

# **AVIS D'EXPERT RELATIF A LA DEMANDE DE CREATION D'UN STOCKAGE SOUTERRAIN DE DECHETS INDUSTRIELS ULTIMES**

Société STOCAMINE

WITTELSHEIM (Haut-Rhin)

*Laboratoire de Référence d'Analyse des Risques*

octobre 1996

# **AVIS D'EXPERT RELATIF A LA DEMANDE DE CREATION D'UN STOCKAGE SOUTERRAIN DE DECHETS INDUSTRIELS ULTIMES**

Société STOCAMINE

WITTELSHEIM (Haut-Rhin)

Code de gestion : 36MA36

*Laboratoire de Référence d'Analyse des Risques*

**octobre 1996**

# EMARGEMENT

Ce rapport intitulé « Avis d'expert relatif à la demande de création d'un stockage souterrain de déchets industriels ultimes », constitue la synthèse de la prestation du Laboratoire de Référence d'Analyse des Risques de l'INERIS.

Dans sa forme, le présent rapport est établi conformément aux principales recommandations des normes ISO 5966, ISO 2145, ISO 31/0 et ISO 1000.

La référence du présent rapport est : 36MA36.

Les personnes ayant participé à la rédaction de ce rapport sont les suivantes : Guy MAVROTHALASSITIS, Philippe CASSINI, Bernard BARTET.

Le responsable d'affaire est :

NOM	QUALITE	DATE	EMARGEMENT
JEAN-PIERRE JOSIEN	Directeur de l'activité Réglementation, Certification, Normalisation	26/09/1996	

Dans le cadre de la procédure générale qualité de l'INERIS, et en respect du paragraphe 14.2 du manuel qualité, ce document a fait l'objet d'une relecture et d'un contrôle par un vérificateur.

NOM	QUALITE	DATE	EMARGEMENT
JEAN-PHILIPPE PINEAU	Délégué aux risques industriels	26/09/1996	

Enfin, ce document a fait l'objet d'une approbation :

NOM	QUALITE	DATE	EMARGEMENT
JEAN-FRANÇOIS RAFFOUX	Directeur Scientifique et de la Qualité	26/09/1996	

# ANALYSE

La Société STOCAMINE, au titre de la législation relative aux Installations Classées pour l'Environnement, a déposé un dossier de demande d'autorisation pour la création d'un stockage souterrain de déchets industriels ultimes.

Compte-tenu des demandes formulées lors de la réunion de la Commission Locale d'Information et de Surveillance (CLIS), la Société STOCAMINE a demandé à l'INERIS son avis d'expert sur certains points du dossier :

- Appréciation sur la méthodologie des études menées par l'exploitant à l'appui de sa demande.
- Impact à court terme (période de mise en place des déchets). L'absence d'impact sur les habitations riveraines est notamment vérifiée dans les hypothèses dimensionnantes suivantes : chute de colis dans le puits, incendie de l'engin de transport au fond, incendie de camion en cours de déchargement au jour, pollution de la nappe phréatique.
- Impact à long terme (après abandon éventuel d'un stockage définitif).
- Conditions techniques de la réversibilité.

Le projet de stockage souterrain STOCAMINE présente, de l'avis de l'INERIS, des conditions exceptionnellement favorables : conditions géologiques et hydrogéologiques, reconnaissance de l'environnement du site lors de l'exploitation minière, expérience des opérateurs en matière de techniques minières et de traitement de déchets, accessibilité du site en surface. Les études présentées dans le dossier, complétées par celles qui ont pu être réalisées par l'INERIS permettent d'avoir une idée claire des impacts potentiels tant en fonctionnement normal qu'en cas d'accident.

Ces impacts doivent pouvoir être contrôlés par les mesures de prévention et de protection exposées dans le dossier, complétées par celles proposées par l'INERIS dans ce rapport.

Les principales recommandations supplémentaires de l'INERIS peuvent être ainsi résumées :

- **au niveau des moyens à mettre en œuvre** : Modifier le bassin de collecte des eaux ; Séparer par des murs et porte coupe-feu l'aire de déchargement du stockage temporaire jour ; Assurer un isolement du stockage fond en moins de dix minutes en cas d'incendie d'engin ; Mettre en place des niches de secours au fond ; Assurer la protection contre la foudre des installations jour.
- **au niveau des procédures** : Pour chaque groupe de déchets, une procédure définira les techniques d'échantillonnage, les tests d'acceptation et de contrôle, leur méthodologie, les valeurs limites ainsi que le traitement et conditionnement des déchets ; Un plan d'urgence reprendra l'ensemble des moyens à mobiliser en cas d'accident ou d'incident, les mesures à prendre et les procédures à suivre.
- **au niveau des contrôles** : Un programme de surveillance des impacts au jour, ainsi que des cavités de stockage en cours de remplissage et après leur fermeture.
- **au niveau des études pendant la période de stockage réversible** : Validation du dimensionnement du stockage ; Calage de la méthode d'estimation de l'évolution thermodynamique des déchets ; Méthode de fermeture définitive des puits et accès.

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
<b>1. APPRECIATION SUR LA METHODOLOGIE .....</b>	<b>3</b>
1.1 CONTENU GENERAL DU DOSSIER .....	3
1.1.1 Adéquation des documents remis avec la réglementation.....	3
1.1.2 Remarques générales sur la forme du dossier .....	4
1.2 CONTENU DE L'ETUDE D'IMPACT.....	5
1.2.1 Contenu général.....	5
1.2.2 Contenu des différentes rubriques.....	6
1.3 CONTENU DE LA NOTICE HYGIENE ET SECURITE.....	10
1.4 CONTENU DE L'ETUDE DES DANGERS .....	11
1.4.1 Remarques générales, exhaustivité des thèmes traités.....	11
1.4.1.1 Identification et Prévention des risques.....	12
1.4.1.2 Synthèse de l'analyse des risques et conclusion sur l'exhaustivité des thèmes traités .....	13
1.4.2 Analyse préliminaire des dangers.....	13
1.4.2.1 Analyse générale du procédé.....	14
1.4.2.2 Admission des déchets .....	16
1.4.2.3 Rupture accidentelle des contenants.....	22
1.5 CONCLUSION .....	26
<b>2. IMPACT A COURT TERME.....</b>	<b>28</b>
2.1 CHUTE D'UN COLIS DANS LE PUITTS .....	28
2.2 SCENARIO D'INCENDIE D'UN CAMION EN COURS DE DECHARGEMENT AU JOUR .....	29
2.2.1 Premières hypothèses.....	29
2.2.2 Considérations sur les déchets exposés à l'incendie et phénomènes impliqués.....	30
2.2.2.1 Généralités.....	30
2.2.2.2 Phénomènes à considérer .....	30
2.2.2.3 Modalités d'émission de déchets à l'atmosphère .....	30
2.2.2.4 Modélisations de l'INERIS .....	32
2.3 SCENARIO D'INCENDIE AU FOND.....	39
2.3.1 Evaluation des principales caractéristiques de l'incendie initial et de ses conséquences dans la zone de stockage.....	39
2.3.2 Risque de communication du feu à la zone de stockage .....	41
2.3.3 Produits de combustion rejetés et toxicité du mélange formé en tête de puits.....	42
2.3.4 Pollution résiduelle après dispersion atmosphérique.....	44
2.3.5 Conclusion .....	45
2.4 RISQUE DE POLLUTION DE LA NAPPE PHREATIQUE.....	52
2.4.1 Conditions du site.....	52
2.4.2 Analyse des risques de pollution de la nappe alluviale.....	53
2.5 RISQUES LIES AU GRISOU .....	56
2.6 CONCLUSIONS.....	57
<b>3. IMPACT A LONG TERME .....</b>	<b>59</b>
3.1 CONTENU DE L'ETUDE, SCENARIO .....	59
3.2 RAPPEL DU CONTEXTE GEOLOGIQUE .....	59
3.2.1 Genèse et tectonique .....	59
3.2.2 Hydrogéologie.....	60
3.3 RISQUE DE DIAPIRISME OU DE MONTEE DE SEL .....	61
3.4 RISQUE SISMIQUE .....	63
3.5 RISQUE D'INSTABILITE MECANIQUE.....	64
3.6 RISQUE DE COMMUNICATION PAR LES PUITTS.....	66
3.7 RECRISTALLISATION DU SEL .....	70
3.8 RISQUE D'INTERVENTION HUMAINE.....	73
3.9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....	73

<b>4. REVERSIBILITE DU STOCKAGE .....</b>	<b>75</b>
4.1 TRAÇABILITE .....	75
4.2 STABILITE AU COURS DU TEMPS DES CONTENANTS.....	75
4.3 ACCESSIBILITE .....	76
4.4 CONCLUSION .....	78
<b>RESUME ET CONCLUSIONS .....</b>	<b>79</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>87</b>
<b>ANNEXE A : LISTE DES DOCUMENTS SOUMIS A L'ANALYSE .....</b>	<b>A1</b>
<b>ANNEXE B : TABLEAU D'ANALYSE PRELIMINAIRE DES DANGERS RELATIFS A LA MANUTENTION DES FUTS DEPUIS LEUR ARRIVEE SUR LE SITE JUSQU'A LEUR STOCKAGE AU FOND .....</b>	<b>A3</b>
<b>ANNEXE C : EVALUATION DES CONSEQUENCES DE LA DISPERSION DES FUMEEES CONSECUTIVES A UN INCENDIE.....</b>	<b>A5</b>
<b>ANNEXE D : DESCRIPTION BREVE DES CARACTERISTIQUES DU LOGICIEL VENDIS-FS .....</b>	<b>A12</b>
<b>ANNEXE E : PRESENTATION DU LOGICIEL PHAST.....</b>	<b>A17</b>
<b>ANNEXE F :DOCUMENTS COMPLEMENTAIRES COMMUNIQUEES PAR LA SOCIETE STOCAMINE A LA DEMANDE DE L'INERIS .....</b>	<b>A25</b>

## INTRODUCTION

La Société STOCAMINE a déposé un dossier de demande d'autorisation au titre de la législation relative aux Installations Classées pour l'Environnement, de création d'un stockage souterrain de déchets industriels ultimes. Ce projet consiste à stocker certains déchets industriels ultimes dans des cavités souterraines dans le sel gemme à près de 600 m de profondeur sur le site de la mine Joseph Else.

Compte-tenu des demandes formulées lors de la réunion de la Commission Locale d'Information et de Surveillance (CLIS), la Société STOCAMINE a demandé à l'INERIS son avis d'expert sur certains points du dossier. En conséquence, L'INERIS a réalisé l'examen des points suivants :

- Appréciation sur la méthodologie des études menées par l'exploitant à l'appui de sa demande. Les points suivants sont notamment examinés : exhaustivité des sujets traités ; validité des méthodes.
- Impact à court terme (période de mise en place des déchets). L'absence d'impact sur les habitations riveraines est notamment vérifiée dans les hypothèses dimensionnantes suivantes :
  - \* Chute de colis dans le puits, contenant par exemple des cyanures ;
  - \* Incendie d'engins diesels au fond, en bordure de stockage des déchets ;
  - \* Incendie de camion en cours de déchargement au jour ;
  - \* Pollution de la nappe phréatique.
- Impact à long terme (après abandon éventuel d'un stockage définitif). Notamment, les risques suivants sont examinés :
  - \* risque sismique ;
  - \* risque de diapirisme et de montée du dôme de sel ;
  - \* risque d'instabilité mécanique ;
  - \* risque de circulation d'eau ;
  - \* risque de dissolution et possibilité de prise en masse.

Pour l'étude de ce point, l'INERIS s'est appuyé sur la sous-traitance d'un expert du G.3S (Groupement pour l'étude des Structures Souterraines de Stockage) de l'Ecole Polytechnique.

- Conditions techniques de la réversibilité. Notamment, les points suivants sont examinés : conditions d'exploitation et de contrôle nécessaires pour assurer la réversibilité, pendant la période d'autorisation temporaire.

Les résultats de l'examen critique font l'objet du présent rapport.

De manière générale, la démarche adoptée par l'INERIS pour réaliser un examen critique se décompose dans les différentes phases suivantes :

- phase 1 : une visite du site, qui consiste en une prise de connaissance de l'ensemble des activités,

- Phase 2 : une analyse du dossier, fonction de la demande exprimée, et qui peut s'appuyer si nécessaire sur les informations fournies correspondant à :
  - \* un exposé des dangers que peut présenter l'installation en cas d'accident,
  - \* une description des accidents susceptibles d'intervenir, que leur cause soit d'origine interne ou externe,
  - \* une description de la nature et de l'extension des conséquences que peut avoir un accident éventuel,
  - \* une justification des mesures propres à réduire la probabilité et les effets d'un accident, déterminées sous la responsabilité du demandeur,
  - \* un descriptif (compte-tenu des moyens de secours publics portés à la connaissance de l'industriel) de la nature et de l'organisation des moyens de secours privés dont il dispose ou dont il s'est assuré le concours en vue de combattre les effets d'un éventuel sinistre et les éléments indispensables pour l'élaboration par les autorités publiques d'un plan particulier d'intervention.

L'analyse réalisée par l'INERIS sur la base des informations précédentes porte notamment sur :

- \* une analyse des hypothèses prises en compte dans l'étude, de la démarche adoptée, et des conclusions qui en sont tirées. Elle vise donc à reprendre l'ensemble des démarches de choix des scénarios et de modélisation de ces scénarios avec l'objectif d'en dégager un cheminement cohérent de choix d'hypothèses et de modèles, d'exposé des limites de ces choix et des modélisations retenues (connaissance du terme source, connaissance actuelle du phénomène concerné, ...) de développement des calculs et d'interprétation des résultats.
  - \* des modélisations particulières. L'INERIS développe lui même, le cas échéant, un choix de scénarios et de modélisations associées. Les conclusions tirées concernent les distances d'effets associées aux phénomènes retenus pour les scénarios choisis. La démarche de l'INERIS s'attache à être démonstrative et transparente dans le choix des hypothèses, les limites des modèles retenus et les conclusions tirées.
  - \* la pertinence des mesures proposées par l'industriel visant à réduire la probabilité d'occurrence des phénomènes redoutés et, le cas échéant, à en diminuer la gravité.
- phase 3 : des demandes d'informations complémentaires, les réponses fournies par l'industriel étant annexées au présent rapport.
  - phase 4 : la rédaction du projet de rapport,
  - phase 5 : une réunion DRIRE et industriel,
  - phase 6 : la rédaction du rapport final,
  - phase 7 : une relecture et remise du rapport.
  - phase 8 : une présentation du rapport à la CLIS.

# 1. APPRECIATION SUR LA METHODOLOGIE

## 1.1 Contenu général du dossier

### 1.1.1 Adéquation des documents remis avec la réglementation

Le cadre légal fixant la nature du contenu des dossiers de demande d'autorisation d'exploitation des Installations Classées Pour l'Environnement est décrit par le décret du 21 septembre 1977 pris pour application de la loi du 19 juillet 1976, et modifié successivement par le décret du 9 juin 1994 puis par le décret du 5 janvier 1996. On doit notamment trouver :

- \* une carte au 1/25000 sur laquelle est indiquée l'emplacement de l'installation,
- \* un plan à l'échelle 1/2500 des abords de l'installation,
- \* un plan d'ensemble à l'échelle 1/200,
- \* une étude d'impact, dont le contenu est examiné au 1.2 suivant,
- \* une étude des dangers, dont l'analyse du contenu fait l'objet de la partie 1.4 suivante,
- \* une notice relative à l'hygiène et à la sécurité du personnel, dont le contenu est examiné au 1.3 ci-dessous.

Par ailleurs, un certain nombre de textes européens et nationaux sont applicables au contexte particulier du projet STOCAMINE. Notamment, la loi du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux constitue un texte fondateur.

Au titre de la gestion tant nationale qu'europpéenne des déchets industriels ultimes, l'INERIS prend note de la liste de textes importante fournie à la fin du dossier STOCAMINE (en ses pages 161 et 162), qui est à même de fixer utilement le cadre dans lequel doit s'inscrire l'activité de stockage souterraine de déchets industriels ultimes.

Toutefois, il convient de noter que certains des textes cités ont fait l'objet de modifications, qu'il convient de prendre en considération. Notamment, les arrêtés ministériels du 18 décembre 1992 relatifs au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations existantes et nouvelles ont été modifiés successivement par deux arrêtés en date du 29 juin 1993, puis par deux arrêtés du 18 février 1994.

De manière générale, l'INERIS note que l'ensemble des documentations requises sont fournies dans le dossier STOCAMINE. Leur contenu est examiné avec plus de détail dans la suite de la présente examen.

## 1.1.2 Remarques générales sur la forme du dossier

Le point principal concerne les difficultés de lecture qui peuvent apparaître, dans la mesure où certaines pièces du dossier ont été rédigées à des dates antérieures au document principal intitulé « Le stockage en mine de déchets industriel ».

C'est notamment le cas de l'étude de sécurité chimique, réalisé en novembre 1990 par l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, dont les renvois de page correspondent au texte principal du premier projet.

Par ailleurs, les renvois au sein d'un même document mériteraient quelques compléments, afin d'en faciliter la lecture. Notamment, des renvois vers la carte de la page 15 depuis certains paragraphes de l'étude d'impact pourraient être utiles.

Les autres remarques qui peuvent être formulées relèvent du détail. Elles concernent principalement le document intitulé « Le stockage en mine de déchets industriel ». On notera par exemple, que :

- \* Entre les pages 15 et 19, si l'on compare les appellations, on constate que les cités Joseph-Else et Graffenwald ont été interverties. D'emblée, le lecteur pourrait faire confiance à la carte de la page 15 plutôt qu'au schéma de la page 19. Toutefois, un doute subsiste en faveur du schéma de la page 19, dans la mesure où, si l'on se reporte à l'énumération de la page 135 concernant la répartition de la population environnante, on peut lire : « *Cité Joseph-Else : 114 habitants ; Cité Graffenwald : 1503 habitants* ».
- \* Le titre du schéma de la page 134 indique que 7 emplacements ont été retenus pour la campagne de mesure de bruits du 28/08/91. Cependant, le lecteur n'en voit que 6, le point n° 2 n'étant pas localisé.

Ces points de détail ont été éclaircis lors des réunions avec la société STOCAMINE. Ainsi,

- \* L'intervention entre les cités Joseph-Else et Graffenwald est le fait de la carte de la page 15,
- \* L'emplacement non répertorié (point n° 2) est à trouver sur le schéma de la page 134 dans le coin situé entre les points n° 1 et n° 3.

## 1.2 Contenu de l'étude d'impact

Ce paragraphe a pour objet, d'une part de déterminer si l'étude d'impact traite exhaustivement l'ensemble des thèmes exigés par la réglementation (décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977, modifié par le décret n° 96-18 du 5 janvier 1996), et d'autre part de lister les compléments d'information qu'il était utile d'apporter à l'étude.

### 1.2.1 Contenu général

Le tableau 1.2-1 ci-dessous compare les thèmes traités dans l'étude d'impact avec ceux que la réglementation exige :

Réglementation	Traité dans l'étude d'impact ?
Analyse de l'état initial du site, de son environnement	OUI (Chapitre I)
Analyse des effets directs et indirects, temporaires et permanents sur l'environnement	OUI (Chapitres II, III)
Raisons pour lesquelles le projet présenté est retenu	OUI (Chapitre IV)
Mesures envisagées pour limiter les inconvénients de l'installation, et dépenses correspondantes	OUI (Chapitre V)
Conditions de remise en état du site	OUI (Chapitre VI)
Analyse des méthodes utilisées	OUI (Chapitre VII)
Résumé non technique	<sup>1</sup>

Tableau 1.2-1 : Exhaustivité des thèmes traités dans l'Etude d'Impact

L'adéquation entre les exigences de la réglementation et les thèmes traités est bonne. Le fait de ne pas trouver de résumé non technique relatif à la seule étude d'impact n'est pas en soi problématique, dans la mesure où l'ensemble du dossier présenté a été soumis à cet exercice.

---

<sup>1</sup> Le Résumé Non Technique de l'Etude d'Impact est en fait à trouver dans un Résumé Non Technique relatif à l'ensemble du dossier.

## 1.2.2 Contenu des différentes rubriques

L'analyse de l'état initial du site et de son environnement est réalisée au chapitre 1 de l'étude d'impact. L'ensemble des thèmes à aborder relativement à ce point l'ont été effectivement (voir le tableau 1.2-2 ci-dessous). Toutefois, dans un souci d'exhaustivité, l'INERIS estime que certaines informations n'apparaissant pas dans l'étude initiale peuvent néanmoins constituer d'utiles compléments. Interrogée sur ce point, la société STOCAMINE a d'ores et déjà fourni en réponse la plupart des documents demandés (voir la colonne 4 du tableau 1.2-2). Les textes de cette réponse font l'objet de l'annexe F du présent rapport.

<b>a) Données relatives à l'état initial</b>				
<b>Type de données</b>		<b>Traité ?</b>	<b>Compléments préconisés</b>	<b>Eléments apportés par STOCAMINE</b>
<b>Géographiques</b>		OUI	•Vues aériennes récentes	Fournies en réponse
<b>Physiques</b>	Climatologie	OUI	•Précipitations moy. mensuelles (mm) •Températures moy. mensuelles	Fournies en réponse
	Géologie locale	OUI	•Carte géologique au 1/50000ème	Fournie en réponse
	Hydrologie	OUI	•Carte des réseaux hydrographiques locaux	Fournie en réponse (carte IGN)
	Hydrogéologie	OUI	•Préciser la perméabilité des terrains •Carte hydrogéologique locale	Fournies dans le rapport BRGM
<b>Milieu naturel</b>	Paysage	OUI	•Photographies (site et environnement)	Fournies en réponse
	Flore	OUI		
	Faune	OUI		
<b>Activité humaine</b>	Infrastructures	OUI	•Réseaux routiers : Carte au 1/50000è	Fournie en réponse
	Habitat	OUI		
	Economie	OUI		
	Urbanisme, POS	OUI	•Joindre carte ou schéma du POS	Fournie en réponse
<b>Etat initial de l'environnement</b>	Qualité de l'air	OUI	Analyse de l'air hors du site (amont et aval), notamment des éléments présents dans les rejets gazeux du fond	
	Qualité de l'eau	OUI	•analyse des eaux et sédiments du ruisseau passant à l'est du terriil Joseph-Else (Thur)	
	Qualité des sols	OUI	•Analyses de sol (sur site ; et hors site après identification d'un point de référence)	
	Niveau sonore	OUI		

Tableau 1.2-2 : Données fournies par l'étude d'impact relativement à l'état initial - Compléments à apporter

**En conclusion** des questions relatives à l'état initial, l'INERIS émet les avis suivants :

- L'analyse du POS a montré que le site prévu pour le stockage est bien situé sur une zone réservée aux activités à caractère industriel et commercial.

Par ailleurs, une zone située au sud du site est également susceptible de recevoir des bâtiments dont l'activité est à caractère industriel. Toutefois, compte-tenu de son classement UEb2 (i.e. « zone interdite aux constructions ou installations produisant des nuisances incompatibles avec la présence de zones d'habitations attenantes »), on peut estimer que ces activités industrielles n'auront pas d'effet sur le centre de stockage.

- Le point principal à retenir concerne les qualités de l'air, de l'eau et du sol, qui devraient faire l'objet d'une analyse sur site et hors site avant le début de l'exploitation.

L'analyse des effets de l'exploitation sur l'environnement est traitée au chapitre 3 de l'étude d'impact. L'ensemble des thèmes à aborder relativement à ce point l'ont été effectivement, et de manière complète (voir le tableau 1.2-3 ci-dessous). Ils n'appellent donc pas de remarque particulière de la part de l'INERIS.

<b>b) Analyse des impacts sur l'environnement</b>		
<b>Milieu ou source concerné</b>	<b>Traité ?</b>	<b>Commentaires</b>
Sols	OUI	Traité conjointement avec le § relatif aux eaux superficielles
Eaux superficielles	OUI	
Eaux souterraines	OUI	
Air	OUI	
Bruit	OUI	
Déchets banals produits par STOCAMINE	OUI	Eventuellement estimer les quantités qui seront produites catégorie par catégorie
Paysage	OUI	
Impact socio-économique	OUI	

Tableau 1.2-3 : Thèmes traités dans l'étude d'impact relativement aux effets de l'exploitation

L'analyse des mesures envisagées pour limiter les inconvénients inhérents à l'exploitation fait l'objet du chapitre 5 de l'étude d'impact. L'ensemble des thèmes à aborder relativement à ce point l'ont été effectivement (voir le tableau 1.2-4 ci-dessous). Toutefois, dans un souci d'exhaustivité, l'INERIS a demandé à la société STOCAMINE d'apporter certaines données complémentaires pouvant être utiles au dossier. La réponse à cette demande est à trouver à l'annexe F du présent rapport.

<b>d1) Mesures pour limiter les impacts sur l'environnement</b>		
<b>Milieu ou source concerné</b>	<b>Traité ?</b>	<b>Compléments à apporter</b>
Sols	OUI	Description sommaire et schéma des équipements projetés de recueil des pollutions (fournis en réponse : voir annexe F)
Eaux superficielles	OUI	Idem Sols
Eaux souterraines	OUI	
Air	OUI	
Bruit	OUI	
Déchets	OUI	
Paysage	OUI	
Impact socio-économique	OUI	

*Tableau 1.2-4 : Thèmes traités dans l'étude d'impact relativement aux mesures de limitations des effets*

**En conclusion** de la question relative aux mesures de limitations des effets, l'INERIS émet les avis suivants :

- Le point principal concerne le danger de pollution de la nappe phréatique, très proche de la surface. Ce point, ainsi que l'adéquation des équipements prévus pour empêcher cette pollution sur l'environnement sera traité dans le chapitre 2 du présent rapport.
- Un programme de surveillance des impacts éventuels du site sur son environnement doit être établi. Il définira le type de mesures, leur localisation et leur fréquence pour juger de l'évolution des effets sur les différents milieux (air, eau, sol, niveau sonore).

L'analyse des dépenses correspondant aux mesures de limitation des effets de l'exploitation sur son environnement a été traitée au chapitre 5 de l'étude d'impact.

Ces dépenses représentent les investissements inhérents aux mesures prises pour limiter les impacts sur :

- Le paysage, la flore, la faune ;
- Les eaux superficielles ;
- Les sols ;
- Les eaux souterraines ;
- L'air ;
- Le niveau sonore, la circulation ...

Les dépenses correspondant aux principales mesures prises pour limiter les impacts ont été évaluées.

L'analyse des conditions de remise en état du site a fait l'objet du chapitre 6 de l'étude d'impact. L'ensemble des thèmes à aborder relativement à ce point l'ont été effectivement (voir le tableau 1.2-5 ci-dessous). Toutefois, dans un souci d'exhaustivité, certaines vérifications devraient être prévues. Elles sont listées dans la conclusion ci-dessous.

<b>e) Remise en état du site</b>		
<b>Aspects concerné</b>	<b>Traité ?</b>	<b>Remarques</b>
Techniques	OUI	Il conviendrait d'apporter un complément d'étude pour les installations de surface, notamment pour les équipements de traitement des effluents.
Impacts résiduels pour l'environnement	OUI	Idem Aspects Techniques
Financiers	OUI	Il conviendrait de prendre en compte le coût de remise en état des installations de surface du site.

*Tableau 1.2-5 : Thèmes traités dans l'étude d'impact relatifs à la remise en état du site*

**En conclusion** de la question relative à la remise en état du site, et après compléments apportés par la société STOCAMINE, l'INERIS émet les avis suivants :

- En ce qui concerne le jour, il est actuellement prévu la démolition des bâtiments spécifiques miniers (chevalement, machine d'extraction ...) et la réutilisation pour d'autres activités des bâtiments de type bureaux ou hangars.

Ceci suppose évidemment que l'absence de pollution ait été établie, en particulier pour les sols. Cette vérification s'appuiera sur les mesures de surveillance effectuées au cours de l'exploitation, ainsi que sur le recueil des incidents et accidents ayant pu se produire. Si une pollution était détectée, la zone concernée devrait être traitée.

Dans ces conditions, les impacts résiduels des installations jour sont sans conséquence sur l'environnement.

- Relativement à la remise en état du fond, les impacts résiduels éventuels dépendent de l'évolution à long terme du stockage, et à ce titre font l'objet du chapitre 3 du présent rapport.

**En conclusion** générale sur le contenu de l'étude d'impact, l'INERIS note que :

- Des mesures prises pour lutter contre le danger de pollution de la nappe phréatique sont proposées dans le dossier. Le paragraphe 2.4 de la présente étude en fait l'examen critique.
- Le point principal à retenir concerne la mise en place nécessaire d'un programme de surveillance des impacts sur le site et son environnement résultant de l'exploitation.

Ce programme de surveillance doit bien évidemment débuter par une analyse de la qualité des différents milieux (air, eau, sol, bruit) sur site et hors site avant le début de l'exploitation (état zéro), et se poursuivre pendant toute la durée de l'exploitation. Il définira les types de mesures, leur localisation et leur fréquence, ainsi que les modalités de consignation des informations recueillies.

Il servira notamment à gérer les risques éventuels de pollution sur l'environnement durant l'exploitation, ainsi qu'à évaluer (et traiter si nécessaire) les impacts résiduels lors de la remise en état du site au jour.

### **1.3 Contenu de la Notice Hygiène et Sécurité**

La partie du dossier relative à la notice Hygiène et Sécurité est à trouver aux pages 152 à 158 incluses du document principal.

les thèmes qui y sont abordés sont les suivants :

- \* sécurité de l'exploitation du centre de stockage,
- \* sécurité en cas d'accident,
- \* mesures d'hygiène et de suivi médical,
- \* formation et personnel.

De manière générale, l'INERIS remarque que cette notice définit bien les moyens de prévention et de protection, le principe des consignes d'exploitation à mettre en place pour la protection des opérateurs.

La formation particulière nécessaire pour les opérateurs est définie dans ses grandes lignes. Ainsi, est-il abordé dans ce cadre le thème du risque incendie, pour lequel l'INERIS recommande une formation adaptée, au vu des scénarios traités dans l'étude des dangers, complétés à la partie 2 du présent rapport.

En outre, l'INERIS préconise la mise en place de niches de secours pour le personnel.

## 1.4 Contenu de l'étude des dangers

Cette partie a pour objet de s'assurer que l'étude réalisée par la société PEC SIE a pris en compte l'ensemble des risques liés à l'activité, et que les scénarios d'accidents retenus sont pertinents.

### 1.4.1 Remarques générales, exhaustivité des thèmes traités

De manière générale, l'étude des dangers a pour vocation de faire apparaître les accidents inhérents à l'exploitation susceptibles d'intervenir, et de définir les mesures permettant de réduire le risque d'occurrence et les conséquences des accidents potentiels répertoriés.

Afin d'identifier ces accidents potentiels, de mesurer les conséquences des plus importants, et de proposer des systèmes de prévention et de protection adaptés, la trame suivante est souvent retenue :

- Présentation et utilisation de méthodes éprouvées d'analyse des risques, dans le but d'identifier les événements susceptibles de conduire à un accident ;
- Définition et quantification des conséquences des scénarios d'accident considérés comme dimensionnants, soit parce que leur probabilité d'occurrence est telle qu'ils ne peuvent être ignorés, soit parce que leurs conséquences sont majorantes ;
- Présentation des mesures de prévention et de protection adaptées au contexte de l'exploitation.

L'ensemble des thèmes que représente cette trame ont été traités dans l'étude des dangers du projet STOCAMINE :

- La présentation de la méthodologie d'analyse fait l'objet du chapitre I de l'étude,
- L'analyse des risques peut ensuite être découpée de la manière suivante :
  - \* **Risques naturels.** Cette question est traitée au chapitre II de l'étude.
  - \* **Dangers propres à l'installation.** L'étude a traité quatre types de risques : chimique (chapitre III), mécanique (chapitre IV), électrique (chapitre V), risque lié à l'exploitation minière (chapitre VI).
  - \* **Dangers liés aux activités extérieures.** Cette question a fait l'objet du chapitre VII de l'étude.
- L'identification et la définition des scénarios a fait l'objet du chapitre VIII de l'étude,
- Les scénarios retenus ont été traités au chapitre IX de l'étude.
- La question des moyens de prévention et d'intervention les concernant est également abordée au chapitre IX.
- Les consignes d'exploitation et de sécurité, plus générales, font l'objet du chapitre X.

De ce qui précède, on peut retenir que, de manière générale, les thèmes devant être traités dans l'étude des dangers l'ont été effectivement.

Dans les paragraphes qui suivent, des remarques détaillées sont émises sur le contenu spécifique de ces différents thèmes.

#### ***1.4.1.1 Identification et Prévention des risques***

**Relativement aux risques naturels**, tout d'abord, seuls les risques d'inondations et de séisme sont abordés. La question de la protection contre la foudre, notamment, n'a pas été traitée. Or la circulaire n° 93-17 du 28 janvier 1993 stipule qu'une étude préalable à l'installation de protections contre la foudre « *mérite de faire partie intégrante de l'étude des dangers jointe au dossier de demande d'autorisation* ».

**Relativement aux dangers propres à l'installation**, aucune étude des accidents et incidents passés ayant eu lieu sur des installations de même nature, pourtant riche en enseignements, n'existe à ce jour.

L'activité principale concernée par le projet STOCAMINE est une activité minière. A ce sujet, l'INERIS dispose de nombreuses références accidentelles. Le dépouillement des statistiques relatives à l'ensemble de ces références montre que les types d'accidents suivants peuvent être rencontrés au fond de manière générale :

- Instabilité de terrains,
- Perturbation des aquifères,
- Chutes, collisions,
- Incendie,
- Explosions, Grisou,
- Risques naturels (irruption d'eau, séisme, foudre).

Compte-tenu du contexte lié au projet STOCAMINE, les risques suivants seront retenus relativement au court terme :

- Chutes, collisions,
- Incendie,
- Grisou,
- Risques naturels (notamment séisme, foudre).

Les autres risques sont traités dans la partie relative au long terme.

Quant aux activités liées à la manutention et à l'entreposage au jour, l'INERIS ne dispose pas de statistiques accidentelles détaillées. Néanmoins, les risques d'incendie et de collision peuvent être retenus en première approche pour les risques à court terme.

#### **1.4.1.2 Synthèse de l'analyse des risques et conclusion sur l'exhaustivité des thèmes traités**

La méthodologie utilisée fait mal apparaître l'exhaustivité de l'analyse des risques. En conséquence, la justification des scénarios retenus a du mal à apparaître clairement. Par ailleurs, le chapitre consacré à l'évaluation de certains scénarios ne donne pas lieu à une quantification des effets.

Toutefois, il convient de noter que, de manière générale, tous les thèmes à aborder ont été traités. Seules quelques remarques de détail peuvent être formulées, notamment relativement à la prise en compte du risque induit par la foudre. Au sujet du retour d'expérience relatif aux accidents ayant eu lieu sur des installations de même nature, l'examen d'accidents ayant concerné une activité minière d'une part et une activité d'entreposage d'autre part, est à même de fournir des indications utiles dans le cadre du projet STOCAMINE.

Par ailleurs, dans le souci de s'assurer de l'exhaustivité de l'analyse des risques réalisée, l'INERIS a mené une Analyse Préliminaire des Dangers, qui fait l'objet du paragraphe 1.4.2 suivant.

Enfin, les scénarios retenus font l'objet d'une étude quantifiée spécifique. Ils sont présentés au chapitre 2 de la présente étude.

#### **1.4.2 Analyse préliminaire des dangers**

Pour s'assurer de l'exhaustivité de l'étude des dangers et du bon choix des scénarios dimensionnants, l'INERIS a réalisé une analyse préliminaire des dangers.

La méthode d'identification et d'analyse des dangers est choisie au vu des spécificités de l'installation, en restant conforme aux pratiques habituelles de réalisation des études de dangers réglementaires.

L'analyse des dangers s'intéresse aux effets sur les travailleurs, des situations dangereuses pertinentes, c'est à dire celles pouvant occasionner un accident aux conséquences significatives. Elle vise à caractériser les phénomènes redoutés du point de vue de leurs zones d'effets, de leur gravité et de leur fréquence. En revanche, elle n'inclut pas les risques chroniques auxquels est exposée la santé des travailleurs dans les différentes phases de l'installation. Ces risques sont pris en compte dans la Notice de Conformité à l'Hygiène et à la Sécurité.

Parmi les différentes méthodes générales d'identification et d'analyse des dangers possibles, la méthode retenue est celle, pour employer des termes consacrés par l'usage, de *l'analyse préliminaire des dangers*, qui permet d'identifier l'ensemble des situations dangereuses, quelles que soient leurs zones d'effets.

A partir des résultats obtenus par cette méthode, on retient donc, pour l'analyse des dangers, les situations dangereuses aux conséquences significatives en terme de fréquence, de gravité et de zones d'effets.

Les résultats d'application de la méthodologie permettent d'identifier l'ensemble des mesures de prévention et de protection à mettre en œuvre pour assurer un niveau minimal de risque résiduel. C'est en fonction de ce risque résiduel que les scénarios de référence sont choisis.

Au sujet de la méthode d'analyse préliminaire des dangers, on pourra noter qu'elle a été utilisée pour la première fois dans les industries aéronautique et militaire américaines au début des années 60. Son utilisation a ensuite été étendue à l'ensemble des domaines d'activités industriels dont l'industrie chimique. Il est important de souligner l'aspect inductif de la méthode, dans la mesure où il permet de vérifier que le système global étudié a bien été examiné dans tous ses sous-systèmes. Sa formalisation pour les installations souterraines est relativement récente.

#### ***1.4.2.1 Analyse générale du procédé***

La figure 1.4-1 ci-dessous présente le procédé de stockage des déchets en mine, du point de vue de l'occurrence d'accident. La particularité du projet examiné permet de scinder les arbres de défaillance, limitant ainsi fortement les possibilités d'accidents.

La première disposition consiste à séparer les activités de creusement des cavités de celles relatives à la manutention des déchets.

Ces deux opérations sont disjointes dans l'espace. En effet, les zones en creusement et en cours de stockage sont séparées physiquement entre elles par des murs d'isolement. Seul les puits d'entrée et de retour d'air sont communs aux deux activités.

En effet, pour ce qui concerne l'entrée d'air notamment, le circuit visite et les quartiers d'exploitation sont en aval aérage du puits JOSEPH, par lequel les déchets sont acheminés vers les cavités de stockage. Néanmoins, on peut remarquer que les cavités en phase de creusement sont indépendantes des cavités en phase de stockage relativement à l'entrée d'air.

Ainsi, de manière générale, il convient de noter qu'il n'y a pas d'influence des opérations de creusement sur les activités de manutention. Toutefois, dans un but de protection du personnel, il est inversement nécessaire de s'assurer que les activités de manutention ne sont pas touchées par les conséquences sur l'aérage des accidents considérés dans les scénarios.

Les opérations de manutention ne présentent aucun risque tant que l'intégrité du contenant est maintenue, et ce quelle que soit la nature des produits manutentionnés. On peut encore définir ici une coupure dans les arbres de défaillance : si la nature des produits est telle qu'elle n'influe pas sur le contenant, alors elle ne joue plus que sur les conséquences de l'incident.

Ainsi, il faut s'assurer que la nature des produits admis au stockage est telle que l'intégrité du contenant n'est pas remise en cause. A ce titre, le paragraphe 1.4.2.2 suivant traite de la question de l'adéquation des 13 groupes de produits avec le type de stockage, et des procédures d'admission des déchets.

D'autre part, l'intégrité du contenant doit être assurée afin d'éviter tout risque de pollution.

Ainsi, de manière générale, l'analyse préliminaire des dangers peut se décomposer en deux parties :

- L'analyse de la procédure d'admission des déchets.
- L'analyse de la rupture accidentelle de l'intégrité du contenant<sup>2</sup>.

Ces deux parties font l'objet des deux paragraphes suivants.

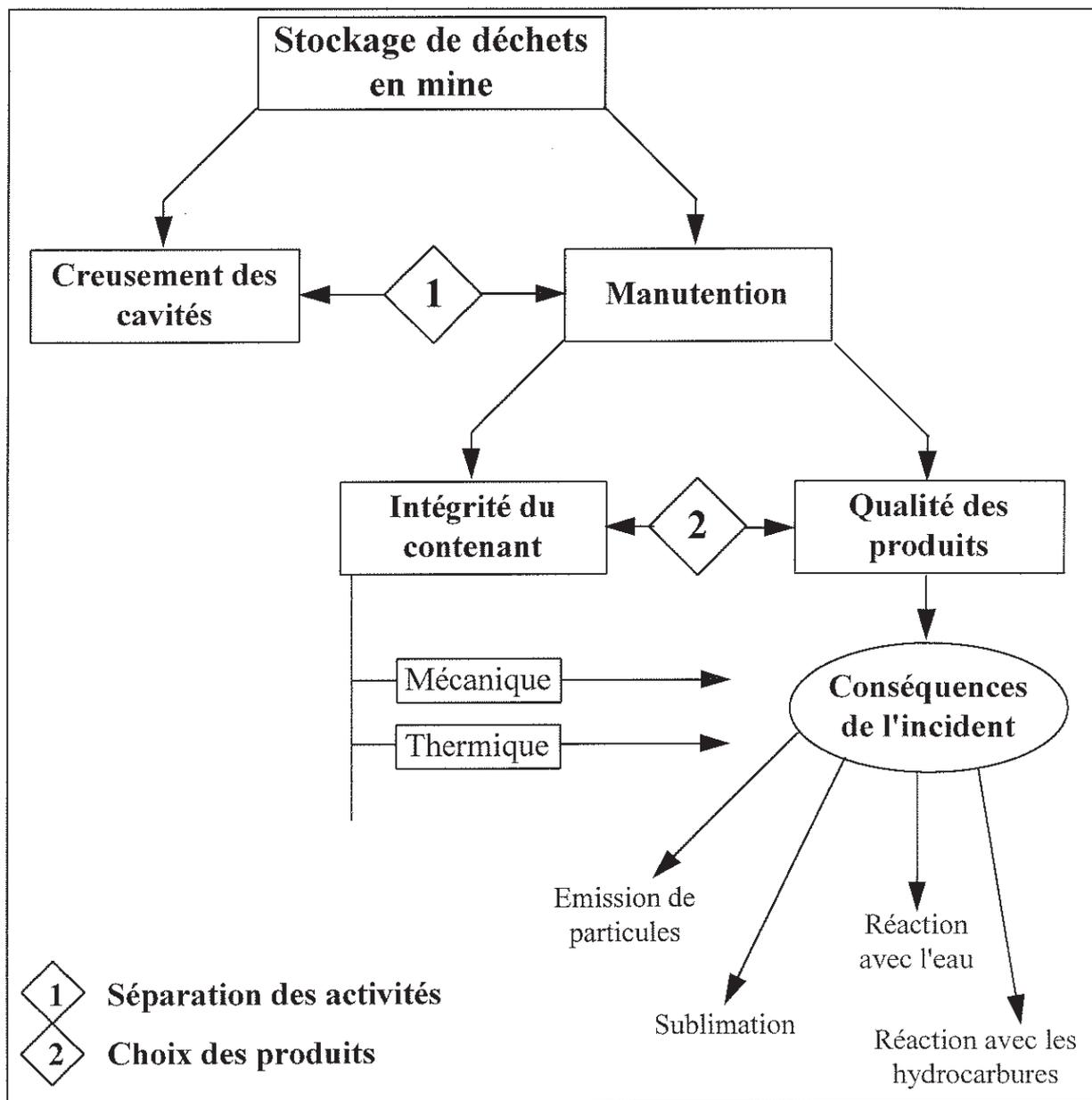


Figure 1.4-1 : Incidents potentiels résultant de l'activité de stockage des déchets en mine

<sup>2</sup> On ne considérera pas ici les risques d'évolution dans le temps de la qualité des contenants, qui sont traités au chapitre 3 du présent examen

### 1.4.2.2 Admission des déchets

Les déchets admissibles au stockage sont répartis en 13 groupes. Leurs caractéristiques principales au vu de l'activité envisagée (aspect physique, réactions possibles avec l'eau, le sel, réactions à la chaleur et caractère comburant éventuel), ont été regroupées ci-dessous dans le tableau 1.4-1 :

Groupes	Aspect Physique	Réaction avec l'eau	Réaction avec le sel	Réaction à la chaleur	Caractère comburant
1) Sels de trempe Cyanurés	Blocs solides	Dégagement de HCN		Dégagement de HCN	
2) Sels de trempe neutres	Solides	Hydrolyse lente. Dégagement de gaz inflammable / explosible	Non, si l'incompatibilité avec les acides est respectée	Dégagement de NOx	OUI
3) Déchets arséniés	Granuleux ou pulvérulent			Dégagement d'As métallique. Sublimation (As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
4) Boues chromiques	Granuleux ou pulvérulent		NON, si l'inertage est bien réalisé		OUI
5) Déchets mercuriels	Granuleux ou pulvérulent			Vapeurs de Hg	
6) Terres polluées	Granuleux ou pulvérulent	Variable (selon produit)		SOx entre autres	
7) Résidus de l'électronique	Solides				
8) Déchets de galvanisation	Granuleux ou pulvérulent			Dégagement de NOx, SOx	
9) Résidus d'incinération	Granuleux ou pulvérulent				
10) Phytosanitaires	Granuleux ou pulvérulent			Dégagement d'As, de Hg	
11) Catalyseurs usés	Granuleux ou pulvérulent				
12) Déchets de laboratoire	Pâte sèche		Oxydants de Labo neutralisés a priori		
13) Déchets amiantés	Solide ou pulvérulent			Diffusion de fibres <sup>3</sup>	

Tableau 1.4-1 : caractéristiques des 13 groupes de déchets admis au stockage

<sup>3</sup> La page 111 du dossier STOCAMINE précise que « le prétraitement et le conditionnement de ces produits seront tels qu'ils interdiront toute émission de poussière même en cas de choc violent ».

