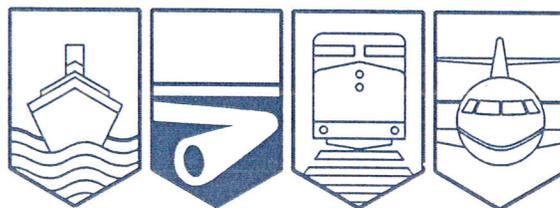




P96H0012

**RAPPORT D'ENQUÊTE SUR ACCIDENT DE PIPELINE
P96H0012**



RUPTURE D'UN GAZODUC

**TRANSCANADA PIPELINES LIMITED
CANALISATION 100-2 DE 864 MILLIMÈTRES (34 POUCES)
POTEAU KILOMÉTRIQUE DE VANNE DE
CANALISATION PRINCIPALE 39-2 + 6,07 KILOMÈTRES
ST. NORBERT (MANITOBA)
15 AVRIL 1996**

MISSION DU BST

La *Loi sur le Bureau canadien d'enquête sur les accidents de transport et de la sécurité des transports* établit les paramètres juridiques qui régissent les activités du Bureau de la sécurité des transports du Canada.

La mission du BST consiste essentiellement à promouvoir la sécurité du transport maritime, ferroviaire et aérien, ainsi que du transport par pipeline :

- en procédant à des enquêtes indépendantes, y compris des enquêtes publiques au besoin, sur les accidents de transport choisis, afin d'en dégager les causes et les facteurs;
- en constatant les manquements à la sécurité mis en évidence par de tels accidents;
- en faisant des recommandations sur les moyens d'éliminer ou de réduire ces manquements;
- en publiant des rapports rendant compte de ses enquêtes et présentant les conclusions qu'il en tire.

Le Bureau n'est pas habilité à attribuer ni à déterminer les responsabilités civiles ou pénales.

INDÉPENDANCE

Pour favoriser la confiance du public à l'endroit du processus d'enquête sur les accidents de transport, l'organisme d'enquête doit non seulement être objectif, indépendant et libre de tout conflit d'intérêts, mais aussi perçu comme tel. La principale caractéristique du BST est son indépendance. Le Bureau relève du Parlement par l'intermédiaire du président du Conseil privé de la Reine pour le Canada et il est indépendant des autres organismes gouvernementaux et des ministères. Son indépendance assure la parfaite objectivité de ses conclusions et de ses recommandations. Elle repose sur sa compétence, sa transparence et son intégrité, ainsi que sur l'équité de ses méthodes.

Visitez le site Internet du BST
<http://bst-tsb.gc.ca/>

Les rapports d'enquête publiés par le BST depuis janvier 1995 y sont maintenant disponibles. Les rapports seront ajoutés au fur et à mesure qu'ils seront publiés.



Le Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) a enquêté sur cet accident dans le seul but de promouvoir la sécurité des transports. Le Bureau n'est pas habilité à attribuer ni à déterminer les responsabilités civiles ou pénales.

Rapport d'enquête sur accident de pipeline

Rupture d'un gazoduc

TransCanada PipeLines Limited
Canalisation 100-2 de 864 millimètres (34 pouces)
Poteau kilométrique de vanne de canalisation
principale 39-2 + 6,07 kilomètres
St. Norbert (Manitoba)
15 avril 1996

Rapport numéro P96H0012

Résumé

À 18 h 15, heure normale de l'Est (HNE), le 15 avril 1996, un gazoduc de 864 mm (34 pouces) de diamètre de la TransCanada PipeLines Limited s'est rompu à la hauteur du poteau kilométrique de vanne de canalisation principale 39-2 + 6,07 km, à 10 km au sud-ouest de Winnipeg, près de la ville de St. Norbert (Manitoba). La rupture a été suivie d'une explosion et d'un incendie à 18 h 29 HNE.

Le Bureau a déterminé que la rupture de la canalisation 100-2 a été causée par une fracture de surcharge ductile, résultant de contraintes externes élevées qui ont été imposées à la surface de la canalisation par le mouvement de la pente dans laquelle la conduite était enfouie. L'existence d'une fissure éco-assistée au bord de la soudure circonférentielle qui joignait les deux sections de conduite à cet endroit a contribué à la rupture. Il se peut que la fissure initiale ait pris naissance lors de la construction de ce tronçon de canalisation.

This report is also available in English.



1.0	Renseignements de base	1
1.1	L'accident	1
1.2	Victimes	6
1.3	Dommmages au réseau de canalisations et à la propriété privée — perte de produit	6
1.4	Conditions météorologiques et état de la rivière La Salle	7
1.5	Particularités du gazoduc	8
1.6	Exploitation du gazoduc	10
1.7	Isolation des installations de la canalisation principale	11
1.8	Protection cathodique de la canalisation 100-2	12
1.9	Espacement entre les canalisations principales au passage de la rivière La Salle	13
1.10	Programme d'inspection géotechnique	14
1.11	Inspection photogrammétrique et documentation géographique de la zone incendiée	16
1.12	Essais métallurgiques	17
1.13	Étude sur place des conditions environnementales associées à la rupture	21
1.14	Degré de préparation aux situations d'urgence	24
2.0	Analyse	27
2.1	Introduction	27
2.2	Examen des faits	27
2.2.1	Intervention d'urgence par le personnel de la compagnie et les autres organismes	27
2.2.2	Arrêt d'urgence des installations de pipelines	28
2.2.3	Conditions propices à la fissuration éco-assistée au passage	30
2.2.4	Surveillance des passages de pipelines sur le réseau de la TCPL	30
3.0	Conclusions	33
3.1	Faits établis	33
3.2	Cause	34

4.0	Mesures de sécurité	35
4.1	Mesures prises	35
5.0	Annexes	
	Annexe A - Plan et profil du passage de la rivière	37
	Annexe B - Plan de la zone incendiée	39
	Annexe C - Schéma d'une vanne	41
	Annexe D - Sigles et abréviations	43

1.0 Renseignements de base

1.1 L'accident

Vers 18 h 15¹, une canalisation principale de 864 millimètres (mm) de diamètre extérieur (diamètre nominal de conduite de 34 pouces) d'un gazoduc de la TransCanada PipeLines Limited (TCPL), désignée sous le nom de canalisation 100-2, se rompt soudainement à la hauteur d'un passage de la rivière La Salle, à 10 kilomètres (km) au sud-ouest de Winnipeg, près de St. Norbert (Manitoba). Des résidents des environs du passage ont signalé avoir entendu un grand bruit qui a secoué les murs. Plusieurs témoins ont signalé avoir vu des débris voler dans les airs et un geyser de boue et d'eau s'élever de la rivière La Salle, à un endroit où la canalisation de la TCPL traverse la rivière. On ne sait pas exactement à quelle heure ces observations ont été faites.

À 18 h 17, un résident des environs informe le centre de secours de Winnipeg (911) qu'un incident s'est produit sur la rivière La Salle. On réachemine l'appel au centre de secours au service des incendies de Winnipeg, ce qui déclenche, à 18 h 18, une intervention d'urgence de niveau 2. On dépêche neuf unités du service des incendies de la grande région de Winnipeg sur les lieux. Cinq autres unités interviennent dans le cadre des opérations. L'appel au service 911 occasionne aussi l'envoi de cinq détachements policiers du district, d'un agent de la Gendarmerie royale du Canada (GRC) et d'une ambulance du Winnipeg Victoria Hospital.

À 18 h 19, plusieurs personnes qui circulent sur la route Pembina ou habitent aux alentours et qui s'approchent pour observer le geyser de boue et d'eau qui s'élève de la rivière sont refoulées par un résident des environs qui les prévient du danger potentiel que représente une fuite de gaz naturel sous pression et les enjoint de garder leurs distances.

À 18 h 27, le résident qui avait précédemment alerté le service de police local appelle le centre de contrôle régional de la TCPL à Winnipeg pour lui signaler que la rivière La Salle crache de la boue et de la glace. Au même moment, les résidents entendent les sirènes des voitures de pompiers du service des incendies de Winnipeg qui font route vers le lieu de l'accident.

À 18 h 29, un résident des environs appelle le numéro d'urgence 24 heures de la TCPL. On réachemine l'appel au centre de contrôle régional de Winnipeg. Il s'agit du premier avis reçu par la TCPL concernant une rupture de la canalisation dans la rivière La Salle. Alors que le résident est au téléphone avec le contrôleur des opérations régionales (COR) de Winnipeg, le gaz naturel s'enflamme, coupant les lignes de transport de l'électricité et les lignes téléphoniques dans les environs immédiats du lieu de l'accident. Le résident quitte aussitôt sa maison en raison de la chaleur intense dégagée par la boule de feu. Trois témoins ont signalé

¹ Toutes les heures sont exprimées en heure normale de l'Est (temps universel coordonné (UTC) moins cinq heures), sauf indication contraire.

que le gaz naturel semblait s'être enflammé en un point près du sommet du geyser de boue et d'eau. Au même moment, une station de télévision de Winnipeg transmet des images des événements qui se déroulent sur la rivière La Salle dans le cadre de son bulletin de nouvelles régulier. Les pompiers de Winnipeg ont signalé avoir vu la grosse boule de feu alors qu'ils étaient en route vers le lieu de l'accident.

À 18 h 30, le surveillant régional de la TCPL pour l'emprise, la sécurité et l'environnement est avisé de ce qui se produit au passage de la rivière La Salle par l'agent principal de l'emprise de la TCPL qui vient d'en voir le compte rendu au bulletin de nouvelles local.

À 18 h 32, l'agent principal de l'emprise de la TCPL avise le COR des événements de la rivière La Salle.

À 18 h 35, le COR avise le contrôleur d'acheminement du gaz de Calgary de la TCPL. Cependant, à 18 h 38, ce dernier informe le COR que le centre de contrôle d'acheminement du gaz de Calgary (centre de Calgary) est dans l'impossibilité de vérifier la véracité de l'information en raison d'une panne de télémessure au niveau de la station de compression 41 de la TCPL, à Île des Chênes, à l'est de Winnipeg. Alors que le COR est en communication directe avec l'émetteur de télémessure de la station 41 et reçoit encore des données du réseau de contrôle du système et d'acquisition des données (SCADA), le centre de Calgary ne reçoit aucune donnée du système SCADA. À 22 h 30, la communication de télémessure est rétablie entre la station 41 et le centre de Calgary.

À 18 h 37, constatant que la pression chute dans les six canalisations principales de la station, le COR isole le groupe A du système d'exploitation de la canalisation principale à la station 41, ce qui entraîne des crêtes de pression dans le groupe E de la station.

À 18 h 41, le COR actionne le composeur automatique d'urgence de la TCPL pour aviser l'équipe de gestion régionale de Winnipeg et les surveillants des stations et des pipelines qu'une situation d'urgence est en cours. Le système d'appel automatique peut faire un maximum de 23 appels téléphoniques, sans arrêt, jusqu'à ce que tous les destinataires prévus par la liste d'appel aient accusé réception du message.

À 18 h 42, le COR est informé que le gestionnaire des installations régionales de Winnipeg est en route vers le lieu de l'accident et assumera les fonctions de commandant des opérations sur place comme le prévoient les directives de la TCPL.

À 18 h 43, le COR demande au contrôleur de Calgary la permission d'isoler le réseau de canalisations.

À 18 h 45, 27 minutes après le premier avis d'accident sur la ligne 911, le contrôleur de Calgary ordonne au COR d'isoler les canalisations 100-1 et 100-2 entre la station 34 de Portage la Prairie (Manitoba) et la station 41 d'Île des Chênes (Manitoba). Le COR isole d'abord le côté aspiration des canalisations 100-1 et 100-2 à la station 41 puis le côté refoulement des canalisations 100-1 et 100-2 à la station 34. La station de compression 41 d'Île des Chênes, où du personnel de la TCPL est en poste, se trouve à environ 30 km de route du lieu de l'accident.

À 18 h 46, un dispositif d'arrêt automatique sur baisse de pression se déclenche sur la canalisation principale à la hauteur de la vanne de canalisation principale (VCP) 39-2, située à 6 km en amont du lieu de l'accident. Quand la pression d'une canalisation diminue jusqu'à un certain niveau prédéterminé, en l'occurrence 3 450 kilopascals (kPa) (500 livres au pouce carré (lb/po²)), la vanne se ferme automatiquement, comme dans le cas présent. La VCP 41-2, la première VCP en aval du lieu de l'événement (à 12 km), était fermée au moment de l'événement; elle est habituellement fermée quand la station 41 alimente la canalisation 2, comme c'était le cas au moment de l'événement.

À 18 h 48, le COR reçoit confirmation du système SCADA que les canalisations 100-1 et 100-2 sont complètement isolées entre les stations de compression 34 et 41.

À 18 h 49, le COR remarque que la pression d'aspiration de la canalisation 100-2 diminue rapidement à la station 41. À partir de ce moment-là, elle diminue sans arrêt.

