

# ANALISI COMPARATIVA DELLE FREQUENZE DI INCIDENTE E DI RILASCIO NEL TRASPORTO STRADALE E FERROVIARIO DI SOSTANZE PERICOLOSE

V. Cozzani<sup>1</sup>, S. Bonvicini<sup>2</sup>, L. Vanni<sup>1</sup>, G. Spadoni<sup>2</sup>, S. Zanelli<sup>1</sup>

- <sup>(1)</sup> Università degli Studi di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali, Via Diotisalvi 2, 56100-Pisa, e-mail: [v.cozzani@ing.unipi.it](mailto:v.cozzani@ing.unipi.it)
- <sup>(2)</sup> Università degli Studi di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, V.le Risorgimento 2, 40136-Bologna, e-mail: [sarah.bonvicini@mail.ing.unibo.it](mailto:sarah.bonvicini@mail.ing.unibo.it)

## SOMMARIO

La domanda di sicurezza nel trasporto di sostanze pericolose porta alla necessità di effettuare valutazioni del rischio. Lo sviluppo di un'analisi di rischio implica una formulazione omogenea del problema in tutte le sue fasi e una riduzione, per quanto possibile, delle incertezze presenti nei dati in ingresso. Tra questi vi sono la frequenza d'incidente propria della strada (o della via ferrata) e, a moltiplicare la stessa, la probabilità di rilascio dell'autocisterna (o della ferrocisterna) in seguito al coinvolgimento in un incidente, o direttamente il loro prodotto, ovvero la frequenza di rilascio a causa di incidente. In generale valori plausibili per queste grandezze vengono desunti dall'elaborazione statistica delle informazioni raccolte in seguito ad incidenti effettivamente avvenuti ed eventualmente da modelli previsionali. Da una prima analisi dei dati reperiti in letteratura è risultata una notevole dispersione degli stessi, a seconda della fonte di riferimento, estesa a più ordini di grandezza. Una revisione critica dei dati ha permesso di comprendere quali sono le principali cause dell'incertezza presente e l'intervallo di variabilità, con particolare attenzione al caso del trasporto su strada e ferrovia nella situazione italiana.

## INTRODUZIONE

Il recente recepimento della Direttiva Europea 96/82/EC ("Seveso-II") da parte della legislazione italiana, attraverso il DL 334/99, prevede l'adozione di criteri per la pianificazione territoriale e l'esecuzione di analisi di rischio integrate delle aree in cui sono presenti elevate concentrazioni di stabilimenti industriali per la produzione, il trattamento e lo stoccaggio di sostanze pericolose. In tal modo, parallelamente alla valutazione del rischio dovuto agli impianti fissi, viene richiesta, sia pure in forma indiretta, anche una quantificazione dei rischi dovuti al trasporto.

Lo sviluppo di un'analisi di rischio implica necessariamente una formulazione omogenea del problema in tutte le sue fasi (riassunte in modo schematico nella Tabella 1 per il caso del trasporto stradale di sostanze pericolose) e una riduzione, per quanto possibile, delle incertezze presenti nei dati in ingresso. Tale esigenza è avvertita in modo particolare quando si vadano ad effettuare degli studi di rischio su più impianti o su diverse modalità di trasporto o su impianti e trasporti contemporaneamente, al fine di rendere possibili e significativi l'analisi ed il confronto dei risultati.

Tra i dati caratterizzati da maggiore incertezza vi sono i dati propri della Fase C della Tabella 1, ovvero la frequenza d'incidente della strada (o della via ferrata) e, a moltiplicare la stessa, la probabilità di rilascio dell'autocisterna (o della ferrocisterna) in seguito al coinvolgimento in un incidente, o direttamente il loro prodotto, ovvero la frequenza di rilascio in seguito ad incidente.

La necessità di avere stime attendibili per la frequenza di rilascio (o per i due moltiplicandi da cui è data) è conseguenza della constatazione che essa incide in modo direttamente proporzionale sulle misure di rischio, sia in termini di rischio individuale che in termini di rischio sociale.

## VALUTAZIONE DELLA FREQUENZA DI RILASCIO

In questo studio l'attenzione è stata rivolta ai rilasci che avvengono mentre il veicolo transita sul percorso, escludendo quindi l'analisi dei rilasci che avvengono durante le operazioni, pur connesse al trasporto, diverse dal viaggio stesso, quali le fasi di carico e scarico, la sosta nei parcheggi e nelle stazioni ferroviarie, le manovre di smistamento nelle apposite aree attrezzate.

Si sono inoltre considerati solamente i rilasci conseguenti al coinvolgimento del veicolo in un incidente,

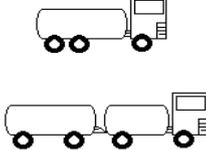
A		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ individuazione delle tratte stradali/ferroviarie sede del transito di sostanze pericolose</li> <li>◆ quantificazione del transito annuo di ciascuna sostanza nelle singole tratte</li> </ul>
B		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ caratterizzazione dei veicoli impiegati per ciascuna sostanza</li> <li>◆ caratterizzazione del tipo di contenimento (in pressione / non in pressione)</li> </ul>
C		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ frequenza d'incidente per unità di lunghezza percorsa (funzione del tipo di strada e di ambiente)</li> <li>◆ probabilità di rilascio in caso d'incidente (funzione del recipiente e del tipo di strada e ambiente)</li> </ul>
D		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ individuazione delle categorie di rottura del contenimento (determinazione dei diametri equivalenti)</li> </ul>
E		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ individuazione di un albero degli eventi in base al tipo di sostanza ed alla categoria di rottura</li> <li>◆ calcolo degli effetti fisici per ciascun scenario individuato e condizione atmosferica di riferimento</li> </ul>

Tabella 1: fasi principali per l'individuazione delle sorgenti di rischio legate al trasporto di sostanze pericolose e degli scenari incidentali conseguenti

in quanto, come evidenziato in [1], [2] e [3], i rilasci durante il viaggio non dovuti ad incidenti sono spesso riconducibili a perdite di contenuto parziali ed in genere di limitata entità da valvole e bocchelli, con conseguenze del tutto modeste se non trascurabili. Nel seguito dunque con il termine "rilasci" si intenderanno i rilasci dai veicoli durante il viaggio, originati dal coinvolgimento del mezzo in un incidente.