L'admission des déchets ne peut être réalisée dans de bonnes conditions que dans la mesure où, d'une part sont clairement définies les incompatibilités des déchets entre eux et avec le contenant (le risque d'agression d'un déchet stocké sur son contenant doit être évité afin d'assurer l'intégrité de ce dernier), et d'autre part des procédures de contrôle d'admission efficaces sont mises en place.

Ces deux points sont examinés ci-dessous.

- **Adéquation des déchets avec le type de stockage**

Pour tous ces déchets, la question est de vérifier :

- que la liste des critères d'exclusion est bien exhaustive,
- que la conformité des différents groupes de déchets avec les critères d'exclusion est assurée.

### **Exhaustivité des critères d'exclusion**

De manière générale, on peut supposer que si l'on prend en compte la nécessité de garantir la sécurité du dépôt et du personnel qui l'exploite, on prend également en compte celle des riverains, en principe moins exposés (dilution ...).

Les critères d'exclusion retenus paraissent tous cohérents avec ce principe général. Parmi ceux-ci, celui qui est relatif au caractère organique réactif est important à considérer.

Deux critères supplémentaires peuvent être pris en considération relativement aux risques pour l'exploitation, et en vue d'assurer la réversibilité. Il s'agit :

- du taux d'humidité dans le déchet, en particulier pour certains groupes, à cause des risques de détérioration par corrosion et des interactions avec le sel plus rapides en cas d'épandage accidentel au fond. Les groupes les plus concernés sont 4, 6, 8 et 9 éventuellement.
- du caractère comburant ou oxydant fort. Cette propriété peut constituer une cause aggravante vis à vis de la mise en contact du déchet avec le sel, surtout en présence d'eau. Le risque de corrosion des fûts peut également être élevé à 40°C (catégories 2 et 4).

Ainsi, des prétraitements de stabilisation, de réduction de l'humidité apparente et l'adéquation du conditionnement sont recommandés.

Au sujet du risque d'interaction comburants - palettes en bois, l'utilisation de palettes ignifugées pour les catégories concernées est conseillée.

Par souci de cohérence, dans la liste des critères d'exclusion il y aurait lieu de déplacer le critère concernant la réactivité avec l'eau, le sel ou une solution saline et de le mettre juste après celui ayant trait aux produits explosibles. Le terme de réactivité avec l'eau est en effet trop général ; il s'agit bien ici d'exclure les produits qui, en présence d'eau ou de solution saline, conduiraient à des produits explosibles et inflammables.

### Conformité des différentes catégories de déchets avec les critères d'exclusion :

D'une manière générale, en vue de leur applicabilité, tous ces critères doivent être assortis de seuils ou de clauses précises et de prescriptions ou de recommandations en ce qui concerne la détermination des paramètres correspondants (normes ou autres).

En ce qui concerne l'aspect toxicité lié au critère d'exclusion « volatilité », les V.L.E. et V.M.E. des différents composés susceptibles d'être émis par les déchets doivent être rappelés dans les consignes de sécurité de l'installation.

Le détail des critères d'exclusion à appliquer de l'avis de l'INERIS aux différents groupes (dont les caractéristiques principales sont rappelées au tableau 1.4-1 ci-dessus) est explicité dans le tableau 1.4-2 ci-dessous :

Numéro du groupe	Remarques générales	Commentaires spécifiques
1	a	Compte-tenu des de la réactivité de ces déchets en présence d'eau et de sel, pouvant conduire à un dégagement d'HCN, les seuils doivent être fixés avec la plus grande attention
2	a	Problème de réactivité avec du sel ou une solution saline
3	a	
4	a, b, c	Problème de réactivité avec le sel, aggravé si le déchet est humide
5	a, b	Vérifier que les mesures d'inertage évitent les risques de dégazage dans les conditions de stockage, certains composés du mercure ayant une tension de vapeur non négligeable
6	c	
7		
8	c	
9	c	La remarque générale (c) ci-contre s'applique en cas d'admission de gâteaux de traitement humide de fumées. Compte-tenu de la nature des différents produits susceptibles de se retrouver dans ce groupe, des interactions sont possibles, quoique faibles
10	a, b	
11		Il ne doit pas y avoir de métaux finement divisés dans des déchets susceptibles d'être admis dans ce groupe. Les catalyseurs à composante organique doivent également être exclus
12		
13	a	

- a) Ce groupe doit faire l'objet d'une attention particulière pour l'étude du conditionnement
- b) Ce groupe doit faire l'objet d'une attention particulière pour l'étude de l'inertage
- c) Le conditionnement doit être adapté à la présence d'une éventuelle humidité dans les déchets et d'un caractère corrosif important

- **Exhaustivité des procédures d'admission des déchets**

Le paragraphe qui suit a pour objet de vérifier l'exhaustivité, la pertinence et le bon fonctionnement des procédures d'admission et de contrôle des lots, ainsi que leur adéquation avec les critères d'exclusion.

Les procédures à examiner sont les suivantes :

- Procédures d'acceptation. Elles comprennent :

1) L'acceptation du producteur. Elle est conditionnée par les règles de transparence fixées par STOCAMINE relativement à l'origine des produits, aux processus de production, et au respect de procédures qualité en règle générale.

La traduction des critères d'exclusion en terme de provenance et de filière d'origine conduit à établir des listes d'activités interdites d'accès au stockage, grâce par exemple à un questionnaire détaillé d'identification du producteur, de façon à pouvoir anticiper, en amont de la procédure, les risques de non-conformité pour l'acceptation au stockage et le contrôle sur lot. Ce questionnaire pourrait inclure notamment des renseignements sur les procédés mis en œuvre par l'entreprise.

Cette question fait partie de la procédure qualité prévue dans le projet.

2) La vérification de la conformité du produit avec l'Arrêté Préfectoral à venir autorisant l'exploitation. Elle se fait à partir de la liste des groupes de produits pouvant être stockés en mines et des critères d'exclusion.

Il convient de noter qu'un déchet peut appartenir à deux groupes ou plus de la liste (par exemple : Déchets arséniés et terres polluées (remblais contenant terres polluées + gypses arséniés en forte concentration)).

Dans les quelques cas ambigus concernant essentiellement les groupes 6 (terres polluées) et 10 (produits phytosanitaires), des règles simples de choix (polluant majoritaire ou limite en teneur) devront être établies. Les compatibilités devraient alors être le premier facteur pris en compte : par exemple terres souillées par des déchets chromiques = groupe 4.

3) L'instruction du dossier, qui est basée sur :

\* La fiche d'identification remplie par le producteur.

Elle recense de nombreuses informations sur le déchet.

Il est important que cette fiche fasse état des éventuels prétraitements effectués avant envoi. Ceux-ci influencent la composition et la structure du déchet.

On peut noter que les critères déchets radioactifs et déchets infectieux sont couverts par la connaissance de la nature du déchet et de sa genèse.

Il convient donc de spécifier que le déchet ne provient ni d'une filière

mettant en jeu des produits radioactifs ni d'une filière comportant des produits infectieux ou des toxiques biologiques.

L'ensemble des points à vérifier semble correctement couvrir les différents autres critères d'exclusion.

Les tests, méthodes et procédures d'analyse sont à préciser pour chaque groupe de déchets, particulièrement en ce qui concerne les points suivants : composition chimique du déchet, teneur en eau ou en liquide, point de fusion, point d'ébullition, point éclair, solubilité dans l'eau et pH, pression de vapeur à 45 °C et dégagements gazeux éventuels dans les conditions de stockage, résultat des tests de stabilité thermique.

Il conviendra donc de communiquer au producteur du déchet une liste indicative des normes et méthodes à appliquer et de lui demander d'indiquer explicitement l'utilisation d'autres méthodes que celles recommandées.

Par ailleurs, il serait bon de prévoir une ligne faisant référence à la réactivité avec l'eau, avec le sel ou avec une solution saline.

\* Les analyses.

L'échantillonnage est une des composantes primordiales de la représentativité de l'échantillon. Il est important, soit que STOCAMINE propose au producteur une méthodologie pour le prélèvement de son échantillon, soit que le producteur décrive la méthodologie selon laquelle il a procédé pour le prélèvement de son échantillon représentatif. Il est en effet indispensable de s'assurer d'un bon degré de représentativité de l'échantillon.

Il est également essentiel d'établir une liste indicative des tests à réaliser et des paramètres physico-chimiques et chimiques à analyser par catégories de déchet. Ces paramètres auront pour objectif de garantir le respect des critères d'exclusion, tout en tenant compte de la spécificité physico-chimique du déchet. Les spécificités de chaque déchet seront, bien entendu prises en compte pour le choix définitif des paramètres.

\* Une déclaration de « Non-valorisation ».

Elle ne sera valable que pour un déchet donné, à une date donnée, dans les conditions technico-économiques prévalant à cette date.

4) L'offre technico-commerciale

Les spécifications concernant les contenants sont claires et bien détaillées ; les procédures de contrôle et d'acceptation sont satisfaisantes.

Les règles générales d'adéquation déchet / prétraitement / contenant devront être énoncées de manière plus détaillée et en particulier l'exclusion de certains types de conditionnements pour certains groupes de déchets.

5) Les contrôles sur les déchets

La bonne connaissance des producteurs, l'agrément et les plans d'assurance qualité des centres de conditionnement ainsi que les contrôles à l'arrivée (au moins un échantillon par lot) doivent mettre à l'abri des surprises.

- Procédure de contrôle à réception.

Comme pour les tests et analyses destinés à l'acceptation, il serait utile d'établir une liste indicative des tests et des paramètres à mesurer par groupes de déchets ainsi que des normes et méthodes recommandées pour ces mesures. Elles pourraient faire partie des plans d'assurance qualité des laboratoires concernés.

Certains points de cette procédure appellent de la part de l'INERIS quelques remarques, relativement :

\* au contrôle à l'arrivée.

Le contrôle de la conformité des contenants : prescriptions, état, aspect, signalisation, marquage est très important. Le marquage devrait en particulier comporter un code très visible pour manifester l'appartenance à un des 4 groupes de compatibilité.

\* à l'ouverture des contenants et au contrôle sur contenants ouverts.

Le contrôle de l'absence de gaz ne doit pas se limiter aux gaz explosibles mais doit prendre en compte toute surpression, manifestation d'une instabilité. Des contrôles d'évolution de pression au fond après stabilisation de la température sont à envisager pour les lots manifestant des pressions anormales.

Au niveau des contrôles sur fût ouvert, on peut envisager d'ajouter un contrôle direct de la radioactivité.

\* à l'analyse d'échantillons.

C'est un point très important du contrôle puisqu'il est le dernier verrou de la procédure. Le choix d'un contenant dans un lot peut être réalisé au hasard, mais la constitution d'un échantillon représentatif de celui-ci doit être réalisé avec une méthodologie spécifique. En effet, au cours du transport, le déchet peut subir des phénomènes de sédimentation, de démixtion des tranches granulométriques, de séparation de phases qui vont créer des hétérogénéités significatives. L'échantillonnage est à ce niveau très important.

Une liste indicative des paramètres à analyser par catégorie de déchet et des normes et méthodes recommandées doit être établie. Par ailleurs, en cas de prétraitement du déchet lors du conditionnement, le mode de vérification de la conformité de celui-ci devra être précisé.

\* à des contrôles inopinés.

Il serait intéressant que la procédure de contrôle soit suffisamment fréquente pour éviter toute dérive du laboratoire. Sa fréquence reste à déterminer.

\* à un contrôle de non-radioactivité.

Tous les fûts passent sous un portique. Des valeurs seuil doivent être fixées. Une procédure de contrôle supplémentaire prévoyant l'ouverture d'au moins un fût par lot, une vérification de la radioactivité sur celui-ci peut facilement être effectuée.

- \* à la bibliothèque d'échantillon.  
Pour que cette à la bibliothèque d'échantillon soit utile, il est indispensable que les échantillons prélevés soient véritablement représentatifs des déchets mis en fond de mine. Une méthodologie d'échantillonnage bien détaillée suivant les caractéristiques des déchets est encore ici primordiale.
- \* au plan de stockage.  
Sa bonne conception, son respect et sa mise à jour rigoureux conditionnent la sécurité du stockage et sa réversibilité. En particulier, le marquage de la catégorie de compatibilité et de l'emplacement au fond doivent être très lisibles.
- \* aux registres, comptabilité, documentation.  
Leur tenue soignée et en temps réel conditionne en dernier ressort la fiabilité de l'ensemble. L'information régulière et rapide des autorités est indispensable, en particulier en cas de refus d'un chargement.

### **1.4.2.3 Rupture accidentelle des contenants**

La rupture des contenants peut être obtenue par deux types d'agressions :

- Impact mécanique : à la suite d'une chute ou d'un choc,
- Impact thermique : on considère qu'un colis soumis à une température élevée est susceptible de s'ouvrir et de répandre son contenu. Cette température serait à préciser pour les différents types de contenants dans les spécifications.

Le procédé de manutention comprend les opérations décrites dans le tableau 1.4-3 ci-dessous.

- Le tableau a été établi pour un approvisionnement par camion. Dans le cas d'un wagon, les quantités de déchets mises en jeu sont plus importantes, mais les possibilités d'accident sont beaucoup plus faibles, tant pour les collisions que pour un incendie.
- Il n'est pas tenu compte de l'interaction avec les autres activités jour du centre ; du fait de l'absence de stockage de fuel au jour, les quantités de combustibles sont limitées (dépôt d'huile, bâtiment commun).

L'analyse préliminaire des dangers liés à ce procédé fait l'objet d'un tableau de synthèse établi par l'INERIS, fourni en annexe B.

Dans cette analyse préliminaire, les points 15 et 16 du tableau 1.4-3 ne sont pas retenus car on peut considérer que les opérations élémentaires concernées sont dissociées de l'activité de stockage. Par ailleurs, le scénario d'incendie de la cuve de fioul au fond n'a pas été retenu dans la mesure où une galerie de faible section assure un by-pass du circuit d'aérage, permettant l'évacuation des fumées sans incidence sur la zone de manutention et de stockage des déchets.

	Opération élémentaire	Quantité de déchets mise en jeu	Risque Mécanique	Risque Thermique	Observations
1	Entrée du camion sur le site	20 T, 17 palettes	Collision camion	Incendie camion	Eloignement camions, moteurs arrêtés
2	Stationnement en attente	Idem			
3	Positionnement sur l'aire de déchargement	Idem	Collision camion	Incendie camion	
4	Déchargement sur l'aire devant le laboratoire (par engin à fourche)	20 T, 17 palettes	Collision engin perçement par fourche	Incendie camion Incendie engin	Mur pare feu entre l'aire de déchargement et l'entrepôt jour
5	Ouverture de fûts pour contrôle au labo	1 fût	Renversement		
6	Reprise pour entrepôt au jour, ou descente	200 palettes (entrepôt) 1 palette manipulée	Collision engin perçement par fourche	Incendie engin	
7	Reprise entrepôt jour et encagement	Idem	Idem	Idem	Conséquence pour l'entrée d'air
8	Descente dans la cage (engin à fourche)	2 palettes	Chute de la cage Chute à partir de la cage		Entrée d'air Eau
9	Sortie de cage	2 palettes	Collision engin perçement par fourche	Incendie engin	Idem
10	Transfert à la plateforme de transit	50 palettes (plateforme) 1 palette manipulée	Idem	Idem	
11	Chargement sur engin de transport	2 palettes	Idem avec les 2 engins	Idem avec les 2 engins	
12	Transferts au bloc de stockage (1500 m)	Idem	Collision engin de transport	Incendie engin de transport	Un seul engin de transport considéré
13	Déchargement par engin à fourche	2 palettes manipulées Stockage fond	Idem avec 2 engins	Idem avec deux engins	
14	Mise en place dans stockage	Idem	Idem avec engin à fourche	Idem avec engin à fourche	
15	Transport de la cuve de fioul jour/fond			Incendie cuve	Citerne 1000 l
16	Ravitaillement des engins au fond			Incendie cuve et engin	Liaison directe aéraie avec retour d'air

Tableau 1.4-3 : Tableau résumé ; risques liés à la manutention

De cette analyse préliminaire, compte-tenu des quantités de déchets mises en jeu et des zones d'effets de risques résiduels, on est fondé à retenir les scénarios suivants :

- \* Chute d'un colis dans le puits (n° 8 dans les tableaux 1.4-3 et annexe B),
- \* Incendie d'un camion sur l'aire de déchargement au jour (n° 3 dans les tableaux 1.4-3 et annexe B),
- \* Incendie de l'engin de transport au fond (n° 12 dans les tableaux 1.4-3 et annexe B).

L'existence d'un mur coupe-feu permettant de séparer le stockage temporaire au jour de l'aire de déchargement permet de ne pas retenir un scénario d'incendie généralisé au véhicule de livraison et à l'entrepôt. De ce fait, le scénario dimensionnant au jour correspond sans conteste à l'incendie d'un camion chargé de palettes.

Pour ce qui concerne la partie souterraine, deux types de scénarios peuvent être retenus, celui de la chute d'un colis, et celui d'un incendie. L'incendie le plus important que l'on puisse considérer correspond à la présence en quantité notable de produits inflammables. C'est le cas lors du transport de déchets sur l'engin de transport au fond (CT 2500). Ce scénario permet de dimensionner les moyens à mettre éventuellement en œuvre pour éviter l'embrassement général du stockage.

Dans l'étude des dangers, les scénarios retenus sont les suivants :

- \* Scénario 1 : Chute de fûts dans le puits (paragraphe 9.1 de l'étude PEC-SIE),
- \* Scénario 2 : Incendie d'un véhicule minier (paragraphe 9.2 de l'étude PEC-SIE),
- \* Scénario 3 : Incendie en surface sur le stockage de fûts (paragraphe 9.3 de l'étude PEC-SIE).

L'analyse de l'INERIS a conduit à une modélisation quantitative des effets associés aux scénarios dimensionnants.

Par ailleurs, pour les scénarios retenus dans l'étude des dangers, l'incidence des différents groupes de déchets conduit l'INERIS à formuler les remarques suivantes :

- **Scénario 1.** Pour les phénomènes chimiques, le risque maximal envisagé est celui résultant de la mise en contact des déchets du groupe 1 avec l'eau de ruissellement, si les seules interactions sont celles résultant de la mise en contact des déchets et de l'eau. Par contre, si le sel peut interagir, les déchets à caractère acide ou oxydant peuvent conduire, surtout en présence d'eau (ruissellement ou déchet lui-même humide) à des dégagements de gaz toxiques : chlore et acide chlorhydrique.

Pour les phénomènes physiques, il convient de noter que l'amiante, groupe 13, peut présenter deux dangers, liés l'un aux toxiques chimiques qui y sont adsorbés, l'autre aux fibres d'amiante qui constituent elles-mêmes un risque pour la santé. Le premier danger paraît effectivement écarté par le caractère adsorbant et stabilisant de l'amiante. Par contre, le danger de dispersion des fibres dans l'air d'aération en cas d'éventration de contenants à la suite d'une chute dans le puits ou autre, est à prendre en considération. Compte-tenu du circuit d'aération (entrée d'air par le puits de descente), les fibres mises en suspension dans l'air pourraient contaminer toutes les zones balayées assez rapidement. Il est vrai qu'il s'agit d'une toxicité à long terme.

Toutefois, elle risque d'être rémanente si les fibres peuvent se déposer et être ensuite remises en suspension par les activités. En conséquence, un traitement approprié doit être envisagé.

Les produits pulvérulents secs (cendres d'incinération groupe 9, déchets arséniés groupe 3, déchets mercuriels groupe 5, produits phytosanitaires groupe 10, et catalyseurs usés groupe 11) pourraient poser des problèmes similaires de dispersion de poussières dans les parties ouvertes du stockage. Les risques seraient alors liés à la toxicité chimique par inhalation de poussières. La nature et la solidité des conditionnements sont des caractéristiques importantes, conditionnant en particulier des éventrations au fond : les big-bags en particulier sont susceptibles de déchirures plus facilement que les fûts de 200 l, et a fortiori que ceux de 120 l, eux-mêmes noyés dans des fûts de 200 l bétonnés.

Au titre du caractère pulvérulent, l'INERIS note que le projet STOCAMINE, en sa page 111, prévoit pour ces produits un « *prétraitement et conditionnement [...] tels qu'ils interdiront toute émission de poussière, même en cas de choc violent* ».

- **Scénario 2** : Relativement au premier groupe de déchets, on peut noter que, parmi les substances pouvant être dégagées par la chaleur, on peut citer l'acide cyanhydrique gazeux, comme pouvant résulter des sels de trempe cyanurés.

Le groupe 4 des déchets peut quant à lui présenter un caractère comburant.

Relativement aux groupes 5 et 10, le cas du mercure, plus volatil que l'arsenic doit être pris en compte en ce qui concerne la possibilité d'émettre des vapeurs en cas d'incendie.

De manière générale, une enveloppe de béton pourrait être prévue pour le stockage des groupes 3, 5 et 10.

Une remarque de détail concerne le seuil olfactif bas du HCN. En cas de feu en effet, d'autres odeurs de combustion ont toutes les chances de masquer celle assez discrète d'amandes amères.

Par ailleurs, il pourrait être utile de formuler des considérations portant sur la description de mesures post-sinistre, et notamment sur les reconditionnement et déstockage des conteneurs susceptibles d'avoir été détériorés, puis le retraitement éventuel des déchets. La chaleur peut avoir déstabilisé ou avoir favorisé la corrosion de certains fûts, voire fondu certains emballages ou provoqué des surpressions durables. Une décontamination éventuelle doit également être entreprise, ainsi que la vérification de l'absence de contaminations rémanentes.

Ces mesures font partie des plans d'intervention ou consignes de sécurité.

- **Scénario 3** : Il est nécessaire de prendre en considération la nature toxique des déchets, lors de l'ouverture des fûts sous l'effet d'un incendie. Par ailleurs, la question de l'absorption éventuelle des fumées émises au jour dans le circuit d'aération au fond doit être posée.

Comme dans le cas du scénario 2, les actions post-sinistre doivent être décrites.

## 1.5 Conclusion

L'ensemble des documentations et des études requises par la réglementation a été fourni dans le dossier. Le document de synthèse intitulé "une mine au service de l'environnement" s'appuie sur des études intéressantes, bien documentées, effectuées par des organismes compétents. Sur le contenu général du dossier, les seules remarques de l'INERIS portent sur la lisibilité (renvois à l'intérieur du document et entre le document et les annexes).

L'étude d'impact traite exhaustivement l'ensemble des thèmes exigés par la réglementation. Pour la clarté du dossier, l'INERIS a demandé à la société STOCAMINE de fournir des informations complémentaires qui ont été annexées au rapport.

L'avis de l'INERIS est que le dossier met bien en évidence les impacts potentiels sur l'environnement et les mesures prises pour les minimiser, le point principal étant le risque de pollution de la nappe phréatique traité dans les paragraphes suivants.

L'INERIS recommande la mise en place d'un programme de surveillance des impacts. Ce programme devrait débiter par un "état 0" caractérisation des différents milieux (air, sol, eau, bruit) sur site et hors site avant le début de l'exploitation et se poursuivre pendant toute la durée de l'exploitation. La surveillance servira à gérer les risques de pollution en cours d'exploitation et à évaluer les impacts résiduels lors de la remise en état du site au jour.

La notice hygiène et sécurité définit bien les moyens de prévention et de protection, les consignes d'exploitation à mettre en place pour la protection des opérateurs. Elle insiste à juste titre sur l'importance de leur formation aux risques rencontrés. Au vu des scénarios d'incendie, l'INERIS recommande une formation particulière sur ce thème et la mise en place de niches de secours pour le personnel.

L'étude de dangers aborde bien l'ensemble des thèmes habituellement retenus pour ce type d'étude.

L'avis de l'INERIS est que les principaux risques ont été analysés et les mesures de prévention et de protection identifiées. Cependant la méthodologie utilisée fait mal apparaître l'exhaustivité de l'analyse des risques, en conséquence la justification des scénarios d'accident retenus a du mal à apparaître clairement. Par ailleurs, certains scénarios n'ont pas donné lieu à une quantification des effets.

L'INERIS a donc mené une étude complémentaire pour s'assurer de l'exhaustivité de l'étude de dangers, (l'analyse préliminaire des dangers présentée ci-dessous), puis repris les scénarios dimensionnant présentés au chapitre 2 concernant les impacts à court terme.

L'analyse préliminaire des dangers réalisée par l'INERIS s'appuie sur le retour d'expérience d'activités analogues, minières d'une part, entreposage d'autre part. Compte tenu du contexte du projet STOCAMINE, les risques principaux à court terme sont en plus des risques naturels (séisme, foudre, grisou) les risques mécaniques (chute, collision) et les risques d'incendie

L'examen du procédé de stockage montre qu'il est possible de scinder les arbres de défaillance, ce qui limite fortement les possibilités d'accident :

- la séparation dans l'espace des activités de creusement et de manutention permet d'affirmer que les premières n'influent pas sur les secondes,
- la sélection des produits stockés est faite de manière à ce que ces produits n'influent pas sur leur emballage.

Dans ces conditions, l'analyse préliminaire des dangers a porté :

- sur l'adéquation des groupes de produits avec le stockage et la procédure d'admission,
- sur la rupture accidentelle des contenants.

Les conclusions suivantes peuvent être retenues :

- \* Les critères d'exclusion sont bien choisis. Il convient de préciser le terme trop général de réaction avec l'eau ou une solution saline ; il s'agit bien d'exclure les produits qui, en présence d'eau ou de solution saline, conduiraient à des produits explosifs ou inflammables. Une attention particulière sera portée au taux d'humidité de certains déchets ainsi qu'au caractère comburant ou oxydant fort ; le conditionnement sera adapté en conséquence.
- \* La procédure d'acceptation précisera, pour chaque groupe de déchets, la méthode d'analyse et les seuils d'acceptation ainsi que le traitement et conditionnement adapté.
- \* La procédure d'admission des déchets apporte dans son principe toute sécurité sur la nature des déchets stockés. Il appartient à la société STOCAMINE de choisir pour chaque groupe de déchets les méthodes de mesures appropriées. L'INERIS attire l'attention sur les techniques d'échantillonnage à mettre en oeuvre pour obtenir des résultats représentatifs. Les possibilités de contrôle par un organisme compétent à l'initiative de l'Administration ou de la CLIS permettent de s'assurer de l'efficacité du système.
- \* L'analyse des modes de rupture du contenant confirme que les situations les plus dangereuses pour l'environnement sont :
  - la chute d'un colis dans le puits,
  - un incendie au jour : la mise en place de mur coupe feu entre le dépôt de transit jour et l'aire de déchargement permet de limiter le scénario à l'incendie d'un camion en cours de déchargement,
  - un incendie au fond.

## 2. IMPACT A COURT TERME

Les risques résiduels retenus précédemment conduisent l'INERIS à traiter les scénarios suivants :

- Chute d'un colis dans le puits,
- Incendie d'engins au fond,
- Incendie d'un camion en cours de déchargement au jour.

La question de la pollution de la nappe phréatique est en outre examinée, ainsi que les risques liés à la présence de grisou.

### 2.1 Chute d'un colis dans le puits

Ce scénario a été traité dans l'étude des dangers.

Toutefois, relativement aux déchets, leur éventuel caractère toxique a été retenu dans l'évaluation des conséquences de l'accident, sans qu'il soit fait mention de leur éventuel caractère pulvérulent. Cette propriété peut conduire à une mise en suspension dans l'air de poussières toxiques (métaux lourds) en cas de perforation de l'emballage.

En conséquence, un prétraitement et conditionnement adaptés doivent être prévus de manière à ne pas conduire à la mise en suspension de poussières ou de fibres (notamment d'amiante) en cas de chute, comme cela est précisé au chapitre précédent et dans le dossier STOCAMINE.

De manière générale, la compatibilité du déchet avec le type d'emballage doit être étudiée et testée avec soins, notamment pour les conteneurs parallélépipédiques et les big-bags.

Il apparaît donc utile de caractériser les compatibilités déchets-conditionnements.

## 2.2 Scénario d'incendie d'un camion en cours de déchargement au jour

Le scénario envisagé est celui d'un incendie affectant un camion lors d'une opération de déchargement d'une cargaison de déchets. Il s'agit ici d'évaluer les effets sur l'environnement de la dispersion de produits toxiques consécutive à un tel sinistre.

### 2.2.1 Premières hypothèses

Au nombre de trois, elles concernent la configuration du bâtiment de stockage journalier, l'inventaire des matières combustibles et l'importance des moyens de détection et d'extinction très rapide.

- a) Avant tout développement, il convient de souligner que le déchargement est conçu pour avoir lieu près du magasin de stockage journalier.

Lors d'une opération de déchargement, il faut noter que le dit magasin de stockage se trouvera isolé de la zone de déchargement par un ensemble parois + porte d'un degré coupe-feu fixé. En conséquence, dans tout le présent paragraphe, ne seront considérées comme potentiellement agressives que les matières composant la cargaison du camion. Il est entendu que cette cargaison ne peut pas être composée de matières incompatibles entre elles, compte-tenu des partis pris pour le transport.

- b) Le point suivant concerne les matières combustibles susceptibles de nourrir l'incendie.

On relève en premier lieu le carburant du camion, ses pneumatiques, les quelques accessoires combustibles qui l'équipent (sièges, peintures, plastiques), puis les palettes de bois sur lesquelles sont disposés les fûts ou les big bags.

- c) Le retour d'expérience d'incendies de camions montre que les flammes se développent, puis que l'incendie garde une puissance calorifique à peu près constante le reste du temps. Un tel incendie, d'expérience, a une durée totale de quelques dizaines de minutes tout au plus.

C'est donc qu'il faut avant tout que le poste de déchargement dispose de moyens d'extinction permettant une intervention rapide, adaptée aux produits mis en jeu, et efficace. Le terme "rapide" induit des considérations relatives à la détection et aux procédures que lui sont associées.

La définition de ces moyens, la vérification de la fiabilité et de la disponibilité des fonctions qu'ils sont amenés à remplir dépasse bien évidemment le cadre de la présente examen.

Il doit être clair que ces moyens doivent s'accompagner de procédures adaptées qui sont indéniablement du ressort de l'industriel.

Il est en effet primordial de tuer dans l'œuf tout développement d'un tel incendie. En ce sens, les calculs ci-dessous ne seraient à prendre en considération que si les moyens que nous venons d'évoquer sont inexistantes ou défaillants.

Il paraît vain de calculer de telles conséquences si les moyens, les modalités et les procédures d'intervention ont été adoptés, et si leur fiabilité et leur disponibilité ont été éprouvés.

## 2.2.2 Considérations sur les déchets exposés à l'incendie et phénomènes impliqués

### 2.2.2.1 Généralités

- a) En premier lieu, il convient de relever que les déchets susceptibles d'être stockés sur le site, et qui arrivent sur le camion sous forme de fûts ou de big-bags palettisés, sont réputés incombustibles.

C'est donc qu'il n'y a pas, dans le type de scénario envisagé, d'autres combustibles que ceux auxquels nous avons fait référence au point b) du sous paragraphe 2.2.1. ci-dessus. Il est donc clair que les effets thermiques d'un tel scénario resteront localisés à quelques mètres autour du camion.

Compte-tenu de la géométrie des lieux, et notamment de la qualité coupe-feu des parois et de la porte du bâtiment de stockage journalier, il n'y a pas lieu d'envisager de synergie d'incendie s'étendant depuis le camion à d'autres parties du site.

- b) Compte-tenu de la remarque que nous venons de faire, il reste à envisager divers phénomènes susceptibles de donner objet à des dispersions de ces matières dans l'atmosphère.

A ce titre, il convient de caractériser les phénomènes susceptibles d'être mis en jeu.

### 2.2.2.2 Phénomènes à considérer

Dans la mesure où les déchets considérés sont réputés être des solides minéraux incombustibles, les trois seules voies qui viennent à l'esprit pour induire leur dispersion dans l'atmosphère sont a priori la sublimation, la décomposition thermique et l'entraînement de particules finement divisées par l'écoulement de l'air nécessaire à la combustion des produits combustibles, ainsi que des fumées qui en résultent.

Le cas échéant, il y a lieu de pousser plus loin l'analyse en considérant soit directement la toxicité du corps dispersé en lui-même, tant sous forme de vapeurs que de fines particules, soit des produits de décomposition ou de réaction (notamment avec l'humidité de l'air).

### 2.2.2.3 Modalités d'émission de déchets à l'atmosphère

Les déchets susceptibles d'être stockés sur le site ont été répartis en 13 groupes rappelés dans le tableau I.4-1 ci-dessus.

Nous rappelons qu'il n'y aura qu'une seule classe de déchets par camion.

La démarche a alors consisté en premier lieu à consulter différentes bases de données toxicologiques de la littérature afin de caractériser des valeurs de toxicité à considérer relativement à des produits minéraux.

C'est ainsi que si l'on se réfère au NIOSH pocket guide to chemical hazards [1], on relève les valeurs suivantes d'IDLH de quelques produits minéraux (voir le tableau 2.2-1 ci-dessous) :

Le NIOSH (acronyme pour -U.S.- National Institute for Occupational Safety and Health), auquel il est ici fait référence, consiste en un guide proposant entre autres des valeurs seuils de toxicité pour un grand nombre de composés.

La définition de l'IDLH (acronyme pour Immediately Dangerous for Safety and Health) considérée est celle donnée par le NIOSH pocket guide to chemical hazards [1], c'est à dire qu'il s'agit de la concentration maximale qu'une personne peut supporter pendant une durée de 30 minutes sans risque d'effets irréversibles sur sa santé.

Antimoine et composés	Sb	IDLH = 80 mg/m <sup>3</sup>
Arsenic et composés <sup>4</sup>	As	IDLH = 100 mg/m <sup>3</sup>
Baryum	Ba	IDLH = 1 100 mg/m <sup>3</sup>
Beryllium	Be	IDLH = 10 mg/m <sup>3</sup>
Cadmium et composés Cd/CdO	Cd	IDLH = 9 mg/m <sup>3</sup>
Chromates	CrO <sub>3</sub>	IDLH = 30 mg/m <sup>3</sup>
Cobalt métal	Co	IDLH = 20 mg/m <sup>3</sup>
Sels cyanurés	NaCN, KCN	IDLH = 50 mg/m <sup>3</sup>
Vapeurs de mercure	Hg	IDLH = 28 mg/m <sup>3</sup>
Etain et composés	Sn	IDLH = 400 mg/m <sup>3</sup>
Oxydes de Vanadium	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	IDLH = 70 mg/m <sup>3</sup>
Zirconium	Zr	IDLH = 500 mg/m <sup>3</sup>
Thallium	Th	IDLH = 20 mg/m <sup>3</sup>

Tableau 2.2-1 : quelques valeurs d'IDLH

Afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible, nous avons retenu des scénarios impliquant :

- **des sels cyanurés.**

Nous avons considéré du NaCN et du KCN dont la valeur d'IDLH dans le tableau précédent est affichée égale à 50 mg/m<sup>3</sup>.

---

<sup>4</sup> Cette dénomination correspond à celle utilisée par le NIOSH pour la définition de l'IDLH.

Dans ce cas, nous avons, de façon prudente, considéré que ces produits, sous l'effet de l'incendie, se décomposaient en dégageant de l'acide cyanhydrique (HCN). C'est ainsi que nous avons considéré de façon majorante, que l'ensemble des CN libérés se trouvait émis sous la forme HCN.

- **des déchets mercuriels.**

Nous avons considéré du chlorure mercureux ( $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ). Dans ce cas, nous avons, de façon prudente, considéré que ce type de produit se décomposait, sous l'effet de l'incendie, en dégageant des vapeurs de mercure ainsi que de chlorure mercurique  $\text{HgCl}_2$ . C'est ainsi que nous avons considéré, dans le cadre d'une démarche majorante, que la totalité de la masse déversée se trouvait émise sous la forme de vapeurs de Hg et de chlorure mercurique, pendant la durée de l'incendie.

- **des déchets arséniés.**

Nous avons considéré du trioxyde de diarsénic ( $\text{As}_2\text{O}_3$ ). Le LETE (Laboratoire d'Études de Toxicologie Expérimentale) de l'INERIS a développé une démarche relative aux indices d'exposition critique au  $\text{As}_2\text{O}_3$ . C'est ainsi qu'il est proposé de retenir pour l' $\text{As}_2\text{O}_3$  sous forme de poudre la valeur de  $40 \text{ mg/m}^3$  pendant 1 heure (sur la base de  $100 \text{ mg/individu}$ ) comme dose correspondant aux effets pathologiques sévères.

Pour le calcul des zones de létalité, la seule étude permettant d'exprimer la charge toxique sous la forme  $C^{nt}$  est l'étude expérimentale réalisée à l'INERIS, où  $n = 1$  (voir le chapitre 3 de l'annexe C pour l'explication de la formule  $C^{nt}$ , destinée à évaluer un effet toxique donné, par exemple celui relatif à l'IDLH). En l'absence d'autres informations, le groupe de travail propose de retenir cette valeur.

C'est ainsi que, pour une durée d'exposition d'une  $\frac{1}{2}$  heure correspondant à l'IDLH, et compte-tenu que  $n = 1$ , l'INERIS a retenu en conséquence une valeur de concentration de  $80 \text{ mg/m}^3$  pour l'IDLH de  $\text{As}_2\text{O}_3$ .

Dans la mesure où  $\text{As}_2\text{O}_3$  se sublime à quelques  $200^\circ\text{C}$ , les scénarios qui impliquent ce produit sont évidemment des scénarios de sublimation.

- **des métaux lourds.**

Nous avons considéré ici l'entraînement de particules finement divisées de Cadmium, et ce dans une approche prudente, au sens de l'anglais "conservative", l'IDLH de ce produit étant de  $9 \text{ mg/m}^3$  d'après le tableau précédent.

#### **2.2.2.4 Modélisations de l'INERIS**

La démarche de l'INERIS relative à l'évaluation des conséquences de la dispersion des fumées issues d'un incendie d'entrepôt est exposée en annexe C de la présente examen.

## Hypothèses de l'INERIS

### \* Terme source de l'incendie

Pour ce qui concerne l'estimation du terme source de l'incendie, l'INERIS a considéré qu'une cargaison en cours de déchargement représente quelques 12 tonnes de déchets incombustibles.

En outre, il a été considéré que l'incendie affectait quelques 2 tonnes de produits à haut pouvoir calorifique (gazole, pneus, sièges) pour lesquels il a été retenu une enthalpie de combustion de 43 MJ/kg, ainsi qu'environ 1 tonne de bois (palettes) dont l'enthalpie de combustion a été prise égale à 17 MJ/kg.

Quant à la vitesse de combustion, l'INERIS, par expérience, a pris le parti d'effectuer ses calculs avec une valeur de 30 g/m<sup>2</sup>s permettant de tenir compte à la fois de la présence de gazole, et de matériaux solides tels que le bois, les pneus,...

Enfin, nous avons considéré qu'une surface au sol de 30 m<sup>2</sup> serait affectée par l'incendie.

### \* Mise à l'atmosphère de particules finement divisées

Le phénomène envisagé est celui de l'entraînement de particules finement divisées par l'écoulement d'air nécessaire à la combustion ainsi que par les fumées d'incendie.

D'expérience, pour nourrir un feu de combustibles tel que celui envisagé, il faut apporter quelques 7 à 10 fois l'air stoechiométrique nécessaire à la combustion. Cet air est nécessairement apporté en périphérie basse du feu. Il induit une vitesse ascensionnelle des fumées de l'ordre de 5 à 6 m/s lorsque la surface au sol de l'incendie est de quelques 30 m<sup>2</sup>.

Compte-tenu de ce dernier ordre de grandeur, le débit de particules entraînées peut plausiblement être calculé en faisant l'hypothèse que, pendant la durée de l'incendie, la masse cumulée de toutes ces particules est de l'ordre de quelques pourcent de la masse déversée au sol.

C'est ainsi que, pour ce type de scénario, nous avons considéré que, sous l'effet de l'incendie, des 12 tonnes de déchets à décharger, assimilés de manière majorante à un toxique pur, 1 tonne se répandrait au sol dont 10 % se trouveraient entraînées sous forme de fines particules. Ainsi, en 1 heure d'incendie calculerait-on un débit de l'ordre de quelques 100 kg/h.

### \* Sublimation

Le phénomène envisagé ici est celui de la sublimation de déchets déversés au sol, exposés au rayonnement thermique de l'incendie.

Il est donc nécessaire de caractériser quelque peu la géométrie du problème.

Dans la mesure où la cargaison du camion est de 12 tonnes de produits, stockés par exemple en fûts de 200 litres, et puisque la densité apparente des déchets est plausiblement voisine de 1, il y a, par palette, 4 fûts de 200 kg, soit 800 kg de

déchets. La cargaison se compose alors de 15 palettes de 4 fûts chacune. En admettant que ces palettes sont disposées de façon symétrique sur le plateau du camion et gerbées sur 2 hauteurs, on pourra concevoir par exemple 8 palettes en 2 rangées de 4 au premier étage et 7 palettes au second.

C'est-à-dire que ne seraient exposés directement au feu que 24 fûts environ.

Il est difficilement concevable que ces fûts s'ouvrent tous simultanément. Il est toutefois plausible de concevoir que du produit, assimilé de manière majorante à un toxique pur, puisse se répandre au sol de part et d'autre du plateau du camion.

Compte-tenu de la géométrie de la rétention (30 m<sup>2</sup> en point bas) et de la quantité de liquide en feu qu'elle est susceptible de contenir au maximum (600 litres), nous ferons l'hypothèse plausible qu'il y a au sol une surface de l'ordre de 5 m<sup>2</sup> de produit directement exposé au rayonnement des flammes.

