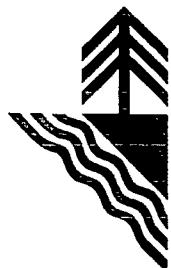


**Exemple de méthode:
Etude de risque d'une
citerne pour gaz
liquéfié**

**Ordonnance
sur les accidents majeurs**

Etat: mai 1996



**Office fédéral de l'environnement,
des forêts et du paysage (OFEFP)**

Impressum

Les membres du groupe de travail "Exemple de méthode pour l'étude de risque des installations de stockage de gaz liquéfié," ayant collaboré à ce rapport sont:

Confédération

M. Schiess OFEFP, Berne (présidence)
R. Bischof OFEFP, Berne

Autorités cantonales

G. Fiolka Amt für Umweltschutz, St. Gallen
F. Berdat Office de l'industrie, des arts et métiers et du travail
du canton de Berne (OCIAMT)
R. Dumont Kant. Laboratorium, Sekt. Chemiesicherheit, Aarau
J. Hansen Koordinationsstelle für Störfallvorsorge, Zürich
A. Stämpfli Amt für Umweltschutz, St. Gallen

Organes de contrôle et experts

H.J. Lüscher Techn. Inspektorat des Schweiz. Gasfaches, Zürich
P. Scholten Holinger AG, Baden

Branche des gaz liquéfiés

C. Dällenbach elf-oil (switzerland) SA, Pery
P. Heusi ESSO (Schweiz), Zürich
J. Ruckstuhl SHELL (Switzerland), Zürich

Auteurs

Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG, Zürich
M. Wolfer, dipl. Chem. ETH (directeur du projet)
F. Gmünder, dipl. Natw. ETH
A. Eckhardt, dipl. Biol.

Les auteurs remercient Monsieur R. Mock, collaborateur scientifique à la chaire des techniques de sécurité de l'EPF de Zurich pour ses commentaires sur les analyses de fiabilité.

Traduction: Basler & Hofmann en collaboration avec le service de traduction de l'OFEFP

Téléchargement du fichier PDF: www.environnement-suisse.ch/publications
(il n'existe pas de version imprimée)
Référence: VU-3815-F

Commande:

Service de documentation
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage
3003 Berne

Sommaire

Préface

Liste des abréviations

1. Introduction	1
2. Données de base	2
2.1 Entreprise et voisinage	2
2.2 Produits stockés	4
2.3 Description de l'installation	4
2.4 Mesures de sécurité	5
3. Analyse	8
3.1 Méthodes	8
3.2 Dangers potentiels	8
3.3 Scénarios principaux	8
4. Conclusions	28
4.1 Scénarios dominants	28
4.2 Courbe cumulative du risque	28
4.3 Commentaire et incertitudes	29
5. Résumé	33

→

Liste des annexes

35

Annexe 1

Plan de situation de l'entreprise (n'est pas contenu dans
dans ce document)

Annexe 2

37

Plan des environs

Annexe 3

41

Arbres des causes et des événements

Annexe 4

55

Vue d'ensemble des accidents

Annexe 5

Plan d'alarme et d'intervention en cas d'accident (n'est pas
contenu dans ce document)

Préface

La prévention contre les accidents majeurs dans les installations de stockage de gaz liquéfié a fait l'objet d'un "Rapport-cadre Stockage de gaz liquéfié". Ce rapport publié en décembre 1992 donne les bases de calcul et les modèles nécessaires pour établir le rapport succinct et, le cas échéant, l'étude de risque.

Pour l'application de ce rapport à un cas concret, l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage a constitué un groupe de travail chargé de réaliser un "Exemple de méthode pour l'analyse de risque d'une citerne de stockage de gaz liquéfié". Placé sous la conduite de l'OFEFP, le groupe de travail était constitué de représentants des cantons et de la branche des gaz liquéfiés et d'experts d'un bureau d'ingénieurs.

L'exemple, basé sur l'état des connaissances en décembre 1995, présente une étude de risque pour une installation de stockage de gaz liquéfié, établie conformément aux dispositions de l'annexe 4.1 de l'ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM). Les détenteurs d'entreprises qui comprennent des installations de stockage de gaz liquéfié et les autorités d'exécution disposent ainsi aujourd'hui d'un exemple décrivant la manière de procéder pour déterminer de manière fiable, sans efforts démesurés, l'ampleur des risques liés à une telle installation. Il est clair que chaque entreprise adaptera la manière de procéder en fonction de sa propre situation.

La vérité ne se trouve pas dans les chiffres, mais celui qui renonce aux chiffres craint de faire face à une 'vérité' au moins sujette à discussion.

Robert Fogel, prix Nobel d'économie 1993

Liste des abréviations

ASIT	Association Suisse d'Inspection Technique
BLEVE	Explosion de vapeur causée par un liquide en ébullition (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)
CFST	Commission fédérale de coordination pour la sécurité au travail
CNA	Caisse nationale suisse d'assurance en cas d'accidents
FF	Incendie d'un nuage de gaz
FS	Torche
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
NE	Nord-est
NO	Nord-ouest
OPAM	Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs du 27 février 1991
PC	Probabilité-Conséquences (diagramme PC)
SE	Sud-est
SO	Sud-ouest
TNO	Institut hollandais des techniques de l'environnement et de l'énergie, Vóorburg
VCE	Explosion d'un nuage de gaz
xE-y	$x \cdot 10^{-y}$

1. Introduction

La méthode proposée décrit comment établir, dans le cas d'une citerne pour le stockage de gaz liquéfié, une étude de risque qui soit conforme aux dispositions de l'ordonnance fédérale sur la prévention des accidents majeurs (OPAM). La méthode, basée sur les données du rapport-cadre¹, traite d'une citerne de propane installée dans un site fictif et présente les différentes étapes de l'étude de risque ainsi que la manière d'établir le rapport. Des détails sont fournis uniquement pour les chapitres qui sont importants pour la compréhension des réflexions et des calculs ci-après.

Décisions de l'autorité

L'entreprise XXX, propriétaire d'une citerne de propane d'une contenance maximale de 63'000 kg (seuil-limite pour le propane selon OPAM: 20'000 kg) a remis le 1er avril 1993 un rapport succinct à l'autorité d'exécution compétente. Après avoir étudié le rapport, l'autorité en a conclu qu'en cas d'accident majeur, on ne pourrait pas exclure tout risque de dommages sérieux pour la population. En application de l'article 6 de l'OPAM, elle a donc ordonné une étude de risque.

¹ Groupe de travail "Stockage de gaz liquéfié": Rapport-cadre "Stockage de gaz liquéfié" pour le rapport succinct et l'étude de risque en vue de la prévention des accidents; Basler & Hofmann, 1ère édition, version française, juin 1995

2. Données de base

2.1 Entreprise et voisinage

Délimitation du système	Dans l'exemple étudié, le seul danger potentiel important dans l'aire de l'entreprise est la citerne pour gaz liquéfié. L'étude de risque se limite donc à la citerne telle qu'elle est décrite dans le rapport-cadre.
Plans	L'emplacement de la citerne est indiqué sur le plan de situation (annexe 1). Le plan des environs ² (annexe 2) indique les objets importants pour l'estimation du risque.

2.1.1 Caractéristiques de l'entreprise³

2.1.2 Permis, autorisations et concessions⁴

2.1.3 Causes possibles d'accidents majeurs

Trafic routier	Il n'y a pas de route à proximité de la citerne. Un endommagement de la citerne par des véhicules peut être exclu.
	Le remplissage de la citerne se fait dans l'entreprise. Un camion de l'entreprise passe en moyenne deux fois par heure. La configuration des lieux ne permet que des vitesses inférieures à $30 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, de sorte qu'un endommagement direct de la citerne ou du camion citerne provoquant une fuite de gaz liquéfié peut être pratiquement exclu. Lors du dépotage, un endommagement mécanique de conduites exposées ou du tuyau flexible de remplissage est possible.

² Voir annexe E, paragraphe 2.1 du manuel I de l'OPAM

³ Voir annexe E, paragraphe 2.1 du manuel I de l'OPAM

⁴ Les permis, autorisations et concessions sont à indiquer.

Trafic aérien

Selon l'étude de l'OFAC⁵, il n'y a pas un risque accru de chute d'avion à l'emplacement de la citerne. C'est pourquoi on reprend la fréquence de chute en route donnée dans cette étude.

2.1.4 Voisinage

Pour l'analyse des effets possibles d'un accident majeur on distingue entre les lieux et les objets suivants (voir annexe 2):

Lieux avec des personnes à l'extérieur

- zone industrielle et zone d'habitation dans le voisinage des objets 1 à 5
- gare, place de la gare, quais
- village

Objets, lieux avec des personnes dans des bâtiments et des véhicules

- entreprises 1 et 2 (objets 1 et 2)
- 7 villas (objet 3)
- immeubles locatifs 4 et 5 (objets 4 et 5)
- village
- ligne de chemin de fer
- route principale

2.1.5 Rose des vents

Les conditions de vents ont une influence décisive sur les effets possibles de certains scénarios d'accidents. Il convient donc de les prendre en considération.

⁵ OFAC, Office fédéral de l'aviation civile, «Les effets de l'aviation sur l'environnement», rapport technique F: Risque de chute, 1993

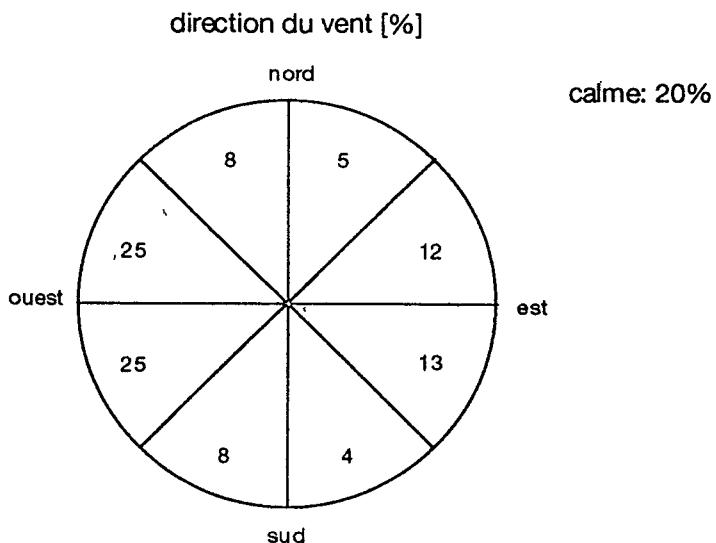


Figure 1: Rose des vents à l'emplacement de la citerne pour gaz liquéfié

2.2 Produits stockés

L'entreprise stocke du propane dont les propriétés physiques sont décrites dans le rapport-cadre, annexe F. Le volume de la citerne cylindrique est de 150 m³. Avec un taux de remplissage maximum de 85%, le contenu atteint 63.8 t, alors que le seuil-limite selon l'OPAM est de 20 t. A 20°C, la surpression du gaz liquéfié est de 7.3 bar. La citerne a une pression de service maximale de 15.5 bar.

2.3 Description de l'installation

Une description générale du système est donnée dans la demande de permis d'installation ainsi que dans le rapport succinct du 1er avril 1993, page 5. Seules les parties de l'installation qui jouent un rôle pour la sécurité et pour l'analyse de risque sont évoquées ici. Le schéma de principe de la citerne correspond à celui de la figure 2 du rapport-cadre. Les éléments de sécurité importants du système sont représentés dans la figure 8 du rapport-cadre.

Soutirage en phase gazeuse

Le soutirage se fait uniquement en phase gazeuse à l'aide de deux réducteurs de pression (diamètre 1 pouce, section 5.8 cm²) raccordés à la citerne par des conduites de 1 1/4 de pouce (section 10.1 cm²). Les sorties des réducteurs sont reliées à une conduite commune de 3 pouces (section 51.3 cm²).

Soupapes de sécurité

La citerne est équipée de deux blocs de 4 soupapes de sécurité réglées à une pression de fonctionnement de 17.1 bar. Trois soupapes ouvertes par bloc atteignent, à la surpression de 20.5 bar, une capacité de décharge de $2 \times 450 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ d'air, ce qui, pour une densité de $2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ correspond à une quantité de $2 \times 900 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ de propane. Ainsi les règles de sécurité de l'ASIT exigeant une capacité de décharge de $620 \times A^{0.82} \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ d'air sont satisfaites. Pour la citerne considérée d'une surface A de 200 m^2 , cette exigence correspond à $800 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ d'air soit $1600 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ de propane.⁶

Stockage

En raison des fluctuations saisonnières du prix du propane, le stock est réduit au minimum du printemps à l'automne (contenu moyen = 15 t). Pour l'hiver, on remplit la citerne, au printemps elle est presque vide.

La citerne contient donc:

Durant 9 mois: 10 – 20 t (en moyenne 15 t)

Durant 3 mois: 50 – 60 t (en moyenne 55 t)

Livraison

Il y a 50 livraisons annuelles de 10 t de propane amené par camion-citerne. Ce dernier stationne environ 100 minutes sur l'aire de l'entreprise. Il est admis que le dépotage dure le même temps: pendant 50 minutes, le véhicule contient plus de 5 t de propane («plein») et pendant 50 minutes, moins de 5 t («presque vide»).

Déclivité du terrain

Le terrain sous la citerne présente une déclivité de 5%. Une accumulation de propane gazeux ou liquide sous la citerne peut donc être exclue.

2.4 Mesures de sécurité

2.4.1 Règlements appliqués

L'installation est conforme aux règles de la technique et en particulier aux directives et prescriptions CFST 1941, 1ère partie (édition 1.90) et à la prescription 705 de l'ASIT.

⁶ Selon la prescription 705 de l'ASIT, la surface A d'une citerne cylindrique est à calculer comme

$$A = (L + 0.3 D_a) \cdot D_a \cdot \pi \quad (\text{en m}^2)$$

L = longueur totale en surface en m

D_a = diamètre extérieur en m

2.4.2 Mesures prises pour diminuer le danger potentiel

Durant 9 mois, le contenu de la citerne est au niveau le plus bas.

