition commune.

La complexité de ce phénomène affecte fortement sa définition et sa caractérisation, d'autant plus que l'analyse des accidents passés, montre que l'ED peut surgir sous plusieurs formes différentes. En effet, on s'aperçoit que la propagation de l'accident peut être simple (d'une unité à une autre uniquement), en chaîne (se développe au-delà de la deuxième unité), en parallèle (plusieurs installations sont touchées par un même accident) Il peut même y avoir interaction des événements (Effet de synergie qui peut engendrer l'endommagement d'une unité suite à deux effets cumulés, émanant de deux accidents ayant lieu sur deux unités différentes). De même pour l'aggravation des conséquences, selon la nature des séquences accidentelles, on distingue deux types de processus. Premièrement, la séquence peut être initiée par un incident mineur (feu de nappe/torche mineur) qui s'aggravera au fur et à mesure de sa propagation. Deuxièmement, l'accident initiateur peut être grave au départ (explosion/ feu de nappe), ce qui mènera à une propagation dans l'espace et causera d'autres accidents graves.

(Reniers, 2010) a également fait le constat de l'absence d'une définition largement acceptée et a proposé de catégoriser l'ED, en 4 catégories, chacune comptant deux sous-catégories, comme indiqué dans la table 2.

Pour synthétiser, les deux caractéristiques indiscutables de l'ED, que sont la propagation de l'accident et l'aggravation de ses conséquences, nous avons adopté la définition donnée par (Reniers et Cozzani, 2013).

¹EXPERT WORKSHOP Fostering current practices to a new generation approach dealing with Domino Effects in the Process Industries, April 16-17th. 2014.

Catégorie	Sous-catégorie	Définitions
1	Interne	Début et fin de l'escalade caractérisant l'ED, au sein d'un même établissement.
	Externe	L'ED se propage au-delà des frontières de l'établissement où a eu lieu l'événement initiateur.
2	Direct	L'événement domino apparaît comme conséquence directe de l'événement domino précédent.
	Indirect	L'événement domino se produit comme une conséquence indirecte d'un événement domino précédent, n'étant pas le précédent.
3	Temporel	L'événement domino se produit au sein de la même zone que l'événement précédent, mais avec un retard (propagation dans le temps).
	Spatiale	L'événement domino se produit en dehors de la zone où l'événement précédent a eu lieu. (propagation dans l'espace)
4	En série	L'événement domino survient comme une conséquence d'une chaîne d'accident unique causée par l'événement précédent.
	Parallèle	L'événement domino apparaît comme l'une des nombreuses conséquences qui découlent simultanément des chaînes d'accidents causés par l'événement précédent.

Table 2. Catégorisation de l'effet domino (adaptée de Reniers, 2010)

Cette dernière semble être la plus compétente, car elle englobe tous les aspects spécifiques trouvés dans la plupart des définitions d'ED, y compris les quatre catégories citées ci-dessus et le concept d'ED local proposé par (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2011), pour désigner plusieurs accidents distincts, séparés par un intervalle de temps, d'une minute ou plus, au sein d'une même unité.

Approches scientifiques et méthodologies existantes

Elles reposent sur l'analyse des accidents passés et ont pour objectif de proposer des méthodes d'analyse et de prévention du risque d'ED.

2.1 Analyse des accidents passés

Cette démarche permet d'une part d'avoir un retour d'expérience à exploiter, afin de savoir quelle serait la meilleure approche concernant le développement de méthodes d'analyse, de prévention de ce risque ; d'autre part elle permet d'obtenir les données d'entrées nécessaires, tels que les événements initiateurs, leurs fréquences et les séquences d'accident etc., pour pouvoir modéliser ce phénomène, afin d'être capable de le reproduire par simulation numérique et donc le comprendre davantage pour mieux le maîtriser.

Il est important de noter que les accidents primaires (explosion, feu...) qui peuvent provoquer un ED, sont dus soit à des événements initiateurs internes à la source, comme la corrosion, l'érosion, l'usure (fatigue), défauts de construction, ou encore un dysfonctionnement; soit à des événements initiateurs externes à la source, qu'on peut classer en trois catégories selon leurs origines :

- Humain : erreurs humaines, actes de malveillance, terrorisme.
- Accidents survenus dans des installations industrielles voisines / incidents de transport de matières dangereuses.
- Causes naturelles : tsunamis, tremblement de terre ...

D'après (Liu *et al.*, 2012), les accidents qui ont tendance à provoquer un ED sont essentiellement des explosions et des incendies. Cette position est confirmée par de nombreux autres chercheurs (Khan *et al.*, 2001), et validée par le retour d'expérience (Abdolhamidzadeh *et al.*, 2011) et (Zhang *et al.*, 2012).

Les explosions sont divisées en quatre types dans l'industrie chimique :

- Explosion d'un nuage (nappe) de gaz ou de vapeurs combustibles confinées ou non confinées (UVCE, CVEC)
- Vaporisation explosive d'un liquide porté à ébullition (BLEVE)
- Explosion de poussières.

On pourrait également rajouter les explosions physiques, ainsi que les explosions en phase condensée. Suite à une explosion les effets physiques produits sont principalement les effets missiles (projections de fragments), de surpression (ondes de chocs) et thermiques.