Ce dernier rayonnement peut être, de façon majorante, estimé à quelques 40 kW/m<sup>2</sup>. Il faut garder présent à l'esprit qu'il n'y aura au maximum que 600 litres à brûler répandus sur 30 m<sup>2</sup>, ce qui ne fonde pas à considérer un incendie de flaque pleinement développé qui perdure.

Cette dernière remarque faite, on considérera donc de façon plausible quelques 5 m<sup>2</sup> de produits déversés au sol exposés sur un de leur côté à un mur de flamme vertical rayonnant 40 kW/m<sup>2</sup>, le sol ne rayonnant pas.

C'est ainsi que pour As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, compte-tenu d'une chaleur de sublimation de l'ordre de 300 kJ/kg, supposer le déversement de ce produit sur 5 m<sup>2</sup> de surface exposée au rayonnement direct de l'incendie, comme mentionné plus haut, conduit à calculer un débit de sublimation de quelques 0,250 kg/s.

## Résultats de l'INERIS

Pour ce qui concerne les conditions météorologiques, l'INERIS rappelle ici qu'elles sont décrites par de nombreux paramètres, dont notamment ceux qui sont liés, d'une part à la turbulence atmosphérique et, d'autre part à la vitesse du vent.

La turbulence atmosphérique est due à la fois à des turbulences d'origine mécanique, engendrées par la rugosité du sol, et à des turbulences d'origine thermique, liées à la stratification verticale de la température de l'atmosphère.

Il est donc important de caractériser la stabilité atmosphérique, qui est liée au gradient vertical de densité de l'air, lui-même fonction du gradient vertical de température. La variation de température adiabatique verticale est comprise entre -0,6 °C/100 m et -1 °C/100 en fonction du taux d'humidité de l'air. De façon simplifiée, lorsque le gradient vertical de température est inférieur à celui de l'adiabatique, l'atmosphère est dite instable. Si le gradient correspond à celui de l'adiabatique, l'atmosphère est dite neutre. Enfin, si le gradient thermique est positif (donc supérieur à celui de l'adiabatique), l'atmosphère est dite stable, autrement dit peu favorable à une diffusion verticale du polluant.

Dans ce cadre, nous avons utilisé la classification de PASQUILL [4], qui comporte 6 classes de stabilité, notées de A à F, couvrant les cas des atmosphères très instables

(A et B) jusqu'aux cas des atmosphères stables à très stables (E et F), en passant par les cas d'atmosphères neutres (C et D).

L'INERIS a effectué ses modélisations dans le cas de plusieurs conditions météorologiques pénalisantes différentes.

Pour le scénario qui nous intéresse, compte-tenu des hypothèses faites, les distances d'effet enveloppes ont été calculées avec la condition repérée par le triplet (C;15;20), où nous rappelons que la première lettre correspond à la classe de stabilité atmosphérique de PASQUILL [4], le chiffre en seconde position à la vitesse du vent en m/s, et le troisième à la température ambiante en °C.

Le tableau 2.2-2 ci-dessous présente, pour chaque type de produit envisagé :

- \* la concentration  $C_1$  en fumées pour laquelle il y aurait un début d'effets irréversibles sur une personne exposée pendant 30 minutes,
- \* la concentration maximale en fumées au niveau du sol,  $C_2$ ,
- \* lorsque  $C_2$  est supérieure à  $C_1$ , la zone dans laquelle les concentrations au sol sont supérieures à  $C_1$  (voir aussi les figures 2.2-1 et 2.2-2 ci-dessous, qui illustrent la répartition des concentrations au sol dans les hypothèses respectives des déchets mercuriels et des sels cyanurés, seuls cas examinés où on dépasse l'IDLH).

#### **Remarques importantes :**

- \* Les concentrations que l'on peut lire au tableau 2.2-2 représentent de concentrations en **fumées**, qui contiennent non seulement les polluants spécifiques objet de l'étude, mais aussi bien évidemment les produits issus de l'incendie des deux tonnes de matières combustibles présentes sur le camion tels que CO, CO<sub>2</sub>, ... Ces concentrations en fumées sont calculées sur la base de corrélations issues de la littérature explicitées en annexe C. Elles tiennent notamment compte des IDLH des polluants spécifiques entraînés par l'incendie.
- \* Il est par ailleurs à concevoir qu'une partie des fumées issues de l'incendie de camion au jour sont susceptibles d'être admises dans le puits d'accès aux galeries de stockage. Les ordres de grandeur des débits de fumées émis par l'incendie et les débits d'aérage dans le puits d'accès (60 m<sup>3</sup>/s) étant du même ordre de grandeur, et même s'il est vrai que toutes les fumées émises ne seront pas piégées dans la ventilation, des mesures doivent être prévues, telle que celle, habituelle, consistant à stopper l'aérage en cas d'incendie au jour.

Type de déchet impliqué dans l'incendie	Hypothèses	Concentration des fumées pour lesquelles il y aurait début des effets irréversibles sur une personne exposée pendant 30 min (mg/m <sup>3</sup> )	Concentration maximum des fumées au niveau du sol en mg/m <sup>3</sup>	Zone au sol sous le vent où l'IDLH est dépassée en m
Sels cyanurés	1 tonne de NaCN déversée au sol. Décomposition et dégagement de HCN. Durée de l'incendie 1 h.	4 462	5970	≅ 30 - 50 m
Déchets mercuriels	1 tonne de Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> déversés au sol. Décomposition et émission de vapeurs de Hg et de HgCl <sub>2</sub> . Durée de l'incendie 1 h.	5 808	5 960	≅ 20 - 80 m
Déchets arseniés	Sublimation d'As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> déversé au sol sur une surface de 5 m <sup>2</sup> . Durée de l'incendie 1 h.	19 078	5960	-
Métaux	1 tonne de Cadmium déversé au sol. 10 % de l'épandage est entraîné sous forme de fines particules. Durée de l'incendie 1 h.	18 659	5950	-

Tableau 2.2-2: Concentrations en fumées et zones au sol pour lesquelles l'IDLH est dépassée

Les valeurs des seuils de toxicité retenues correspondant à la concentration des fumées pour laquelle il y aurait des effets irréversibles sur une personne exposée pendant 30 minutes, sont affichées dans la deuxième colonne du tableau 2.2-2 précédent. Elles ne dépendent que des conditions de dilution initiale, caractéristiques du stockage affecté par l'incendie. C'est ainsi que l'on ne calcule d'effets toxiques au sol que dans les cas où les déchets impliqués dans l'incendie modélisé sont des produits mercuriels ou des sels cyanurés.

Dans ce cas, on calcule des effets toxiques au sol jusqu'à des distances maximales sous le vent qui restent inférieures à 80 mètres. Le lecteur pourra se référer aux figures 2.2-1 et 2.2-2 ci-dessous où il trouvera les courbes représentant la variation au niveau du sol de la concentration globale des fumées émises en fonction de la distance à la source, dans le cas où des vapeurs de mercure et des sels cyanurés sont dispersés. Il apparaît donc que, pour tous les cas envisagés, on ne calcule pas, moyennant les hypothèses retenues, d'effet toxique des fumées au niveau du sol au delà de 80 m.

Il est bien entendu à concevoir qu'un tel résultat est à considérer en ordre de grandeur. Aussi, dans une démarche simplificatrice et majorante, pourrait-il paraître logique de retenir une distance de 100 mètres comptée depuis le poste de déchargement des camions. En outre, il est intéressant de souligner qu'un tel rayon n'atteint pas les limites de la cité Joseph Else.

DISPERSION DE FUMES TOXIQUES FORMEES DANS UN INCENDIE

REFERENCE

Hypothèse Déchets mercuriels - Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> - 30 g/m<sup>2</sup>s - C15

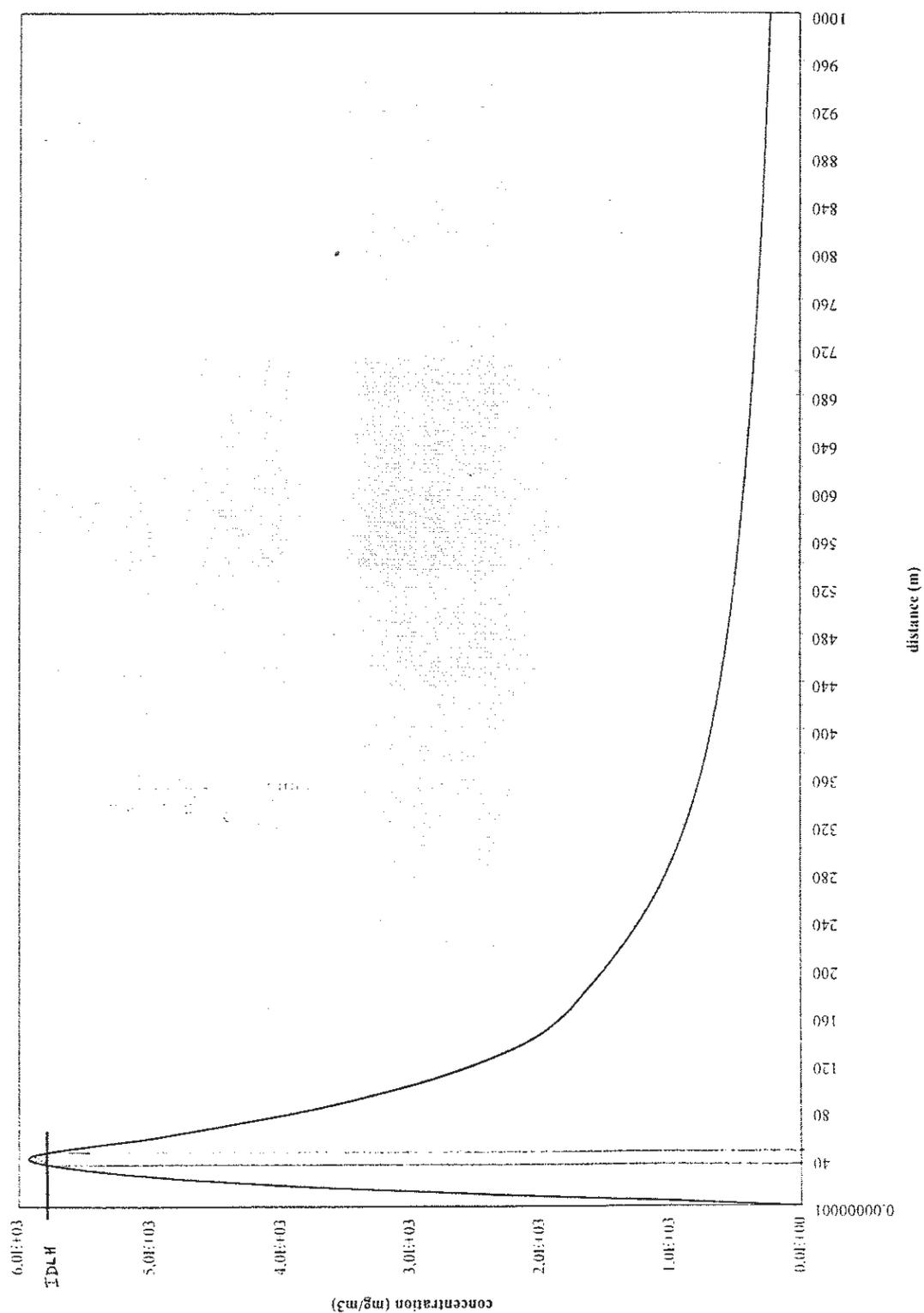


Figure 2.2-1 : Courbe de répartition des concentrations au sol en fonction de la distance dans l'hypothèse des déchets mercuriels.

DISPERSION DE FUMES TOXIQUES FORMEES DANS UN INCENDIE

Hypothèse Sels cyanurés - HCN - 30 g/m<sup>2</sup>s - C15

REFERENCE

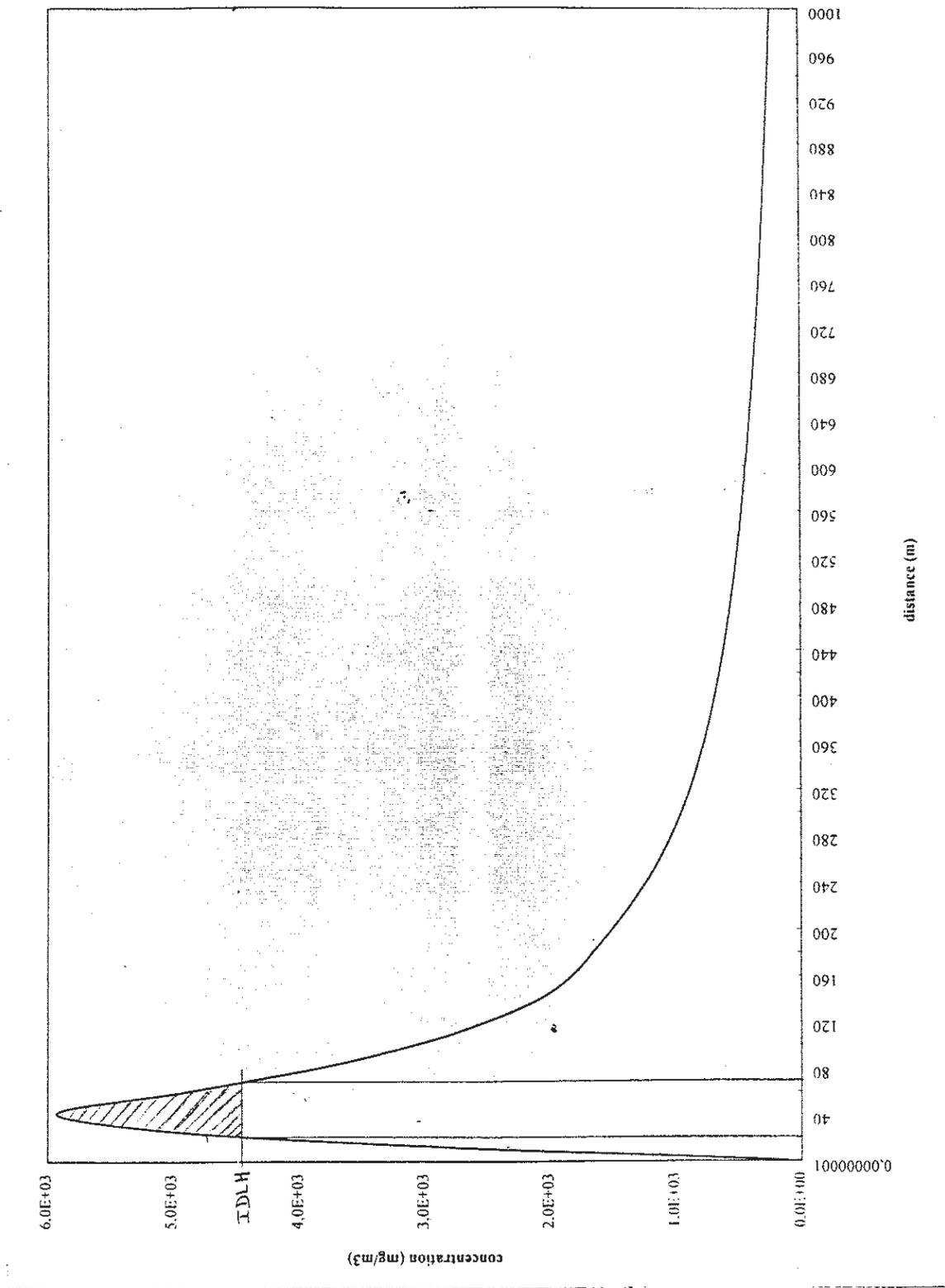


Figure 2.2-2 : Courbe de répartition des concentrations au sol en fonction de la distance dans l'hypothèse des sels cyanurés.

## 2.3 Scénario d'incendie au fond

Pour évaluer les conséquences de la dispersion des fumées issues d'un incendie au fond, la démarche utilisée par l'INERIS a consisté à :

- définir un scénario d'incendie majorant pour le fond, évaluer les principales caractéristiques de l'incendie initial correspondant et ses conséquences dans la zone de stockage,
- explorer le risque de communiquer le feu aux produits combustibles stockés (palettes de bois, puis déchets),
- déterminer les produits de combustion formés, leurs débit et conditions de rejet à l'atmosphère extérieure (terme source) compte-tenu des refroidissements et dilutions au cours du trajet dans la mine, déterminer la toxicité de ces rejets,
- modéliser la dispersion de ces rejets à l'extérieur pour différentes conditions météorologiques.

### 2.3.1 Evaluation des principales caractéristiques de l'incendie initial et de ses conséquences dans la zone de stockage

L'objectif de ce qui suit est de déterminer les risques de pollution liés aux déchets.

Un stockage de combustible liquide est implanté au fond, mais il est loin des zones de stockage des déchets. Ces dernières ne sont pas sur son aval aérage. Le scénario retenu n'a donc pas porté sur un incendie au cours d'un transvasement à proximité de ce stockage.

Cette évaluation s'est faite à partir d'un scénario d'incendie impliquant un engin de transport CT 2500 plein de combustible et transportant deux palettes de produits (c'est à dire 8 fûts de déchets). On a considéré que l'engin brûlait à proximité immédiate de la zone de stockage (plus précisément entre les nœuds 8 et 5 sur le schéma de la figure 2.3-3 reproduite en fin du paragraphe 2.3) et que cette dernière était déjà pratiquement complètement remplie de déchets (situation a priori aggravante).

Dans les galeries où des fûts sont stockés, la section de passage est très notablement réduite et se présente comme sur le schéma de la figure 2.3-1 ci-dessous.

Le potentiel calorifique initial est estimé à un équivalent de 950 kg de gasoil : voir décompte au tableau 2.3-1 ci-dessous.

Le logiciel Vendis-FS a été utilisé pour déterminer les effets d'un incendie. Il est décrit succinctement en annexe D.

Pour réaliser les calculs de l'incendie initial, les hypothèses suivantes ont été formulées :

- le feu monte en puissance pendant un quart d'heure,
- la température au niveau du foyer est de l'ordre de 1200 °C.

Les résultats de calcul obtenus respectivement au bout de 5, 10 et 15 minutes de feu sont donnés sur les schémas des figures 2.3-4 à 2.3-6 reproduite en fin du présent paragraphe 2.3.

Les températures qui y apparaissent correspondent aux moyennes spatiales dans les branches.

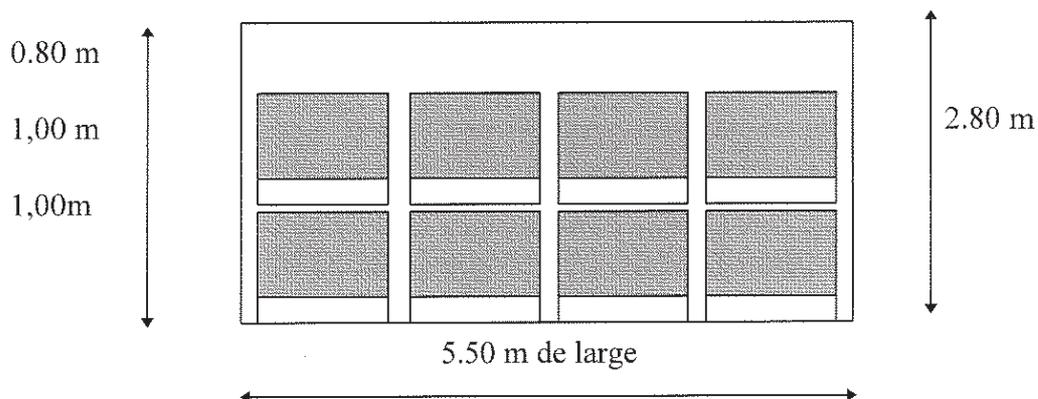


Figure 2.3-1 : Coupe transversale d'une chambre de stockage, chaque palette fait 1.20 m de large et comporte quatre fûts. Les fûts sont sur deux étages.

<b>CT 2500 L : Charge combustible maximum</b>			
		<b>litres</b>	<b>équivalent kg pétrole</b>
<b>Huiles :</b>			
	Moteur	12,5	10
	convertisseur	35	28
	réservoir hydraulique	240	192
	différentiel avant	15	12
	différentiel arrière	15	12
	réducteurs avant G+D	16	12,8
	réducteurs arrière G+D	16	12,8
	réservoir freinage	0,4	0,32
<b>Carburant :</b>			
	réservoir gasoil	114	91,2
<b>Pneus :</b>			
	pneumatiques de 149kg chacun	1200*24 MIND2	458
	divers (120 kg)		92
<b>Bois :</b>			
	2 palettes de 25 kg		28
<b>TOTAL COMBUSTIBLE EQUIVALENT PETROLE</b>			<b>950</b>

Tableau 2.3-1 : Charge combustible d'un chargeur transporteur plein de gasoil transportant deux palettes de produits.

### 2.3.2 Risque de communication du feu à la zone de stockage

Lors d'un incendie dans une voie libre d'obstacle, on observe des effets de stratification : l'air chaud file en partie supérieure à grande vitesse. L'air plus froid reste en partie inférieure et se déplace plus lentement.

Compte-tenu de l'encombrement des voies au niveau des stockages et de l'impossibilité pour l'air froid de passer en partie basse (voir schéma de la figure 2.3-1 ci-dessus), il y a tout lieu de penser qu'une certaine homogénéisation s'opérera.

Les températures reportées sur les schémas des figures 2.3-4 à 2.3-6 pourraient donc bien représenter celles auxquelles seront soumis les fûts et les palettes, les échanges ayant lieu par convection du fait des mouvements d'air.

Les mouvements d'air seront rapides dans les allées et très lents dans les recoupes.

Les températures obtenues au cours de la phase initiale sont trop basses pour que des fûts métalliques subissent de réels dommages.

Le risque est bien évidemment de voir s'enflammer les palettes.

Des indications relevées dans le document NFPA 921 [5] ont permis de tracer la courbe de la figure 2.3-2 ci-dessous reliant la vitesse d'inflammation d'un parallélépipède de bois de pin de 32mm x 32mm x 102mm avec la température de l'air.

Des palettes de bois devraient s'enflammer au moins aussi vite.

Compte-tenu des températures relevées sur la figure 2.3-5 et des délais fournis par la figure 2.3-2, il est raisonnable de penser que si aucune action n'est entreprise (comme par exemple la fermeture de portes), l'incendie s'étendra en aval aéraie aux palettes. Si elles sont ignifugées, cette extension sera nettement freinée, mais sans doute pas évitée.

La figure 2.3-7 reproduite en fin du paragraphe 2.3 donne une indication du champ des températures atteintes si l'ensemble des palettes de la voie 5-51 s'enflamme, et seulement celles-là.

Les températures moyennes dans la voie n'apparaissent pas comme extrêmement élevées.

Il faut cependant prendre en considération deux phénomènes :

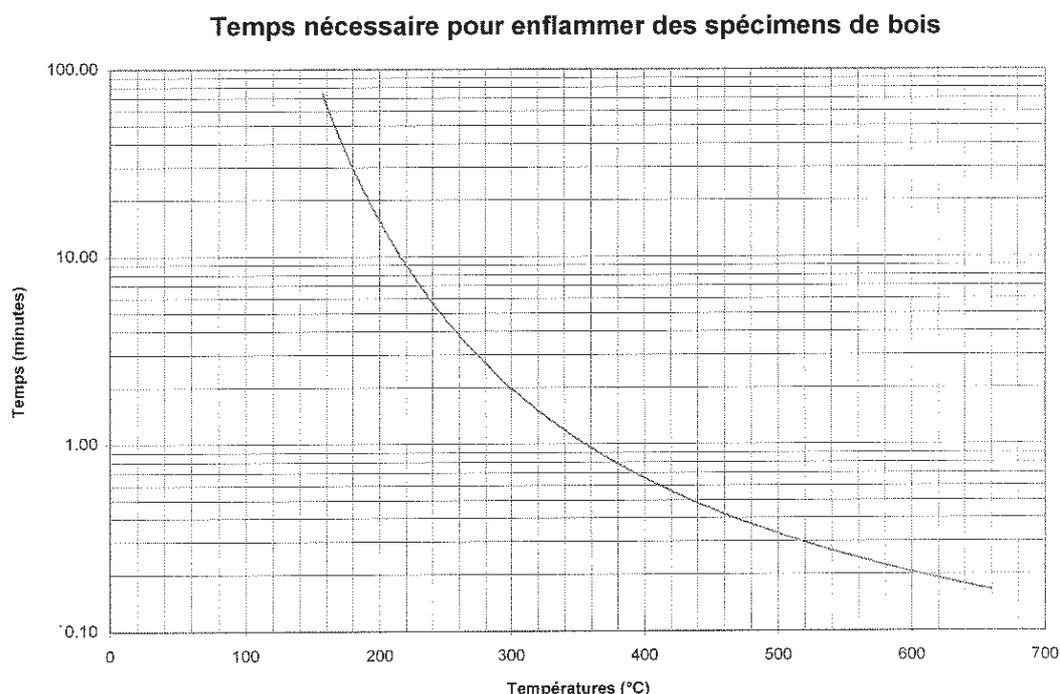
- l'embrassement risque de se généraliser : progressivement, en effet, les palettes des allées en aval s'enflammeront, et seul un manque d'oxygène est susceptible de limiter la rapidité de cette progression,
- les fûts au contact des palettes seront localement, et pour des durées significatives à des températures plus élevées que les moyennes apparaissant sur le schéma de la figure 2.3-7.

Il convient donc de s'assurer que les fûts stockés peuvent supporter sans dommage des expositions à des feux de buchers violents.

Il convient également de limiter la quantité d'oxygène disponible pour l'incendie.

Cela peut se faire :

- soit en organisant différemment l'aération du stockage de façon à ce que les alvéoles soient aérées par des lignes secondaires qu'il suffirait d'arrêter en cas de besoin,
- soit, plus simplement, en disposant des portes qui puissent être fermées dans un temps court. La progression des températures entre les figures 2.3-4, 2.3-5 et 2.3-6, la cinétique d'inflammation du bois (voir la figure 2.3-2 ci-dessous) mettent en évidence la nécessité d'agir dans de brefs délais. Les mesures de sécurité prévues doivent être activées en moins d'une dizaine de minutes, si l'on veut que les fûts ne soient pas exposés à des températures élevées. Ce délai pourrait être allongé si des essais sur des fûts montrent qu'ils résistent un certain temps à des feux de bois de grande ampleur.



*Figure 2.3-2 : Durée nécessaire approximative à l'inflammation d'un parallélépipède de bois de pin de 32mm x 32mm x 102mm en fonction de la température de l'air ambiant.*

### 2.3.3 Produits de combustion rejetés et toxicité du mélange formé en tête de puits

Lors de son parcours minier, la pollution initialement produite est diluée.

D'abord en sortie de la zone de stockage, au noeud 59, le débit d'air double, les températures chutent et les concentrations sont divisées par 2.

Ensuite, à la base du puits, l'air provenant des zones de stockage se mélange avec un débit important d'air venant de chantiers.

L'impact de ces dilutions successives est de diviser les concentrations initiales dans un rapport 10. En ce qui concerne les températures du rejet, elles sont, compte-tenu des échanges avec les terrains et le jeu des dilutions successives revenues à un niveau normal en sortie de puits (28 °C).

Ainsi, les flux de polluants produits sont dilués dans 250 m<sup>3</sup>/s d'air approximativement.

On peut admettre que des fûts impliqués dans l'incendie initial seront ouverts et que leur contenu donnera naissance à une pollution spécifique.

On suppose que des mesures suffisantes pour empêcher que d'autres fûts déjà stockés puissent céder à de trop fortes températures auront été prises (voir paragraphe précédent).

Les conséquences de l'incendie sur les fûts en cours de transport ont été estimées en utilisant une méthode similaire à celle mise en œuvre pour le scénario d'incendie au jour.

Toutefois, il convient d'emblée de noter que, compte-tenu de la géométrie du lieu de l'incendie et des quantités de déchets incombustibles mises en jeu, certaines hypothèses doivent être modifiées. Ainsi,

- relativement au terme source de l'incendie, la cargaison transportée par le CT 2500 représente quelque 1,6 T de déchets incombustibles. En outre, conformément au tableau 2.3-1 ci-dessus, il a été considéré que l'incendie affecte quelques 950 kg de produits à haut pouvoir calorifique.
- relativement à la mise à l'atmosphère de particules finement divisées, il a été considéré que, sous l'effet de l'incendie, des 1,6 T de déchets transportés, quelques 500 kg se répandent au sol, dont 10 % se trouvent entraînés sous forme de fines particules.
- relativement à la sublimation, enfin, compte-tenu des dimensions du CT 2500 et de la faible surface disponible autour de celui-ci, il a été considéré que seule une aire de l'ordre de 2,5 m<sup>2</sup> est directement exposée au rayonnement des flammes.

Sur la base de ces hypothèses, les débits initiaux de CO, CO<sub>2</sub> et polluant spécifique ont été évalués de manière analogue au cas du scénario d'incendie au jour. Compte-tenu du débit d'air dans la galerie où se déroule l'incendie et des dilutions successives, les concentrations dans l'air sortant du puits ont été estimées. Elles ont été comparées aux IDLH correspondantes.

Les rapports de concentrations ainsi obtenus ont été reportés dans la dernière colonne du tableau 2.3-2 ci-dessous.

DECHETS	CO		CO <sub>2</sub>		POLLUANTS SPECIFIQUES DES DECHETS			Σ(Mi/IDLHi)/Q Dépassement IDLH globale si ce ratio est supérieur à 1.
	Flux (kg/s)	IDLH (mg/m <sup>3</sup> )	Flux (kg/s)	IDLH (mg/m <sup>3</sup> )	Flux émis dans le scénario jour (kg/s)	Flux émis dans le scénario fond (kg/s)	IDLH (mg/m <sup>3</sup> )	
Produits arséniés	0.1	1718	1.5	89980	0.25	0.125	81	6.5
Composés de cadmium	0.1	1718	1.5	89980	0.03	0.015	9	7.0
Sels cyanurés	0.1	1718	1.5	89980	1	0.5	75	27.0
Déchets mercuriels	0.1	1718	1.5	89980	0.3	0.15	28	21.7

Tableau 2.3-2 : Comparaison entre IDLH et concentrations à la sortie du puits.

Ces rapports sont tous supérieurs à 1. Ainsi, d'emblée, il apparaît impossible que du personnel reste dans le bâtiment du puits.

Les rejets sortant du puits ne peuvent retrouver des niveaux de concentration compatibles avec les IDLH que par des dilutions dans des rapports 6.5 à 27 en fonction de la nature des déchets (voir le tableau 2.3-2 ci-dessus).

Afin donc d'évaluer les zones à l'atmosphère dans lesquelles les concentrations sont supérieures aux IDLH, un calcul de dispersion est nécessaire.

#### 2.3.4 Pollution résiduelle après dispersion atmosphérique.

L'air chargé de polluant sort du puits de retour et subit une dilution atmosphérique.

Le puits est coiffé d'un bâtiment de 22 m de hauteur. L'air pollué (en cas d'incendie) sort de ce bâtiment par le haut avec une vitesse ascensionnelle approximative de 15 m/s.

Des calculs de dispersion ont été réalisés à l'aide du logiciel PHAST 4.2 (qui a fait l'objet d'une évaluation par l'INERIS - voir à ce titre l'annexe E), sur la base des hypothèses défavorables suivantes :

- la densité du mélange sortant est légèrement supérieure à celle de l'air (densité de 1.034)
- la température extérieure est égale à celle du rejet de la mine (28 °C).

Ces deux conditions font que le nuage de pollution ne bénéficie d'aucun effet ascensionnel autre que sa quantité de mouvement initiale. Il a d'ailleurs plutôt tendance à redescendre vers le sol.

Les résultats obtenus montrent que le nuage de pollution ne touche le sol qu'après avoir subi des dilutions importantes.

La dilution entre le rejet et le moment où la pollution revient au sol est suffisante pour que l'on se situe significativement en dessous de l'IDLH. Les figures 2.3-8 (classe météorologique A suivant classification de PASQUILL [4]) et 2.3-9 (classe F) illustrent ce fait. Elles sont relatives à des vitesses de vent compatibles avec ce type de classe.

Sur ces figures, les aires hachurées à l'intérieur de l'isocontour 4 (resp. 5, 14 et 15) correspondent à la zone pour laquelle la concentration en sels cyanurés (resp. déchets mercuriels, composés de cadmium et produits arseniés) est supérieure à l'IDLH.

### 2.3.5 Conclusion

L'analyse précédente a mis en lumière la nécessité d'éviter la généralisation d'un incendie accidentel au fond, et notamment sa transmission aux palettes déjà stockées dans les galeries prévues à cet effet.

A ce titre, l'ignifugation des palettes n'est susceptible que de retarder l'extension du sinistre, sans toutefois être à même de l'arrêter. Des solutions sont donc plutôt à trouver dans la mise en œuvre de mesures d'éloignement et d'isolement de l'engin en feu, dans un délai de l'ordre de la dizaine de minutes qui suit un incendie d'engin non maîtrisé.

Il convient également de s'assurer que les fûts admis au stockage sont à même de supporter des expositions à des feux de bûchers violents. A ce titre, un choc notable se produisant sur un fût durant sa manutention doit conduire à ne pas l'admettre au stockage en l'état.

Il faut noter par ailleurs que dans le cas de l'incendie du CT 2500 chargé de 2 palettes, il est impératif que personne ne reste en aval aéré ni dans le bâtiment d'accès du puits.

Enfin, les calculs réalisés montrent qu'à l'air libre, les polluants sont dispersés de telle manière qu'au sol, l'IDLH n'est pas atteinte.

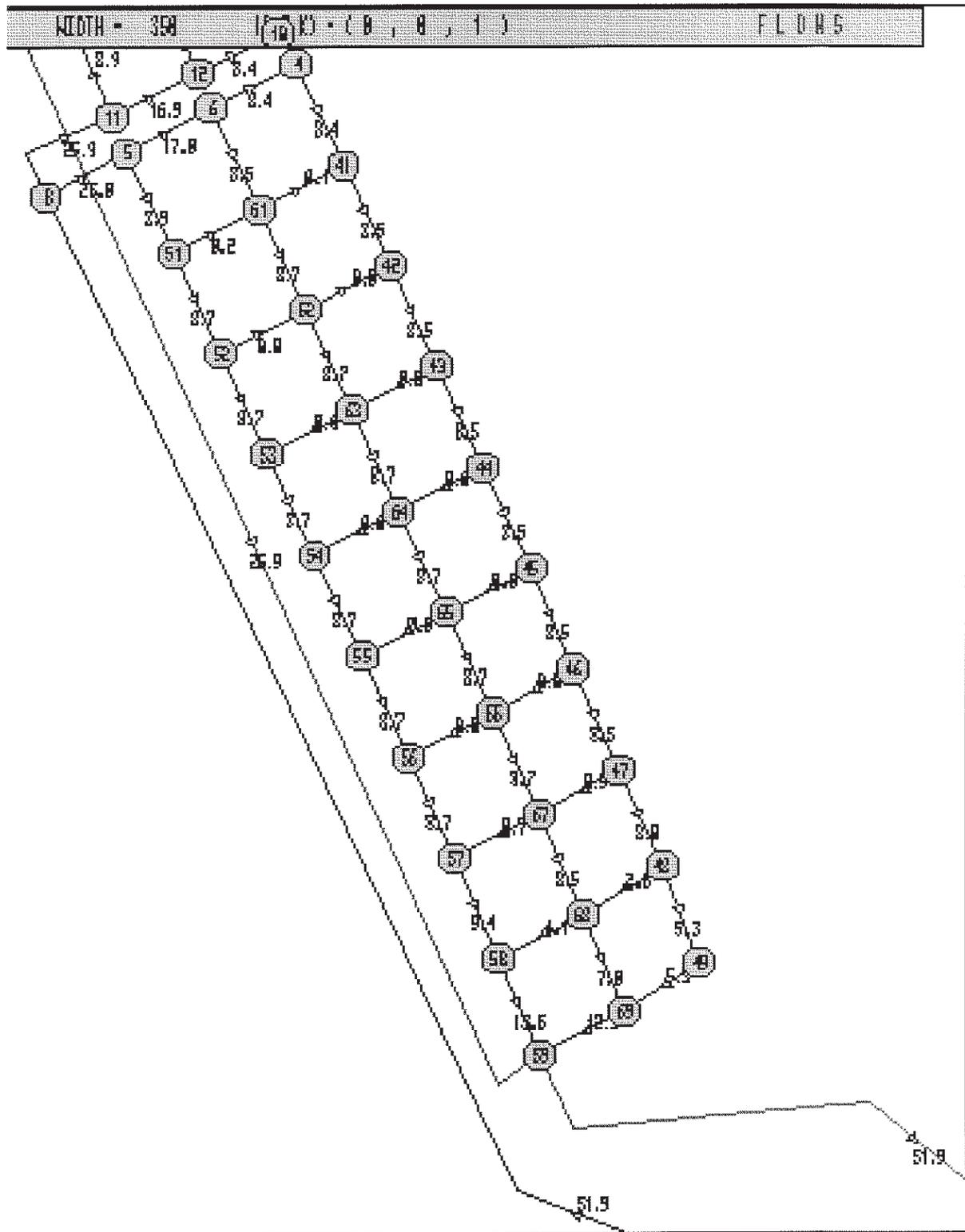


Figure 2.3-3 : Schéma de la zone de stockage avec indication des numéros de noeuds.  
Répartition des débits normaux à froid.

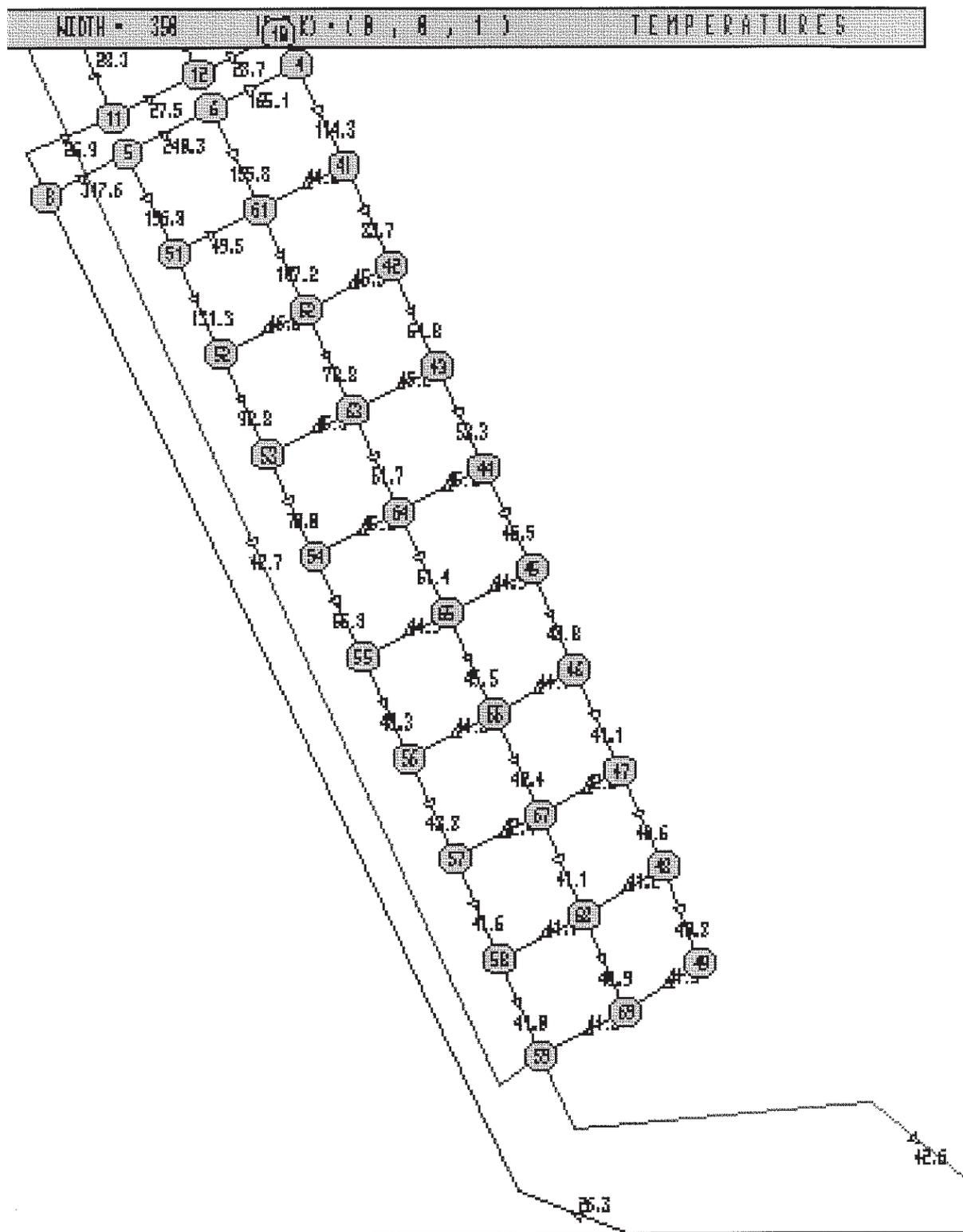


Figure 2.3-4 : Schéma de la zone de stockage avec indication des numéros de noeuds. Répartition des températures à chaud lors de la phase initiale de l'incendie au bout de 5 minutes de feu.

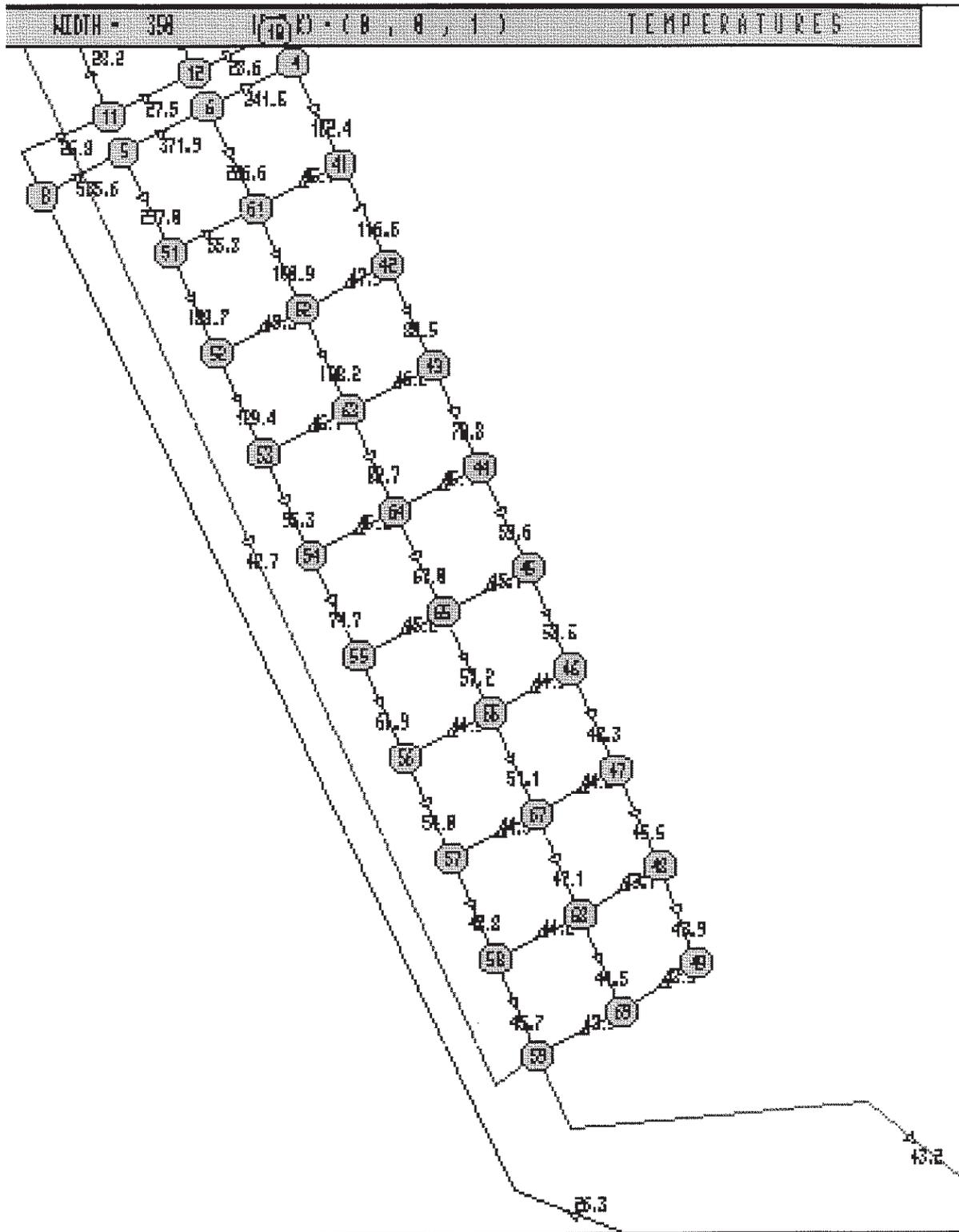


Figure 2.3-5 : Schéma de la zone de stockage avec indication des numéros de noeuds. Répartition des températures à chaud lors de la phase initiale de l'incendie au bout de 10 minutes.