2.4.3 Mesures permettant d'empêcher les accidents majeurs

- L' ASIT a procédé au dernier contrôle extérieur en 1993. Le rapport sur ce contrôle est disponible. Selon la prescription 705 de l'ASIT, le prochain contrôle intérieur est prévu pour l'an 2000.
- Les soupapes de sécurité sont remplacées tous les 4 ans. Les plombs des soupapes indiquent que la dernière fois remonte à 1992.
- Conduites de décharge avec point de rupture obligé, indicateur de niveau, jauge de point haut, manomètre, système de vidange et panneaux indicateurs pour danger d'explosion et d'incendie sont installés. Selon le plan de l'installation, des sécurités de rupture sont installées à tous les endroits où elles sont nécessaires.
- Les garnitures exposées sont protégées par des capes verrouillables. En plus, l'aire de stockage est clôturée et fermée.
- La citerne est équipée du système d'arrosage prescrit. La capacité est de $1400 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ à une pression de 8 bar. La directive CFST exige une capacité de $600 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. L'installation est branchée sur une conduite circulaire du service des eaux, dont la pression normale est de 6 à 9 bar, et qui atteint encore une capacité de $800 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ pour une pression de 3 bar.

L'enclenchement de l'arrosage est situé à 40 m de la citerne, de façon à être toujours accessible en cas d'incendie. Les conduites d'eau sont vidées en automne pour éviter le gel, et sont remplies au printemps. Les directives correspondantes sont contenues dans le plan de travail. Avant la vidange automnale, le fonctionnement de l'installation est contrôlé.

- Le trafic dans l'aire de l'entreprise est réglé de manière à pouvoir raisonnablement exclure un endommagement de la citerne par des véhicules.
- Les zones-Ex selon le feuillet 2153.f-1992 de la CNA sont respectées (zone de sécurité de 3 m au voisinage des ouvertures de décharge et du raccord de remplissage).

- Les distances de sécurité selon CFST 1941, 1ère partie sont respectées.
- L'état des conduites est contrôlé une fois par an par l'entreprise Y, avec laquelle un contrat d'entretien a été conclu.
- Le collaborateur responsable de la sécurité est au courant des propriétés particulières et des dangers du propane. Il procède régulièrement à des contrôles d'étanchéité au moyen d'un produit moussant. Il doit également empêcher une utilisation inadéquate des environs de la citerne et prendre les mesures qui s'imposent.
- Le mode d'emploi et les consignes de sécurité de l'installation sont parties intégrantes du manuel de l'entreprise.
- Chaque nuit, un gardien fait deux rondes de contrôle.

2.4.4 Mesures permettant de limiter les conséquences d'un accident majeur

- Dans les environs immédiats de l'installation il n'y ni caves, ni canalisations, ni puits ou fosses, dans lesquels du gaz pourrait s'accumuler. L'écoulement d'eau de pluie le plus proche est situé à 50 m et est équipé d'un siphon.
- La légère déclivité sous la citerne empêche l'accumulation de gaz liquéfié. Le sous-sol est impérméable.
- Un plan d'alarme et d'intervention en cas d'incident a été mis au point avec les pompiers locaux (voir annexe 5). En cas de feu, il y a plusieurs bouches à l'incendie (voir plan de situation, annexe 1).
- Le fournisseur du gaz offre un service d'assistance 24 heures sur 24.

3. Analyse

3.1 Méthodes

Les méthodes utilisées et les modèles de calcul sont décrits dans les annexes A – D du rapport-cadre.

3.2 Dangers potentiels

Le danger potentiel du système étudié est déterminé par la quantité de propane stocké (max. 63.8 t). Les caractéristiques du danger potentiel "propane liquéfié sous pression dans une citerne" sont illustrés dans le rapport-cadre, chiffre 2.2.

3.3 Scénarios principaux

Pour le stockage de propane liquéfié sous pression, les scénarios suivants sont considérés comme principaux:

- BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion): une chaleur excessive ou une contrainte mécanique extrême font éclater un réservoir; le gaz liquéfié est libéré d'un coup et s'enflamme. Pour des citernes de stockage, un tel événement a par exemple lieu en cas d'incendie, au cours duquel la chaleur fait monter la pression du gaz au-dessus de la pression d'éclatement. L'incendie enflamme immédiatement le gaz libéré, et il se forme une boule de feu ascendante.
- Incendie d'un nuage de gaz (FF): le gaz libéré par une fuite continue étant plus lourd que l'air, il forme un nuage au ras du sol qui ne se dilue que lentement avec de l'air. Des mélanges inflammables peuvent ainsi se propager à des distances importantes du point de fuite. Si le nuage prend feu, la combustion se propagera en fonction de l'extension et de la concentration du nuage à des vitesses comprises entre quelques $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ et quelques $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Des essais ont démontré qu'en absence d'obstacles majeurs, les effets de pression restent minimes (voir rapport-cadre, annexe C2.5).
- Explosion d'un nuage de gaz (VCE): si un nuage de gaz formé au ras du sol à la suite d'une importante libération spontanée prend feu, des

obstacles placés en aval du front de combustion peuvent créer des ondes de pression de 0.3 à 0.5 bar. Dans le cas présent, le terrain est ouvert et il ne faut pas s'attendre à d'importants effets de pression.

- Torche: un jet de gaz s'échappant par une brèche forme une torche de plusieurs dizaines de mètres, s'il est enflammé. Une telle torche représente avant tout un danger pour les installations avoisinantes et peut être à l'origine d'un BLEVE.
- Projection de débris: lors d'un BLEVE, des débris de la citerne éclatée peuvent être projetés aux alentours. Pour des citerne cylindriques, la probabilité de projection des débris dans la direction de l'axe du cylindre est plus grande (60%) que perpendiculairement à l'axe (40%). En tenant compte de l'orientation des citerne et du fait que les distances de projection ne dépasseront guère 250 m, les dommages causés par la projection de débris peuvent être négligés par rapport aux effets directs du BLEVE.

3.3.1 Modes de libération et probabilité d'occurrence

Modes de libération principaux et méthodes

Les principaux modes de libération sont la libération spontanée (éclatement de la citerne) et la libération continue sur la section complète d'une conduite (voir également rapport-cadre, annexe B1). De petites fuites dues par exemple à des joints défectueux n'ont pas de conséquences directes pour les environs, mais elles peuvent être la cause de libérations plus grandes.

Arbres des causes et des événements

Les probabilités sont calculées, comme décrit dans le rapport-cadre, par la méthode des arbres des causes et des événements. Les arbres des causes pour la citerne et pour le camion-citerne figurent à l'annexe 3 de cette méthode.

La probabilité d'une libération ainsi que l'exposition de la population dépendent de l'heure: c'est pourquoi des arbres différents sont utilisés pour le jour et pour la nuit. La probabilité est répartie à part égale entre le jour et la nuit. Cela signifie que les probabilités par an des événements de base qui peuvent avoir lieu aussi bien de jour que de nuit sont multipliées par 0.5 dans les arbres des causes correspondants.

Les chiffres donnés entre parenthèses dans les arbres des causes se rapportent à des événements partiels déjà décrits sous le même chiffre dans le rapport-cadre, annexe B ⁷. Les événements de base des arbres des causes sont également commentés.

Arbres des causes "Libération continue"

Sécurité de rupture de conduite ne ferme pas (3)

La valeur recommandée dans le rapport-cadre pour la probabilité de défaillance (0.05) est reprise ⁸.

Sabotage (13)

Le sabotage n'est pas de nature stochastique (les actes de sabotage visent volontairement certaines installations) et n'a en principe pas de place dans un arbre des causes. On renoncera donc à quantifier sa probabilité. Le sabotage est inclus dans les événements de caractère général tels que "joints défectueux et petites brèches" et "autres dommages".

Joints défectueux et petites brèches (4)

La valeur recommandée dans le rapport cadre est reprise (10^{-5}). Pour les arbres des causes de jour et de nuit, elle est multipliée par 0.5.

Soupape de sécurité s'ouvre spontanément (1)

La valeur recommandée dans le rapport-cadre est reprise. Comme la citerne est équipée de 8 soupapes, la valeur recommandée de $2 \cdot 10^{-7}$ est multipliée par 8 et divisée par 2 pour les arbres des causes de jour et de nuit. Il est cependant admis qu'une libération par la soupape de sécurité ne représente pas un risque important, la vitesse de sortie élevée du gaz conduisant à une dilution immédiate avec l'air, au-dessous de la limite inférieure d'explosion. La probabilité par an est reportée dans l'arbre des causes, mais n'est pas utilisée dans le calcul.

⁷ Les probabilités, probabilités de défaillance, etc., indiquées dans les arbres des causes et des événements sont basées sur l'état des connaissances en 1992 (rapport-cadre). Il ne s'agit en aucun cas des valeurs spécifiques à une installation et qui seules seraient incontestables. En général, il s'agit de valeurs génériques pour des installations de type identique ou semblable (installations de stockage) ou de valeurs reprises des techniques des procédés (bibliographie). Quand aucune information n'était disponible, on a eu recours aux opinions des experts. Des valeurs plus précises peuvent être utilisées dans une étude de risque en indiquant leurs sources.

⁸ Cette valeur est une opinion d'experts prudente qui tient compte des défaillances proprement dites et des cas douteux pour lesquels, en raison d'un faible débit, le fonctionnement n'est pas assuré

Surremplissage et libération par la soupape de sécurité (8)

La valeur recommandée dans le rapport-cadre est reprise ($6.7 \cdot 10^{-6}$ par remplissage). En fonction des quantités stockées, un surremplissage n'est possible que durant les 3 mois d'hiver c'est-à-dire pour environ 13 remplissages, et cela de jour uniquement. La quantité libérée est toujours faible: la pompe du camion n'est pas assez puissante pour surmonter la pression de fonctionnement de 17.1 bar des soupapes de sécurité. Une libération ne peut donc être due qu'à une augmentation de la température qui sera toutefois lente, en raison de la grande quantité de liquide. La probabilité par an est reportée dans l'arbre des causes, mais n'est pas utilisée dans le calcul.

Incendie

Les effets d'un incendie sur une conduite proche de la citerne n'ont pas été étudiés, ce risque étant presque inexistant.

Contrainte mécanique extérieure (12)

La rupture d'une conduite par contrainte mécanique extérieure peut avoir lieu si un véhicule endommage une conduite. La valeur donnée est déduite de la probabilité qu'un véhicule lourd sorte d'une route secondaire ($1.5 \cdot 10^{-5}$ par an, voir rapport-cadre). Comme la circulation dans l'aire de l'entreprise avec 2 passages de véhicules par heure est nettement plus faible que sur une route secondaire moyenne, la valeur est d'env. 10^{-6} par an. En reprenant cette valeur dans l'arbre des causes, la probabilité est surestimée, puisqu'une collision ne provoque pas nécessairement une fuite. La nuit, il n'y a pas de circulation dans l'entreprise, et la probabilité est réduite d'un facteur 100.

Négligence (lors de révisions) (15)

Lors des travaux de révisions, il est imaginable qu'une fuite ait lieu sur la section complète d'une conduite. Il n'y aura des conséquences importantes que si la fuite passe longtemps inaperçue ou si elle n'est pas interrompue. Pour cette grave négligence, on propose une valeur de $5 \cdot 10^{-5}$ par an déduite de la statistique CNA sur les accidents avec du gaz liquéfié.

Autres causes (5)

La valeur recommandée dans le rapport-cadre est reprise (10^{-6} par an). Elle comprend également les ruptures de conduites dues à des séismes⁹.

⁹ L'auteur du rapport n'a connaissance d'aucun cas de séisme ayant provoqué une libération de gaz. Il faut cependant admettre que des séismes d'intensité IX peuvent conduire à des ruptures de conduites. La fréquence de séismes de cette intensité est inférieure à 10^{-5} par an pour une grande partie du plateau suisse. Pour les régions plus exposées (Valais, Genève, Bâle et Engadine), les fréquences annuelles se situent aux environs de $5 \cdot 10^{-4}$ par an.

Pour les arbres des causes diurnes et nocturnes, elle est multipliée par 0.5.

Rupture du flexible lors du remplissage (7)

La valeur recommandée dans le rapport-cadre est reprise ($8 \cdot 10^{-7}$). Elle est multipliée par le nombre de livraisons par an (50). Cet événement n'est possible que de jour.

Vanne de fond non activée ou défectueuse (3)

La valeur recommandée dans le rapport-cadre est reprise (0.05).

Négligence (lors du remplissage) (10)

L'erreur considérée est un départ du camion-citerne avant la fin de l'opération, ce qui provoque l'arrachage du flexible. La valeur recommandée dans le rapport-cadre est reprise ($4 \cdot 10^{-6}$ par remplissage). Elle est multipliée par le nombre de livraisons par an (50). Cet événement ne peut se produire que de jour.

Effets extérieurs sur le camion-citerne (12)

Durant le dépotage, un véhicule peut entrer en collision avec le camion-citerne. Comme ce dernier est stationné dans un endroit où il n'y a que 2 passages horaires du camion de l'entreprise, la valeur proposée dans le rapport-cadre ($8 \cdot 10^{-6}$) est réduite d'un facteur 10, puis multipliée par le nombre de livraisons par an (50). Cet événement ne peut se produire que de jour.

Arbres des causes "Libération spontanée"

Effet thermique latéral

Cet événement n'est pas pris en compte dans l'analyse, car il n'y a pas de matériaux inflammables à proximité de la citerne. On peut également ignorer un éventuel accident de transport accompagné d'une libération de liquide inflammable, car il n'y a pour ainsi dire pas de trafic dans l'aire de l'entreprise. Puisqu'il n'est pas possible qu'une quantité importante de carburant s'accumule sous la citerne, celle-ci n'est pas mise en danger.

Incendie non maîtrisé en 10 minutes

L'expérience acquise au cours d'exercices montre que le corps local des pompiers est à pied d'œuvre en 8 minutes en moyenne. Les petits incendies sont ainsi immédiatement maîtrisés. Quant à un grand incendie, il est admis (dans 20% des cas) qu'on ne peut pas le maîtriser en 10 minutes de manière à pouvoir exclure une surchauffe de la citerne. De nuit, la moyenne est de 60% des cas.