À 18 h 50, après s'être identifiés auprès des policiers et des responsables du service des incendies, les premiers intervenants de la TCPL entreprennent d'établir un périmètre de sécurité autour du lieu de l'événement, aident à l'évacuation d'une résidence et conseillent les policiers et les pompiers sur les questions de sécurité et d'intervention associées à la rupture.

À 18 h 56, le COR reçoit un appel d'une personne non identifiée signalant avoir vu, depuis la route 75, une grosse boule de feu au sud de Winnipeg en direction de la rivière La Salle.

À 19 h, le gros incendie qui faisait rage au passage de la rivière La Salle s'éteint de lui-même tandis qu'une flamme résiduelle d'environ 600 mm continue de brûler par intermittence. À ce moment-là, le service des incendies diminue la sécurité sur le lieu de l'événement sans consulter le personnel de la TCPL, ce qui permet aux membres des médias et à de nombreux curieux de s'approcher des rives de la rivière et d'une résidence en feu. Vers 19 h 15, les employés de la TCPL, avec l'aide des policiers, parviennent à rétablir le périmètre de sécurité.

À 19 h 13, le commandant des opérations sur place avise le COR qu'il y a un petit incendie et une fuite de gaz naturel sur le lieu de l'événement. On avise aussi le COR qu'une résidence est en train de brûler à l'est du passage de la rivière et que le personnel de la TCPL a été avisé par les pompiers de Winnipeg que la résidence ne semblait pas être occupée quand l'incendie s'est déclaré.

À 19 h 17, un spécialiste du système SCADA en poste à Winnipeg demande que les problèmes de communication entre le contrôleur de Calgary et la station 41 soient corrigés immédiatement.

À 19 h 24, le contrôleur de Calgary demande au COR de rétablir la communication SCADA avec la station 41.

À 19 h 42, le pilote principal de patrouille de la TCPL reçoit l'ordre de voler au-dessus du lieu de l'événement avec l'hélicoptère de la compagnie.

À 19 h 45, un préposé de la station 41 se met en route vers la VCP 39 pour s'assurer qu'elle est bien fermée.

À 19 h 46, les techniciens de la station 41 informent le COR que la station de comptage des ventes de St. Norbert a été isolée de la canalisation 100-1.

À 19 h 52, le COR confirme au contrôleur de Calgary que la VCP 39-2 est fermée.

À 20 h 4, le contrôleur de Calgary donne au personnel sur le terrain l'autorisation de procéder à l'ouverture de la vanne de raccordement 2:3 en amont de la VCP 39, entre les canalisations 100-2 et 100-3. On confirme à 20 h 15 que la vanne est ouverte en amont.

À 20 h 7, la haute direction de la TCPL est informée des activités de 19 h 52 et de 20 h 4, et on les assure que la canalisation 100-1 demeurera isolée tant que la sécurité du réseau ne sera pas confirmée.

À 20 h 16, on confirme que la vanne d'isolement n° 6 est fermée à la station de comptage des ventes de St. Norbert.

À 20 h 23, le commandant des opérations sur place confirme que la VCP 39-2 s'est fermée à la suite de la chute de pression, mais que la VCP 39-1 ne s'est pas fermée et que la pression interne se maintient.

À 20 h 34, le personnel de la TCPL sur place informe le COR que la conduite s'est rompue dans la rivière La Salle, qui avait environ 100 m de largeur à ce moment-là en raison des crues printanières, au lieu de ses 30 m de largeur habituels. On informe aussi le COR que les canalisations 100-1 et 100-3 ne semblent pas avoir été touchées par la rupture.

À 20 h 35, le contrôleur de Calgary confirme que la canalisation 100-2 s'est rompue dans la rivière La Salle, au sud de Winnipeg, environ à la hauteur de la VCP 39 + 6,07 km.

À 20 h 36, la TCPL informe pour la première fois le BST que la canalisation 100-2 s'est rompue dans la rivière La Salle; à 20 h 43, elle informe l'Office national de l'énergie (ONE).

À 20 h 45, on redémarre les unités de compression 4 et 5 du groupe A de la station 41 de manière à recommencer à acheminer du gaz naturel dans la canalisation 100-1 vers l'est de Winnipeg et l'est du Canada.

À 20 h 51, le contrôleur de Calgary demande que le tronçon de la canalisation 100-1 entre la station de compression 34 et la station de comptage des ventes n° 39 de Winnipeg soit remis en service normal.

À 21 h 28, trois heures après l'explosion et le début de l'incendie, la petite flamme résiduelle de 600 mm s'éteint d'elle-même.

À 21 h 30, ayant terminé de combattre et de circonscrire l'incendie sur le lieu de l'événement, les pompiers du service des incendies de Winnipeg se préparent à quitter les lieux.

Entre 21 h 32 et 22 h 20, le COR termine une série de manoeuvres destinées à rétablir l'écoulement du gaz naturel autour du lieu de l'événement et dans la canalisation 100-2 et les canalisations adjacentes du passage de la rivière La Salle.

À 22 h 8, ayant déterminé que tout est sous contrôle, le service des incendies de Winnipeg laisse le contrôle des opérations sur le lieu de l'accident au service de police de Winnipeg. Le commandant des opérations sur place de la TCPL et les représentants de Manitoba Hydro et de la Central Gas Inc. sont informés de la situation.

À 23 h 12, le COR demande au personnel de contrôle de rester en poste toute la nuit à la hauteur de la VCP 39 pour surveiller les pressions de réglage de la canalisation 100-1 et pour assurer le maintien de l'alimentation en gaz à la station de comptage des ventes de Transcona.

À 23 h 49, cinq heures et demie après la rupture de la canalisation 100-2, le COR informe les centres de contrôle de Thunder Bay et de Regina que le réseau est remis en service, sauf pour ce qui est du tronçon de la canalisation 100-2 qui traverse la rivière La Salle.

En raison du niveau d'eau très élevé au passage de la rivière La Salle le 18 avril, la canalisation 100-2 est isolée de la canalisation principale et des bouchons sont installés par soudage aux extrémités de la conduite jusqu'à ce que le niveau d'eau revienne à une hauteur normale.

Le 25 juin, un entrepreneur engagé par la TCPL commence à effectuer des réparations sur la canalisation 100-2. Le 27 juin, par mesure de précaution, la TCPL retire la canalisation 100-1 du service au passage de la rivière La Salle.

Entre le 23 juillet et le 3 août, le tronçon de la canalisation 100-2 qui franchit la rivière est enlevé et un nouveau tronçon est installé puis soumis sur place à des essais hydrostatiques. Le 15 août, la canalisation 100-2 est remise en service normal.

Entre le 31 juillet et le 13 août, le tronçon de la canalisation 100-1 qui franchit la rivière est enlevé et remplacé par un nouveau tronçon qui est aussi soumis sur place à des essais hydrostatiques. Le 14 août, la canalisation 100-1 est remise en service normal.

Entre le 15 août et le 23 août, la canalisation 100-2 est soumise à des inspections électroniques internes entre la VCP 34 et la station 41 pour voir si la surface de la conduite a été endommagée. Le 25 août, la canalisation 100-2 est remise en service en tant que canalisation principale.

Le 25 août, la canalisation 100-3 est retirée du service normal en raison de la présence d'un fléchissement dans la conduite du côté est du passage de la rivière. Avant de remettre la canalisation en service, on excave la conduite à partir du bord du passage de la rivière La Salle et jusqu'au sommet de la pente de la rive pour réduire les contraintes exercées sur la conduite. Le 29 août, la canalisation 100-3 est remise en service normal.

Le 20 septembre, le nettoyage et les travaux de réclamation sont terminés sur le lieu de l'événement.

1.2 *Victimes*

Personne parmi les employés de la TCPL et les résidants des environs n'a été blessé à la suite de cet événement.

1.3 *Dommages au réseau de canalisations et à la propriété privée — perte de produit*

Les dommages à la canalisation 100-2 consistent en 6,325 m (20,75 pieds) de conduite rompue dans le sens longitudinal. Un lestage boulonné situé dans les limites de la rupture a été détruit lors de l'accident; selon les dossiers de la TCPL, le lestage se trouvait sur, près ou à côté d'une soudure circonférentielle à la limite amont de la rupture. La canalisation 100-1, qui n'a pas été endommagée par la rupture de la canalisation 100-2 mais qui a quand même été remplacée par mesure de précaution, passe au même endroit que cette dernière, dans une zone d'instabilité pré-existante de la pente.

Les ruptures de la canalisation 100-2 ont produit deux fragments qui ont été retrouvés dans un rayon de 40 m (130 pieds) du cratère. Le premier fragment de conduite, qui comportait un joint longitudinal de 1,175 m (3,86 pieds) de longueur, a été retrouvé dans un boisé près de la rive. Le deuxième fragment, qui comportait un joint longitudinal de 5,150 m (16,89 pieds) de longueur, a été localisé au fond de la rivière par des plongeurs, directement au-dessus du passage de la

canalisation 100-4 dans la rivière La Salle. La rupture a créé au fond de la rivière un cratère de forme irrégulière mesurant environ 13,5 m de largeur sur 17 m de longueur sur 5 m de profondeur, ce qui représente un volume d'environ 550 mètres cubes (m^3).

L'explosion et l'incendie ont entraîné la perte d'une résidence qui se trouvait à 178,1 m (584 pieds) au sud du lieu de la rupture. Des lignes de transport hydro-électriques, des poteaux, des transformateurs et du matériel connexe se trouvant dans les environs immédiats du lieu de l'accident ont aussi été endommagés et ont dû être remplacés. Des arbres et de la végétation qui se trouvaient des deux côtés de la rivière dans la zone d'impact de l'incendie ont été endommagés ou détruits par l'explosion et l'incendie et ont été enlevés.

On estime qu'environ 97 800 m^3 (3 470 000 pieds cubes) de gaz naturel ont été perdus à la suite de la fuite initiale, qui a duré 12 minutes, et de l'incendie subséquent.

Des tronçons de conduite endommagés et intacts ont été enlevés en amont et en aval du lieu de l'événement. On a utilisé 166,44 m (546,1 pieds) de conduite pour réparer la canalisation 100-2. Puisque la canalisation 100-1 passe à peu près au même endroit que la canalisation 100-2, des tronçons des deux canalisations ont été remplacés pour des raisons de sécurité; on a utilisé 185,87 m (609,8 pieds) de conduite pour réparer la canalisation 100-1.

1.4 Conditions météorologiques et état de la rivière La Salle

Le 15 avril 1996, à 19 h, à l'aéroport de Winnipeg, soit à environ 10 km au nord-est du lieu de la rupture, le temps était clair avec des passages nuageux, le plafond était à 5 000 m, la visibilité de 24 km et la température extérieure de deux degrés Celsius; les vents soufflaient du nord-nord-ouest à 12 km/h; la pression barométrique était de 101,15 kPa; le point de rosée se situait à moins trois degrés Celsius et l'humidité était de 30 p. 100.

La rivière La Salle est un cours d'eau régularisé dont la zone de drainage occupe 1 900 kilomètres carrés (km^2); elle se déverse dans la rivière Rouge environ 3 km en aval de l'emprise de la TCPL. Au moment de l'événement, la rivière était en crue. Alors que le débit moyen de la rivière La Salle sur une période d'un an est de 2,42 mètres cubes à la seconde (m^3/s), il est toujours plus élevé au mois d'avril où il se situe à 15,9 m^3/s . Le débit moyen pour les mois de juin à octobre est de moins de 1 m^3/s .

1.5 Particularités du gazoduc

À l'endroit où s'est produit l'accident, la TCPL possède six canalisations disposées en parallèle (voir l'annexe A), à savoir :

Désignation	Diamètre extérieur nominal
Canalisation 100-1	864 mm (diamètre nominal de conduite de 34 pouces)
Canalisation 100-2 (rompue)	864 mm (diamètre nominal de conduite de 34 pouces)
Canalisation 100-3	914 mm (diamètre nominal de conduite de 36 pouces)
Canalisation 100-4	1 067 mm (diamètre nominal de conduite de 42 pouces)
Canalisation 100-5	1 219 mm (diamètre nominal de conduite de 48 pouces)
Canalisation 100-6	1 219 mm (diamètre nominal de conduite de 48 pouces)

Les six canalisations sont enfouies à des profondeurs variant entre 1,5 m et 4,0 m dans du sol noir du Manitoba (constitué principalement de sol tchernozémiq ue et de sol gleysolique). Ces sols sont de la variété des argiles de St. Norbert associés au bassin de la rivière Rouge et présentent un degré de perméabilité variant de bas à modéré.