La metodologia comunemente seguita per quantificare la frequenza di rilascio ( $f_{ril}$ ) su un percorso omogeneo consiste nell'esprimere questo dato come prodotto di tre termini: l'intensità del traffico veicolare ( $i_{tr}$ ), la frequenza di rilascio unitaria ( $f_{ril,u}$ ) e la lunghezza del tratto ( $L$ ). L'intensità del traffico veicolare di sostanze pericolose sul tratto è dato dal numero di veicoli di interesse che transitano su uno specifico percorso in un certo tempo di riferimento, tipicamente pari ad un anno (ad esempio il numero di autocisterne che trasportano cloro su una data strada statale in un anno); si esprime quindi come il rapporto tra il numero di veicoli transitati ed il tempo in cui sono transitati. La frequenza di rilascio unitaria si esprime come il numero di rilasci che un determinato tipo di veicolo subisce per ogni unità di lunghezza percorsa (ad esempio incidenti/km-percorsi dal veicolo). L'utilità di tale fattore consiste nella sua indipendenza dal valore dell'intensità del traffico veicolare, cosicché il suo valore dipende soltanto dal tipo di strada/ferrovia percorsa. In definitiva per ogni tratto stradale o ferroviario si avrà:

$$f_{ril} = i_{tr} \cdot f_{ril,u} \cdot L \quad (1)$$

dove  $f_{ril}$  è la frequenza di rilascio (rilasci/anno),  $i_{tr}$  l'intensità del traffico (veicoli/anno),  $f_{ril,u}$  la frequenza di rilascio unitaria (rilasci/km-percorsi dal veicolo),  $L$  la lunghezza del tratto in esame (km). Poiché si considerano solamente i rilasci dovuti ad incidenti, la frequenza di rilascio unitaria può essere espressa come prodotto di una frequenza di incidente unitaria ( $f_{inc,u}$  espressa in incidenti/km-percorsi dal veicolo) per una probabilità di rilascio condizionata all'incidente ( $p_{ril}$ , adimensionale):

$$f_{ril,u} = f_{inc,u} \cdot P_{ril} \quad (2)$$

Riorganizzando le precedenti formule si ottiene la seguente equazione:

$$f_{ril} = f_{inc} \cdot P_{ril} = i_{tr} \cdot f_{inc,u} \cdot P_{ril} \cdot L \quad (3)$$

L'equazione (3) rappresenta la relazione fondamentale per il calcolo della frequenza dei rilasci dovuti ad incidente nel trasporto di sostanze pericolose. In essa la lunghezza del tratto  $L$ , e l'intensità del traffico veicolare sul tratto  $i_{tr}$ , dipendono dal particolare segmento stradale o ferroviario preso in esame e dunque il loro valore è rilevato con specifiche indagini sui trasporti delle sostanze pericolose di interesse nell'area in esame. Viceversa i restanti due termini sono desunti da indagini statistiche. A causa della necessità di disporre di un campione statisticamente significativo, in generale questi dati vengono basati sull'elaborazione dei dati raccolti su un'ampia area geografica.

Occorre qui ricordare che, nel calcolo degli indici di rischio su un'area [4], la frequenza di rilascio incide in modo direttamente proporzionale sia sull'indice di rischio individuale che sulla frequenza cumulata delle curve  $F(N)$  di rischio sociale. A titolo di esempio si riportano in Figura 1 le curve di rischio sociale imputabile al trasporto di GPL nell'area di Piombino in funzione dei valori di frequenza unitaria di rilascio forniti da alcune delle fonti<sup>1</sup> prese in esame nel seguente studio.

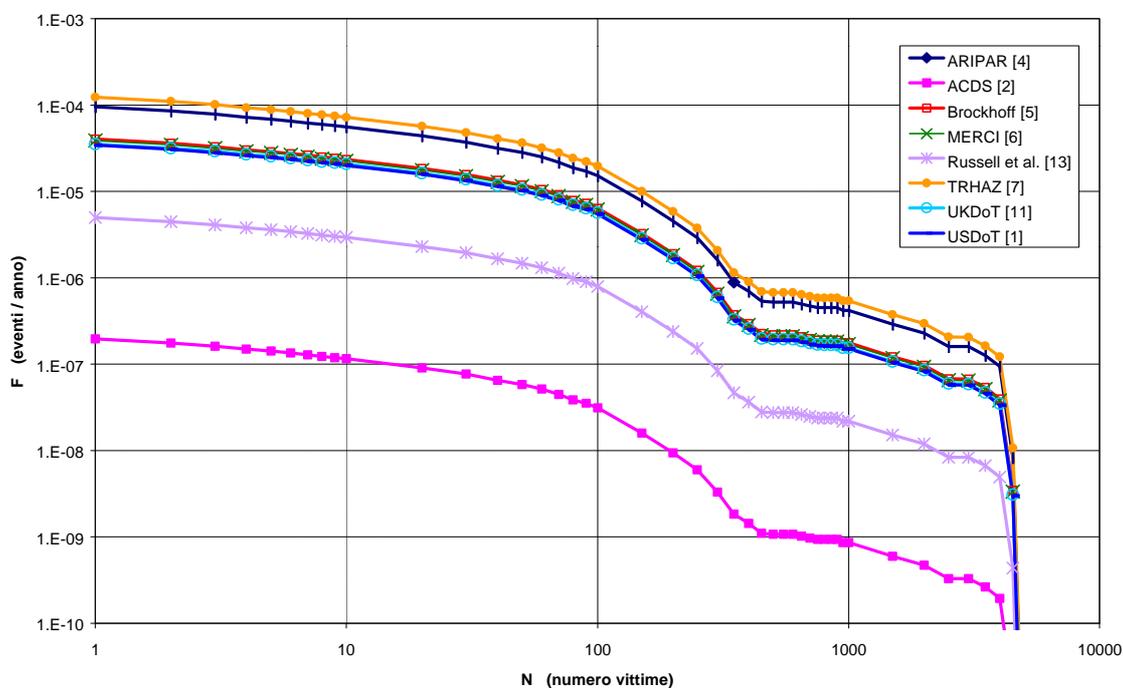


Figura 1: rischio sociale imputabile al trasporto di GPL nell'area portuale di Piombino stimato con frequenze di rilascio derivate da varie fonti in letteratura<sup>2</sup> [8]

Si può immediatamente notare come le curve  $F(N)$  risultino molto distanti. Ciò evidenzia come vi siano, sulla frequenza di rilascio, stime che differiscono addirittura per più di un ordine di grandezza, e come dunque sia estremamente urgente il problema di definire dei valori di riferimento da utilizzarsi negli studi di rischio d'area, con particolare riferimento alla situazione italiana.