Incendie non maîtrisé en 15 minutes	Selon entente avec les pompiers, les estimations sont 10% de jour et 30% de nuit.
Citerne pleine au moment de l'inflammation	Si les soupapes de sécurité fonctionnent, la citerne doit être presque pleine au moment de l'inflammation pour qu'il y ait un BLEVE. Dans les autres cas, le contenu de la citerne se sera échappé avant que celle-ci n'éclate. La citerne est pleine trois mois par an.
Forces naturelles	Vu l'emplacement de la citerne, il n'y a pas de risques d'endommagement. On peut exclure les éboulements, les chutes de pierres, les glissements de terrains et les inondations. Un séisme entraîne au pire une rupture de conduite (voir plus haut).
Avion (12)	<p><i>Avions de ligne:</i> La chute d'un avion de ligne n'est pas étudiée, car l'étude de risque porte avant tout sur les dangers liés à la citerne. Qu'un avion s'écrase sur le village ou sur la citerne, les conséquences seraient semblables. La présence de la citerne n'augmente que faiblement le risque collectif dû à la chute d'un avion de ligne. La fréquence de chute de $3 \cdot 10^{-13} \text{ m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ est très faible (voir alinéas suivants).</p> <p><i>Petits avions:</i> La situation est différente pour le cas des petits avions dont la chute doit être étudiée dans l'analyse. Un éclatement de la citerne n'est probable que si un avion s'écrase directement dessus. La probabilité de chute est calculée pour une surface de $24 \text{ m} \cdot 7 \text{ m} = 168 \text{ m}^2$ (surface du rectangle circonscrit à 2 m de distance autour de la citerne).</p> <p>Pour la région concernée, la fréquence de chute¹⁰ d'un petit avion est de $6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Ceci donne une probabilité par an de $1 \cdot 10^{-8}$ pour l'éclatement de la citerne provoqué par une chute d'avion. Cette probabilité est réduite d'un facteur 100 pour la nuit.</p>
Autres effets mécaniques	Les véhicules qui circulent dans l'aire de l'entreprise n'ont pas une vitesse suffisante pour endommager la citerne ou le camion-citerne, et ainsi provoquer une libération spontanée. Dans les environs, il n'y pas d'autres causes importantes.
Sabotage (13)	N'est pas quantifié dans cette étude (voir commentaire page 10).

¹⁰ Office fédéral de l'aviation civile, "Les effets de l'aviation sur l'environnement", 1993

GPL en flammes	La valeur est reprise de l'arbre des événements "fuite continue de jour". Elle correspond à la probabilité cumulée de tous les événements entraînant un échauffement direct de la citerne.
Inflammation de carburant ou de combustible	Un incendie sous la citerne ou sous le camion n'est possible qu'en cas de fuite suivie de l'inflammation du liquide. Un accident de transport accompagné d'une fuite de carburant n'est pas à envisager dans l'aire de l'entreprise; d'une part le trafic interne est insignifiant, d'autre part une accumulation importante et dangereuse de carburant sous la citerne n'est pas possible.
Soupapes de sécurité ne fonctionnent pas (2)	La valeur proposée dans le rapport-cadre est reprise (10^{-11}).
Refroidissement insuffisant de la citerne (6)	La valeur donnée dans le rapport-cadre est reprise (0.5).
Surremplissage (8)	La valeur recommandée dans le rapport-cadre ($6.7 \cdot 10^{-6}$ par remplissage) est reprise. En raison de la variation du stock, un surremplissage n'est possible que durant les 3 mois d'hiver, c'est-à-dire pour 13 remplissages. L'événement n'a lieu que de jour.
Augmentation de la température	Un surremplissage n'est possible qu'en hiver (voir plus haut). Il est admis qu'il peut y avoir une fois par mois une augmentation suffisante de la température extérieure susceptible de provoquer un éclatement de la citerne en cas de non-fonctionnement des soupapes de sécurité.
Camion reste dans la zone dangereuse	En cas d'incendie, le chauffeur essayera de sortir le camion de la zone dangereuse. Dans la moitié des cas, cette opération n'est pas possible.

3.3.2 Effets d'une libération

Effets

La libération de gaz liquéfié n'a pas d'effets sur les environs tant qu'il n'y a pas d'inflammation. Les scénarios importants pour l'analyse des effets sont (voir également paragraphe 3.3):

- La torche
- L'incendie d'un nuage de gaz (FF)
- Le BLEVE

Les enchaînements des événements conduisant à des dommages après une libération sont décrits par des arbres des événements.

Torche

Conséquences	Seules les personnes qui se trouvent à proximité immédiate de la torche sont mises en danger. Quant à celles qui sont dans le voisinage de la citerne, elles peuvent se mettre en sécurité en s'éloignant de quelques mètres. Pour calculer la longueur de la torche, il convient de déterminer les possibilités de fuite.
Fuite d'une conduite	L'hypothèse est que la fuite a lieu sur toute la section (10 cm^2) des deux raccords parallèles de la citerne. Pour une pression de 8.3 bar correspondant à une température du liquide de 20°C , le taux de fuite est de $3.8 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ selon l'annexe C2.1.1 du rapport-cadre.
Débit de la pompe	Le débit de la pompe du camion-citerne est de $1.7 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. La sécurité de rupture est réglée à 1 1/2 fois cette valeur, soit $2.5 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. La puissance de la pompe ne permet guère un débit supérieur à $2.5 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, même en cas de rupture du flexible et de non-fonctionnement de la sécurité de rupture.
Rupture du flexible	Si la sécurité de rupture de la citerne ne fonctionne pas lors de la rupture du flexible, du propane est libéré à partir de la phase gazeuse, à raison d'environ $2 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ (section ouverte environ 10 cm^2).
Autres fuites	Le taux de fuite est inférieur à $1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ pour les petites brèches et les joints non-étanches, dont la probabilité par an est chiffrée à 10^{-5} .
Conclusion	Les taux de fuite sont inférieurs à $3.8 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Afin de simplifier l'analyse, cette valeur est reprise pour toutes les fuites, ce qui représente une hypothèse pessimiste.
Longueur de la torche	La longueur de la torche correspondant au taux de fuite de $3.8 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ est de 18 m (rapport-cadre, annexe C2.4.2).

Incendie d'un nuage de gaz (FF)

Estimation des effets

La moitié des personnes se trouvant à l'extérieur dans la zone touchée meurent. Les personnes dans les bâtiments sont protégées des effets directs, 10% de ces personnes meurent cependant dans un incendie¹¹ provoqué par le nuage de gaz.

Etendue du nuage de gaz: fuite continue

Le diagramme de la figure 15 du rapport-cadre donne pour un taux de fuite de $3.8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ une distance moyenne de 110 m entre le point de libération et la limite inférieure d'explosion¹².

La figure 2 définit la zone potentiellement affectée par un nuage de gaz inflammable en fonction de la direction du vent.

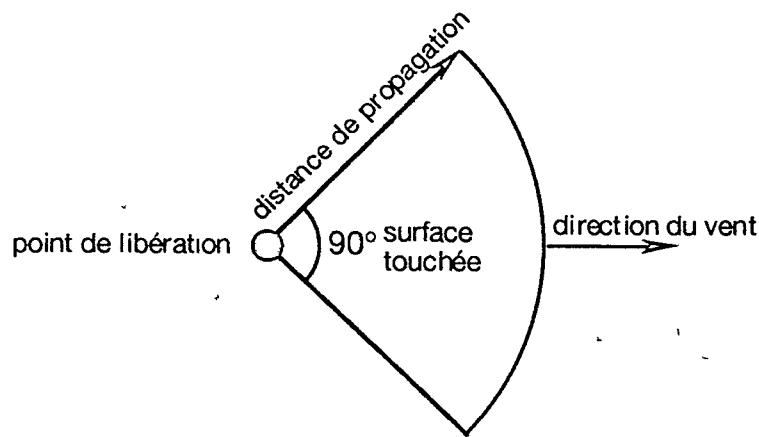


Figure 2: Définition de la zone potentiellement affectée par un nuage de gaz

Par vent calme, la zone affectée est un cercle dont le centre est situé au point de libération et dont le rayon est égale à la distance jusqu'à la limite inférieure d'explosion.

¹¹ L'expérience montre que des personnes directement touchées par l'incendie d'un nuage de gaz ne subissent pas nécessairement des blessures mortelles. Les parties du corps non protégées (p.ex. le visage) sont cependant brûlées au point qu'il faut envisager d'attribuer ces personnes à l'indicateur de dommages n1, morts et blessés graves (voir également TNO, "Green Book" 1992). Dans le cas présent, l'étendue du nuage de gaz est largement surestimée. Il est donc permis d'admettre qu'en réalité, l'incendie n'affecte pas toute la zone définie et qu'un taux de mortalité de 50% est adéquat. Si les modèles de propagation utilisés devaient permettre de mieux préciser l'étendue du nuage de gaz, il faudrait augmenter le taux de mortalité.

¹² Il est en général peu probable que le nuage de gaz atteigne son étendue maximale avant d'être enflammé, car il peut y avoir de nombreuses possibilités d'inflammation dans la zone de propagation (personnes, bâtiments, véhicules etc.). Comme le modèle utilisé ici conduit à un risque estimé peu critique (voir figure 4), une variation de l'étendue du nuage de gaz n'est pas étudiée par la suite.

Dans le cas d'un jet de gaz sortant d'une conduite, la distance jusqu'à la limite inférieure d'explosion ne comporterait que 14 m. L'étendue du nuage de gaz est donc surestimée¹³.

Etendue du nuage de gaz:
libération spontanée

Le diagramme de la figure 14 du rapport-cadre donne l'étendue du nuage de gaz dans le cas d'une libération spontanée:

Quantité libérée	distance ¹⁴
15 tonnes	450 m
55 tonnes	700 m

Lors de l'éclatement d'une citerne, les turbulences provoquées par la libération du gaz entraînent un apport d'air important qui conduit rapidement à une grande dilution. Selon un modèle de calcul¹⁵ tenant compte de ces conditions, le rayon maximum du volume de mélange inflammable pour une quantité libérée de 55 tonnes est de 68.5 m. Les distances indiquées plus haut ne sont valables que pour une libération sans pression avec un apport d'air très lent. Elles sont donc à considérer comme limites supérieures¹⁶.

13. Une fuite continue de l'importance en question donne rarement lieu à un pur jet ou une pure libération sans pression (=condition du diagramme de la figure 15, rapport-cadre). Cette circonstance peut être prise en compte en utilisant par exemple d'une manière générale la moyenne géométrique des deux distances de propagation. Pour comparaison:

Le modèle DEGADIS de propagation des gaz lourds donne pour les paramètres taux de fuite: 7 kg.s^{-1}
stabilité des couches atmosphériques: neutre
rugosité: $z_0 = 0.45 \text{ m}$
température de l'air: $t = 15^\circ\text{C}$
humidité de l'air: $r = 70\%$
vitesse du vent: $u_{10\text{m}} = 4 \text{ m.s}^{-1}$

une distance de propagation de 33 m qui augmente à 66 m pour une rugosité $z_0 = 0.05 \text{ m}$ (voir rapport-cadre, réf. 9). Pour le même taux de fuite, la moyenne géométrique des distances pour le jet de gaz et la libération sans pression est de 54 m.

14. idem note 12.

15. TNO: Methods for the determination of possible damage (Green Book), Voorburg, 1989 (édition anglaise: First edition 1992).

16. Deux modèles partant de conditions initiales distinctes donnent des distances de propagation différent d'un ordre de grandeur. Cela pose un problème qui peut être résolu de manière analogique au cas de la fuite continue, en prenant la moyenne géométrique des deux distances. Il est ainsi tenu compte qu'en réalité, les conditions de libération se situent entre les deux extrêmes admis par les modèles. Pour des quantités libérées de 15 t et de 55 t, les distances calculées de cette façon sont de 140 et de 220 m.

BLEVE

Estimation des effets

Le rapport-cadre décrit les effets du BLEVE pour différents lieux où se trouvent des personnes, ce qui donne pour le cas présent:

Extérieur: $F = 0.003 \cdot P_D \cdot M^{0.666}$

(F = nombre de victimes, M = quantité libérée en [t], P_D = densité des personnes à l'extérieur dans le triple rayon de la boule de feu [personnes · km⁻²])

Bâtiments: $F = 50 - 90\%$ des personnes affectées dans le rayon simple de la boule de feu

Voitures: On considère qu'il n'y a que des blessés.

Trains: Les passagers des trains sont compris dans la densité des personnes P_D pour le triple rayon de la boule de feu des BLEVE de 15 et 55 tonnes (voir plus bas). Les effets des BLEVE de 5 et 10 tonnes sont trop faibles pour mettre en danger les voyageurs.

Zone affectée

Les variations du stock permettent de distinguer les deux états "citerne pleine" (55 tonnes) et "citerne presque vide" (15 tonnes)¹⁷.

Rayon de la boule de feu $R = 27.5 \cdot M^{0.33}$

(R en [m] et M en [t])

Quantité libérée	Rayon simple de la boule de feu	Rayon triple
15 tonnes	68 m	203 m
55 tonnes	104 m	313 m

BLEVE du camion-citerne

Le camion-citerne transporte au maximum 10 t de gaz liquéfié. Le temps entre l'arrivée du camion sur l'aire de l'entreprise et la fin du dépotage est de 100 min. Lors du dépotage, on distingue entre un camion-citerne plein

¹⁷ En cas de feu sous la citerne pleine, 40t du contenu se seront échappées par les soupapes de sécurité après 17 minutes. Si seules trois soupapes par bloc fonctionnent, ce sera le cas après 22 minutes. De même, la citerne contenant 15 t sera vide après 6 ou 8 minutes. En admettant que les soupapes de sécurité fonctionnent, les quantités libérées lors d'un éclatement de la citerne prise au moins 15 minutes dans le feu seront donc de 15 t et de 0 t

(contenu > 5 t) et un camion-citerne presque vide (contenu < 5 t). Les rayons de la boule de feu sont calculés pour des quantités libérées de 10 t et de 5 t selon la formule donnée plus haut.

Quantité libérée	Rayon simple de la boule de feu	Rayon triple
5 tonnes	47 m	141 m
10 tonnes	59 m	178 m

Probabilités d'occurrence

Les probabilités d'occurrence sont calculées à l'aide d'arbres des événements présentés dans l'annexe 3 et commentés ci-dessous.

Arbres des événements "Fuite continue"

Jet libre

L'énergie cinétique élevée d'un jet libre entraîne un mélange suffisant avec de l'air, et empêche ainsi la formation d'un nuage inflammable. Il est admis que 20% des fuites continues donnent lieu à un jet libre, ce qui est une hypothèse prudente.

Inflammation immédiate

La population étant dense dans les environs du site de stockage, il faut donc compter avec un nombre particulièrement élevé de sources d'inflammation. La valeur recommandée dans le rapport-cadre est doublée (0.1).

Inflammation retardée

Même remarque que ci-dessus; valeur = 0.1.

Direction du vent

La répartition de la direction du vent est donnée par la rose des vents de la figure 1:

vent du sud-est	14 %
vent du nord-ouest	26 %
autres directions	40 %
calmes	20 %

Citerne dans le feu

La probabilité qu'un jet de gaz enflammé sortant d'une conduite touche la citerne est estimée à 0.5, en admettant une répartition aléatoire de la direction du jet.