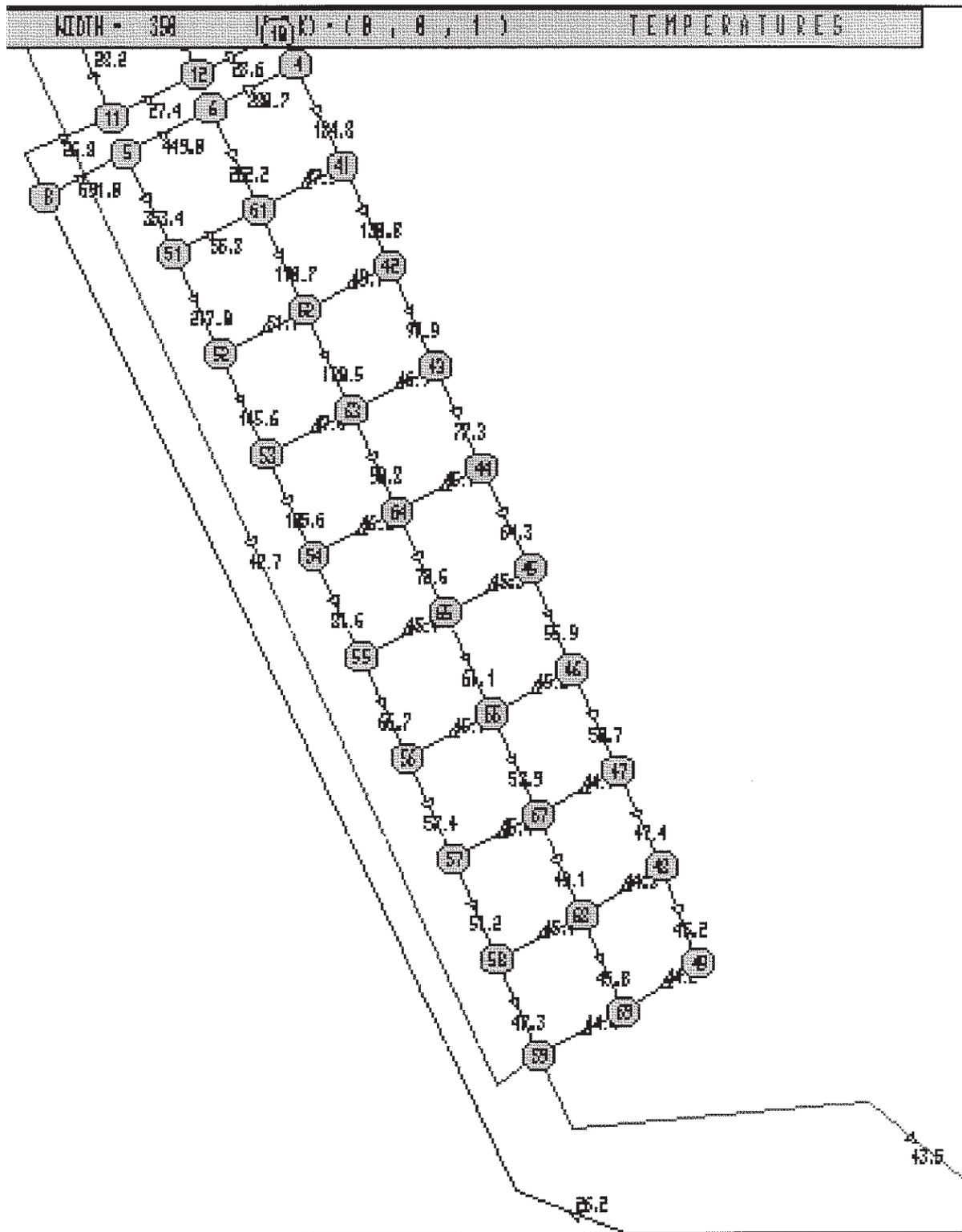


Figure 2.3-6 : Schéma de la zone de stockage avec indication des numéros de noeuds. Répartition des températures à chaud lors de la phase initiale de l'incendie au bout de 15 minutes.

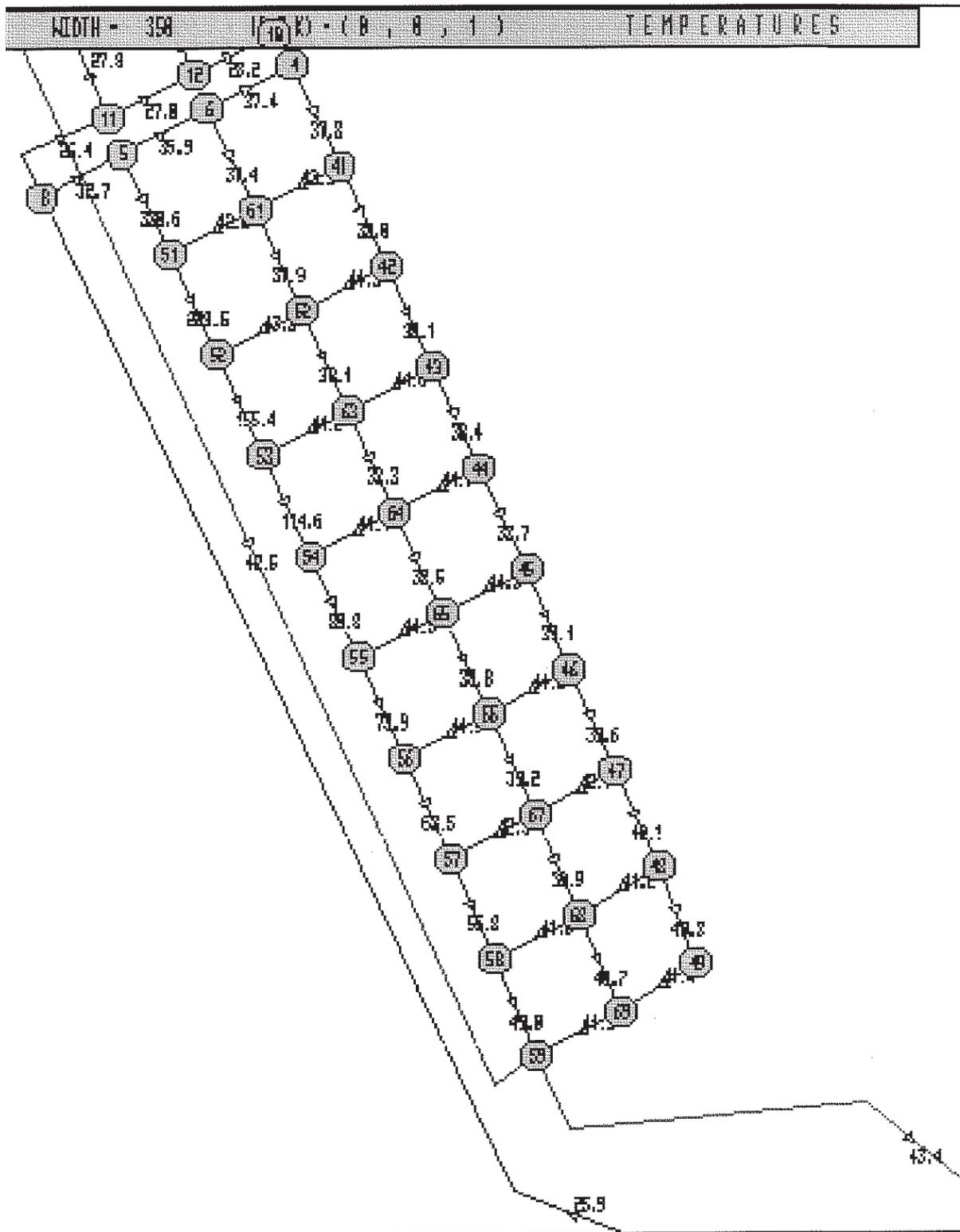


Figure 2.3-7 : Schéma de la zone de stockage avec indication des numéros de noeuds. Répartition des températures à chaud lors de la phase induite correspondant à un incendie des palettes de la branche 5-51 au bout du temps de montée en puissance correspondant.

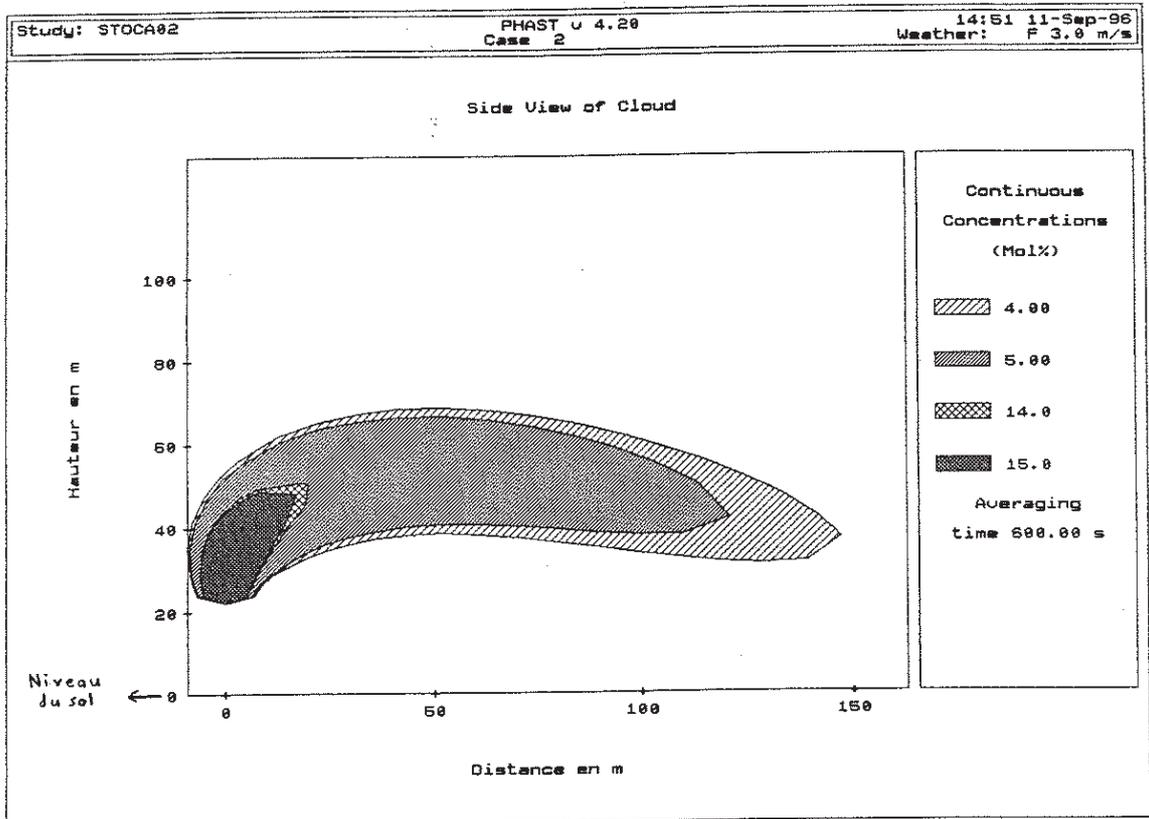


Figure 2.3-8 : Zones dans lesquelles l'IDLH est atteinte pour les polluants considérés. Cas d'un rejet en atmosphère très stable, avec un vent de 3 m/s

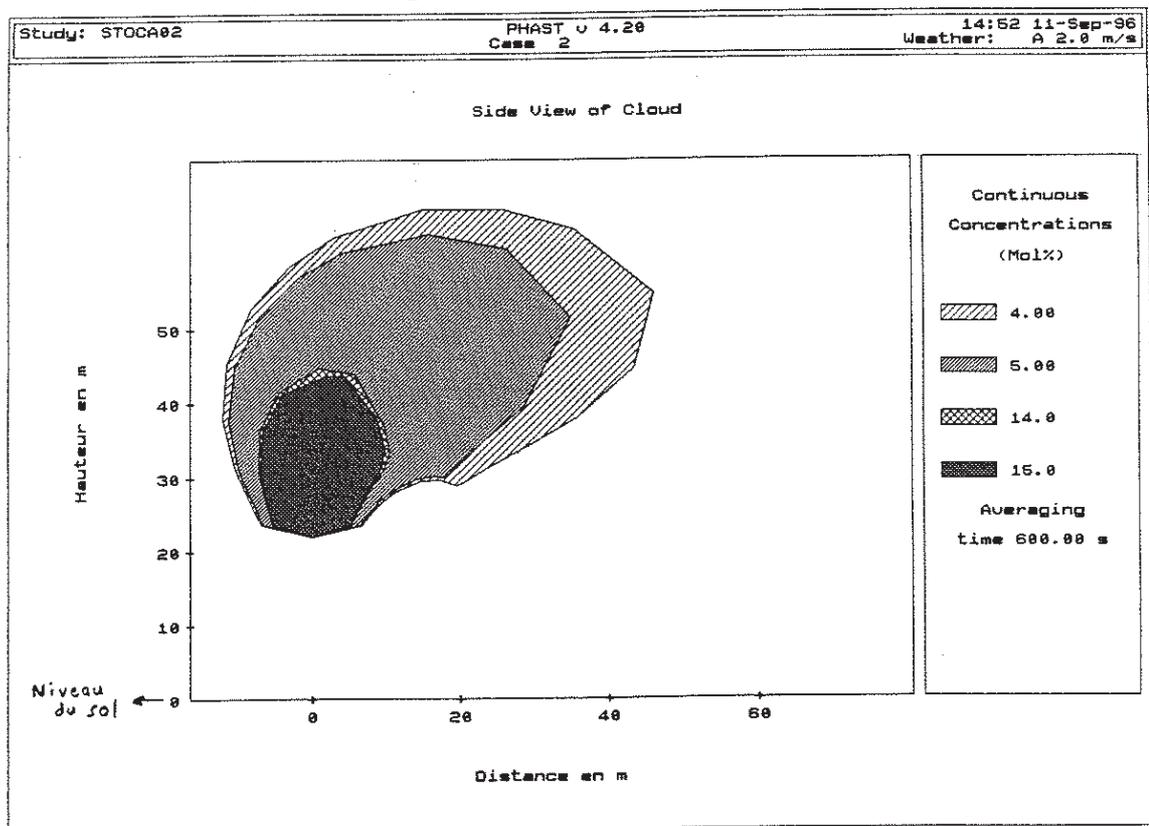


Figure 2.3-9 : Zones dans lesquelles l'IDLH est atteinte pour les polluants considérés. Cas d'un rejet en atmosphère instable, avec un vent de 2 m/s

## 2.4 Risque de pollution de la nappe phréatique

L'étude d'impact analysée dans le chapitre 1 montre clairement que le risque de pollution de la nappe phréatique est situé au court terme au niveau des installations du jour. Après avoir rappelé les éléments principaux de l'étude du site, nous présenterons des observations sur les risques de pollution.

### 2.4.1 Conditions du site

#### • Hydrographie

Les rivières la Thur et la Doller sont respectivement situées à 4 km au Nord et à 3,5 km au Sud du secteur étudié. Elles sont toutes deux des affluents de l'Ill, le point de confluence étant situé à l'aval du village de Ensisheim pour la Thur, et dans le secteur nord-ouest de l'agglomération de Mulhouse pour la Doller.

Quelques plans d'eau correspondant le plus souvent à des gravières anciennes ou encore en activité, sont également présents à proximité du site.

Il s'agit en particulier d'une gravière, actuellement exploitée par l'entreprise Michel, située à 700 mètres environ au nord-est du site, et de l'étang du Rothmoss au sud-est, distant de 500 mètres. Cet étang est alimenté par un petit ruisseau qui passe à l'est du terri Joseph Else. Plus d'un kilomètre au sud, au-delà de la voie rapide Mulhouse-Thann (N66), signalons aussi le plan d'eau de Reiningue, ancienne gravière également réaménagée en base nautique et de loisirs.

#### • Nappe alluviale

La présence de ces différents plans d'eau témoigne de l'existence au droit du site d'une nappe phréatique peu profonde contenue dans les alluvions quaternaires, constitués de galets, graviers et sables d'origines vosgienne et rhénane mêlés par endroit d'un peu d'argile. L'épaisseur des alluvions atteint près de 35 mètres.

Compte-tenu de la porosité élevée de ces formations, celles-ci sont très perméables ( $k = 10^{-3}$  m/s) et constituent un réservoir très productif largement exploité dans le secteur par des forages industriels ou agricoles et pour l'alimentation en eau potable (champs captants du Hirtzbach et de Reiningue) de l'agglomération mulhousienne.

Les données de l'annexe 4 du dossier STOCAMINE renseignent entre autres sur le contexte géologique et hydrogéologique. Les alluvions reposent en général sur les formations du Chattien (Oligocène) constituées par des marnes bariolées à horizons gréseux mal consolidés. Mais le Chattien étant absent au droit du secteur du stockage, les alluvions reposent directement sur le Stampien représenté de la base au sommet par respectivement : des marnes pyriteuses bitumeuses ; des marnes grises micacées, comportant des niveaux de calcaires dolomitiques et de grès à ciment calcaires ; et enfin par une alternance de marnes finement sableuses et de grès tendres. La transition entre les formations du Tertiaire et le remplissage alluvial est souvent marquée par un niveau d'argile jaune.

Dans le secteur Joseph-Else, la nappe alluviale a une épaisseur de 20 à 25 mètres. D'après les mesures effectuées sur deux piézomètres, réalisés respectivement à proximité du hangar à sel (référence BRGM n° 413-5-207) et à 60 mètres au Nord de l'extrémité orientale du terrier d'Else (référence BRGM 413-5-208), le niveau piézométrique s'établit entre 3 et 4 mètres de profondeur en période de basses eaux et à environ 1 mètre de profondeur en période de hautes eaux. La nappe s'écoule du Sud-Ouest vers le Nord-Est à une vitesse estimée de l'ordre de 3 mètres par jour pour un gradient d'environ 3 %.

L'alimentation de la nappe est assurée par l'Ill et par les rivières vosgiennes (la Thur et la Doller), et bien sûr, par l'infiltration des précipitations. Des études effectuées par le BRGM montrent que, dans le secteur envisagé, l'Ill est toujours en position d'alimentation vis-à-vis de la nappe alors que la Doller est soit en position d'alimentation, notamment en période de hautes eaux décennales, soit en position de drainage vis-à-vis de la nappe.

Enfin, en ce qui concerne les caractéristiques hydrochimiques de l'eau de la nappe alluviale, des analyses réalisées sur des prélèvements effectués dans les deux piézomètres cités précédemment montrent clairement une minéralisation de l'eau (notamment en ions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) à l'aplomb et en aval des anciens terrils, due à la percolation et aux infiltrations d'eaux météoriques en leur sein.

#### 2.4.2 Analyse des risques de pollution de la nappe alluviale

La faible profondeur de la nappe phréatique, la grande perméabilité des alluvions qui sont le siège de cette nappe et l'importance des prélèvements effectués dans cette nappe à des fins industrielles, agricoles et domestiques (eau potable) soulignent la vulnérabilité de cette nappe vis-à-vis de toute pollution accidentelle liée aux activités de surface. En effet, en période de hautes eaux, le niveau de la nappe phréatique s'établit à moins d'un mètre de profondeur.

#### • Risques d'inondation et remontée de nappe

A ce risque de pollution de la nappe superficielle par les eaux de surface s'ajoutent le risque d'inondation du site en cas de crue de la Doller ou de la Thur et surtout le risque d'affleurement de la nappe phréatique dans le secteur en cas de hautes eaux exceptionnelles.

Ce risque d'affleurement a été accru par les affaissements de la surface induits par les exploitations minières. Toutefois, l'étude réalisée par le BRGM (réf. N° 88 SGN 661 ALS) tient compte des affaissements prévus dans le secteur et d'une situation de hautes eaux de fréquence décennale. Lorsque les infrastructures et les équipements seront effectivement réalisés, il sera possible de conforter les conclusions de cette étude en précisant l'évolution du risque (exploitation future et fermeture des MDPAs, évolution des pompages) par une surveillance adaptée.

#### • Risques de pollution de la nappe alluviale par les eaux de surface

Les eaux stockées ou s'écoulant en surface ou dans les réseaux enterrés peuvent, en cas de fuite, s'infiltrer dans les alluvions et atteindre rapidement la nappe phréatique.

La séparation des divers réseaux contribue à éviter tout risque de pollution des eaux de surface. D'autre part, un bassin étanche de 1 000 m<sup>3</sup> collectera toutes les eaux provenant de l'exhaure minière, des aires de lavage de l'entrepôt et du laboratoire de contrôle, des douches de décontamination, ainsi que les eaux pluviales collectées sur les aires de manutention des déchets.

Les eaux du bassin seront analysées régulièrement. En l'absence de toute pollution chimique, elles seront évacuées vers le réseau existant sur le carreau. Dans le cas contraire, l'eau du bassin sera évacuée du centre de stockage par citernage.

Les eaux pluviales collectées en dehors des aires de circulation des engins de manutention des fûts de déchets et les eaux usées seront rassemblées, après dégraissage, avec les effluents des sanitaires avant évacuation au réseau préexistant de l'ancienne mine Joseph-Else.

Ces mesures sont de nature à protéger efficacement la nappe. Il est cependant possible de faire les remarques et propositions suivantes pour améliorer la sécurité en cas de situations accidentelles exceptionnelles.

##### a) Conception du bassin de stockage

En ce qui concerne le bassin de stockage des eaux susceptibles d'avoir été en contact des déchets, le risque de pollution de la nappe par les eaux qu'il contient est essentiellement lié à une perte d'étanchéité de la membrane étanche en PEHD mise en place en fond de bassin. Ce risque est réduit par le contrôle de la qualité des fournitures et de la pose de la membrane et par l'établissement d'une procédure détaillée de curage.

Il est prévu de réaliser le bassin par décaissement dans le terrain naturel sur une profondeur de 2 mètres. Autrement dit, en période de hautes eaux, avec un niveau phréatique qui s'établit à moins d'un mètre de profondeur, on encourt le risque d'un soulèvement de la membrane d'étanchéité notamment lorsque le niveau de remplissage du bassin ne sera pas suffisant pour s'opposer à ce soulèvement.

Dans ce cas, la membrane peut se détériorer notamment au niveau des soudures des différentes nappes de PEHD et perdre ainsi sa fonction d'étanchéité. La conception du bassin

étanche devrait être revue en fonction de l'étude d'évolution de la position de la nappe en période de hautes eaux. Il est tout à fait possible de trouver une solution adaptée (bassin ceinturé par une digue et réalisé sans décaisser les terrains par exemple).

#### b) Dimension du bassin étanche

Il est prévu de vidanger le bassin dès que celui-ci atteint un niveau de 150 à 200 m<sup>3</sup> ; il restera donc au minimum une capacité de 800 m<sup>3</sup> pour recueillir l'eau utilisée pour s'opposer à un incendie.

La note de calcul de STOCAMINE donnée en annexe F montre que le bassin est également capable de recueillir les eaux pluviales provenant des toitures sur la base de la hauteur pluviométrique maximale observée au cours des 22 dernières années (219 mm de pluie au mois de mai 1983).

#### c) Organisation du contrôle des effluents

L'organisation actuelle prévoit de contrôler par le bassin étanche les eaux qui risquent d'être polluées par la manutention de déchets et d'envoyer les eaux usées et pluviales dans le réseau existant sur le site.

Le bassin étanche a une capacité qui lui permet de recevoir les eaux pluviales provenant des toitures (14500 m<sup>2</sup>) sur la base de la hauteur pluviométrique maximale mensuelle observée ces 22 dernières années (219 mm).

La capacité du bassin permet de faire face à une pluie d'orage de très forte intensité tombant en quelques heures, ou à un épisode extrêmement pluvieux de 1 à quelques jours, correspondant à une hauteur pluviométrique de  $1000 \text{ m}^3 / 14\,500 \text{ m}^2 = 0,69 \text{ m}$  soit 69 l par m<sup>2</sup>.

Il n'apparaît pas intéressant de mélanger dans le bassin les eaux provenant des toitures à celle de l'aire de déchargement. Il pourrait par contre être envisagé de faire transiter par le bassin étanche les eaux de pluie qui sont recueillies sur les parkings des camions qui pourraient être chargées en hydrocarbures et en cas d'accident recueillir des déchets pulvérulents.

Si on utilise le réseau pour l'évacuation des eaux pluviales et usées, son état est à établir avant la mise en service. Ceci nécessite une inspection du réseau pour détecter les fuites éventuelles de manière à s'affranchir des risques de rupture et/ou de perte d'étanchéité. On vérifiera alors également que ce réseau est suffisamment dimensionné pour l'évacuation des eaux usées et celle provenant d'une pluie dont l'intensité est telle que sa période de retour est de 10 ans.

D'autre part, il paraît souhaitable de séparer les eaux pluviales qui risquent peu d'être polluées par des poussières toxiques, des autres effluents. Si le rejet des eaux pluviales dans le réseau existant n'est pas ou plus envisageable, il serait préférable de réaliser sur le site un bassin de rétention spécifiquement réservé aux eaux pluviales et surtout différent de celui réservé aux autres effluents.

#### d) Surveillance et contrôle du niveau et de la qualité des eaux de l'aquifère alluvial

La vulnérabilité de l'aquifère alluvial impose une surveillance et un contrôle de son niveau, particulièrement en période de hautes eaux, et de la qualité des eaux de manière à prévenir suffisamment à l'avance tout risque d'extension d'une pollution accidentelle de ces eaux.

Un tel contrôle suppose l'implantation et la réalisation de piézomètres dans l'emprise du site et à son voisinage en complément des deux piézomètres déjà réalisés dans le cadre d'études antérieures (piézomètres n° 413-5-207 et 208).

Lorsque le plan masse des installations sera définitivement arrêté (bassin étanche, points de rejet des effluents et des eaux pluviales...), le nombre, les modalités de réalisation et l'implantation des piézomètres seront précisés.

Si cela s'avère nécessaire à la suite de l'étude d'évolution de la nappe, des mesures en continu du niveau de certains piézomètres pourront être envisagées.

## 2.5 Risques liés au grisou

Le gisement des MDPa est épisodiquement grisouteux. Le gaz contenant du méthane est susceptible de donner des explosions lorsqu'il est mélangé avec de l'air dans certaines proportions.

Dans le gisement de potasse, le grisou est surtout présent au niveau de certains intercalaires marneux ; il est libéré dans l'atmosphère de la mine lorsque l'exploitation découvre ces horizons ou lorsque ceux-ci sont mis en relation avec les ouvrages miniers par des fissures liées aux pressions de terrain. Dans certaines configurations le dégagement peut être rapide lorsqu'il y a rupture du mur sous forte pression en bordure d'exploitation.

Le risque de dégagement de grisou est bien connu par l'exploitation de la potasse ; il a été maîtrisé en adaptant au gisement les règlements des mines grisouteuses dont les principales dispositions sont les suivantes :

- maintenir la teneur en grisou dans l'atmosphère de la mine à un niveau très inférieur à la limite inférieure d'explosivité par un aérage suffisant,
- supprimer les causes d'inflammation en utilisant du matériel électrique et des engins diesels certifiés,
- surveiller en permanence la teneur en grisou dans l'atmosphère souterraine.

Dans la zone choisie pour le projet de stockage, il y a lieu de prévoir que du grisou peut apparaître dans les mêmes conditions que celles rencontrées lors de l'exploitation minière. Il est donc nécessaire de se prémunir contre ce risque :

- Lors du creusement des cavités de stockage : c'est dans cette phase que le risque est le plus important car le creusement des galeries va découvrir de nouvelles zones et le découpage des piliers va mettre en charge le toit et le mur (formation). Dans ces zones, les conditions sont tout à fait comparables à celles de l'exploitation minière et

les mêmes mesures de prévention et de protection doivent être appliquées. Dans certaines zones, la foration de trou de reconnaissance en avant du front de creusement peut permettre de reconnaître le danger.

- Lors du remplissage des cavités de stockage : le risque de dégagement de grisou est beaucoup moins important car il y aura peu de modifications de contrainte dans les terrains.

Il semble cependant prudent de conserver les mesures analogues à celles de la phase précédente (aéragé, matériel certifié, surveillance continu de l'atmosphère).

- Dans les cavités de stockage pleines : le risque de dégagement de grisou reste faible mais ne peut être écarté du fait de la redistribution des contraintes autour de l'ouvrage au cours du temps.

Il est donc indispensable de continuer à surveiller la teneur en grisou dans les cavités car elles ne seront plus aérées.

## 2.6 Conclusions

Les études d'impact et de dangers effectuées par STOCAMINE et complétées par les analyses de l'INERIS permettent d'identifier les impacts potentiels sur l'environnement au cours de la phase de mise en place des déchets (impacts à court terme). Ces impacts ont été étudiés tant en fonctionnement normal de l'installation que dans le cadre d'accidents éventuels. Les risques principaux ainsi identifiés sont les suivants :

- **Risques naturels.** En ce qui concerne le site, on peut retenir les séismes, la foudre, le grisou et l'inondation (ou remontée de la nappe). Une protection contre la foudre des installations du jour est à prévoir. Compte-tenu de la proximité de la nappe par rapport à la surface, son évolution est à surveiller pour se prémunir d'un risque d'inondation. Le risque grisou peut être maîtrisé par les mesures habituelles mises en œuvre dans l'exploitation minière. Les effets d'un séisme potentiel ont été étudiés dans le dossier. Il n'y a pas de risque spécifique pour le stockage fond, les dégâts pouvant se situer aux installations jour et à la tête des puits. Les effets majorants sont une augmentation des venues d'eau dans le puits qui peut être maîtrisée par le pompage.
- **Risques de pollution de la nappe.** La nappe superficielle étant très vulnérable du fait de sa proximité de la surface et de la forte perméabilité des terrains, des mesures importantes sont prévues pour éviter sa pollution : l'ensemble des opérations de manutention sont effectuées sur une dalle reliée à un bassin étanche. Ce bassin a une capacité lui permettant de recevoir les eaux en cas d'incendie.

Il semble nécessaire de concevoir le bassin étanche de façon à ce qu'il soit au-dessus de la position la plus haute de la nappe, et de contrôler les eaux de ruissellement sur les parkings et la voirie.

Ces dispositions doivent être complétées par une surveillance de la qualité des eaux et des niveaux piézométriques sur le site et hors du site.

- **Risques de pollution atmosphérique.** L'analyse des risques montre que la pollution atmosphérique ne pourrait se produire que dans le cadre de situations accidentelles conduisant à une ouverture du conditionnement des déchets, suite à une chute ou à un incendie.

Les effets de telles situations accidentelles sont maîtrisables par l'ensemble des dispositifs de prévention et de protection, ainsi que des consignes décrites dans le dossier. Les scénarios dimensionnants permettent d'identifier les mesures à mettre en place afin de traiter les risques résiduels :

- \* Dans le cas de la chute d'un colis, il convient de prendre en compte la nature pulvérulente de certains déchets par le biais d'un conditionnement adapté.
- \* La limitation des effets d'un incendie au jour est obtenue grâce à la séparation entre l'aire de déchargement et le stockage temporaire jour par un mur et porte coupe-feu. Dans ces conditions, les distances des effets majorants d'un incendie de camion en cours de déchargement sont d'une centaine de mètres.
- \* Les effets d'un incendie au fond peuvent être limités en assurant un isolement du point de vue aérage du stockage fond dans les dix minutes qui suivent un incendie d'engin non maîtrisé. Par suite de la dilution, on n'observe au sol en surface que des effets inférieurs à l'IDLH.

L'ensemble des scénarios envisagés montrent que les effets potentiels sont circonscrits au site proprement dit ou à sa proximité immédiate dans le cas d'un incendie de camion sur son aire de déchargement. De plus, la cinétique de ce scénario impose une action rapide. C'est pourquoi, il convient d'établir l'équivalent d'un Plan d'Opération Interne incluant des dispositions particulières d'information et de protection des tiers situés dans le voisinage immédiat. De ce fait, l'établissement d'un Plan Particulier d'Intervention (PPI) n'apparaît pas nécessaire.

## **3. IMPACT A LONG TERME**

### **3.1 Contenu de l'étude, scénario**

Le point analysé ci-dessous concerne exclusivement l'évolution à long terme du stockage, au-delà d'une période d'au moins 25 ans, qualifiée de court terme, au cours de laquelle la stabilité et la réversibilité du stockage doivent être démontrées. Il s'ensuit, en principe, une nouvelle phase du stockage définitif débutant avec la fermeture des communications entre le site de stockage et l'environnement. La sûreté à long terme du stockage durant cette phase vis-à-vis des risques de contamination de la biosphère a fait l'objet dans le dossier de plusieurs études analysées ci-après. Il s'agit en particulier des études hydrogéologiques, chimiques, sismiques et mécaniques réalisées respectivement par le Centre Informatique Géologique de l'Ecole des Mines de Paris, l'Ecole de Chimie de Mulhouse, l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg, et le Centre de Géotechnique et d'Exploitation du Sous-sol de l'Ecole des Mines de Paris.

En dehors des documents émis par ces établissements qui figurent en annexe du rapport STOCAMINE, nous allons nous appuyer sur d'autres documents utiles à ce contexte (notamment la thèse d'Etat de Mme Blanc-Valleron sur le contexte géologique, et le rapport BRGM sur la géothermie en Alsace), ainsi que sur l'expérience de l'INERIS et de celle acquise au G.3S à l'occasion d'études et d'expérimentations in situ (thermomécaniques et hydrauliques) réalisées pour la CCE et l'ANDRA, à proximité du site envisagé pour le stockage STOCAMINE<sup>5</sup>.

### **3.2 Rappel du contexte géologique**

#### **3.2.1 Genèse et tectonique**

Le bassin de Mulhouse est le seul bassin potassique parmi les quatre bassins appartenant au fossé rhénan. Ce fossé d'âge tertiaire de direction NNE-SSW est long de 300 km et large de 35 km. Son histoire tectonique débute à l'orogénèse Hercynienne et son affaissement commence à l'Eocène, atteint son paroxysme à l'oligocène et se poursuit encore actuellement. Cet affaissement a permis l'invasion marine et la formation de dépôts salifères et potassiques tertiaires découverts en 1904 et exploités depuis par les MDP.

---

<sup>5</sup> Cette partie du rapport a été analysée et rédigée pour la plus grande part par M. GHOREYCHI, directeur du G.3S (Groupement pour l'étude des Structures Souterraines de Stockage).

Le substratum du bassin de Mulhouse est constitué d'un socle granitique et de roches sédimentaires secondaires.

L'essentiel du remplissage tertiaire (1500 m d'épaisseur) est d'âge Oligocène ; c'est le cas des horizons potassiques et de l'horizon envisagé pour le stockage. Ce dernier se trouve au sein de la série sel V appartenant au salifère supérieur (Sannoisien). Le sel V, d'environ 150 m d'épaisseur est constitué par un ensemble de 120 lits de faibles épaisseurs de marne, de gypse, d'anhydrite, de potasse et de sel gemme. L'horizon envisagé pour le stockage se trouve entre les bancs S1-6 et S1-11 de cet ensemble. Il est composé essentiellement de sel gemme et d'intercalations marno-anhydritiques.

Dans le bassin de Mulhouse, le remplissage tertiaire est affecté d'ondulations de direction subméridienne à grand rayon de courbure. Celles-ci sont parfois interrompues par des failles normales de même direction que les plis, et de pendage 30° et 40°. A l'exception des accidents bordiers qui sont synsédimentaires, les autres failles sont en général post-sédimentaires.

Dans le secteur concerné par le site de stockage, bien connu grâce aux ouvrages Joseph, Else, Wittlesheim I, Wittlesheim II et Max, la structure est régulière et se présente sous forme d'un monoclin à pendage de 6° à 10° vers le NNW. Cette régularité structurale s'interrompt au voisinage du puits Max, c'est-à-dire à 1,5 km du site de stockage envisagé. Le rejet de cette faille est voisin de 170 m. C'est le bloc Amélie qui est affaissé par rapport au bloc Max. Aucune venue d'eau n'a été observée dans cette faille traversée par des galeries.

### 3.2.2 Hydrogéologie

- **aquifère quaternaire : la seule nappe exploitée**

La seule nappe aquifère exploitée dans le secteur (y compris par les MDPAs) est l'aquifère alluvial, constitué par une trentaine de mètres de graviers et de galets, à forte perméabilité ( $k = 10^{-3}$  m/s). C'est un réservoir très productif, dont le niveau statique (niveau piézométrique de la nappe au repos) est voisin de 263 m. La nappe est alimentée par les rivières Vosgiennes (la Thur et la Doller) ; son écoulement général s'effectue vers le Nord-Est.

- **Aquifères secondaires en-dessous des séries salifères**

D'autres horizons pouvant être retenus comme aquifères dans le bassin de Mulhouse sont quatre niveaux lithologiques profonds d'âge secondaire, situés au mur des séries salifères. Ces niveaux sont, de haut en bas : les calcaires du Malm (situés à 1000 m en dessous du site envisagé pour le stockage), les calcaires de la grande Oolithe (Dogger), les calcaires de Musschelkalk et les grès de Buntsandstein. Les conditions hydrogéologiques précises de ces aquifères sont mal connues, car il n'y a pas de forage exploitant ces réservoirs dans le bassin de Mulhouse. Des renseignements partiels tirés des forages pétroliers et géothermiques montrent que ces réservoirs ont une porosité inférieure à 10 % ; la fracturation est par contre importante dans les trois calcaires, en particulier dans la grande Oolithe. La perméabilité est en général peu élevée sauf dans la grande Oolithe qui paraît être l'aquifère le plus productif du secondaire, en particulier dans le bassin potassique. Ces nappes, qui peuvent être considérées comme artésiennes dans la région concernée par le stockage, sont séparées par des séries peu perméables. La température de l'eau est très élevée (80° à 120°C) en raison du fort gradient

géothermique de cette région ; la salinité des eaux est également très forte (5 à 50 g/l). Aucune étude n'a cependant été entreprise pour tenter de préciser l'origine de cette salinité.

### • Horizons perméables du tertiaire

Au sein de la puissante série tertiaire essentiellement marneuse, il n'y a pas d'aquifère à proprement parler. On rencontre seulement quelques horizons gréseux plus ou moins perméables dans lesquels l'eau peut être présente.

La série tertiaire est constituée par trois niveaux lithologiques distincts dans lesquels des venues d'eau ont été rencontrées dans les puits foncés par les MDP. Le tableau 3.2-1 ci-dessous résume quelques indications données dans le document EMP/CIG sur l'hydrogéologie.

Horizon perméable		Terrains	Épaisseur (m)	Puits débitant de l'eau	Débit (l/mn)	Salinité	Niveau productif (profondeur) (m)
Chattien (absent dans le secteur du stockage)		Grès	20-50	Marie-Louise, Rodolphe Alex	- 1-500 (20 après 8J)	- 30	276
Stampien	Inf.	Marnes à foraminifères et Amphisiles	20	Amélie I	7	-	
	Moy-sup.	Marnes à Melettes et à Cyrène	Importante	Marie	4-120 exception 750	-	25-85
Sannoisien	Partie sup. du salifère sup.	Zone à Gypse	100	Amélie II Joseph	31 15	eau douce	
	Partie int. du salifère sup.	Marne + anhydrite + sel	180	6 puits sur 22 Amélie II	<4 35 réduit à 1,5	élevée	236
	Partie inf. du salifère sup.	Marne + anhydrite + sel	200-250	Aucun	-	-	-

Tableau 3.2-1 : Caractéristiques des horizons perméables du tertiaire (extrait du rapport de EMP/CIG sur l'hydrogéologie)

On remarque qu'aucune venue d'eau n'a été observée, en-dessous de 300 m de profondeur dans le secteur du stockage, ni dans les salifères supérieurs où se trouvent les galeries d'infrastructure minière, ni dans les séries salifères intermédiaires et inférieures reconnues par des forages miniers et pétroliers. Ainsi, le site du stockage se trouve dans un ensemble de terrains caractérisés par l'absence d'eau. Cet ensemble de 1200 m d'épaisseur appelé "bloc-hôte" dans le document CIG se trouve entre 300 m (toit du sel en couche) et 1500 m de profondeur (toit du premier aquifère sous-jacent dans les calcaires du Malm).

### 3.3 Risque de diapirisme ou de montée de sel

Les risques d'une formation du diapir et d'une montée du dôme de sel ont été analysés dans un paragraphe du rapport CIG. On note que dans la plaine du Rhin, les conditions sont assez peu favorables à la formation de diapir, en raison notamment de l'épaisseur trop réduite de bancs de sel individualisés. D'après le CIG, les valeurs typiques des seuils nécessaires au développement du diapirisme est de 500 m d'épaisseur du sel situé à 2 000 m de profondeur.

Le diapir le plus proche se trouve à 10 km à l'Est du site de stockage. C'est le diapir de Ensisheim orienté N.S et long de 15 km. Dans le secteur du site de stockage, les travaux miniers et les sondages réalisés attestent de la régularité des couches et de l'absence de diapir en formation. Si un diapir devait se constituer, ce qui est peu probable, car si les conditions étaient favorables il existerait déjà, il faudrait un minimum d'un million d'années avant qu'il atteigne la nappe alluviale. Le risque entraîné par le diapirisme est donc négligeable pour la sûreté du stockage.

L'absence d'un diapir dans le secteur du site envisagé pour le stockage est en soi une preuve convaincante que le risque de formation d'un nouveau diapir est pratiquement inexistant dans ce secteur. Ce fait semble d'ailleurs être confirmé par les données des sondages témoignant de la régularité des bancs.

Il en est de même pour la formation d'un dôme de sel, dont l'origine est distincte de celle d'un diapir. Ce dernier se forme essentiellement par suite d'une instabilité mécanique de bancs de sel soumis à une forte poussée tectonique, tandis que la montée d'un dôme de sel est exclusivement due au fait que la densité du sel gemme (2,16 pour un sel pur, 2,18 pour un sel impur) est plus faible que celle de sa couverture (typiquement 2,5). Comme par ailleurs, le sel se comporte comme un fluide visqueux (non Newtonien), son écoulement viscoplastique permet son ascension à partir d'un état initial instable (corps léger en-dessous d'un corps lourd), lorsqu'une irrégularité de taille suffisante (pli, diapir, ...) est présente à l'interface sel/couverture. Ainsi, le critère de formation d'un dôme de sel peut être exprimé par la simple relation suivante (voir le schéma de la figure 3.3-1 ci-dessous).