<sup>1</sup> Nel presente lavoro è stato esaminato un sottoinsieme delle fonti presenti nella letteratura tecnica riportanti dati di frequenza di incidente e/o di rilascio e/o dati di probabilità di rilascio. Si ritiene che i valori citati, pur non rappresentando la totalità delle informazioni reperibili, consentano di effettuare una prima elaborazione ed analisi critica dei dati.

<sup>2</sup> Le fonti esaminate nel presente lavoro sono indicate con una sigla ed un numero; il numero indica il riferimento bibliografico in cui il dato è citato e la sigla la fonte originale del dato. L'autore del riferimento può essere diverso da quello della fonte originale.

## CONSIDERAZIONI PRELIMINARI ALL'ANALISI DEI DATI

### *Considerazioni sulla frequenza d'incidente unitaria*

La frequenza d'incidente unitaria è un valore statistico e come tale fortemente legato ai dati su cui la statistica è stata condotta. Le varie statistiche possono differenziarsi tra loro principalmente per:

- |   |  |
|---|--|
| ✓ definizione d'incidente                         | ✓ distinzione per categoria di veicoli |
| ✓ distinzione o meno tra tipi di strada o binario | ✓ numero di dati raccolti              |
| ✓ anni di riferimento dei dati                    | ✓ origine geografica dei dati          |

Risulta molto importante stabilire chiaramente che cosa si intende per "incidente", perché tra le varie fonti non esiste univocità di tale definizione; basti pensare che alcune fonti definiscono incidenti solo quegli eventi in cui è stato quantificato un danno economico superiore ad un certo valore soglia, mentre altre parlano d'incidente solo se si è verificata la presenza di almeno un ferito, oppure solo se c'è stato l'intervento dei vigili del fuoco.

Relativamente al solo trasporto stradale la maggior parte delle fonti utilizza dati che si riferiscono esclusivamente ad incidenti di veicoli per il trasporto merci, mentre poche fonti riportano dati specifici per i veicoli adibiti al trasporto di sostanze pericolose. Nonostante alcuni autori siano propensi a ritenere che i veicoli per il trasporto di sostanze pericolose abbiano una frequenza d'incidente inferiore a quella degli altri trasportatori di merce in virtù di una più scrupolosa manutenzione degli automezzi e di una maggiore preparazione e responsabilizzazione degli autisti, non esiste alcuna prova statistica a sostegno di questa tesi; al contrario alcuni studi mostrano che, in certi contesti territoriali, questi mezzi sono soggetti ad una maggiore incidentalità.

Il numero dei dati raccolti consente di stabilire la significatività delle elaborazioni statistiche e quindi la credibilità dei risultati presentati; l'arco temporale a cui i dati si riferiscono è indice della loro attualità.

L'origine geografica è un altro elemento importante, perché può comportare differenze nelle caratteristiche delle vie di trasporto e dei mezzi utilizzati, che possono giustificare scostamenti nei valori di frequenza misurati.

### *Considerazioni sulla probabilità di rilascio*

Alcune fonti intendono per "rilascio" la fuoriuscita indesiderata del prodotto trasportato nel caso in cui essa dia luogo a esplosioni ed incendi; altre fonti indicano con il termine "rilascio" la fuoriuscita di sostanze pericolose indipendentemente dagli eventuali incendi o esplosioni che possono seguire. Nel presente lavoro si adotta la seconda delle definizioni introdotte.

Si deve inoltre prestare attenzione al fatto che alcune fonti classificano i rilasci accidentali in base alla quantità di sostanza fuoriuscita, escludendo poi dal computo dei rilasci quelli di minore entità, perché ritenuti privi di conseguenze; sotto questa ipotesi il valore della probabilità di rilascio è minore di quella che si avrebbe se si considerassero tutti i rilasci indipendentemente dalla loro entità.

Poiché la probabilità di rilascio a seguito d'incidente è condizionata all'accadimento dell'incidente stesso, il suo valore varia al variare della definizione d'incidente. Ad esempio, se gli incidenti esaminati sono soltanto quelli con danni gravi, la probabilità di rilascio ha un valore maggiore rispetto al caso in cui si considerano anche gli incidenti più lievi. Questo problema è in parte superabile quando si calcola la frequenza di rilascio, purché la definizione d'incidente utilizzata per la frequenza d'incidente unitaria coincida con quella usata per la probabilità di rilascio. La frequenza d'incidente unitaria ottenuta usando definizioni d'incidente particolarmente gravi è minore rispetto al caso opposto, compensando così parzialmente il maggior valore della probabilità di rilascio. Da questa considerazione segue l'importanza fondamentale di calcolare la frequenza di rilascio usando valori di frequenza d'incidente unitaria e probabilità di rilascio congruenti tra loro. Trascurare questo aspetto può portare ad ottenere valori della frequenza di rilascio completamente privi di significato.

La probabilità di rilascio è un numero adimensionale, la cui stima è ottenuta dal rapporto tra il numero dei rilasci ed il numero degli incidenti; perché questo dato sia significativo, occorre includere nel computo degli incidenti solamente quelli che hanno coinvolto veicoli carichi, ovvero veicoli dai quali un rilascio avrebbe effettivamente potuto avere origine; infatti se, nel calcolo della probabilità di rilascio, si considerano a denominatore tutti gli incidenti, indipendentemente dal fatto che essi possano dar luogo a un rilascio o meno, si ottiene una probabilità di rilascio più piccola di quella effettiva.

Le metodologie utilizzabili per valutare la probabilità di rilascio sono:

- 1) statistiche su dati storici di rilascio;
- 2) analisi probabilistica.

Il primo metodo è senz'altro il più usato, perché fornisce risultati affidabili quando si abbia a disposizione un numero di dati sufficientemente elevato da consentire elaborazioni statistiche. E' impiegato quindi con successo nel caso di sostanze comunemente trasportate come benzina o GPL a condizione che sia disponibile un campione statisticamente significativo e omogeneo di dati. Il secondo metodo valuta la probabilità di rilascio tramite la stima dell'energia cinetica del mezzo al momento dell'impatto e la resistenza meccanica tipica del recipiente; tale metodologia è indubbiamente interessante quando la valutazione statistica non sia applicabile, ad esempio per trasporti di sostanze atipiche o a seguito dell'uso di recipienti di nuova progettazione.