Les feux à leur tour peuvent survenir sous quatre formes différentes : feu de nuage, feu de nappe, boule de feu et les feux torche. L'effet physique produit suite à un feu est le flux thermique. Ce dernier peut agir sur l'installation cible sous deux formes différentes, selon la distance qui sépare l'équipement cible, de la source : rayonnement distant ou impact direct (englouti par les flammes).

Cependant, il est important de souligner le fait qu'un effet domino peut être causé par d'autre événement, tel que les catastrophes naturelles ou encore les rejets toxiques. Ces derniers n'engendrent pas un effet domino direct mais indirect, parce qu'ils ne propagent pas l'accident aux équipements voisins directement via un effet physique. Les catastrophes naturelles peuvent engendrer des risques NATECH (NATUREL-TECHnologique). De plus un nuage toxique peut affecter le personnel se trouvant dans une salle de contrôle, ce qui les empêcherait de déclencher la procédure d'urgence... la classification de (Reniers, 2010) trouve tout son intérêt dans ce contexte. Car il est impossible actuellement de traiter à la fois les quatre catégories d'ED. Par conséquent nous approuvons la position de Liu *et al.*, pour les EDs direct (d'une unité à une autre via un flux physique). L'ED indirect reste cependant rare par rapport au l'ED direct, pour plus de détail voir (Reniers *et Cozzani*, 2013), où un chapitre est dédié aux EDs indirects.

1.2 Développement de méthodes d'analyse et de prévention du risque

Différents outils et modèles sont utilisés en fonction de l'objectif visé et correspondent à plusieurs approches. Certains visent la prévention des risques au sein des zones industrielles, tandis que d'autres, ont tendance à aller vers une quantification plus précise des conséquences, par conséquent ils sont limités à un seul type d'accident primaire susceptible de générer un ED. Parmi les méthodes proposées certaines sont chronophages et nécessitent l'intervention (participation) d'experts, alors que d'autres se limitent aux scénarios de premier niveau. Cela ne remet pas en cause les

travaux mais, par contre met en évidence la complexité de l'ED, à la fois sur le plan physique et organisationnel; car le phénomène peut impliquer plusieurs entreprises. L'étude de danger devrait donc se faire en concertation et en collaboration entre les sites industriels voisins, ce qui est difficile à mettre en œuvre, à cause des contraintes liées à la confidentialité des informations.

La complexité du phénomène oblige les chercheurs à aborder le sujet avec des hypothèses simplificatrices, car une démarche cohérente de management des risques doit inclure plusieurs étapes abordées l'une après l'autre, allant de l'analyse du risque d'effet domino à sa prévention et maîtrise (traitement). Dans ce qui suit nous présentons quelques exemples nous semblant pertinents, et des méthodes proposées selon leurs objectifs.

1.2.1 Les méthodes de prévention

Le DominoXI a été développé par (Fievez *et al.*,2002), dans le but d'énumérer tous les effets dominos pouvant causer des accidents en chaîne. À partir des équipements les plus dangereux, le logiciel examine pour chaque installation de la zone, la possibilité qu'un accident primaire engendre un accident secondaire dans une autre installation de la zone. Si c'est le cas, le premier accident est appelé « effet domino primaire ». Le deuxième est appelé « effet domino secondaire » s'il conduit à l'occurrence d'un troisième accident dans une autre installation. Les installations les plus dangereuses pour un scénario domino donné sont déterminées en faisant la somme des effets dominos primaires (accidents primaires) pour chaque risque potentiel (perte de confinement) afin d'obtenir un facteur de danger (DF) qui est calculé pour chaque installation et pour chaque scénario. De même les équipements les plus vulnérables sont déterminés en additionnant le nombre d'effets dominos secondaires pour lesquels l'installation, lorsqu'elle est considérée comme une installation cible, est atteinte, en considérant un certain niveau de protection, afin d'obtenir un facteur de vulnérabilité (VF). Les deux facteurs DF et VF sont déterminés en tenant compte d'un coefficient de pondération défini par l'utilisateur.

(Reniers *et al.*, 2005) ont développé une méthode qui vise à prévenir le risque des EDs externes, nommée Hazwim, en utilisant plusieurs méthodes et outils simples tels que HAZOP et What-if pour l'identification des dangers et de la matrice des risques pour leur évaluation. La méthode peut atteindre l'objectif pour lequel elle a été conçue, mais en dépit d'un certain niveau de complexité, sa mise en œuvre nécessite la participation d'un personnel hautement qualifié, notamment des experts en HAZOP, What-if et capables de renseigner la Matrice des risques.

Le logiciel DomPrevPlanning, a été proposé par (Reniers *et al.*,2007). Il est destiné à la planification de la prévention des EDs, à travers l'aide à la prise de décision, concernant l'application de mesures préventives et protectrices, afin de minimiser le risque au sein des zones industrielles, comportant des installations chimiques dangereuses. Le bassin industriel est représenté par un réseau (théorie des graphes), en prenant en compte uniquement les installations considérées dangereuses par l'IDE (2003) (réservoirs de stockages, installations contenant des substances inflammables, très inflammables ou explosives) afin de comparer chaque paire d'installation en termes de risque d'effet domino, et de les classer ensuite selon leur propension à causer un ED.

