



SEPTEMBRE 2023

CONSIGNES DE SÉCURITÉ POUR L'INDUSTRIE DE LA MOUSSE DE POLYURÉTHANE FLEXIBLE

PATRICK DE KORT
EUROPUR | EURO-MOULDERS
Avenue de Cortenbergh 71, 1000 Bruxelles, Belgium



Avant-propos à la première révision

Ces lignes directrices ont été initialement publiées en 2016. Depuis, la réglementation encadrant l'utilisation des substances dans notre secteur (notamment les diisocyanates) a évolué et les connaissances collectives du secteur se sont enrichies. C'est pourquoi le groupe de travail *Environment, Health & Safety* (EHS) d'EUROPUR et d'EURO-MOULDERS a entrepris leur révision en 2021.

Pour cette révision, un groupe d'experts en matière de sécurité a été constitué et a orienté les travaux du secrétariat. Nous tenons à remercier :

- Georg Pirkl, PhD, président du groupe de travail EHS, Covestro
- Paul Howard MSc, coprésident du groupe de travail EHS, Adient
- Adri Aerts MSc, président du groupe de travail PS, groupe Vita
- Laurent Verschuere PhD, Recticel Engineered Foams
- Stefano Grassini MSc, Toscana Gomma
- Thomas Bundgaard BSc, Dan-Foam
- Andrea Cirani, Orsa Foam/AIPEF

Certaines images et figures incluses ou mentionnées dans ce document sont utilisées avec l'autorisation des sociétés Hennecke, Laader Berg et Dow Chemical.

Le secrétariat a eu le grand plaisir de collaborer avec des experts dans l'élaboration de ces lignes directrices qui, nous l'espérons, constitueront la base de la formation des nouveaux responsables EHS de notre secteur.

Patrick de Kort



Responsable des affaires réglementaires
EUROPUR et EURO-MOULDERS

Clause de non-responsabilité

EUROPUR et EURO-MOULDERS ont tout mis en œuvre pour présenter dans ce document des informations précises et fiables, afin de soutenir la mise en place de systèmes de gestion de la sécurité harmonisés dans l'industrie de la mousse de polyuréthane flexible.

Ce document ne fournit toutefois que des conseils et des orientations ; il n'exonère pas les producteurs de mousse de polyuréthane de l'obligation de mettre en œuvre leurs propres systèmes de gestion de la sécurité adaptés à leur site, et de suivre l'évolution de la réglementation ou des connaissances scientifiques dont ils doivent tenir compte pour la mise à jour de leurs procédures. La responsabilité de la mise en œuvre de ces systèmes et du respect de la législation et des exigences locales incombe exclusivement aux producteurs de mousse de polyuréthane.

Aucune déclaration ni garantie n'est donc faite quant à l'exhaustivité, l'exactitude ou la fiabilité de ce document et aucune responsabilité ne sera acceptée par EUROPUR, EURO-MOULDERS ni aucun de leurs membres pour les dommages de quelque nature que ce soit résultant de l'utilisation ou de la confiance accordée à ce document.



Table des matières

Introduction	4
B. Description sommaire du processus	4
B1 Matière première	5
B2 Production de blocs de mousse flexible	6
B3 Production de mousse moulée flexible	7
B4 Autres productions de mousse	10
C Sécurité des procédés	10
C1 Principes et méthodologie d'évaluation des risques	10
C2 Conseils spécifiques de gestion des risques	12
C2.1 Livraison/Stockage/Mélange des matières premières	12
C2.2 Production de blocs de mousse	21
C2.3 Production de mousse moulée	28
C2.4 Conversion	31
C3 Intervention d'urgence	32
C4 Audits	32
D Hygiène industrielle	33
D1 Agents chimiques	33
D1.1 Diisocyanates	33
D1.2 Autres substances utilisées intentionnellement	40
D1.3 Substances non utilisées intentionnellement	41
D2 Surveillance de l'exposition	43
D2.1 Campagnes d'échantillonnage de l'air	43
D2.2 Instruments de lecture directe	46
D2.3 Biosurveillance	51
D2.4 Dosimètres	53
D3 Équipement de protection individuelle	53
D3.1 Équipement de protection respiratoire	53
D3.2 Protection cutanée	65
D4 Amélioration continue	66
E Surveillance de la santé	69



E1 Mécanisme d'action des diisocyanates	69
E2 Outils utilisés dans la surveillance médicale	73
E3 Surveillance médicale	76
E3.1 Examens préalables à l'embauche	76
E3.2 Surveillance médicale régulière	77
E3.3 Guide diagnostique	78
F Gestion des déchets	78
F1 Déchets chimiques	78
F2 Déchets d'emballages chimiques	81
F2.1 Récipients pour produits chimiques liquides	81
F2.2 Conteneurs de produits chimiques solides	82
F3 Autres déchets	82
G Références	83



A Introduction

Ces consignes ont été préparées par EUROPUR et EURO-MOULDERS et sont destinées aux responsables EHS qui prennent en charge la gestion d'une usine de mousse PU flexible ; afin de sensibiliser aux dangers et aux mesures de gestion des risques spécifiques à ce secteur.

Le document est divisé en plusieurs chapitres, les principaux traitant de la sécurité des procédés et de l'hygiène industrielle. Le chapitre sur la sécurité des procédés abordera les dangers susceptibles de provoquer des accidents majeurs (notamment liés aux produits chimiques), leur prévention et les mesures à prendre en cas d'incident. Le chapitre sur l'hygiène industrielle traitera des dangers et des risques à maîtriser lors du fonctionnement normal d'une usine de mousse flexible.

Pour illustrer cette distinction, prenons l'exemple des diisocyanates. Lors du démarrage d'une production, un incident peut survenir et entraîner le rejet de diisocyanates sur le convoyeur, provoquant des concentrations atmosphériques massives, dépassant largement les valeurs limites. Le chapitre consacré à la sécurité des procédés fournira des recommandations sur la conception des systèmes afin de prévenir ce type de situation, sur les systèmes à mettre en place pour assurer la détection précoce de l'incident (instruments de lecture directe reliés aux systèmes d'alarme) et sur les mesures à prendre après détection (arrêt et évacuation, suivis de l'intervention d'une équipe spécialisée équipée d'EPI respiratoire pour remédier à la situation).

Lorsqu'une production démarre normalement, le dépassement des valeurs limites d'exposition devrait être beaucoup plus faible et limité à des zones spécifiques. Ces consignes précisent où se situe ce risque d'exposition, comment identifier ces zones et quel équipement de protection respiratoire (EPR) convient. Elles fournissent également des recommandations pour une amélioration continue, afin de réduire la taille et la durée des surexpositions dans les zones critiques. Enfin, des recommandations générales expliquent comment mesurer et contrôler l'exposition aux diisocyanates.

Les risques chimiques spécifiques à notre secteur d'activité nécessitant une surveillance médicale particulière, un chapitre distinct est consacré à ce sujet et s'adresse aux responsables EHS de notre industrie. Enfin, un chapitre contenant des conseils spécifiques en matière de gestion des déchets est également inclus.

Cependant, un chapitre présentant un résumé du processus expliquera d'abord le processus de production aux nouveaux venus dans le secteur.

B Description sommaire du processus

La production de polyuréthane est décrite en détail dans l'Encyclopédie de chimie industrielle d'Ullmann [3]. Les principaux procédés de production de mousse de polyuréthane flexible sont **la production de mousse en blocs** et **la production de mousse moulée** ; pour les deux procédés, la manipulation des matières premières est quasiment identique.

Le produit fini, pour les deux procédés de production (en blocs et moulé), est une mousse de polyuréthane flexible. Les diisocyanates sont entièrement consommés lors de la réaction chimique de



polymérisation du polyuréthane, grâce à la forte réactivité du groupe NCO qu'ils contiennent. Ils ne peuvent pas être libérés dans l'air à partir de mousse de polyuréthane complètement polymérisée. C'est pourquoi il n'y a aucun risque d'exposition des consommateurs aux diisocyanates provenant de la mousse de polyuréthane polymérisée [4].

B1 Matière première

Les principales matières premières pour la production de mousse de polyuréthane flexible (PUF) sont les diisocyanates (TDI, mMDI, p-MDI, prépolymères à base de MDI ou un mélange de ceux-ci) et le polyol, dans un rapport d'environ 1:2 pour les mousses à base de TDI et d'environ 1.5:2 pour celles à base de MDI (ce rapport peut toutefois varier en fonction de la teneur en NCO du produit MDI). Ces matières premières sont généralement livrées par camion-citerne et déchargées dans un parc de stockage, comme illustré sur Figure 1 : .

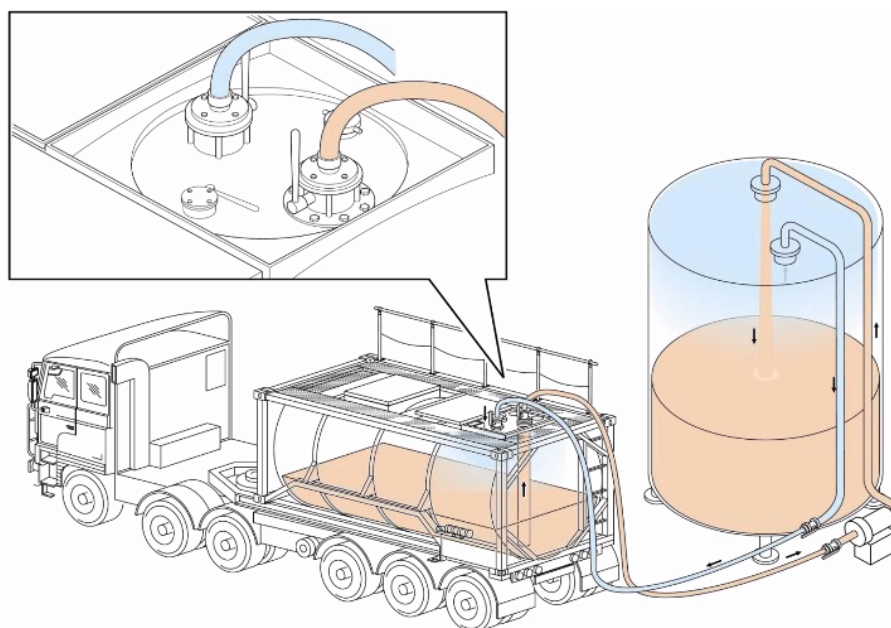


Figure 1 : Déchargement de camions-citernes et stockage dans les réservoirs. Source : ISOPA

Les catalyseurs et autres additifs sont incorporés en très faibles quantités dans les formulations, mais sont essentiels au processus de production. Il s'agit généralement de liquides, livrés en GRV ou en fûts. Ils peuvent être raccordés à une tuyauterie fermée pour une utilisation directe depuis leur contenant d'origine, ou bien le contenu du contenant peut être transvasé dans un système de cuves fermées. Le choix dépendra des pratiques en vigueur et du volume de substance utilisé. Les additifs solides (par exemple, le carbonate de calcium comme charge) sont généralement livrés en gros sacs ou, plus rarement, en petits sacs, et sont généralement introduits dans des trémies pour être mélangés à du polyol afin de former une suspension.

Pour obtenir une structure de mousse, on ajoute un agent gonflant. Le principal agent gonflant utilisé dans l'industrie est l'eau, qui réagit avec les groupes isocyanates pour former un groupe amine et du CO₂. Pour certaines qualités de mousse, généralement plus faibles en densité, un agent gonflant



auxiliaire peut être ajouté. Autrefois, on utilisait des CFC, qui ne sont plus employés en Europe. Plusieurs fabricants de mousse utilisent le chlorure de méthylène¹ comme agent gonflant auxiliaire, mais son utilisation est progressivement remplacée par l'injection de CO₂ supercritique, en raison de l'évolution des données probantes concernant l'état sanitaire, sécuritaire, environnemental et réglementaire de la substance.

Normalement, la formulation et le mélange des matières premières s'effectuent en système clos. Dans certaines installations, notamment pour la production de mousse moulée, le polyol, les additifs et les catalyseurs sont mélangés puis stockés dans une cuve journalière. Cette formulation est ensuite acheminée vers une tête de mélange où elle est mélangée à des isocyanates avant d'être coulée. Dans d'autres installations, en particulier pour la production de mousse en blocs, toutes les matières premières transitent par des conduites séparées jusqu'à la tête de mélange où elles sont mélangées avant d'être coulées.