#### *Considerazioni specifiche per il trasporto ferroviario*

Nel trasporto ferroviario si possono distinguere due tipologie di incidente: una prima classe di incidenti che dipendono dall'intensità del traffico ferroviario  $i_{tr,treni}$  espressa in treni/anno e che risultano indipendenti dal numero dei vagoni presenti in ogni treno (ad esempio le collisioni tra treni dovute ad errore dell'operatore); ed una seconda classe di incidenti la cui frequenza dipende dall'intensità del traffico espressa come numero di vagoni/anno  $i_{tr,vag}$  (per esempio i deragliamenti dovuti ad un difetto dei vagoni). L'approccio rigoroso alla valutazione della frequenza degli incidenti ferroviari (dettagliatamente esposto in [1]) è quindi basato sulla disponibilità di due diversi valori di frequenza unitaria: la frequenza unitaria d'incidente che tenga conto di tutti gli incidenti che dipendono dal numero dei treni ( $f_{inc,u,dipNtreni}$  espressa in incidenti del treno/km-percorsi dal treno), e la frequenza unitaria che tenga conto di tutti gli incidenti che dipendono dal numero dei vagoni ( $f_{inc,u,dipNvag}$  espresso in incidenti del vagone/km-percorsi dal vagone). La prima frequenza andrà moltiplicata per l'intensità del traffico ferroviario espresso in treni/anno ( $i_{tr,treni}$ ) sulla tratta in questione e per la probabilità di rilascio condizionata ad incidenti la cui frequenza dipende dal numero dei treni, la seconda per dall'intensità del traffico ferroviario espresso in vagoni/anno ( $i_{tr,vag}$ ) e per la probabilità di rilascio condizionata ad incidenti la cui frequenza dipende dal numero dei vagoni; entrambe dovranno poi essere moltiplicate per la lunghezza della tratta. Da un punto di vista matematico:

$$f_{ril} = \left( f_{inc,u,dipNvag} \cdot P_{ril,dipNvag} \cdot i_{tr,vag} + f_{inc,u,dipNtr} \cdot P_{ril,dipNtr} \cdot i_{tr,treni} \right) \cdot L \quad (4)$$

Questo approccio rigoroso è stato però scarsamente seguito in letteratura, anche per l'assenza di dati storici sufficientemente precisi sulle cause degli incidenti ferroviari. Infatti, in generale, non sono disponibili dati di frequenza di incidente distinti per le due classi di incidenti, ma si ha un solo valore di frequenza espresso o come incidenti del vagone/km-percorsi dal vagone ( $f_{inc,u,vag}$ ) o come incidenti del treno/km-percorsi dal treno ( $f_{inc,u,treni}$ ) che comprende presumibilmente entrambe le tipologie di incidente. I due valori sono chiaramente diversi tra loro ed inoltre, poiché più di un vagone può essere coinvolto in un incidente, non confrontabili se non in modo approssimato, cioè ipotizzando un numero medio di vagoni per treno ed un numero medio di vagoni coinvolti nell'incidente.

## **ANALISI DEI DATI PER IL TRASPORTO FERROVIARIO**

### *Frequenza di incidente unitaria nel trasporto ferroviario*

I dati disponibili in letteratura sono stati classificati in base al fatto che la frequenza incidentale sia espressa come incidenti del vagone/km-percorsi dal vagone ( $f_{inc,u,vag}$ ) o come incidente del treno/km-percorsi dal treno ( $f_{inc,u,treni}$ ); essi sono riportati in Tabella 2.

Si osserva come il rapporto tra il valore massimo e minimo di ogni categoria di dati sia pari a due ordini di grandezza quando si considerino in modo congiunto i dati europei ed i dati americani; allo scopo di verificare se una variabilità così ampia sia dovuta alle differenze tra il sistema ferroviario europeo e quello americano, si sono analizzati in modo separato i dati dei due continenti, evidenziando sia per i dati europei che per quelli americani una dispersione pari al massimo ad un ordine di grandezza.

Alcune fonti riportano la frequenza incidentale in funzione della velocità consentita sul binario: ■ alta (oltre 90 km/h); ■ media (60 km/h); ■ bassa (40 km/h). In Tabella 3 è riportato il rapporto  $Rf$ , tra il valore di frequenza proprio di ogni categoria di velocità con il valore medio; quest'ultimo rappresenta la media dei valori propri di ogni classe di velocità pesata sulle frazioni dei km-percorsi dal vagone per ogni classe. I valori di  $Rf$ , indicano come la frequenza incidentale cali al crescere della velocità; ciò è presumibilmente giustificato dalla migliore qualità dei binari su cui è consentito un più elevato valore della velocità.

Fonte	dati EUROPA + USA		dati EUROPA		dati USA	
	finc,u,vag	finc,u,treni	finc,u,vag	finc,u,treni	finc,u,vag	finc,u,treni
ARIPAR [4]	5.00E-08		5.00E-08			
Brockhoff [5]	1.15E-08	3.00E-08	1.15E-08	3.00E-08		
TRHAZ [7]	6.60E-08		6.60E-08			
USFRA [9]	1.68E-07	8.40E-07			1.68E-07	8.40E-07
Saccomanno [3]	4.68E-07				4.68E-07	
Appleton [10]	7.00E-08		7.00E-08			
TNO [10]	1.40E-07		1.40E-07			
Hubert [10]	1.00E-07		1.00E-07			
Geffen [10]	9.40E-07				9.40E-07	
Westbrook [11]		1.18E-06		1.18E-06		
Harris,NL [11]		8.80E-07		8.80E-07		
Harris,USA [11]		6.00E-06				6.00E-06
Harris,UK [11]		3.50E-07		3.50E-07		
Media geom. <sup>3</sup>	1.12E-07	6.17E-07	5.78E-8	3.23E-07	4.20E-7	2.24E-06
Max/Min <sup>4</sup>	81.7	200.0	12.2	39.3	5.6	7.1

Tabella 2: frequenze incidentali unitarie nel trasporto ferroviario ( $f_{inc,u,vag}$  in incidenti del vagone/km-percorsi dal vagone e  $f_{inc,u,treni}$  in incidenti del treno/km-percorsi dal treno)

finc,u,vag	alta velocità	Rf	media vel.	Rf	bassa vel.	Rf	val. medio
Brockhoff [5]			6.24E-09	0.5	1.38E-08	1.2	1.15E-08
USFRA [9]	8.66E-08	0.5	2.20E-07	1.3	8.09E-07	4.9	1.64E-07
finc,u,treni							
USFRA [9]	4.57E-07	0.5	1.09E-06	1.3	1.83E-06	2.1	8.67E-07
ValDefCH [10]	1.20E-07		3.00E-07				

Tabella 3: frequenze incidentali unitarie nel trasporto ferroviario in funzione della velocità ( $f_{inc,u,vag}$  in incidenti del vagone/km-percorsi dal vagone e  $f_{inc,u,treni}$  in incidenti del treno/km-percorsi dal treno)

#### Probabilità di rilascio nel trasporto ferroviario

I fattori fondamentali che influenzano la probabilità di rilascio sono:

- 1) velocità consentita sul binario: ▪ alta ▪ media ▪ bassa;
- 2) tipo di contenitore: ▪ in pressione (P) ▪ non in pressione (NP).