Evacuation réussie Le temps compris entre la formation d'un nuage de gaz et l'inflammation peut être mis à profit pour évacuer la population en danger. De jour, une telle évacuation réussit dans un cas sur dix (0.1).

Arbres des événements "Libération spontanée"

Citerne pleine La citerne est remplie au maximum 3 mois sur 12, ce qui donne une probabilité de 0.25 pour le cas "citerne pleine". Tout le contenu de la citerne est libéré dans les situations où les soupapes de sécurité n'entrent pas en fonction, soit:

1. Contrainte mécanique extrême (p. ex. chute directe d'un avion sur la citerne); probabilité = $P(\text{contr. mécanique})$
2. Citerne dans le feu et mise en surpression; probabilité = $P(\text{feu et surpr.})$
3. Surchauffe d'une citerne trop pleine et non-fonctionnement des soupapes de sécurité; probabilité = $P(\text{surremplissage})$

La probabilité que le contenu maximum de la citerne s'échappe lors d'une libération spontanée est donc égale à

$$0.25 \cdot \frac{P(\text{contr. mécanique}) + P(\text{feu et surpr.}) + P(\text{surremplissage})}{P(\text{libération spontanée})}$$

Camion-citerne plein ou presque vide Il est admis que lors de la livraison et du dépotage, qui durent 100 minutes, le camion-citerne est plein (contenu > 5t) la moitié du temps. La probabilité de l'événement "camion-citerne plein" est donc de 0.5.

Inflammation immédiate La valeur recommandée dans le rapport-cadre est reprise (0.9).

Inflammation retardée La valeur recommandée dans le rapport-cadre est reprise (0.5).

Direction du vent La répartition de la direction du vent est donnée par la rose des vents de la figure 1:

vent du nord-ouest	26 %
vent du sud-ouest	26 %
vent du sud-est	14 %
vent du nord-est	14 %
calmes	20 %

Evacuation réussie Voir "fuite continue".

3.3.3 Conséquences pour la population

Seul l'indicateur de dommages n1 (= nombre de décès et invalidités lourdes, Manuel I de l'OPAM), prépondérant dans les accidents dus au gaz liquéfié, est pris en considération dans cette étude¹⁸.

Exposition¹⁹

Personnes à l'extérieur

Lieu	Jour	Nuit
Zone industrielle et d'habitation aux alentours des objets 1 à 5	10	2
Environs immédiats de la gare, place de la gare	10	1
Village	300/km ²	60/km ²
Quai de gare, 5 min. chaque heure	30	—

Tableau 1: Nombre de personnes à l'extérieur

Personnes dans les bâtiments

Objet n°	Description	Jour	Nuit
1	entreprise	10	0
2	entreprise	10	0
3	7 villas à 3 personnes de jour et 5 personnes de nuit	21	35
4	immeuble locatif 4	25	50
5	immeuble locatif 5	25	50
	village: densité de population	2'500/km ²	2'500/km ²

Tableau 2: Nombre de personnes dans les bâtiments

Personnes dans les voitures

Par 100 m de route principale, il faut compter 4 voitures le jour et 1 voiture la nuit. Le taux moyen d'occupation est de 1.5 personne par voiture. Le trafic sur les autres routes peut être négligé dans cette étude.

¹⁸ Selon les situations, d'autres indicateurs devront être pris en compte, en particulier le nombre de blessés et les dégâts matériels.

¹⁹ Les chiffres sont obtenus à partir de la densité à l'hectare de la population, des comptages du trafic, des informations des CFF et d'observations directes.

Personnes dans les trains

De jour, un train par heure s'arrête à la gare. Le nombre moyen de passagers par train est de 200.

Estimation des dommages

Torche

En raison de la longueur limitée de la torche, il est admis que personne ne sera touché.

Incendie d'un nuage de gaz

Voisinage immédiat

Les dommages dans le voisinage immédiat de la citerne sont calculés en fonction du rapport de la surface du nuage de gaz et de la surface du périmètre défini par les objets 1 à 5 (surface $\sim 60'000 \text{ m}^2$, voir annexe 2). Les surfaces touchées en cas de fuite continue sont égales à $9'500 \text{ m}^2 = 110^2 \pi/4 \text{ m}^2$ par vent et à $38'000 \text{ m}^2$ par calme. En cas de libération spontanée, ces surfaces sont égales à 1/4 du périmètre par vent, et à tout le périmètre par calme.

Bâtiments et véhicules

Le risque d'incendie des bâtiments pris dans l'incendie d'un nuage de gaz est faible. Il est toutefois admis que 10 % des personnes se trouvant dans ces bâtiments périssent à la suite d'un incendie secondaire. La même hypothèse est valable pour les passagers des trains et les occupants des voitures. Le tableau 3 indique la surface du village et la longueur de la route exposées en cas d'incendie d'un nuage de gaz en fonction des paramètres de libération. Les tableaux 4 à 6 indiquent les dommages.

Libération	Vent	Surface exp. village	Longeur exp. route
$3.8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$	vent/calme	—	—
15'000 kg	vent du NE ou NO	0.072 km ²	400 m
15'000 kg	calme	0.144 km ²	800 m
55'000 kg	vent du NE ou NO	0.247 km ²	670 m
55'000 kg	calme	0.494 km ²	1'340 m

Tableau 3: Surfaces et longueurs exposées en cas d'incendie d'un nuage de gaz

Fuite continue

Vent	surface exposée [m ²]	victimes (jour)	victimes (nuit)
vent du sud-est	9'500	1	0
vent du nord-ouest	9'500	1	0
autres directions	9'500	1	0
calme	38'000	3	1

Tableau 4: Victimes à l'extérieur lors de l'incendie d'un nuage de gaz à la suite d'une fuite continue

Vent	surface exposée [m ²]	victimes (jour)	victimes (nuit)
vent du sud-est	9'500	2	0
vent du nord-ouest	9'500	3	6
autres directions	9'500	0	0
calme	38'000	5	6

Tableau 5: Victimes dans les bâtiments lors de l'incendie d'un nuage de gaz à la suite d'une fuite continue

Au total, les dommages s'élèvent en cas de fuite continue aux chiffres rassemblés au tableau 6.

Vent	surface exposée [m ²]	victimes (jour)	victimes (nuit)
vent du sud-est	9'500	3	0
vent du nord-ouest	9'500	4	6
autres directions	9'500	1	0
calme	38'000	8	7

Tableau 6: Total des victimes lors de l'incendie d'un nuage de gaz à la suite d'une fuite continue

Libération spontanée

Les dommages en cas d'incendie d'un nuage de gaz dû à une libération spontanée sont récapitulés au tableau 7. Les dix termes des additions correspondent dans l'ordre aux nombres de victimes qui, au moment de l'accident, se trouvaient aux endroits suivants: à l'extérieur aux environs des objets 1 - 5; à l'extérieur aux environs de la gare; à l'extérieur dans le village; dans les bâtiments pour l'objet 1, l'objet 2, l'objet 3, l'objet 4 et l'objet 5; dans les bâtiments du village; dans les voitures.

Quantité, direction du vent	Victimes (jour)	Victimes (Nuit)	Victimes (jour, quai inclus)	Victimes (jour, quai et train inclus)
15 t, nord-ouest	$1+0+11+0+0+$ $2+3+3+18+2$ $=40$	$0+0+2+0+0+$ $4+5+5+18+1=$ 35	40	40
15 t, nord-ouest	$1+0+0+0+$ $0+0+0+0+0+0$ $=1$	0	1	1
15 t, sud-est	$1+1+0+1+1+0+$ $0+0+0+0$ $=4$	0	12	22
15 t, nord-est	$1+1+11+0+0+0$ $+0+0+18+2$ $=33$	$0+0+2+0+0+$ $0+0+0+18+1$ $=21$	41	51
15 t, calme	$5+5+22+1+1+$ $2+3+3+36+5$ $=83$	$1+1+4+0+0+$ $4+5+5+36+1$ $=57$	98	118
55 t, nord- ouest	$1+0+37+0+0+$ $2+3+3+62+4$ $=112$	$0+0+7+0+0+$ $4+5+5+62+1$ $=84$	112	112
55 t, sud-ouest	$1+0+0+0+0+0+$ $0+0+0+0$ $=1$	0	1	1
55 t, sud-est	$1+1+0+1+1+0+$ $0+0+0+0$ $=4$	0	12	22
55 t, nord-est	$1+1+37+0+0+$ $0+0+0+62+4$ $=105$	$0+0+7+0+0+$ $0+0+0+62+1$ $=70$	113	123
55 t, calme	$5+5+74+1+1+$ $2+3+3+123+8$ $=225$	$1+1+14+0+0+$ $4+5+5+123+2$ $=155$	240	260

Tableau 7. Victimes lors de l'incendie d'un nuage de gaz à la suite d'une libération spontanée.

BLEVE

Personnes à l'extérieur

Pour chiffrer les dommages (voir tableau 8), il faut déterminer la densité des personnes dans la surface définie par le triple rayon de la boule de feu, soit 140, 180, 200 et 310 m pour des quantités libérées de 5, 10, 15 et 55 tonnes. Dans la colonne "nombre de personnes exposées" du tableau 8, les différentes contributions à l'exposition sont dans l'ordre: personnes dans les environs des objets 1 - 5, personnes dans les environs de la gare et personnes dans le village.

Personnes sur le quai de gare

La citerne est visible depuis le quai de gare et un incendie violent ne peut pas échapper à l'attention des personnes qui attendent le train. Une évacuation a une grande chance de réussir (p. ex. avertissement par les pompiers ou par les haut-parleurs de la gare). Dans le cas d'un éclatement subit, les voyageurs n'auraient pas le temps de réagir. L'hypothèse prudente pour cette étude est que l'évacuation des passagers a la même chance de réussir que celle de la population.

La probabilité que les voyageurs soient touchés par un événement est donnée par leur temps de séjour sur le quai (5 minutes).

Personnes dans des voitures

La route est située en dehors des zones touchées par la boule de feu. Il n'y a pas de dommages.

Personnes dans les trains

De jour, un train par heure s'arrête à la gare. Les passagers ne sont exposés que pour un BLEVE de la citerne de stockage. Dans les autres cas, la distance jusqu'à la boule de feu est suffisante pour que les wagons offrent une protection valable. Les dommages sont calculés de la même manière que pour les personnes à l'extérieur.

La probabilité que les passagers du train soient touchés par un événement dépend du temps d'arrêt en gare (estimé à 2 minutes).

Quan- tité	Nombre de personnes exposées		Densité des personnes au km ²		Victimes		Jour (quai inclus)		Jour (quai et train inclus)	
	jour	nuit	jour	nuit	jour	nuit	densité	victimes	densité	victimes
5 t	10+5+ 0=15	—	244	—	2	—	487	4	487	4
10 t	10+10 +0=20	—	196	—	3	—	491	7	491	7
15 t	10+10 +0=20	2+1+0 =3	159	24	3	0	398	7	1989	36
55 t	10+10 +11 =31	2+1+2 =5	103	17	4	1	202	9	865	37

Tableau 8: Victimes à l'extérieur et dans les trains lors d'un BLEVE

Personnes dans les
bâtiments

L'exposition se limite aux bâtiments situés dans les surfaces définies par le rayon simple de la boule de feu; soit 50, 60, 70 et 105 m. Un bâtiment peut être situé complètement ou partiellement dans cette surface. Dans le premier cas, le taux de mortalité des occupants est de 90%, dans le deuxième de 50%.

Quan- tité	Bâtiments	Pour- centage de victimes	Personnes		Victimes	
			jour	nuit	jour	nuit
5 t	aucun	0	0	-	0	-
10 t	entreprise 2	50%	10	-	5	-
15 t	entreprise 2	50%	10	0	5	0
	1 villa	50%	3	5	2	3
55 t	entreprise 1	90%	10	0	9	0
	entreprise 2	90%	10	0	9	0
	2 villas	90%	6	10	5	9
	1 villa	50%	3	5	2	3
	bâtiment locatif 4	50%	25	50	13	25

Tableau 9: Victimes dans les bâtiments lors d'un BLEVE

Total

Quantité	Victimes (jour)	Victimes (nuit)	Victimes (jour, quai inclus)	Victimes (jour, quai et train inclus)
5 t	2	0	4	4
10 t	8	0	12	12
15 t	10	3	14	43
55 t	65	83	70	98

Tableau 10: Total des victimes lors d'un BLEVE

4. Conclusions

4.1 Scénarios déterminants

Les scénarios déterminants sont rassemblés dans le tableau 11. Une liste complète de tous les scénarios avec les dommages, les probabilités par an et les probabilités cumulées se trouve à l'annexe 4.

Situation	Scénario	P (probabilité par an)	C (conséquences = victimes)
jour, calme	Incendie d'un nuage de gaz, libération spontanée (55 t)	2×10^{-11}	225
jour, calme	Incendie d'un nuage de gaz, libération spontanée (15 t)	4×10^{-10}	83
jour	BLEVE citerne pleine	2×10^{-9}	65
jour	BLEVE citerne à moitié pleine, quai et train inclus	1×10^{-9}	43
jour	BLEVE citerne à moitié pleine	4×10^{-8}	10
jour	BLEVE camion-citerne plein	6×10^{-8}	8
jour, calme	Incendie d'un nuage de gaz, libération continue	3×10^{-7}	8
nuit, calme	Incendie d'un nuage de gaz, libération continue	7×10^{-8}	7
nuit, vent du nord-ouest	Incendie d'un nuage de gaz, libération continue	9×10^{-8}	6
jour, vent du nord-ouest	Incendie d'un nuage de gaz, libération continue	4×10^{-7}	4

Tableau 11: Scénarios déterminants classés par ampleur décroissante des dommages. Les détails du calcul sont donnés à l'annexe 4

4.2 Courbe cumulative du risque

Le risque pour la population que représente l'installation étudiée est jugé selon les directives de l'OFEFP "Critères d'appréciation pour l'ordonnance sur les accidents majeurs OPAM, Appréciation de la gravité des dommages, Appréciation de l'acceptabilité du risque". Du diagramme P-C (probabilité-conséquences) de la figure 3, construit à partir des résultats présentés en détail à l'annexe 4, ressortent les points suivants:

- La courbe cumulative du risque ne dépasse pas la ligne d'acceptabilité du risque proposée dans le manuel I de l'OPAM, annexe G.
- La courbe cumulative passe par le domaine intermédiaire pour des valeurs de l'indice d'accident majeur comprises entre 0.1 et 0.3 et touche la limite inférieure de ce domaine à la valeur de 0.55.