2.2.2 Les méthodes de quantification

Une procédure systématique pour l'analyse quantitative du risque causé par l'ED a été présentée par (Cozzani *et al.*,2005). Ils ont introduit une technique simplifiée, pour l'analyse des conséquences et de la pertinence des scénarios dominos, en définissant les vecteurs d'escalade, qui sont les effets physiques responsables de la propagation de l'accident (radiations thermiques, ondes de surpression, projection de fragments), générés par les principaux scénarios considérés en QRA (Quantitative Risk Analysis). Ce modèle présente des valeurs seuils d'endommagement des équipements causés par différents effets. Afin de calculer la probabilité d'escalade d'un accident, une méthode est proposée, basée sur les équations probit (Cozzani *et al.*,2004). L'un des avantages de cette procédure est le fait qu'elle tient compte de la combinaison des événements, ainsi que sa capacité à estimer leur fréquence d'occurrence. La méthodologie a été mise en œuvre (implémenté) dans un logiciel (ARIPAR) pour permettre le calcul des indices de risques (risque individuel et sociétal,...), et a été appliquée à plusieurs études de cas, notamment pour étudier les effets dominos au sein d'un bassin industriel (Antonioni *et al.*,2009). Les résultats obtenus soulignent l'importance d'une analyse quantitative des EDs dans le cadre d'une QRA, afin d'identifier les scénarios dominos pertinents à inclure dans la maîtrise des risques, les interventions en situation d'urgence, ainsi que pour l'aménagement du territoire.

(Liu *et al.*,2012) ont proposé un modèle d'évaluation des risques sur les zones industrielles basé sur l'ED. Le modèle a été construit dans le but de procéder à l'évaluation quantitative des risques globaux au sein des parcs chimiques, afin de fournir une base scientifique pour aider à la prise de décision concernant la gestion de la sécurité de ces zones. Il comporte trois étapes principales : la première vise à évaluer les risques en général et permet d'estimer la probabilité qu'un effet domino surgisse. Si ce dernier est probable, alors on passe à la deuxième étape, qui consiste à calculer la probabilité et les conséquences d'un ED, à l'aide d'un modèle proposé. Ce dernier est établi à partir de trois types de vecteur d'escalade cités auparavant. Enfin il calcule le risque individuel et sociétal à l'aide de modèles de calcul établis sur la base de la probabilité d'extension de l'ED, en considérant l'unité cible comme étant le centre.

D'autres études existent également, mais elles ne visent pas à proposer l'analyse quantitative de l'effet domino en général, mais estiment l'endommagement des équipements dû au rayonnement thermique, à une surpression, etc.

Méthodologie proposée

Dans une démarche de management de risque, avant d'arriver à l'étape d'évaluation des risques, et donc de décider de leur acceptabilité ou non, en les comparant aux critères d'acceptabilité on doit passer par leurs analyses, afin d'avoir la base nécessaire pour l'évaluation. Cette base est une estimation des données, concernant le niveau du risque, qu'on peut résumer à sa probabilité d'occurrence et la gravité de ses conséquences.

L'analyse des effets dominos est une extension de l'identification des dangers. C'est pourquoi l'analyse ne commence que lorsque l'identification des dangers primaires est effectuée et les conséquences calculées. L'objectif est de pouvoir identifier ensuite les incidents à effets dominos et de les traiter avec la méthode QRA.

Il convient de préciser que dans le cas de telles études, le terme analyse de risques est utilisé pour désigner l'ensemble des phases d'appréciation du risque. Étant donné que le vocabulaire de management de risques souffre de certaines divergences. Le recours au Guide ISO CEI 73 (Management du risque -Vocabulaire) est indispensable pour éviter toute ambiguïté. Les mêmes termes peuvent avoir des sens différents, selon le contexte dans lequel ils sont utilisés.

Pour remédier à cela, les définitions appliquées dans l'étude sont précisées ci-après (Guide ISO CEI 73 Management du risque -Vocabulaire) :
Fréquence : Nombre d'événements ou d'effets par unité de temps donnée.

Note1 : La fréquence peut s'appliquer à des événements passés ou des événements futurs potentiels, où elle peut être utilisée comme mesure de la vraisemblance/probabilité.

Probabilité : Mesure de la possibilité d'occurrence exprimée par un chiffre entre 0 et 1, 0 indiquant une impossibilité et 1 indiquant une certitude absolue.

Vraisemblance : Possibilité que quelque chose se produise.

Note2 : Dans la terminologie du management du risque, le mot «vraisemblance» est utilisé pour indiquer la possibilité que quelque chose se produise, que cette possibilité soit définie, mesurée ou déterminée de façon objective ou subjective, qualitative ou quantitative, et qu'elle soit décrite au moyen de termes généraux ou mathématiques (telle une probabilité ou une fréquence sur une période donnée).