Per quanto riguarda le caratteristiche dei contenitori è intuitivo che un recipiente in pressione abbia pareti più spesse e sia progettato con criteri più cautelativi di un recipiente non in pressione; questo implica anche una resistenza meccanica maggiore. Purtroppo l'esiguità dei dati storici a disposizione non consente di suddividere ulteriormente i recipienti in categorie più specifiche, perciò i valori ottenuti si possono considerare soddisfacenti per le applicazioni comuni, come il trasporto di benzina o GPL, ma non certamente per casi particolari, come ad esempio il trasporto di scorie nucleari. La prima categoria (recipienti in pressione) è presumibilmente riferita a cisterne analoghe a quelle impiegate per il GPL, la seconda (recipienti non in pressione) a cisterne analoghe a quelle impiegate benzina o gasolio, essendo i riferimenti a queste due sostanze i più frequenti nelle statistiche.

I dati di probabilità di rilascio reperiti sono riportati in tabella 4 e sono in generale compresi tra 0.010 e 0.560. A conferma di quanto detto in precedenza, si può notare che la probabilità di rilascio da recipienti non

<sup>3</sup> Nella Tabella 2 ed in quelle seguenti è spesso riportata la media geometrica dei dati, in quanto essa consente, a differenza della media aritmetica, di ben evidenziare il contributo di tutti i termini, dai più grandi ai più piccoli, essendo sia le frequenze di incidente e di rilascio che la probabilità di rilascio numeri positivi minori di 1 (addirittura molto minori di 1 nel caso delle frequenze).

<sup>4</sup> Nella Tabella 2, come pure in quelle seguenti, il termine Max/Min rappresenta il rapporto tra il massimo ed il minimo dei valori riportati; esso è utile in quanto indica l'ordine di grandezza della variabilità dei dati.

Fonte	$p_{ril}$	$p_{ril(P)}$	$p_{ril(NP)}$	$p_{ril(NP)}/p_{ril(P)}$
ARIPAR [4]		0.033	0.100	3.0
Brockhoff [5]		0.010	0.050	5.0
TRHAZ [7]	0.560			
USFRA [9]		0.080	0.290	3.6
VanAerde&al [12]	0.033			
Sacomanno [3]		0.117		
TNO [10]		0.100		
Geffen [10]		0.080		
Westbrook [11]		0.041		
Media geom.	0.136	0.052	0.113	2.2
Max/Min	17.0	11.7	5.8	/

Tabella 4: probabilità di rilascio (condizionata ad incidente del vagone) nel trasporto ferroviario ( $p_{ril}$ : probabilità di rilascio per contenitore generico,  $p_{ril(P)}$ : probabilità di rilascio per contenitori in pressione,  $p_{ril(NP)}$ : probabilità di rilascio per contenitori non in pressione)

in pressione, dove è possibile il confronto, è maggiore di un fattore 3÷5 rispetto alla probabilità di rilascio da recipienti in pressione. Dai dati di Tabella 4 si evince inoltre che la variabilità delle probabilità di rilascio è pari ad un fattore 17.0 per recipienti non meglio definiti; questa si riduce ad un fattore 11.7 e 5.8 per recipienti rispettivamente in pressione e non in pressione.

I dati forniti da [9] permettono di confrontare la probabilità di rilascio per classi di binari con velocità diverse. I valori del rapporto  $R_p$  tra il valore di probabilità di rilascio proprio di ogni categoria di velocità ed il valore medio, riportati in Tabella 5, indicano come la probabilità di rilascio diminuisca al calare della velocità; ciò è facilmente giustificabile se si considera che le forze di impatto in gioco in caso di incidente (necessarie per lesionare la ferrocisterna e dunque per determinare un rilascio) sono minori in caso di bassa velocità.

	alta velocità	$R_p$	media vel.	$R_p$	bassa vel.	$R_p$	val.medio
$p_{ril,NP}$	0.460	1.6	0.350	1.2	0.260	0.9	0.290
$p_{ril,P}$	0.130	1.6	0.100	1.3	0.070	0.9	0.080

Tabella 5: probabilità di rilascio (condizionata ad incidente del vagone) nel trasporto ferroviario al variare della velocità [9].

#### Frequenza di rilascio unitaria nel trasporto ferroviario

Si sono qui esaminati solamente i dati relativi alle fonti che o riportano direttamente il valore della frequenza unitaria di rilascio oppure consentono immediatamente di risalire ad essa, citando dati sia per la frequenza unitaria di incidente che per la probabilità di rilascio. In Tabella 6 si sono riportate le frequenze unitarie di rilascio (per contenitore generico  $f_{ril,u,vag}$ , per contenitore in pressione  $f_{ril,u,vag(P)}$  e per contenitore non in pressione  $f_{ril,u,vag(NP)}$ ) separando direttamente le fonti europee dalle fonti americane, secondo quanto suggerito dall'analisi dei dati di Tabella 2.

Per quanto riguarda le fonti relative a dati sulle ferrovie nordamericane, un confronto è possibile solo per i rilasci da contenitori in pressione, che si discostano l'uno dall'altro al massimo di un fattore 6.8. Questa variabilità così contenuta può essere dovuta alle caratteristiche di maggiore omogeneità delle vie ferrate nordamericane rispetto alle reti ferroviarie dei diversi paesi europei. D'altro canto la differenze tra queste ultime potrebbe giustificare, almeno in parte, la dispersione, estesa a due ordini di grandezza, delle frequenze di rilascio delle fonti europee.

Il riferimento [9] fornisce anche in questo caso dati disaggregati in funzione delle classi di velocità dei binari. I valori riportati in Tabella 7 sembrano indicare che la frequenza di rilascio cali al diminuire della velocità, come evidenziato dal rapporto  $R$  tra il valore proprio di ogni categoria di velocità ed il valore medio. Poiché questa è data dal prodotto della frequenza incidentale (che cresce con la velocità) per la probabilità di rilascio (che cala con la velocità), si ricava che il secondo fattore sembra essere prevalente nell'influenzare il valore della frequenza di rilascio.