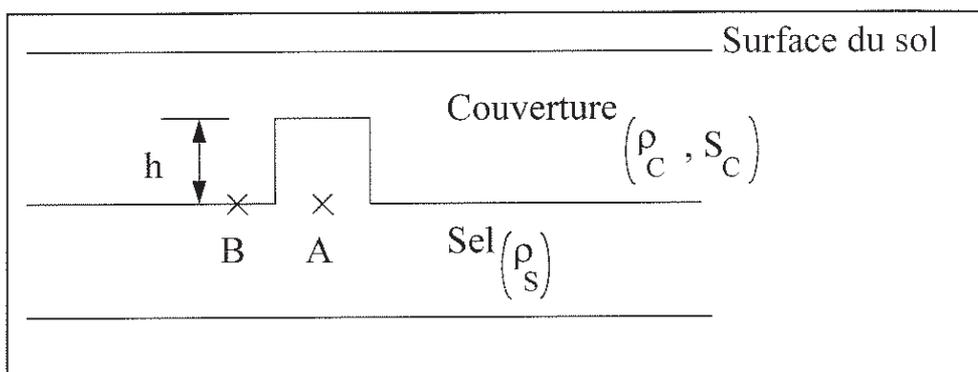


Figure 3.3-1 :  $P_B - P_A > S_C$ , soit  $(\rho_S - \rho_C)h > S_C$

où  $P_A$  et  $P_B$  sont les pressions aux point A et B,

$\rho_C$  et  $\rho_S$  représentent respectivement les densités du sel et de sa couverture,

$S_C$  est le seuil de plasticité de la couverture,

$h$  est la hauteur de l'irrégularité de l'interface.

En général, ce critère ne peut être vérifié qu'au-delà d'une certaine profondeur où les terrains sédimentaires de la couverture du sel sont assez consolidés pour disposer d'une densité supérieure à la densité du sel, cette dernière ne variant pas avec la profondeur du fait de la porosité pratiquement nulle du sel gemme. En outre, la vérification du critère ci-dessus

nécessite, nous l'avons déjà précisé, l'existence d'une irrégularité à l'interface dont la hauteur (h) doit être d'autant plus grande que la couverture du sel est résistante ( $S_c$  élevée).

Ces conditions ne sont manifestement pas réunies dans le secteur du site de stockage STOCAMINE : l'écart entre les densités du sel et de sa couverture est faible, les terrains marneux de la couverture du sel sont assez consolidés et cohérents, et il n'y a aucune irrégularité significative à l'interface sel/couverture. Le risque d'une formation d'un dôme de sel est par conséquent négligeable.

### 3.4 Risque sismique

L'étude de l'impact de la sismicité de la région Alsace sur le stockage, réalisée par l'IPG de Strasbourg, s'appuie notamment sur des mesures effectuées en surface et à 500 m de profondeur dans un sondage, celui de Chalampé. L'IPGS prend en compte les séismes du passé qui se sont produits dans la région, en particulier le séisme de Bâle (32 km du site) de 1356 de magnitude, 6,5 sur l'échelle de Richter, et un séisme équivalent à celui de Remiremont (simulé sur une faille plus proche, située 8 km du site) de 1685 de magnitude 5,5. On note que la probabilité d'occurrence de tels séismes à des distances aussi proches du site de stockage est faible ; elle peut être estimée à environ un séisme par millier d'années pour un séisme de magnitude 6,5 produit au sud du fossé de Rhénan.

En se plaçant dans les hypothèses les plus défavorables maximisant les accélérations prédites, les modèles sismiques indiquent que les accélérations du fond sont inférieures d'un facteur 4 à 5 par rapport aux accélérations de surface. A la profondeur de 500 m, les accélérations horizontales restent inférieures à 0,1 g, tandis que les accélérations verticales sont encore deux fois plus faibles. Or, il apparaît (d'après une étude bibliographique) que les ouvrages souterrains ne semblent pas connaître de dégâts significatifs pour des accélérations inférieures à 0,2 g.

Les conséquences de telles accélérations sur la tenue mécanique du cuvelage de puits dans la traversée de la nappe phréatique ont été étudiées par l'EDF sur modèle (dynamique des pieux). La conclusion de cette étude est qu'une accélération horizontale de 0,4 g n'est pas de nature à provoquer la rupture de la fonte du cuvelage. Les boulons à la profondeur de 35 m risquent cependant de subir des déformations irréversibles.

L'originalité de l'étude réalisée par l'IPGS tient, à notre sens, à la corrélation des données sismiques recueillies en surface et en profondeur. Les résultats obtenus confirment le fait souvent constaté et rapporté dans la littérature : les ouvrages souterrains sont en général peu vulnérables vis-à-vis des séismes, sans commune mesure avec les ouvrages de surface qui les surplombent. Cette réalité est souvent expliquée d'une part par l'importance de la longueur d'onde des séismes devant la taille d'un ouvrage souterrain, et d'autre part par le fait que les dégâts sont en général causés par des ondes de surface.

Il n'y a donc aucune raison de penser qu'un site de stockage profond soit davantage menacé d'un point de vue sismique que d'autres ouvrages souterrains.

Le site de stockage STOCAMINE ne fait pas a priori exception à cette règle, même si ce site se trouve dans une région réputée sismiquement active (à l'échelle nationale).

Il n'en demeure pas moins que l'incidence d'un séisme sur un stockage souterrain ne doit pas être analysée seulement d'un point de vue de l'instabilité mécanique des ouvrages du stockage. Cet aspect peut être important à court terme, notamment dans l'optique d'une réversibilité de stockage. Or, pour un stockage définitif (enfouissement), une instabilité mécanique de l'ouvrage (d'origine dynamique ou statique) ne pose de problème que si celle-ci est susceptible de menacer la sûreté à long terme du stockage, en favorisant la possibilité d'une contamination de la biosphère ; ce peut être le cas si les discontinuités créées autour de l'ouvrage s'étendent aux aquifères et autorisent une circulation des eaux souterraines. Une telle situation, si elle pouvait être rencontrée dans le stockage STOCAMINE, se serait déjà produite aux MDPAs. Or rien de tel n'a été constaté, et ce en dépit d'une exploitation totale très étendue des deux couches de potasse, et du foudroyage des terrains.

Aussi, sans préjuger du contexte spécifique du site STOCAMINE, nous proposons d'un point de vue méthodologique, comme il est d'usage dans le contexte du stockage de déchets, que les conséquences d'une activité sismique régionale pour la sûreté d'un stockage de déchets industriels soient analysées d'un point de vue de son incidence éventuelle sur les discontinuités existantes.

Dans certains cas, un déplacement des plans de failles ou de fractures majeures provoqué par des ondes sismiques peut être de nature à établir, à terme, une communication entre le stockage et les aquifères.

A notre connaissance, une telle possibilité n'existe pas dans le secteur du site de stockage STOCAMINE où la régularité des terrains est assurée. L'examen du plan des courbes de niveau de la base de la couche inférieure de potasse sur l'ensemble du bassin potassique montre que la faille la plus proche du stockage est celle séparant Max et Amélie, située à 1,5 km. Cette faille a été sollicitée par des exploitations, en conséquence des affaissements de part et d'autre se sont produits, sans pour autant amener de débit d'eau.

### **3.5 Risque d'instabilité mécanique**

L'étude réalisée par le CGES porte uniquement sur la stabilité des piliers et des chambres ; elle sera analysée dans le cadre de l'étude de la réversibilité. Concernant la stabilité à long terme, nous retiendrons le fait que la convergence des chambres entraînera un contact entre les fûts et le toit du stockage.

L'effondrement des cavités ne saurait donc avoir plus d'influence sur le recouvrement que les affaissements de surface liés au foudroyage qui a été pratiqué dans les couches inférieures et supérieures dans cette zone.

En ce qui concerne l'influence de l'exploitation de la potasse en couche inférieure et supérieure qui a été pratiquée au-dessus du site du stockage, le dossier ne prend pas en compte les effets potentiels en s'appuyant sur le fait qu'aucune venue d'eau consécutive aux

affaissements miniers n'a jamais été observée. Il est cependant nécessaire de s'interroger sur des effets à très long terme de modifications du milieu dus aux affaissements miniers, modifications pouvant se traduire par une infiltration d'eau douce à travers des terrains plus ou moins fissurés ou de perméabilité augmentée.

Des exemples de ce type d'accidents produits dans les mines de sel et de potasse sont nombreux. Dans certains cas, une accélération du débit d'eau douce provoquée par la dissolution du sel a conduit à l'invasion complète des mines par des eaux souterraines (citons par exemple les cas des Mines de sel de Avery Island et de Jefferson Island aux Etats-Unis). D'autres ouvrages souterrains en milieu salifère sont restés secs pendant près d'un siècle, avant de donner lieu à des infiltrations de saumure à faible débit sans que ce phénomène ne soit aggravé dans le temps et ne conduise à l'ennoyage des vides souterrains. Un exemple récent est la mine d'Asse dans un dôme de sel en Allemagne. Exploitée au début du siècle, cette mine est actuellement utilisée en tant que laboratoire souterrain de stockage de déchets radioactifs. Une infiltration de la saumure (quelques m<sup>3</sup>/jours) est rencontrée depuis quelques années, à la limite de l'exploitation ancienne.

De très faibles débits de la saumure sont également obtenus dans un autre laboratoire de stockage de déchets radioactifs, celui de WIPP au Nouveau Mexique aux Etats-Unis. Ce phénomène est expliqué par la perméabilité du sel résultant d'une microfissuration provoquée par les ouvrages (Stromont et al, 1991).

Le rappel des principaux résultats des mesures de perméabilité réalisées à partir de la paroi d'une galerie sur le site WIPP peut être utile : la perméabilité initiale du sel, qui est voisine de 10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup> <sup>(6)</sup> loin de la paroi, augmente de six ordres de grandeur à proximité de la paroi, alors qu'aucune fissuration n'y est visible. Ce résultat permet d'observer que :

- a) les ouvrages souterrains dans le sel entraînent une microfissuration de leur champ proche, caractérisée par une perméabilité non négligeable. Ce phénomène ne conduit pas nécessairement à un affaiblissement de la résistance mécanique du sel et donc à une complication de la tenue des terrains ;
- b) la perméabilité du champ lointain des ouvrages en milieu salifère reste cependant négligeable, bien en dessous des seuils d'imperméabilité admis par des hydrogéologues (typiquement 10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup>). Ce résultat a d'ailleurs été confirmé par des mesures in situ réalisées récemment dans le cadre d'un projet européen. La valeur de la perméabilité du banc de sel S1 mesurée à 16 m de la voie Jos-D est voisine de 10<sup>-21</sup> m<sup>2</sup>. Cette valeur, qui a été obtenue aussi bien avec de la saumure saturée qu'avec de l'azote, diminue d'un facteur dix après percolation de la saumure. Ce phénomène est attribué aux effets capillaires liés à la taille nanométrique des pores dans le sel (Cosenza et Ghoreychi, 1996).

Pour le site de stockage envisagé, deux caractéristiques nous amènent à rejeter ce scénario :

- \* Dans l'exploitation des Potasses d'Alsace, l'épaisseur exploitée (w, au maximum 6 m cumulés) est petite par rapport à l'épaisseur des couches de protection (H = 300 m) : H/w = 50. A partir de cas d'exploitation et d'études sur maquettes, il a été montré l'absence de perturbation hydrogéologique tant que le rapport H/w est supérieur à 40 (GIMM, 1975).

---

<sup>6</sup> à 1 m<sup>2</sup> correspondent 10<sup>12</sup> Darcy et 10<sup>7</sup> m/s

- \* L'exploitation a été menée largement autour du site, tout au moins en couche supérieure. Or les règles d'affaissement minier, corroborées par les mesures d'affaissement effectuées lors de l'exploitation (voir annexe F) montrent que les zones en extension dans le recouvrement sont situées en bordure de la zone exploitée. Ce n'est que dans ces zones que pourrait éventuellement se situer à long terme une augmentation de la perméabilité. Les bordures de l'exploitation se trouvent à plus de 2 km du site de stockage, ce qui permet d'écarter l'influence de ces travaux sur l'alimentation en eau du site.

### 3.6 Risque de communication par les puits

La sûreté à long terme du site envisagé pour le stockage a été étudiée par le CIG d'un point de vue d'une communication éventuelle de l'aquifère alluvial avec le stockage. On se place dans l'hypothèse de l'abandon de la concession Amélie après rebouchage des puits de mine. On considère qu'un colmatage parfait des puits est peu réaliste sur une très longue période. Le risque d'une contamination de la biosphère serait alors lié à la qualité de ce rebouchage qui peut, dans certaines conditions, mettre en relation les déchets avec les eaux de la nappe alluviale s'infiltrant dans les vides souterrains.

On admet par ailleurs que les caractéristiques hydrogéologiques de l'environnement du site de stockage (horizons perméables, leur position, leur perméabilité, ...) seront préservées dans le temps, de sorte que potentiellement la seule voie de communication entre l'aquifère et le stockage sera exclusivement constituée par les bouchons des puits et les vides résiduels (bloc-hôte imperméable sauf aux niveaux des vides résultant de l'exploitation et/ou du foudroyage, absence de toute discontinuité compromettant l'étanchéité hydraulique du système).

En adoptant une valeur pénalisante pour la perméabilité verticale du matériau de remplissage (d'après le CIG,  $5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ ), et en supposant une très grande perméabilité des vides résiduels, comparée à celle des bouchons, on calcule à l'aide de la loi de Darcy le débit d'eau susceptible de s'introduire dans les vides à travers le bouchon de chacun des puits de mine. Ce calcul est effectué en prenant une surface des puits de  $20 \text{ m}^2$ , une épaisseur active des bouchons correspondant à la distance entre le mur de l'horizon perméable le plus profond au toit du sel supérieur, et la recette supérieure du puits (cote de travaux miniers), ainsi qu'une charge hydraulique supposée constante dans le temps (hypothèse volontairement pessimiste). Cette dernière est donnée par la différence entre les cotes de la recette supérieure du puits et de la nappe alluviale.

L'addition des débits ainsi calculés pour l'ensemble des puits en communication permet d'obtenir le débit total remplissant les vides.

Dans l'état actuel, la mine Amélie est en relation avec la surface par l'intermédiaire de cinq puits (Joseph, Else, Amélie I, Amélie II et Max). Cette mine se sépare de la mine Marie-Louise par un stot de 4 km de longueur, de 5 m de hauteur et de 20 m d'épaisseur, limitant le bloc-hôte vers le Nord. Ce stot n'est actuellement traversé par aucune galerie. Toutefois, l'étude du CIG se place également dans l'hypothèse pessimiste d'un percement du stot à long terme causé par une dissolution lente. Dans ce scénario, la mine Marie-Louise sera en relation

avec la surface par l'intermédiaire de dix puits qui seront également rebouchés lors de l'abandon (trois d'entre eux ont d'ailleurs été obturés).

Suivant que les systèmes hydrauliques Amélie et Marie-Louise sont considérés ou non comme indépendants, les débits totaux s'introduisant par les puits concernés sont calculés.

Le maintien des débits dans le temps (en réalité ils doivent diminuer progressivement avec la montée de la cote du plan d'eau dans la mine, et donc avec la diminution de la charge hydraulique) permet d'estimer le temps nécessaire pour que les galeries de connexion reliant les cavités de stockage à la mine soient atteintes par l'eau. Ce n'est qu'à partir de ce moment (d'après le rapport CIG) que les déchets pourraient se trouver en contact avec de l'eau. La contamination éventuelle des aquifères proches de la surface ne pourra s'effectuer avant le remplissage total des vides (dont le volume est calculé en admettant une porosité résiduelle de 5 % après stabilisation du foudroyage des terrains au toit des deux couches de potasse exploitées).

Après remplissage des vides, il faudra encore quelques dizaines d'années pour que s'établisse un niveau d'équilibre entre les différents puits des mines concernées. Un état stationnaire sera alors obtenu.

Dans la pratique, lorsque le niveau d'eau douce atteint la recette supérieure d'un puits (cote de travaux miniers), l'eau se charge en sel et devient progressivement saturée. La saumure saturée (densité 1,2) étant plus dense que l'eau douce, elle se positionne aux points bas alors que l'eau douce remonte vers le haut. Cette transition s'effectuant d'une manière complexe, le CIG considère deux cas extrêmes :

- a) Il y a une interface abrupte eau douce/eau salée ; tant que les mines Amélie et Marie-Louise ne sont pas en communication, le calcul montre que la position de cette interface reste bien en dessous de la base des niveaux aquifères, même si l'eau n'est pas totalement saturée (ce calcul a été fait avec une densité de 1,1 correspondant à une salinité de 150 g/l). Cela signifie qu'un équilibre hydrostatique est théoriquement possible avec comme conséquence une absence de circulation de l'eau dans les vides résiduels, et donc une absence de transport d'une pollution vers l'environnement.

Tel n'est pas le cas si les mines Amélie et Marie-Louise sont en communication. Cela tient à l'approfondissement vers le nord des niveaux perméables de la couverture des séries salifères.

- b) Il y a une homogénéité verticale de la densité de la saumure (cas pessimiste). Un majorant du débit de circulation dans le système est alors calculé.

- **Ordres de grandeurs calculés.** Ci-dessous sont résumés les principaux résultats des calculs effectués par le CIG.

Cas n° 1 : Mine Amélie isolée

délai d'atteinte des déchets par l'eau : 1500 ans ;  
délai d'ennoyage total des vides de la mine : 2300 ans ;  
débit de circulation des eaux : inférieur à 10 m<sup>3</sup>/an ;  
établissement vraisemblable d'un régime hydraulique bloquant les effluents.

Cas n° 2 : Mine Marie-Louise isolée

délai d'ennoyage : 1000 ans ;  
débit de circulation des eaux : 42 m<sup>3</sup>/an.

Cas n° 3 : Système communiquant (Amélie et Marie-Louise)

débit de circulation global : 90 m<sup>3</sup>/an ;  
débit introduit susceptible d'être contaminé: 38 m<sup>3</sup>/an.

NOTA : Ces résultats sont conditionnés par deux paramètres essentiels.

- Le volume des vides résiduels des travaux miniers (pris comme 5 % du volume des vides exploités). Ce paramètre n'influe pas sur les valeurs des débits, mais affecte les délais de remplissage ; il n'est donc pas essentiel pour l'objectif de l'étude de sûreté à long terme.
- La perméabilité des bouchons. Ce paramètre (pris égal à 5.10<sup>-7</sup> m/s), en agissant simultanément sur les délais de remplissage et les débits, influe sur les flux d'eau éventuellement contaminée, et donc sur l'impact à long terme.

- **Conséquence d'une dissolution du sel.** L'eau douce dispose d'un pouvoir de dissolution du sel important (environ 300 g/l dans la condition standard) mais une fois saturée, la précipitation du sel par effet de densité peut conduire au blocage des circulations souterraines, ce qui est favorable d'un point de vue du transport de l'eau contaminée, et donc de la sûreté du stockage.

En prenant une concentration à la saturation de 300 kg/m<sup>3</sup> et un volume de vides total de 5,5 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> pour la mine Amélie, la quantité du sel dissoute lors de l'ennoyage de la mine peut être estimée à 1,65.10<sup>6</sup> tonnes, soit 800000 m<sup>3</sup>. Ce volume, réparti sur l'ensemble de l'exploitation représente une lame mince de 3 cm environ dont la disparition n'aura pas de conséquence sur la stabilité des terrains. Ces ordres de grandeurs ont conduit le CIG à conclure que le phénomène de dissolution représente un risque mineur pour l'évolution à long terme du stockage.

Pourtant la dissolution est considérée par le CIG comme potentiellement responsable d'une communication des mines Amélie et Marie-Louise, après l'ennoyage de cette dernière. La raison évoquée est qu'une attaque du stot de séparation des mines par de l'eau non saturée en sel risque d'être active du côté Marie-Louise. En effet, on se trouve en amont pendage, ce qui favorise le développement d'une émission progressive par de l'eau non saturée qui a tendance à remonter. Le CIG n'exclut donc pas un percement du stot à très long terme, phénomène qui ne pourrait en tout état de cause intervenir qu'après l'ennoyage de la mine Marie-Louise.

En considérant la valeur calculée du débit transitoire dans les vides résiduels et correspondant aux dix puits de la mine Marie-Louise (débit de 42 m<sup>3</sup>/an), le temps nécessaire à une disparition totale du stot (surface 4 km x 5 m) est estimé à 60000 ans. En notant par ailleurs, que la dissolution sera vraisemblablement plus active en des points localisés, et que l'eau atteignant le stot sera très proche de la saturation, le CIG conclut qu'une mise en communication des deux mines avant un minimum de 10000 ans est peu réaliste.

- **Conséquences de la pollution des aquifères.** Compte-tenu des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe alluviale (transmissivité  $> 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ), un puits destiné au pompage dans cette nappe donnera facilement un débit de  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ , soit  $900\,000 \text{ m}^3/\text{an}$ . En admettant, ce qui est pessimiste, que ce pompage draine la totalité de l'effluent soit  $10$  à  $40 \text{ m}^3/\text{an}$  au maximum, la dilution sera au moins d'un facteur  $25\,000$  à  $100\,000$ . En outre, puisque le débit d'effluent n'est pas influencé, ou très peu, par le débit pompé dans la nappe, le facteur de dilution augmente avec ce dernier. Ainsi un champ de captage destiné à une collectivité sera moins vulnérable qu'un puits particulier défavorablement placé.

Les résultats de l'étude du risque d'une communication entre le stockage et les aquifères, réalisée par le CIG tiennent à trois facteurs essentiels :

- 1) le scénario de référence considéré : les seules voies de communication potentielle entre les aquifères et le stockage sont constituées par les puits rebouchés ;
- 2) la qualité de rebouchage des puits qui conditionne les débits s'introduisant dans les vides souterrains, ainsi que les temps d'envoyage du stockage et de sa communication avec les aquifères ;
- 3) la communication des mines Amélie et Marie-Louise dans l'hypothèse d'un percement du stot de séparation des mines, provoqué par l'envoyage de la mine Marie-Louise.

- **Scénario de référence**

Le scénario retenu nous paraît plausible à l'échelle de quelques siècles où une extrapolation de la situation vécue, en particulier durant ce siècle, et plus précisément depuis le début de l'exploitation minière, semble réaliste. A plus long terme, compte-tenu de la distance entre les discontinuités naturelles ou susceptibles d'être créées par l'exploitation, les considérations des paragraphes 3-4 et 3-5 montrent que les voies de communications essentielles devraient rester celles des puits et des travaux miniers.

- **Qualité des bouchons**

Les connaissances acquises par les MDPAs sur les techniques de remblayage de puits montrent que cette méthode est très efficace à l'échelle de quelques années (BONTE, 1992). L'absence de mesure précise ne permet pas de fixer une valeur de perméabilité qui devrait être inférieure, comme nous l'avons dit plus haut, à celle prise par sécurité dans l'étude CGES. Il nous semble important de reprendre cet aspect par des mesures in situ sur la technique MDPA, et si nécessaire par la recherche de l'amélioration des techniques.

Un inventaire des techniques de scellement étudiées pour les barrières ouvragées dans le contexte du stockage de déchets radioactifs présenterait, à notre avis, un intérêt évident. Une étude technico-économique permettrait de comparer, par exemple, les matériaux à base d'argiles gonflants (bentonite) avec les cendres volantes utilisées par les MDPAs.

### 3.7 Recristallisation du sel

L'étude réalisée par l'Ecole de Chimie de Mulhouse (ENSCMu) vise à analyser d'un point de vue de l'équilibre chimique, l'incidence d'une dissolution du sel sur la sûreté à long terme du stockage STOCAMINE.

Cette étude se place dans un cadre thermodynamique, et définit l'état de saturation d'un sel comme un état d'équilibre solide/solution caractérisé par l'égalité des potentiels chimiques du sel en solution et du sel solide. Or, ces potentiels sont essentiellement liés à la concentration pour des expériences de laboratoire durant quelques heures. Il n'en est pas de même in situ où le temps d'évolution atteint des années, voire des siècles. Dans ce cas, le potentiel chimique d'une solution doit non seulement intégrer la contribution de la concentration, mais également celle des énergies de surface et de gravité. Ces énergies peuvent être prépondérantes dans un gisement salin profond où les conditions physico-chimiques (pression, température, hygrométrie) sont pratiquement constantes.

Pour comparer quantitativement les contributions de la concentration et des énergies de surface et de gravité, ces dernières sont exprimées, d'une façon équivalente, en fonction de l'écart de concentration.

On note qu'une sursaturation de 1 g/l de NaCl correspond à un accroissement de potentiel chimique voisin de  $15 \text{ J.mole}^{-1} \cdot (\text{g/l})^{-1}$ . Par ailleurs, une mole de NaCl élevée à une hauteur de 1 m aura son potentiel augmenté de  $0,27 \text{ J.mole}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  (valeur à  $40^\circ\text{C}$ ). Donc une hauteur de 55 m environ de sel est équivalent à une sursaturation de 1 g/l, ce qui correspond par ailleurs à une vitesse de croissance des cristaux de NaCl en solution saturée de  $V_c = 0,02 \cdot \text{g.cm}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  (d'après le diagramme présenté dans le rapport de l'ENSCMu). Cela signifie qu'une cavité verticale de 55 m de haut remplie de saumure saturée (supposée homogène) se déplacerait

vers le haut à une vitesse de  $\frac{V_c}{\rho} = \frac{0,02}{2,16} \cong 0,1 \text{ mm/h}$ . Cette valeur surestimée, obtenue à partir

d'un modèle simple de cavité verticale parfaitement agitée (hypothèse simplificatrice qui n'est pas conforme à la réalité) permet d'expliquer, d'après le rapport ENSCMu le bouchage des fissures par gradient, d'altitude dans un dépôt salin minier :

*« Une saumure saturée dissout le sel dans sa partie haute et le recristallise dans sa partie basse. Ce phénomène mène à l'obturation progressive totale et à la prise en masse de tous les passages d'eau inférieurs dans une couche de sel. Parallèlement, les poches d'eau sont rejetées par le toit du dépôt salin. Si ces phénomènes restent en général peu importants sur des périodes brèves, en raison des vitesses de diffusion relativement faibles résultant de la faiblesse des variations de potentiel chimique avec l'altitude, ils deviennent, par contre, prépondérants dès que les écoulements se font à faible vitesse, dans des conditions proches de l'équilibre. A terme ce phénomène suffit à imperméabiliser totalement une couche de sel. »*

Un raisonnement analogue a permis à l'ENSCMu d'expliquer la contribution de l'énergie de surface à la précipitation du sel dans une saumure saturée.

Des références fiables sur les énergies de surface de NaCl et KCl se faisant rares, on a retenu la valeur de l'énergie de surface de NaF ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ J/cm}^2$ ) pour estimer le temps nécessaire à l'obturation d'une fissure de 0,1 mm d'épaisseur. Ce temps est théoriquement de 10 mn dans le cas idéal d'une solution pure, mais peut atteindre en réalité quelques heures en présence d'impuretés.

Aux contributions de la gravité et de l'énergie de surface s'ajoute l'effet du gradient géothermique, lui aussi responsable de bouchage des vides remplis de la saumure saturée. L'ensemble de ces phénomènes confirme l'imperméabilité et la siccité des couches salines de même que la pérennité des gisements de sel. Ainsi conclut l'ENSCMu que tout écoulement d'eau dans des couches salées se colmate de lui-même et ne peut en aucun cas constituer un vecteur à long terme de matière.

Les processus de transport de masse dans les géomatériaux sont complexes et se prêtent mal à une modélisation précise, en particulier quantitative. Cette difficulté tient à plusieurs faits :

- a) d'une manière générale, parmi les trois modes de transport de masse : la diffusion, l'advection et la cinétique chimique (solution-précipitation), le mode de transport prépondérant peut varier dans le temps et dans l'espace. Ce mode ne dépend pas seulement de propriétés intrinsèques du milieu, et tient à l'importance relative des constantes de temps des trois processus de transport. Celles-ci dépendent aussi bien de propriétés intrinsèques que de caractéristiques extrinsèques telles que la géométrie et les dimensions de la structure considérée.

Dans le cas des évaporites, comme le sel gemme et la potasse, la dissolution-recristallisation correspond en général au processus le plus rapide, au voisinage de l'équilibre. Toutefois, ce processus peut prendre de l'ampleur en présence de l'eau douce alimentée par un système ouvert (étant donné la grande solubilité du sel : 300 à 350 g/l en condition standard).

En revanche, la diffusion est un processus de transport en principe très lent, tandis que la convection ne peut apparaître pratiquement dans le sel (compte-tenu de la porosité et de la perméabilité négligeables de ce matériau), mais peut être présente dans des cavités remplies de saumure.

- b) La dissolution-recristallisation du sel gemme, comme celle de tout autre matériau, est fortement contrôlée par la composition chimique du soluté et du solvant. Le sens de l'évolution d'une réaction chimique donnée (dissolution de NaCl par exemple), et à plus forte raison les quantités de substances dissoutes et précipitées dépendent de l'ensemble de réactions chimiques présentes dans le milieu naturel hétérogène considéré. Aucune prédiction précise ne peut être effectuée en se plaçant dans des configurations théoriques idéales d'un solide monphasé (NaCl) ou biphasé (NaCl + KCl), en contact avec un liquide pur (H<sub>2</sub>O).

- c) Dans un milieu hétérogène, la dissolution-précipitation s'opère préférentiellement dans des zones localisées, ce qui complique la prédiction de la vitesse, de l'ampleur et du chemin parcouru par ce phénomène.

Pour mieux se rendre compte combien il est difficile de prédire, d'une manière raisonnablement précise, l'incidence d'une solution-précipitation du sel sur la sûreté à long terme d'un stockage, prenons le cas d'un exemple simple : celui d'une cavité remplie de saumure.

Nous nous plaçons volontairement dans un contexte favorable à la sûreté, et admettons que la saumure est saturée, et que son équilibre n'est compris ni par une modification de la pression et de la température de la cavité et du massif (le régime stationnaire est atteint), ni par une communication avec l'extérieur (système fermé).

Des faibles écarts de pression et de température existent cependant entre le toit et le mur de la cavité, compte-tenu de la pesanteur et du gradient géothermique. Les valeurs les plus élevées sont obtenues au mur de la cavité, alors que la saumure est légèrement plus froide au toit et sa pression hydrostatique y est plus faible.

Comme par ailleurs, la densité et la concentration de la saumure dépendent de la pression et de la température (d'après les équations d'état), des courants convectifs se forment dans la cavité, et permettent une dissolution du sel au mur et sa recristallisation au toit.

Ainsi, on peut penser que la cavité est soumise, dans l'ensemble, à une descente progressive et lente provoquée par le processus de solution-précipitation. Une telle conclusion doit être nuancée puisque simultanément, un autre phénomène, d'origine mécanique, joue dans le sens opposé : la saumure étant plus légère que le sel (rapport des densités 1,2/2,16), elle tend à remonter, et ce mouvement ascendant n'est pas empêché par le sel, matériau qui ne dispose théoriquement d'aucun seuil d'écoulement viscoplastique. Précisons que la géométrie initiale de la cavité ne peut être préservée au cours de cette montée ; des faibles écarts de contraintes déviatoriques existant entre le toit et le mur, et résultant de faibles écarts de profondeurs, conduisent à un fluage dissymétrique de la paroi de la cavité. Ce dernier phénomène se poursuit tant que l'équilibre entre la pression de la saumure dans la cavité, et la contrainte lithostatique n'est pas assuré. Or, cet équilibre ne peut être atteint que si le sel est réellement imperméable ; il ne peut être obtenu si le milieu présente une certaine perméabilité bien que négligeable.

Précisons que le phénomène de remontée progressive de la cavité vers la surface du sol correspond à un cas d'école. Ce mouvement peut être arrêté dans la pratique, par des bancs d'impuretés présents au toit (ces bancs sont dotés d'un certain seuil d'écoulement, contrairement au sel). De même, la descente théorique de la cavité résultant de la solution-précipitation est fortement contrôlée par des impuretés. Il ne serait donc a priori pas évident de prévoir convenablement l'évolution à long terme du système sous l'effet conjugué de tous ces phénomènes. La situation serait encore plus complexe, si la possibilité d'une communication avec l'extérieur était considérée et que la saumure présente dans la cavité n'était pas nécessairement saturée.

Aussi, peut-on conclure de cet exemple qu'étant donné la complexité de nombreux phénomènes mis en jeu, il ne nous paraît pas justifié que le scénario de l'évolution à long terme du stockage STOCAMINE repose sur une recristallisation massive du sel isolant les déchets, après une dissolution éventuelle provoquée par l'ennoyage de la mine abandonnée.

Cette dissolution, si elle se produisait, serait certainement lente et modérée ; aucune crainte d'une dissolution massive du sel (disparition du sel) ne serait donc en principe justifiée. Toutefois, on peut se demander si une recristallisation du sel, bien que tout a fait probable dans l'hypothèse d'une infiltration lente et modérée des eaux souterraines, serait de nature à provoquer une recristallisation massive du sel isolant les déchets, après l'ennoyage de la mine abandonnée.

S'il s'avérait nécessaire pour la sécurité à long terme du système, ce processus de recristallisation massive devrait être étudié et prouvé par des essais au cours de la période de stockage temporaire.

### **3.8 Risque d'intervention humaine**

Ce scénario n'a pas été évoqué dans le dossier ; il s'agit d'une intrusion humaine qui surviendrait très longtemps après la fermeture du stockage définitif. On peut par exemple imaginer le cas d'une exploitation du sel par dissolution, et donc la réalisation d'une cavité par lessivage débouchant dans le stockage par accident ou par ignorance.

La définition d'un périmètre de risque sur le site de stockage permettrait une meilleure maîtrise de la sûreté à long terme du stockage. A titre indicatif, la réalisation de tout forage (et à plus forte raison les puits, les cavités de lessivage, ...) dans ce périmètre devrait être autant que possible évitée. Des cas exceptionnels devraient être accompagnés de mesures techniques et de contrôles stricts, qu'il conviendrait de préciser attentivement.

### **3.9 Conclusion et recommandations**

Les études réalisées sur les différents aspects de la sûreté à long terme du stockage STOCAMINE ont été effectuées par des équipes compétentes. Les approches et les méthodologies employées sont très intéressantes et ont permis une analyse fine des questions majeures soulevées par le stockage.

Sur la base de ces études, ainsi que des compléments qui ont pu être apportés par l'examen critique, il est possible de conclure sur les points suivants :

- Le site se trouve dans des conditions exceptionnellement favorables du point de vue de la lithologie et de la tectonique (éloignement des failles).
- Le scénario de référence (communication établie par les puits et les travaux miniers) est bien choisi compte-tenu de l'hypothèse de l'absence de discontinuités naturelles ou de bordure d'exploitation dans l'environnement du site.
- Dans le cadre de ce scénario, l'élément essentiel de la sûreté à long terme du site est la qualité du rebouchage des puits. L'étude actuelle se basant sur des hypothèses volontairement pessimistes de la perméabilité des bouchons montre que l'équilibre hydrostatique peut être atteint dans certains cas.

- Il est possible de diminuer la perméabilité des circuits entre l'aquifère et la surface :
  - \* en précisant la perméabilité réelle des bouchons pratiqués par les MDPA. Une expérimentation menée en liaison avec des spécialistes doit être mise en place lors d'un prochain remblayage.
  - \* en recherchant si nécessaire une amélioration de la technique de rebouchage et du choix des matériaux. Les études réalisées dans le contexte du stockage de déchets radioactifs devraient pouvoir être mises à profit.
  - \* en mettant en place si nécessaire une barrière à proximité du stockage, et en isolant le site avant abandon de la mine Amélie.
  
- Il n'est possible de considérer la prise en masse du sel, isolant les déchets par recristallisation, dans l'hypothèse d'une dissolution lente du sel, que si des études à une échelle suffisante ont montré la pertinence du phénomène.

## 4. REVERSIBILITE DU STOCKAGE

La réversibilité du stockage se définit comme la possibilité de pouvoir ressortir les déchets à tout moment au cours de la période de stockage temporaire (25 ans minimum). Le problème a été traité dans le dossier STOCAMINE aux pages 62 et 63 en s'appuyant sur l'étude de l'Ecole des Mines de Paris sur la stabilité du stockage (annexe 2 du dossier). Ce point est également abordé par l'étude de l'Ecole de Chimie de Mulhouse sur la sécurité chimique (annexe 8 du dossier).

La réversibilité du stockage repose sur :

- la traçabilité,
- la stabilité au cours du temps des contenants,
- l'accessibilité.

### 4.1 Traçabilité

La traçabilité suppose que l'on puisse connaître exactement à tout moment la position de chaque déchet dans les cavités de stockage. Les dispositions prises pour affecter à chaque fût une position et tenir à jour le plan de stockage semblent bonnes. On s'assurera de la redondance de ce plan de stockage : existence du plan en des lieux différents (quel que soit le support).

Il faut également qu'il soit possible de retrouver un type de déchet donné ; l'existence de la banque d'échantillon répond à cette nécessité.

La recherche d'un type de déchet peut être effectuée à partir des dossiers et si nécessaire de la banque d'échantillon ; les questions sur la représentativité des échantillons ont été traitées au chapitre 1.

### 4.2 Stabilité au cours du temps des contenants

La reprise d'un colis suppose que l'intégrité du contenant et si possible de sa palette soit maintenue au cours du temps.

En ce qui concerne les palettes, la corrosion externe des fûts, l'expérience des MPDA est suffisante pour conclure que l'atmosphère qui règne au fond est favorable, et que ce point ne pose pas de problème.

Pour la corrosion interne des fûts, le chapitre 1 a attiré l'attention sur la nécessité de prévoir le conditionnement de certains groupes de déchets (oxydants), de façon à éviter toute corrosion des fûts.

Pour les autres contenants (big bag) les spécifications du cahier des charges doivent pouvoir assurer une longévité suffisante ; des essais de réception pourraient être à prévoir.

Le dernier élément nécessaire pour assurer la stabilité des contenants au cours du temps est le maintien de la condition de non évolution des produits stockés. Il s'agit ici d'éviter une décomposition lente du contenu des fûts qui n'aurait pas été détectée à l'acceptation des déchets, du fait d'une cinétique des réactions très lente au départ.

Ce problème a été traité par l'étude de l'Ecole de Chimie de Mulhouse, qui propose une méthode pour aborder le problème. Compte-tenu du fait que dans le stockage, les conditions de température seront fixées<sup>7</sup>, ainsi que la géométrie (taille et position des fûts), il doit être possible de définir des critères d'évolution à partir de résultats de test sur les déchets par microcalorimétrie.

La procédure d'acceptation devra prévoir, par groupes de déchets le type, le test à mettre en œuvre et les valeurs limites d'acceptation. Pour certains groupes, il sera peut être utile de prévoir un test de calibrage en suivant l'évolution de la température des déchets en condition de stockage.

En tout état de cause, il semble nécessaire de suivre la température à l'intérieur des blocs fermés.

### 4.3 Accessibilité

La réversibilité du stockage suppose que les déchets restent accessibles pendant la durée de l'exploitation, c'est-à-dire que la stabilité des cavités et des galeries d'accès est assurée, et que la fermeture de ces cavités par convergence reste compatible avec le maniement des déchets.

L'étude réalisée par l'Ecole des Mines de Paris a porté sur la détermination des caractéristiques mécaniques du sel sur échantillon et la simulation d'un pilier de sel dans différentes configurations de chargement à l'aide du code de calcul VIPLEF.

Les simulations étant effectuées avec une loi de comportement élasto-visco-plastique du sel (loi de Lemaître), il est possible de suivre l'évolution des déformations en fonction du temps. Les conclusions de cette étude sont :

- la stabilité des piliers est assurée à long terme, les contraintes déviatoriques (écart entre la contrainte majeure et la contrainte mineure) restant très inférieures à la résistance mécanique du sel même si une zone de l'ordre de cinquante centimètres en bordure du pilier est fissurée par les contraintes de traction,

---

<sup>7</sup> on tiendra compte de l'existence de 2 températures d'ambiance du stockage l'une dans la période de manutention (basse avec l'aéragé), l'autre dans la période de fermeture du bloc (haute sans aéragé)

- la convergence des chambres augmente avec le temps selon une courbe amortie. Pour une galerie de 2,80 m d'ouverture au creusement la hauteur reste supérieure à 2,10 m pendant un siècle.

Cette étude très précise et reposant sur un modèle de comportement du sel éprouvé dans de nombreux cas est bien démonstrative de la stabilité à attendre des cavités. Nous pouvons cependant faire les remarques et compléments suivants :

- La résistance à la compression uniaxiale du sel obtenue par l'Ecole des Mines de Paris est sensiblement plus forte que la résistance à long terme de sel d'Amélie d'après les études expérimentales de G.3S (environ 30 MPa contre 15 MPa). Une confrontation de ces différentes mesures aurait été intéressante pour détecter des évolutions de résistance (position stratigraphique, faciès). En tout état de cause, ceci ne remet pas en cause la stabilité d'ensemble du pilier mais renforcerait la probabilité d'une fissuration des bords de pilier.
- Les résultats d'un calcul dépendant des paramètres qui y sont introduits, il est important de "caler" le modèle de comportement sur des mesures effectuées in situ dans un ouvrage existant. Dans ce but, une simulation d'une double voie d'infrastructure a été effectuée, qui conduisait à une convergence de l'ordre de 24 cm au bout d'une quinzaine d'années. Malheureusement, l'Ecole des Mines de Paris n'avait pu disposer de mesures pour comparer son modèle avec la réalité.

Des mesures de convergence ont pu être retrouvées pour une voie de même géométrie à la mine Amélie (voir annexe F). Les valeurs au bout de 14 ans de mesure variaient sur 5 stations entre 5,5 et 15,8 cm. Ces valeurs sont du même ordre que celles trouvées dans une voie située au sud-ouest du lieu prévu pour le stockage lors d'une étude européenne sur le comportement thermo-élasto-viscoplastique du sel : 0,25 % par an contre 0,35 % dans le cas ci-dessus.

Les valeurs expérimentales sont donc nettement inférieures à celles issues du calcul. En conséquence, on peut penser que le calcul pour les galeries de stockage est lui aussi pessimiste, donc que l'accessibilité est assurée pour une durée largement suffisante.

Il est néanmoins conseillé, comme le prévoit le projet STOCAMINE, d'effectuer des mesures de convergence dès le découpage du premier bloc. Le plan de mesure, qu'il serait utile de concevoir avec un organisme spécialisé, devrait prévoir les moyens d'obtenir le calage du modèle et d'autre part de définir les moyens de mesure simplifiée de contrôle à mettre en place par la suite. Les mesures doivent naturellement être poursuivies à la fermeture du bloc<sup>8</sup> et l'instrumentation prévue en conséquence.

---

<sup>8</sup> d'après les études expérimentales de G.3S, les vitesses de déplacement du massif sont très affectées par la variation de la température ambiante résultant de l'aérage

- La modélisation effectuée ne concerne qu'un pilier découpé par les chambres qui l'entourent. Elle permet d'effectuer sans problème le découpage des premiers blocs. Par la suite, il y a lieu de s'interroger sur la stabilité des bancs du toit en tenant compte de l'influence de l'exploitation de la potasse et de l'effet de la largeur totale de l'ouvrage de stockage. En effet, la largeur prévue est importante, de l'ordre de 2 fois la profondeur. Il peut être recommandé de ne pas traiter toute cette zone par petits piliers abandonnés, mais de la partager en laissant des "piliers barrières" beaucoup plus larges de place en place.

Les mesures de déformations mises en œuvre dans les premiers blocs serviront à évaluer l'intérêt de ces piliers barrières et à les dimensionner.