L'approche probabiliste s'impose, si l'on veut prendre en compte les risques d'accidents à EDs, lors des études d'analyse des risques, pour la maîtrise de l'urbanisation et donc la protection des populations, car elle permet d'exclure de l'étude les scénarios à très faible probabilité d'occurrence, même si leurs conséquences sont graves. Étant donné le nombre très important des scénarios envisageables, l'approche déterministe n'est pas évidente dans une telle démarche, d'autant plus qu'elle repose sur le postulat « risque d'accident zéro à l'extérieur du site » ce qui mènera à définir des distances de sécurité très grandes, en particulier pour les rejets toxiques et la projection de fragments en cas d'explosion. Ces distances sont incompatibles avec les sites industriels existants et inapplicables pour les sites en construction (Hourtoulou *et al.*, 2002).

Le choix de l'approche probabiliste, hormis le fait qu'il est inévitable pour la prise en compte des EDs, est motivé à cause de l'objectif final de notre étude qui consiste à identifier les équipements les plus critiques (ceux qui auront un rôle central dans la propagation de l'accident) et de les hiérarchiser selon leur propension à causer/propager l'accident. Ceci dans le but de permettre aux responsables de la sécurité d'agir sur ces derniers en renforçant les moyens de prévention et de protection afin de réduire le risque. C'est dans cette optique que l'approche probabiliste, trouve tout son intérêt, car c'est la plus riche en matière d'informations.

3 Étapes de la méthodologie

Avant de détailler les phases de la méthode, nous tenons à souligner le fait qu'une telle démarche ne vise pas à remplacer le déplacement d'un groupe de travail sur le terrain, afin d'effectuer une analyse des risques. En revanche, elle permet d'axer les efforts sur les unités les plus dangereuses. En d'autres termes elle servira d'outil d'aide à la décision, afin de faciliter l'inclusion des effets dominos, lors des analyses de risques, à travers l'identification des équipements les plus dangereux du point de vue de la propagation des accidents. Cela afin de centrer les efforts des groupes de travail, autour de ces équipements ciblés; sélectionnés par cette méthode pour être examinés avec plus de détails, en utilisant des outils qui sortent des standards (approfondissement de l'étude pour un équipement ou un scénario, moyennant des outils CFD « Computational Fluid Dynamics »...).

L'objectif de la méthode proposée, est d'identifier les installations les plus dangereuses vis-à-vis de l'effet domino, donc de la propagation des accidents. Nous avons soulevé cette problématique, car très peu d'étude traitent de la question; en ayant recours à des modèles qualitatifs, qui ne permettent pas l'obtention de résultats concluants. La démarche présentée est composée de trois étapes principales.

3.1 Description de la zone industrielle étudiée

Des interfaces utilisateur simples sont codées sous VBA, afin de faciliter la saisie des données d'entrée nécessaires à l'application de la méthode. Ces données représentent une description détaillée des caractéristiques des équipements, ainsi que celle des matières qu'ils contiennent. Les barrières de sécurité existantes, sont identifiées puis analysées afin de décider de leur prise en compte ou non dans le calcul des fréquences d'occurrences d'un accident donné. Ce choix est fait selon leurs performances et leur nature (active ou passive, barrière de contrôle/limitation ou barrière de prévention) et en fonction de l'accident en question. Les conditions météorologiques, jugées représentatives sur la zone étudiée sont aussi considérées dans cette première étape. Une fois toutes ces informations recueillies, on passe à l'étape suivante.

3.2 Modélisation des scénarios d'accidents

En considérant la définition de l'effet domino suivante :

Un accident où un événement indésirable initiateur se propage au sein d'un équipement (temporellement) et/ou aux équipements voisins (spatialement), séquentiellement ou simultanément, déclenchant ainsi un ou plusieurs événements indésirables secondaires, qui à leur tour peuvent provoquer d'autres événements indésirables (tertiaires et/ou plus), entraînant ainsi des conséquences globales plus graves que ceux de l'événement initial. (Reniers et Cozzani, 2013).

On constate que le processus de propagation commence au sein de l'équipement où l'événement critique (perte de confinement dans la plupart des cas) a eu lieu, pour ensuite s'élargir à d'autres équipements. Puisque l'analyse des effets dominos est le prolongement de l'identification des dangers. Dans un premier temps, on procède à la modélisation du terme source, qui est une étape primordiale, afin de déterminer les accidents primaires pouvant être engendrés par une PDC, sur l'unité où la défaillance a eu lieu. Dans un deuxième temps, on étudie la propagation des effets physiques engendrés par l'accident, au sein et en dehors de l'établissement, en tenant compte des barrières de sécurité, si elles existent.

3.2.1 Modélisation des scénarios d'accidents primaires

Les événements critiques susceptibles de provoquer un effet domino, considérés dans cette étude, sont limités dans un premier temps aux pertes de confinement du fait qu'ils représentent l'événement initiateur, le plus récurrent dans l'industrie chimique. Des bases de données (Purple Book, 2005; Handbook on Failure Frequencies, 2009...) existent pour estimer leurs fréquences d'occurrence sur différents types d'équipements en fonction de leurs caractéristiques et celles des substances qu'ils contiennent. Les autres événements critiques, tel que la décomposition, l'effondrement du toit de réservoir, etc. nécessitent le développement d'arbre des causes spécifiques à chaque équipement et pour chaque événement indésirable (méthode nœud papillon) afin qu'ils soient pris en compte. Néanmoins nous avons prévu d'utiliser les données concernant les fréquences d'occurrence de tels événements, issues des rapports de sécurité, qui nous seront fournies par les industriels de la région Haute-Normandie, intéressés par notre méthode.