La paroi du tronçon de la canalisation 100-2 qui s'est rompu dans le passage de la rivière a une épaisseur nominale de 12,7 mm (0,5 pouce). Le tronçon de canalisation a été fabriqué en 1962 par A.O. Smith. Les bourrelets longitudinaux ont été soudés selon le procédé de soudage par étincelage et la limite élastique minimale spécifiée de la canalisation est de 359 mégapascals (MPa) (correspondant à la catégorie 5LX de l'American Petroleum Institute pour les conduites d'acier). Lors de sa construction en 1962, la canalisation 100-2 a été recouverte d'un mastic humide et d'une couche extérieure, comprenant trois couches (une pellicule de résine laminée à chaud à l'extérieur, une couche de renfort intermédiaire constituée d'un tissu traité et saturé, et une seconde pellicule de résine isolante à l'intérieur) enroulées au-dessus du mastic humide pour former un isolant électrique laminaire appliqué à froid et un revêtement à renfort mécanique. Pour empêcher la conduite de flotter vers la surface, on a décidé lors de la conception initiale d'installer neuf lestages en béton de 34 pouces pesant 2 800 kg (6 200 livres) et boulonnés à la conduite. Les lestages étaient séparés les uns des autres par des lattes de bois assujetties en place avec de la broche au moment de la construction. D'après les dossiers de soudage tenus pendant la construction du passage de la rivière, 60 p. 100 des soudures circonférentielles avaient été radiographiées. La présente enquête n'a pas réussi à découvrir quelles soudures du passage de la rivière ont été radiographiées et quelles ne l'ont pas été.

Hors du passage de la rivière La Salle, la paroi de la conduite de la canalisation 100-2, fabriquée en 1962 par la Welland Tube, a une épaisseur nominale de 9,53 mm (0,375 pouce) et une limite élastique minimale spécifiée de 359 MPa (X-52).

En 1962, le tronçon de la canalisation 100-2 qui s'est rompu avait été soumis à des essais hydrostatiques à des pressions variant de 8 095 à 8 301 kPa (de 1 174 à 1 204 lb/po²). L'autorisation de mise en service délivrée à la TCPL le 29 novembre 1962 par l'ONE prévoyait une pression manométrique maximale de service de 5 695 kPa (826 lb/po²), ce qui correspond à 57 p. 100 de la limite élastique minimale spécifiée. Durant 1968 et 1969, la pression manométrique maximale de service de ce tronçon est passée à 6 068 kPa (880 lb/po²), ce qui correspond à 61 p. 100 de la limite élastique minimale spécifiée. Même si ce tronçon de la canalisation 100-2 a été reclassifié, il n'a pas été soumis à d'autres essais puisque les essais hydrostatiques initiaux dépassaient les nouveaux critères de pression manométrique maximale de service approuvés par l'ONE en 1968.

Plusieurs travaux de construction et de réparation ont déjà été effectués au fil des ans sur ce tronçon de la canalisation 100-2 entre la VCP 34 et la VCP 41. Ces travaux ont principalement consisté à installer des dispositifs de drainage, à faire la réfection de routes, à réparer des raccords de robinets de purge qui fuyaient et à réparer du tubage de franchissement de route endommagé. Les travaux les plus rapprochés du lieu de l'accident se sont déroulés à la hauteur de la VCP 39 + 6,916 km et ont consisté à réparer un tubage de franchissement de route endommagé.

La rupture de la canalisation 100-2 n'a pas endommagé les autres canalisations du passage, mais on a quand même remplacé la canalisation 100-1 puisqu'elle traverse la même zone où la pente est instable et mouvante. Quand on a découvert que le tronçon de la canalisation 100-3, voisin de la canalisation 100-2 dans le passage, s'était déplacé, la conduite a été excavée et remise en position neutre pour réduire les contraintes. La surface de la conduite de la canalisation 100-3 n'a pas été endommagée par ces travaux.

Avant l'événement, la dernière patrouille aérienne hebdomadaire de la TCPL au-dessus de cette partie du réseau de canalisations avait été effectuée le 10 avril 1996 et rien d'anormal n'avait été remarqué. Au moment de la patrouille aérienne, la rivière était gelée et le passage était recouvert de glace, ce qui était normal pour cette période de l'année.

Dans le cadre de leurs activités courantes, les employés de la TCPL effectuent des tournées visant à détecter les fuites de gaz naturel du réseau de canalisations en marchant le long de l'emprise avec des détecteurs de gaz portatifs. Selon le code des procédures d'exploitation de la compagnie intitulé *Line Walking Leak Detection Survey* (Tournées de détection des fuites), on doit effectuer une tournée de détection des fuites sur la partie du réseau qui s'étend à l'ouest de

Winnipeg au moins une fois tous les quatre ans. D'après les dossiers de la compagnie, l'inspection effectuée en 1993 n'avait rien relevé d'anormal et le passage de la rivière La Salle n'avait fait l'objet d'aucune interférence de la part d'une tierce partie.

Comme le prévoit un autre code des procédures d'exploitation de la compagnie intitulé *Underwater Survey* (Inspections sous-marines), la TCPL a effectué des inspections sous-marines du passage de la rivière La Salle. Le code des procédures d'exploitation ne précise pas la fréquence des inspections sous-marines, mais quatre de ces inspections avaient été effectuées au passage de la rivière La Salle au cours des dernières années, soit en 1967, en 1976, en 1983 et en 1988. Chaque fois, on avait décidé d'effectuer une inspection parce que la nappe phréatique était exceptionnellement élevée à ce moment-là. Un examen des dossiers de ces inspections a aidé à confirmer qu'aucun problème évident n'avait été relevé à cet endroit. Au cours de l'inspection de 1983, un sondage de la canalisation 100-2 a indiqué que la couverture du sol au-dessus de la conduite avait une épaisseur minimale de 1,3 m.

Dans le cadre de ses activités courantes, la TCPL a établi un programme de contrôle de l'intégrité qui consiste à identifier les tronçons dont la structure s'est affaiblie et qui apporte les correctifs nécessaires pour assurer la protection et la sécurité du réseau. La TCPL dispose de toute une gamme de dispositifs d'inspection internes capables d'identifier les problèmes comme la faiblesse structurale, les charges externes de déformation des conduites et les conduites déplacées et désaxées par des efforts externes. Avant l'événement, la TCPL n'avait jamais effectué d'inspection interne des tronçons des canalisations 100-1, 100-2 et 100-3, les deux premières qui ont éventuellement été remplacées par suite de l'événement au passage de la rivière La Salle.

1.6 *Exploitation du gazoduc*

Le contrôleur en poste au centre de contrôle de la TCPL à Calgary compte sur les données de télémessure (en provenance des stations de compression et de comptage) transmises par le système SCADA pour optimiser les ventes du gaz naturel en provenance de l'ouest canadien. Le réseau de canalisations de la TCPL est subdivisé en plusieurs centres de contrôle régionaux, chaque centre étant sous l'autorité directe d'un COR qui commande à distance une série de stations de compression. Au moment de l'événement, le COR en charge était celui de Winnipeg. Il a reçu des données de télémessure de la station 41 tout au long du déroulement de l'événement alors que le contrôleur de Calgary n'a pas pu recevoir quoi que ce soit en raison d'une panne de transmission.

Au cours des deux semaines précédant la rupture de la canalisation, un expert-conseil à l'emploi de la TCPL avait travaillé sur le système SCADA et effectué des essais et des vérifications sur le nouveau système d'automatisation du groupe A de la station 41. Au cours de ces travaux, il devait faire des changements au programme de la dernière version du système

d'automatisation. Durant toute cette période, l'expert-conseil désactivait le système d'exploitation version existante et activait le système d'exploitation nouvelle version chaque jour qu'il arrivait à la station 41.

Le jour de l'événement, simultanément, le système de télémesure est tombé en panne entre la station 41 et le centre de Calgary quand l'expert-conseil a remis en service la version existante du système d'exploitation à la fin de la journée. En examinant ce qui s'est passé, on a découvert que le problème se situait au niveau de la connexion virtuelle entre le VAX et la borne d'accès du terminal serveur qui prend en charge les communications de télémesure. Toutes les fonctions s'étaient comportées normalement pendant les deux semaines précédentes. Précédemment, chaque fois que l'expert-conseil avait désactivé et activé le système d'automatisation existant du groupe A pour travailler sur le nouveau système d'automatisation, aucune anomalie ne s'était manifestée. Cependant, l'expert-conseil n'a pas vérifié si le signal de communication des télémesures avec le centre de Calgary fonctionnait avant de quitter la station le jour de l'événement.

À 22 h 30, après avoir effectué un certain nombre de réarmements du programme des bornes d'accès du système de télémesure de la station 41, on a réussi à rétablir la liaison de télémesure entre la station 41 et le centre de Calgary, quatre heures après les premières indications de la panne.

1.7 Isolation des installations de la canalisation principale

En vertu de l'article 04-07 intitulé *Winnipeg Region - Regional Control Centre* (Centre de contrôle régional de Winnipeg) du manuel des procédures d'urgence de la compagnie et après avoir vérifié qu'une conduite de transport s'est bien rompue ou qu'une situation d'urgence menace la sécurité du réseau de canalisations, le COR doit immédiatement isoler toutes les canalisations entre les stations de compression, de chaque côté du lieu de l'événement. Lors de l'événement dont il est question, et en dérogation des consignes d'isolation de la compagnie, ce ne sont pas tous les tronçons du réseau qui ont été isolés entre les stations 34 et 41.

La TCPL a pris la décision de déroger à l'article 04-07 de son manuel des procédures d'urgence après consultation entre le contrôleur de Calgary, le COR et le gestionnaire adjoint du centre de Calgary. On a jugé plus prudent d'isoler les canalisations 100-1 et 100-2 puisque la station de comptage des ventes de St. Norbert est raccordée à ces deux canalisations et que l'une ou l'autre pouvait avoir été touchée lors de la rupture. Il a donc été décidé d'isoler les canalisations 100-1 et 100-2 seulement entre les stations 34 et 41 pour les raisons suivantes :

1. On avait signalé une explosion à St. Norbert, mais il n'avait pas été question d'incendie au début.

2. Les relevés de vitesse de variation de pression pris à la station 41 indiquaient que c'était une conduite de diamètre relativement petit qui s'était rompue, ce qui a contribué à convaincre la TCPL que c'était bien leur canalisation d'alimentation de la station de comptage des ventes de St. Norbert qui était en cause.
3. Les variations de débit et de pression de gaz naturel à la station 34 étaient très faibles.
4. L'emplacement de la rupture était très inhabituel. La pression d'exploitation était relativement faible dans ce tronçon du réseau, soit près de 5 000 kPa (725 lb/po²) habituellement.
5. Le parachèvement de la canalisation 100-6 (entre les stations 34 et 41) a permis d'isoler les canalisations une à une.

C'est pour ces raisons qu'à 18 h 45, le contrôleur de Calgary a ordonné au COR d'isoler les canalisations 100-1 et 100-2 seulement, entre les stations 34 et 41.

1.8 Protection cathodique de la canalisation 100-2

La protection cathodique (PC) de la canalisation 100-2 entre la VCP 39 + 0,00 km et la VCP 39 + 7,99 km est assurée par un dispositif à courant imposé à distance à prise de terre. Dans le secteur, le système de distribution de PC est raccordé à la conduite au niveau de la VCP 39 + 8,55 km et de la VCP 39 + 3,81 km. Il n'y a pas d'anodes de magnésium dans les environs immédiats du réseau de canalisations. Le tronçon de la canalisation 100-2 entre la VCP 39 + 0,00 km et la VCP 39 + 7,99 km a été construit en 1962 et l'installation de la première prise de terre pour la PC a été terminée en 1965. Les dossiers comportent les renseignements suivants sur l'installation des prises de terre de PC :

Installation des prises de terre	VCP 39 + 8,55 km	VCP 39 + 3,81 km
Installation initiale	1965	1974
Remplacement	1973, 1990, 1993	1991
Durée d'indisponibilité (1980-1993)	11 mois	11 mois
Raisons de l'indisponibilité	<ul style="list-style-type: none"> - travaux de construction - problèmes électriques - dommages exigeant des réparations - fermeture du réseau pour inspections de dépolarisation 	<ul style="list-style-type: none"> - appauvrissement des prises de terre - travaux de construction - fermeture du réseau pour inspections de dépolarisation

En vertu des codes de procédures d'exploitation de la TCPL intitulés *Annual Pipe-to-Soil Surveys* (Vérifications annuelles des conduites et du sol) et *Close Pipe-to-Soil Survey* (Vérifications du système cathodique par points fixes rapprochés) (habituellement effectuées tous les deux ans), le personnel itinérant de la TCPL effectue des vérifications de conduites et de sol pour déterminer l'efficacité du système de PC, et pour s'assurer que la norme minimale existante de l'industrie est respectée, à savoir 850 millivolts (mV) de potentiel cathodique hors tension et 900 mV de potentiel cathodique sous tension. Sur la canalisation 100-2, des vérifications du système cathodique par points fixes rapprochés ont été effectuées en 1980, 1984, 1986, 1988 et 1992 au passage de la rivière La Salle. Les vérifications ont révélé que les potentiels de PC sur le lieu de la rupture dépassaient la norme minimale de l'industrie. Une vérification des conduites et du sol effectuée en 1983 en même temps qu'une inspection sous-marine du passage de la rivière La Salle a révélé que le potentiel de PC sur la canalisation 100-2 excédait la norme minimale de l'industrie.