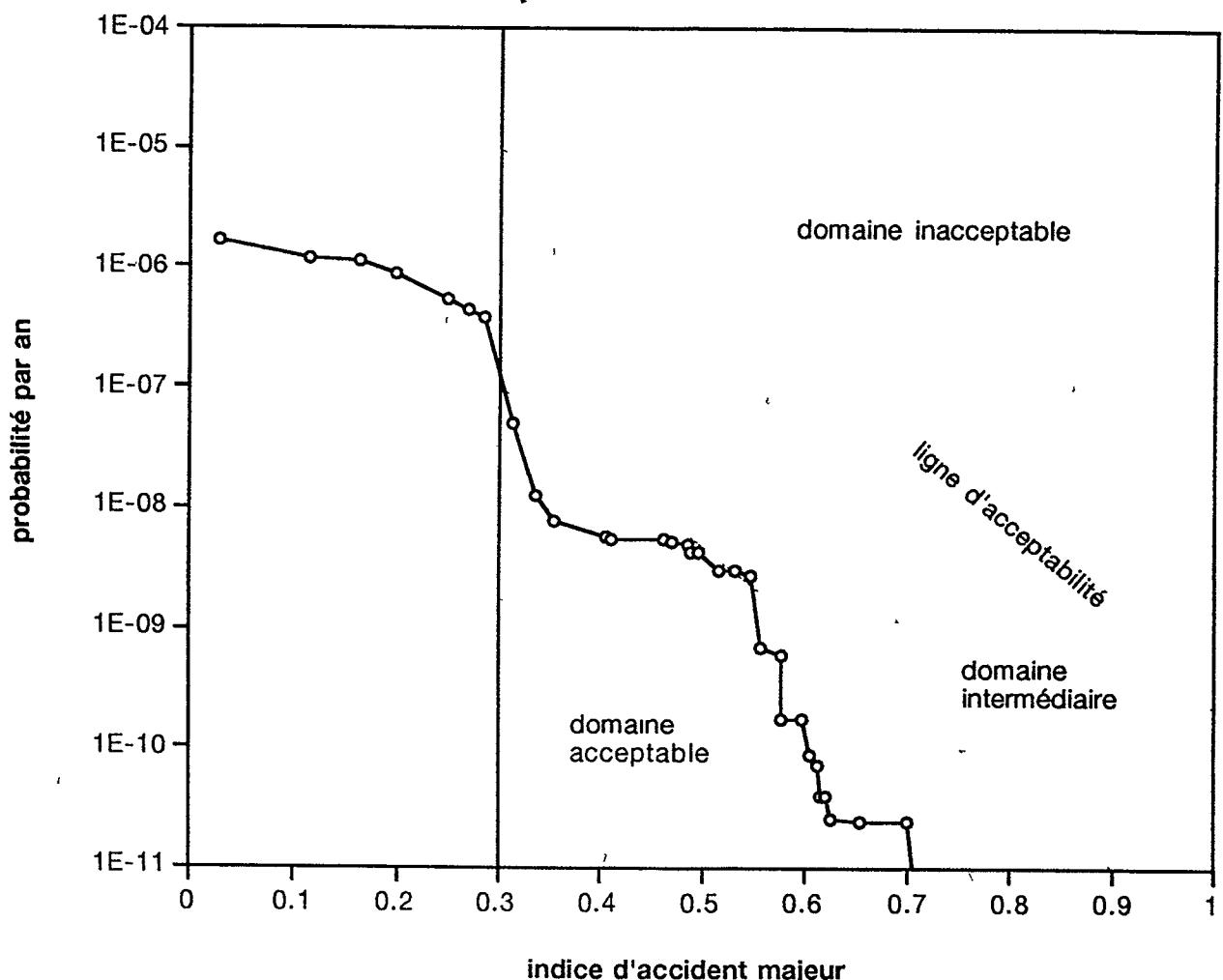


Figure 3 Courbe cumulative inscrite dans le diagramme P-C

4.3 Commentaire et incertitudes

4.3.1 Commentaire sur la courbe cumulative

L'aspect de la courbe cumulative s'explique de la manière suivante (voir figure 4)²⁰:

²⁰ La figure 4 montre que la courbe cumulative totale est la somme des courbes cumulatives calculées séparément pour chaque type de scénarios.

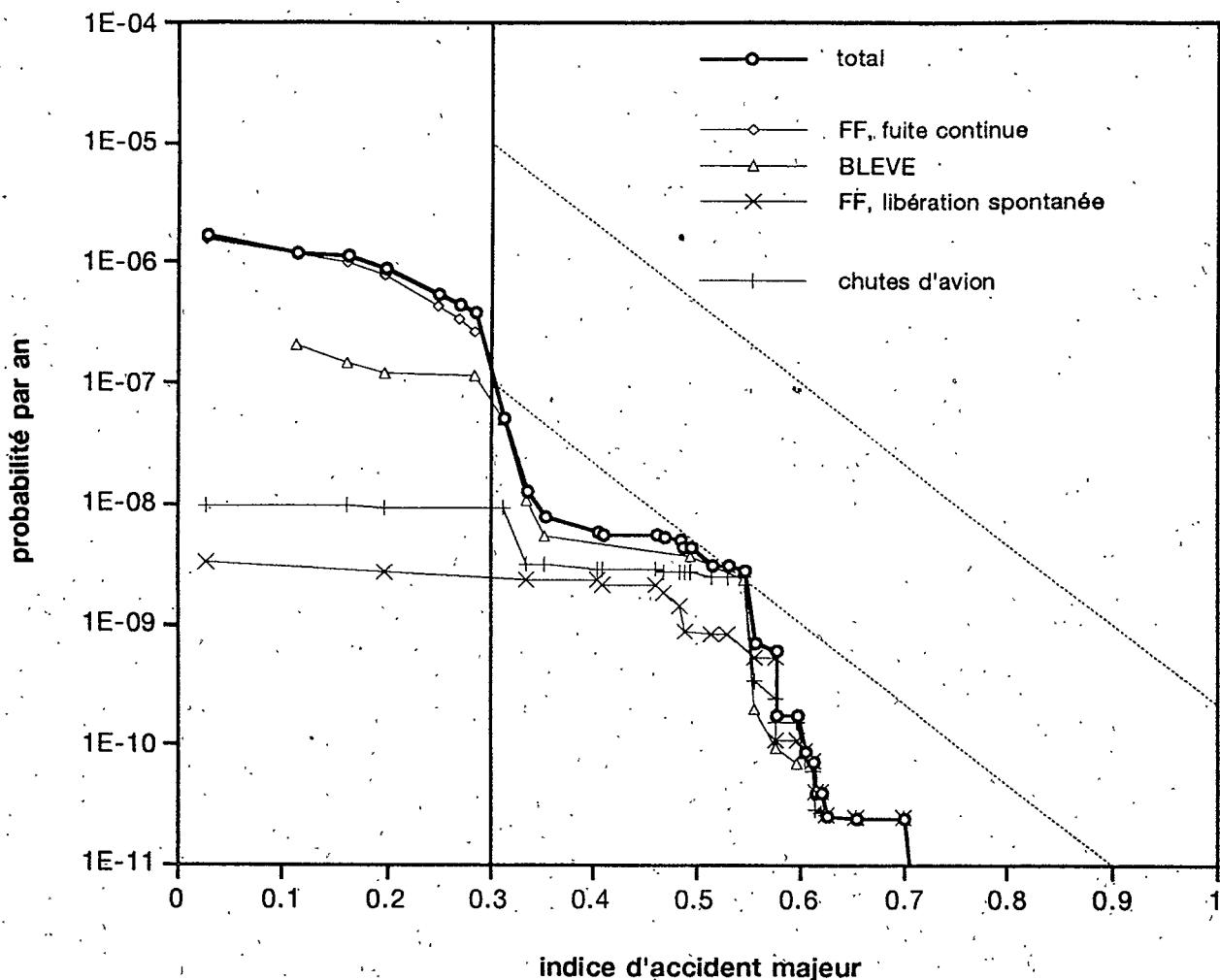


Figure 4: Effets des scénarios "incendie d'un nuage de gaz", "BLEVE" et "chute d'un avion" sur la courbe cumulative

- Dans le domaine des faibles dommages (indice d'accident majeur 0 à 0.3) l'aspect de la courbe est dominé par les incendies de nuages de gaz dus à des fuites continues.
- Les BLEVE dictent l'aspect de la courbe pour l'intervalle de 0.3 à 0.55 de l'indice d'accident majeur.
- Les dommages les plus importants sont dus à des incendies de nuages de gaz à la suite d'une libération spontanée. Ceux-ci sont provoqués par les chutes d'avions, qui représentent ici toutes les causes possibles d'une libération spontanée sans inflammation immédiate.

Le passage de la courbe cumulative dans le domaine intermédiaire est dû aux causes suivantes:

- Dans l'intervalle 0.1 à 0.3 de l'indice d'accident majeur, le risque est dominé par des incendies de nuages de gaz formés lors du dépotage.

-
- Les fuites dues à une rupture ou à un arrachage du flexible sont prépondérantes.
- Le BLEVE de la citerne de stockage pleine représente le scénario déterminant pour l'indice d'accident majeur de 0.55.

4.3.2 Incertitude et sensibilité²¹

Modèles	L'étude de risque se base en principe sur l'expérience et sur les méthodes décrites dans le rapport-cadre. Les résultats obtenus à partir de ces données et modèles sont plausibles ²² .
Probabilités par an	Dans le domaine des faibles dommages, la courbe cumulative est donnée par l'incendie d'un nuage de gaz dû à une fuite continue, en particulier lors du dépotage, dont les causes sont statistiquement bien documentées. Le point décisif pour une libération de gaz est la probabilité de défaillance de la sécurité de rupture d'une conduite. La valeur admise par exemple pour le cas de "l'arrachage du flexible" est très prudente (en cas d'arrachage du flexible, toute la section est libérée, la sécurité réagira donc à coup sûr). La probabilité par an totale pour les fuites continues sera donc surestimée. L'effet sur la courbe cumulative est toutefois faible, car d'autres causes que "l'arrachage du flexible" contribuent pour des parts semblables au scénario de la fuite continue.
	La cause principale de l'incendie d'un nuage de gaz à la suite d'une libération spontanée est la chute d'un avion, dont la probabilité par an est déterminée sur la base de statistiques fiables.
	A l'origine d'un BLEVE, il y a avant tout un incendie dû à une fuite continue. L'incertitude sur les probabilités par an des fuites continues se répercute ainsi sur les probabilités par an pour l'éclatement de la citerne. Les conditions requises conduisant à un BLEVE sont un incendie assez violent pour que le refroidissement ne suffise plus, et une quantité stockée

²¹ Sensibilité = Variabilité des résultats d'analyse en fonction des variations des données de base.

²² Les lacunes des données statistiques et les simplifications introduites dans les modèles donnent inévitablement lieu à des incertitudes. L'application systématique des méthodes proposées permet cependant de comparer directement les risques représentés par différentes installations, et de fournir une base unifiée d'appréciation pour les autorités. Prendre en compte les particularités d'un site (topographie, vitesse du vent etc.) exigerait un effort important sans diminuer sensiblement les incertitudes.

de gaz liquéfié supérieure à celle pouvant s'échapper par les soupapes de sécurité jusqu'au moment de l'éclatement. L'hypothèse d'une durée de l'incendie de 15 minutes est réaliste et prudente.

Amplitude des dommages

Les variations du nombre de personnes exposées lors d'un accident majeur ne peuvent pas être déterminées avec précision dans le cadre de l'étude de risque. Par un beau jour d'été, le nombre de personnes à l'extérieur sera par exemple supérieure à la moyenne (promeneurs, travaux de jardinage etc.). De telles variations sont cependant suffisamment prises en compte par la distinction faite entre exposition de jour, exposition de nuit et exposition des voyageurs d'un train.

Les modèles de dommages pour un BLEVE sont basés sur l'expérience acquise lors d'accidents majeurs. Les résultats sont donc considérés comme fiables. Les dommages dus à un BLEVE dépendent fortement du temps disponible entre le moment de l'alarme et l'éclatement de la citerne. Comme ce dernier est le plus souvent dû à une surchauffe (prolongée), l'évacuation devrait être plus efficace qu'admis dans les calculs.

Les plus grands dommages sont attribués à des incendies d'un nuage de gaz à la suite d'une libération spontanée. Le rayon d'action de ces incendies dépend directement des calculs de propagation qui présentent de grandes incertitudes. Les modèles utilisés surestiment les distances de propagation pour le cas du stockage sous pression. Les dommages seront donc plutôt surestimés dans la partie de la courbe P-C dominée par les incendies d'un nuage de gaz.

Comparaison avec la réalité

Les statistiques d'accidents suisses et mondiales confirment l'ordre de grandeur des probabilités d'un BLEVE et d'une fuite continue calculées dans l'exemple de méthode.

5. Résumé

Le manuel I de l'OPAM, annexe G, paragraphe 5, décrit en détails la manière de présenter le résumé de l'étude de risque. Il n'est pas nécessaire de le répéter ici.

Zdorf, le.....

Entreprise XXX

Le propriétaire

Liste des annexes

- Annexe 1* Plan de situation de l'entreprise
2 Plan des environs
3 Arbres des causes et des événements
4 Liste détaillée des possibilités d'accident décrites par les arbres des causes et des événements
5* Plan d'alarme et d'intervention en cas d'accident

* Ces annexes ne sont pas contenues dans ce document.

Annexe 2

Plan des environs

Annexe 2

Plan des environs* échelle 1:4'000

100 m



ligne de chemin de fer

gare

2

1

0

5

4

100 m

50 m

150 m

200 m

250 m

300 m

route principale

village

Légende

- T Citerne de stockage
- 1 Entreprise 1
- 2 Entreprise 2
- 3 7 villas
- 4 Immeuble locatif à 5 étages et 10 appartements
- 5 Immeuble locatif à 5 étages et 10 appartements

* Comme il s'agit d'un exemple fictif, le plan ne peut être que schématique.