#### 4.4 Conclusion

La réversibilité du stockage peut être assurée pendant un temps long par rapport aux 25 ans minimum. Pour assurer cette réversibilité, il convient de mettre en place les mesures permettant :

- de vérifier les calculs de dimensionnement au niveau de la stabilité des ouvrages et de l'évolution thermodynamique des déchets,
- de contrôler dans chaque bloc fermé l'évolution de la convergence et de la température. Le contrôle des blocs portera également sur l'atmosphère qui y règne en particulier du point de vue grisou car il n'y aura plus d'aéragé pour diluer d'éventuelles venues.

Compte-tenu du développement progressif du stockage et de l'évolution lente des phénomènes, il est tout à fait possible de réagir à une évolution défavorable et de modifier le dimensionnement du stockage (position de bandes fermes par exemple).

## **RESUME ET CONCLUSIONS**

### **Mission de l'INERIS**

Compte tenu des demandes formulées lors de la Réunion de la Commission Locale d'Information et de Surveillance (CLIS), la société STOCAMINE a demandé à l'INERIS son avis d'expert sur les points suivants de son dossier de demande d'autorisation :

- appréciation sur la méthodologie des études,
- impact à court terme,
- impact à long terme,
- conditions de réversibilité.

Pour remplir sa mission l'INERIS a suivi la démarche suivante :

- visite du site,
- analyse du dossier STOCAMINE,
- demande et analyse d'informations supplémentaires,
- réalisation d'études complémentaires,
- rédaction, présentation et discussion de l'avis.

Pour l'impact à long terme, l'INERIS s'est appuyé sur la sous-traitance d'un expert du Groupement pour l'étude des Structure Souterraines de l'Ecole Polytechnique.

### **Appréciation sur la méthodologie**

L'ensemble des documentations et des études requises par la réglementation a été fourni dans le dossier. Le document de synthèse intitulé "une mine au service de l'environnement" s'appuie sur des études intéressantes, bien documentées, effectuées par des organismes compétents. Sur le contenu général du dossier, les seules remarques de l'INERIS portent sur la lisibilité (renvois à l'intérieur du document et entre le document et les annexes).

L'étude d'impact traite exhaustivement l'ensemble des thèmes exigés par la réglementation. Pour la clarté du dossier, l'INERIS a demandé à la société STOCAMINE de fournir des informations complémentaires qui ont été annexées au rapport.

L'avis de l'INERIS est que le dossier met bien en évidence les impacts potentiels sur l'environnement et les mesures prises pour les minimiser, le point principal étant le risque de pollution de la nappe phréatique traité dans les paragraphes suivants.

L'INERIS recommande la mise en place d'un programme de surveillance des impacts. Ce programme devrait débuter par un "état 0" caractérisation des différents milieux (air, sol, eau, bruit) sur site et hors site avant le début de l'exploitation et se poursuivre pendant toute la durée de l'exploitation. La surveillance servira à gérer les risques de pollution en cours d'exploitation et à évaluer les impacts résiduels lors de la remise en état du site au jour.

La notice hygiène et sécurité définit bien les moyens de prévention et de protection, les consignes d'exploitation à mettre en place pour la protection des opérateurs. Elle insiste à juste titre sur l'importance de leur formation aux risques rencontrés. Au vu des scénarios d'incendie, l'INERIS recommande une formation particulière sur ce thème et la mise en place de niches de secours pour le personnel.

L'étude de dangers aborde bien l'ensemble des thèmes habituellement retenus pour ce type d'étude.

L'avis de l'INERIS est que les principaux risques ont été analysés et les mesures de prévention et de protection identifiées. Cependant la méthodologie utilisée fait mal apparaître l'exhaustivité de l'analyse des risques, en conséquence la justification des scénarios d'accident retenus a du mal à apparaître clairement. Par ailleurs, certains scénarios n'ont pas donné lieu à une quantification des effets.

L'INERIS a donc mené une étude complémentaire pour s'assurer de l'exhaustivité de l'étude de dangers, (l'analyse préliminaire des dangers présentée ci-dessous), puis repris les scénarios dimensionnants présentés au chapitre 2 concernant les impacts à court terme.

L'analyse préliminaire des dangers s'appuie sur le retour d'expérience d'activités analogues, minières d'une part, entreposage d'autre part. Compte tenu du contexte du projet STOCAMINE, les risques principaux à court terme sont en plus des risques naturels (séisme, foudre, grisou) les risques mécaniques (chute, collision) et les risques d'incendie.

L'examen du procédé de stockage montre qu'il est possible de scinder les arbres de défaillance, ce qui limite fortement les possibilités d'accident :

- la séparation dans l'espace des activités de creusement et de manutention permet d'affirmer que les premières n'influencent pas sur les secondes,
- la sélection des produits stockés est faite de manière à ce que ces produits n'influencent pas sur leur emballage.

Dans ces conditions, l'analyse préliminaire des dangers a porté :

- sur l'adéquation des groupes de produits avec le stockage et la procédure d'admission,
- sur la rupture accidentelle des contenants.

Les conclusions suivantes peuvent être retenues :

- \* Les critères d'exclusion sont bien choisis. Il convient de préciser le terme trop général de réaction avec l'eau ou une solution saline ; il s'agit bien d'exclure les produits qui, en présence d'eau ou de solution saline, conduiraient à des produits explosifs ou inflammables. Une attention particulière sera portée au taux d'humidité de certains déchets ainsi qu'au caractère comburant ou oxydant fort ; le conditionnement sera adapté en conséquence.
- \* La procédure d'acceptation précisera, pour chaque groupe de déchets, la méthode d'analyse et les seuils d'acceptation ainsi que les traitements et conditionnements adaptés.
- \* La procédure d'admission des déchets apporte dans son principe toute sécurité sur la nature des déchets stockés. Il appartient à la société STOCAMINE de choisir pour chaque groupe de déchets les méthodes de mesures appropriées. L'INERIS attire l'attention sur les techniques d'échantillonnage à mettre en oeuvre pour obtenir des résultats représentatifs. Les possibilités de contrôle par un organisme compétent à l'initiative de l'Administration ou de la CLIS permettent de s'assurer de l'efficacité du système.
- \* L'analyse des modes de rupture du contenant confirme que les situations les plus dangereuses pour l'environnement sont :
  - la chute d'un colis dans le puits,
  - un incendie au jour : la mise en place d'un mur coupe feu entre le dépôt de transit jour et l'aire de déchargement permet de limiter le scénario à l'incendie d'un camion en cours de déchargement,
  - un incendie au fond.

## Impact à court terme

Les études d'impact et de dangers effectuées par STOCAMINE et complétées par les analyses de l'INERIS permettent d'identifier les impacts potentiels sur l'environnement au cours de la phase de mise en place des déchets (impacts à court terme). Ces impacts ont été étudiés tant en fonctionnement normal de l'installation que dans le cadre d'accidents éventuels. Les risques principaux ainsi identifiés sont les suivants :

- **Risques naturels.** En ce qui concerne le site, on peut retenir les séismes, la foudre, le grisou et l'inondation (ou remontée de la nappe). Une protection contre la foudre des installations du jour est à prévoir. Compte-tenu de la proximité de la nappe par rapport à la surface, son évolution est à surveiller pour se prémunir d'un risque d'inondation. Le risque grisou peut être maîtrisé par les mesures habituelles mises en oeuvre dans l'exploitation minière. Les effets d'un séisme potentiel ont été étudiés dans le dossier. Il n'y a pas de risque spécifique pour le stockage fond, les dégâts pouvant se situer aux installations jour et à la tête des puits. Les effets majorants sont une augmentation des venues d'eau dans le puits qui peut être maîtrisée par le pompage.

- **Risques de pollution de la nappe.** La nappe superficielle étant très vulnérable du fait de sa proximité de la surface et de la forte perméabilité des terrains, des mesures importantes sont prévues pour éviter sa pollution : l'ensemble des opérations de manutention sont effectuées sur une dalle reliée à un bassin étanche. Ce bassin a une capacité lui permettant de recevoir les eaux en cas d'incendie.

Il semble nécessaire de concevoir le bassin étanche de façon à ce qu'il soit au-dessus de la position la plus haute de la nappe, et de contrôler les eaux de ruissellement sur les parkings et la voirie.

Ces dispositions doivent être complétées par une surveillance de la qualité des eaux et des niveaux piézométriques sur le site et hors du site.

- **Risques de pollution atmosphérique.** L'analyse des risques montre que la pollution atmosphérique ne pourrait se produire que dans le cadre de situations accidentelles conduisant à une ouverture du conditionnement des déchets, suite à une chute ou à un incendie.

Les effets de telles situations accidentelles sont maîtrisables par l'ensemble des dispositifs de prévention et de protection, ainsi que des consignes décrites dans le dossier. Les scénarios dimensionnants permettent d'identifier les mesures à mettre en place afin de traiter les risques résiduels :

- \* Dans le cas de la chute d'un colis, il convient de prendre en compte la nature pulvérulente de certains déchets par le biais d'un conditionnement adapté.
- \* La limitation des effets d'un incendie au jour est obtenue grâce à la séparation entre l'aire de déchargement et le stockage temporaire jour par un mur et porte coupe-feu. Dans ces conditions, les distances d'effets majorants d'un incendie de camion en cours de déchargement sont de l'ordre d'une centaine de mètres.
- \* Les effets d'un incendie au fond peuvent être limités en assurant un isolement du point de vue aéraire du stockage fond dans les dix minutes qui suivent un incendie d'engin non maîtrisé. Par suite de la dilution, on n'observe au sol en surface que des effets inférieurs à l'IDLH.

L'ensemble des scénarios envisagés montrent que les effets potentiels sont circonscrits au site proprement dit ou à sa proximité immédiate dans le cas d'un incendie de camion sur son aire de déchargement. De plus, la cinétique de ce scénario impose une action rapide. C'est pourquoi, il convient d'établir l'équivalent d'un Plan d'Opération Interne incluant des dispositions particulières d'information et de protection des tiers situés dans le voisinage immédiat. De ce fait, l'établissement d'un Plan Particulier d'Intervention (PPI) n'apparaît pas nécessaire.

#### 4- Impact à long terme

Les études réalisées sur les différents aspects de la sûreté à long terme du stockage STOCAMINE ont été effectuées par des équipes compétentes. Les approches et les méthodologies employées sont très intéressantes et ont permis une analyse fine des questions majeures soulevées par le stockage.

Sur la base de ces études, ainsi que des compléments qui ont pu être apportés par l'examen critique, il est possible de conclure sur les points suivants :

- Le site se trouve dans des conditions exceptionnellement favorables du point de vue de la lithologie et de la tectonique (éloignement des failles).
- Le scénario de référence (communication établie par les puits et les travaux miniers) est bien choisi compte-tenu de l'hypothèse de l'absence de discontinuités naturelles ou de bordure d'exploitation dans l'environnement du site.
- Dans le cadre de ce scénario, l'élément essentiel de la sûreté à long terme du site est la qualité du rebouchage des puits. L'étude actuelle se basant sur des hypothèses volontairement pessimistes de la perméabilité des bouchons montre que l'équilibre hydrostatique peut être atteint dans certains cas.
- Il est possible de diminuer la perméabilité des circuits entre l'aquifère et la surface :
  - \* en précisant la perméabilité réelle des bouchons pratiqués par les MDPA. Une expérimentation menée en liaison avec des spécialistes doit être mise en place lors d'un prochain remblayage.
  - \* en recherchant si nécessaire une amélioration de la technique de rebouchage et du choix des matériaux. Les études réalisées dans le contexte du stockage de déchets radioactifs devraient pouvoir être mises à profit.
  - \* en mettant en place si nécessaire une barrière à proximité du stockage, et en isolant le site avant abandon de la mine Amélie.
- Il n'est possible de considérer la prise en masse du sel, isolant les déchets par recristallisation, dans l'hypothèse d'une dissolution lente du sel, que si des études à une échelle suffisante a montré la pertinence du phénomène.

## 5- Réversibilité du stockage

La réversibilité du stockage repose sur la traçabilité des déchets, la stabilité au cours du temps des contenants et l'accessibilité du stockage.

La traçabilité est assurée par le plan de stockage, les dossiers des livraisons et la banque d'échantillon. Il convient de s'assurer de la redondance du plan de stockage.

La stabilité des contenants dépend d'une part du bon choix du conditionnement en fonction du produit stocké (produit oxydant) ou de sa propre longévité (big bag). D'autre part il faut éviter l'évolution lente des produits stockés. Ce point a été prévu dans la procédure d'acceptation, (test de stabilité thermique). Pour certains groupes de déchets, un calibrage peut être utilement réalisé en suivant l'évolution de la température des déchets en condition de stockage.

L'accessibilité des déchets est assurée par les calculs sur modèle de stabilité des cavités et de convergence montrant que la fermeture des galeries de stockage reste compatible avec le maniement des déchets pendant une période de temps très supérieure à la durée minimum de stockage réversible (25 ans). Les résultats des calculs de convergence ont pu être confortés par des valeurs expérimentales mesurées dans des voies à proximité du lieu de stockage et qui ont été communiquées à l'INERIS. Il est toutefois nécessaire de contrôler, comme le prévoit le projet, l'évolution de la stabilité des terrains dès le creusement des premiers blocs par des mesures de déformations. Ces mesures peuvent servir de base à une étude de stabilité globale du stockage souterrain, dont l'objectif sera de confirmer que l'ensemble du stockage peut être traité par petit pilier ou s'il est préférable de laisser par place des piliers "barrières" plus larges.

Les conclusions de l'INERIS sont donc que la réversibilité peut être assurée pour une durée de stockage longue par rapport aux 25 ans minimum. L'INERIS conseille de mettre en place les mesures permettant :

- de vérifier les calculs de dimensionnement au niveau de la stabilité des ouvrages et de l'évolution thermodynamique des déchets,
- de contrôler dans chaque bloc fermé l'évolution de la convergence et de la température. Le contrôle des blocs portera également sur l'atmosphère qui y règne en particulier du point de vue grisou car il n'y aura plus d'aérage pour diluer d'éventuelles venues. Compte tenu du développement progressif du stockage et de l'évolution lente des phénomènes, il est tout à fait possible de réagir à une évolution défavorable et de modifier le dimensionnement du stockage (position de bandes fermes par exemple).

## 6- Conclusion générale

Le projet de stockage souterrain STOCAMINE présente des conditions exceptionnellement favorables :

- conditions géologiques et hydrogéologiques,

- reconnaissance de l'environnement du site lors de l'exploitation minière,
- expérience des opérateurs en matière de techniques minières et de traitement de déchets,
- accessibilité du site en surface.

Les études présentées dans le dossier complétées par celles qui ont pu être réalisées par l'INERIS permettent d'avoir une idée claire des impacts potentiels tant en fonctionnement normal qu'en cas d'accident.

Ces impacts doivent pouvoir être contrôlés par les mesures de prévention et de protection exposées dans le dossier, complétées par celles proposées par l'INERIS dans ce rapport.

Les principales recommandations supplémentaires de l'INERIS peuvent être ainsi résumées :

- au niveau des moyens à mettre en œuvre,
  - 1) Modifier le bassin de collecte des eaux de façon à le mettre hors nappe, et collecter les eaux des parkings et voirie.
  - 2) Séparer par des murs et porte coupe-feu l'aire de déchargement du stockage temporaire jour.
  - 3) Assurer un isolement du stockage fond en moins de dix minutes en cas d'incendie d'engin.
  - 4) Mettre en place des niches de secours au fond.
  - 5) Assurer la protection contre la foudre des installations jour.
- au niveau des procédures :
  - 1) Pour chaque catégorie de déchets, une procédure définira les techniques d'échantillonnage, les tests d'acceptation et de contrôle, leur méthodologie, les valeurs limites ainsi que le traitement et conditionnement des déchets,
  - 2) Un plan d'urgence, équivalent d'un plan d'opération interne, reprendra l'ensemble des moyens à mobiliser en cas d'accident ou d'incident, les mesures à prendre et les procédures à suivre. Ce plan prévoira les liaisons à établir si nécessaire avec les entreprises voisines du centre de stockage sur le site.
- au niveau des contrôles :
  - 1) Un programme de surveillance des impacts au jour, en particulier de la qualité des eaux et des sols sur site et hors site. Un état zéro est à réaliser avant le début de l'exploitation.
  - 2) Un programme de surveillance des cavités de stockage en cours de remplissage et après leur fermeture (déformation des terrains, température, qualité de l'air).
- au niveau des études pendant la période de stockage réversible :
  - 1) Validation du dimensionnement du stockage.
  - 2) Calage de la méthode d'estimation de l'évolution thermodynamique des déchets.
  - 3) Méthode de fermeture définitive des puits et accès.

## INDEX - GLOSSAIRE

DRIRE	:	Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement
I.D.L.H.	:	Immediately Dangerous for Life and Health
L.I.E	:	Limite Inférieure d'Explosivité
L.S.E	:	Limite Supérieure d'Explosivité
VLE	:	Valeur Limite d'Exposition
VME	:	Valeur Moyenne d'Exposition

## REFERENCES

- [1] Pocket guide to chemical hazards. NIOSH Publication n°94-116. June 1990.
- [2] G. HESKESTAD, « Engineering Relations for Fire Plumes », Fire Safety Journal, vol. 7 (1984), pp. 25-32.
- [3] C.A. BRIGGS, « Plume Rise », U.S. ATOMIC ENERGY COMMISSION. Office of Information Services. 1969.
- [4] F. PASQUILL, F.B. SMITH, « Atmospheric diffusion », Third Edition, Ellis Horwood, Chichester, 1983.
- [5] NFPA 921, « Fire and Explosion Investigations », 1992 edition, pp.921-15 à 921-23.
- [6] P. PONS, H. SIMON, G. MAVROTHALASSITIS, "Evaluation de l'aptitude du logiciel PHAST version 4.2 à traiter des conséquences de mise à l'atmosphère de produits inflammables et/ou toxiques", Rapport INERIS : 31FP51, 1995
- [7] R.L. Van ZELE, R. DIENER. "On the road of HF mitigation", Hyd. Proc, Juin 90, pp. 92-98 ; Juillet 90, pp. 77-80.
- [8] M.E. DAVIES, S. SINGH. "The phase II trials : a data set on the effect of obstructions", Journal of Hazardous Mat. 11, 1985, pp. 301 323.
- [9] « Maîtrise de l'urbanisation autour des sites industriels à haut risque » - Guide octobre 1990 - Secrétariat d'état auprès du Premier Ministre chargé de l'environnement et de la prévention des risques technologiques et naturels majeurs - DEPPR - Service de l'Environnement Industriel.
- [10] P. BEREST, M GHOREYCHI, S. GEOLTRAIN, « Risques liés à la dissolution du sel gemme : la notion de couverture », Journée sur le sel, Ecole Polytechnique, 1er Mars 1984.

- [11] M. BLANC-VALLERON, « Les formations paléogènes évaporitiques de bassin potassique de Mulhuse et des bassins plus septentrionaux d'Alsace », Thèse Docteur-ès-Sciences, Université de Strasbourg, 1990.
- [12] Ph COSENZA, M. GHOREYCHI et al, "First results and interpretation of in situ permeability measurement in salt to gas and to brine", CEC Workshop Pegasus, Rapolano Terme (Italie), EUR 16746 EN, pp. 167-175, 1996.
- [13] M. GHOREYCHI, M. RAYNAL, J. ROMAN, "Implementing and Minorng Thermomechanical tests in a salt formation of a French Potash Mine", 33<sup>rd</sup> U.S. Symp. Rock Mechanics, Santa-Fe (USA), pp. 181-200, Juin 1992.
- [14] M. GHOREYCHI, "Near Field Investigation in Salt : CPPS and Permeability in situ tests (Amélie-Mine, MDPa, France)", CEC Workshop Thermo-Hydro-Mechanical Testing and Modelling, Bruxelles, 10-11 Janvier 1995, EUR 16219 EN.
- [15] P. LEBRUN, "Evolution des caractéristiques pétrophysiques des couches salifères sous sollicitations thermo-mécaniques", Thèse en Géologie de l'Ingénieur, ENSMP, 30 Novembre 1993.
- [16] L. THOREL, M. GHOREYCHI, Ph. COSENZA, S. CHANCHOLE, « Damage and failure of salt rock under dry or wet conditions » 4<sup>th</sup> Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Montréal (Canada), 17-18 Juin 1996.
- [17] J.C. STORMONT, C.C. HOWARD et al, "Charges in rock salt permeability due to near-by excavation", Rock Mechanics as a Multidisciplinary science, Roeggier, Balkema Edition pp. 899-907, Rotterdam, 1991.
- [18] F. WALGENWITZ, Ph. MAGET, R. TIETZE, "Synthèse géothermique du fossé Rhénan supérieur", rapport BRGM, Service Géologique Régional Alsace, 1979.
- [19] W. GIMM, M. SIEGMUNDT, « Internationalen Stand und Entwicklungstendenzen bei werkstermen Abhauverfahren im Kalibergbau. », Neubergbautechnik Heft 11, nov. 1975.
- [20] G. BONTE, « Le remblayage des puits aux MDPa », Revue de l'industrie minière, février 1992.

**ANNEXE A :**

**LISTE DES DOCUMENTS SOUMIS A L'ANALYSE**

Les documents examinés ont été les suivants :

- Projet technique,
- Etude d'impact,
- Etude des dangers,
- Notice relative à l'hygiène et à la sécurité,
- Plan d'ensemble indiquant les positions projetées de l'installation ainsi que le tracé des égouts existants (échelle 1/500),
- Carte au 1/25000 indiquant la situation du centre de stockage,
- Carte au 1/2000 des abords de l'installation,
- Autorisation des MDPAs, propriétaire, d'utiliser une parcelle pour l'installation du projet,
- Ensemble d'études confiées à des organismes extérieurs :
  - \* étude de mécanique des roches (Ecole des Mines de Paris),
  - \* étude de sismicité (Institut Physique du Globe de Strasbourg),
  - \* étude hydrogéologique (Ecole des Mines de Paris),
  - \* étude sur le flux des déchets admissibles (ANRED),
  - \* étude de danger (PEC-SIE),
  - \* étude de sismicité (EDF),
  - \* étude de sécurité chimique (Ecole de Chimie de Mulhouse),
  - \* étude de sécurité chimique sur le projet MDPA de stockage profond des déchets industriels dans la mine Joseph Else à Wittelsheim (Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse).

**ANNEXE A :**

**LISTE DES DOCUMENTS SOUMIS A L'ANALYSE**

Les documents examinés ont été les suivants :

- Projet technique,
- Etude d'impact,
- Etude des dangers,
- Notice relative à l'hygiène et à la sécurité,
- Plan d'ensemble indiquant les positions projetées de l'installation ainsi que le tracé des égouts existants (échelle 1/500),
- Carte au 1/25000 indiquant la situation du centre de stockage,
- Carte au 1/2000 des abords de l'installation,
- Autorisation des MDPA, propriétaire, d'utiliser une parcelle pour l'installation du projet,
- Ensemble d'études confiées à des organismes extérieurs :
  - \* étude de mécanique des roches (Ecole des Mines de Paris),
  - \* étude de sismicité (Institut Physique du Globe de Strasbourg),
  - \* étude hydrogéologique (Ecole des Mines de Paris),
  - \* étude sur le flux des déchets admissibles (ANRED),
  - \* étude de danger (PEC-SIE),
  - \* étude de sismicité (EDF),
  - \* étude de sécurité chimique (Ecole de Chimie de Mulhouse),
  - \* étude de sécurité chimique sur le projet MDPA de stockage profond des déchets industriels dans la mine Joseph Else à Wittelsheim (Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse).



**ANNEXE B :**

**TABLEAU D'ANALYSE PRELIMINAIRE DES DANGERS RELATIFS A  
LA MANUTENTION DES FUTS DEPUIS LEUR ARRIVEE SUR LE  
SITE JUSQU'A LEUR STOCKAGE AU FOND**

Activité élémentaire	Entités dangereuses ou agression externe	Événement causant une situation dangereuse	Événement causant un accident potentiel	Accident potentiel	Caractère	Zone d'effets	Mesures de prévention	Mesures de protection	Zone d'effets du risque résiduel
1	Entrée du camion sur le site	État du camion, circulation de véhicules	Collision camion	Incendie camion, rupture du conteneur	Effet thermique, toxicité, pollution	Partie jour du site et extérieur	Signalisation adaptée, limitation de la circulation, respect des distances entre les camions, vérification de l'état du véhicule	Présence d'extincteur, formation du personnel à l'intervention	Partie jour du site et extérieur
2	Stationnement en attente	État du camion, circulation de véhicules	Collision camion, présence simultanée de sources d'inflammation et de produits inflammables	Incendie camion, rupture du conteneur	Effet thermique, toxicité, pollution	Partie jour du site et extérieur	Signalisation adaptée, limitation de la circulation, respect des distances entre les camions, vérification de l'état du véhicule	Présence d'extincteur, formation du personnel à l'intervention	Partie jour du site et extérieur
3	Positionnement sur l'aire de déchargement	État du camion, circulation de l'engin à fourche	Collision camion, présence simultanée de sources d'inflammation et de produits inflammables	Incendie camion, rupture du conteneur	Effet thermique, toxicité, pollution	Extension de l'incendie à l'ensemble du dépôt, extension des effets au site et à l'extérieur	Consignes et signalisation adaptées, formation du personnel	Idem et mur coupe-feu entre l'aire de déchargement et l'entrepôt au jour	Site et extérieur
4	Déchargement sur l'aire devant le labo (par engin à fourche)	État du camion, circulation et état de l'engin	Collision engin, percement par fourche	Incendie camion, rupture du conteneur	Effet thermique, toxicité, pollution	Partie jour du site	Limitation des quantités transportées, déchargement de l'aire de manutention	Idem et mur coupe-feu entre l'aire de déchargement et l'entrepôt au jour	Site et extérieur
5	Ouverture de fûts labo pour contrôle au labo	Manipulation des fûts	Renversement	Rupture du conteneur	toxicité, pollution	Labomatière, entrepôt, extension éventuelle à la partie jour du site	Optimisation des opérations de manutention, consignes adaptées	Rétention, moyens d'inertage et de confinement, formation du personnel à l'intervention	Entrepôt -
6	Reprise depuis labo pour entrepôt au jour, ou descente	Circulation et état de l'engin	Collision engin, percement par fourche	Incendie engin, rupture du conteneur	Effet thermique, toxicité, pollution	Partie jour du site	Aire de circulation dégagée, pas d'opérations simultanées, consignes et formation adaptées, état de l'engin	Présence d'extincteur, formation du personnel à l'intervention	Partie jour du site
7	Reprise depuis entrepôt au jour et encagement	Circulation et état de l'engin	Collision engin, percement par fourche	Incendie engin, rupture du conteneur	Effet thermique, toxicité, pollution	Partie jour du site	Aire de circulation dégagée, pas d'opérations simultanées, consignes et formation adaptées, état de l'engin	Présence d'extincteur, formation du personnel à l'intervention	Partie jour du site
8	Descente dans la cage (engin à fourche)	Basculement du colis, rupture du câble	Chute à partir de la cage, chute de la cage	Rupture du conteneur	toxicité, pollution	Parties souterraines	Dimensionnement des équipements et vérifications périodiques	Conduite de l'aérage, évacuation du personnel au fond	Parties souterraines
9	Sortie de cage	Circulation et état de l'engin	Collision engin, percement par fourche	Incendie engin	Effet thermique, toxicité, pollution	Parties souterraines	Aire de circulation dégagée, pas d'opérations simultanées, consignes et formation adaptées, état de l'engin	Présence d'extincteur, formation du personnel à l'intervention, présence de niches et d'équipements individuels	Parties souterraines
10	Transfert à la plateforme de transit	Circulation et état de l'engin	Collision engin, percement par fourche	Incendie engin	Effet thermique, toxicité, pollution	Parties souterraines	Matérialisation au sol des zones de manutention, aire de circulation dégagée, consignes et formation adaptées, état de l'engin	Présence d'extincteur, formation du personnel à l'intervention, présence de niches et d'équipements individuels	Parties souterraines
11	Chargement sur engin de transport	Circulation et état des engins	Idem avec les deux engins	Incendie engins	Effet thermique, toxicité, pollution	Parties souterraines et extérieur par retour d'air	Aire de circulation dégagée, pas d'opérations simultanées, consignes et formation adaptées, état des engins	Présence d'extincteur, formation du personnel à l'intervention, présence de niches et d'équipements individuels	Parties souterraines et extérieur par retour d'air
12	Transport au bloc de stockage (1500 cm)	Circulation et état de l'engin	Collision engin de transport	Incendie engin de transport	Effet thermique, toxicité, pollution	Parties souterraines et extérieur par retour d'air	Aire de circulation dégagée, pas d'opérations simultanées, consignes et formation adaptées, état de l'engin	Présence d'extincteur, formation du personnel à l'intervention, présence de niches et d'équipements individuels	Parties souterraines et extérieur par retour d'air
13	Déchargement par engin à fourche	Circulation et état des engins	Idem avec les deux engins	Incendie engins	Effet thermique, toxicité, pollution	Parties souterraines et extérieur par retour d'air	Aire de circulation dégagée, pas d'opérations simultanées, consignes et formation adaptées, état des engins	Présence d'extincteur, formation du personnel à l'intervention, présence de niches et d'équipements individuels	Parties souterraines et extérieur par retour d'air
14	Mise en place dans stockage	Circulation et état de l'engin	Idem avec engin à fourche	Incendie engin à fourche	Effet thermique, toxicité, pollution	Parties souterraines et extérieur par retour d'air	Matérialisation au sol des zones de manutention, aire de circulation dégagée, consignes et formation adaptées, état de l'engin	Mesures d'isolement entre l'engin et le stockage, présence d'extincteurs, de niches et d'équipements individuels	Parties souterraines

**ANNEXE C :**

**EVALUATION DES CONSEQUENCES DE LA DISPERSION DES  
FUMÉES CONSECUTIVES A UN INCENDIE**

## **INTRODUCTION**

Pour évaluer les conséquences de la dispersion des fumées issues d'un incendie, l'INERIS propose la démarche suivante, en six étapes :

- évaluation des principales caractéristiques de l'incendie,
- détermination des produits de combustion formés et de leur débit de rejet,
- définition d'un critère de toxicité,
- caractérisation de l'émission des fumées,
- définition des conditions météorologiques retenues,
- modélisation de la dispersion atmosphérique du terme source de rejet atmosphérique.

### **1. EVALUATION DES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'INCENDIE**

Le potentiel calorifique est estimé à partir de l'analyse quantitative du contenu du stockage considéré, ainsi que des enthalpies de combustion de chaque produit entreposé.

La puissance thermique de l'incendie est déterminée à partir :

- de l'évaluation globale du potentiel calorifique,
- de la surface de l'incendie,
- de la vitesse moyenne de combustion.

### **2. PRODUITS DE COMBUSTION**

L'analyse des matières combustibles par éléments simples amène à retenir une distribution massique.

L'INERIS table sur les hypothèses majorantes suivantes :

- La totalité du carbone présent conduit à la formation de monoxyde et de dioxyde de carbone (CO et CO<sub>2</sub>) suivant la rapport molaire  $\frac{CO}{CO_2} = 0,1$ .

Cette dernière hypothèse correspond au cas d'un incendie relativement bien ventilé.

- La totalité du chlore se transforme en acide chlorydrique (HCl).
- Une part significative (de l'ordre de 60 %) de l'azote est supposée se re-combiner en azote moléculaire (N<sub>2</sub>).

L'expérience de l'INERIS le fonde à retenir que les quelques 40 % de l'azote total restant est converti pour moitié en acide cyanhydrique (HCN) et pour moitié en dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>).

- Les éléments métalliques (Na, Ca, Ti, Al) en l'absence de données suffisamment renseignées et dans la mesure où les quantités stockées sont relativement faibles, sont a priori négligés. Il est par ailleurs vraisemblable que la plus grande partie d'entre eux restera dans les résidus de combustion.

Les débits de rejet atmosphérique ont par ailleurs été déterminés, en accord avec les hypothèses relatives à la détermination des caractéristiques de l'incendie, en considérant un scénario du feu simplifié qui considère uniquement le régime établi.

### 3. CRITERE DE TOXICITE

On s'intéresse ici à la toxicité accidentelle. La première fonction des modèles est de déterminer des lieux de l'espace où une concentration donnée est observée. Il est donc possible, en première approximation, de ne s'intéresser qu'à la distance maximale sous le vent de la source où une concentration donnée est atteinte.

Lorsqu'une personne respire une atmosphère polluée par un produit toxique, les effets auxquels on s'intéresse habituellement sont définis comme étant l'apparition (à faible probabilité) de la létalité, des malaises, de la toux ... Ces effets sont directement fonction de la concentration C et du temps t pendant lequel le sujet est exposé à cette concentration. Les effets varient bien évidemment selon que la personne est un enfant ou un vieillard, ainsi qu'en fonction de son état de santé ou de ses facultés d'accoutumance. Ainsi, les courbes dans un plan (C,t) correspondant à un effet donné sont-elles établies pour une population représentative de l'ensemble des situations susceptibles de se produire.

Dans le plan Log(C), Log(t), ces courbes sont assimilables à des droites et donc, à effet E constant, concentrations et temps se trouvent pratiquement liés par une relation  $C^n t = E$ . Sur ces courbes, les coordonnées d'un point (C,t) représentent l'échelon de concentration C et le temps d'application t de cet échelon nécessaire pour que l'effet E se produise. Cet effet se produira dès que  $C^n t \geq E$ . En pratique, lors d'un accident, un observateur n'est jamais soumis à un

échelon de concentration constant au cours du temps, et il y a donc lieu d'intégrer les apports de chacun des pas de temps pendant lesquels la concentration est supposée constante en calculant :

$$I = \int C(t)^n . dt$$

L'effet se produira si  $I \geq E$ .

Dans le cas de fumées telles que celles générées dans le cadre d'un scénario d'un incendie de camion au jour, plusieurs gaz toxiques sont susceptibles d'être émis simultanément à l'atmosphère.

En pratique dans le cas d'un tel incendie, l'INERIS retiendra, pour la détermination des distances limites des effets irréversibles, la notion d'I.D.L.H. (Immediately Dangerous for Life and Health) proposée par le N.I.O.S.H. (National Institute for Occupational Safety and Health) [1].

La valeur de l'I.D.L.H. correspond à la concentration maximale qu'une personne peut supporter pendant une durée de 30 minutes avant de risquer des effets irréversibles sur sa santé.

C'est ainsi, qu'en se limitant à une exposition d'une demi-heure, si l'on considère, pour chaque gaz toxique  $i$  auquel est associé la concentration I.D.L.H. $_i$  correspondant à l'apparition des effets irréversible et la concentration  $C_i$  à laquelle une personne est exposée, l'effet d'atteinte irréversible sur sa santé sera considéré se produire si  $\sum_i C_i / I.D.L.H._i = 1$

Cette méthode permet de tenir compte de l'ensemble des gaz, sans considérer d'éventuelles interactions ou de synergies de toxicité. Elle est toutefois retenue faute de mieux.

Pour chacun des produits considérés comme étant susceptibles de se former dans un incendie, les valeurs retenues pour l'I.D.L.H. sont celles proposées dans l'édition de juin 1990 du Pocket Guide to Chemical Hazards édité par le N.I.O.S.H. [1], soit :

- |  |   |
|--|---|
| - CO : 1 700 mg/m <sup>3</sup> ,               | - NO <sub>2</sub> : 94 mg/m <sup>3</sup> ,                |
| - CO <sub>2</sub> : 90 000 mg/m <sup>3</sup> , | - Hg : 28 mg/m <sup>3</sup> ,                             |
| - HCl : 150 mg/m <sup>3</sup> ,                | - As <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 80 mg/m <sup>3</sup> , |
| - HCN : 55 mg/m <sup>3</sup> ,                 | - Cd : 9 mg/m <sup>3</sup>                                |

## 4. CARACTERISATION DE L'EMISSION DES FUMÉES

En préalable à tout calcul de dispersion de fumées d'incendie, il est notamment nécessaire :

- d'évaluer leur énergie thermo-cinétique initiale.

Pour cela, l'INERIS se base notamment sur une corrélation, proposée par HESKESTAD [2], qui relie la vitesse ascensionnelle initiale des fumées respectivement à la puissance thermique de l'incendie. Cette vitesse est donnée pour une altitude de référence, également calculée par une corrélation proposée par le même auteur, à laquelle la température des fumées est supposée supérieure de 250°C à la température ambiante.

Il convient de noter ici que ces données, établies à l'origine pour des feux d'hydrocarbures sont extrapolées ici, faute de mieux.

- de déterminer les concentrations des gaz toxiques en tenant compte de la dilution induite par l'excès d'air entraîné dans l'incendie.

Les fumées sont composées des produits de combustion, de l'azote de l'air de combustion et de l'air en excès par rapport à la quantité stoechiométrique requise pour la combustion.

Des mesures effectuées au cours d'expérimentations indiquent que la quantité d'air entraînée dans un incendie correspond à 7 à 12 fois la quantité d'air utile à la réaction de combustion. Les gaz toxiques produits par la combustion sont donc déjà dilués lorsqu'il sont émis à l'atmosphère.

Le débit massique total des fumées est calculé, toujours d'après HESKESTAD [3], à partir de la puissance thermique de l'incendie.

*Remarque : La quantité d'air nécessaire à la combustion stoechiométrique des combustibles considérés peut être calculée en appliquant le principe de THORNTON selon lequel la production par combustion de 13.1 MJ requiert la consommation d'un kilogramme d'oxygène. Les débits d'air calculés selon le modèle d'HESKESTAD semblent cohérents avec des observations expérimentales, ce qui fonde l'INERIS à retenir les résultats de ce dernier pour ses modélisations.*

C'est ainsi qu'en pratique, pour chaque cas étudié correspondant à un type de déchet impliqué dans l'incendie, l'INERIS a calculé la concentration des fumées, notée  $C_{eq}$ , pour laquelle il y aurait des effets irréversibles sur une personne exposée pendant 30 minutes, à l'aide de la relation suivante :

$$C_{eq} = \frac{\text{Débit massique total des fumées}}{\sum_i \frac{\text{Débit massique du polluant } i}{\text{IDLH du polluant } i}}$$

Le lecteur gardera à l'esprit que, dans les cas qui nous intéressent, les fumées sont composées d'une part des produits de combustion (CO, CO<sub>2</sub>, ...) et des déchets entraînés, et d'autre part des produits tels que :

- L'azote de l'air de combustion,
- L'air en excès par rapport à la quantité stoechiométrique requise pour la consommation des combustibles.

Il convient également de rappeler que la quantité d'air entraînée dans un incendie correspond à 7 à 12 fois la quantité d'air utile à la réaction de combustion.

Les produits toxiques sont donc, à la source, dilués de manière significative par les gaz passifs (au sens de leur toxicité) tels que l'air en excès.

## 5. CONDITIONS METEOROLOGIQUES

L'INERIS a retenu quatre ensembles de conditions météorologiques, repérées par les trios (A,2,20), (C,15,20), (D,5,20) et (F,3,15) où la première lettre correspond à la classe de stabilité atmosphérique de PASQUILL [4], le chiffre en seconde position à la vitesse du vent en mètre par seconde, et le troisième à la température ambiante en degré Celsius.

Par ailleurs, l'INERIS a pris en compte la présence d'une éventuelle couche d'inversion. C'est ainsi que si habituellement la température de l'atmosphère diminue avec l'altitude, il est possible, notamment lors de nuits printanières ou hivernales et en l'absence de nuages, que le sol se refroidisse plus vite que l'atmosphère. L'air au niveau du sol peut ainsi être surmonté d'une couche d'air plus chaude appelée couche d'inversion.

Ainsi, si les polluants sont rejetés à l'atmosphère à une altitude inférieure à la hauteur de la couche d'inversion, cette dernière provoque un effet de couvercle piégeant la pollution. Les concentrations de polluants au niveau du sol sont donc d'autant plus importantes que la couche d'inversion est basse.

Le modèle de dispersion utilisé ci-après suppose qu'une couche d'inversion est « infranchissable » par le panache de fumées. La diffusion des gaz toxiques se trouve donc limitée et les concentrations au sol de ce fait majorées.

Toutefois, compte-tenu de l'énergie thermo-cinétique initiale des fumées on conçoit que malgré la présence d'une couche d'inversion de température à basse altitude, le panache de fumées pourrait continuer de s'élever.

Pour évaluer l'altitude d'une couche d'inversion défavorable au sens de la dispersion, mais également réaliste compte-tenu de la remarque précédente et du fait qu'une couche d'inversion est en fait une zone de forte stabilité atmosphérique, l'INERIS a retenu les valeurs de l'altitude de culmination d'un panache se dispersant dans une atmosphère très stable fournies par les corrélations proposées par BRIGGS [3].

## 6. CALCULS DE LA DISPERSION ATMOSPHERIQUE DES FUMÉES TOXIQUES

Pour calculer la dispersion des panaches de fumées toxiques, on calcule, dans un premier temps, la trajectoire de l'axe du panache de fumées considéré, puis, dans un second temps, les concentrations en polluants autour de cet axe, en supposant une distribution gaussienne.

Pour le calcul de la trajectoire, l'INERIS a retenu les corrélations de BRIGGS. Suivant les conditions de stabilité, elle permet de calculer les hauteurs du panache en fonction de la hauteur d'émission, de l'énergie thermo-cinétique initiale, de la vitesse du vent et de la distance à la source.

On notera que suivant cette corrélation :

- plus l'énergie thermo-cinétique initiale est importante, plus le panache s'élève,
- plus la distance à la source est importante, plus le panache s'élève, à moins que son niveau de dilution soit tel qu'il devienne passif et poursuive alors sa dispersion à altitude constante,
- plus la vitesse du vent est importante, moins le panache s'élève.

Il est également clair, que plus la hauteur initiale d'émission des fumées est importante, plus le panache s'élève.

Par ailleurs, la distribution des concentrations autour de la trajectoire de l'axe du panache est supposée gaussienne.

C'est ainsi que la concentration sous le vent de la source, au niveau du sol dépend notamment:

- du débit massique des polluants,
- de la distance sous le vent de la source,
- de la vitesse du vent,
- des conditions de stabilité atmosphérique,
- de la hauteur du panache.

Ainsi, quand la distance augmente, les concentrations au centre du panache diminuent globalement. De plus, la concentration est proportionnelle au débit massique, mais inversement proportionnelle à la vitesse du vent.

Enfin, il convient de noter que le modèle employé par l'INERIS prend en compte les phénomènes de réflexion au sol. C'est ainsi que les valeurs des concentrations calculées au sol sont deux fois plus importantes de celles que l'on calculerait si l'on négligeait les réflexions au sol ou si l'on était fondé à supposer que les gaz toxiques sont absorbés à la surface du sol.

## 7. MODALITES DE CALCUL

Tous les calculs ont été effectués en considérant la présence d'une couche d'inversion à une altitude estimée d'après les critères développés ci-dessus et pour une valeur classique du paramètre de rugosité correspondant à l'encombrement d'une zone industrielle.

**ANNEXE D :**

**DESCRIPTION BREVE DES CARACTERISTIQUES DU LOGICIEL  
VENDIS-FS**

## Ventilation des tunnels et influence d'un incendie

N.d'Albrand & Ph.Cassini  
CERCHAR, France

ABSTRACT: CERCHAR has a large experience in mine ventilation and air conditioning for which he developed different softwares. It is now using its knowledge in the field of underground civil engineering works. The main research carried on currently concerns the effect of fires on underground works ventilation.

RESUME: Le CERCHAR, fort de son expérience acquise dans la ventilation et la climatisation des mines pour lesquelles il a développé différents logiciels, intervient maintenant pour les ouvrages de Génie Civil qui, sous bien des aspects, s'apparentent au milieu minier. Ces travaux l'ont conduit à s'intéresser à l'influence des incendies sur la ventilation.