1.9 *Espacement entre les canalisations principales au passage de la rivière La Salle*

Les dossiers de la TCPL indiquent que, sur le lieu de la rupture, l'emprise du réseau de canalisations de la TCPL mesure 67,244 m (220,62 pieds) et que les six canalisations installées à cet endroit sont en parallèle (voir l'annexe A). À l'intérieur de l'emprise de la TCPL, la canalisation 100-1 se trouve à 7,6 m (24,93 pieds) de la limite nord de l'emprise. L'espacement est de 9,1 m (29,85 pieds) entre les canalisations 100-1; 100-2, 100-3 et 100-4, de 10,0 m (32,81 pieds) entre les canalisations 100-4 et 100-5 et de 12,0 m (39,37 pieds) entre les canalisations 100-5 et 100-6. Entre la canalisation 100-6 et la limite sud de l'emprise, il y a 9,8 m (32,15 pieds). Il y a un câble téléphonique souterrain à la limite nord de l'emprise de la TCPL.

1.10 Programme d'inspection géotechnique

Puisque les crues sont fréquentes et que les sols sont plutôt instables dans cette région de St. Norbert, la TCPL a demandé à un expert-conseil de faire un examen géotechnique détaillé au passage de la rivière La Salle qui comprendrait les éléments suivants :

1. reconnaissance des sols au niveau du passage;
2. examen historique des photographies aériennes, en remontant jusqu'avant l'installation de la canalisation 100-1 en 1959;
3. analyse du sous-sol par l'entremise de sondages et de forages;
4. installation et contrôle d'instruments de surveillance temporaire des pentes;
5. évaluation des conditions de stabilité des pentes;
6. inspection judiciaire détaillée des substratums du sol (durant l'installation et l'enlèvement des sections de conduites de remplacement);
7. installation d'instruments de surveillance permanente des pentes (après la fin des travaux de construction du passage);
8. analyse détaillée des contraintes subies par les canalisations sous l'effet de divers mécanismes de mise en charge potentiels associés aux conditions géologiques présentes dans les pentes en cause.

Les résultats de l'examen géotechnique indiquent que les canalisations 100-1 et 100-2 sont construites dans une zone d'instabilité de pente pré-existante sur la rive est du passage de la rivière La Salle. Un profil de construction du passage, antérieur à 1959, montre des caractéristiques classiques d'instabilité de pente, comme un pied de talus proéminent, un affaissement dans la pente ascendante et une surface de pente concave. Par la configuration de la surface près du lieu de l'événement, on pouvait voir que des mouvements de sol s'étaient produits à cet endroit, y compris des fissurations sous tension incurvées et le déplacement vertical de la surface du sol dans la pente ascendante à l'endroit où la rupture s'est produite.

L'examen géotechnique a aussi révélé que, sur le lieu de l'événement, la base est constituée d'argile stratifiée fortement plastique, compressible, gonflante et à faible sensibilité, déposée par le lac glaciaire Agassiz, qui couvrait cette région dans les temps anciens. Le niveau d'eau de la rivière monte et descend rapidement chaque printemps dans la région où se trouve le passage des canalisations, ce qui produit des abaissements rapides (temporaires) à cet endroit. Cet état de chose est aggravé par des augmentations saisonnières coïncidentes des pressions

piézométriques dans un aquifère en profondeur sous le lieu de l'événement. Il s'est produit d'autres situations similaires dans la région de Winnipeg qui ont entraîné des déplacements de pentes très documentés. Les instruments de surveillance de la pente installés vers la fin du printemps 1996, après un abaissement rapide du niveau d'eau au passage, ont détecté des mouvements de pente à peine perceptibles. Une comparaison entre les résultats de la surveillance de 1996 et le profil d'avant-construction de 1959 pour le passage indique une correspondance entre les deux, ce qui est indicatif d'un mouvement de pente.

Des activités de construction antérieures ont mis en évidence l'instabilité de la rive est du passage de la rivière La Salle à cet endroit. Pendant l'installation de la canalisation 100-4, un important effondrement s'est produit quand la paroi de la tranchée de la canalisation 100-4 s'est effondrée, exposant la canalisation 100-3. Pendant l'installation de la canalisation 100-5 en 1991, du sol de déblai était amoncelé temporairement sur la pente au-dessus de la canalisation 100-2 quand un mouvement de sol a été observé sous le déblai, à proximité de la canalisation 100-2. Rien n'indique qu'il y a eu des excavations de suivi, des vérifications ou des inspections de la surface des conduites sur les canalisations adjacentes par le personnel de la TCPL. De telles inspections auraient peut-être pu identifier les risques possibles pour la sécurité en matière de mouvements de sol à cet endroit.

Avant de commencer les travaux de construction pour réparer le passage de la canalisation 100-2, chaque canalisation a été localisée et balisée avec des piquets. On s'est aperçu, d'après l'alignement des piquets d'arpentage au-dessus de la canalisation 100-3, que cette dernière s'était vraisemblablement déplacée depuis sa construction. Près de la rive, la canalisation 100-3 s'était déplacée en aval, dans la direction sud-sud-ouest, vers la canalisation 100-4. On a excavé la canalisation 100-3 des deux côtés du passage de la rivière. Quand on l'a excavée, on a découvert, du côté est du passage, que la conduite s'était redressée de 0,3 m en direction nord. D'après la géométrie du fléchissement de la conduite et la direction du redressement de la conduite, il semble que la conduite a été assujettie à un mouvement latéral vers le sud et à un affaissement antérieur de la rive est. Il n'y avait pas de redressement notable de la conduite du côté ouest du passage.

L'examen géotechnique a déterminé que la rive est du passage connaît des mouvements de pente épisodiques le long d'une zone d'instabilité de surface pré-existante depuis l'installation de la canalisation 100-2. Ces épisodes de mouvements de pente ont entraîné un accroissement monotone des charges sur les conduites de la canalisation 100-2 qui, de façon prévisible, aurait donné lieu à des contraintes de flexion sur la conduite au point de la rupture. On n'a trouvé aucun signe d'instabilité de pente sur la rive ouest du passage de la rivière La Salle.

Pour évaluer l'importance relative des contraintes associées aux conditions géologiques qui peuvent avoir contribué à la rupture de la conduite, on a examiné les mécanismes de mise en charge potentiels suivants :

1. mise en charge cyclique provoquée par la flottabilité par suite des fluctuations saisonnières du niveau de la rivière;
2. expansion et contraction du sol, entraînant la mise en charge cyclique saisonnière de la conduite;
3. mise en charge longitudinale de la conduite par suite de l'interaction sol-conduite associée aux frictions attribuables au mouvement du sol parallèlement à l'axe de la conduite;
4. mise en charge transversale causée par un plan de cisaillement qui croise la canalisation.

L'analyse des contraintes a révélé que le fait de lester la conduite se traduisait par une flottabilité négative même durant les crues, et que cela ne constituait pas un mécanisme de mise en charge externe très important. Elle a aussi permis de déterminer que les contraintes engendrées dans la conduite par l'expansion du sol limono-argileux autour de la conduite semblent négligeables. On a aussi effectué des analyses des contraintes longitudinales pour déterminer les effets des mises en charge longitudinales causées par les mouvements de sol parallèles à l'axe de la conduite et les résultats semblent indiquer que la conduite n'est pas susceptible aux ruptures par gauchissement par suite d'une mise en charge potentielle par le sol. Les mises en charge transversales effectuées pour déterminer si le déplacement de cisaillement en croisé du sol, associé à l'instabilité de la pente, pouvait faire fléchir la conduite ont permis de découvrir que des mouvements de pente de 150 mm à 350 mm suffisaient pour le faire. L'évaluation géotechnique de la pente est de la rivière La Salle indique que des mouvements de pente de 150 mm à 350 mm ont bien pu se produire aux environs du lieu de l'événement, compte tenu de la caractéristique de terrain en forme d'arc qui a été identifiée à proximité des canalisations 100-1 et 100-2, des anciennes techniques de construction et des données de surveillance des mouvements de la pente. Cependant, on n'a pas réussi à déterminer de combien la pente s'est déplacée, ni quand le mouvement s'est produit.

1.11 Inspection photogrammétrique et documentation géographique de la zone incendiée

Tout ce qui se trouvait dans les environs immédiats du lieu de l'événement a été incendié, endommagé ou détruit à la suite de l'explosion de la canalisation 100-2 et de l'incendie subséquent. Des levés photogrammétriques aériens et terrestres ont permis de recueillir des données géographiques sur la zone incendiée. On s'est servi de photographies aériennes infrarouges couleur et de photographies couleur aériennes et terrestres pour déterminer l'étendue et l'importance des dommages. On a effectué une inspection sur le terrain pour enregistrer les renseignements recueillis. En outre, un dossier photogrammétrique a été établi sur la résidence endommagée par l'incendie.

Ces travaux ont révélé qu'il y avait une zone incendiée définie autour du lieu de la rupture, des deux côtés du passage de la rivière La Salle. La zone incendiée la plus importante se trouvait sous le vent par rapport à la rupture; la résidence incendiée se trouvait dans cette zone. À l'intérieur de la grande zone incendiée boisée (les deux rives de la rivière étaient boisées à la hauteur du passage), on pouvait distinguer trois plus petites zones distinctes : une zone où les arbres n'étaient brûlés que du côté de la rupture, une zone où les arbres étaient brûlés du côté de la résidence et une zone où les arbres étaient brûlés tout autour. La zone où les arbres sont brûlés tout autour se trouvait la plus près de la résidence endommagée par l'incendie. Dans son ensemble, la zone incendiée ou touchée par la chaleur autour du réseau de canalisations mesurait environ 160 m (525 pieds) de rayon (voir l'annexe B). Les photographies infrarouges ont confirmé l'étendue des dommages causés par l'incendie en illustrant la zone incendiée et le niveau de stress subi par la végétation sur le lieu de l'accident.

En étudiant le dossier photogrammétrique de la résidence incendiée, on constate que l'incendie a pris naissance sur la surface extérieure du toit et qu'il s'est ensuite propagé à la structure intérieure du toit. La partie inférieure des fermes du toit a subsisté. Les plafonds de toutes les pièces de l'étage ont brûlé alors que les murs porteurs et les planchers des pièces de l'étage de même que toutes les pièces du rez-de-chaussée étaient encore en place. Toutes les parties de la résidence ont été lourdement endommagées par l'eau, probablement en raison des efforts des pompiers de même que de la pluie et de la neige qui sont tombées plus tard. Rien n'indique que la résidence ait été endommagée par l'explosion initiale de la canalisation. Si la source d'allumage du gaz naturel avait été à l'intérieur de la maison, toutes les portes et fenêtres auraient été soufflées vers l'extérieur mais, dans ce cas-ci, les fenêtres et les portes étaient intactes. L'enquête n'a découvert aucune source d'allumage externe, comme une veilleuse ou un contact électrique, à l'intérieur ou autour de la résidence.

1.12 *Essais métallurgiques*

La composition chimique et les propriétés mécaniques des tronçons de conduite prélevés sur la canalisation 100-2 à une certaine distance du tronçon directement touché étaient conformes aux spécifications de la conduite au moment de l'achat.

L'analyse métallurgique de la section endommagée a permis de déterminer que la canalisation 100-2 s'est rompue parce qu'une fissure circumférentielle s'est amorcée dans le bord du joint de soudure circulaire à partir de la surface externe. Le mécanisme de fissuration est un procédé à long terme à plusieurs étapes assisté par l'environnement et désigné sous l'appellation technique de «fissuration éco-assistée». La section où la rupture s'est produite présentait des similarités avec les caractéristiques habituellement associées à la fissuration par corrosion sous tension, mais une analyse plus poussée a révélé des différences significatives.

Deux fragments de conduite de la canalisation 100-2 ont été projetés à distance par l'explosion après la rupture initiale. Le métal était tout déformé et l'intérieur de la conduite avait été tourné vers l'extérieur sous la force de l'explosion. Le premier fragment comportait une section de bourrelet longitudinal de 1,175 m (3,86 pieds) de longueur. Un examen préliminaire de la surface de la première rupture a permis de découvrir que la rupture avait pris naissance dans ce fragment. La rupture s'est propagée sur une certaine distance le long d'un joint de soudure circonférentielle avant de changer de direction.

Le deuxième fragment, beaucoup plus gros, a été localisé par des plongeurs au fond de la rivière juste au-dessus de la canalisation 100-4 enfouie. Il s'agissait d'un morceau de conduite de 5,150 m (16,89 pieds) de longueur. La deuxième rupture recoupait le bourrelet transversal trois fois, ce qui, sur le plan de la configuration et de l'orientation, correspondait à un parcours de propagation hélicoïdal. Ajoutés l'un à l'autre, les deux fragments avaient sensiblement la même longueur que l'écart entre les deux points de rupture de la canalisation 100-2, ce qui permet de croire que tous les fragments de conduite ont été retrouvés. La surface de rupture correspondant à la rupture initiale ne se trouvait pas sur le gros fragment. C'est en enlevant les extrémités amont et aval des tronçons intacts de la canalisation 100-2 que l'on a trouvé la surface de rupture correspondant à la rupture initiale sur l'extrémité amont de la conduite.