Les PDCs concernent tous les types d'installations (réservoirs, réacteurs, colonnes de séparation...). Elles provoquent des phénomènes dangereux qui varient selon plusieurs paramètres (type de PDC et sa hauteur si fuite continue, caractéristiques et type de l'équipement, catégorie et phase de la substance contenue, conditions météorologique, etc.). Différentes classifications sont proposées et nous avons adopté celles données dans le Purple Book; ce dernier les classe en trois catégories définies ci-dessous. Elles s'appliquent aux capacités sous pression et atmosphériques (capacité de procédé, réacteur, réservoir de stockage) autour desquelles est centrée notre étude :

- G1 : Rejet instantané de l'ensemble du produit contenu (rupture catastrophique).
- G2 : Rejet continu de l'ensemble du produit contenu en dix minutes à un débit constant.
- G3 : Rejet continu par un trou de diamètre équivalent de 10 mm.

Les scénarios à envisager suite à une perte de confinement sont multiples, et changent selon les paramètres cités auparavant. Afin de déterminer les accidents éventuels (conséquences du rejet) et leurs fréquences d'occurrence, sur l'installation où a eu lieu le rejet, sur la base des arbres

d'événements existants dans la littérature : Purple Book, et (Vílchez *et al.*,2011), etc. nous avons dressé, vingt arbres d'événements, dans lesquels chaque branche représente un scénario d'accident.

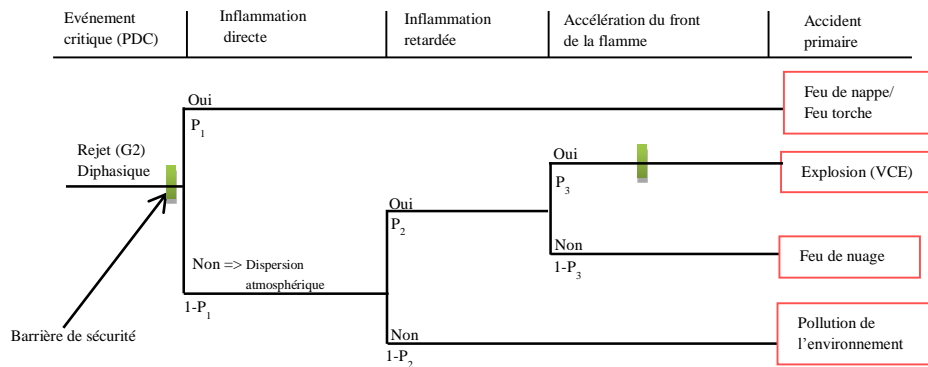


Figure 1. Arbre d'événements simplifié (rejets continus de matières liquéfiées sous pression)

Les probabilités des événements (inflammation direct/ retardée, accélération du front de la flamme), constituant les différents scénarios, dépendent de plusieurs paramètres.

P_1 (probabilité d'inflammation direct) : elle dépend du débit de la fuite, si celle-ci est continue, ou de la quantité de la matière rejetée si fuite instantanée.

P_2 (probabilité d'inflammation retardée) : elle dépend de la présence de source d'inflammation (point chaud, étincelle...), dans l'environnement où se trouve le nuage/nappe; la position du nuage dépend, des conditions météorologiques, de la quantité rejeté, du débit,...

P_3 (probabilité d'accélération du front de la flamme) : elle dépend essentiellement de la congestion de la zone où se trouve le nuage inflammable, et aussi de la quantité de matière qui se situe entre les limites d'inflammabilité dans le nuage.

En fonction de certains paramètres tels que, les conditions de température et de pression, le type de rejet (G1, G2 ou G3), la phase de la matière rejetée (liquide, gaz ou diphasique), le type d'équipement concerné, etc. On affecte l'arbre d'événements adéquat, pour chaque PDCs considérées. Nous avons utilisé Matlab[®] pour effectuer les calculs liés à la modélisation des PDCs. Cela s'est fait en codant les vingt arbres d'événements, sous Matlab[®] afin de les utiliser comme des fonctions Matlab et donc, les appeler à chaque fois que leurs conditions sont remplies.

Dans la mesure où, la dispersion d'un nuage toxique ne peut pas propager l'accident à une autre unité, sauf dans des cas particuliers et rares, cités auparavant (effet domino indirect). Et du fait que notre objectif est d'étudier les effets dominos directs : la propagation des accidents primaires, aux installations voisines via les effets physiques (vecteurs d'escalade), engendrés par les accidents, nous supposons que ces vingt arbres d'événements, modélisent tous les cas de PDCs susceptibles de provoquer des EDs dans un parc chimique. Toutefois, l'aspect toxique peut être facilement rajouté à la méthode, en vue de calculer les conséquences d'un tel scénario sur les humains, et estimer le risque individuel et social, dans un contexte QRA. En utilisant les résultats obtenus (fréquence d'occurrence) pour l'accident : dispersion toxique; puis au moyen d'un modèle de vulnérabilité humaine, on obtient aisément les indices de risques.