### 1 INTRODUCTION

Dans les chantiers de creusement des longs tunnels, le personnel doit pouvoir travailler dans une atmosphère saine et exempte de danger ce qui nécessite la mise en place, soit d'une ventilation soufflante permettant de diluer les gaz nocifs, soit d'une ventilation aspirante au niveau de la production de ces derniers [1].

Les gaz nocifs proviennent de l'utilisation d'engins à moteur diesel pour le marinage, ou de celle d'explosifs. Dans certains cas il ne faut pas non plus négliger des gaz ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ , radon) pouvant émaner des terrains encaissants.

Mais de plus en plus, lorsque la nature des terrains le permet et que la longueur de l'ouvrage le justifie on utilise, au lieu de l'explosif ou de la machine à attaque ponctuelle, des tunneliers.

La puissance des tunneliers est telle, que bien souvent, il faut en tenir compte pour définir les besoins en air frais du chantier qui permettront d'assurer des conditions climatiques acceptables.

### 2 VENTILATION

Le CERCHAR, fort de son expérience acquise dans la ventilation et la climatisation des mines, pour lesquelles il a développé des logiciels de calcul, intervient maintenant pour les ouvrages de Génie Civil qui, sous bien des aspects, s'apparentent au milieu minier. Ceci est particulièrement vrai lorsque l'on a affaire à des réseaux maillés complexes (voir le Tunnel sous la Manche ou les différents projets routiers sous Paris).

Des règlements et des règles spécifient les teneurs limites à ne pas dépasser pour les différents gaz nocifs ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , ...). Connaissant les engins prévus pour les chantiers et leur taux d'utilisation, il est possible de calculer alors les quantités d'air frais nécessaires.

Un projet de chantier étant établi et les débits d'air frais nécessaires au chantier calculés, il s'agit de déterminer les moyens à mettre en œuvre pour les assurer. Lorsque l'on a affaire à un tunnel monotube, des logiciels relativement simples permettent cette détermination (ventilateur, nature et diamètre de la ligne d'aérage, fuites). Dans le cas d'ouvrages à plusieurs tubes reliés par des recoups, il faut faire appel à des logiciels sophistiqués comme VENDIS développé par le CERCHAR [1].

### 3 CONDITIONS CLIMATIQUES

De nos jours encore, lors de l'élaboration d'un projet de creusement de tunnel, les conditions climatiques sont rarement prises en compte. Et pourtant, des ambiances thermiques pénibles entraînent beaucoup de désagréments : baisse de productivité, baisses d'attention pouvant conduire à des accidents, et même parfois malaises causés directement par la chaleur.

Ces phénomènes ont été bien étudiés dans les mines [2], [3].

Cet oubli vient certainement en grande partie du manque de directives dans les réglementations applicables aux ouvrages de Génie Civil. En France, le code du travail, dans son article R232-5 impose d'éviter les élévations exagérées de température, les odeurs désagréables et la condensation, mais aucune indication n'est donnée sur la façon de mesurer ces températures et les limites acceptables.

Les réglementations minières sont sur ce point précises et pratiques. Elles définissent des indices permettant d'apprécier de façon réaliste l'influence du climat sur l'organisme humain, indiquent quelles en sont les valeurs raisonnables et les dispositions à prendre (en général limitation du temps de présence au chantier) en cas de dépassement. Les réglementations minières françaises [4] et allemandes [5] sont assez proches. Elles sont basées sur des indices qui font intervenir la température (température de bulbe sec), mais aussi l'humidité et la vitesse d'air, car il est prouvé que chacun de ces paramètres à une forte incidence sur la façon dont l'organisme est sollicité.

En France, l'indice de la température résultante est défini par la relation :

$$t_r = 0,7 t_h + 0,3 t_s - V$$

avec :

$t_r$  : température résultante en degrés,  
 $t_h$  : température humide en degrés Celsius,  
 $t_s$  : température sèche en degrés Celsius,  
 $V$  : vitesse du courant d'air en mètres par seconde.

Cet indice a prouvé son utilité et sa validité dans les mines souterraines pour lesquelles le souci constant de le limiter à  $28^\circ$  a permis de rendre négligeables les risques dus à la chaleur.

C'est pourquoi, lors du creusement des tunnels, il paraît plus que souhaitable de prendre toutes dispositions pour empêcher que les températures résultantes ne puissent dépasser  $28^\circ$ .

Il faut, par ailleurs veiller à ce que, dès que les températures résultantes dépassent  $26^\circ$ , le

personnel soit d'un âge compris entre 18 et 50 ans sans prédispositions connues aux coups de chaleur. Il est de plus recommandé qu'il puisse bénéficier d'un acclimatement au chantier : efforts physiques moindres les premiers jours.

Des risques de dépasser ces valeurs existent dès que les tunnels sont creusés en terrains chauds ou que des puissances importantes électriques ou diesel sont installées.

Même dans des terrains dont la température initiale (avant creusement) est inférieure à 20°C, l'emploi de tunneliers avec de très fortes puissances installées et des avancements rapides peut conduire à des conditions inacceptables.

Il est nettement préférable, en cas de doute, de réaliser des calculs au moment du projet.

Des calculs manuels simples ne sont pas possibles, et ceci pour trois raisons. Il y a, d'une part, la difficulté pour calculer les échanges énergétiques avec les terrains, d'autre part, la possibilité qu'ont les échanges de s'opérer sous forme sensible ou sous forme latente, enfin la précision souhaitée du fait de la grande sensibilité de l'organisme humain à de faibles écarts de température et d'humidité lorsqu'on atteint des conditions pénibles.

Des logiciels de calcul ont été mis au point et testés pour les mines. Le CERCHAR a collaboré à ces développements et validations dans le cadre de programmes européens et dispose de logiciels adaptés au cas des tunnels de grande longueur.

Ceux-ci ont par exemple été utilisés pour évaluer, avant démarrage, les conditions climatiques lors du creusement de différentes galeries du Tunnel sous la Manche.

Ils ont également permis d'analyser les possibilités de présence de brouillard dans ces chantiers.

Ces programmes permettent, en cas de besoin, de trouver et de dimensionner des solutions et d'évaluer l'incidence, par exemple : augmentation du débit d'air, remplacement de machines diesel par des machines électriques, mise en oeuvre d'une réfrigération.

L'augmentation du débit d'air reste bien souvent la solution la plus simple à mettre en oeuvre d'autant plus qu'elle permet d'accroître les rejets de polluants (diesel par exemple).

Elle nécessite un sur-dimensionnement de la ventilation, d'où l'intérêt de réaliser les calculs dès la conception du projet.

#### 4 INCENDIE

Il existe cependant un autre problème que celui lié à la pollution par les gaz nocifs ou la pollution thermique des tunneliers. Il s'agit des perturbations de la ventilation provoquées par un incendie. C'est un sujet dont on parle peu car en fait, jusqu'à présent, on ne disposait que de peu de moyens d'investigation (numériques ou expérimentaux).

La ventilation d'un chantier, étant réglée de manière satisfaisante pour des conditions normales de marche, sera gravement perturbée par un incendie. Les perturbations concernent :

- les débits d'air,
  - les températures,
  - la composition de l'atmosphère (fumées),
- et peuvent entraîner des risques de :
- brûlures,
  - empoisonnement (CO...),
  - asphyxie (baisse de la teneur en O<sub>2</sub>),
  - explosion.

Pour évaluer ces risques, il faut connaître en chaque point du réseau l'évolution en fonction du temps :

- du débit d'air,
- de la température,
- de la composition des gaz.

Il est aussi important de savoir si des fumées

peuvent se déplacer en sens inverse de l'aéragé à partir du foyer.

La connaissance de l'évolution de l'aéragé suite au développement d'un incendie doit permettre, indépendamment de la lutte contre l'incendie lui-même, de contrôler la ventilation de manière à minimiser les risques pour le personnel.

Deux cas différents peuvent se présenter suivant que l'incendie est situé dans une galerie en ventilation passante ou une galerie en cul-de-sac ventilée par une ligne d'aéragé secondaire.

#### 4.1 Incendie en ventilation passante

VENDIS permet le calcul de la ventilation d'un réseau de galeries pour un état stationnaire. Ce logiciel est bâti sous forme modulaire avec des sous-programmes permettant entre autre :

- la construction du réseau et sa sauvegarde,
- le calcul d'aéragé,
- l'affichage graphique du réseau avec les résultats du calcul,
- les modifications interactives du réseau à l'aide d'une souris.

Utilisant ces différents modules, nous avons bâti un nouveau logiciel VENDIS-FS, en y incluant un module calculant l'évolution de l'aéragé en fonction du temps sous l'effet d'un incendie (fig.1).

- Description de VENDIS-FS

Tout comme VENDIS, cette nouvelle version concerne les galeries en ventilation passante et fonctionne sur PC-AT relié ou non à un terminal graphique TEK-4211.

Le réseau étant défini, il est nécessaire de fixer les caractéristiques de l'incendie, la durée de la simulation  $t_s$  et le pas de temps  $dt$ .

Le programme calcule alors pour chaque instant  $t$ , jusqu'à  $t = t_s$ , l'évolution du foyer et de l'aéragé.

- Définition du réseau et calcul d'aéragé

Ces deux modules n'ont subi aucune modification par rapport à VENDIS. Rappelons simplement que le réseau est déterminé par :

- ses branches (résistance aéraulique et température moyenne de l'air dans la branche),
- les caractéristiques aérauliques des ventilateurs.

Le programme après avoir établi une base de mailles du réseau, calcule la répartition des débits d'air en utilisant la méthode Hardy et Cross.

- Caractéristique de l'incendie

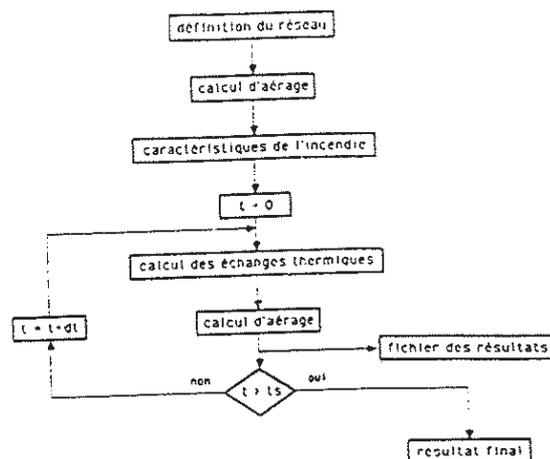


Figure 1 - Ordinoigramme de VENDIS-FS

Caractériser un foyer d'incendie est très compliqué. On peut s'attacher aux phénomènes macroscopiques ou microscopiques. Etant donné que l'on cherche à étudier le phénomène de perturbation à une certaine distance du foyer nous avons choisi de considérer le foyer comme une masse de combustible M délivrant une puissance thermique P proportionnelle au débit d'air Q sur le foyer et au pourcentage d'oxygène  $P_{O_2}$  participant à la combustion.

En première approximation, quel que soit le combustible on a :

$$P_{(kW)} = 4000 Q_{(m^3/s)} \cdot P_{O_2} (\%)$$

Lorsque l'on veut simuler un incendie, le programme demande :

- sa localisation,
- la masse de combustible,
- le pourcentage d' $O_2$  utilisé,
- la durée de la simulation,
- le pas de temps.

- Calcul des échanges thermiques

Ces échanges sont gouvernés d'une part par les échanges convectifs à l'interface air-terrains, d'autre part par la conduction dans les terrains : les effets de l'évaporation éventuelle d'eau ont été négligés.

On a supposé les galeries circulaires et on a admis que l'échauffement des terrains se limitait à un "manteau thermique" dont on fixe l'épaisseur et dont la conductivité est supposée infinie.

Le coefficient d'échange air-terrain est :

$$\alpha = 2,6 Q^{0,8} S^{-0,9} \quad |6|$$

Au début de la simulation la température des terrains est égale à celle de l'air des galeries.

- Fichier des résultats

Comme il a été dit ci-dessus, pour chaque pas de temps dt le programme calcule l'état du réseau. C'est-à-dire que l'on obtient pour chaque branche, le débit, la température moyenne de l'air (ou des gaz), la teneur en oxygène (avec l'hypothèse que tout le carbone brûlé est transformé en  $CO_2$ ).

Enregistrer les résultats pour toutes les branches du réseau ne présente pas forcément de l'intérêt, d'autant plus que les branches situées loin en aval aéraire de l'incendie ont des chances de ne pas être perturbées. Le programme permet de sélectionner les branches dont on veut suivre l'évolution, et d'enregistrer dans un fichier de format ASCII les résultats concernant ces dernières. Ce fichier peut ensuite être consulté et traité avec un tableur.

#### 4.2 - Incendie dans un cul-de-sac

Lorsque l'on a un chantier en cul-de-sac, ce dernier est généralement aéré au moyen d'une ligne de ventilation secondaire avec des fuites réparties. VENDIS-FS ne permet pas le calcul des lignes d'aéraire mais ce calcul étant fait par ailleurs on peut alors l'introduire dans le réseau et utiliser VENDIS-FS.

Pour ce faire, on crée la branche en cul-de-sac et la branche représentant la ligne d'aéraire. On place des noeuds régulièrement espacés sur ces branches et on les relie par des branches à débit imposé qui représentent les fuites de la ligne d'aéraire secondaire (figure 2).

Grâce à cet artifice, on peut simuler un incendie dans le chantier, mais cet artifice n'est valable que tant que l'incendie n'aura pas détruit la ligne de ventilation.

Connaissant la température T de l'air frais, l'augmentation de température  $\Delta T$  au passage du foyer, la vitesse de l'air V et la hauteur de la galerie h on peut calculer le nombre de Froude Fr :

$$Fr = \frac{\Delta T \cdot gh}{T V^2}$$

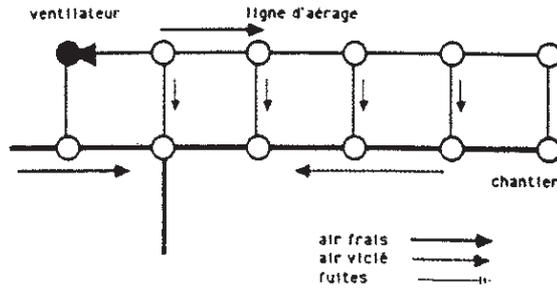


Figure 2 - simulation de fuites

S'il est supérieur à 4,5 des fumées vont remonter en sens inverse de la ventilation.

#### 5 - EXEMPLE D'APPLICATION

Nous avons simulé l'incendie d'une masse de 1000 kg de combustible dans une galerie de 20 m<sup>2</sup> de section parcourue par un débit de 40 m<sup>3</sup>/s, et faisant partie d'un réseau plus complexe (figure 3).

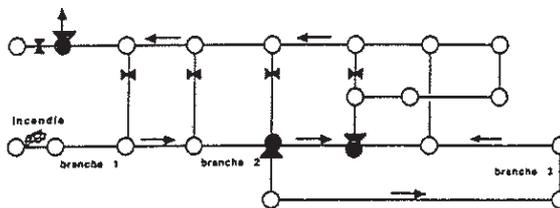


Figure 3

En prenant l'hypothèse que 20 % seulement de l'air passant au droit du foyer participe à la combustion et que l'incendie met 5 minutes à se développer, nous avons suivi l'évolution de la température de l'air et de la teneur en oxygène dans trois branches du réseau :

- branche 1 : à 30 m du foyer
- branche 2 : à 300 m
- branche 3 : à 1200 m

Sur la figure 4 on voit que très rapidement la température dans les deux premières branches atteint un palier. A partir de ce moment il y a équilibre entre la puissance thermique fournie à l'air et celle transmise aux terrains encaissants. La troisième branche située à une certaine distance en aval voit sa température augmenter avec un décalage qui correspond à la durée de transit des gaz. Cette température est nettement inférieure à celle des branches précédentes par suite de la dissipation dans les terrains.

Une option du programme permet de connaître la température atteinte par ces derniers.

Au bout de 21 minutes, lorsque tout le combustible est consommé, les températures baissent très rapidement grâce à l'introduction d'air frais dans le réseau.

On observe un phénomène inverse en ce qui concerne l'évolution de la teneur en oxygène dans l'air des galeries. De 20,9 % d' $O_2$ , en air frais on passe de 16,5 % d'oxygène. Ensuite, après l'arrêt de la combustion, on voit la teneur en oxygène revenir à sa valeur normale.

L'exemple de simulation décrit ci-dessus ne prétend pas refléter la réalité dans toute sa complexité. Les températures atteintes dépendent de la qualité de combustible consommé par unité de temps et, dans notre modèle, nous avons admis que tout l'oxygène est utilisé ce qui peut ne pas être le

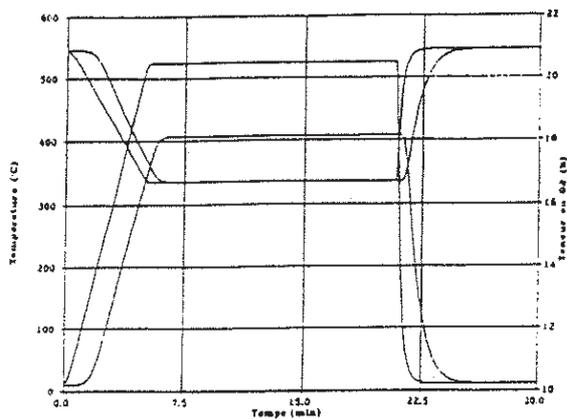


Figure 4

cas. Dans la pratique, le débit de combustible dépend de la surface libre de ce dernier et non seulement de sa masse. Cependant nous retrouvons les ordres de grandeur de ce que l'on a observé dans des galeries expérimentales si bien que nous pensons que notre modèle permet d'ores et déjà de prévoir l'influence des différents paramètres gouvernant l'incendie. On peut en effet tester l'influence de la modification du pourcentage d'oxygène consommé ou du débit d'air. Le programme permet même, en cours de calcul, de modifier la résistance des branches du réseau ou de modifier le ou les ventilateurs.

## 6 CONCLUSIONS

Le programme VENDIS-FS fonctionne sur des micro-ordinateur de type PC-AT et permet dans des temps raisonnables environ 10 minutes pour des réseaux de 200 branches) de simuler l'influence d'un incendie sur la ventilation du réseau et de connaître l'influence des différents paramètres.

Ce programme a été porté sur un transputer qui autorise des calculs environ 15 fois plus rapide. A partir de cette version, nous envisageons d'affiner notre modèle et, dans une étape ultérieure, le confronter à la réalité.

Mais d'ores et déjà, le modèle simplifié que nous avons utilisé permet des calculs en un temps court et donne des résultats en bon accord avec ce qui a pu être observé dans des installations expérimentales.

Ce programme désormais opérationnel vient compléter les moyens disponibles du CERCHAR qui peut ainsi traiter tous les points qui doivent être examinés lors de la définition d'une ventilation : la salubrité, les conditions climatiques et les conséquences d'un incendie.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. d'Albrand, Ph. Cassini  
Ventilation des longs tunnels pendant leur creusement. Application au tunnel sous la Manche Tunnel et ouvrages souterrains n° 94, juillet-août 1989.
- [2] D. Seelmann  
Influence du climat des chantiers sur l'activité des mineurs. Etude documentaire. Revue de l'Industrie Minérale, décembre 1973, 560-77, 55 n° 12
- [3] The physiological adaptations to heat-stress with a classification of heat illness and a description of the features of heat exhaustion. South African Medical Journal. République Sud-Africaine, juin 1962.
- [4] Journal Officiel de la République Française.

Décret n° 88-1027 du 7 novembre 1988 complétant le règlement général des industries extractives publié le 9.11.88.

Arrêté du 14.11.89 relatif à la durée maximale du travail dans les chantiers chauds ; publié le 25.11.89.

[5] Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung-Klima-BergV) du 9 juin 1983.

-Bundesgesetzblatt-Nr.25, Bonn le 15 juin 1983.

[6] R. Loison  
Chauffage industriel. Sennac 1956.

**ANNEXE E :**

**PRESENTATION DU LOGICIEL PHAST**

Le logiciel PHAST, utilisé pour les modélisations de la présente étude, a fait l'objet d'une évaluation [6].

## 1. PROCEDURE D'EVALUATION

Il existe sur le marché des logiciels qui se proposent d'évaluer les conséquences de la mise à l'atmosphère accidentelle de produits toxiques ou inflammables.

En tant que tels, ils servent ou peuvent être utilisés lors de l'établissement des études de dangers.

Dans le cadre du projet "Evaluation des logiciels", l'INERIS réalise pour le Service de l'Environnement Industriel du ministère de l'Environnement un travail d'évaluation des différentes fonctionnalités qu'offrent des versions données de certains de ces logiciels.

Il convient en premier lieu de souligner que l'INERIS tient à réaliser ses travaux d'analyse en adoptant exclusivement le point de vue de l'utilisateur du logiciel.

### 1.1 Positionnement du logiciel

**L'INERIS analyse une version donnée d'un logiciel donné.** En conséquence, les considérations que l'Institut est amené à développer ne concernent bien évidemment que le produit évalué.

Le produit analysé se compose de trois parties indissociables :

- le manuel de théorie,
- le manuel de l'utilisateur,
- le software lui-même.

Chacune de ces parties remplit une fonction bien définie :

- le manuel de théorie doit permettre de définir clairement les fonctionnalités que le logiciel offre à l'utilisateur,
- le manuel de l'utilisateur doit guider ce dernier lors de l'introduction des données nécessaires au calcul et expliquer les résultats obtenus en spécifiant la signification de toutes les mentions obtenues à l'écran ou sur papier,
- le software enfin est le support physique qui permet de lancer le logiciel et d'obtenir les résultats à l'écran ou sur papier.

Avant toute autre considération, il apparaît donc nécessaire que le manuel de théorie **positionne clairement le logiciel** en décrivant brièvement le contexte d'emploi que les concepteurs ont dévolu au logiciel et en annonçant clairement les phénomènes modélisés ainsi que les principales limitations à l'usage du produit.

C'est ainsi, notamment, que l'on pourra d'emblée définir quels scénarios, parmi ceux rapportés dans le guide de Maîtrise de l'Urbanisation [9], le logiciel est à même de modéliser.

## 1.2 Evaluation

La phase d'évaluation comporte trois parties indissociables, compte-tenu des parties qui composent le produit.

### 1.2.1 Evaluation du manuel théorie

Les points abordés correspondent notamment aux questions suivantes :

- . Le manuel existe-t-il spécifiquement pour la version analysée du logiciel analysé ?
- . Quelle est sa date de rédaction ? Son nombre de pages ?
- . Est-ce que toutes les fonctionnalités du logiciel sont exhaustivement définies ?
- . Est-ce que toutes les combinaisons possibles de ces fonctionnalités sont décrites ? Si des fonctionnalités viennent à s'exclure l'une, l'autre, est-ce spécifié ?
- . Est-ce que, pour chacune de ces fonctionnalités, les domaines d'application et les limitations sont clairement définies ? Ces limitations se traduisent-elles effectivement par des plages de valeurs à accorder à certains paramètres ?
- . Est-ce que les modélisations entreprises sont décrites avec un niveau de détail suffisant ? Est-ce que, notamment, les références bibliographiques sont rapportées dans le manuel ?

### 1.2.2 Evaluation du manuel de l'utilisateur

Le manuel de l'utilisateur devant remplir la fonction de guide, son analyse conduit aux questions :

- . L'architecture du logiciel est-elle clairement définie ? Les différentes fonctionnalités sont-elles mentionnées en un schéma synthétique de l'ensemble ?  
Ce schéma correspond-il strictement au déroulement des différents menus successifs ? Toutes les combinaisons possibles, à tous les niveaux sont-elles effectivement répertoriées ?  
Les données et les résultats sont-ils, le cas échéant, stockés dans des fichiers accessibles et repérés de façon claire dans la documentation ?
- . Est-ce que, pour chaque fonctionnalité, les paramètres à introduire sont tous décrits (unités, plage de valeurs ...) ? Des exemples pertinents sont-ils donnés, notamment lorsqu'existent des difficultés d'interprétation ? Reste-t-il, à l'examen, des zones d'ombre pas ou peu définies ?
- . Lorsque certains choix lui sont offerts, l'utilisateur est-il averti des **valeurs retenues par défaut** dans les modélisations ?
- . Est-ce que des explications sont données relativement à **toutes** les sorties que l'on peut obtenir à l'écran ou sur papier ? Ces explications incluent-elles des considérations physiques, des grilles de lecture ? Le manuel comporte-t-il des exemples exhaustifs et suffisamment illustrés de cas pertinents ? Reste-t-il, à l'examen, des caractéristiques des sorties qui n'auraient pas été définies,

moyennant par exemple des combinaisons de fonctionnalités qui n'auraient pas été envisagées ?

### 1.2.3 Evaluation du software proprement dit

L'analyse de cette évaluation est à concevoir à plusieurs titres : matériel, commodité d'emploi et résultats obtenus.

#### 1.2.3.1 Matériel

Pendant l'évaluation, l'INERIS note l'ensemble des matériels nécessaires à l'emploi du logiciel et décrit les modalités d'implantation et d'utilisation ainsi, éventuellement, que les difficultés rencontrées lors de ces dernières.

#### 1.2.3.2 Commodité d'emploi

Sous ce vocable sont regroupées en premier lieu des considérations relatives à la convivialité de l'exploitation :

- Quelle est la facilité d'introduction d'un cas à étudier ? Est-il possible, par exemple, lors d'une étude paramétrique, d'engendrer des cas voisins en faisant uniquement varier le paramètre considéré, sans avoir à réintroduire chaque fois toutes les données ? Est-il possible de "stocker" des fichiers correspondant à des études déjà réalisées ? Sous quelle forme ?
- Quelle est la traçabilité des sorties ? Est-ce que, par exemple, tous les listings sont repérés par des chaînes de caractères permettant leur identification ? Est-il possible de ne faire imprimer que certaines parties des résultats ? Est-il possible d'avoir un résumé complet des hypothèses faites et des valeurs des paramètres introduits ? Le cas échéant, est-il possible de disposer des valeurs de tous les paramètres implicites ou fixés par défaut ? ...

En second lieu est examinée la qualité des outils d'analyse offerts à l'utilisateur. A cette étape de la phase d'évaluation, il ne s'agit pas d'analyser les résultats obtenus, mais de faire l'inventaire des outils disponibles et de leurs adéquations formelles aux besoins de l'utilisateur.

- Quelle est la liste exhaustive des outils dont l'utilisateur dispose ?
- Lui est-il par exemple possible de visualiser le nuage toxique par diverses coupes ? Le cas échéant lui est-il possible de connaître l'historique des concentrations en un point ? Lui est-il possible, en tout point, d'accéder à la dose reçue, à la charge toxique

$$\int C^n(t).dt ?$$

Est-il possible pour un corps chimique donné de considérer plusieurs valeurs de "n" ?....

- Le cas échéant est-il possible en tout point de l'espace de connaître le flux thermique reçu ?

### **1.2.3.3 Tests de cohérence physique**

Il s'agit d'analyser la cohérence des résultats obtenus lors des variations des paramètres introduits.

Pour ce faire, est envisagé un ensemble de cas choisis de façon à permettre d'illustrer l'évolution des résultats lorsque les paramètres à introduire prennent des valeurs différentes.

Ces tests portent sur le terme source et sur la dispersion qui lui est associée.

Quant au terme source sont notamment abordés :

- . en monophasique gazeux, les conditions de criticité,
- . en fuite liquide ou gazeuse, la prise en compte des pertes de charges,
- . le flash adiabatique,
- . la formation d'aérosols par arrachement mécanique,
- . la recondensation possible lors d'une détente brusque,
- . la problématique d'une nappe liquide au sol (rayon d'extension, évaporation depuis la nappe),
- . écoulement diphasique,

Quant à la dispersion, sont notamment abordées :

- . la prise en compte des paramètres orographiques (stabilité atmosphérique, humidité, rugosité du sol, température ambiante, vitesse du vent, hauteur de la couche d'inversion ...),
- . la prise en compte des différents types de rejets ( instantanés ou continus, au sol ou en altitude, horizontal ou vertical ...),
- . l'influence des conditions de rejets (vitesse, température ...),
- . la prise en compte des caractéristiques physiques du produit et notamment de la problématique gaz lourd, gaz neutre, gaz léger,
- . la problématique des rejets diphasiques.

## **2. AVIS GÉNÉRAL SUR LE LOGICIEL PHAST**

### **2.1 Introduction**

L'INERIS a évalué l'aptitude du logiciel PHAST, version 4.2 à traiter des conséquences de la mise à l'atmosphère de produits inflammables et/ou toxiques. Les principales conclusions de ce travail d'évaluation sont consignées dans la référence [6].

Dans le cadre de cet exposé, il ne s'agit pas de reprendre l'intégralité des conclusions de [6] mais plutôt d'apporter des précisions quant à l'aptitude du logiciel à calculer la formation d'un nuage.

## 2.2 Calculs de la formation d'un nuage

Les termes sources à l'origine de la formation d'un nuage inflammable peuvent être très divers. Dans le cas des ruptures accidentelles de canalisations ou de capacités de stockage, on distingue plusieurs phénomènes en amont de la dispersion atmosphérique proprement dite du produit inflammable rejeté. En général, le terme source s'apparente à l'un des cas suivants :

1. la fuite de gaz, émis avec une faible énergie cinétique,
2. la fuite de gaz, émis avec une énergie cinétique importante,
3. la fuite de liquide à vitesse de rejet faible et sans flash adiabatique qui conduit à la formation au sol d'une flaque qui, en se vaporisant, engendre un panache inflammable,
4. la fuite de liquide à vitesse de rejet importante qui se fractionne en fines gouttelettes et engendre un jet diphasique ou la fuite qui s'accompagne d'un flash adiabatique,
5. et enfin, la fuite diphasique dès la section de rejet.

S'agissant du cas 1, la dispersion atmosphérique dépend de la densité du gaz rejeté. Dans le cas d'un gaz lourd ou léger, les effets de densité jouent un rôle prépondérant durant les premiers instants de la dispersion. Lorsque la dilution est suffisante, la densité devient uniforme, la dispersion est alors "dynamiquement passive" ce qui revient à dire qu'elle est uniquement fonction du couple vitesse de vent-stabilité atmosphérique. Bien sûr, dans le cas d'un gaz de densité proche de celle de l'air, la dispersion est passive dès le point de rejet.

S'agissant du cas 2, dans le champ proche du point de rejet (d'une dizaine à une centaine de mètres) la turbulence de l'écoulement atmosphérique ne joue qu'un rôle secondaire dans la dispersion du gaz émis. La dilution de ce dernier par l'air ambiant est principalement tributaire des caractéristiques du jet gazeux (diamètre de fuite, vitesse de rejet, ...). Au-delà du champ proche, les vitesses caractéristiques du jet diminuent pour finalement devenir comparables à celles du vent. En l'absence d'effets de densité, la dispersion devient alors dynamiquement "passive" et essentiellement fonction des conditions météorologiques : vitesses de vent-stabilité de l'atmosphère.

Pour traiter les cas 1 et 2 à l'aide d'un code numérique, il est donc nécessaire d'être à même de modéliser :

- les effets dus au champ de pesanteur,
- ceux dus à la turbulence de l'écoulement atmosphérique,
- et enfin ceux propres à la problématique du jet.

Dans la version 4.2 de PHAST, les calculs de dispersion atmosphérique peuvent être effectués avec quatre types de modèles correspondant à autant de problématiques différentes. On trouve :

- le modèle "initial turbulent mixing" qui est employé lorsque c'est la turbulence propre au rejet qui préside à la dispersion,
- le modèle "hybrida behavior" qui est employé lorsque la dispersion dépend à la fois de la turbulence du rejet et des effets de densité,

- le modèle "dense cloud dispersion" qui, comme son nom l'indique, est employé pour les calculs de dispersion des gaz lourds,
- et enfin, un modèle classique de dispersion gaussienne lorsque le polluant émis est dynamiquement neutre.

Ces modèles sont de type intégral, c'est-à-dire qu'ils permettent de résoudre les équations de conservation sur la base d'hypothèses simplificatrices. Ils peuvent être utilisés successivement dans l'ordre où ils sont présentés ci-dessus. Le cas échéant, certains peuvent ne pas avoir d'objet. L'enchaînement des modèles dépend de critères de transition basés, entre autres, sur la densité du nuage.

La modélisation proposée par PHAST est donc assez fine, prenant en compte les différents régimes de dispersion qui précèdent la phase de dispersion passive. Ce point revêt une importance particulière dans le cas des rejets de gaz inflammables. En effet, dans ce cas on s'intéresse essentiellement aux lieux où la concentration peut être supérieure à la L.I.E.. En pratique, il s'avère que lorsque le gaz est émis avec une énergie cinétique non négligeable (cas des jets par exemple), la dilution jusqu'à des concentrations inférieures à la L.I.E. s'opère bien avant la phase de dispersion passive.

Le cas 3 se raccorde en fait au cas 1 puisque dans le cas d'une évaporation de flaque, on admet généralement que le gaz est émis sans énergie cinétique, uniformément en chaque point de sa superficie.

Pour les cas 4 et 5, aux contraintes évoquées pour traiter les cas 1 et 2, il faut ajouter la prise en compte des effets induits par la présence d'une phase liquide en suspension. La fraction de polluant transportée en phase liquide s'évapore durant la dispersion et consomme une chaleur latente non négligeable. Ainsi, à plusieurs dizaines de mètres du lieu de rejet les nuages ou panaches diphasiques peuvent se trouver à très basse température malgré l'apport énergétique permanent de l'environnement. En conséquence, la masse volumique du mélange air-polluant peut être relativement importante ce qui induit un "effet gaz lourd".

Un module de PHAST est dédié au calcul de la fraction de produit qui reste en suspension (aérosol). De l'analyse présentée dans [6], il ressort que les résultats obtenus à l'aide de ce module sont cohérents et a priori conservatifs. Par ailleurs, les modèles de dispersion atmosphérique précédemment présentés tiennent compte de la présence éventuelle d'une phase condensée pour le calcul des caractéristiques d'un nuage ou d'un panache.

PHAST est donc généralement bien adapté aux contraintes à satisfaire pour traiter les cas 1 à 5. De l'analyse complète présentée dans [6], il ressort toutefois que le logiciel fournit des résultats majorants dans le cas des rejets de gaz de masse volumique inférieure à celle de l'air. Par ailleurs les limitations suivantes sont aussi à prendre en compte :

- le terrain doit être plat, de rugosité uniforme et non-encombré d'obstacles (\*),
- pour obtenir des résultats plausibles la vitesse du vent doit être au moins égale à 1 m/s,
- les conditions météorologiques doivent être invariables tout le temps de l'émission et de la dispersion,
- et enfin la source d'émission doit être fixe dans l'espace.

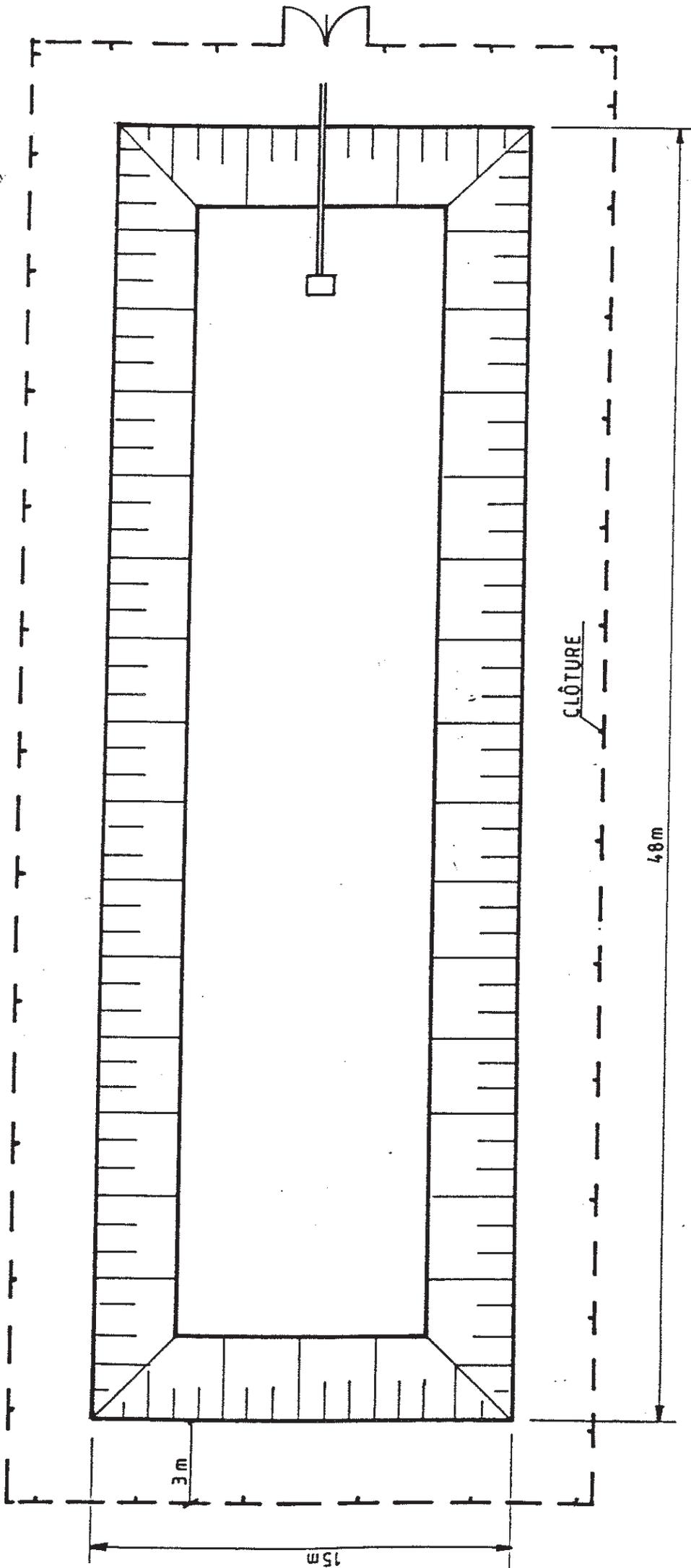
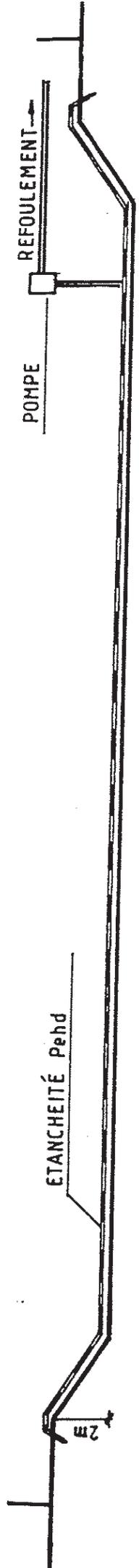
Parmi ces limitations, la première d'entre elles [repérée par (\*)] est sans aucun doute la plus contraignante. En pratique, si les terrains sont parfois plats, il est par contre très rare qu'ils ne soient pas encombrés. Dans le cas des unités pétrochimiques par exemple, la densité et la taille des obstacles peuvent être très importantes du fait des différents équipements employés pour les stockages et les procédés. Or, il ressort des essais à grandes échelles ([7] et [8]) qu'en présence d'obstacles, le volume explosible (et donc la masse explosible) obtenu est généralement supérieur à celui que l'on mesure lorsque la dispersion s'opère en champ libre.

En conclusion, l'INERIS émet un préjugé favorable sur l'aptitude du logiciel PHAST (dans la version 4.2) à calculer la formation d'un nuage et la masse explosible si la dispersion a lieu dans un espace libre. Si la dispersion est susceptible de se produire dans une unité industrielle typique où l'encombrement est tel qu'il ne peut être négligé, il convient alors de considérer les résultats fournis par PHAST comme un ordre de grandeur. Ce dernier peut ensuite éventuellement être majoré pour obtenir des résultats plus conservatifs au sens de la sécurité.

## **ANNEXE F :**

### **DOCUMENTS COMPLEMENTAIRES COMMUNIQUEES PAR LA SOCIETE STOCAMINE A LA DEMANDE DE L'INERIS**

- **Annexe F1** : Schéma du bassin de récupération des eaux et note de calcul



STOCAMINE — Bassin de récupération des eaux

Document cité au paragraphe 2.2 de la note du 06.08.1996

### Poussières :

Les fines poussières de sel contenues dans le retour d'air des puits des MDPA sont entraînées par l'aérage au contact du minerai abattu, ou transporté dans les galeries.

Les déchets ne seront par contre jamais en contact avec l'air : toujours dans des fûts fermés, et de plus spécialement conditionnés s'ils sont pulvérulents, ils ne risquent absolument pas de se retrouver dans l'air sortant du puits.

Le seul cas qui a été envisagé est celui d'un accident au fond (accident d'engin de transport ou chute dans le puits Joseph). Ce cas a été examiné dans l'étude de danger (p. 136). Il ne mettrait en jeu qu'une quantité très limitée de produit (un ou quelques fûts) et ne pourrait engendrer de nuage de poussières.

En conséquence, les dispositions énumérées ci-dessus permettent d'assurer qu'il n'y aura pas de gêne de voisinage et de retombées polluantes ou odorantes aux abords du puits Else.

Il en sera de même pour les installations de surface, où s'appliquent les mêmes règles : le contrôle d'absence de gaz à l'arrivée se fera fût par fût, et un excédent avec rupture d'emballage ne pourra concerner qu'un ou quelques fûts, sans risque de dégagement gazeux ou de nuage de poussière.

### Eaux de pluie - et Bassin

- Le dossier prévoit que les eaux pluviales provenant des toitures seront récupérées à part et infiltrées dans le sol.

Cette disposition ne sera finalement pas retenue, et ces eaux seront, comme les autres effluents, acheminées vers le bassin de 1000 m<sup>3</sup> et traitées comme indiqué au § 4223 du dossier, bien qu'elles ne risquent pas d'être polluées par des poussières toxiques, comme il a été vu ci-dessus, mais dans un souci de transparence complète des effluents.

#### Capacité du bassin

- . Les eaux de rejet de la mine, et les eaux utilisées en surface, n'excéderont pas 250 à 300 m<sup>3</sup>/mois.

#### . Eaux pluviales :

- Le tableau des précipitations fourni par SGAL-BRGM et joint en annexe montre un maximum, sur 22 ans, de 219 mm de pluie en un mois (mai 1983)
- La surface des toitures du carreau est inférieure à 7000 m<sup>2</sup>, celle des pistes et routes non couvertes est inférieure à 7500 m<sup>2</sup>
- Le total des pluies du mois le plus humide est donc de :

$$0,219 \text{ m}^3 \times 14\,500 \text{ m}^2 = \underline{3200 \text{ m}^3}$$

- . Le total maximal de l'eau à récupérer pendant un mois est donc de

$$3200 + 300 = 3500 \text{ m}^3$$

- . La vidange du bassin étant effectuée dès que le niveau y atteindra une valeur de 150 à 200 m<sup>3</sup>, une capacité de 1000 m<sup>3</sup> est donc suffisante, même pour le mois le plus pluvieux.

. Pluie d'orage :

La pluie d'orage maximale est de 89 litres/s/ha en 1 heure (source : poste de Mulhouse-Hirtzbach)

(les volumes des pluies d'orage maximales de 1/4 heure et 1/2 heure étant inférieurs).

Le débit maximum en cas d'orage est donc de

$$89 \text{ l/s} \times \frac{3600}{1000} \times \frac{14\,500}{10\,000} \text{ m}^2 = \underline{465 \text{ m}^3}$$

et peut donc être récupérée dans le bassin qui est vidangé chaque semaine.

- Conception technique du bassin

Le schéma joint en annexe représente le bassin de 1000 m<sup>3</sup>. Ce bassin sera creusé, et puis rendu étanche, grâce à un revêtement en PEHD. La vidange sera effectuée par une pompe aspirant par le haut, pour éviter toute discontinuité dans le revêtement étanche.