Les quatre fragments de la canalisation 100-2 ont été lavés à l'eau pour enlever la boue et l'argile et le revêtement de protection extérieur d'origine a été examiné. Le revêtement s'était détaché et s'écaillait facilement. La déformation du métal a vraisemblablement contribué au détachement du revêtement. Ce qui restait du revêtement extérieur a ensuite été enlevé par projection de coques de noix écrasées. Un examen visuel de la surface de la conduite a révélé la présence de colonies de piqûres de corrosion isolées. La conduite a ensuite été préparée afin de procéder à un examen magnétoscopique de la surface à la recherche de colonies de fissures, notamment des colonies de fissures par corrosion sous tension. Même si l'examen magnétoscopique n'a révélé la présence d'aucune colonie de fissures par corrosion sous tension, il a permis de trouver quelques fissures longitudinales isolées. Des éprouvettes comportant des fissures longitudinales représentatives ont été enlevées, découpées et polies. Il semble qu'il ne s'agissait cependant que de pailles de surface datant de l'étape de fabrication initiale de la conduite.

Un examen méticuleux de la surface de rupture a révélé que la rupture finale a été précédée d'une pré-fissure qui s'est amorcée près de la position deux heures et s'est propagée le long de la soudure circonférentielle. La pré-fissure a atteint 450 mm de longueur et pénétré la paroi de 12,7 mm d'épaisseur sur une profondeur de 5,8 mm. La fissure s'est propagée du côté aval de la soudure circonférentielle, encerclant la conduite. Quand elle a atteint la taille critique et est devenue instable, son parcours s'est altéré et elle a commencé à se propager en spirale vers l'aval. On croit que le passage à la propagation en spirale est favorisé par des efforts dynamiques réactionnels, compatibles avec une fuite de produit en pleine aggravation avant la rupture finale.

La fissure initiale a formé un front unique, sur un seul plan, sauf sur une distance de 70 mm où elle était décalée de 3 mm en aval. Il y avait une deuxième fissure à la suite du front de fissure initial. En amont, juste à côté du joint circulaire, la conduite portait des traces de piqûres de corrosion. Dans le prolongement de surcharge de la pré-fissure, quelques traits de rupture s'étaient propagés suivant le profil de la soudure.

Un examen détaillé de la surface de rupture à proximité de la position deux heures a exposé trois grands stades de l'évolution des fissures. À commencer par la surface extérieure de la conduite, on a découvert un premier stade, le stade de la corrosion ou de l'oxydation, qui comprenait plusieurs bandes de corrosion distinctes, indicatives de différentes périodes de fissuration. Les fissures de corrosion ou d'oxydation du premier stade ont atteint la profondeur maximale de 5,8 mm et ce, probablement après plusieurs années. À ce stade de leur évolution, les fissures ressemblent à de la fissuration par corrosion sous tension en milieu à pH faible.

Deux autres grands stades de l'évolution des fissures se sont ensuite succédé; ils se caractérisent nettement par l'absence d'écailles. Lors du deuxième stade de propagation, le front de fissuration a progressé jusqu'à une profondeur de 8,5 mm. Les deux derniers stades étaient séparés par une légère décoloration de la corrosion et les fissures du deuxième stade avaient une texture plus fine que celles du dernier stade, qui ont transpercé la paroi. Un examen au microscope électronique à balayage des deux derniers stades d'évolution des fissures a révélé une topographie de rupture mixte, le deuxième stade étant constitué de plans de clivage et de dépressions et le troisième stade étant dominé par les dépressions. L'absence relative de produits de corrosion au niveau des deux derniers stades de l'évolution des fissures indique que ces derniers étaient récents, et que le troisième a suivi le deuxième de près.

Puisqu'une écaille de corrosion oblitérait l'image fractographique des fissures de premier stade, on a sectionné et ouvert l'une des fissures secondaires pour en identifier le mécanisme de fissuration. Un examen métallographique de la tête d'une fissure secondaire a permis d'établir que l'on était en présence d'un mécanisme de propagation transgranulaire. La microstructure de la tête de la fissure secondaire était formée de ferrite ou de perlite en couches zonales, bien que la fissure principale se soit amorcée dans la zone touchée par la chaleur. Quand on a examiné la fissure secondaire au microscope électronique à balayage (et à l'oeil), on pouvait voir distinctement les deux stades de l'évolution de la fissuration et constater la présence de corrosion ou l'oxydation jusqu'à la tête de la fissure. La couche de corrosion était si mince aux abords immédiats de la tête de la fissure qu'il était encore possible de reconnaître les plans de clivage et de quasi clivage à cet endroit.

Une situation similaire s'est présentée quand on a examiné la fissure du joint, à l'endroit où la fissure principale était momentanément décalée sur un autre plan. Une ramification de la tête de fissure, supposée de type transgranulaire, de même qu'une surface corrodée de la fissure ont été examinées. On a pu observer jusqu'à neuf stades de propagation distincts sur la surface de la fissure du joint.

Pour mieux déterminer le type de mécanisme de fissuration en présence, on a analysé aux rayons X à dispersion d'énergie les résidus trouvés sur les surfaces de rupture et sur la surface des fissures. Ces analyses ont révélé la présence de résidus de magnésium, d'aluminium, de silicone, de potassium et de calcium, en plus des éléments que l'on retrouve habituellement dans l'acier au carbone. On doit probablement la présence de ces éléments à des mélanges d'oxydes. On a aussi analysé des dépôts de produits de corrosion trouvés à l'intérieur d'une fissure fermée et on y a trouvé une combinaison semblable d'éléments. Cependant, les balayages à dispersion d'énergie ont révélé la présence de crêtes de carbone et d'oxygène, ce qui semble indiquer la présence d'un mélange d'oxydes et de carbonates.

Puisque la fissure a pris naissance au bord de la soudure circonférentielle, une section transversale de conduite a été découpée le long de la soudure pour vérifier l'intégrité de cette dernière. L'examen a révélé qu'il s'agissait d'une soudure multipasse, avec quelques incidences de décalage, porosité interpasse occasionnelle et inclusion de scories. On a trouvé une petite fissure dans la passe de fond de la soudure d'une des sections et une petite encoche de pénétration sur le bord de la couche de rechargement. Dans l'ensemble, la soudure circonférentielle comportait quelques discontinuités, mais aucune d'entre elles n'était assez grave pour faire en sorte que le joint cesse d'être conforme aux exigences.

Des essais de dureté ont été effectués sur le travers de la soudure pour voir si elle n'avait pas été fragilisée. L'indice de dureté était un peu plus élevé près de la surface extérieure de la conduite qu'à proximité de la surface intérieure. On a pu remarquer une augmentation plus importante de l'indice de dureté dans la zone touchée par la chaleur près de la surface extérieure. Cependant, un certain écart dans les indices de dureté est considéré comme normal. On n'a découvert aucune trace de points durs ni de zones qui auraient pu rendre le joint de soudure susceptible aux fissures. Une analyse spectrographique du métal des deux plaques a établi qu'il était conforme aux limites de composition chimique prévues par les spécifications applicables en vigueur au moment de la fabrication de la conduite. La microstructure du métal de base était formée de perlite ou de ferrite en bandes zonales, ce qui est typique des aciers au carbone des conduites en charge. Des inclusions (parfois appelées inclusions «linéaires») étaient présentes en concentrations normales dans l'acier de la conduite. Les propriétés mécaniques du métal des deux bords du joint de soudure satisfaisaient aux valeurs prescrites.

Un expert-conseil a évalué la ténacité du joint de soudure. Des calculs et des essais complexes ont indiqué que même un défaut de 450 mm de longueur et de 5,8 mm de profondeur était encore sous-critique pour des variations normales de la pression d'exploitation. Le fait que la fissure se soit amorcée dans le bord de la soudure circonférentielle plutôt que sur le bourrelet longitudinal de la soudure est lié à la source de la contrainte responsable de la fissuration. Même en tenant compte de la concentration de contraintes occasionnée par le désalignement et les encoches de pénétration, on peut conclure qu'il a fallu qu'un effort extérieur important s'exerce sur la conduite pour que la fissure traverse la paroi. L'analyse détaillée a indiqué que la pression

d'exploitation ne produisait qu'environ 13 p. 100 des contraintes totales associées à la rupture et que la principale force de mise en charge ayant entraîné la rupture provenait du fléchissement de la conduite sous l'action d'efforts extérieurs, probablement des mouvements de terrain.

1.13 *Étude sur place des conditions environnementales associées à la rupture*

Même si l'environnement du lieu de l'événement a été modifié par l'explosion et l'incendie de la canalisation 100-2, une étude sur place détaillée des tronçons de conduite intacts voisins du lieu de l'événement a quand même pu mettre en évidence la gravité des conditions environnementales présentes. La TCPL a confié à un expert-conseil le soin de procéder aux analyses suivantes :

1. analyse chimique du béton des lestages;
2. examen de l'état de la conduite et du sol (pendant l'excavation des passages des canalisations 100-1, 100-2 et 100-3) et analyse des échantillons de sol;
3. analyse d'échantillons d'eau de sol prélevés sous le revêtement extérieur qui s'est détaché des canalisations 100-2 et 100-3;
4. évaluation de l'état de la PC sur la canalisation 100-2 avant l'événement;
5. examen non destructif sur place des soudures circonférentielles sur les canalisations 100-2 et 100-3;
6. analyse chimique approfondie et examen fractographique du tronçon de conduite qui s'est rompu;
7. évaluation de la mécanique de la rupture sur la soudure qui s'est rompue.

L'installation d'un lestage de béton sur la soudure circonférentielle qui s'est subséquemment rompue avait été prévue par les plans d'exécution initiaux. Lors de la rupture et de l'explosion de la canalisation 100-2, le lestage de béton s'est brisé en morceaux et a été éparpillé aux alentours. L'excavation de la canalisation 100-2 a révélé que la plupart des lestages du passage ne se trouvaient plus à l'endroit prévu (selon les plans de la compagnie). Ils étaient inégalement espacés. Il est possible que la rupture et l'explosion aient déplacé les lestages de béton, mais rien sur le terrain ne vient appuyer cette hypothèse. Puisque le revêtement extérieur en asphalte voisin de la soudure qui s'est rompue a été arraché lors de la rupture, il est impossible de retracer la position exacte du lestage de béton détruit. Après avoir excavé la canalisation 100-2, on a déterminé que la soudure qui s'est rompue se trouvait juste à l'extérieur, ou juste à l'intérieur, de la section de conduite couverte par le lestage de béton. Pour démontrer l'action

du lestage de béton sur l'alcalinité de l'eau, un morceau du lestage de béton détruit a été placé dans de l'eau distillée. Moins de quatre jours après l'immersion, le pH de l'eau s'est élevé aux alentours de 11.

L'excavation a révélé que la canalisation s'était décalée vers le sud. Puisque les dossiers de construction et les dessins indiquent que la canalisation 100-2 avait été posée en ligne droite dans la tranchée, il semble que le décalage remarqué sur la canalisation 100-2 ait été le résultat d'un mouvement de terrain du fait de l'instabilité du sol de la pente. En amont et en aval de la rupture, le matériau de remblayage de la tranchée contenait beaucoup de sol organique limoneux, ce qui entraîne des niveaux de dioxyde de carbone très élevés et éventuellement une augmentation des niveaux d'ions bicarbonates autour de la canalisation.

Le premier lestage de béton intact en amont de la rupture a été examiné. Après avoir enlevé la moitié supérieure du lestage, on a découvert que le revêtement d'asphalte recouvrant le bourrelet de la soudure était très mince sous le lestage, et que la conduite était à découvert à certains endroits. On a trouvé que l'humidité qui imprégnait la surface de la conduite avait un pH de 11. À la deuxième soudure, un peu plus en amont, le lestage de béton se trouvait à 0,3 m de la soudure circonférentielle et l'humidité qui imprégnait la surface de la conduite à cet endroit avait un pH de 8,8. Dans l'ensemble, la surface des tronçons de conduite se trouvant à moins d'un joint de soudure en aval de la rupture et à moins de trois joints de soudure en amont se trouvait dans le même état, sans corrosion généralisée ni piqûres de corrosion importantes. Cependant, il y avait des piqûres de corrosion plus en amont sur la conduite. Après avoir enlevé le revêtement extérieur de la canalisation 100-2 (qui en général n'adhérait pas très bien à la surface de la conduite), on a découvert un produit de corrosion crémeux constitué principalement de carbonate de fer (FeCO_3) et d'une quantité infime d'hématite (Fe_2O_3). Pour résumer, il y avait très peu de corrosion sur les joints de la conduite qui étaient enfouis dans le lit de la rivière, mais il y avait des piqûres de corrosion à certains endroits sur les joints qui se trouvaient un peu plus en amont. Cette différence provient vraisemblablement du fait que les niveaux de PC accordés à la conduite en surface étaient différents.