Annexe 3

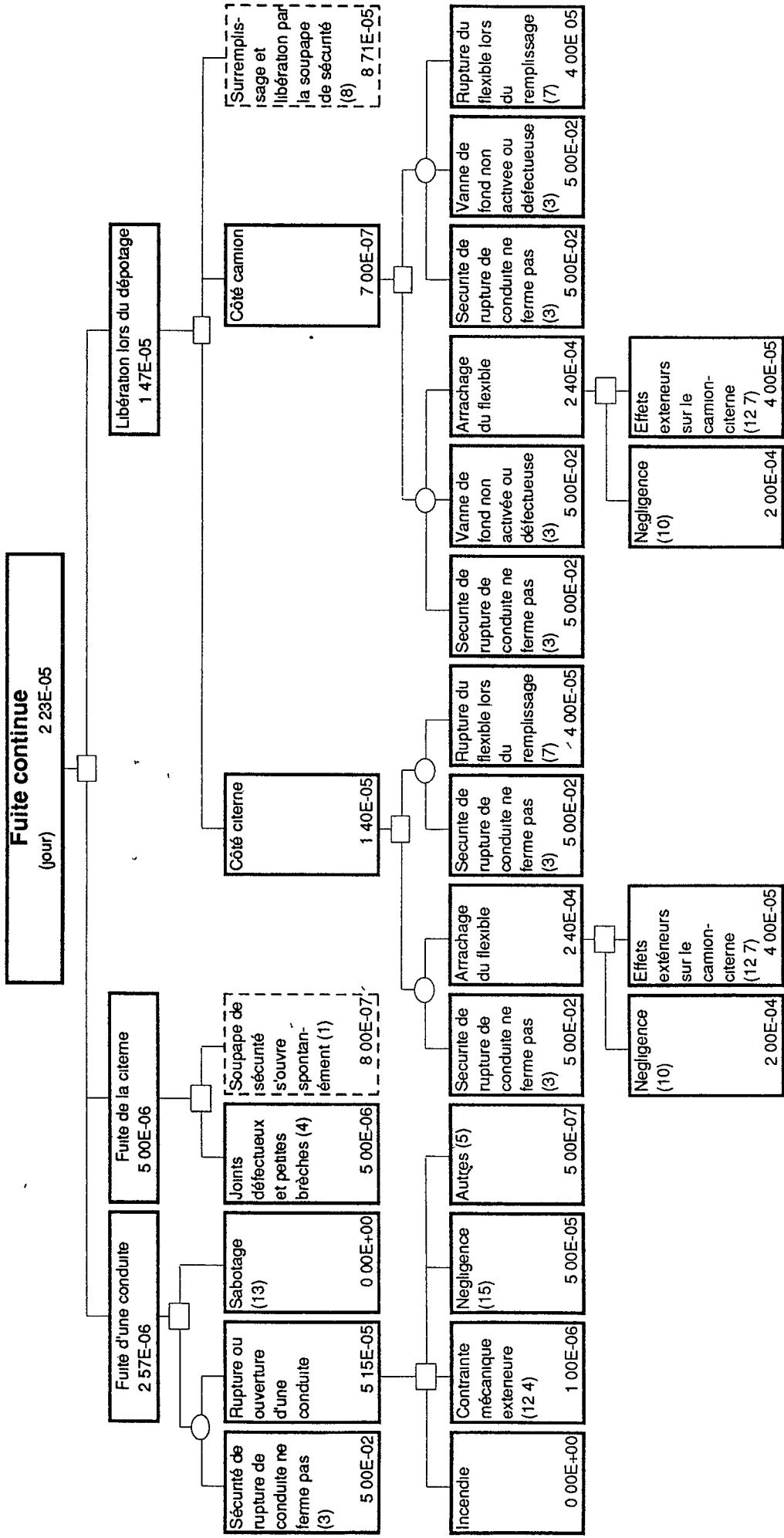
Arbres des causes et des événements

- *Arbre des causes "Fuite continue de jour"*
- *Arbre des événements "Fuite continue de jour"*
- *Arbre des causes "Libération spontanée de jour"*
- *Arbre des événements "Libération spontanée de jour"*

- *Arbre des causes "Fuite continue de nuit"*
- *Arbre des événements "Fuite continue de nuit"*
- *Arbre des causes "Libération spontanée de nuit"*
- *Arbre des événements "Libération spontanée de nuit"*

- *Arbre des causes "Fuite continue camion"*
- *Arbre des événements "Fuite continue camion"*
- *Arbre des causes "Libération spontanée camion"*
- *Arbre des événements "Libération spontanée camion"*

Fuite continue de jour

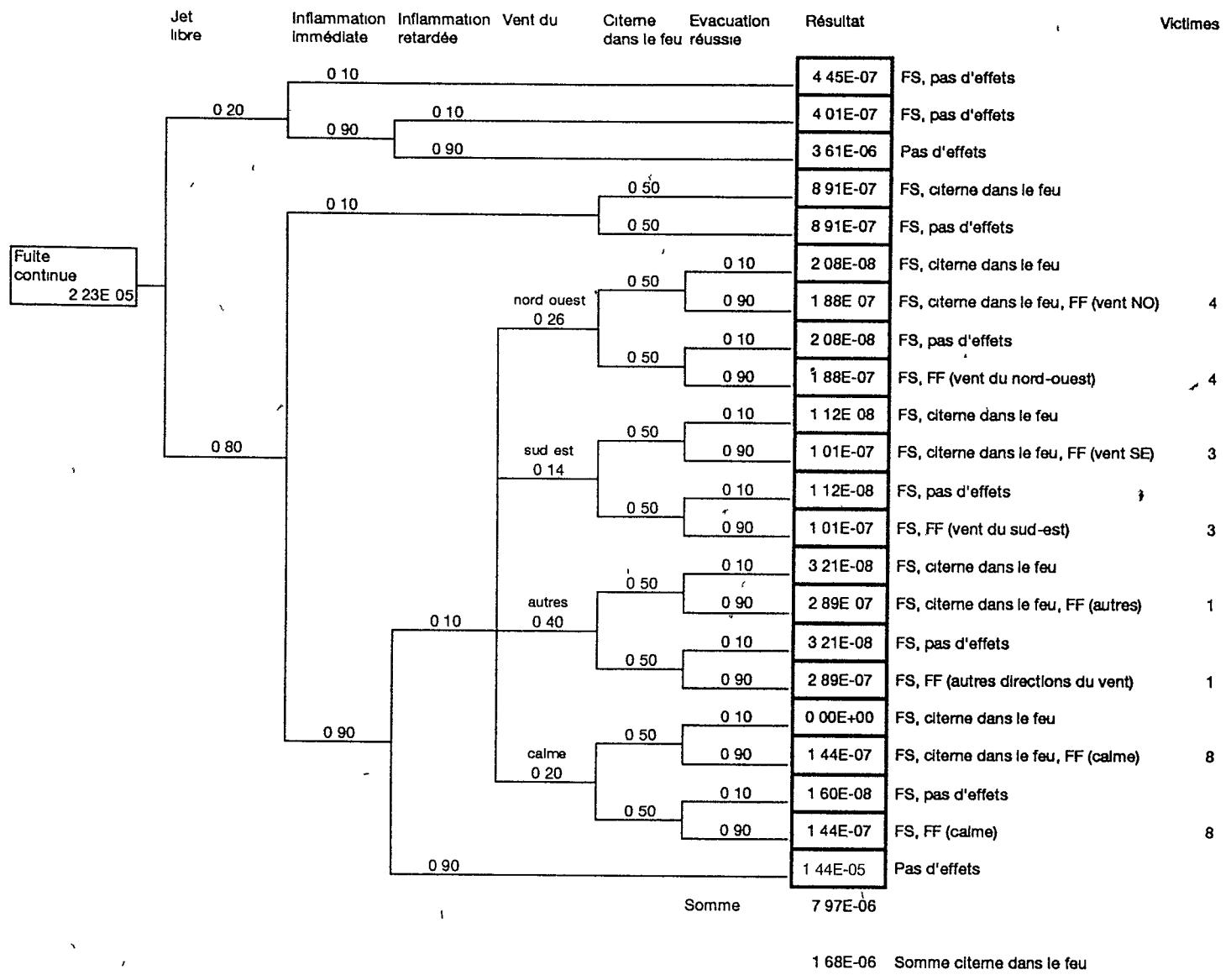


Addition logique l'état décent est atteint dès qu'un seul événement a lieu

Multiplication logique l'état décent n'est atteint que si tous les événements ont lieu simultanément

Les libérations par la soupape de sécurité ne représentent pas un risque important La probabilité indiquée n'est pas utilisée dans le calcul

Fuite continue de jour

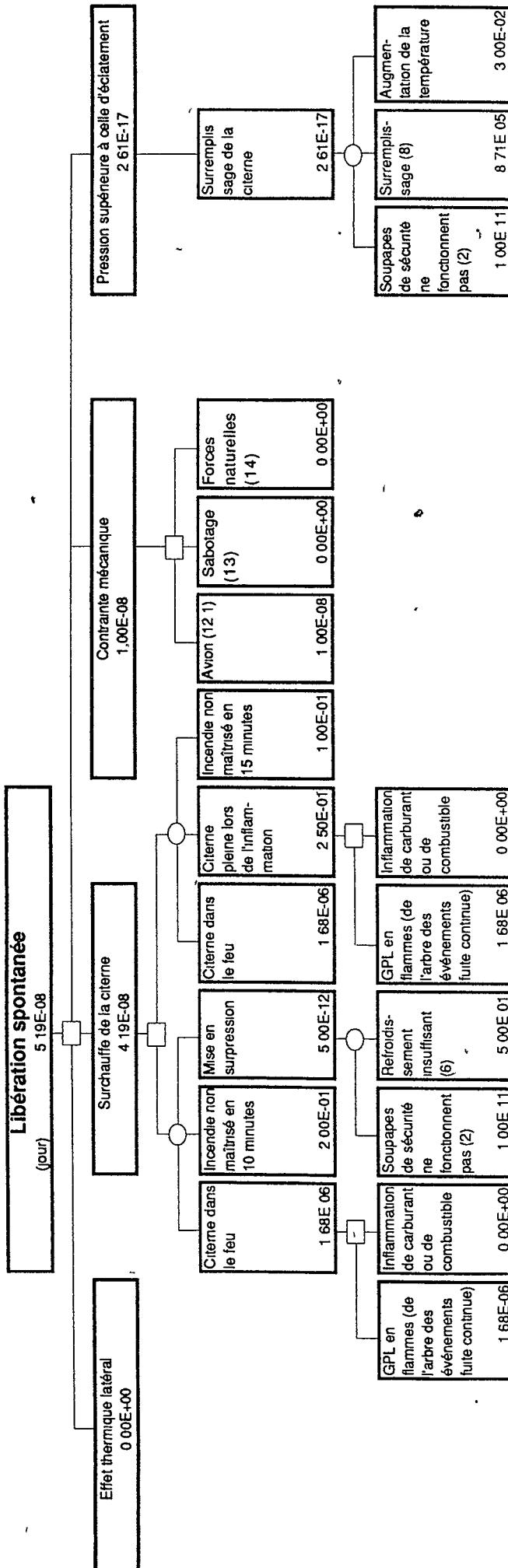


FS = Torche

FF = Incendie d'un nuage de gaz (Flash-Fire)

Libération spontanée de jour

44

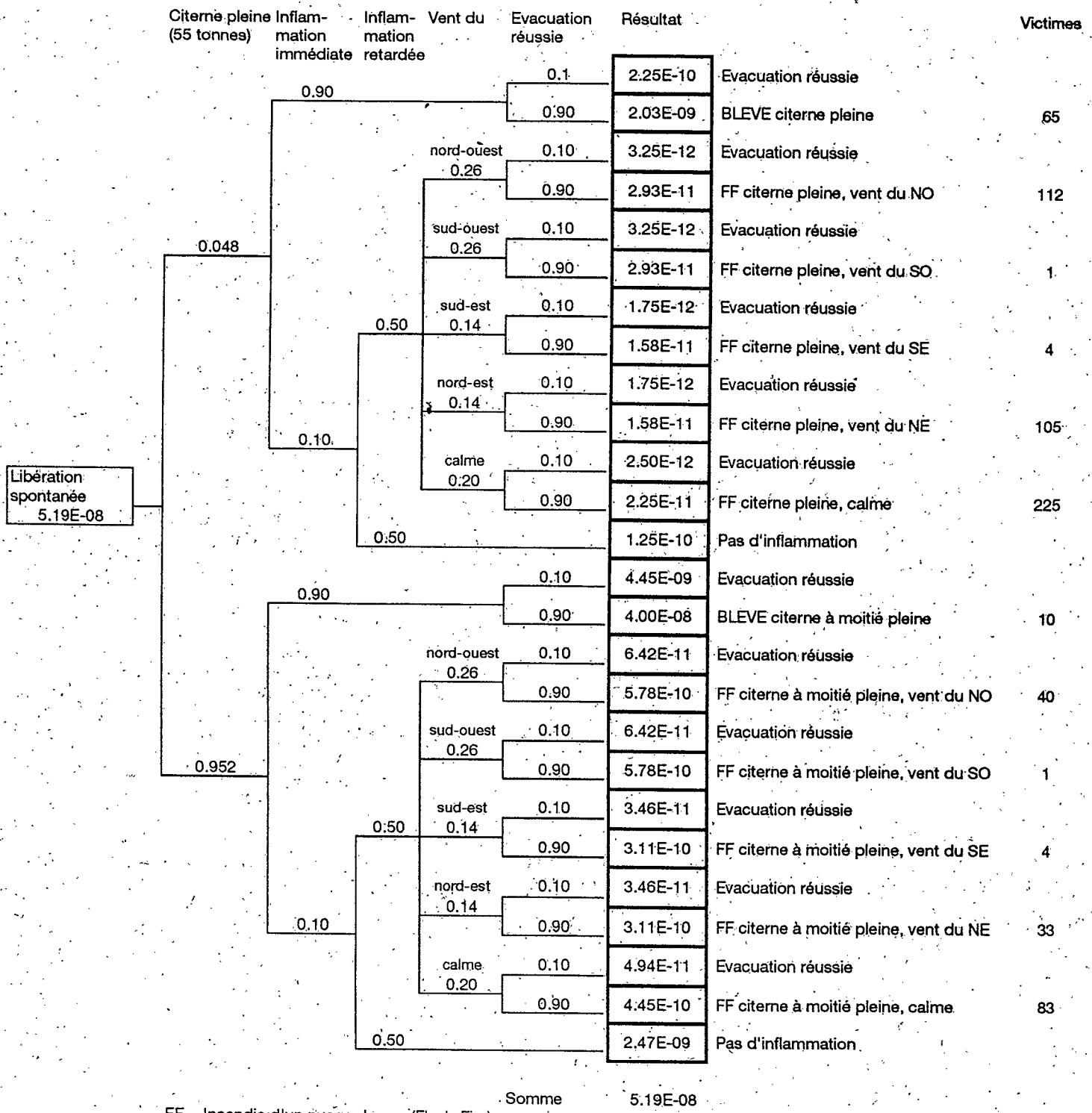


ddition largue était décrété dès qu'un seul événement a lieu

Multiplication logique L'état décris n'est atteint que si tous les événements ont lieu simultanément