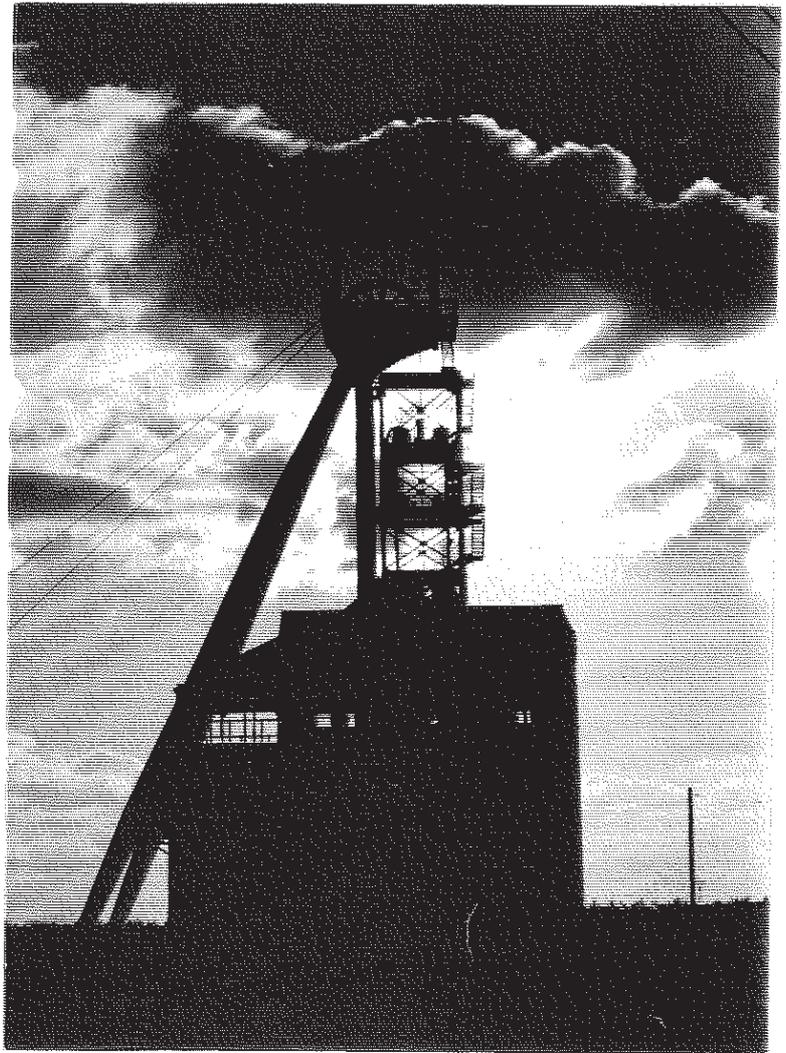
Les caractéristiques techniques du revêtement PEHD sont données dans les deux rapports joints en annexe :

- Propriétés physiques et mécaniques
- Rapport d'essais du CERCHAR (actuel INERIS).

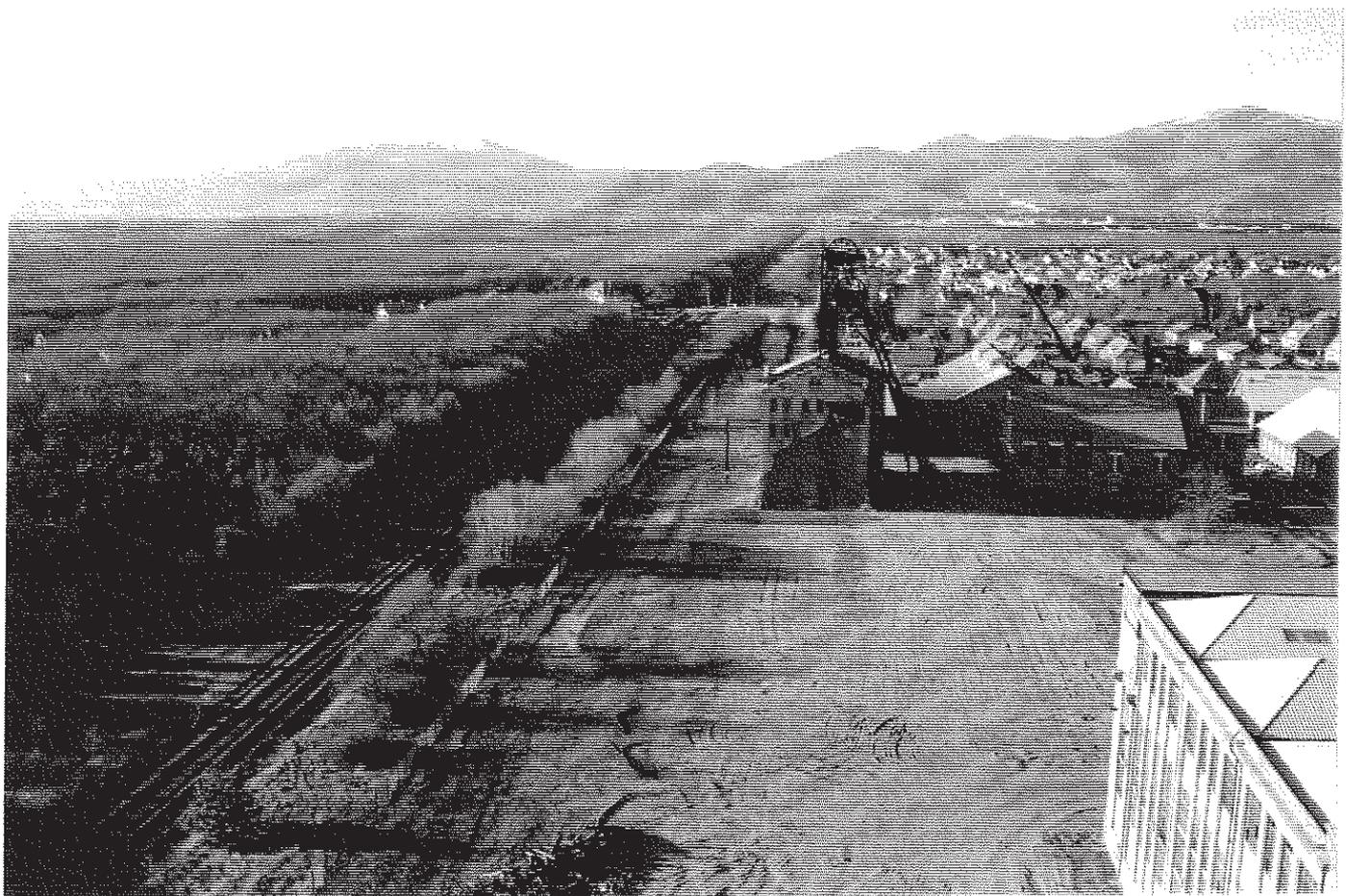
Ce revêtement PEHD est utilisé depuis 1988 par les MDPA pour le stockage de sel résiduaire sur aire étanche.

- **Annexe F2** : Photographies du site

Le Puits Else



Le carreau et le Puits Joseph



- **Annexe F3** : Données climatologiques

-FRANCE (R)

Station : MULHOUSE (S.A.)	Latitude : 47°45' N	Période
Commune : MULHOUSE (S.A.)	Longitude : 007°18' E	1955 à 1995
Lieu dit : STATION POMPAGE DU HIRTZBACH	Altitude : 245 m	41 ans
Département : HAUT-RHIN	Indicatif : 68224006	

PRECIPITATIONS (crit./reconst.) ( de 06h à 06h le lendemain )  
valeurs en millimètres

	moienne	quint.4	maximun	en
J déc1	22,7	34,7	96,8	1982
A déc2	20,4	39,1	119,9	1955
N déc3	26,4	46,7	114,1	1995
V mois	69,5	109,2	166,8	1959
F déc1	24,6	45,2	92,6	1970
E déc2	20,4	39,5	67,2	1957
V déc3	14,9	26,7	67,7	1970
R mois	59,9	93,3	199,5	1970
M déc1	12,2	23,1	51,0	1962
A déc2	17,5	31,2	76,7	1995
R déc3	22,5	34,1	56,0	1965
S mois	52,2	76,9	133,5	1995
A déc1	19,0	31,8	103,6	1983
V déc2	15,0	23,8	65,1	1956
R déc3	20,0	30,7	88,5	1969
I mois	54,0	80,0	137,8	1986
M déc1	20,5	32,5	55,2	1987
A déc2	24,8	37,6	86,8	1983
I déc3	28,2	42,6	104,8	1983
mois	73,4	92,0	219,2	1983
J déc1	26,7	42,6	66,9	1992
U déc2	22,3	33,3	77,1	1987
I déc3	22,5	39,6	82,3	1982
N mois	71,6	89,7	132,9	1987
J déc1	21,6	30,5	82,9	1956
U déc2	19,7	29,9	75,0	1956
I déc3	23,8	31,3	108,1	1982
L mois	65,1	89,2	169,8	1956
A déc1	20,4	28,2	115,0	1963
O déc2	21,2	30,5	92,2	1986
U déc3	23,5	41,0	62,5	1956
T mois	65,4	89,8	226,9	1963
S déc1	19,8	34,3	76,7	1965
E déc2	20,1	31,1	77,2	1963
P déc3	21,0	34,9	90,3	1987
T mois	60,9	94,3	143,4	1968
O déc1	18,4	33,5	49,3	1988
C déc2	20,4	38,1	65,2	1987
T déc3	16,4	25,7	60,8	1986
O mois	55,1	89,2	126,6	1981
N déc1	19,4	34,1	89,8	1963
O déc2	25,6	44,3	141,6	1972
V déc3	18,0	33,1	68,1	1965
E mois	63,1	88,8	173,1	1972
D déc1	22,5	35,8	77,8	1965
E déc2	25,9	50,1	116,3	1981
C déc3	22,1	45,0	68,2	1978
E mois	70,5	107,2	213,3	1981
ANNEE	/	/	/	/

"j" ou "j" : nombre de jours. "cum" ou "C" : cumul. "/" : données insuffisantes. Case vide : pas de données.  
Xfui4832v192) le Vendredi 18 Août 1995

METEO-FRANCE (R)  
 PRECIPITATIONS CRITIQUEES (en mm)  
 CUMUL

68-HAUT-RHIN

POSTE : MULHOUSE SAD12

ALT: 245m

INDICATIF: 68224006

ANNEE	Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nové	Déce	TOTAL ANNUUEL
1955	134.2	110.0	48.5	18.2	56.0	84.6	72.4	24.0	66.3	47.4	5.8	120.2	787.6
1956	59.1	4.9	23.0	85.4	66.9	49.1	169.8	109.3	51.3	61.0	47.6	16.2	743.6
1957	16.3	111.6	24.0	25.1	26.9	80.8	90.5	49.6	55.6	13.7	39.4	25.9	559.4
1958	129.2	161.9	29.5	38.9	77.6	84.7	89.0	75.2	48.4	46.2	47.7	84.2	912.5
1959	166.8	0.9	61.4	91.0	26.4	81.3	17.4	48.7	31.0	51.2	42.1	81.0	699.2
1960	63.6	82.2	63.8	27.2	49.5	64.8	78.4	92.1	49.3	89.9	79.9	35.8	776.5
1961	79.2	45.5	7.5	63.0	108.0	79.9	61.3	54.8	35.4	62.0	40.3	65.9	702.8
1962	109.9	69.5	84.9	48.2	66.7	26.0	33.4	37.2	53.6	13.1	29.9	47.0	619.4
1963	22.7	37.7	72.9	42.7	43.6	94.0	31.9	226.9	96.5	25.8	148.7	6.6	850.0
1964	10.7	23.2	86.2	47.5	89.6	48.8	17.6	78.3	52.4	65.0	40.7	19.8	579.8
1965	118.3	19.9	102.8	63.2	118.2	81.4	63.6	54.7	117.8	28.0	133.8	147.2	1048.9
1966	64.5	68.1	62.2	65.6	35.8	81.1	60.1	101.2	26.1	54.8	59.0	124.3	802.8
1967	23.6	45.5	68.2	11.6	98.5	61.1	40.8	51.3	71.0	41.0	88.0	78.4	679.0
1968	83.7	71.6	21.4	113.9	82.8	26.5	83.2	104.3	143.4	36.8	51.1	39.5	858.2
1969	33.2	65.9	77.5	108.5	90.8	81.5	100.9	70.5	21.4	3.4	101.2	66.5	821.3
1970	81.7	199.5	47.3	70.8	44.7	76.8	49.9	65.8	39.1	35.4	92.2	19.9	823.1
1971	52.1	12.5	44.6	12.6	91.7	88.0	54.0	83.8	14.5	13.5	62.7	22.4	552.4
1972	25.4	34.4	38.2	51.7	43.0	104.1	71.1	50.6	14.4	9.0	173.1	37.6	652.6
1973	28.9	35.2	16.9	70.7	73.4	99.7	108.1	65.6	17.4	69.5	68.0	49.4	702.8
1974	42.9	50.3	33.5	27.4	58.7	72.4	49.6	30.7	69.0	103.1	72.4	65.2	675.2

FRANCE (R)  
 PRECIPITATIONS CRITIQUEES (en mm)  
 CUMUL

HAUT-RHIN

POSTE : MULHOUSE SAD12

ALT: 245m

INDICATIF: 68224006

NEE	Janv	Févr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Déce	TOTAL ANNUEL
75	67.4	15.0	45.0	51.0	48.2	80.3	18.9	92.1	93.3	23.3	89.5	17.7	641.7
1976	37.4	34.4	8.2	45.9	33.7	4.9	110.0	30.5	86.2	58.7	51.8	85.5	587.2
77	109.3	115.5	35.9	90.0	34.9	123.0	104.4	77.5	20.7	45.7	114.5	68.4	939.8
78	63.3	87.3	82.9	31.8	92.6	55.8	58.0	87.5	58.6	25.6	4.4	119.4	767.2
1979	83.1	106.6	76.8	59.0	80.6	59.0	34.0	110.4	28.7	51.2	73.7	102.4	865.5
80	82.4	77.1	59.7	25.4	69.0	93.8	73.1	52.3	30.4	104.8	38.4	61.7	768.1
81	98.4	40.7	77.0	12.9	89.3	55.1	87.5	28.8	105.7	126.6	45.0	213.3	980.3
1982	109.2	11.7	76.1	11.6	40.8	112.5	133.3	66.9	40.5	105.1	56.7	136.4	900.8
83	64.0	55.9	65.0	136.2	219.2	44.6	47.3	36.2	95.2	38.1	53.3	44.9	899.9
84	162.7	83.4	26.6	24.2	84.7	38.9	39.1	31.5	116.7	54.5	57.2	35.9	755.4
1985	59.4	24.5	36.5	65.6	78.1	63.6	67.5	38.0	57.3	8.5	77.8	62.7	639.5
86	108.6	38.1	66.2	137.8	76.3	60.7	31.0	151.1	41.4	88.5	33.1	87.5	920.3
87	22.4	35.6	40.8	25.7	122.1	132.9	89.7	39.7	113.8	107.2	52.1	34.0	816.0
1988	78.9	E 94.5	110.0	16.7	69.9	67.3	50.7	E 50.2	76.6	115.8	12.9	83.4	E 826.9
89	11.7	56.7	37.0	103.3	45.7	30.0	E 84.7	60.3	25.2	38.2	63.7	104.1	E 660.6
90	31.0	133.8	24.7	69.7	33.3	105.5	73.1	29.9	48.9	65.6	78.1	59.4	753.0
1991	33.7	14.1	28.7	11.5	24.4	85.1	40.7	12.4	81.7	54.6	70.7	51.2	508.8
92	13.5	E 26.0	64.8	77.7	E 30.3	77.3	56.1	44.6	32.6	91.9	99.9	34.2	E 648.9
93	33.3	7.6	7.3	20.9	E 91.1	81.7	58.5	60.5	116.6	88.5	10.1	153.6	E 729.7
1994	71.1	56.3	22.6	E 75.8	123.2	15.1	31.5	40.8	92.2	42.9	15.7	110.2	E 697.4

dans l'état des Données arrêté au

Lundi 21 Aout 1995 à 7 H 17:52

(Type II)

IDA R3/07305/v260

TEO-FRANCE (R)  
 PRÉCIPITATIONS CRITIQUEES (en mm)  
 CUMUL

-HAUT-RHIN

POSTE : MULHOUSE SAD12

ALT: 245m

INDICATIF: 68224006

ANNEE	Janv	Pévr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nové	Déce	TOTAL ANNUEL
1995	164.4	E 92.8	133.5	E 39.2	172.6	80.2	35.1						E 717.8
OYENNE	69.5	59.9	52.2	54.0	73.4	71.6	65.1	65.4	60.9	55.1	63.1	70.5	[ 753.9]
Nb An Mq								1	1	1	1	1	[ 1]

dans l'état des Données arrêté au

Lundi 21 Aout 1995 à 7 H 17:52

(Type II )

IDA R3/u152/v27

- **Annexe F4** : Schéma du Plan d'Occupation des Sols

**TERMINOLOGIE DU POS DE LA COMMUNE DE WITTELSHEIM**

- UC** zone à dominante d'habitat de faible densité
- UE** zone réservée aux activités industrielles , artisanales et commerciales
- UEb** zone réservée aux activités industrielles , artisanales et commerciales justifiant d'une architecture indiscutable
- UEb1** même définition que UEb , interdites aux constructions ou installations produisant des eaux usées d'origine industrielles
- UEb2** même définition que UEb , interdites aux constructions ou installations produisant des nuisances incompatibles avec la présence de zone d'habitation attenante
- UEc** zone destinée au traitement des matériaux
- NCa** secteur destiné à l'ouverture et à l'exploitation de carrières
- ND** zone naturelle protégée en raison de l'intérêt du site ou de ses boisements
- NDa** secteur destiné à l'ouverture et à l'exploitation de carrières et à la décharge de matériaux inertes
- NDc** secteur à vocation de loisirs

- **Annexe F5** : Descriptif structural des flexures-failles majeures dans le sud du Bassin Potassique

Document cité au paragraphe 42. de la note du 06.08.1996

ING./1007-92/ITG

Descriptif structural  
des flexures-failles majeures  
dans le Sud du Bassin Potassique

Le Fossé Rhéna est un graben qui s'est individualisé à l'Eocène : effondrement entre deux systèmes de failles (vosgiennes et Schwarzwaldiennes), remplissage de sédiments continentaux d'abord, puis à caractères marins épisodiques et labiles (sauf au terme des séries évaporitiques qui se sont succédées à l'Eocène Supérieur et au Stampien) pour revenir enfin à des régimes plus continentaux au Chattien.

Ce remplissage tertiaire, et notamment l'ensemble évaporitique qui en constitue la majeure partie, s'est placé dans un régime tectonique distensif continu pendant  $20.10^6$  années avec très certainement une composante en décrochement sénestre. Cette dynamique du Fossé pendant les dépôts de sels a ainsi engendré des bassins subsidents ; dont celui de Mulhouse où les sédiments ont de remarquables propriétés de régularité, d'homogénéité et de continuité, à l'échelle du bassin. Rien ne vient perturber ces sédiments et leur répartition est seulement marquée de failles, anisotropies ou hétérogénéités, orientées soit N-20°E, soit N-60°E.

C'est à la fin de l'Oligocène, qu'un épisode tectonique plus coercitif mais toujours distensif a perturbé les dépôts accumulés. Accompagné de phénomènes volcaniques qui ne se sont pas manifestés dans le Bassin potassique de Mulhouse (s.s.) celui-ci fut néanmoins affecté de failles normales dans le sel, pentées vers l'Ouest et de directions (historiques) N-20°, pratiquement parallèles aux grandes failles bordières du Fossé. Le résultat dans le Bassin potassique de Mulhouse (s.s.) fut un découpage de toute la série évaporitique tertiaire en demi-grabens pentés vers l'Est.

Ce schéma tectonique simple se complique de flexures-failles annexes, dites conjuguées et donc pentées vers l'Est, le rejet du compartiment Est se faisant suivant le style normal, là encore. Le plan au 1/50 000 en annexe 1 positionne ces accidents majeurs, notamment les failles d'"Amélie".

Au centre du Bassin Potassique ces ensembles de flexures-failles ont des rejets plurihectométriques. Dans la coupe 1 représentée en figure 1, le rejet au niveau des couches potassiques est de l'ordre de 350 m, et de 300 m dans la coupe 2 plus au Sud.

Toujours plus au Sud, le rejet s'amointrit. On le voit sur la coupe 3 où il n'atteint plus que 100 m.

Ce système de failles normales conjuguées qui réduisent leurs rejets verticaux dans une direction donnée est désigné sous le nom de failles listriques, c'est-à-dire de failles qui s'aplatissent en profondeur. Ce qui est remarquable dans le Bassin Potassique, c'est que cet aplatissement des failles remonte dans la série stratigraphique à mesure que l'on se dirige vers le Sud, à tel point qu'il parvient à un jeu distensif en étirement pur, horizontal, dans la couche potassique elle-même près de Joseph-Else. Les flexures-failles y perdent leur identité et se diluent dans des zones étirées en y réduisant évidemment de leurs épaisseurs.

Il se trouve donc qu'à Joseph-Else la distension tardive qui a marqué de ruptures majeures les dépôts salifères et leur couverture tertiaire se manifeste non plus en rejets verticaux importants, mais au contraire par un aplatissement général avec élongation horizontale des couches potassiques sur quelques dizaines de mètres.

Ainsi, des flexures-failles plurihectométriques au centre du Bassin potassique, se transforment au Sud, notamment dans le secteur de Joseph-Else, en failles plates n'affectant même plus la base du Salifère Supérieur.

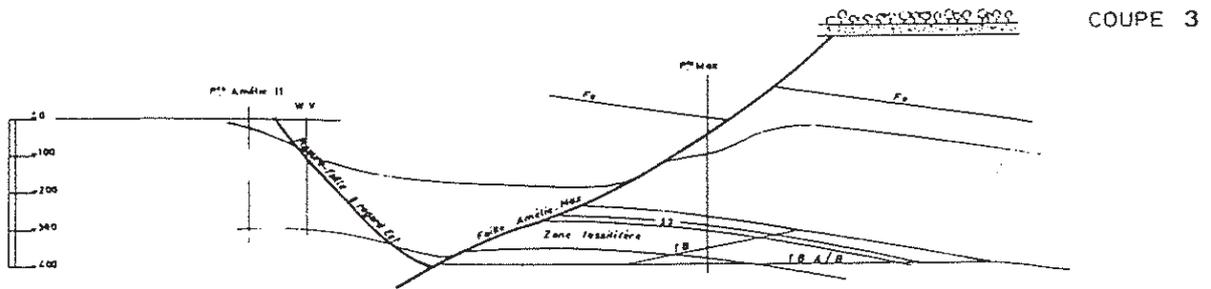
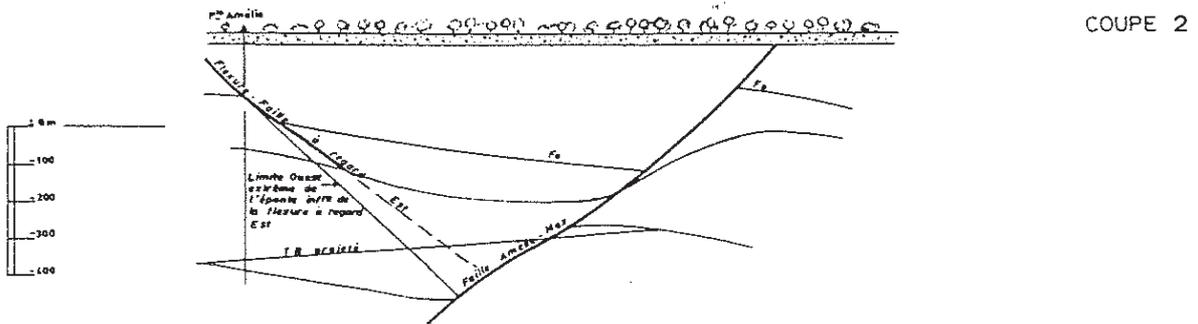
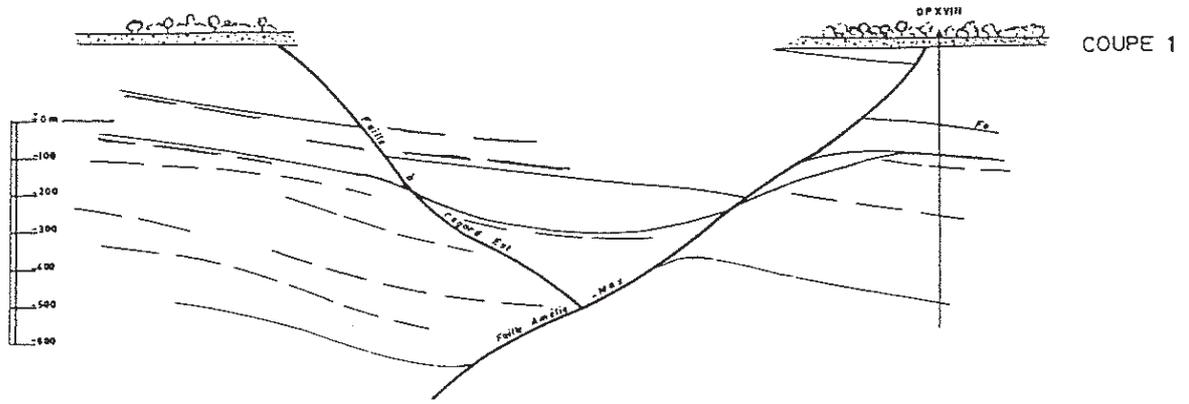
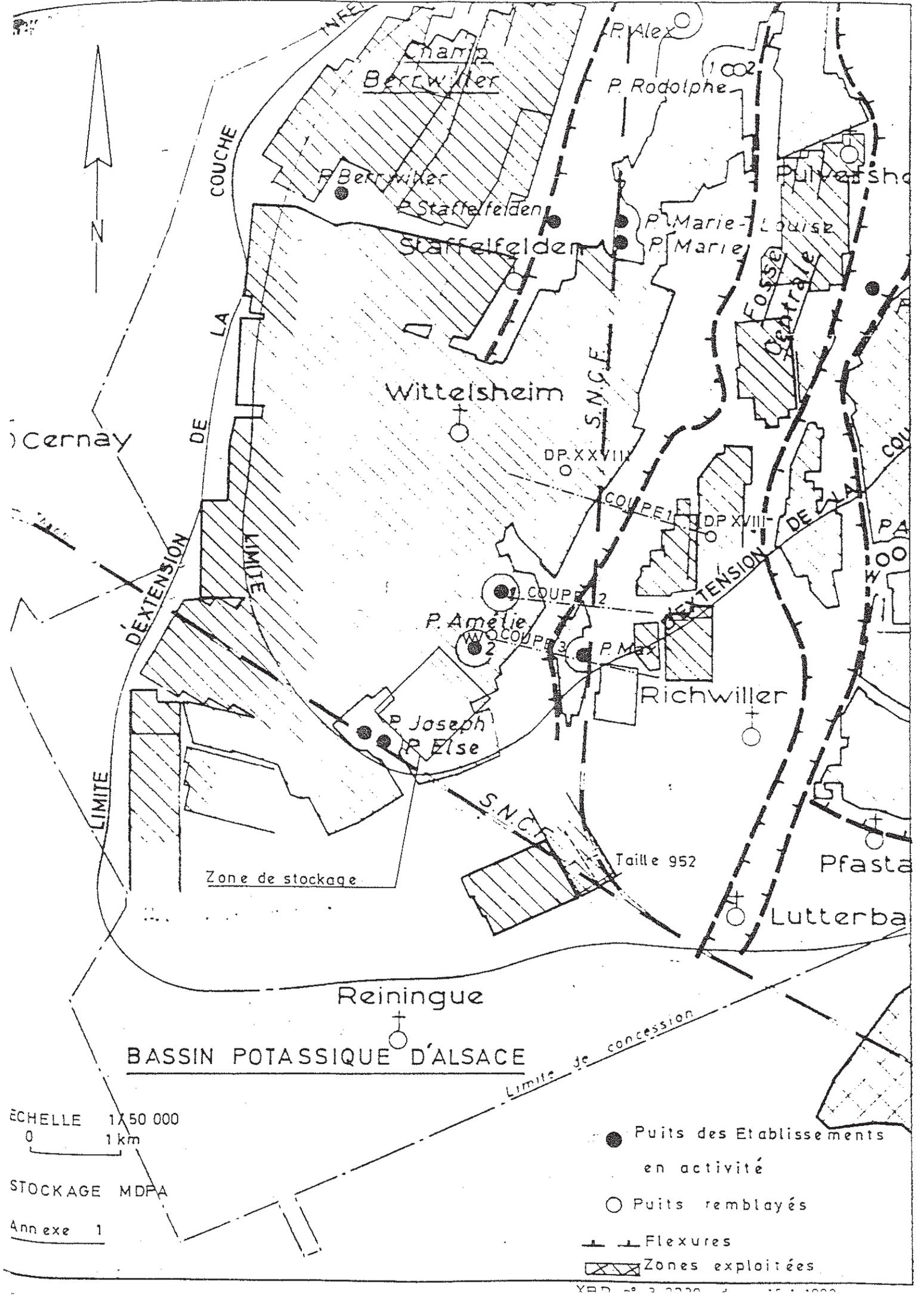


Figure 1



**BASSIN POTASSIQUE D'ALSACE**

ECHELLE 1:50 000  
0 1 km

STOCKAGE MDPA

Annexe 1

- Puits des Etablissements en activité
- Puits remblayés
- +— Flexures
- ▨ Zones exploitées

- **Annexe F6 :** Courbe d'affaissement et convergences mesurées dans l'horizon prévu pour STOCAMINE

## COURBE TYPE D'AFFAISSEMENT

Les très nombreuses mesures et études effectuées au début des années 60 ont montré que l'on pouvait estimer les affaissements provoqués par l'exploitation à l'aide d'une "courbe type" sans dimension avec :

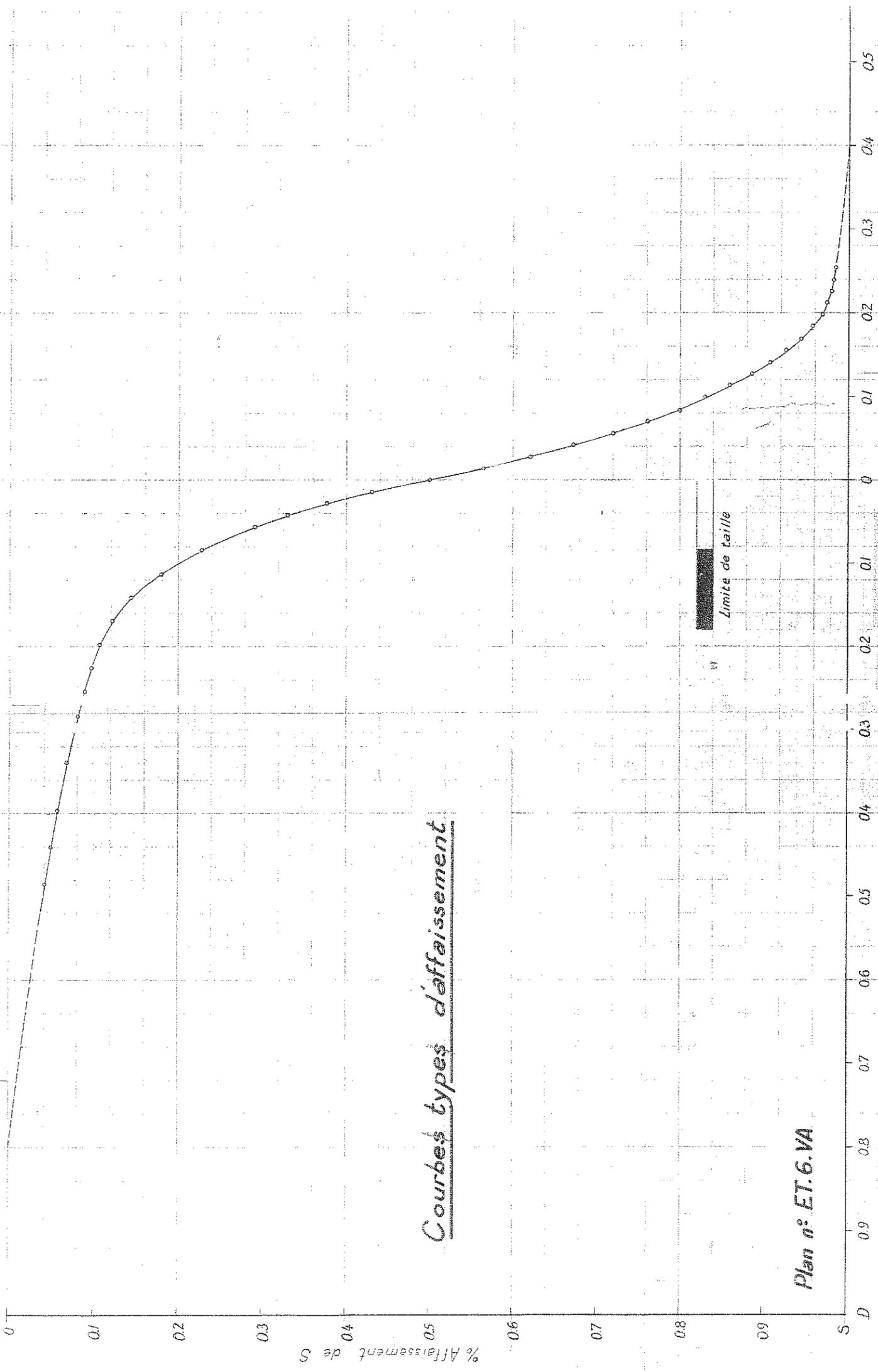
- les abscisses en pourcentage de la profondeur de l'exploitation ;
- les ordonnées en pourcentage de l'affaissement maximum, celui-ci étant égal à 90 % de l'ouverture du chantier.

Bien entendu, ce profil n'est valable que pour des panneaux suffisamment étendus ; dès qu'une dimension est inférieure à la profondeur, les affaissements sont réduits.

Si la couche est pentée, les affaissements sont déportés vers l'aval. Pratiquement, tout au moins tant que la pente est inférieure à 20 %, ce qui est le plus courant, tout se passe comme si l'affaissement se produisait perpendiculairement à la couche.

A noter une particularité de notre gisement : le point d'inflexion qui correspond à l'affaissement moitié n'est pas à l'aplomb du front mais à environ 10 % de la profondeur à l'intérieur de la partie exploitée.

Courbes types d'affaissement



Plan n° ET.6.VA

Stocamine

30.08.1996

## CONVERGENCES MESUREES DANS L'HORIZON PREVU POUR STOCAMINE

### **Convergence dans la voie au mur AJE à la mine Amélie**

La voie AJE-D a fait l'objet d'un suivi à long terme de l'évolution de la convergence verticale d'une galerie.

Les voies AJE ont une largeur de 5 m et sont séparées par un pilier large de 4 m. Elles ne comportent aucun soutènement de leur toit.

5 stations ont été matérialisées par des tire-fonds.

Le premier relevé a été effectué le 30.11.76, le dernier le 5.12.90.

Les plans ci-joints donnent la position du tronçon instrumenté ainsi que la position des doublets dans la voie AJE-D.

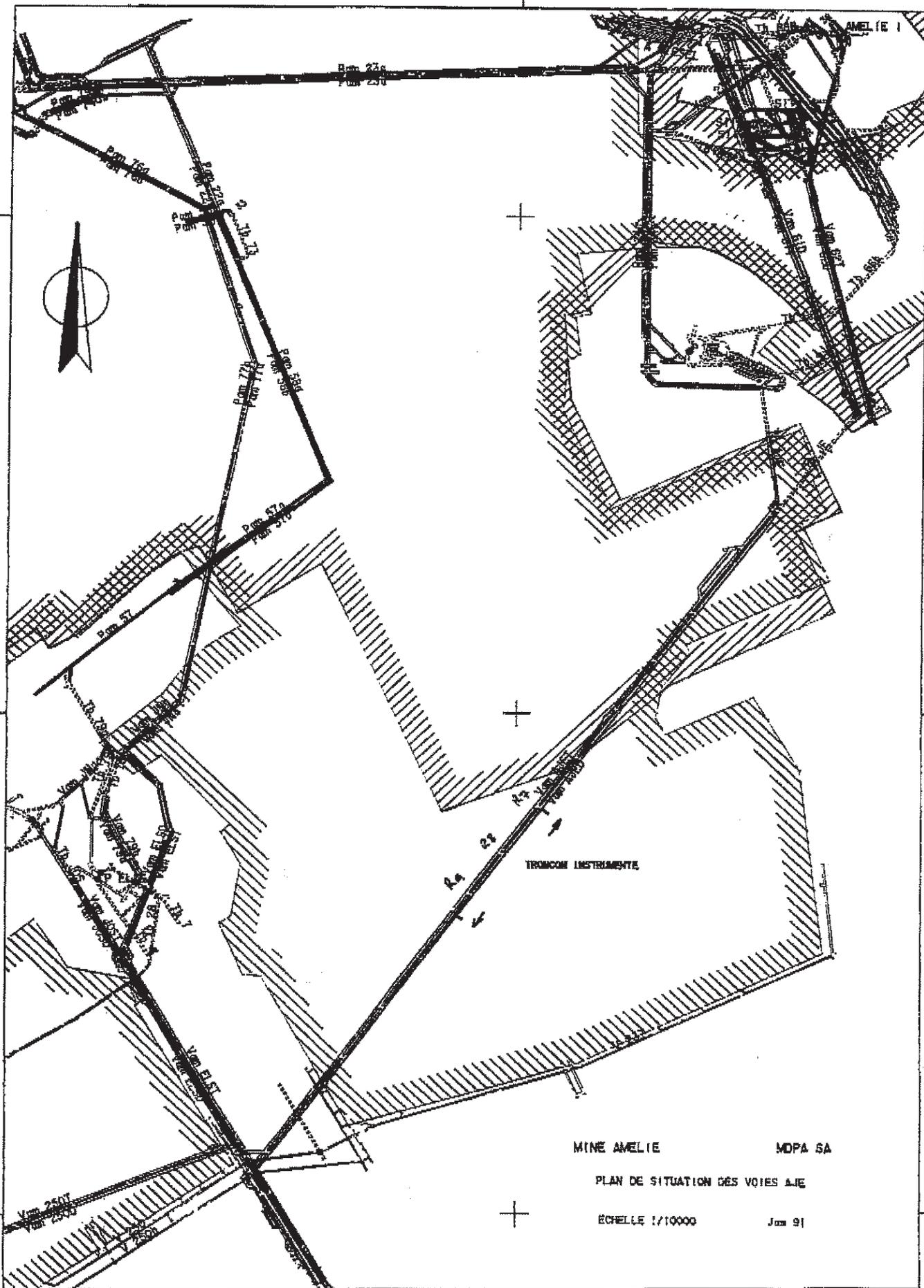
Les observations faites sont les suivantes :

Résultats au bout de 14 années	S 982	S 1045	S 1150	S 1247	S 1267
Déplacement relatif en mm	145	158	126	113	55
Convergence (%)	5,6	6,9	5,3	4,5	2,1

### **Thèse sur le comportement thermo-élasto-viscoplastique des ouvrages souterrains dans le sel gemme**

Des mesures ont été effectuées dans les voies JOS au sud-ouest du lieu prévu pour le stockage. Le rapport de thèse souligne :

"la tenue est excellente : la convergence moyenne est de l'ordre de 0,25 % par an".



MINE AMÉLIE MDPA SA

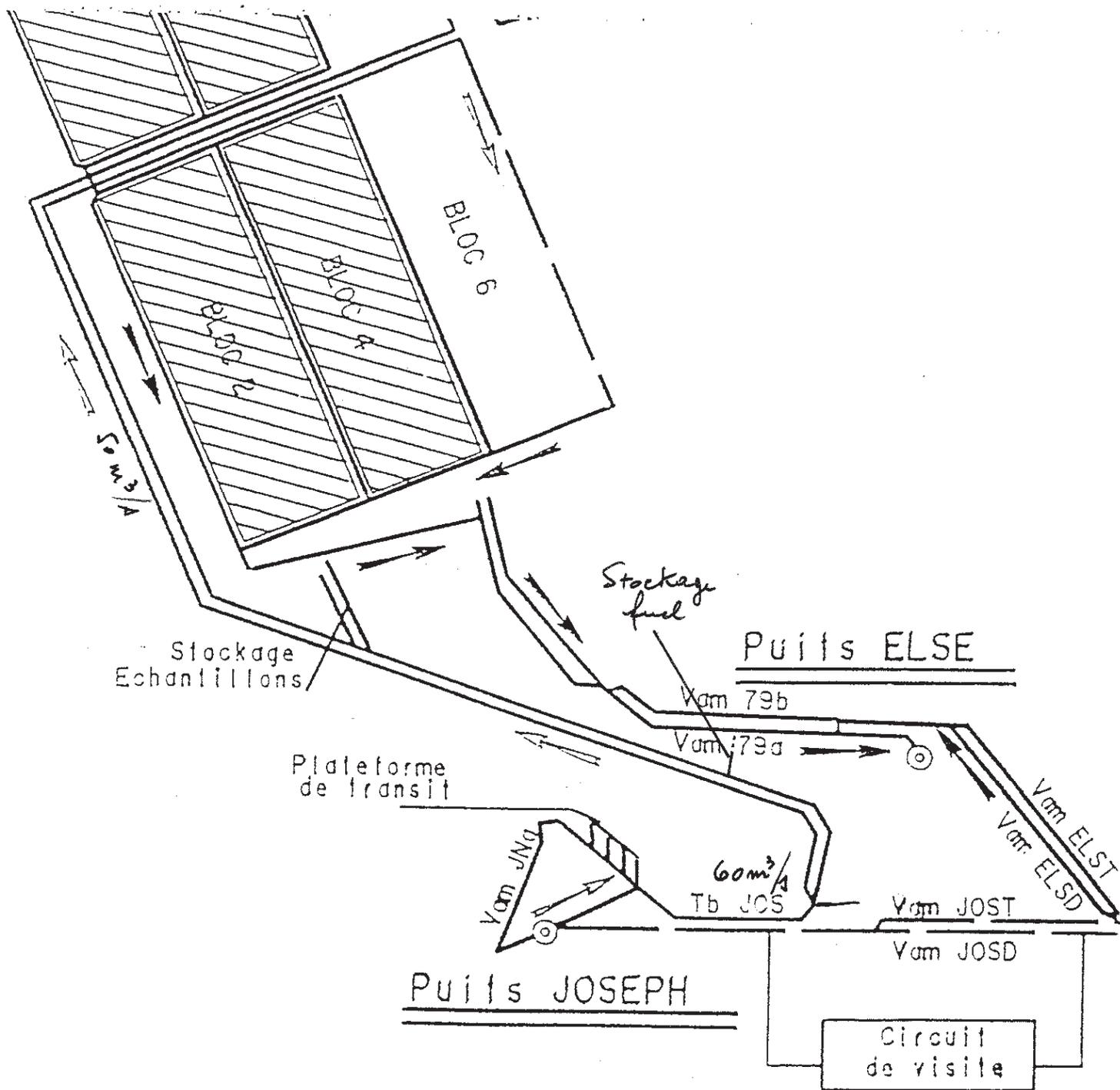
PLAN DE SITUATION DES VOIES A.J.E.

ÉCHELLE 1/10000 Jan 91

-110000



- **Annexe F7** : Emplacement prévu pour le stockage fuel et schéma d'aérage dans les zones prévues pour le stockage





## STOCKAGE DE DECHETS - SCHEMA D'UN BLOC

### VUE EN PLAN