La couverture de PC du passage de la rivière La Salle a été évaluée. Une représentation de la consommation mensuelle moyenne en électricité pour les deux prises de terre installées à la hauteur des VCP 39 + 3,81 km et 39 + 8,55 km a permis de découvrir que la consommation en électricité de la prise de terre en aval avait augmenté de plus de 100 p. 100 depuis 1989. Entre 1990 et 1996, il y a eu trois pannes de courant au niveau des prises de terre en amont et une panne au niveau de la prise de terre en aval. En ce qui concerne une conduite recouverte d'asphalte, la quantité de PC qui arrive à un endroit particulier de la conduite dépendra en grande partie de l'état du revêtement extérieur à cet endroit. Pour examiner la question de l'effet d'écran produit par un lestage en béton boulonné sur une conduite, on a fait des mesures sur place au moment de l'excavation. Une série de lectures, prises à différents endroits à

l'intérieur de l'espace vide entre le béton et la conduite, a confirmé que le courant de PC pénétrait l'espace vide entre la conduite revêtue et le lestage de béton, le niveau de PC diminuant vers le centre du lestage.

On a aussi fait une évaluation de l'humidité imprégnant la conduite sous du revêtement qui s'était détaché de tronçons de conduite excavés du passage. En règle générale, les endroits non recouverts de béton avaient un pH se situant entre 7 et 9, tandis que les endroits recouverts avaient un pH entre 10 et 11. L'action du béton sur la composition chimique de l'eau entre la conduite et le lestage de béton fait en sorte que les produits de la corrosion ont une teneur élevée en ions chlorures (Cl⁻), en ions sodium (Na⁺) et en magnésium (Mg). Ils ont aussi une teneur élevée en ions bicarbonates. Les niveaux de bicarbonate et de pH sont plus représentatifs d'une solution à fissuration par corrosion sous tension en milieu à pH élevé que d'une solution à fissuration par corrosion sous tension en milieu à pH quasi neutre. Cependant, les concentrations d'ions carbonates n'étaient pas aussi élevées que celles des solutions à fissuration par corrosion sous tension à pH élevé. On a fait des relevés semblables sur la canalisation 100-3 et on a découvert que les niveaux d'acide carbonique et d'ions bicarbonates étaient beaucoup moins élevés sur les échantillons prélevés que sur ceux de la canalisation 100-2.

Les soudures circonférentielles et les parois de toutes les autres conduites des canalisations 100-1, 100-2 et 100-3 du passage de la rivière La Salle ont été examinées sur place et, à l'exception de la soudure qui s'est rompue, aucune autre fissure n'a été découverte. Il n'y avait pas de colonies de fissures à proximité de la soudure rompue ni près d'aucune autre soudure circonférentielle. Le fait que la fissure se soit amorcée au bord de la soudure circonférentielle plutôt que sur le bourrelet longitudinal de la soudure est certainement dû à la source de contrainte responsable. La pression d'exploitation du réseau ne produisait que 13 p. 100 des contraintes totales associées à la soudure rompue. La principale force de mise en charge provenait donc du fléchissement de la conduite, le résultat d'efforts externes et, plus particulièrement, de mouvements de terrain.

Une évaluation de la mécanique de la rupture a été effectuée. On a déterminé qu'une fissure de la taille de la fissure en question devient instable à une valeur critique d'intensité de contrainte égale à 93 p. 100 de la limite d'élasticité réelle de la conduite et qu'il fallait générer des contraintes axiales de valeur critique pour faire fléchir la conduite. L'évaluation a démontré qu'un mouvement de terrain pouvait générer un tel fléchissement de la conduite et qu'il n'était pas nécessaire que le déplacement soit très important. Ces travaux ont donc permis de déterminer que le déplacement de la canalisation 100-2 constaté au cours de l'excavation était suffisant pour générer des contraintes externes suffisamment importantes pour déformer la conduite et que l'encoche de pénétration découverte au bord de la soudure durant l'analyse métallurgique était à l'origine d'une importante concentration de contraintes.

1.14 Degré de préparation aux situations d'urgence

En vertu du paragraphe 48(1) et de l'article 49 du *Règlement sur les pipelines terrestres* (DORS/89-303) de l'ONE, les compagnies de pipelines sous réglementation fédérale doivent établir des plans d'action en cas d'urgence relatifs aux réseaux. Conformément aux alinéas 10.2.2 et 10.3.3, tous deux intitulés *Sinistres*, de la norme CAN/CSA Z662-96 de l'Association canadienne de normalisation intitulée *Réseaux de canalisations de pétrole et de gaz* (norme Z662), les compagnies de pipelines doivent établir la marche à suivre en cas d'urgence, laquelle doit comprendre des méthodes de mise hors service sans danger du réseau de canalisations en cas de rupture ou d'autres cas d'urgence relatifs au réseau, élaborer des mesures de sécurité à respecter par le personnel sur les lieux des accidents, et tenir des dossiers pour faciliter l'établissement des mesures d'urgence. En vertu du paragraphe 49(2) du *Règlement sur les pipelines terrestres*, les compagnies de pipelines doivent mettre à jour régulièrement les renseignements du manuel des procédures d'urgence concernant les plans pour obtenir la collaboration des organismes publics compétents et le plan d'évacuation dans les situations d'urgence. Pour aider les compagnies de pipelines à établir et à mettre à jour leurs plans d'action en cas d'urgence, l'Association canadienne de normalisation a préparé et publié la norme CAN/CSA Z731-95 intitulée *Planification des mesures d'urgence pour l'industrie* (norme Z731), bien que ni le *Règlement sur les pipelines terrestres* ni la norme Z662 ne la cite à titre d'exigence pour l'industrie des pipelines au Canada.

Dans le cadre de son programme de sensibilisation du public, la TCPL a posé, à tous les passages et à d'autres endroits, des panneaux avertissant le public des dangers possibles que représente l'acheminement du gaz naturel dans un réseau de canalisations. On y trouve aussi des renseignements importants sur les mesures à prendre en cas d'urgence. Les gens qui habitent à proximité du réseau de la TCPL reçoivent régulièrement de la compagnie des renseignements sur les dangers associés aux canalisations et se font régulièrement rendre visite par les agents des emprises de la TCPL dans le cadre du programme. La TCPL est un membre actif du plan d'urgence en cas de catastrophe de la ville de Winnipeg. Des renseignements pertinents sur le réseau de la TCPL ont été entrés dans la base de données du plan d'urgence et sont facilement disponibles aux premiers intervenants (service de police ou des incendies) en cas d'urgence.

Au cours de l'événement, c'est un résidant des environs qui a avisé le centre de secours de Winnipeg (911) à 18 h 17 qu'un accident venait de se produire au passage. Avisé à 18 h 18, le service des incendies de Winnipeg a déclenché une intervention d'urgence de niveau 2, ce qui a entraîné le déploiement de 13 unités du service des incendies, d'une ambulance et d'un grand nombre d'agents de police de la ville de Winnipeg et de la GRC pendant toute la durée de l'événement. La TCPL n'a pas été avisée qu'une intervention d'urgence de niveau 2 avait été déclenchée. Ce n'est qu'à 18 h 27 que la TCPL a été avisée de l'accident par un résidant et que son plan d'action en cas d'urgence a été mis en branle. À 18 h 29, le gaz naturel s'est enflammé et la boule de feu qui s'en est suivi a pu être vue par les pompiers qui se rendaient sur le lieu de

l'événement. Pendant les 14 minutes qui ont précédé l'allumage du gaz, des résidants des alentours et d'autres personnes, non conscients des dangers associés à la rupture d'un gazoduc, se sont rassemblés près du lieu de l'événement. Avant que le gaz ne prenne feu, et en dépit du danger, un résidant est retourné chez lui pour y prendre des effets personnels et, à 18 h 29, il a appelé la TCPL pour l'aviser de la situation. Après que le gaz naturel s'est enflammé, le chef des pompiers de Winnipeg a conduit jusqu'à un endroit sûr la conjointe de ce résidant qui, voyant que leur domicile n'était pas menacé par les flammes, s'est mise à la recherche de la personne qui avait appelé la TCPL à 18 h 29. À 19 h, le service des incendies a diminué la sécurité sur les lieux de l'accident, permettant aux médias et au grand public de s'approcher du lieu. La TCPL n'a pas été avisée de ces mesures et n'a repris le contrôle du secteur qu'à 19 h 15.

17

0

2.0 *Analyse*

2.1 *Introduction*

L'examen métallurgique a identifié le mécanisme appelé fissuration éco-assistée (FÉA) comme étant la source de la faiblesse de la conduite qui a mené à une surcharge de contraintes au niveau d'une défaillance pré-existante sur la surface extérieure de la conduite, juste à côté de la soudure circonférentielle entre deux joints de conduite. Par suite de la rupture, de l'explosion et de l'incendie, une résidence et un petit boisé qui s'étendait des deux côtés de la rivière ont été détruits. Des lignes de transport d'électricité et des lignes téléphoniques ont aussi été détruites par l'incendie. La rupture et la perte de pression d'exploitation interne dans la canalisation ont déclenché une série d'interventions d'urgence de la part du service des incendies de Winnipeg, du service de police de Winnipeg, de la GRC, du personnel d'exploitation et du personnel itinérant de la TCPL et de plusieurs autres autorités publiques.

La présente analyse portera surtout sur l'intervention d'urgence de la TCPL, sur l'arrêt d'urgence des installations par la TCPL, sur les conditions environnementales qui ont pu déclencher la FÉA et sur les politiques et procédures utilisées par la TCPL pour identifier et vérifier les passages de canalisations instables.

2.2 *Examen des faits*

2.2.1 *Intervention d'urgence par le personnel de la compagnie et les autres organismes*

Quand une compagnie de pipelines conçoit un nouveau réseau de canalisations, le *Règlement sur les pipelines terrestres* et la norme Z662 de l'Agence canadienne de normalisation dictent les normes auxquelles l'industrie doit se conformer. Ces normes visent à faire en sorte que le réseau soit conçu correctement et satisfasse aux exigences actuelles en matière de sécurité, de fonctionnement et de planification d'urgence. Le *Règlement sur les pipelines terrestres* et la norme Z662 déterminent les exigences en matière de plan d'action en cas d'urgence et précisent les exigences minimales du plan. En outre, le *Règlement sur les pipelines terrestres* exige que les sections du plan concernant la coopération avec les organismes publics soient mises à jour régulièrement. Cependant, il n'existe aucune assurance que les plans seront toujours conformes puisque ni le *Règlement sur les pipelines terrestres* ni la norme Z662 n'exige des compagnies de pipelines sous réglementation fédérale qu'elles utilisent la norme CAN/CSA Z731-95 de l'Association canadienne de normalisation intitulée *Planification des mesures d'urgence pour l'industrie* (norme Z731) pour élaborer ou mettre à jour leurs plans d'urgence. La norme Z731 est destinée à servir de guide dans l'élaboration d'un plan d'urgence qui intègre les préoccupations de toutes les personnes concernées.

En vertu des exigences actuelles du *Règlement sur les pipelines terrestres* et de la norme Z662, la TCPL participe au plan d'urgence en cas de catastrophe de la ville de Winnipeg, en fournissant des renseignements pertinents sur le réseau de canalisations pour la base de données du plan. Ces renseignements sont facilement disponibles aux premiers intervenants (service de police ou des incendies) en cas d'urgence. Au cours du présent événement, même si une alerte a été déclenchée et une intervention de niveau 2 par le service des incendies de Winnipeg était en cours, la TCPL n'a pas été mis au courant de ce qui se passait au passage de la rivière La Salle et n'a pu mettre en application le plan d'urgence de la compagnie. Ce n'est qu'à 18 h 27, 10 minutes après le déclenchement de l'intervention de niveau 2, qu'un résidant a averti la TCPL des événements et que cette dernière a pu mettre son plan d'urgence à exécution, faisant intervenir son personnel de la station de compression d'Île des Chênes et d'autres endroits sur le réseau.

Un des éléments clés de tout plan d'urgence consiste à ce que les passants ou les témoins avertissent sans délai les personnes intéressées. À cette fin, les compagnies de pipelines installent des panneaux d'avertissement près des routes, des rivières, des passages à niveau et des clôtures pour indiquer que des canalisations sous pression sont enfouies à proximité. Les panneaux fournissent des renseignements importants, comme le nom de la compagnie qui exploite le pipeline, le produit qu'il transporte et un numéro de téléphone d'urgence 24 heures. En cas d'urgence, on encourage les passants à appeler immédiatement la compagnie. La TCPL avait posé de tels panneaux au passage de la rivière La Salle.