B2 Production de blocs de mousse flexible

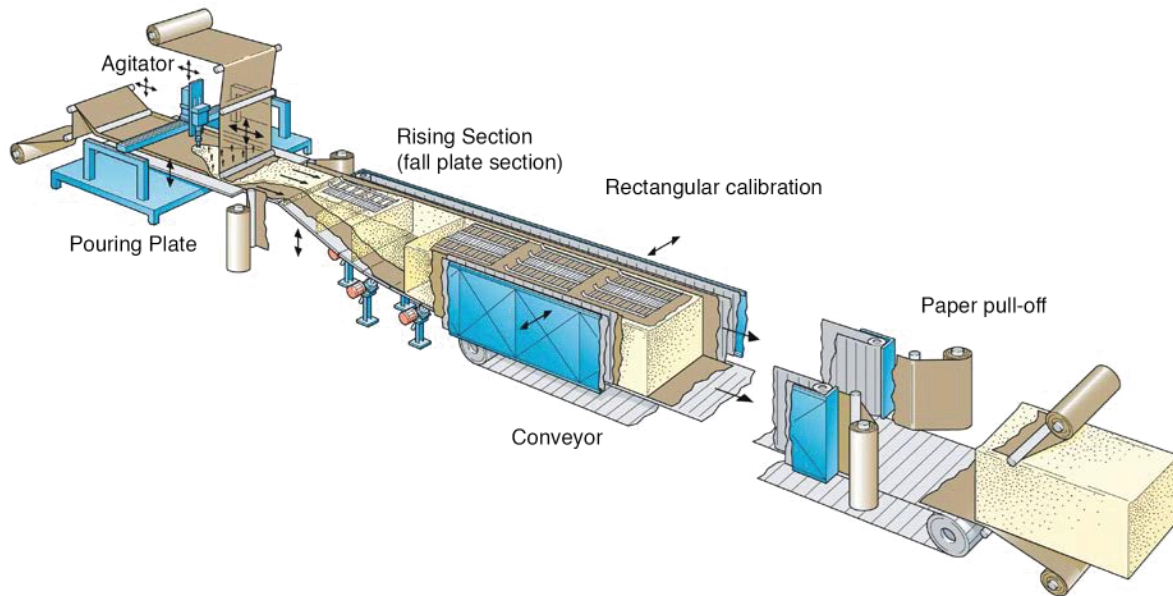
Lors de la production de mousse en bloc, le mélange est dispersé depuis la tête de mélange sur un tapis roulant où la polymérisation et le moussage se déroulent simultanément. Le matériau est conduit et guidé par une feuille.² Le matériau est introduit dans un tunnel de moussage afin de conserver sa forme rectangulaire. Les dimensions habituelles des blocs de mousse utilisés dans l'industrie sont de 2 m de large sur 1 m de haut. Les densités obtenues varient de 15 à 60 kg/m³ et la vitesse du tapis roulant de 2 à 10 m/min. À des densités plus élevées, la vitesse du tapis roulant tend à diminuer, car les pompes doseuses deviennent le facteur limitant et peuvent généralement distribuer un maximum de 500 à 600 kg/min.

À la sortie du tunnel de moussage, le revêtement de la mousse, en papier, en plastique ou en une combinaison des deux, est retiré. Lorsqu'un papier pelable est utilisé, le revêtement plastique reste en place sur le bloc. En fin de chaîne de production, la mousse produite est découpée en blocs pouvant atteindre 120 m de long. Cette mousse fraîche peut être produite en seulement 3 minutes, depuis la dispersion du mélange réactionnel jusqu'à l'obtention de la forme finale.

¹Plus formellement connu sous le nom de dichlorométhane (CAS 75-09-2)

²Le film peut être composé de papier, de papier-feuille PE ou de feuille PE pure.





La figure 1 illustre l'agitateur, le plateau de coulée, la section de montée, le convoyeur et le dispositif de retrait du papier dans un système de production continue de blocs de mousse flexible rectangulaires. Représentation 3D d'un système – sans doseur ni scie de découpe – pour la production continue de blocs de mousse flexible rectangulaires par le procédé QFM (source : Hennecke).

La mousse fraîche est placée dans des zones de durcissement dédiées pendant une durée de 12 à 72 heures, selon son type, afin de permettre son durcissement. Ce processus permet aux substances résiduelles (par exemple, les diisocyanates) de réagir et à la mousse d'acquies ses propriétés physiques et mécaniques finales. La **mousse durcie** est ensuite transférée dans des zones de stockage classiques. Les blocs longs sont découpés en blocs plus courts avant expédition et/ou transformation sur site en produits (semi-)finis. Certaines mousses nécessitent un broyage avant expédition ou transformation afin d'ouvrir leur structure cellulaire.

B3 Production de mousse moulée flexible

Dans la production de mousse moulée, le mélange réactionnel provenant d'une tête de mélange est dispersé dans un moule. La plupart des productions de mousse moulée destinées aux grandes séries (par exemple, les sièges automobiles) sont réalisées à l'aide de robots de coulée automatiques (voir Figure 2) fonctionnant sur un système carrousel. Pour les petites séries, la coulée est effectuée manuellement : un opérateur disperse alors le mélange réactionnel dans le moule. La suite de ce texte portera sur la coulée automatique avec un système carrousel.



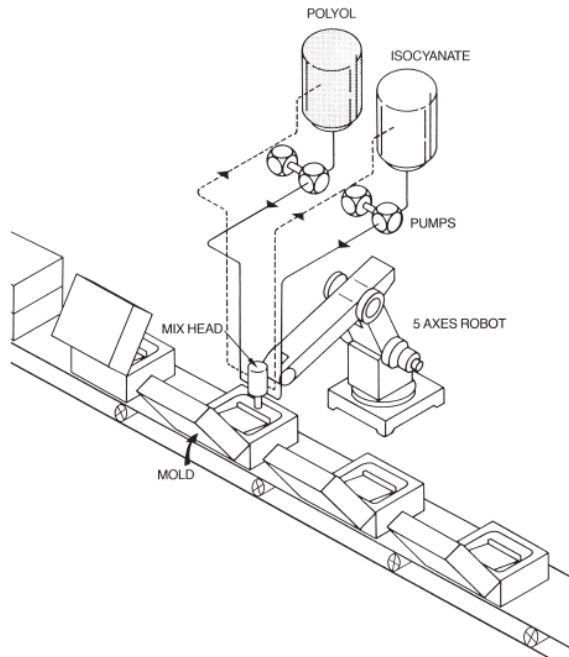


Figure 2 Vue schématique d'une ligne de production de mousse de polyuréthane moulée (source : Dow Chemicals, 1997).

Dans la production de mousse moulée, on peut identifier deux variantes d'un procédé similaire : la mousse moulée à chaud et la mousse moulée à froid.

La production de mousse moulée à chaud est schématisée sur Figure 3. Les matières premières sont injectées automatiquement dans les moules au niveau de la section de remplissage fermée d'un carrousel (d). Le moule est ensuite transféré automatiquement dans un four fermé (a) où la température est maintenue entre 160 et 250 °C. Après le moussage dans le four, le moule est transféré dans une zone de travail où il est ouvert, la pièce de mousse fraîche est extraite, le moule est nettoyé et un agent de démoulage³ est appliqué. Après application de l'agent de démoulage, le moule quitte la zone de travail et entre dans la zone fermée où il refroidit (c). Le cycle se répète ensuite.

³L'agent de démoulage est une substance cireuse pulvérisée à l'intérieur des moules pour faciliter le démoulage.



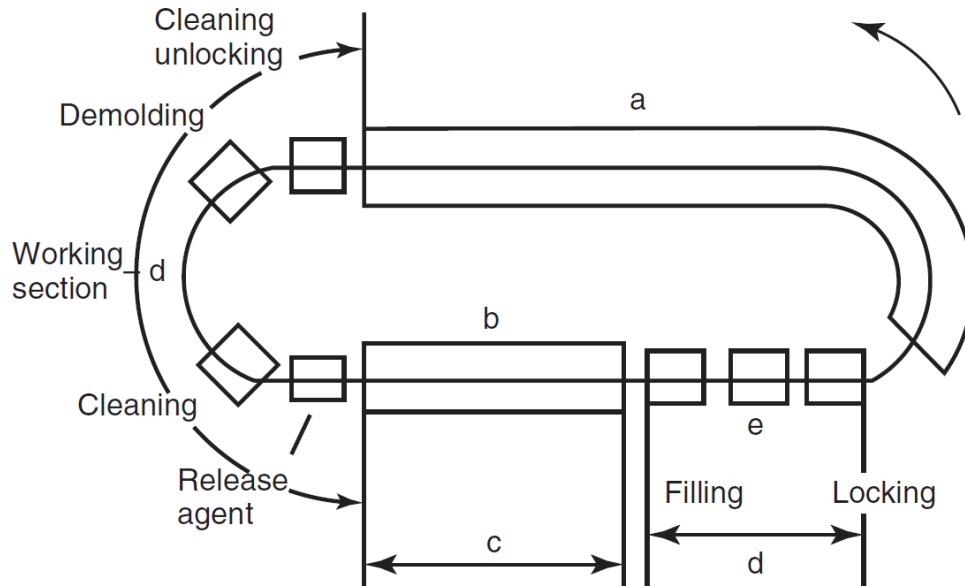


Figure 3 Installation de moulage à chaud : a) Four (160-250 °C) ; b) Bain-marie à recirculation d'air ; c) Section de refroidissement ; d) Section de travail ; e) Inserts. Source : [3]

La production de mousse moulée à froid s'effectue à l'aide d'un carrousel similaire. Cependant, au lieu d'un four, le moule est maintenu à une température plus basse (par exemple 60 °C). De même que pour le procédé à chaud, l'étape de coulée jusqu'au déchargement se déroule en milieu clos.

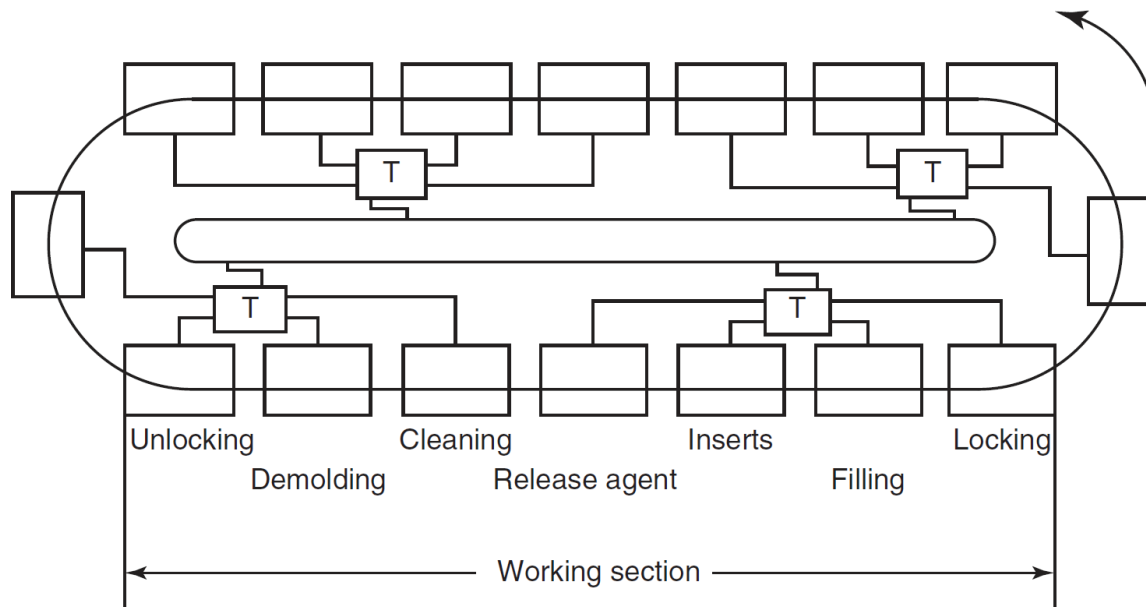


Figure 5 Installation de moulage à froid T = unités de thermostatage . Source : [3]



Après démoulage, la mousse peut être compressée pour briser les structures à cellules fermées. Cette compression empêche le rétrécissement et augmente la perméabilité à l'air de la mousse. Les pièces de mousse sont ensuite généralement acheminées vers un poste d'ébavurage et de réparation où elles sont ébavurées et les défauts mineurs (par exemple, les micro-perforations) sont corrigés. La mousse est ensuite soit traitée/assemblée (par exemple, par l'ajout d'une housse textile et d'autres pièces pour former un siège auto), soit expédiée aux clients.

Le moment où la mousse est considérée comme durcie dépend de la température du procédé, de la taille de la pièce et de la formulation utilisée. Bien que chaque fabricant de mousse moulée soit libre de déterminer ce moment précis, il est généralement admis que le temps de durcissement est beaucoup plus court que pour la mousse en blocs et se mesure en heures.

B4 Autres productions de mousse

Il existe plusieurs autres procédés de production de mousse. Ces lignes directrices peuvent être une source d'inspiration pour les responsables EHS dans ces domaines, mais elles n'ont pas été spécifiquement conçues pour traiter les dangers et les risques liés à ces procédés. Parmi ces procédés figurent le moussage en caisson et la production de mousse recyclée.