Fonte	dati EUROPA			dati USA		
	fril,u,vag(P)	fril,u,vag(NP)	fril,u,vag	fril,u,vag(P)	fril,u,vag(NP)	fril,u,vag
ACDS [2]	2.50E-09	6.30E-08				
ARIPAR [4]	1.65E-09	5.00E-09				
Brockhoff [5]	1.15E-10	5.75E-10				
TRHAZ [7]			3.7E-08			
USFRA [9]				1.85E-08		6.70E-08
Saccomanno [3]				5.48E-08		
TNO [10]	1.40E-08					
Geffen [10]				7.52E-08		
Westbrook [11]	1.21E-08					
Harris,NL [11]	1.10E-08			1.10E-08		
Harris,USA [11]				7.50E-08		
Lautkaski [11]			4.10E-9		4.19E-9	
<i>Media geom.</i>	<i>3.11E-09</i>	<i>6.24E-09</i>	<i>1.23E-08</i>	<i>3.63E-08</i>	<i>4.19E-09</i>	<i>6.70E-08</i>
<i>Max/Min</i>	<i>121.7</i>	<i>109.6</i>	<i>9.0</i>	<i>6.8</i>	<i>/</i>	<i>/</i>

Tabella 6: frequenza unitaria di rilascio del vagone nel trasporto ferroviario (in rilasci del vagone/km-percorsi dal vagone)

	alta velocità	R	media vel.	R	bassa vel.	R	val.medio
fril,u,vag(NP)	3.98E-08	0.8	7.70E-08	1.6	2.10E-07	4.4	4.76E-08
fril,u,vag(P)	1.13E-08	0.9	2.20E-08	1.7	5.66E-08	4.3	1.31E-08
fril,u,tr(NP)	2.10E-07	0.8	3.83E-07	1.5	4.76E-07	1.9	2.51E-07
fril,u,tr(P)	5.94E-08	0.9	1.09E-07	1.6	1.28E-07	1.8	6.94E-08

Tabella 7: frequenza unitaria di rilascio nel trasporto ferroviario in funzione della velocità ( $f_{inc,u,vag}$  in incidenti del vagone/km-percorsi dal vagone e  $f_{inc,u,treni}$  in incidenti del treno/km-percorsi dal treno) [9]

## ANALISI DEI DATI PER IL TRASPORTO STRADALE

### Frequenza di incidente unitaria nel trasporto stradale

I fattori ritenuti fondamentali nella quantificazione della frequenza d'incidente unitaria nel trasporto su strada si possono riassumere in: velocità media ed intensità del traffico della strada, numero e dimensioni delle corsie per ogni senso di marcia. I dati comunemente reperibili dalle statistiche sono raggruppati secondo criteri diversi che li rendono difficili da confrontare. In questo lavoro sono state perciò definite delle categorie stradali di riferimento, a cui far corrispondere i valori riportati dalle diverse fonti. I criteri impiegati per stabilire le categorie stradali di riferimento sono due:

- 1) numero di corsie per ogni senso di marcia: ■ singola corsia (tipo A) ■ doppia corsia (tipo B);
- 2) zona di attraversamento (solamente per strade di tipo A): ■ urbana (urb) ■ extraurbana(ex).

Al fine di poter includere tutte le fonti in questa suddivisione, si è reso necessario effettuare alcuni accorpamenti, qui non riportati per ragioni di spazio, e illustrati in dettaglio in [8]. Si noti che tale suddivisione corrisponde indirettamente a valori diversi di velocità e di intensità di traffico. Infatti una strada a più corsie è in genere più veloce di una strada a singola corsia, così come una strada urbana è più trafficata di una extraurbana. La suddivisione è stata effettuata avendo come riferimento la rete stradale italiana, ovvero includendo nella categoria A le strade statali e provinciali (distinguendo tra ambiente urbano, **urb**, ed extraurbano, **ex**), e nella categoria B le autostrade.

Fonte	A <sub>ex</sub>	A <sub>urb</sub>	A <sub>ex+urb</sub>	B <sub>ex</sub>	B <sub>ex+urb</sub>	A <sub>ex</sub> +B <sub>ex</sub>	A <sub>urb</sub> +B <sub>urb</sub>	tutte le strade
ARIPAR [4]								7.00E-06
Brockhoff [5]	3.00E-07	4.20E-06		4.30E-08				3.09E-07
MERCI [6]								8.20E-07
Russell&al. [13]						3.30E-07	3.10E-07	
TRHAZ [7]	4.00E-08	5.00E-07		1.50E-07				
UKDoT [11]	1.19E-07	5.70E-07				4.82E-07	1.22E-06	6.68E-07
USDoT [1]	3.98E-07	1.35E-06		1.36E-06				
Lassarre&al. [14]			2.50E-07		7.50E-07			
James [11]			1.19E-07		6.00E-08			9.40E-08
Allsop [11]			1.15E-07	3.65E-07				
ValDefCH [10]	5.00E-07	2.10E-06		4.50E-07				
Appleton [10]								6.70E-07
Geffen [10]								1.60E-06
TNO [10]								4.40E-07
USAEC [1]								9.94E-07
Abkowitz [1]								8.70E-07
NSC [1]								5.49E-06
CalTr [1]								2.86E-06
ADL [1]								8.00E-07
<i>Media geom.</i>	<i>1.95E-07</i>	<i>1.28E-06</i>	<i>1.51E-07</i>	<i>2.70E-07</i>	<i>2.12E-07</i>	<i>3.87E-07</i>	<i>6.35E-07</i>	<i>1.16E-06</i>
<i>Max/Min</i>	<i>12.5</i>	<i>8.4</i>	<i>2.2</i>	<i>31.6</i>	<i>12.5</i>	<i>1.6</i>	<i>3.7</i>	<i>74.5</i>

Tabella 8: frequenza incidentale unitaria nel trasporto stradale in funzione della tipologia di strada e di ambiente (in incidenti/km-percorsi dal veicolo)

Osservando i dati di Tabella 8, si nota come la frequenza incidentale abbia una variabilità contenuta entro un ordine di grandezza per tutte le classi, raggiungendo invece quasi due ordini di grandezza quando si consideri il valore medio per tutte le categorie di strada. Ciò conferma la necessità di utilizzare dati di frequenza di incidente specifici per categoria di strada e di ambiente che essa attraversa, anziché valori mediati su tutte le classi. Si nota anche come la frequenza incidentale unitaria sia, per ogni classe di strada, maggiore in ambiente urbano che non in ambiente extraurbano, a sottolineare la sua scarsa dipendenza dalla velocità limite, tipicamente minore in ambiente urbano che non su strade extraurbane.