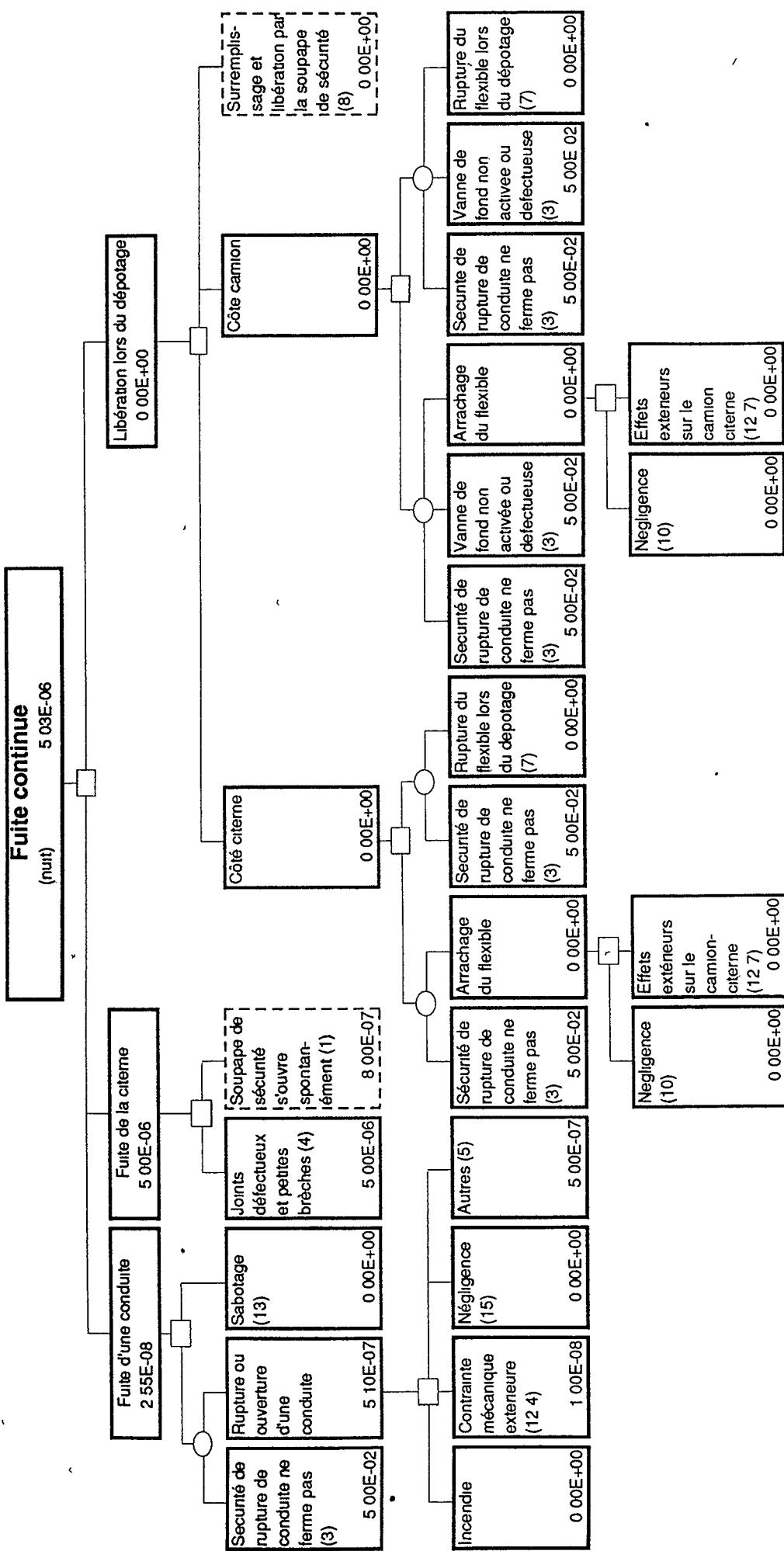
Libération spontanée de jour



Inflammation immédiate: la valeur proposée à l'annexe C1.1.2 du rapport-cadre est reprise bien que la proportion des inflammations immédiates soit supérieure à 90% pour un éclatement dû à une surchauffe ou à une chute d'avion. 2 raisons expliquent ce choix:

1. Les scénarios pris en compte représentent toujours une série de scénarios qui ne sont pas décrits plus en détail pour ne pas compliquer outre mesure l'étude de risque.
2. Ce choix qui augmente la proportion des incendies d'un nuage de gaz (dommages élevés) n'a qu'un effet marginal sur la courbe de risque. Une distinction plus détaillée des scénarios n'est donc pas nécessaire.

Fuite continue de nuit



Ensuite, l'état de crise atteint des seuils événementiels à lieu

Multiplication logique l'état décent n'est atteint que si tous les événements ont lieu simultanément

Les libérations par la souape de secuit ne représentent pas un risque important. La probabilité indiquée n'est pas utilisée dans le calcul.

Fuite continue de nuit

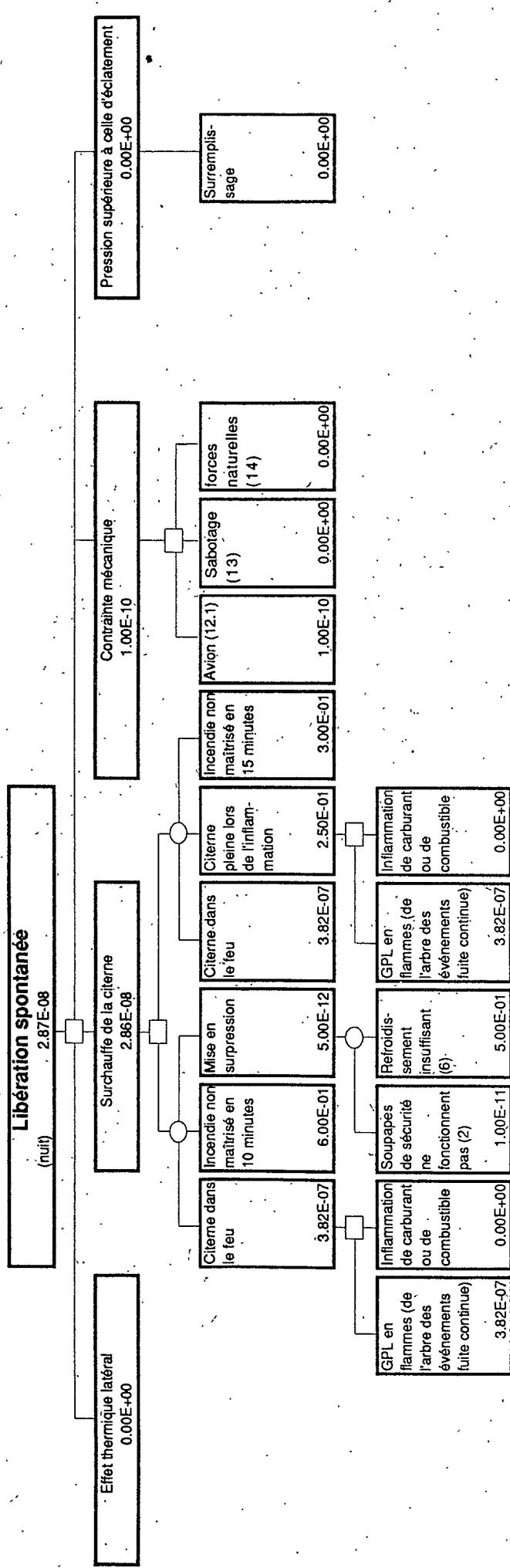
Jet libre	Inflammation immédiate	Inflammation retardée	Vent du	Citerne dans le feu	Evacuation réussie	Résultat	Victimes	
	0 10					1 01E-07	FS, pas d'effets	
0 20	0 10					9 05E-08	FS, pas d'effets	
	0 90	0 90				8 14E-07	Pas d'effets	
	0 10		0 50			2 01E-07	FS, citerne dans le feu	
		0 50				2 01E-07	FS, pas d'effets	
		0 00				0 00E+00	FS, citerne dans le feu	
		1 00				4 70E 08	FS, citerne dans le feu, FF (vent NO)	6
		0 00				0 00E+00	FS, pas d'effets	
		1 00				4 70E 08	FS, FF (vent NO)	6
		0 00				0 00E+00	FS, citerne dans le feu	
		1 00				2 53E-08	FS, citerne dans le feu, FF (vent SE)	0
		0 00				0 00E+00	FS, pas d'effets	
		1 00				2 53E-08	FS, FF (vent SE)	0
		0 00				0 00E+00	FS, citerne dans le feu	
		1 00				7 24E-08	FS, citerne dans le feu, FF (autres)	0
		0 00				0 00E+00	FS, pas d'effets	
		1 00				7 24E-08	FS, FF (autres directions du vent)	0
		0 00				0 00E+00	FS, citerne dans le feu	
		1 00				3 62E-08	FS, citerne dans le feu, FF (calme)	7
		0 00				0 00E+00	FS, pas d'effets	
		1 00				3 62E-08	FS, FF (calme)	7
	0 90					3 26E 06	Pas d'effets	
				Somme		5 03E-06		
						3 82E-07	Somme citerne dans le feu	

FS = Torche

FF = Incendie d'un nuage de gaz (Flash Fire)

Libération spontanée de nuit

48



Addition logique: l'état décrit est atteint dès qu'un seul événement a lieu.

Multiplication logique: l'état décrit n'est atteint que si tous les événements ont lieu simultanément.

Libération spontanée de nuit

Citerne pleine (55 tonnes)	Inflammation immédiate	Inflammation retardée	Vent du	Evacuation réussie	Résultat	Victimes
			0	0.00E+00	Evacuation réussie	
	0.90		1.00	2.25E-11	BLEVE citerne pleine	83
		nord-ouest 0.26	0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
			1.00	3.25E-13	FF citerne pleine, vent du NO	84
		sud-ouest 0.26	0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
			1.00	3.25E-13	FF citerne pleine, vent du SO	0
		sud-est 0.14	0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
			1.00	1.75E-13	FF citerne pleine, vent du SE	0
		nord-est 0.14	0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
			1.00	1.75E-13	FF citerne pleine, vent du NE	70
		calme 0.20	0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
			1.00	2.50E-13	FF citerne pleine, calme	155
	0.10		0.00	1.25E-12	Pas d'inflammation	
	0.50		1.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
	0.90		1.00	2.58E-08	BLEVE citerne à moitié pleine	3
		nord-ouest 0.26	0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
			1.00	3.73E-10	FF citerne à moitié pleine, vent du NO	35
		sud-ouest 0.26	0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
			1.00	3.73E-10	FF citerne à moitié pleine, vent du SO	0
		sud-est 0.14	0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
			1.00	2.01E-10	FF citerne à moitié pleine, vent du SE	0
		nord-est 0.14	0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
			1.00	2.01E-10	FF citerne à moitié pleine, vent du NE	21
	0.10		0.00	0.00E+00	Evacuation réussie	
	0.50		1.00	0.00E+00	FF citerne à moitié pleine, calme	57
		calme 0.20	0.00	2.87E-10		
			1.00	1.44E-09	Pas d'inflammation	
Libération spontanée 2.87E-08				Somme	2.87E-08	

FF = Incendie d'un nuage de gaz (Flash-Fire)

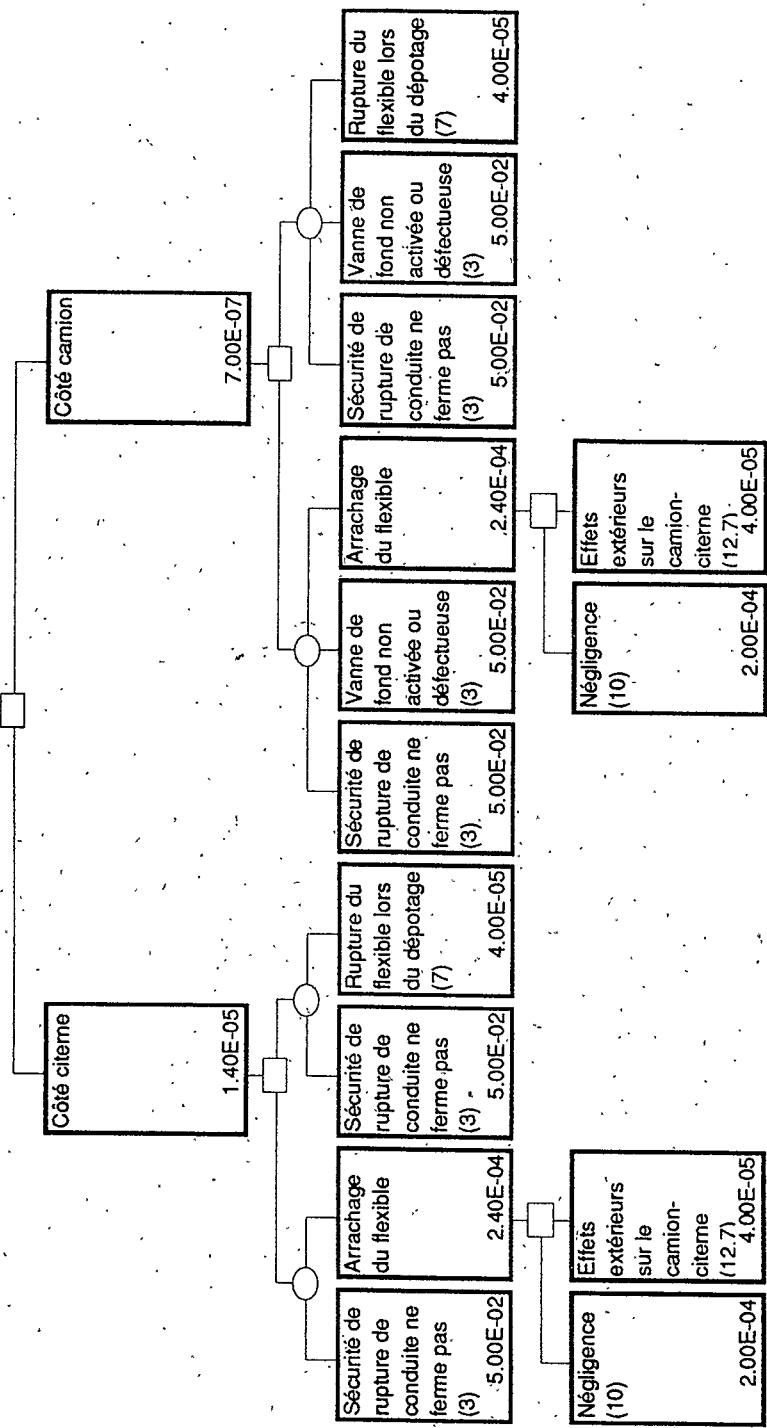
Inflammation immédiate: la valeur proposée à l'annexe C1.1.2 du rapport-cadre est reprise bien que la proportion des inflammations immédiates soit supérieure à 90% pour un éclatement dû à une surchauffe ou à une chute d'avion. 2 raisons expliquent ce choix:

- 1: Les scénarios pris en compte représentent toujours une série de scénarios qui ne sont pas décrits plus en détail pour ne pas compliquer outre mesure l'étude de risque.
2. Ce choix qui augmente la proportion des incendies d'un nuage de gaz (dommages élevés) n'a qu'un effet marginal sur la courbe de risque. Une distinction plus détaillée des scénarios n'est donc pas nécessaire.