C Sécurité des procédés

Ce chapitre traite des dangers susceptibles de provoquer des accidents majeurs (impliquant des produits chimiques), de leur prévention et des mesures à prendre en cas de survenance. Les dangers abordés ici présentent une certaine probabilité d'occurrence et les dommages qu'ils causent aux personnes ou aux biens sont généralement immédiats⁴ et importants ; ils sont donc souvent liés à un événement ponctuel.

La fréquence des incidents liés à la sécurité des procédés doit être considérée comme faible et minimisée davantage compte tenu de la gravité de leurs conséquences. Ces conséquences peuvent avoir une ampleur dépassant le cadre de l'installation. De nombreux sites de production de mousses flexibles sont donc soumis à la directive 2012/18/UE relative à la maîtrise des risques d'accidents majeurs impliquant des substances dangereuses (directive Seveso). Dans l'industrie chimique, des lignes directrices spécifiques ont été élaborées pour préciser les aspects liés à la sécurité des procédés chimiques [5], et pourraient s'avérer utiles pour les sites de production de mousses flexibles.

C1 Principes et méthodologie de l'évaluation des risques

L'évaluation des risques est au cœur d'un système de gestion de la sécurité des procédés. Pour les usines de mousse de polyuréthane flexible, la gestion des risques doit au minimum garantir la conformité à la directive Seveso et aux dispositions de transposition locales, ainsi que la mise en œuvre de toutes les précautions nécessaires pour prévenir les incidents impliquant des substances dangereuses. Son objectif est l'application de systèmes de gestion et de contrôles (programmes,

⁴ Vous trouverez de plus amples informations sur les conséquences immédiates possibles sur la santé suite à des incidents liés à la sécurité des procédés dans la section E, où sont abordés les effets des diisocyanates sur le corps humain.



procédures, audits, évaluations) aux procédés de fabrication ou chimiques, de manière à identifier, comprendre et maîtriser les dangers liés aux procédés, afin de prévenir les accidents et incidents.

Outre les exigences découlant de la directive Seveso et les dangers présentés par les substances dangereuses, des évaluations spécifiques des risques peuvent également être mises en œuvre pour les risques physiques (par exemple, les risques de coupure).

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation des risques, telles que celles présentées dans Méthodes d'évaluation des risques (Tableau)1 Ces méthodes varient en complexité et en applicabilité aux procédés de production de mousses flexibles. Il est conseillé d'évaluer la méthode la plus appropriée à chaque application.

Par exemple, pour un laboratoire de R&D nouvellement construit, il peut être nécessaire de prélever des échantillons de polyol dans un parc de stockage. Ce prélèvement est une opération ponctuelle et peu fréquente, présentant un faible risque. Dans ce contexte, une analyse de scénarios (analyse « et si » ou analyse en nœud papillon) serait probablement la plus appropriée.

Méthodes d'évaluation des risques (Tableau)1

	Méthode	Norme applicable
Événements individuels	Et si	
	Nœuds papillon	ISO 3100 (Norme générique d'évaluation des risques)
Systemique	Analyse par arbre de défaillance analyse d'arbre d'événements	CEI 61025
	Analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)	CEI 60812
	Étude d'identification des dangers (HAZID)	
	Étude des risques et de l'opérabilité (HAZOP)	CEI 61882
Gestion des risques identifiés	Analyse des couches de protection	
Technique du facteur humain	Analyse des tâches critiques pour la sécurité (SCTA)	ISBN 9781787251656 Guide sur l'analyse des facteurs humains dans les tâches critiques pour la sécurité

Les techniques systémiques proposent un examen formel et rigoureux d'une installation, d'un procédé ou d'une opération afin d'identifier les risques crédibles pour l'ensemble du système susceptibles de contribuer à des dangers ou à des problèmes d'exploitation. Cet examen repose sur l'expérience, le jugement et l'imagination de l'équipe, stimulés par des mots-clés. Par exemple, le système de stockage



de liquides en vrac peut et doit être évalué rigoureusement et systématiquement à l'aide de l'une des techniques mentionnées.

Les techniques systémiques sont idéalement mises en œuvre par une équipe pluridisciplinaire composée de représentants des services Maintenance, Automatisation, Procédés, Exploitation et Sécurité. Cette équipe doit être dirigée par un expert en sécurité des procédés expérimenté, maîtrisant la technique d'évaluation choisie. Si l'organisation ne dispose pas des connaissances ou de l'expérience requises, il convient de faire appel à un prestataire externe compétent.

Ces techniques de gestion des risques systémiques comprennent généralement déjà un certain niveau de techniques pour traiter les risques, mais une approche plus formelle consisterait à effectuer une analyse des couches de protection.

Il est recommandé de réexaminer les évaluations des risques liés aux processus tous les 5 ans, avant toute modification majeure ou à la suite d'un incident/quasi-accident, par une équipe répondant aux exigences ci-dessus afin de garantir que l'analyse des dangers est cohérente avec le processus actuel.

Enfin, on estime qu'une grande partie des incidents et des quasi-accidents sont le résultat direct d'une erreur humaine ; l'analyse des tâches critiques pour la sécurité (SCTA) peut être utilisée pour remédier à cela.

C2 Conseils spécifiques en matière de gestion des risques

C2.1 Livraison, stockage et mélange des matières premières

Les diisocyanates constituent la matière première primaire la plus critique pour la production de mousse de polyuréthane flexible. ISOPA, l'Association européenne des producteurs de diisocyanates et de polyols, a élaboré des consignes spécifiques sur le :

- Chargement/déchargement, transport et stockage en toute sécurité du TDI et du MDI en vrac
- Transport, déchargement et stockage en toute sécurité du TDI et du MDI conditionnés

Ces consignes sont disponibles sur le [site web d'ISOPA](#) dans plusieurs langues de l'UE. Elles sont utiles et doivent être suivies. Leur contenu ne sera pas repris dans le présent document, mais complété. Parmi les éléments importants de ces consignes, on peut citer :

- une bonne description des propriétés dangereuses des substances elles-mêmes,
- recommandations sur les PPE appropriés,
- une procédure détaillée de déchargement, et
- de bonnes bases pour la conception d'un parc de réservoirs.

En premier lieu, il est recommandé aux producteurs de mousse de polyuréthane flexible de n'accepter que la livraison de TDI en vrac. Les volumes utilisés sont tels que la livraison conditionnée (fûts ou IBC) entraînerait de nombreuses opérations de transvasement de ces petits contenants vers le parc de stockage, tandis que le transport en vrac nécessite un seul transvasement et une seule opération, minimisant ainsi le risque d'incident.



Il peut toutefois arriver qu'une usine de mousse flexible n'utilise que de faibles quantités d'un diisocyanate particulier (par exemple, des volumes limités de MDI dans une usine de production de mousse en blocs pour une production occasionnelle de mousse HR). Par ailleurs, l'usine peut être située dans un pays où les infrastructures nécessaires à une livraison efficace en vrac sont insuffisantes. Dans ce cas, l'isocyanate peut être livré sous forme conditionnée. Des précautions appropriées doivent alors être prises pour gérer les risques pour la santé et la sécurité liés aux emballages utilisés sur le site (voir chapitre F).

Dangers et risques

Bien que les consignes d'ISOPA contiennent de bonnes recommandations pour gérer certains risques, ceux-ci ne sont pas toujours mentionnés explicitement. Il est donc important de noter que la liste non exhaustive des risques suivants existe en lien avec le déchargement et le stockage des diisocyanates :

- Un **incendie adjacent** , pendant le stockage ou le déchargement, provoquant le chauffage des isocyanates liquides et induisant une rupture de réservoir ou une fuite associée à un important nuage de substances dangereuses.
- Une **fuite** suivie d'émissions de vapeurs, liée à une rupture de la paroi des réservoirs ou de la tuyauterie, provoquée principalement par une agression extérieure ou par toute défaillance de la tuyauterie.
- Un **effondrement du réservoir** dû à une séquence d'opérations incorrecte lors du déchargement.
- Une **réaction chimique incontrôlée** provoquée par l'entrée d'eau ou de tout autre produit chimique incompatible dans les réservoirs.
- Une **surpression** ou un **remplissage excessif** des réservoirs, suivi d'une fuite.
- Une **sous-pression** entraînant une implosion et des fuites subséquentes.
- **La cristallisation** induite par une basse température ou la dimérisation induite par une chaleur excessive peuvent avoir des conséquences indirectes sur la sécurité. En cas d'obstruction de la conduite de retour, une implosion du véhicule de déchargement est possible.
- Un **mouvement inattendu du camion**.
- Un **risque de chute lié à l'accès en hauteur** pour le déchargement.
- Une **exposition à des substances dangereuses** (liquides restants dans les tuyaux ou suite à une situation accidentelle ou à une fuite) par contact cutané et/ou inhalation.

Recommandations

Tous les risques liés à un parc de réservoirs doivent être évalués par la méthode HAZOP ou une méthode similaire mentionnée précédemment. Le fabricant de mousse doit mettre en place un système de gestion de la sécurité intégrant l'évaluation des risques. Plusieurs mesures préventives contre ces risques liés au procédé sont décrites ci-dessous.



Outre les dispositions des directives ISOPA, les principes suivants doivent être respectés pour la conception des parcs de stockage de réservoirs :

- La conception des parcs de stockage de liquides doit tenir compte d'une évaluation des risques, notamment des risques sismiques, des fortes chutes de neige, des inondations et de la foudre, le cas échéant. Dans les zones sismiques, la suspension des canalisations doit prendre en compte ce risque afin de préserver leur flexibilité. Dans les zones inondables, la submersion des digues et la flottaison des réservoirs partiellement vides doivent être prises en considération, notamment par l'augmentation de la hauteur des digues.
- Trois risques doivent être pris en compte lors du **déchargement des diisocyanates** : le risque de **chute de hauteur**, les **fuites** et le **risque d'incendie à proximité**.
 - En ce qui concerne les **chutes de hauteur**, la meilleure solution consiste en une plateforme de sécurité avec une cage de sécurité entourant la zone et empêchant les chutes depuis la cuve. Une autre solution serait un accès sécurisé par un portique ou un escalier, associé à un système antichute avec harnais et rails de guidage. Une troisième option serait un accès sécurisé par l'échelle du conteneur-citerne, en utilisant un système antichute avec harnais. Tout système de travail sécurisé utilisant un système antichute avec harnais doit également garantir que les personnes sont formées à son utilisation, qu'elles sont supervisées pendant son utilisation et qu'un plan de sauvetage est prévu pour la personne suspendue en cas de chute, sauf si le dispositif antichute est à descente automatique. Tous les équipements de protection et harnais doivent faire l'objet d'un programme d'inspection et de maintenance conforme aux recommandations du fabricant.
 - En ce qui concerne le **risque de fuite**, il convient de noter que, particulièrement avec le TDI, toute fuite entraînera des concentrations de diisocyanates dépassant les limites d'exposition professionnelle et les travailleurs ne disposant pas d'un équipement de protection respiratoire (EPR) suffisant peuvent subir des conséquences immédiates sur leur santé ⁴.
 - En cas de **fuite importante**, une accumulation de diisocyanates peut se former autour de laquelle toute personne ne possédant pas de RPE peut subir des conséquences immédiates sur sa santé ⁴ Par conséquent, la zone de déchargement doit être entourée d'une cuvette afin d'empêcher la propagation de cette accumulation.
 - Un excès de diisocyanates pourrait entraîner la volatilisation d'une quantité suffisante pour provoquer le dépassement des valeurs limites d'exposition occupationnelles (OELs) dans différentes parties de l'usine, voire à l'extérieur de celle-ci. Dans le cas du TDI, ce dépassement pourrait être si important qu'il pourrait avoir des conséquences sanitaires immédiates ⁴ Il est donc recommandé de mettre en place un système de drainage de la zone de rétention, relié à une cuve souterraine, ou une combinaison de ces systèmes : 1) un système de drainage de la zone de rétention menant à une cuve souterraine ; et/ou 2) une aire de déchargement fermée.