#### *Probabilità di rilascio nel trasporto stradale*

Per la probabilità di rilascio in caso d'incidente stradale si può applicare la stessa suddivisione utilizzata per la frequenza d'incidente unitaria, a cui però si deve aggiungere, per alcune fonti, un'ulteriore distinzione in base al tipo di recipiente: ■ in pressione; ■ non in pressione. I dati raccolti sono riassunti in Tabella 9.

Si può notare che, mentre la probabilità di rilascio per recipienti non meglio definiti presenta un'elevata incertezza (un fattore 23, cioè più di un ordine di grandezza), la variabilità delle probabilità di rilascio per le due categorie di recipienti (in pressione e non in pressione) è più contenuta (inferiore ad un fattore 5 in entrambi i casi, se si trascura il dato di Hubert per i recipienti in pressione).

Alcune fonti riportano valori di probabilità di rilascio in funzione della tipologia di strada e di ambiente che essa attraversa. Rapportando tali valori al valore globale di probabilità di rilascio, è possibile ottenere dei fattori correttivi della probabilità di rilascio per tipologia di strada. Dai dati di Tabella 10 si evince come, nel caso di strade urbane, sembrerebbe necessario dimezzare la probabilità di rilascio rispetto al valore medio, mentre nel caso di strade extraurbane, sia di tipo A che di tipo B, sembrerebbe necessario moltiplicarle il valore medio per un fattore compreso tra 1.1 e 1.4. I dati in tabella 10 confermano l'ipotesi che la velocità al momento dell'incidente giochi un ruolo fondamentale sulla rottura del contenimento.

Fonte	Pril	Pril(P)	Pril(NP)	Pril(NP)/Pril(P)
ARIPAR [4]		0.033	0.100	3.0
Brockhoff [5]		0.023	0.070	3.0
MERCI [6]	0.115			
Russel&al. [13]		0.037		
TRHAZ [7]	0.600			
UkDoT [11]		0.080	0.190	2.4
USDoT [1]	0.081			
Saccomanno [3]		0.016		
Harwood&al. [3]		0.075		
Transp.Can. [3]		0.030		
BMCS [15]	0.143	0.081	0.188	2.3
MissDB [15]	0.127			
EPA [16]	0.395			
Mich [17]			0.210	
Hobeika&al. [18]	0.174			
Lovett&al. [19]		0.081		
Lees [11]	0.033			
Griffith [11]	0.429			
Tiemessen [20]		0.052		
ValDefCH [10]	0.026			
Hubert [10]		0.260		
TNO [10]		0.050		
Geffen [10]		0.113		
Media geom.	0.138	0.051	0.139	2.7
Max/Min	23.1	16.3	3.0	/

Tabella 9: probabilità di rilascio (condizionata ad incidente) nel trasporto stradale ( $p_{ril}$ : probabilità di rilascio per contenitore generico,  $p_{ril(P)}$ : probabilità di rilascio per contenitori in pressione,  $p_{ril(NP)}$ : probabilità di rilascio per contenitori non in pressione)

	Mich[17]	USDOT[1]	BMCS[15]	media aritm.
<b>Aurb</b>	0.3	0.8	0.5	0.5
<b>Bex</b>	1.1	1.1	1.4	1.2
<b>Aex</b>	1.3	1.1	1.4	1.3

Tabella 10: fattori correttivi della probabilità di rilascio nel trasporto stradale per tipo di strada e ambiente

#### Frequenza di rilascio unitaria nel trasporto stradale

Come già nel caso del trasporto ferroviario, anche nel caso del trasporto stradale si sono esaminati i dati relativi alle fonti che o riportano direttamente il valore della frequenza unitaria di rilascio oppure consentono immediatamente di risalire ad essa dalla frequenza unitaria di incidente e dalla probabilità di rilascio. I dati sono riassunti nella Tabella 11. Va notato che la maggior parte delle fonti non riporta contemporaneamente dati di frequenza incidentale per categorie di strada e ambiente e dati di probabilità di rilascio in funzione della pressione del trasporto.

E' possibile notare come la variabilità della frequenza unitaria di rilascio da contenitore generico mediata su tutte le categorie di strada e di ambiente sia pari ad un fattore 14. Tale valore è inaspettatamente piccolo, se si considera che la probabilità di rilascio da contenitore generico e la frequenza di incidente media avevano una variabilità di un fattore pari, rispettivamente, a 23.1 e a 74.5. Dall'analisi dei dati si riscontra dunque un effetto di compensazione del valore di frequenza d'incidente unitaria con quello di probabilità di rilascio.

Risulta difficile stabilire se esso sia dovuto a fattori compensativi, a fattori casuali o ad un'influenza reciproca delle varie fonti. Va notato però che l'utilizzo di definizioni diverse per il termine "incidente" può portare a valori molto diversi della frequenza di incidente e, conseguentemente, della probabilità di rilascio; se però i due dati assunti sono ricavati in modo coerente, il valore della frequenza di rilascio non dipende dalla definizione di incidente. Questa può essere una possibile giustificazione della minore variabilità riscontrata per questo dato tra le diverse fonti.

Fonte	Tutte strade	Aex	Bex	Aex+Bex	Aurb
<b>f<sub>ril,u(NP)</sub></b>					
ARIPAR [4]	7.00E-07				
Brockhoff [5]	2.73E-08	2.10E-8	3.01E-09		2.94E-07
UKDoT [11]	1.27E-07			9.16E-08	
ACDS [2]	2.10E-08				
<i>Media geom.</i>	<i>8.45E-08</i>	<i>2.10E-8</i>	<i>3.01E-09</i>	<i>9.16E-08</i>	<i>2.94E-07</i>
<i>Max/Min</i>	<i>33.3</i>	<i>/</i>	<i>/</i>	<i>/</i>	<i>/</i>
<b>f<sub>ril,u(P)</sub></b>					
ARIPAR [4]	2.31E-07				
Brockhoff [5]	8.97E-09	6.90E-09	9.89E-10		9.66E-08
UKDoT [11]	5.34E-08			3.86E-08	
ACDS [2]	4.80E-10				
Russell&al. [13]				1.15E-08	
<i>Media geom.</i>	<i>1.52E-08</i>	<i>6.90E-09</i>	<i>9.89E-10</i>	<i>2.10E-08</i>	<i>9.66E-08</i>
<i>Max/Min</i>	<i>481.3</i>	<i>/</i>	<i>/</i>	<i>3.4</i>	<i>/</i>
<b>f<sub>ril,u</sub></b>					
TRHAZ [7]		2.40E-08	9.00E-08	3.72E-08	
USDOT [1]		3.58E-08	1.17E-07		8.37E-08
ValDefCH [10]	1.31E-08	1.30E-08	1.17E-08		
Hubert [10]	1.30E-07				
Geffen [10]	1.81E-07				
TNO [10]	2.20E-08				
<i>Media geom.</i>	<i>5.10E-08</i>	<i>2.24E-08</i>	<i>4.97E-08</i>	<i>3.72E-08</i>	<i>8.37E-08</i>
<i>Max/Min</i>	<i>13.8</i>	<i>2.8</i>	<i>10.0</i>	<i>/</i>	<i>/</i>