Une fois le plan d'intervention d'urgence mis en application, le COR a actionné le composeur automatique d'urgence. Ce dispositif a pour but d'alerter les équipes de gestion régionales de la TCPL et les surveillants des stations et du réseau visés qu'une situation d'urgence est en cours. Une fois déclenché, le dispositif fait les appels automatiquement, permettant au COR de s'occuper d'autres priorités. Le plan d'urgence de la TCPL ne précise pas que le COR doit immédiatement déclencher le dispositif d'appel automatique en cas d'urgence.

Le dispositif d'appel automatique compose systématiquement 23 numéros de téléphone jusqu'à ce que le destinataire accuse réception du message. Puisqu'il faut compter jusqu'à 40 minutes pour passer à travers la liste, on pourrait améliorer le système en classant les numéros de téléphone par ordre de priorité et en s'assurant que le message pré-enregistré est aussi précis que possible quant à l'emplacement de l'accident.

2.2.2 Arrêt d'urgence des installations de pipelines

Le plan d'action en cas d'urgence de la TCPL donne clairement les grandes lignes des politiques et procédures qui doivent être suivies par le personnel de la compagnie en cas d'urgence. Pour s'assurer que le personnel de la TCPL connaît bien le plan d'action, le personnel de la compagnie effectue des vérifications et des essais de la capacité de rendement des systèmes de mise hors service d'urgence et du système SCADA du réseau. La TCPL apporte continuellement

des améliorations à ces systèmes pour garantir un niveau d'intervention adéquat, tant en situations normales qu'en situations d'urgence. Le COR n'a pas eu, au cours de cet événement, de difficulté à obtenir tous les renseignements nécessaires du système SCADA pour prendre des décisions opportunes concernant l'exploitation de la canalisation, mais en ce qui concerne le contrôleur de Calgary, il semble qu'il ait eu de la difficulté à obtenir les renseignements relatifs au système SCADA pour la station de compression 41.

Juste avant l'événement, on était en train de modifier le système SCADA et de vérifier le nouveau système d'automatisation du groupe A de la station 41. L'expert-conseil qui effectuait les travaux à cet endroit ne s'est pas assuré qu'il n'y avait pas de problème de télémetrie entre la station 41 et le contrôleur de Calgary avant de s'en aller. Ce n'est qu'à 18 h 35, soit 20 minutes après la rupture, que le COR a averti le contrôleur de Calgary. À 18 h 38, le contrôleur de Calgary a averti le COR qu'il y avait panne de transmission des données entre le centre de Calgary et la station 41. Ce n'est qu'à 22 h 30, soit plus de quatre heures après l'avis initial, que les communications ont été rétablies entre le centre de Calgary et la station 41. Pendant tout ce temps, alors que le COR était en constante communication avec la station 41 et pouvait prendre des décisions éclairées, le contrôleur de Calgary, lui, n'avait accès à aucune information SCADA pertinente de la station 41 qui aurait pu lui permettre de prendre des décisions informées au sujet du système d'exploitation. Le contrôleur de Calgary devait communiquer toutes ses instructions verbalement au COR qui, par la suite, devait mettre ces instructions à exécution. En cas de panne de communication, le système SCADA n'était équipé d'aucun dispositif qui lui aurait permis de rétablir la communication avec n'importe quelle station de compression du réseau.

L'article 04-07 du manuel des procédures d'urgence stipule qu'en cas de rupture d'une canalisation, le COR et le contrôleur de Calgary doivent tous deux vérifier la pression des canalisations dans le secteur où la rupture a été signalée. C'est à ce moment seulement que le COR peut isoler toutes les canalisations entre les stations de compression, de chaque côté du lieu de l'événement. À 18 h 29, le COR a reçu confirmation de la rupture quand un résidant lui a décrit ce qu'il venait de voir au passage, juste comme le gaz naturel explosait. À 18 h 45, le contrôleur de Calgary a ordonné au COR d'arrêter l'écoulement du produit seulement sur deux canalisations, entre les stations 34 et 41, et non sur les six canalisations, comme le stipulent les politiques et procédures du manuel des procédures d'urgence de la TCPL. Ces dernières étaient claires en ce qui concerne la marche à suivre d'isolation des canalisations; au moment de l'événement, le manuel des procédures d'urgence ne donnait ni au contrôleur de Calgary ni au COR la latitude de s'écarter des politiques et procédures prescrites. Cependant, dans certaines circonstances, quand les renseignements nécessaires sont disponibles (comme dans le cas présent), il peut être justifié de s'écarter quelque peu des procédures établies.

2.2.3 Conditions propices à la fissuration éco-assistée au passage

L'examen métallurgique a déterminé qu'un mécanisme de fissuration éco-assistée (FÉA) était en action au moment de la rupture. La FÉA est un terme générique qui décrit la fissuration et la rupture des métaux sous l'action combinée de contraintes et d'un environnement corrosif, habituellement aqueux, comme c'est le cas au passage de la rivière La Salle. La FÉA en milieu aqueux peut être classée en deux sous-types. Quand la contrainte de mise en charge est alternée, on utilise le terme «corrosion sous fatigue». Quand la fissuration se produit sous contrainte statique dans un milieu corrosif, on utilise le terme fissuration par corrosion sous tension. La fissuration assistée par l'hydrogène (FAH) est aussi un mécanisme de FÉA. Des recherches récentes ont démontré que certains types de fissuration (notamment la fissuration par corrosion sous tension en milieu quasi neutre) actuellement classés comme fissuration par corrosion sous tension ont besoin d'une charge dynamique pour atteindre un niveau de propagation appréciable. On a aussi découvert que la fissuration par corrosion sous tension peut découler de toute une gamme de micro-mécanismes, les plus souvent mentionnées étant la dissolution anodique et la FAH. Si la fissure se propage sous l'action d'un procédé anodique (soit la dissolution d'atomes de métal ou la formation et la rupture répétées d'une pellicule anodique à la tête de la fissure), il ne fait pas de doute que la fissure soit du type fissuration par corrosion sous tension (p. ex., la fissuration d'une conduite en acier dans une solution à pH élevée). Par contre, si la propagation de la fissure est surtout le résultat d'un procédé mécanique de micro-rupture assisté par l'hydrogène à la tête de la fissure, alors le terme fragilisation par l'hydrogène est plus précis.

Le débat se poursuit toujours sur le véritable mécanisme ou les véritables mécanismes qui font interagir l'hydrogène et le métal, les principaux modèles étant la décohesion et la plasticité élevée de la tête de la fissure. Quand de l'hydrogène se dégage à la suite d'une réaction de corrosion naturelle, plutôt qu'au moyen d'une charge cathodique, on classe parfois la fissuration dans la catégorie de fissuration par corrosion sous tension. Cependant, la fissuration de l'acier soumis à des charges de PC adéquates serait plus précisément décrite en terme de FAH puisque, sous polarisation électrochimique suffisante, les procédés anodiques (dissolution ou passivation, ou les deux) sont bloqués. Au passage de la rivière La Salle à St. Norbert, la TCPL avait installé un système de PC qui assurait une PC adéquate à la conduite.²

2.2.4 Surveillance des passages de pipelines sur le réseau de la TCPL

On a trouvé que la pente sur laquelle est survenue la rupture de la canalisation 100-2 était instable et qu'elle se déplaçait vers le bas de façon saisonnière, quand le niveau d'eau était élevé. Ce lent déplacement vers le bas du sol se trouvant au-dessus de la canalisation a entraîné la création de contraintes axiales anormalement élevées sur la conduite de la canalisation 100-2, contribuant directement à la propagation de la fissure transversale qui s'était amorcée au bord

² Voir l'annexe Q du rapport détaillé de la TCPL intitulé *St. Norbert Line Break*

de la soudure circonférentielle. Les canalisations 100-1 et 100-3 ont aussi subi des contraintes axiales anormalement élevées, mais ces dernières n'ont pas entraîné de ruptures. Un expert-conseil de la TCPL a découvert que la pente était instable quand la TCPL a installé la canalisation 100-1 en 1959. Le même expert-conseil a fait remarquer que le mouvement de la pente était évident à proximité du lieu de l'événement durant la construction des autres canalisations du réseau de la TCPL.

Le *Règlement sur les pipelines terrestres* exige que les programmes de contrôle et de surveillance des réseaux de canalisations fassent partie intégrante des manuels d'exploitation et d'entretien des compagnies. Par suite d'une enquête du BST (P90H1006) sur un événement semblable qui s'est produit sur un autre réseau de canalisations, l'ONE a envoyé, le 26 novembre 1993, à toutes les compagnies de pipelines sous sa compétence, un rappel de leurs obligations en vertu du *Règlement sur les pipelines terrestres* concernant le contrôle et la surveillance pour la protection des canalisations et de l'environnement. L'ONE enjoignait aussi les compagnies à inclure dans leurs programmes de contrôle et de surveillance toute pente suspecte se trouvant sur leurs emprises, ou à proximité, qui pourrait compromettre l'intégrité d'une canalisation. L'ONE reconnaît que, dans certains cas, il serait sans doute préférable que les compagnies ajoutent des instruments de détection des mouvements de pente à leurs programmes de contrôle et de surveillance des endroits suspects, mais il a néanmoins décidé d'en laisser la décision à la discrétion de la compagnie et que cette décision devait être considérée en fonction des coûts, de facteurs opérationnels et de valeur des renseignements recueillis. La lettre de l'ONE aux compagnies de pipelines ne contenait aucune suggestion ni directive aux compagnies quant à l'installation d'instruments de détection et de surveillance des mouvements de pente. La TCPL effectue régulièrement des reconnaissances aériennes de son réseau de pipelines pour satisfaire aux exigences du *Règlement sur les pipelines terrestres* et les pilotes qui travaillaient pour la TCPL avaient reçu la formation nécessaire pour détecter les instabilités de sol, les subsidences de sol ou les signes d'envasement de sol, mais le pilote qui a effectué la patrouille aérienne n'avait pas reçu de formation qui lui aurait permis d'identifier des événements géotechniques inhabituels (comme ceux qui se sont produits au passage des canalisations à St. Norbert) indicatifs de mouvements de pente. De toute façon, même si une reconnaissance aérienne avait permis d'identifier une défaillance de pente catastrophique, elle n'aurait pas permis de détecter ce genre de mouvement de pente.

Avant cet événement, la TCPL ne disposait d'aucune politique d'inspection interne des pentes de son réseau de canalisations qui lui aurait permis d'identifier les changements dans le profil des conduites, ni d'une politique relative à l'installation d'instruments de détection et de surveillance des mouvements de pentes qui auraient permis de déterminer si une pente particulière était stable ou instable.

En un certain nombre d'occasions, comme le prescrit le code des procédures d'exploitation intitulé *Underwater Survey* (qui fait partie intégrante du programme permanent de contrôle de l'intégrité des canalisations de la compagnie), la TCPL a effectué des inspections sous-marines

du lit de la rivière La Salle pour s'assurer qu'il était stable. Le code des procédures d'exploitation de la compagnie ne précise cependant pas à quel endroit ces inspections doivent être faites, ni à quels intervalles. L'enquête a permis de déterminer que ni le *Règlement sur les pipelines terrestres* ni la norme Z662 de l'Association canadienne de normalisation ne prescrit (dans le cadre d'un programme de contrôle et de surveillance) qu'une compagnie de pipelines effectue ce genre d'inspection, mais ce fait n'a pas contribué à l'événement.

3.0 *Conclusions*

3.1 *Faits établis*

1. La rupture de la canalisation 100-2 s'est amorcée au niveau d'une défaillance pré-existante majeure, localisée sur le bord de la soudure circonférentielle. Il se peut que la fissure initiale se soit trouvée à cet endroit depuis la construction de la canalisation en 1962.
2. La canalisation s'est rompue en raison d'une surcharge de contraintes indicative d'un mécanisme de fissuration appelé fissuration éco-assistée. Une analyse détaillée de la rupture de la conduite qui s'est rompue a révélé que le principal effort de mise en charge ayant entraîné la rupture provenait d'un fléchissement de la conduite causé par des efforts externes.
3. Un examen géotechnique du passage a révélé que la canalisation qui s'est rompue avait été construite dans un secteur où l'instabilité de la pente était une condition pré-existante. Le secteur entourant le passage de la rivière La Salle de la TCPL est connu pour ses glissements de pente, et l'instabilité du terrain à la hauteur du passage avait déjà été constatée lors de travaux de constructions antérieurs effectués sur la rive est de la rivière La Salle. Aucun dossier antérieur à la rupture ne mentionnait que des excavations de contrôle, des vérifications ou des inspections de la surface de la conduite avaient été effectuées sur l'une ou l'autre des six canalisations pour examiner les mouvements de terrain à la hauteur du passage.
4. Des contrôles de l'efficacité du système de PC sur le lieu de la rupture ont démontré que le potentiel de PC excédait les normes minimales de l'industrie.
5. Des inspections sous-marines ont été effectuées par la TCPL à la hauteur du passage de la rivière La Salle, conformément aux procédures de la compagnie.
6. Le signal de télémessure SCADA entre la station 41 et le centre de Calgary a cessé de fonctionner le jour même de l'événement parce que le technicien à l'emploi de la TCPL qui travaillait sur le système de la station n'a pas vérifié le mode de fonctionnement du signal.
7. Le contrôleur de Calgary n'a pas pu rétablir le signal de télémessure SCADA entre la station 41 et le centre de Calgary puisque le système SCADA du centre de Calgary n'avait pas la connexion nécessaire.