- En cas d'installation d'un système de drainage vers une cuve souterraine, il convient de veiller à éviter toute infiltration d'eau dans cette cuve. Le drainage de diisocyanates dans une cuve souterraine contenant de l'eau provoquerait une réaction exothermique génératrice de CO₂ dans la cuve. Ceci pourrait entraîner une explosion ou le rejet d'un volume important de CO₂ par le système de drainage, déplaçant l'air autour des entrées et pouvant mettre en danger la sécurité des travailleurs à proximité. L'infiltration d'eau peut être évitée en protégeant la zone de déchargement des eaux pluviales et/ou en utilisant un système de vannes permettant d'orienter le système de drainage vers la collecte des eaux pluviales ou la cuve souterraine. Dans ce dernier cas, la vanne vers la cuve souterraine serait ouverte pendant le déchargement et celle vers la collecte des eaux pluviales fermée, et inversement en dehors des périodes de déchargement.
- Un quai de déchargement fermé empêcherait toute infiltration d'eau dans un système de rétention des déversements souterrain. De plus, un système de restriction d'accès interdirait l'accès au personnel non autorisé. Cependant, tout incident entraînerait des concentrations de particules en suspension encore plus élevées dans le quai, et l'évacuation des travailleurs affectés à l'opération de déchargement pourrait être compliquée par la fermeture du quai. Il convient de veiller à ce que les équipements de protection individuelle (EPI) soient portés et que l'évacuation ne soit pas entravée. Par exemple, le système de restriction d'accès pourrait limiter l'accès au quai sans exiger de badge pour en sortir, et des issues de secours pourraient être présentes de tous côtés du quai.
- Quelle que soit la conception de la zone/quai de déchargement, des cales de roues doivent être placées avant le début du déchargement afin d'éviter tout mouvement inattendu du camion susceptible de provoquer des fuites.
- En cas d'incendie à proximité, il serait préférable que les camions soient stationnés de manière à faciliter leur départ. Par exemple, pour un quai de déchargement simple à une seule entrée, le camion devrait y entrer par l'arrière. Si un incendie se déclare sur le site, il conviendra de décider s'il est possible de déplacer le camion en toute sécurité afin d'éviter la propagation du feu à son contenu.
- Une telle décision ne doit pas être prise à la légère, car elle peut présenter un danger pour la personne chargée de déplacer le camion-citerne. Il doit être clairement établi au sein de l'usine, à tout moment, qui est habilité et responsable de prendre cette décision. De plus, toutes les personnes habilitées et responsables de cette décision doivent participer à une analyse de scénarios afin de déterminer la marche à suivre. Dans certains cas, la situation est claire : si l'incendie est détecté à l'autre bout de l'usine et que le camion-citerne n'est pas encore raccordé, il convient de le déplacer. Dans d'autres cas, moins évidents, l'incendie est détecté au milieu de l'usine et le débranchement du camion ne prend que quelques minutes. Enfin, en cas d'incendie, il est impossible de prévoir tous les scénarios. Les personnes habilitées et responsables doivent être informées qu'il faut privilégier la prudence, notamment en cas de situation imprévue, et ne pas déplacer le camion en cas de doute. Il est



essentiel de leur préciser explicitement qu'elles ne doivent pas tenir compte de la valeur du contenu du camion.

- De petites **fuites** ou des brèches dans le confinement des gaz peuvent entraîner des concentrations de diisocyanates dans le parc de stockage susceptibles d'avoir des conséquences sanitaires immédiates⁴. Par conséquent, l'accès au parc de stockage de diisocyanates doit être limité (par badge ou clé) au personnel autorisé. Lors des opérations de déchargement ou de maintenance, ce personnel doit être équipé d'un équipement de protection respiratoire et de combinaisons chimiques adaptés. De plus, des appareils de mesure directe des concentrations de diisocyanates doivent être installés dans le parc de stockage (voir la section D2.2 pour plus de détails sur les appareils de mesure directe), reliés à un système de signalisation par feux tricolores à l'entrée du parc. Enfin, des caméras peuvent être installées pour permettre aux opérateurs de surveiller à distance et avec précision l'état du parc de stockage et d'évaluer la situation en toute sécurité si les appareils de mesure directe indiquent des concentrations élevées.
- Les réservoirs doivent être **équipés** d'un système de sécurité empêchant les risques de débordement et de surpression. Ce système doit être conforme à la norme IEC 61511. Le système doit être conforme à la norme et atteindre un niveau d'intégrité de sécurité (SIL) de 1 ou 2 selon une étude LOPA. Il convient de veiller à ce que le système instrumenté de sécurité fonctionne au niveau spécifié, notamment par la sélection appropriée de capteurs, d'une logique de commande de sécurité et d'un élément final tel qu'une vanne, tous conformes au SIL requis. L'installation d'un capteur de niveau haut conforme au SIL ne suffit pas à elle seule. La conception de ces systèmes est généralement effectuée par un ingénieur de sécurité fonctionnelle.
- **Une dépression** peut se former dans le parc de stockage en raison d'obstructions lors du déchargement, de l'utilisation de produits provenant du parc et/ou d'une chute de température (surtout lorsque les réservoirs sont presque pleins). Cette dépression peut provoquer l'implosion des réservoirs, entraînant des fuites et des dommages importants. La dépression doit être corrigée automatiquement par injection de gaz. On peut utiliser de l'azote, de l'air sec ou de l'air ambiant. Dans ce dernier cas, l'air doit être déshydraté, ce qui se fait généralement à l'aide d'un système à gel de silice. Il est préférable d'utiliser du gel de silice indicateur en colonnes transparentes, qui se décolore lorsqu'il est saturé d'eau, permettant ainsi de détecter rapidement le moment où les filtres doivent être remplacés. Quelle que soit la méthode choisie, l'humidité du gaz dans le parc de stockage doit avoir un point de rosée inférieur ou égal à -20 °C,⁵ et le système d'alimentation en gaz doit pouvoir le garantir. Idéalement, la pression dans les réservoirs doit être surveillée en continu et le point de rosée doit être mesuré à l'entrée du gaz dans le système du parc de stockage.
- **Une surpression** peut également se développer dans les systèmes de réservoirs suite à une infiltration d'eau, au pompage dans un système fermé (notamment avec une pompe d'alimentation haute pression) et/ou à une augmentation de la température (surtout lorsque les réservoirs sont presque pleins). Ceci peut entraîner la rupture d'un réservoir et des fuites. Pour prévenir une

⁵ Certains membres visent un point de rosée de -40 °C.



surpression, une soupape de sûreté peut être utilisée pour évacuer les gaz. En second lieu, un disque de rupture distinct, se déclenchant à une pression supérieure à celle d'une soupape de sûreté, peut être utilisé⁶. Ces systèmes de sécurité doivent être conformes au niveau SIL et équipés de capteurs pour alerter les opérateurs. Il est important de noter que, même si une surpression est corrigée de cette manière, les gaz provenant des systèmes de stockage de diisocyanates contiendront ces derniers. En particulier lorsque le système contient du TDI, ces gaz peuvent avoir des effets néfastes immédiats sur la santé⁴ et doivent être évacués, conformément à la réglementation locale, par un épurateur adapté, tel qu'un fût à charbon actif, vers une zone inoccupée ou en hauteur.

- Lors de la conception de nouvelles installations ou de la modernisation d'installations existantes, il est important de noter que les tubes de surveillance du niveau de vue en verre ne sont pas les meilleurs de leur catégorie et doivent être remplacés au fil du temps par des alternatives (par exemple des indicateurs de niveau magnétiques ou des capteurs à ultrasons) qui sont mieux adaptées pour résister à la surpression et sont plus résistantes aux dommages physiques.
- **La tuyauterie** doit être en acier inoxydable (304L), notamment en cas de risque de condensation sous l'isolation. Pour le transport de diisocyanates, l'acier ordinaire convient également, à condition d'un traitement anticorrosion approprié et d'un programme d'entretien et de contrôle régulier. L'épaisseur doit être choisie pour résister à la pression maximale de la pompe de transfert et à la dilatation des liquides organiques en cas de variation de température le long de la tuyauterie. Les raccords doivent être soudés, les raccords filetés présentant un risque de fuite ; l'utilisation de brides doit être réduite au strict minimum.
- **Les tuyaux et tubes flexibles** sont largement utilisés dans la production de mousses moulées et en blocs, généralement plus près du point de dispersion que dans le parc de cuves. Ils sont, par exemple, raccordés à l'agent de démoulage et à la tête de mélange des robots de dispersion de mélanges réactionnels. Fréquemment, ces tuyaux transportent des matériaux sous haute pression (jusqu'à 150 bars) et présentent un risque important de fuite. Les recommandations suivantes s'appliquent à ces tubes flexibles :
 - Le choix des matériaux et de la construction des flexibles doit tenir compte des contraintes d'impulsion, de la pression de service, du rayon de courbure et du poids. De plus, les produits chimiques transportés peuvent entraîner un durcissement des matériaux. Il est indispensable de discuter de ces éléments avec le fournisseur d'équipement afin de sélectionner les matériaux de construction appropriés et de définir la fréquence de maintenance et de remplacement.
 - De plus, une fuite au niveau d'un tuyau ou d'un tube peut entraîner l'éjection de matière à grande vitesse, provoquant ainsi la dispersion du contenu sur une zone étendue. L'application

⁶ La différence entre une soupape de sûreté à résistance (SRV) et un disque de rupture réside dans le fait que la SRV s'ouvre lorsqu'une pression interne prédéfinie est atteinte et se referme dès que la pression redescend en dessous de ce seuil. Un disque de rupture, quant à lui, se brise et doit être réparé pour pouvoir être refermé.



d'une gaine extérieure (par exemple , une simple couche de tissu) permet de prévenir ce problème. Cette gaine extérieure présente également l'avantage de limiter les frottements.

- Chaque **joint** , joint de soupape et siège doit être compatible avec le contact avec les diisocyanates. Ceci est primordial car seuls certains joints spécifiques résistent aux diisocyanates.
- En matière de **pompes** , la solution optimale consiste en l'utilisation de pompes à accouplement magnétique, réduisant ainsi le risque de fuite pour les pompes de déchargement et de transfert. Afin d'éviter une surpression due à la fermeture brutale d'une vanne, associée à une défaillance concomitante de la soupape de sécurité interne de la pompe, des soupapes de sécurité externes ou des disques de rupture sont ajoutés en dérivation ou directement sur la pompe. Cette solution a été rendue nécessaire par plusieurs incidents liés à la cristallisation des soupapes de sécurité internes. Les pompes étant généralement l'élément d'un parc de stockage le plus exposé aux fuites, elles doivent par conséquent être installées dans un local fermé ou intégrées au parc de stockage avec un accès restreint.
- Des températures trop basses peuvent entraîner **la cristallisation** des diisocyanates, un phénomène particulièrement important pour le TDI, tandis que des températures trop élevées peuvent provoquer la dimérisation du MDI. La cristallisation et la dimérisation peuvent toutes deux entraîner la formation de matières solides dans les réservoirs, provoquant des obstructions. Par conséquent, la gestion de la température est cruciale dans un système de réservoirs, et les considérations suivantes s'appliquent :

- Il est important de tenir compte de la température des matières premières reçues. En particulier pour les diisocyanates, des températures trop basses ou trop élevées peuvent engendrer des problèmes. De plus, si le conteneur-citerne refroidit excessivement pendant le transport, il est possible que le transporteur ait chauffé le camion. Ce chauffage peut avoir été réalisé en faisant circuler de l'eau chaude autour de la citerne, assurant ainsi un réchauffement progressif de son contenu. Dans certains cas, de la vapeur est utilisée dans ce circuit, car le chauffage est plus rapide, mais cela comporte également un risque de surchauffe.

En cas de basse température du conteneur, il est possible que le TDI présent dans la citerne soit à la fois liquide et solide. Généralement, ce problème n'est détecté qu'au moment du déchargement et des systèmes de sécurité doivent être prévus pour y faire face.

- Le chauffage interne des réservoirs n'est pas acceptable en raison des risques qu'il engendre.
- Les systèmes de gestion thermique à base d'huile, bien que présentant des avantages en matière de sécurité du fait de l'absence de réaction avec les diisocyanates, sont des fluides caloporteurs peu efficaces et, par conséquent, rarement utilisés. Lors de la conception de systèmes de gestion thermique à base d'eau, il convient de prendre en compte le risque de réaction chimique incontrôlée entre les diisocyanates et l'eau. Ce problème ne se pose pas pour l'utilisation de systèmes de gestion thermique à base d'eau pour les polyols et la plupart des autres substances utilisées dans la production de mousses flexibles.



- Les échangeurs de chaleur à plaques sont des composants courants des systèmes de gestion thermique des parcs de stockage (voir Figure 4). Un circuit de matière première échange sa chaleur avec un autre circuit de liquide (généralement de l'eau). Lors de l'utilisation de cette technologie avec de l'eau et des diisocyanates, il est fortement recommandé d'utiliser des échangeurs de chaleur à plaques à double paroi avec détection de fuites. Une fuite dans le circuit d'eau (par exemple, due à la corrosion causée par une eau de mauvaise qualité) n'entraînerait alors pas automatiquement un contact avec le circuit de diisocyanates, et inversement.