Lors du calcul des fréquences d'occurrence des accidents primaires, les barrières de sécurité ainsi que les conditions météorologiques sont prises en compte. Cependant à ce stade de l'étude on ne considère que les barrières de sécurité qui peuvent réduire la fréquence d'occurrence des accidents. Celles destinées à limiter les effets, seront considérées dans la prochaine étape (modélisation de la propagation), vu qu'elles peuvent réduire la propagation de l'accident, mais pas son occurrence.

En ce qui concerne les conditions météorologiques (CM), elles sont incluses dans le calcul, uniquement si cela est pertinent pour le scénario en question (accidents pour lesquels les conditions météorologiques, sont très importantes : feu de nappe, explosion de nuage de vapeur, feu de nuage, dispersion de toxique...).

Dans l'hypothèse où, la fréquence d'occurrence annuelle de l'accident primaire, est inférieure à 0.1 an^{-1} . Le calcul peut se faire en utilisant l'équation {1}²:

$$f_{ap} = f_{PDC} \times P_S \times P_{MC} \times \prod_{i=1}^n PFD_i \quad \{1\}$$

Avec :

f_{ap} : Fréquence d'occurrence annuelle³ de l'accident primaire (Ex : Feu de nappe, dispersion toxique, explosion...), an^{-1}

P_S : Probabilité du scénario (produit des probabilités des événements conduisant à l'accident primaire : inflammation direct (P_1)/ retardée (P_2), accélération du front de la flamme (P_3)).

f_{PDC} : Fréquence d'occurrence annuelle de la perte de confinement (l'événement redouté central), an^{-1} .

P_{MC} : Probabilité des conditions météorologiques considérées (si pertinent pour le scénario).

PFD_i : Probabilité de défaillance à la sollicitation de la $i^{\text{ème}}$ barrière de sécurité, qui peut réduire la fréquence d'occurrence de l'accident primaire.

3.2.2 Modélisation de la propagation

Une fois qu'un arbre d'événements est attribué à une perte de confinement, tous les accidents primaires possibles sont connus. L'étape suivante, consiste à modéliser la propagation, afin de déterminer si les installations voisines de l'installation source où la PDC a eu lieu, seront impactées suite à ces accidents. Cela est rendu possible en suivant les quatre étapes décrites ci-après :

² (Voir : les rapports de L'INERIS : Guide pour l'intégration de la probabilité dans les études de dangers. Fiches pratiques : Intégration de la probabilité dans les études de dangers).

Étape.1 : trois effets physiques susceptibles de propager l'accident sont pris en compte à savoir, les effets thermiques, les effets de surpression et les projectiles. Lors de cette première étape, on procède au calcul de chaque conséquence (effets physiques) engendrées par l'accident primaire, en utilisant des outils de calculs existants. Cela revient à calculer les distances d'effets, afin de les comparer aux distances réelles qui séparent l'équipement source (l'équipement où l'accident primaire a eu lieu) des autres équipements.
Les équipements pour lesquels, les distances d'effets dépassent, les distances réelles, sont sélectionnés pour un calcul précis de l'intensité de l'effet physique impliqué, à la distance réelle qui les sépare de la source de l'accident.

Étape.2 : Comparaison des valeurs obtenues de l'étape 1 (intensités des effets physiques) aux seuils d'escalade (endommagement de l'équipement et propagation de l'accident), proposées par (Cozzani *et al.*, 2006). À cette étape, nous obtenons un modèle de propagation qualitative, en déterminant les équipements cibles potentiels.

Étape.3 : Estimation de la probabilité d'escalade, pour les équipements considérés comme des cibles potentielles, moyennant des modèles de vulnérabilité, qui utilisent la fonction probit. Des fonctions différentes sont utilisées selon l'effet physique et le type d'équipement étudiés. La table 3, illustre les différentes fonctions probit utilisées (Cozzani *et al.*, 2004, 2005), (Mingguang *et Juncheng*, 2008), (Landucci *et al.*, 2009). Une étude récente (Sun *et al.*, 2013) montre la validité et la rationalité des modèles probit, pour l'étude des effets dominos causés par les ondes de surpression dans l'industrie chimique. Concernant l'effet des radiations thermiques, la fiabilité des modèles de calcul de la probabilité d'escalade présentés, a été démontrée, lors de leur application à plusieurs cas d'études, notamment dans l'étude réalisée par (Landucci *et al.*, 2012).

Effets physiques	Equipements cibles	Modèles de vulnérabilité
Radiation thermique	Atmosphérique	$\ln(\text{ttf}) = -1.13 \cdot \ln(I_{i,j}) - 2.67 \cdot 10^{-5} \cdot V + 9.9$ $Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \cdot \ln(\text{ttf})$
	Sous pression	$\ln(\text{ttf}) = -0.95 \cdot \ln(I_{i,j}) + 8.845 \cdot V^{0.032}$ $Y_{i,j} = 12.54 - 1.847 \cdot \ln(\text{ttf})$
Surpression	Atmosphérique	$Y_{i,j} = -9.36 + 1.43 \cdot \ln(\Delta P_{i,j})$
	Sous pression	$Y_{i,j} = -14.44 + 1.82 \cdot \ln(\Delta P_{i,j})$
	Allongé (tour de distillation...)	$Y_{i,j} = -28.07 + 3.16 \cdot \ln(\Delta P_{i,j})$

i, équipement source de l'accident. *j* équipements cible. $Y_{i,j}$, fonction probit. ttf, temps-avant-défaillance, en seconds. *V*, volume de l'équipement en m³. $I_{i,j}$, intensité des radiations thermiques en kW/m². $\Delta P_{i,j}$, surpression statique maximale, en kPa.