Fuite continue camion

Fuite continue
(dépotage)

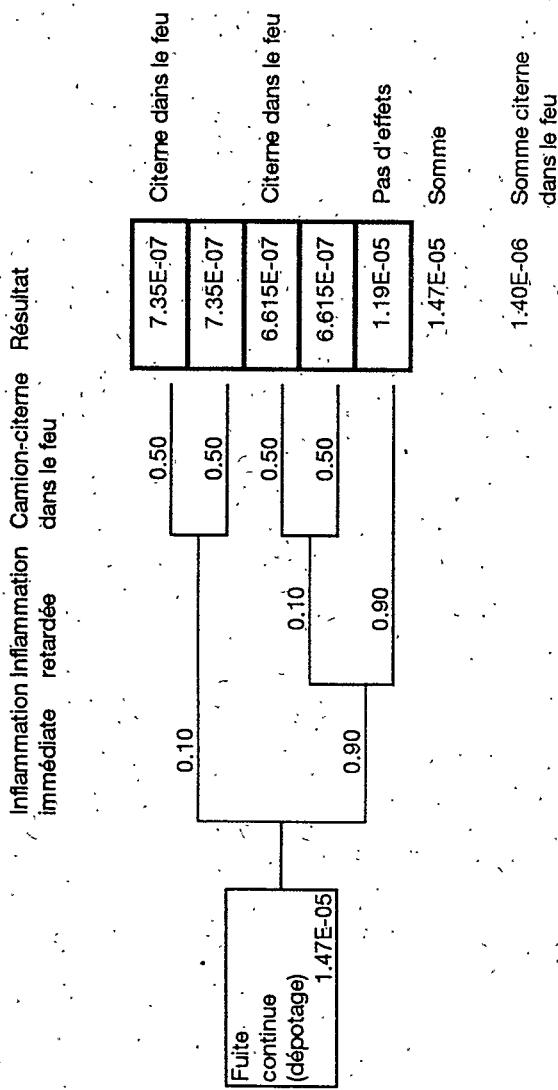
1.47E-05



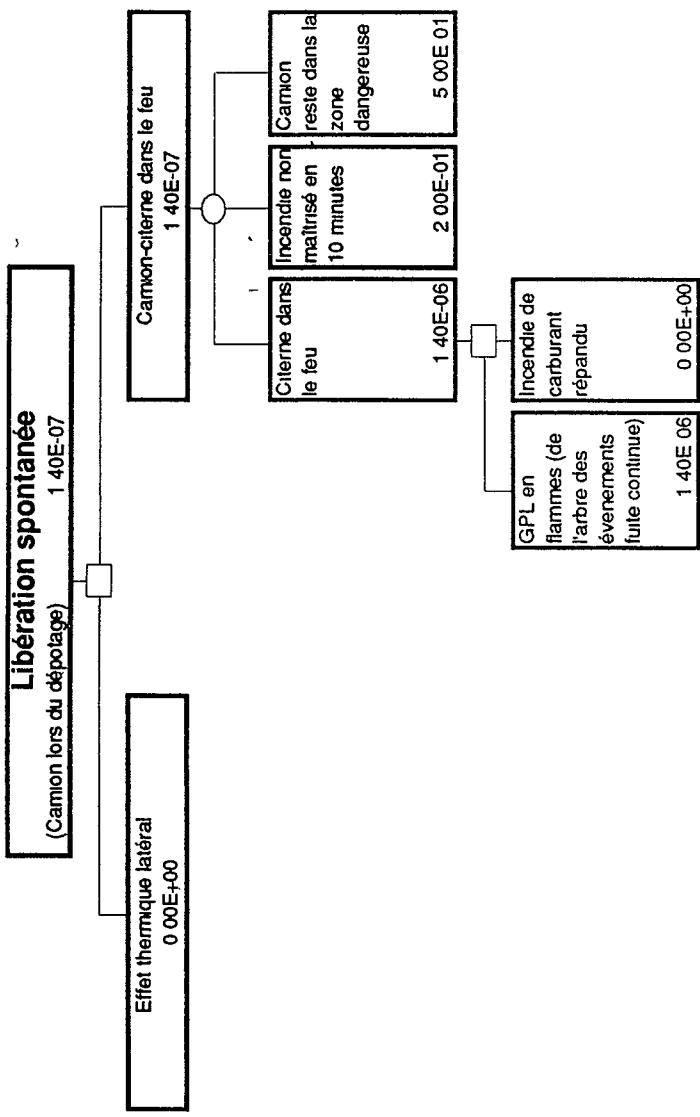
Addition logique: l'état décrit est atteint dès qu'un seul événement a lieu.

Multiplication logique: l'état décrit n'est atteint que si tous les événements ont lieu simultanément.

Fuite continue camion



Libération spontanée camion



- Addition logique l'état décrit est atteint dès qu'un seul événement a lieu
- Multiplication logique l'état décrit n'est atteint que si tous les événements ont lieu simultanément

Libération spontanée camion

Citerne pleine (10 tonnes)	Evacuation réussie	Résultat	Victimes
		BLEVE citerne pleine, pas d'effets	
		0.1 6.98E-09	
		0.9 6.28E-08	
		0.1 6.98E-09	8
		0.9 6.28E-08	
		BLEVE citerne à moitié pleine, pas d'effets	
		0.50 1.40E-07	
		0.50 1.40E-07	
		BLEVE citerne à moitié pleine	
		0.1 1.40E-07	2
		0.9 1.40E-07	
		BLEVE citerne à moitié pleine	
		0.1 1.40E-07	
		0.9 1.40E-07	
		Somme	
		1.40E-07	

Annexe 4

Vue d'ensemble des accidents

- *Liste détaillée des possibilités d'accident décrites par les arbres des causes et des événements*
- *Liste des probabilités cumulées et des dommages*
- *Diagramme Probabilité - Conséquences*

Résultats

Situation	Événement	C (victimes)	P (par an)
jour	FS, citerne dans le feu, FF (vent NO)	4	1.88E-07
fuite	FS, FF (vent du nord-ouest)	4	1.88E-07
continue	FS, citerne dans le feu, FF (vent SE)	3	1.01E-07
	FS, FF (vent du sud-est)	3	1.01E-07
	FS, citerne dans le feu, FF (autres)	1	2.89E-07
	FS, FF (autres directions du vent)	1	2.89E-07
	FS, citerne dans le feu, FF (calme)	8	1.44E-07
	FS, FF (calme)	8	1.44E-07
nuit	FS, citerne dans le feu, FF (vent NO)	6	4.70E-08
fuite	FS, FF (vent NO)	6	4.70E-08
continue	FS, citerne dans le feu, FF (vent SE)	0	2.53E-08
	FS, FF (vent SE)	0	2.53E-08
	FS, citerne dans le feu, FF (autres)	0	7.24E-08
	FS, FF (autres directions du vent)	0	7.24E-08
	FS, citerne dans le feu, FF (calme)	7	3.62E-08
	FS, FF (calme)	7	3.62E-08
jour	BLEVE citerne pleine	65	2.03E-09
libération	FF citerne pleine, vent du NO	112	2.93E-11
spontanée	FF citerne pleine, vent du SO	1	2.93E-11
	FF citerne pleine, vent du SE	4	1.58E-11
	FF citerne pleine, vent du NE	105	1.58E-11
	FF citerne pleine, calme	225	2.25E-11
	BLEVE citerne à moitié pleine	10	4.00E-08
	FF citerne à moitié pleine, vent du NO	40	5.78E-10
	FF citerne à moitié pleine, vent du SO	1	5.78E-10
	FF citerne à moitié pleine, vent du SE	4	3.11E-10
	FF citerne à moitié pleine, vent du NE	33	3.11E-10
	FF citerne à moitié pleine, calme	83	4.45E-10
nuit	BLEVE citerne pleine	83	2.25E-11
libération	FF citerne pleine, vent du NO	84	3.25E-13
spontanée	FF citerne pleine, vent du SO	0	3.25E-13
	FF citerne pleine, vent du SE	0	1.75E-13
	FF citerne pleine, vent du NE	70	1.75E-13
	FF citerne pleine, calme	155	2.50E-13
	BLEVE citerne à moitié pleine	3	2.58E-08
	FF citerne à moitié pleine, vent du NO	35	3.73E-10
	FF citerne à moitié pleine, vent du SO	0	3.73E-10
	FF citerne à moitié pleine, vent du SE	0	2.01E-10
	FF citerne à moitié pleine, vent du NE	21	2.01E-10
	FF citerne à moitié pleine, calme	57	2.87E-10
jour, camion	BLEVE citerne pleine	8	6.28E-08
	BLEVE citerne à moitié pleine	2	6.28E-08

FS: Torche

FF: Incendie d'un nuage de gaz (Flash-Fire)

Résultats

Situation	Événement	C (victimes)	P (par an)
jour, y compris	BLEVE citerne pleine	70	1.01E-10 *
quai de gare	FF citerne pleine, vent du NO	112	1.46E-12
	FF citerne pleine, vent du SO	1	1.46E-12
	FF citerne pleine, vent du SE	12	7.88E-13
	FF citerne pleine, vent du NE	113	7.88E-13
	FF citerne pleine, calme	240	1.13E-12
	BLEVE citerne à moitié pleine	14	2.00E-09
	FF citerne à moitié pleine, vent du NO	40	2.89E-11
	FF citerne à moitié pleine, vent du SO	1	2.89E-11
	FF citerne à moitié pleine, vent du SE	12	1.56E-11
	FF citerne à moitié pleine, vent du NE	41	1.56E-11
	FF citerne à moitié pleine, calme	98	2.22E-11
(Camion)	BLEVE citerne pleine	12	5.24E-09
	BLEVE citerne à moitié pleine	4	5.24E-09
Situation	Événement	C (victimes)	P (par an)
jour, y compris	BLEVE citerne pleine	98	6.75E-11 **
quai de gare et	FF citerne pleine, vent du NO	112	9.75E-13
train	FF citerne pleine, vent du SO	1	9.75E-13
	FF citerne pleine, vent du SE	22	5.25E-13
	FF citerne pleine, vent du NE	123	5.25E-13
	FF citerne pleine, calme	260	7.50E-13
	BLEVE citerne à moitié pleine	43	1.33E-09
	FF citerne à moitié pleine, vent du NO	40	1.93E-11
	FF citerne à moitié pleine, vent du SO	1	1.93E-11
	FF citerne à moitié pleine, vent du SE	22	1.04E-11
	FF citerne à moitié pleine, vent du NE	51	1.04E-11
	FF citerne à moitié pleine, calme	118	1.48E-11

* Les probabilités sont calculées comme suit:

P.ex.: P(BLEVE citerne pleine, jour)=2.03E-09 (voir page précédente)

Il y a 5 minutes par heure des personnes sur le quai de gare, dont

3 minutes sans présence d'un train: $p=3/60$

La probabilité est donc $P=2.03E-09 \times 3/60 = 1.01E-10$

L'ampleur des dommages est donnée dans les tableaux 7 à 10 du rapport.

**Les probabilités sont calculées comme suit:

P.ex.: P(BLEVE citerne pleine, jour)=2.03E-09 (voir page précédente)

Durant 2 minutes par heure, un train s'arrête en gare: $p=2/60$

La probabilité est donc $P=2.03E-09 \times 2/60 = 6.75E-11$

L'ampleur des dommages est donnée dans les tableaux 7 à 10 du rapport.

FF: Incendie d'un nuage de gaz (Flash-Fire)

Ampleur et probabilité cumulée

Victimes	P	P (cum.)	indice
260	7.50E-13	7.50E-13	0.7186
240	1.13E-12	1.88E-12	0.7087
225	2.25E-11	2.44E-11	0.7006
155	2.50E-13	2.46E-11	0.6543
123	5.25E-13	2.52E-11	0.6255
118	1.48E-11	4.00E-11	0.6203
113	7.88E-13	4.08E-11	0.6150
112	3.17E-11	7.25E-11	0.6138
105	1.58E-11	8.82E-11	0.6058
98	8.97E-11	1.78E-10	0.5972
84	3.25E-13	1.78E-10	0.5781
83	4.67E-10	6.46E-10	0.5766
70	1.01E-10	7.47E-10	0.5554
65	2.03E-09	2.77E-09	0.5462
57	2.87E-10	3.06E-09	0.5298
51	1.04E-11	3.07E-09	0.5160
43	1.33E-09	4.40E-09	0.4948
41	1.56E-11	4.42E-09	0.4888
40	6.26E-10	5.05E-09	0.4858
35	3.73E-10	5.42E-09	0.4691
33	3.11E-10	5.73E-09	0.4618
22	1.09E-11	5.74E-09	0.4114
21	2.01E-10	5.94E-09	0.4056
14	2.00E-09	7.94E-09	0.3552
12	5.25E-09	1.32E-08	0.3360
10	4.00E-08	5.32E-08	0.3133
8	3.52E-07	4.05E-07	0.2855
7	7.24E-08	4.77E-07	0.2689
6	9.41E-08	5.71E-07	0.2498
4	3.81E-07	9.52E-07	0.1993
3	2.28E-07	1.18E-06	0.1635
2	6.28E-08	1.24E-06	0.1131
1	5.78E-07	1.82E-06	0.0268