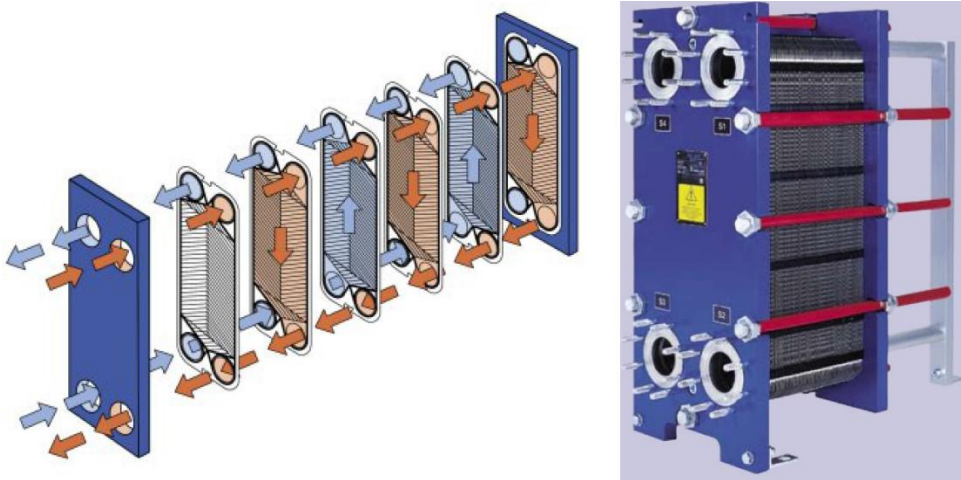


Figure 4 Exemple d'un échangeur de chaleur à plaques

- Pour les échangeurs de chaleur à plaques non à double paroi, les considérations de pression suivantes doivent être prises en compte :
 - Si de l'eau est utilisée dans un échangeur de chaleur en contact avec des diisocyanates, il est conseillé de s'assurer que la pression de la conduite transportant les diisocyanates est légèrement supérieure à celle de la conduite d'eau. Ainsi, en cas de fuite, les diisocyanates s'échapperont et réagiront avec l'excès d'eau, ce qui générera du CO₂ et de la chaleur et pourrait endommager l'échangeur de chaleur. Cependant, l'alternative est que l'eau s'infilte dans le système de réservoir fermé, générant également du CO₂ et de la chaleur, avec des conséquences plus graves.
 - Pour la plupart des autres combinaisons (par exemple huile et diisocyanates ou eau et polyol), le même différentiel de pression doit être appliqué pour empêcher l'entrée du liquide d'échange thermique dans le système de réservoirs.
- Enfin, une extrême prudence est de mise lors de l'installation et de la maintenance de ces échangeurs de chaleur afin d'éviter tout désalignement des raccords. Un défaut d'alignement pourrait entraîner le passage du liquide caloporteur vers le système de stockage et inversement. Dans le cas des diisocyanates, cela pourrait provoquer une réaction en chaîne aux conséquences graves. Il est recommandé d'utiliser un code couleur pour les conduites



d'eau, de diisocyanates et de polyol, ainsi qu'un marquage similaire sur l'échangeur de chaleur.

- Le bâtiment de stockage doit être protégé des incendies extérieurs et intérieurs adjacents. La norme de référence prévoit deux locaux distincts, l'un pour les diisocyanates et l'autre pour les polyols, avec des bassins de rétention séparés, le tout étant intégré dans un compartiment coupe-feu. Le parc de stockage doit être équipé d'un système de détection et d'extinction d'incendie. La protection par sprinklers est compatible avec le stockage d'isocyanates. Les agents extincteurs appropriés comprennent la poudre sèche, le dioxyde de carbone, la mousse à base de protéines et l'eau ⁷. Aucun stockage de matières combustibles ou inflammables n'est autorisé dans le parc de stockage.
- Des dispositions similaires doivent être prises pour le stockage des diisocyanates et des polyols à proximité de leur point d'utilisation. Il est courant de stocker les mélanges de polyols et les diisocyanates séparément dans la même pièce, car le risque de contamination croisée est réduit par la configuration des équipements et la présence de quantités plus faibles. Dans ces zones, il est courant que les pompes augmentent la pression à un niveau élevé avant la dispersion depuis la tête de mélange. Ceci présente un risque accru de projection de liquide en cas de petites fuites et d'élévation de la température des produits chimiques, nécessitant l'utilisation d'échangeurs de chaleur. Les équipements doivent être conçus avec des systèmes de sécurité internes et des accouplements magnétiques. Lorsque l'eau est utilisée comme fluide de refroidissement, elle doit être pompée à une pression inférieure à celle du diisocyanate afin d'éviter la contamination du réservoir journalier. Un petit circuit de refroidissement local en boucle fermée, relié à l'ensemble de l'installation par une unité de conditionnement, doit être utilisé.
- Les agents de démoulage utilisés dans la production de mousse moulée peuvent être à base de solvants combustibles ou inflammables. Il est recommandé de procéder à une évaluation de la classification des zones à risque (directive ATEX de l'UE) pour ce site et de respecter les réglementations de zonage applicables. Ceci peut inclure un local dédié, résistant au feu et équipé d'un système de rétention des eaux pluviales, utilisé pour le stockage et/ou le pompage. L'ensemble de la tuyauterie utilisée pour l'agent de démoulage doit être mis à la terre et clairement étiqueté afin de réduire les risques de décharges électrostatiques. Dans la mesure du possible, les brides et les joints doivent être munis de protections pour limiter les fuites. Des systèmes d'aspiration doivent être installés sur le lieu d'utilisation.
- Les catalyseurs et additifs sont transportés en fûts ou en GRV. Ces substances peuvent présenter des risques spécifiques (par exemple, certains catalyseurs sont corrosifs, irritants/sensibilisants pour les voies respiratoires, toxiques par contact cutané ou peuvent provoquer de graves lésions oculaires). Par conséquent, lors du pompage et de la manipulation, les émissions atmosphériques doivent être réduites au minimum par l'utilisation de lots fermés, une ventilation locale efficace et

⁷Si de l'eau est utilisée, elle doit l'être en très grande quantité. Il faut être vigilant quant à la réaction entre l'eau et le TDI/MDI chaud peut être vigoureux.



un équilibre de l'air, ainsi que par la mise en place de joints d'étanchéité sur les fûts pendant le pompage. Si les additifs ou les catalyseurs sont pompés d'un fût placé verticalement, le tuyau d'échappement doit être nettoyé après utilisation et stocké dans un endroit bien ventilé. S'il existe une salle de mélange dédiée, celle-ci doit être installée dans un bassin de rétention. Les précautions habituellement appliquées à l'utilisation de produits chimiques s'appliquent également ici.

Les recommandations ci-dessus concernent la conception. Il convient également de prendre en compte les mesures organisationnelles suivantes :

- Afin de prévenir tout risque de réaction chimique incontrôlée due à une réaction entre les diisocyanates et les polyols, des contrôles rigoureux doivent être mis en place à la réception des matières premières pour garantir que le bon produit soit déchargé dans les réservoirs appropriés. Dans la mesure du possible, les raccords de déchargement doivent être de conception différente et ne pas être placés côte à côte. Les recommandations d'ISOPA préconisent de décharger les diisocyanates par le haut du camion-citerne et les polyols par le bas.
- Les consignes d'ISOPA décrivent une procédure de traitement des déversements de diisocyanates, précisant notamment une solution décontaminante contenant 5 à 10 % de carbonate de sodium, 0,2 à 2 % de détergent, le reste étant complété avec de l'eau. Certaines fiches de données de sécurité (FDS) des diisocyanates proposent la solution de décontamination suivante : 3 à 8 % de solution d'ammoniaque concentrée, 0,2 à 2 % de détergent liquide, le reste étant de l'eau. Cette solution présente l'avantage d'une odeur perceptible, alertant ainsi tout travailleur portant un masque mal ajusté. Il convient toutefois d'être prudent lors de la préparation et de la manipulation de cette solution, car les solutions d'ammoniaque concentrées présentent des risques.
- Quelle que soit la solution décontaminante utilisée, il convient d'en disposer en quantité suffisante, ainsi que d'un absorbant solide (par exemple, du sable) prêt à l'emploi en cas de déversement. La procédure à suivre en cas de déversement consiste à appliquer d'abord l'absorbant solide, puis la solution décontaminante liquide. Seuls les déversements de très faible ampleur peuvent faire l'objet d'une application directe de la solution décontaminante liquide. Pour plus d'informations sur la réaction entre les diisocyanates et l'eau, veuillez consulter l'annexe 1 des [consignes d'ISOPA](#).

C2.2 Production de blocs de mousse

Certaines recommandations de la section C2.1 s'appliquent jusqu'à la ligne de production de mousse en blocs. Par exemple, l'utilisation de tuyauterie en acier inoxydable et la recommandation d'éviter les raccords filetés s'appliquent également à la tête de mélange où sont dispersés les diisocyanates, le polyol, les catalyseurs et les additifs. Ces recommandations ne seront pas reprises dans cette section. En revanche, nous aborderons les risques spécifiques ainsi que les moyens de les prévenir et de les maîtriser.

Incidents de surexposition au diisocyanate

Certains événements peuvent provoquer une augmentation soudaine des concentrations de diisocyanates sur la plateforme de mélange et potentiellement dans toute la salle de mousse ou d'autres zones. Il s'agit notamment des événements suivants :



1. Dépôt humide : situation dans laquelle seuls des diisocyanates ou un mélange de diisocyanates et d'eau ou d'additifs sans polyol sont dispersés à partir de la tête de mélange.
2. Une situation où le bloc de mousse est empêché de progresser sur la ligne (par exemple, une scie qui ne remonte pas en bout de ligne), ce qui entraîne le déversement du mélange réactionnel sur et au-dessus de la tête de mélange.
3. Un morceau de tuyau reliant la tête de mélange à la cuve se déconnecte pendant la formation de mousse.
4. Défaillance du confinement des tuyauteries ou des pompes contenant du diisocyanate.
5. Absence ou manque de ventilation dû, par exemple, à une panne du système d'extraction (par exemple, un défaut de mise en marche ou une saturation ou un blocage des filtres à charbon).

De tels événements entraînent généralement des concentrations de diisocyanates bien supérieures aux limites d'exposition professionnelle⁸ et peuvent provoquer des effets néfastes immédiats sur la santé (voir la section Relative à la surveillance médicale pour plus de détails). Il convient de prévenir autant que possible ces événements par des mécanismes de contrôle techniques et organisationnels, tels que :

1. Le programme de démarrage de la ligne doit préciser que le polyol doit toujours être dosé dans la tête de mélange avant les diisocyanates et que les diisocyanates ne doivent pas commencer à s'écouler tant que la pression n'est pas détectée dans la tête de mélange.
2. Des boutons d'arrêt d'urgence doivent être installés le long de la ligne, notamment au niveau du poste de sciage situé en bout de ligne.
3. Procédure de vérification de l'étanchéité du raccord de la tubulure reliant la tête de mélange à la cuve par deux opérateurs.
4. Des contrôles et un entretien périodiques sont effectués pour garantir l'étanchéité du système de tuyauterie et des pompes.
5. Mise en place d'un système empêchant le démarrage de la ligne en cas de défaillance du système de ventilation par extraction.

De plus, bien que de tels incidents doivent être évités, des appareils de lecture directe doivent être installés sur la plateforme de mélange. Ces appareils déclenchent une première alarme dès qu'un seuil minimal est dépassé, informant ainsi les opérateurs qu'ils doivent porter un équipement de protection respiratoire. Une seconde alarme, paramétrée à un seuil plus élevé, déclenche une procédure d'arrêt manuel ou automatique (d'urgence) et l'évacuation subséquente de l'atelier de production (voir D2.2 pour plus de détails sur les appareils de lecture directe). Une équipe spécialisée, équipée d'un équipement de protection respiratoire adapté, peut ensuite intervenir pour résoudre le problème.

La plupart de ces incidents de surexposition surviennent lors du démarrage de la production. Par conséquent, les opérateurs doivent porter un équipement de protection respiratoire pendant cette

⁸Par exemple, des rapports transmis au secrétariat ont révélé que, lors d'incidents, les instruments de lecture directe indiquaient des niveaux d'environ 100 ppb et, dans de rares cas, de 200 ppb (le niveau maximal détectable par l'appareil). À l'heure actuelle, la limite d'exposition à court terme (LECT) varie selon les pays, mais est généralement inférieure à 20 ppb.



phase, car celui-ci est essentiel pour prévenir les effets néfastes immédiats sur la santé suite à un incident de surexposition.