Table 3. Modèles de vulnérabilité

En ce qui concerne, les effets de projection de fragments, du fait qu'aucun modèle vulnérabilité précis n'existe pour l'estimation des dommages causés sur la cible. Nous obtenons uniquement un modèle de propagation qualitative, provoqué par cet effet.

Pour l'estimation de la probabilité d'escalade, on utilise l'équation {2}, proposée par (Mingguang *et Juncheng*, 2008).

$$P_{i,j} = \frac{1.005}{1 + e^{-\left(\frac{Y_{i,j} - 5.004}{0.6120}\right)}} \quad \{2\}$$

$P_{i,j}$: Probabilité qu'un équipement *j* soit endommagé suite à un accident au sein de l'équipement *i*. $Y_{i,j}$: Valeur de la fonction probit.

La fréquence de l'effet domino, est calculée en utilisant l'équation {3}, où les barrières de sécurité, destinées à limiter les effets d'un accident primaire (après son occurrence) sont incluses dans le calcul, en multipliant leur probabilité d'escalade par la probabilité de défaillance à la sollicitation. Par exemple, si une escalade est possible suite à la propagation d'un incendie, et qu'un système de protection contre les incendies (extincteur automatique à eau...) existe. En revanche, nous n'incluons pas la probabilité de conditions météorologiques, car celle-ci est déjà impliquée dans l'estimation de la fréquence des accidents primaires.

$$F_{ed} = f_{ap} \times P_{i,j} \times \prod_{j=1}^n PFD_j \quad \{3\}$$

Avec :

F_{ed} : Fréquence d'occurrence annuelle, de la séquence domino (installation *j* impactée suite à un accident dans *i*).

f_{ap} : Fréquence d'occurrence de l'accident primaire, calculée par l'équation {1}

$P_{i,j}$: Probabilité d'escalade, calculée par l'équation {2}

PFD_j : Probabilité de défaillance à la sollicitation de la *j*^{ème} barrière de sécurité, qui peut limiter les conséquences de l'accident primaire.

Cette équation est valide, dans l'hypothèse où l'accident primaire (accident en *i*) et l'accident secondaire (accident en *j*), ne peuvent pas avoir lieu simultanément, en dehors du cadre d'un effet domino. Cette hypothèse est justifiée parce que, les fréquences d'occurrence de l'accident primaire et secondaire, sans l'apparition d'effet domino sont suffisamment faibles.

Étape.4 : Détermination des scénarios d'escalade de premier niveau avec leurs différentes conséquences (accidents secondaires), si la probabilité d'escalade dépasse une valeur prédéterminée (valeur en dessous de laquelle l'accident n'a plus d'influence sur le risque individuel et sociétal). Cela se fait en affectant l'arbre d'événements adéquat, pour simuler la propagation de l'accident.

³ Au sens de l'article L.512-1 du code de l'environnement, la probabilité d'occurrence d'un accident est assimilée à sa fréquence d'occurrence future estimée sur l'installation considérée.

La répétition de ces quatre étapes, permet de déterminer la probabilité d'escalade au deuxième niveau (trois équipements touchés par deux accidents consécutifs), et ainsi de suite.

Cependant le modèle actuel considère uniquement les effets dominos en série (en chaîne) et ne prend pas en compte la combinaison des événements. Cela a été fait pour simplifier le modèle au départ, et permettre de passer à la propagation de deuxième niveau, car le fait de tenir compte des combinaisons des événements complique énormément le calcul. En revanche la méthode proposée par (Cozzani *et al.*, 2005) qui permet de prendre en compte les combinaisons des événements sera adaptée au modèle très prochainement.

3.3 Identification des installations les plus dangereuses

Après identification de l'ensemble des séquences accidentelles possibles, leur hiérarchisation se fait par l'attribution d'un facteur de dangerosité, pour chaque chemin de propagation de niveau 2 (trois équipements touchés par deux accidents consécutifs) :

$$Fa_D = \sum_{k=1}^{k=n} (f_{do})_k \times n$$

Avec :

Fa_D : Facteur de dangerosité de la séquence (chemin de propagation).

f_{do} : Fréquence annuelle de la séquence pour le scénario k .

n : Nombre total d'apparition de la séquence accidentelle ($\sum k$).

k : Scénario où la séquence a été observée.

Une fois la hiérarchisation des séquences accidentelles effectuées, on procède au classement des unités les plus dangereuses vis-à-vis de l'effet domino. Pour optimiser la prévention des EDs, on se concentre sur les installations situées au centre des séquences accidentelles. En agissant sur ces dernières, par la mise en œuvre de mesures de prévention et de protection, l'effet domino de niveau 1 : la propagation de l'accident primaire aux installations voisines pourra être évité et donc le niveau deux n'aura pas lieu.