Tabella 11: frequenza unitaria di rilascio nel trasporto stradale (in rilasci/km-percorsi dal veicolo)

## CONCLUSIONI

L'elaborazione delle informazioni raccolte ha messo in luce i principali fattori da cui dipendono le frequenze di rilascio nel trasporto di sostanze pericolose. Tra questi, i più importanti sono la velocità del mezzo e le caratteristiche meccaniche del contenitore, in particolare la sua pressione di progetto.

L'analisi dei dati ha inoltre evidenziato come, sia nel caso del trasporto ferroviario che in quello stradale, le frequenze di incidente e le probabilità di rilascio, anche distinguendo in base alla categoria di binario o di accoppiamento strada/ambiente attraversato e alla pressione del trasporto, abbiano una dispersione pari ad un ordine di grandezza, che in qualche caso arriva a due. Tuttavia tale variabilità si riduce nel caso del trasporto stradale, quando si vada a considerare il prodotto delle due grandezze, ovvero la frequenza di rilascio, da cui il rischio individuale e la frequenza cumulata nelle curve  $F(N)$  di rischio sociale dipendono in modo proporzionale.

E' importante sottolineare come, quando si effettuino analisi di rischio, una variabilità di un ordine di grandezza delle misure di rischio sia ammissibile, essendo comunque presente un intervallo di incertezza per i numerosi dati in ingresso; ciò significa che in generale intervalli di variabilità contenuti entro un ordine di grandezza per le frequenze di rilascio sono da ritenersi senz'altro accettabili.

I risultati ottenuti evidenziano da una parte la necessità di utilizzare dati coerenti tra loro per le frequenze di incidente e le probabilità di rilascio, privilegiando i dati statisticamente significativi e possibilmente relativi ad un contesto simile a quello al quale devono essere applicati. Dall'altra, è evidente la necessità di ottenere dati sempre più affidabili, promuovendo iniziative specifiche, in particolare modo in campo nazionale, per lo sviluppo di banche dati sufficientemente dettagliate per gli incidenti e i rilasci nel trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose.

## BIBLIOGRAFIA

1. CCPS, Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis, AIChE, New York (USA), (1995)
2. ACDS, Major Hazard Aspect of the Transport of Dangerous Substances, Advisory Committee on Dangerous Substances, HSC, London(UK), (1991)
3. F.F. Saccomanno, Shortreed, Hazmat transportation risks: societal and individual perspectives, *Journ. Transp. Eng.*, 119(2), 177-188, (1993)
4. D. Egidi, F.P. Foraboschi, G. Spadoni, A. Amendola, The ARIPAR project: analysis of the major accident risks connected with industrial and transportation activities in the Ravenna area, *Reliability Engineering and System Safety*, 49, 75-89, (1995)
5. L.H. Brockhoff, A risk management model for transport of dangerous goods, EUR 14675 EN, Commission of the European Communities, Luxemburg (L), (1992)
6. A. Bertelle, P. Haastруп, Trasporto di merci pericolose, elementi di valutazione per l'assicuratore, *Il Sole 24 ORE libri*, Milano (I), (1996)
7. R. Bubbico, S. DiCave, G. Dore, B. Mazzarotta, Valutazione del rischio nel trasporto di sostanze pericolose: il software TrHaz, *Atti del Convegno VGR 98, Dip. Costr. Mec. Nuc., UNIPI, Pisa (I)*, (1998)
8. L. Vanni, Aggiornamento della valutazione del rischio nelle aree industriali e portuali di Livorno e Piombino, *Tesi di Laurea in Ingegneria Chimica, Università di Pisa, Pisa* (2000)
9. USFRA, Railroad Accident/Incident Database, US Federal Railroad Administration, (1999)
10. M. Nicolet-Monnier, A.V. Gheorghie, Quantitative risk assessment of hazardous materials transport system, *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NL)*, (1996)
11. F.P. Lees, Loss prevention in the process industries, *Butterworth-Heinemann, London (UK)*, (1996)
12. M. Van Aerde, A.M. Stewart, F.P. Saccomanno, Estimating the impacts of LPG spills during transportation accidents, *Journ. Haz. Mat*, 20, 375-392, (1988)
13. S.B. Russell, T.F. Kempe, Methodology for assessing the public risk from transporting hydrogen sulfide, in F.F. Saccomanno, K. Cassidy, *Transport of dangerous goods: assessing the risk, IRR, University of Waterloo, Ontario (C)*, (1993)
14. S. Lassarre, K. Fedra, E. Weigkricht, Computer-assisted routing of dangerous goods for Haute-Normandie, *Journ. Transp. Eng.*, 119(2), 200-210, (1993)
15. D.W. Harwood, J.G. Viner, E.R. Russell, Characteristics of accidents and incidents in highway transportation of hazardous materials, *Transportation Research Record 1264, TRB, Washington D.C. (USA)*, (1989)
16. G. Marsili, L. Lauria, M.E. Soggiu, Modelling risk for road transport of dangerous goods, evaluating uncertainty, *Proceedings of the SRA-Europe Conference, Amsterdam (NL)*, (1995)
17. H. Sherali, L. Brinzendine, T.S. Glickman, S. Subramanian, Low probability-high consequence considerations in routing hazardous material shipments, *Transp. Science*, 31(3), 237-251, (1997)
18. A.G. Hobeika, S. Kim, R. Sethuraman, Characteristics of hazardous material accidents in Pennsylvania, *Journ. Transp. Eng.*, 119(2), 226-238, (1993)
19. A.A. Lovett, J.P. Parfitt, J.S. Brainard, Using GIS in risk analysis: a case study of hazardous waste transport - *Risk Analysis*, 17(5), 625-633, (1997)
20. G. Tiemessen, J.P. Zweeden, Risk assessment of the transport of hazardous materials, *Proceedings of the Loss Prevention and Safety Promotion Conference, Barcelona (S)*, 299-307, (1998)