Formulations à chaud et pièces de démarrage/arrêt/changement

La réaction produisant la mousse de polyuréthane flexible est exothermique, ce qui signifie qu'elle dégage de la chaleur. La température maximale du bloc de mousse peut être atteinte entre 4 et 6 heures après le moussage, en raison des réactions de durcissement. À ce stade, la mousse se trouve dans sa zone de durcissement. Les formulations dont la température maximale au cœur de la mousse dépasse 175 °C présentent un risque élevé d'auto-inflammation, tandis que celles dont la température maximale est inférieure à 165 °C sont généralement considérées comme non inflammables. Pour les mousses dont la température maximale au cœur se situe entre ces deux extrêmes, il existe également un risque d'auto-inflammation, qu'il convient donc d'éviter. La température au cœur de la mousse doit être contrôlée, notamment après le démarrage de la production et lors de tout changement de formulation.

Une formule a été développée pour estimer la température maximale du noyau de la mousse.⁹ [6] :

$$T_p = 69 + T_{RM} + 1.394 \times C_{TDI} - 1.17 \times C_{MC}$$

Où

T_p	Température maximale du noyau de mousse (°C)
T_{RM}	Température de la matière première utilisée à la tête de mélange (°C)
C_{TDI}	Concentration de TDI dans la formulation (pphp ¹⁰)
C_{MC}	Concentration de chlorure de méthylène (ppm ¹⁰)

Il convient de noter que, bien que cette formule présente une bonne valeur prédictive globale, elle ne tient pas compte de la densité de la mousse, de la température et de l'humidité ambiantes, de la taille de la section transversale du bloc de mousse, ni d'autres facteurs pouvant influencer l'évolution de la température au cœur du bloc. Le résultat de la formule doit être considéré comme une indication et nécessite une vérification expérimentale, notamment dans la zone critique $T_p \geq 160$ °C.

Un autre facteur à prendre en compte est l'importance des antioxydants dans la prévention de la combustion et/ou du roussissement. Les polyols destinés à la production de mousses en blocs contiennent une plus grande quantité d'antioxydants que ceux utilisés pour d'autres applications du polyuréthane (par exemple, les polyols CASE). Les fournisseurs de polyols pour mousses flexibles en

⁹La formule est conçue pour l'utilisation de polyols contenant des antioxydants spécifiques à la production de mousses flexibles. Si des polyols à teneur insuffisante en antioxydants (par exemple, les polyols CASE) sont utilisés, la formule n'est pas applicable. Il est conseillé de contacter les fournisseurs de polyols pour savoir comment remédier à cette carence.

¹⁰ pphp signifie parties pour cent parties de polyol, une unité courante dans la création de formulations de mousse flexible.



tiennent généralement compte ; toutefois, il est important d'en tenir compte lors du mélange de différents polyols pour la production de mousses flexibles ou lors de l'homologation de nouvelles qualités de polyols.

Pour les raisons évoquées ci-dessus, il est important de mesurer la température à cœur des blocs de mousse, notamment lors de la production de nouvelles formulations et de formulations plus risquées. Ces dernières sont celles pour lesquelles la formule mentionnée indique des températures proches de 165 °C, des densités plus faibles et/ou des mousses ayant déjà atteint une température proche de 165 °C lors de mesures antérieures. Il est conseillé de constituer une base de données de courbes temps/température associées aux formulations afin de mieux prédire les températures maximales à cœur des mousses.

Pour effectuer ces mesures, il est recommandé d'installer des systèmes de surveillance de la température dans la zone de polymérisation. La meilleure pratique consiste à utiliser un thermomètre électronique à thermocouple, composé d'un thermomètre à lecture directe et d'une sonde. La sonde peut être amovible, permettant ainsi d'utiliser un seul thermomètre à lecture directe pour alimenter autant de sondes que nécessaire. Ces sondes sont insérées dans des blocs de mousse de polyuréthane afin de mesurer leur profil de température en fonction du temps. La température de fonctionnement doit être comprise entre 0 et 200 °C, avec une résolution d'au moins 0,1 °C et une précision de $\pm 0,5$ °C.

Le thermocouple de la sonde doit être muni d'un dispositif de compensation de la soudure froide efficace sur toute la plage de températures de fonctionnement de l'instrument. La soudure chaude du thermocouple doit être située à l'extrémité de la sonde et isolée du reste de celle-ci afin d'éliminer tout refroidissement de l'extrémité par conduction thermique.

La sonde doit être constituée d'une tige métallique robuste de 2 à 5 mm de diamètre, résistante au pliage et aux risques liés à la manipulation lors de son insertion dans le bloc de mousse à tester. Sa longueur doit être choisie de manière à ce que son extrémité atteigne le centre de la mousse testée.

Le thermocouple doit être étalonné conformément aux spécifications du fabricant et tenir compte de la plage de températures exothermiques de pointe typiques des blocs de mousse de polyuréthane.

Lors de la production de blocs courts, il convient de mesurer le premier et le dernier **bloc** d'une même formulation. Lors de la production de blocs longs, la mesure doit être effectuée à au moins un mètre de chaque extrémité. Toute dérogation à cette procédure doit être justifiée et donner des résultats identiques.

Les blocs de départ, d'arrêt et de changement de voie ne doivent pas être mesurés, mais simplement déplacés vers une zone dédiée (vous trouverez plus de détails ci-dessous sur ce que sont ces blocs et sur ce qu'il faut faire avec eux).

Il est important de noter l'heure de production des sections de mousse mesurées. La sonde doit être insérée dès que possible afin de pouvoir établir une courbe température-temps, le versement du mélange réactionnel étant considéré comme le temps zéro. La sonde peut être insérée sur n'importe quelle face et doit être enfoncée jusqu'au centre du bloc, en tenant compte de ses dimensions. Pour



compenser l'effet de densification de la mousse de polyuréthane devant l'extrémité de la sonde pendant et à la fin de son insertion, celle-ci doit être retirée d'environ 1 à 2 cm. La température doit être enregistrée toutes les 10 minutes jusqu'à ce qu'elle ait chuté d'au moins 40 °C en dessous de la température maximale au cœur de la mousse. La mesure peut alors être interrompue et la sonde retirée.

Les blocs présentant une température à cœur supérieure à 165 °C doivent être retirés de la zone de polymérisation . De plus, les profils de température des formulations mesurées doivent être conservés et régulièrement analysés par les personnes chargées de décider du maintien ou non des formulations nouvelles ou plus risquées dans la zone de polymérisation. Ceci permet de développer une expertise dans la prédiction des courbes temps/température. Si une personne constate qu'un bloc de mousse dépassera une température de 165 °C, elle doit être autorisée à le retirer de la zone de polymérisation.

Lors du retrait de cette mousse, il convient de la déposer dans un endroit dédié, de préférence à l'extérieur, loin de tout matériau combustible. Idéalement, les blocs devraient être découpés en morceaux plus petits lors de cette opération. Si la température atteint 170 °C au cœur du bloc, ou si la mousse a déjà atteint cette température, il faut se préparer à un éventuel incendie et prévoir un dispositif de lutte contre l'incendie suffisant pour éteindre les blocs.

Comme la combustion dans ces blocs débute au cœur et se propage vers la surface, et que la mousse est un isolant, l'application d'eau à l'extérieur du bloc n'aura qu'un effet limité. Il est donc fortement recommandé d'utiliser des lances à eau (voir Figure 5). Ces outils ont été initialement conçus pour la lutte contre les incendies de conteneurs. Les lances à eau peuvent être raccordées à des tuyaux d'incendie et utilisées pour perforer la mousse afin d'injecter de l'eau sous pression au cœur du bloc. Lors de l'utilisation de ces dispositifs, il est important de s'assurer de disposer de longues aiguilles fines et pointues pour faciliter la perforation, d'un raccordement suffisant à l'alimentation en eau et d'une pression suffisante pour alimenter simultanément toutes les lances nécessaires pour plusieurs blocs.



Figure 5. Source : [Viking](#)

La procédure décrite ci-dessus permet de maîtriser les risques d'incendie liés à la mousse de composition connue, dans certaines limites. Cependant, lors des opérations de démarrage, d'arrêt et



de changement de format¹¹, le rapport de mélange des différents composants de la formulation fluctue et n'est donc pas conforme aux spécifications. Il en résulte des zones de démarrage, d'arrêt et de changement de format (ZSC) dont le comportement en termes d'évolution de température peut être imprévisible. Ces zones ZSC doivent être retirées de la ligne et traitées comme des zones à risque d'incendie.

Les fabricants de mousse disposent de différentes méthodes pour gérer ces morceaux de mousse autoportante. Certains les retirent simplement et les entreposent à l'extérieur, dans un espace dédié. D'autres les transportent dans des bunkers spécialement conçus à cet effet, où ils peuvent être surveillés et équipés d'un système d'extinction d'incendie. Les deux options sont acceptables, mais le système de bunkers dédiés est préférable. Dans un bunker dédié, le rejet de substances provenant de la mousse par les eaux de pluie est évité. La plupart des morceaux étant incombustibles, la mousse elle-même peut être utilisée comme mousse de seconde qualité, floquée pour le rembourrage de coussins ou recyclée.

Quel que soit le lieu d'élimination, ces blocs de béton cellulaire autoclavé (BCA) présentent un risque d'incendie dès leur fabrication et jusqu'à leur refroidissement complet, 4 à 6 heures plus tard. Le degré de ce risque peut toutefois être minimisé par une meilleure planification de la production et un séquençage approprié du dosage des composants de la formulation. Les règles suivantes doivent être prises en compte :

- Lors de la planification d'une production de mousse, avec plusieurs qualités de mousse produites en alternance, il est conseillé de commencer par la mousse la moins dense et de passer progressivement à des formulations de densité croissante, dans la mesure du possible. De plus, lors des changements de formulation, plus la modification est importante (entraînant une variation de densité), plus la pièce concernée est risquée. Ceci est particulièrement vrai pour les formulations dont la densité est inférieure à 30 kg/m³.
- Concernant le dosage des composants d'une formulation, il existe actuellement sur le marché des systèmes dont les procédures de démarrage, de changement de format et d'arrêt sont numériques et dont la synchronisation de l'ouverture et de la fermeture des vannes est automatisée. Pour ces équipements, les fournisseurs peuvent apporter leur assistance à la programmation afin de garantir un dosage sûr et contrôlé des composants. Il existe également des systèmes analogiques (plus anciens) qui nécessitent des interventions manuelles sur un panneau de commande. Pour ces systèmes, il est important de noter que :
 - Lors de la procédure de démarrage, il est important de veiller à ce que les flux de matières soient ouverts dans l'ordre suivant : polyol puis diisocyanate puis eau.
 - Lorsqu'on augmente la densité de la mousse, il convient de diminuer la dose d'eau avant de diminuer celle des diisocyanates, et enfin d'ajuster les autres composants.

¹¹Une opération de changement de formulation est une opération au cours de laquelle la formulation est modifiée pour produire un autre type de mousse sans interrompre la production.



- Lors de la diminution de la densité de la mousse, il convient d'augmenter d'abord la dose de diisocyanates, puis la quantité d'eau.
- Lors d'une séquence d'arrêt, arrêtez d'abord l'eau, puis les diisocyanates, et enfin le polyol.

L'objectif est d'éviter la formation de zones de mousse présentant un risque d'incendie en raison de proportions de mélange inappropriées et plus risquées (par exemple, une teneur en eau ou en diisocyanates trop élevée). Ces zones pourraient être réparties de manière non uniforme dans le bloc, ce qui signifie que les thermocouples ne les détecteraient pas nécessairement.

La compression de la mousse fraîche peut également être due à un dysfonctionnement des systèmes de convoyage, par exemple si un premier convoyeur fonctionne plus rapidement qu'un second. Il convient d'éviter la formation accidentelle de cette mousse et de surveiller attentivement la mousse fraîche comprimée en mesurant sa température comme décrit précédemment.

Zones de séchage et stockage régulier

Les blocs de mousse fraîche doivent être stockés dans des zones de séchage dédiées, car ils dégagent des diisocyanates résiduels¹² pendant leur durcissement. De plus, même en l'absence de formulations chaudes, un risque d'incendie résiduel persiste.

Ces zones de séchage se présentent généralement sous forme de systèmes de rayonnages, mais peuvent aussi être de simples halls où la mousse est posée à même le sol. Quel que soit le système utilisé, un espace d'au moins 5 cm doit être maintenu entre les blocs adjacents afin de permettre la dissipation de la chaleur interne.

La durée minimale de séjour d'un bloc dans la zone de durcissement devra être déterminée par chaque entreprise en fonction de l'évolution de la température enregistrée pour chaque type de mousse. On peut toutefois citer quelques règles générales :

- Les densités plus faibles atteignent des températures plus élevées, mais refroidissent aussi plus vite.
- Les mousses VE nécessitent généralement un temps de durcissement plus long que les mousses d'éther classiques.

Il est recommandé d'éloigner la zone de séchage de tout autre bâtiment et/ou d'installer un système d'extinction automatique à eau avec des points de dispersion au-dessus de chaque bloc de mousse afin de maîtriser les risques d'incendie. L'accès à la zone de séchage doit également être limité autant que possible afin de limiter l'exposition aux diisocyanates.