Conclusion

Les accidents à effets dominos figurent parmi les scénarios les plus complexes qui peuvent avoir lieu dans l'industrie chimique. L'utilisation du retour d'expérience couplé à l'analyse par arbres d'événements peut conduire à une méthodologie pour l'évaluation et la gestion des risques provoqués par de tels accidents.

La méthodologie présentée peut être utilisée comme outil d'aide à la décision afin de faciliter l'inclusion des effets dominos lors des analyses de risques. L'application de la procédure expliquée dans cet article pour tous les équipements de la zone à étudier, permet d'obtenir le plus grand nombre de scénarios d'accidents à effets dominos possibles suite à un événement critique (perte de confinement). Afin de pouvoir réduire le risque à la source, les équipements qui participent à la propagation de l'accident sont classés par ordre en fonction du nombre d'apparition et de la probabilité de celle-ci. Cela permettra aux responsables de sécurité, de centrer les efforts sur les unités les plus dangereuses, par l'allocation de plus de ressources humaines et financières.

La prise en compte d'éventuelles combinaisons d'événements et les effets de synergie, concernant les radiations thermiques, constituent la prochaine étape de développement de cette méthodologie, ainsi que sa généralisation à d'autres événements critiques.

4 Remerciements

Ce travail a été développé au sein du projet MER en collaboration avec le projet de PROTEC appartenant au réseau de recherche SER / MRT. Les auteurs tiennent à remercier le Conseil régional de Haute-Normandie pour leur soutien financier à ce réseau et le financement de la thèse de M. Nassim Alileche.

5 Références

- Abdolhamidzadeh B, Abbasi T, Rashtchian D, Abbasi SA. Domino effect in process-industry accidents – An inventory of past events and identification of some patterns. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24, 575–593, 2011.
- Antonioni G, Spadoni G, Cozzani V. Application of domino effect quantitative risk assessment to an extended industrial area. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 22. 614–624, 2009.
- Bagster, D.F., Pitblado, R.M. The estimation of domino incident frequencies: an approach. *Process Safety and Environmental Protection* 69, 196, 1991.
- Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S., The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of Hazardous Materials* 127, 14–30, 2005.
- Cozzani V, Salzano E. The quantitative assessment of domino effects caused by overpressure: Part I. Probit models. *Journal of Hazardous Materials A107*, 67–80, 2004.
- Cozzani V, Gubinelli G, Salzano E. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *Journal of Hazardous Materials A129* 1–21, 2006.
- Dongliang Sun, Guangtuan Huang, Juncheng Jiang, Mingguang Zhang, Zhirong Wang, Study on the Rationality and Validity of Probit Models of Domino Effect to Chemical Process Equipment caused by Overpressure, *Journal of Physics: Conference Series* 423 (2013) 012002.
- Delvosalle, C. A Methodology for the Identification and Evaluation of Domino Effects, Rep. CRC/MT/003, Belgian Ministry of Employment and Labour, Bruxelles, 1998.
- Handbook failure frequencies, 2009 for drawing up a safety report, Flemish Government LINE Department Environment, Natural and Energy Policy Unit Safety Reporting Division scenarios in process industries. *Journal of Hazardous Materials* 130, 200–219, 2006.
- Hourtoulou D., 2002, Rapport final – Opération a: ASSessment of the Uncertainties in Risk Analysis of Chemical Establishments, INERIS DHo - 2002-26824.
- Khan, F.I., and Abbasi, S.A, Models for domino effect analysis in chemical process industries. *Process Safety Progress* 17, 107, 1998.
- Kourniotis, S.P., Kiranoudis, C.T., Markatos, N.C. Statistical analysis of domino chemical accidents. *Journal of Hazardous Materials* 71, 239–252, 2000.
- Landucci G, Gubinelli G, Antonioni G, Cozzani V. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. *Accident Analysis & Prevention* 41, 1206–1215, 2009.

- Liu A, Wu C, Peng X, Research on Area Risk Assessment for Chemical Park based on Domino Effect Model. *Procedia Engineering*, 47–52, 2012.
- Mingguang Z, Juncheng J. An improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure. *Journal of Hazardous Materials* 158, 280–286. 2008.
- P.A.M. Uijt de Haag, B.J.M. Ale, 2005, Publication Series on Dangerous Substances (PGS 3): Guidelines for Quantitative Risk Assessment (Purple Book). Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
- Reniers Genserik, Cozzani Valerio, 2013, Domino Effects in the Process Industries Modelling, Prevention and Managing, 35-39. Elsevier.
- Reniers Genserik L.L., 2010, Multi-Plant Safety and Security Management in the Chemical and Process Industries, 13. WILEY-VCH.
- Reniers GLL, Dullaert W, Ale BJM, Soudan K, Developing an external domino accident prevention framework: Hazwim. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18, 127–138, 2005.
- Reniers GLL, Dullaert W. DomPrevPlanning©: User-friendly software for planning domino effects prevention. *Safety Science* 45, 1060–1081, 2007.
- Vilchez JA, Espejo V, Casal J, Generic event trees and probabilities for the release of different types of hazardous materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24, 81–87, 2011.