8. Le manuel des procédures d'urgence de la TCPL donne clairement comme consigne au contrôleur des opérations régionales (COR) d'isoler immédiatement toutes les canalisations entre les stations de compression de chaque côté d'une défaillance confirmée sur le réseau, mais tous les tronçons du réseau n'ont pas été fermés entre les stations 34 et 41. Cependant, dans ce cas-ci, les responsables disposaient des renseignements nécessaires qui les justifiaient de s'écarter quelque peu des procédures établies.
9. Même si, le 26 novembre 1993, l'Office national de l'énergie avait envoyé à toutes les compagnies de pipelines sous réglementation fédérale un rappel indiquant que les exigences réglementaires de l'ONE relatives aux programmes de contrôle et de surveillance comprenaient la surveillance des pentes susceptibles de s'effondrer ou de se déplacer, la TCPL n'avait installé aucun instrument au passage de la rivière La Salle pour surveiller les mouvements de pente.
10. La TCPL est un participant actif au plan d'urgence en cas de catastrophe de la ville de Winnipeg, mais elle n'a pas été avisée tout de suite quand l'accident a été signalé au centre d'urgence de Winnipeg. La TCPL n'a été avisée de ce qui se passait au passage que 14 minutes plus tard par un témoin qui l'a appelée et par un employé de la TCPL qui a vu un bulletin de nouvelles en direct à la télévision.

3.2 *Cause*

La rupture de la canalisation 100-2 a été causée par une fracture de surcharge ductile, résultant de contraintes externes élevées qui ont été imposées à la surface de la canalisation par le mouvement de la pente dans laquelle la conduite était enfouie. L'existence d'une fissure éco-assistée au bord de la soudure circonférentielle qui joignait les deux sections de conduite à cet endroit a contribué à la rupture. Il se peut que la fissure initiale ait pris naissance lors de la construction de ce tronçon de canalisation.

4.0 *Mesures de sécurité*

4.1 *Mesures prises*

Le tronçon de la canalisation 100-1 qui traverse la rivière a été remplacé puisqu'il passait dans le même secteur d'instabilité de pente. De plus, puisqu'on a découvert que la canalisation 100-3 s'était aussi déplacée, on a excavé ce tronçon de canalisation et on a éliminé les contraintes en remettant la conduite en position neutre.

Par suite de cet événement, la TCPL a modifié comme suit la portée et l'étendue de ses pratiques et procédures d'exploitation :

- i) la connexion de télémessure SCADA a été modifiée pour permettre au centre de Calgary de rétablir les communications avec une station de compression en cas de perte temporaire du signal de télémessure primaire;
- ii) le manuel des procédures d'urgence de la compagnie a été remanié pour permettre de s'écarter des procédures établies concernant la mise hors service complète du réseau;
- iii) les procédures de la compagnie ont été modifiées pour que les équipes de gestion soient avisées plus rapidement;
- iv) un programme à long terme a été élaboré pour assurer le succès du projet de stabilisation et de surveillance du terrain mis en oeuvre au passage de la rivière La Salle;
- v) un programme géotechnique a été mis en marche à l'échelle du réseau pour découvrir tout signe de mouvement de pente sur les emprises des canalisations et pour collationner des données sur les types de sol, le revêtement des conduites et les caractéristiques géotechniques et géographiques de tous les passages de rivière du réseau.

En outre, la TCPL a tenu une séance d'information (et une séance de suivi) à l'intention du grand public pour le renseigner sur ses activités à la suite de l'événement au passage de la rivière La Salle. Dans le cadre d'un programme de relations améliorées avec les communautés, le 19 mars 1997, la TCPL a rencontré les préfets et les conseillers des municipalités rurales de Macdonald et Richot et ceux de la ville de Winnipeg.

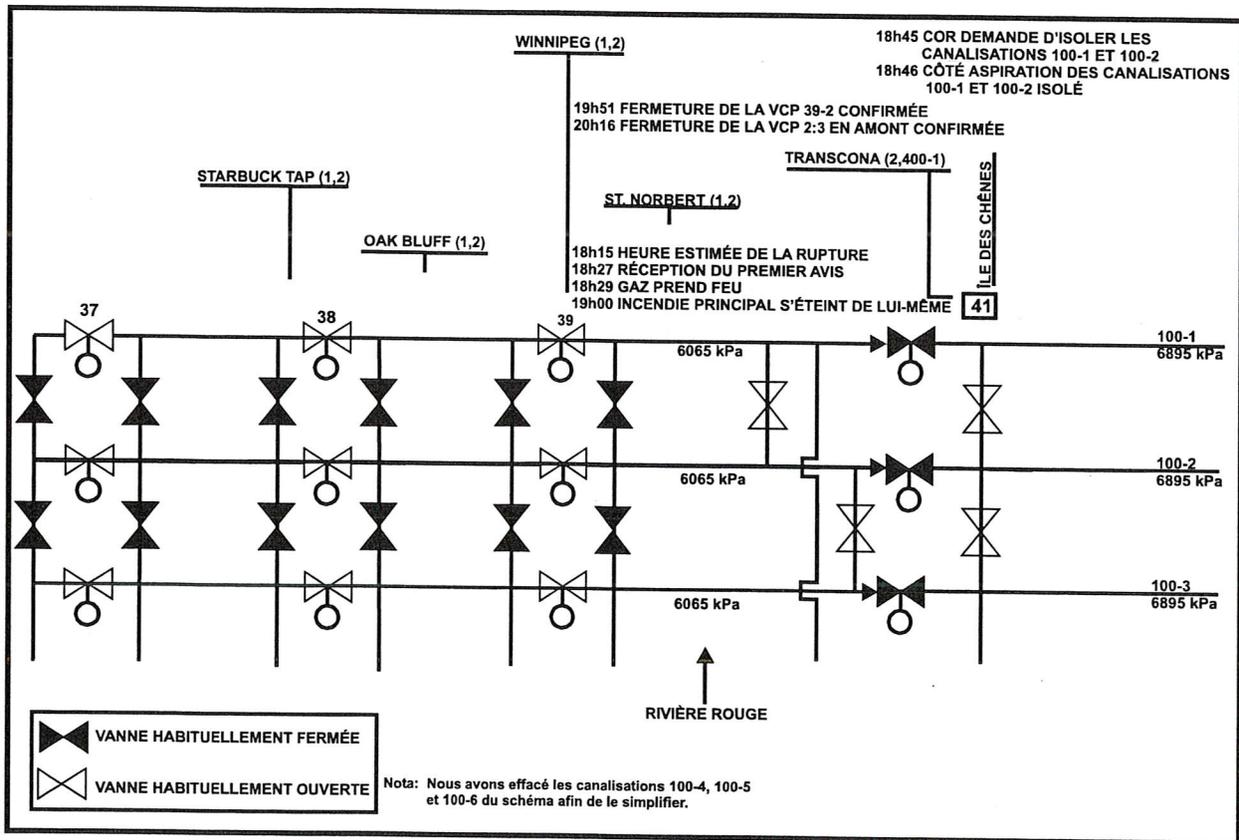
Le manuel des procédures d'urgence de la TCPL, qui renferme le plan d'action en cas d'urgence, a été modifié de façon à ce que les contrôleurs des opérations régionales de la TCPL mettent immédiatement en branle la procédure régionale d'appel automatique dès qu'ils soupçonnent une urgence au niveau du réseau de canalisations de la TCPL. On a demandé aux contrôleurs des opérations régionales, si l'événement est plus tard identifié comme une fausse alarme, de le consigner comme une simulation d'une rupture de canalisation de laquelle on discuterait à la prochaine réunion des opérations. Dans le cadre d'une initiative au sein de la

compagnie, les bureaux régionaux de la TCPL ont tenu des séances de planification des interventions d'urgence avec tous les services des incendies le long de tout le réseau de canalisations de la TCPL. Au cours des séances de planification des interventions d'urgence, on a discuté des communications, de la coordination et du besoin de maintenir un périmètre de sécurité autour des lieux des événements.

Avant septembre 1995, on communiquait avec les organismes de première intervention (service des incendies, service de police et centres de contrôle d'urgence) tous les quatre ans. Conformément à la dernière révision au code des procédures d'exploitation POP-01-04, intitulé *Public Awareness Programs* (Programmes de sensibilisation du public), on communique maintenant avec les organismes de première intervention tous les ans.

Le présent rapport met fin à l'enquête du Bureau de la sécurité des transports sur cet accident. La publication de ce rapport a été autorisée le 27 janvier 1999 par le Bureau qui est composé du Président Benoît Bouchard et des membres Maurice Harquail, Charles Simpson et W.A. Tadros.

Annexe C - Schéma d'une vanne



Annexe D - Sigles et abréviations

BST	Bureau de la sécurité des transports du Canada
COR	contrôleur des opérations régionales
FAH	fissuration assistée par l'hydrogène
FÉA	fissuration éco-assistée
GRC	Gendarmerie royale du Canada
h	heure(s)
HNE	heure normale de l'Est
kg	kilogramme(s)
km	kilomètre(s)
km ²	kilomètre(s) carré(s)
km/h	kilomètre(s) à l'heure
kPa	kilopascal(s)
lb/po ²	livre(s) au pouce carré
m	mètre(s)
m ³	mètre(s) cube(s)
m ³ /s	mètre(s) cube(s) à la seconde
mm	millimètre(s)
MPa	mégapascal(s)
mV	millivolt(s)
ONE	Office national de l'énergie
PC	protection cathodique
SCADA	réseau de contrôle du système et d'acquisition des données
TCPL	TransCanada PipeLines Limited
UTC	temps universel coordonné
VCP	vanne de canalisation principale



Bureau de la sécurité des transports
du Canada

Transportation Safety Board
of Canada

Place du Centre
200, promenade du Portage
4^e étage
Hull (Québec)
K1A 1K8

POSTE MAIL

Société canadienne des postes / Canada Post Corporation

Port payé

Postage paid

Nbre

Blk

04771397

BUREAUX DU BST

ADMINISTRATION CENTRALE

HULL (QUÉBEC)*

Place du Centre
4^e étage
200, promenade du Portage
Hull (Québec)
K1A 1K8
Tél. (819) 994-3741
Télécopieur (819) 997-2239

INGÉNIERIE

Laboratoire technique
1901, chemin Research
Gloucester (Ontario)
K1A 1K8
Tél. (613) 998-8230
Télécopieur (613) 998-5572

BUREAUX RÉGIONAUX

GRAND HALIFAX (NOUVELLE-ÉCOSSE)*

Marine, pipeline, rail et aviation
160 avenue Thorne
Dartmouth (Nouvelle-Écosse)
B3B 1Z2
Tél. (902) 426-2348
Télécopieur (902) 426-5143

GRAND MONTRÉAL (QUÉBEC)*

Pipeline, rail et aviation
185, avenue Dorval
Pièce 403
Dorval (Québec)
H9S 5J9
Tél. (514) 633-3246
Télécopieur (514) 633-2944

GRAND QUÉBEC (QUÉBEC)*

Marine, pipeline et rail
1091, chemin Saint-Louis
Pièce 100
Sillery (Québec)
G1S 1E2
Tél. (418) 648-3576
Télécopieur (418) 648-3656

GRAND TORONTO (ONTARIO)

Marine, pipeline, rail et aviation
23, rue Wilmot est
Richmond Hill (Ontario)
L4B 1A3
Tél. (905) 771-7676
Télécopieur (905) 771-7709

WINNIPEG (MANITOBA)

Pipeline, rail et aviation
335 - 550, rue Century
Winnipeg (Manitoba)
R3H 0Y1
Tél. (204) 983-5548
Télécopieur (204) 983-8026

EDMONTON (ALBERTA)

Pipeline, rail et aviation
17803, avenue 106 A
Edmonton (Alberta)
T5S 1V8
Tél. (403) 495-3865
Télécopieur (403) 495-2079

CALGARY (ALBERTA)

Pipeline et rail
Édifice Sam Livingstone
510 - 12^e avenue sud-ouest
Pièce 210, C.P. 222
Calgary (Alberta)
T2R 0X5
Tél. (403) 299-3911
Télécopieur (403) 299-3913

GRAND VANCOUVER (COLOMBIE-BRITANNIQUE)

Marine, pipeline, rail et aviation
4 - 3071, rue Number Five
Richmond (Colombie-Britannique)
V6X 2T4
Tél. (604) 666-5826
Télécopieur (604) 666-7230

Services en français à l'extérieur
de la région de la capitale
nationale : 1-800-387-3557

*Services disponibles dans les
deux langues officielles