Après durcissement, la mousse peut être stockée dans un entrepôt. Il est recommandé d'y maintenir un système d'extinction d'incendie. La quantité de mousse stockée et la hauteur de stockage doivent

¹²Il ne faut pas confondre les concentrations de diisocyanates présentes autour de la mousse fraîche avec celles observées lors d'épisodes de surexposition. Ces dernières sont beaucoup plus faibles et n'entraînent pas de conséquences immédiates sur la santé ; elles sont abordées plus en détail dans la section consacrée à l'hygiène industrielle.



être adaptées à la conception du système d'extinction d'incendie de l'entrepôt et au risque de basculement¹³.

C2.3 Production de mousse moulée

Certaines recommandations de la section C2.1 s'appliquent jusqu'à la dispersion du mélange réactionnel (polyol, diisocyanates, catalyseurs et additifs). Par exemple, l'utilisation de tuyauteries en acier inoxydable et la recommandation d'éviter les raccords filetés restent valables jusqu'à la tête de mélange où les diisocyanates, le polyol, les catalyseurs et les additifs sont dispersés. Ces recommandations ne seront pas reprises dans cette section. En revanche, nous aborderons les risques spécifiques ainsi que les moyens de les prévenir et de les maîtriser.

Incidents de surexposition au diisocyanate

Certains événements peuvent provoquer une augmentation soudaine des concentrations de diisocyanates au voisinage du point d'écoulement et potentiellement se propager à d'autres zones. Ces événements comprennent :

1. Erreur de coulée : situation dans laquelle seuls des diisocyanates sont versés dans le moule chauffé.
2. Défaillance du confinement de la tête de mélange via des tuyaux flexibles ou des raccords de tuyauterie.
3. Absence ou insuffisance de ventilation due, par exemple, au dysfonctionnement de la ventilation d'extraction ou à la saturation/l'obstruction des filtres à charbon.

De tels événements entraînent généralement des concentrations de diisocyanates bien supérieures aux limites d'exposition professionnelle et peuvent provoquer des effets néfastes (immédiats) sur la santé (voir la section Relative à la surveillance médicale pour plus de détails). Il convient de prévenir autant que possible ces événements par des mécanismes de contrôle techniques et organisationnels, tels que :

1. L'utilisation de capteurs de pression pour détecter une baisse de pression du polyol et/ou d'un système de caméras pour surveiller le coulage dans le moule. Des boutons d'arrêt d'urgence permettent aux opérateurs d'arrêter la machine en cas de problème. Des instruments de lecture directe, reliés à un système de sécurité, arrêtent la ligne de production dès qu'un tel incident se produit.
2. Le choix du matériau et de la construction du tuyau doit tenir compte des charges d'impulsion et de pression de service. Une gaine extérieure pour éviter les frottements, ainsi que des contrôles d'entretien réguliers, le remplacement du tuyau, le rayon de courbure et le support du poids du tuyau sont également des éléments à prendre en considération.
3. Mise en place d'un système empêchant le déversement du mélange réactionnel en cas de dysfonctionnement de la ventilation.

¹³Bien que la mousse soit un matériau de faible densité, un bloc tombant d'une certaine hauteur peut blesser des travailleurs.



De plus, bien que de tels incidents doivent être évités, des instruments de lecture directe doivent être installés à proximité de la tête de mélange. Ces instruments doivent déclencher une alarme d'évacuation dès qu'un certain seuil est atteint. Cette alarme doit entraîner l'arrêt de la production et l'évacuation du hall de production de mousse (voir D2.2 pour plus de détails sur les instruments de lecture directe). Une équipe spécialisée, équipée d'un équipement de protection respiratoire adapté, pourra ensuite intervenir pour résoudre le problème.

Inflammabilité de l'agent de démoulage

Un agent de démoulage est un produit généralement pulvérisé sur le moule avant le coulage ¹⁴ afin d'éviter que la mousse n'y adhère trop fortement et n'empêche ainsi son démoulage. Les agents de démoulage sont généralement des substances cireuses dispersées dans un fluide porteur. Selon le fluide porteur, on distingue les classifications suivantes :

- À base d'eau ; il s'agit d'une cire maintenue en solution/suspension dans l'eau
- À base de solvant ; il s'agit de cire dissoute dans un solvant organique
- Hybride ; il s'agit de cire mélangée à de l'eau et à un solvant.
- Sans solvant ; pulvérisation directe de cire

Le choix de l'agent de réticulation (AR) dépend du réglage précis des moules et de l'effet de peau souhaité sur les pièces en mousse moulées. Du point de vue de la sécurité, l'utilisation d'AR à base de solvant présente le risque d'incendie le plus élevé, suivie par la dispersion sans solvant, puis par les AR hybrides. L'AR à base d'eau est l'option la plus sûre, pratiquement sans risque d'incendie.

Malheureusement, l'utilisation d'un autoclave à base d'eau présente des inconvénients en termes d'efficacité. Le fluide porteur doit être en grande partie évaporé avant le coulage du mélange réactionnel. Sur les lignes de polymérisation à froid fonctionnant à basse température (par exemple 50 °C), l'utilisation d'un autoclave à base d'eau ne permet pas d'obtenir des moules secs avant le coulage. En revanche, sur les lignes fonctionnant à des vitesses plus faibles ou à des températures plus élevées, le passage à un autoclave à base d'eau peut améliorer la sécurité. De plus, la cire étant en suspension et non en solution aqueuse, le volume total de cire à appliquer pour assurer une couverture complète du moule est plus important, ce qui augmente la fréquence de nettoyage des moules.

Dans certains cas, on utilise des pistolets de pulvérisation électrostatiques. Ces appareils permettent de pulvériser l'agent de revêtement (AR) sur le moule grâce à des molécules chargées et des champs électriques. L'AR est chargé négativement par le pistolet, tandis que le moule à revêtir est chargé positivement. Cette attraction entre l'AR et le moule améliore ainsi l'efficacité du revêtement. Cependant, cette technologie augmente le risque de deux incidents : la possibilité de provoquer une étincelle (par exemple, par contact avec une pièce métallique ou un insert) et une diminution insuffisante du courant du générateur haute tension.

1. Lorsqu'on utilise un agent de pulvérisation à base de solvant, une étincelle peut provoquer une combustion du produit pulvérisé, formant ainsi un jet de flammes. Si la gâchette est bloquée et que

¹⁴L'automatisation est à l'étude et a été déployée avec succès pour des moules aux géométries moins complexes.



l'opérateur perd le contrôle du pistolet (le lâcher pouvant être un réflexe), celui-ci se mettra en mouvement, son déplacement étant limité par le tuyau le reliant au système de tuyauterie.

2. En cas de ventilation insuffisante, la concentration de COV inflammables autour du poste de pulvérisation de l'agent de démoulage peut atteindre des concentrations explosives dans l'air, qui peuvent s'enflammer au contact d'une étincelle.

L'association de l'électropulvérisation et des systèmes de pulvérisation à base de solvants présente donc un risque spécifique qui doit être géré en conséquence. L'association de l'électropulvérisation avec des systèmes à base de solvants aqueux ne présente pas ce risque.

Pour maîtriser les risques d'incendie, les recommandations suivantes sont proposées :

- Il convient de choisir un agent de démoulage à point d'éclair le plus élevé possible ou un agent de démoulage inflammable. La présence de sels de métaux lourds dans la cire doit être soigneusement évaluée et les substances à base d'étain doivent être remplacées, dans la mesure du possible, par des substances moins dangereuses.
- Les pistolets à peinture électrostatiques doivent être remplacés par des pistolets à peinture pneumatiques ou d'autres types de pistolets à peinture.
- Le pistolet pulvérisateur doit être conçu de manière à ce que la libération de l'agent de démoulage nécessite une pression active sur la gâchette. Il ne doit pas être possible de bloquer la gâchette afin que, si l'opérateur la relâche, le flux de produit soit interrompu.
- Idéalement, la chaîne de production est entièrement fermée (c'est-à-dire en boîte) afin de permettre une bonne capture des émissions.
- Des parois d'extraction doivent être installées derrière les postes de démoulage, les cabines de pulvérisation d'agent de démoulage et les cabines d'insertion et de coulée. Une compensation par un volume d'air équivalent au volume extrait est nécessaire, éventuellement par chauffage, refroidissement partiel ou échangeurs air/air. L'extraction doit être positionnée de manière à éloigner les vapeurs des opérateurs et ne doit pas être placée derrière eux ni au-dessus de leur tête afin de limiter leur exposition. Un moule ouvert, mal positionné, risque d'affecter négativement le fonctionnement de l'extraction. En particulier, lorsque la ligne de production est entièrement fermée, il convient de veiller à un apport d'air suffisant pour un fonctionnement optimal de la ventilation.
- Le volume d'air d'échappement à l'intérieur de la cabine de peinture doit être calculé de manière à maintenir la concentration de vapeurs inflammables bien en dessous de 25 % de la limite inférieure d'explosivité (LIE) des solvants (cette dilution n'a aucun effet sur le risque d'incendie par jet).

Même en cas d'utilisation d'un agent de recirculation des granulés (ARG) à base d'eau, la cire et la poussière seront extraites par le système d'extraction d'air. Ceci pourrait entraîner une accumulation de matières combustibles sur les parois des conduits du système d'extraction. Pour éviter ce phénomène, des systèmes de filtration doivent être installés au point d'aspiration de ce système. Ces



filtres doivent être entretenus régulièrement (nettoyage , remplacement occasionnel). La fréquence d'entretien peut être déterminée en collaboration avec le fabricant et/ou à l'aide d'un système mesurant la différence de pression de l'air avant et après le filtre.

Selon les circonstances locales, il peut être nécessaire d'installer un système pour capturer le solvant et l'agent de démoulage résiduel avant leur émission par le système d'échappement.

C2.4 Conversion

Tant dans la production de mousse moulée que dans celle de mousse en blocs, des opérations de transformation sont nécessaires, mais leur nature diffère sensiblement. Dans le cas de la mousse moulée, il s'agit principalement d'ébavurage et de réparation pour corriger les petits défauts (par exemple, la réparation des piqûres). Les procédés de transformation de la mousse en blocs sont plus complexes et peuvent être réalisés sur site ou dans d'autres installations.

Les risques liés aux opérations de transformation sont principalement d'ordre mécanique. La plupart de ces risques sont traités dans la norme EN 14886 et ne seront pas abordés ici. Il est fortement recommandé d'adopter les pratiques décrites dans la norme EN 14886.

Concernant le port de gants, la norme précise : « Le fabricant doit indiquer que, pour la coupe à main levée, une protection des mains adaptée doit être utilisée et que des gants anti-coupures appropriés doivent être portés ; toutefois, le port de gants est déconseillé lors de l'utilisation de couteaux à ruban dentés. » Il convient de noter que l'utilisation de gants avec des scies ou des lames dentées comporte un risque de blocage des gants et de traction sur les extrémités de l'opérateur. Ce risque est particulièrement important avec des gants anti-coupures en cotte de mailles. Ces gants sont généralement les plus performants en cas de risques de coupure, sauf si des lames dentées sont utilisées ; leur utilisation est donc déconseillée lors des opérations (de maintenance) avec des lames dentées.

La norme précise également que les émissions de poussières « nocives » doivent être maîtrisées. Plus précisément, les poussières provenant de blocs de mousse fraîche non polymérisée peuvent être considérées comme nocives, car elles contiennent des diisocyanates résiduels non polymérisés et doivent donc être contrôlées. Les poussières provenant de mousse polymérisée ne doivent pas être considérées comme particulièrement nocives et leur gestion relève des bonnes pratiques d'hygiène industrielle.

La poussière de mousse de polyuréthane est un matériau combustible. Cependant, du fait de sa flexibilité, le volume créé est faible et la taille des particules importante, ce qui réduit considérablement le risque d'explosion. Il existe néanmoins un point d'accumulation possible, notamment dans les bacs à poussière des machines de découpe. Ces bacs sont conçus pour contenir de l'eau afin d'éliminer ce risque. Toutefois, une procédure de contrôle doit être mise en place pour s'assurer que le niveau d'eau est suffisant (par exemple, une inspection visuelle avant la mise en marche de la machine) et pour procéder régulièrement au nettoyage et au remplissage.



C3 Intervention d'urgence

Au sein de l'entreprise, une personne doit être désignée comme responsable de l'élaboration du plan d'intervention d'urgence. Ce plan est un document qui évalue et décrit tous les scénarios possibles et définit les actions correspondantes.

Tous les types d'urgences possibles, ainsi que les scénarios correspondants (incendie, fuite de produits chimiques, fuite de gaz, inondation, etc.). Un plan d'action pour chaque situation doit être élaboré. Ces plans doivent définir clairement les responsabilités de chacun et les employés doivent recevoir un document récapitulatif des actions à entreprendre. Par ailleurs, des formations régulières doivent être mises en place.

Pour les situations nécessitant l'intervention des services d'urgence (pompiers, par exemple), il convient de les consulter. Ces services doivent être contactés et invités à participer à des exercices simulant des accidents liés à ces situations (par exemple, des problèmes lors du déchargement de diisocyanates). Lors de ces exercices, il est important d'enregistrer le temps de réponse et les services/équipements disponibles. Il peut être judicieux d'associer les autorités locales lorsque les situations font apparaître un risque (par exemple, si une usine de mousse est située à proximité d'une école ou d'un supermarché).

Chaque exercice d'intervention d'urgence ou application réelle est évalué afin de tirer des enseignements des éventuels écarts constatés et d'adapter le plan d'intervention d'urgence en conséquence. De plus, ce plan doit être mis à jour après chaque modification importante de l'installation et faire l'objet d'un examen périodique.

C4 Audits

Pour les entreprises multisites, il est recommandé d'organiser des audits de sécurité au cours desquels le personnel concerné examine les pratiques et procédures des autres. Cela permet d'échanger les meilleures pratiques.

ISOPA a mis au point un outil d'évaluation des parcs de stockage de diisocyanates, utilisable pour l'auto-évaluation ou l'évaluation par les entreprises membres d'ISOPA. Le fournisseur de diisocyanates peut être contacté pour obtenir cette évaluation.

***EUROPUR et EURO-MOULDERS recommandent
vivement à leurs membres de faire évaluer leur parc de
réservoirs (en interne ou par une tierce-partie)***



D Hygiène industrielle

Ce chapitre traite des risques chimiques pour les travailleurs qui doivent être maîtrisés dans des conditions normales d'exploitation. Dans ce contexte, les risques sont généralement omniprésents (par exemple, les vapeurs de certaines substances en suspension dans l'air), la dose étant le facteur déterminant, et le risque d'effets néfastes sur la santé dépendant du niveau de maîtrise du risque en dessous des seuils réglementaires.

Par exemple, il est impossible d'éviter complètement l'exposition aux diisocyanates lors du fonctionnement normal d'une usine de mousse de polyuréthane, mais le niveau d'exposition doit être contrôlé pour se conformer aux limites d'exposition professionnelle et/ou pour atteindre le niveau le plus bas raisonnablement possible (ALARP).

D1 Agents chimiques

Dans le procédé de fabrication de mousses flexibles, les matières premières principales sont les diisocyanates et les polyols. De nombreuses autres substances entrent également dans la formulation, telles que des catalyseurs aminés, des catalyseurs métalliques et des tensioactifs siliconés. Selon les propriétés de mousse souhaitées, d'autres types de substances peuvent être utilisés, comme des retardateurs de flamme, des charges, des pâtes colorantes et des agents d'expansion auxiliaires. Outre les ingrédients de la mousse, d'autres substances ou mélanges peuvent être employés, tels que des solvants pour le nettoyage/rinçage des équipements, des produits de nettoyage, des peintures pour le marquage de direction et des colles (par exemple, pour la transformation).

Le risque d'exposition le plus élevé lors de l'opération de moussage est probablement dû aux diisocyanates. Ce point sera donc abordé dans le sous-chapitre ci-dessous, suivi de recommandations sur les bonnes pratiques concernant les autres substances utilisées intentionnellement, et enfin d'une note sur les substances utilisées involontairement. Une évaluation des risques sur le lieu de travail est nécessaire et permettra de déterminer si les mesures appliquées pour maîtriser le risque d'exposition aux diisocyanates couvrent également le risque lié aux autres produits chimiques utilisés.

D1.1 Diisocyanates

Deux diisocyanates principaux sont utilisés dans la production de mousses flexibles : le TDI et le MDI. Le MDI utilisé est un mélange de MDI polymérique (pMDI) et de MDI monomérique ou « pur », ou encore d'un prépolymère à base de MDI . Le TDI et le MDI présentent des classifications de danger quasi identiques, le principal risque étant la sensibilisation respiratoire, pouvant entraîner un asthme professionnel. Pour plus d'informations sur la sensibilisation et l'asthme professionnel¹⁵, veuillez consulter la section E

¹⁵ On utilise parfois le terme « prépolymère MDI », qui est en réalité un produit issu du même mélange de MDI et de polyol.



Tableau 2 Classification harmonisée des dangers des TDI et MDI

	TDI	MDI
Nom	de m- tolylidène ; diisocyanate de toluène	diisocyanate de méthylènediphényle
Cas	26471-62-5	26447-40-5
CE	247-722-4	247-714-0
Indice CLP	615-006-00-4	615-005-00-9
Classification harmonisée	Toxicité aiguë . 1 * Sens. rép. 1 Sensibilité cutanée 1 Carc . 2 Irritation oculaire . 2 Irritation cutanée . 2 STOT SE 3 Chronique aquatique 3	Toxicité aiguë. 4 * Sens. rép. 1 Sensibilité cutanée 1 Carc . 2 Irritation oculaire . 2 Irritation cutanée . 2 STOT SE 3 STOT RE 2 *
Pression de vapeur (25°C)	1,5 Pa	0,0014 Pa

À l'heure actuelle, la plupart des États membres de l'UE ont fixé des limites d'exposition professionnelle aux diisocyanates à 5 ppb pour la moyenne pondérée sur 8 heures (MPE) et à 10 ou 20 ppb pour la valeur limite d'exposition à court terme (VLE-CT) sur 15 minutes. Cela signifie que l'exposition moyenne sur un poste de travail ne doit pas dépasser 5 ppb et qu'aucune période de 15 minutes au cours de ce poste ne doit présenter une exposition moyenne supérieure à 10 ou 20 ppb dans la plupart des pays de l'UE. Il existe des exceptions notables, comme la Suède (MPE de 2 ppb et VLE-CT de 5 ppb), la Pologne (TDI : MPE de 1 ppb et VLE-CT de 3 ppb) et l'Italie (TDI : MPE de 1 ppb et VLE-CT de 5 ppb). Certains pays peuvent présenter des particularités, comme l'Allemagne qui applique une valeur plafond pour le TDI, une limite à ne jamais dépasser, même momentanément.

Pour un aperçu des limites nationales de l'UE applicables en 2021, l'Agence européenne des produits chimiques a publié un [rapport](#) les présentant dans les tableaux 5 à 7 [7] . La [base de données internationale GESTIS sur les valeurs limites](#) offre quant à elle une vue d'ensemble plus large des valeurs limites adoptées dans le monde. Par ailleurs, les VLEP des substances ou des mélanges doivent figurer sur les fiches de données de sécurité nationales des matières premières fournies. Ces limites sont susceptibles d'évoluer dans les années à venir (voir la section D4 pour plus d'informations).

Chaque installation doit connaître les limites qui lui sont applicables, généralement définies par la législation nationale, et tenir compte des spécificités nationales (par exemple, la valeur plafond allemande). Toutes les sources mentionnées ci-dessus peuvent être utiles, notamment en l'absence de limites nationales, mais elles peuvent s'avérer erronées. La qualité des fiches de données de sécurité est variable, la base de données GESTIS n'est mise à jour que périodiquement et ne couvre pas tous les pays. Par conséquent, pour connaître les limites applicables au niveau national, il est impératif que l'installation identifie les moyens de communication des valeurs limites mis en place par l'État, tels que la législation ou la réglementation en vigueur, ou tout autre moyen de diffusion.



Certains pays n'ont pas de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) nationales applicables à l'ensemble ou à certains diisocyanates. Dans ces cas, il convient de respecter les valeurs de la dose sans effet dérivée (DNEL) indiquées dans la fiche de données de sécurité.

Il est important de comprendre que les courbes de pression de vapeur du TDI et du MDI sont radicalement différentes. Comme pour la plupart des substances, leur pression de vapeur augmente avec la température ; cependant, le TDI est beaucoup plus volatil que le MDI (voir Figure 6) ; à température ambiante, il est environ 400 fois plus volatil. Du fait de sa pression de vapeur beaucoup plus élevée, le TDI a une plus grande tendance à se volatiliser. Par conséquent, le TDI présente un risque intrinsèque plus important que le MDI. À titre d'exemple, une simple goutte de TDI déposée sur une table dans une salle de réunion de taille moyenne entraînerait une concentration immédiate dans l'air supérieure à 5 ppb¹⁶ à **température ambiante** ; le MDI devrait entraîner une concentration dans l'air bien inférieure à 5 ppb à température ambiante et pour des taux de renouvellement d'air typiques dans les bâtiments.

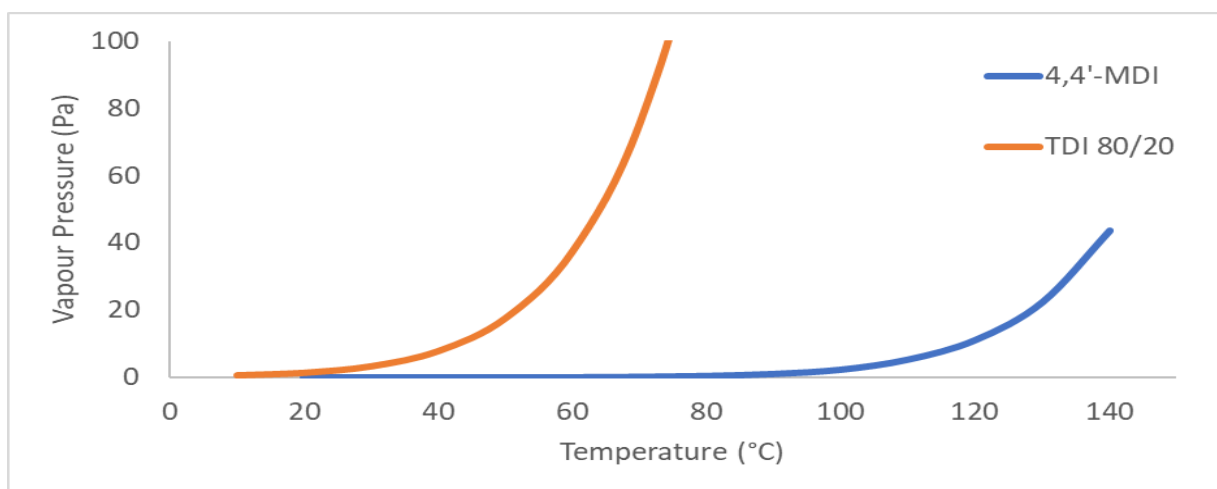


Figure 6 Pression de vapeur du TDI 80/20 et du 4,4'-MDI. Source : Covestro

La plupart des mousses en blocs sont produites à partir de TDI, mais le MDI est également utilisé pour certaines qualités (par exemple, les mousses HR). Les mousses moulées sont produites à partir de MDI et de TDI (par exemple, pour les sièges auto légers et de faible densité). Pour la production de mousses en blocs, il n'est pas rare de couler 500 kg/minute : en supposant une teneur en TDI de 1/3 et une goutte de 1 ml, cela représente environ 140 000 gouttelettes par minute. Pour la production de mousses moulées, les quantités sont un peu moins importantes.

Deux raisons expliquent pourquoi ces milliers de gouttelettes n'entraînent pas des concentrations dans l'air dépassant plusieurs fois la VLEP (Valeur Limite d'Exposition). Premièrement, les mesures de

¹⁶Une gouttelette de moins de 2 mm de diamètre et contenant 10 mg de TDI entraînerait une concentration atmosphérique de 0,37 mg/m³ (10 fois supérieure à la VME de 5 ppb, soit 0,035 mg/m³ dans une pièce de 3 x 3 x 3 m, sans tenir compte du renouvellement de l'air). Remarque : La concentration de saturation du TDI à 25 °C est de l'ordre de 100 mg/m³.



gestion des risques mises en œuvre, notamment les enceintes de confinement et une ventilation par extraction spécialement conçue, réduisent les concentrations dans l'air autour des travailleurs. Deuxièmement, lors du versement, les diisocyanates sont mélangés à d'autres composants engagés dans une réaction de polymérisation. En particulier durant les premiers instants de cette réaction, la vitesse de réaction est élevée, éliminant déjà une grande partie des diisocyanates. De plus, la matrice liquide de polyol réduit la volatilisation. Ainsi, le procédé de « coulée humide », où aucun polyol n'est versé simultanément aux diisocyanates, est l'une des causes des incidents de surexposition décrits dans la section relative à la sécurité des procédés (section C2.2). Néanmoins, l'augmentation de la température dans le mélange moussant accroît la volatilité du TDI ou du MDI résiduel ; par conséquent, l'ensemble du processus de moussage doit être considéré comme une source d'exposition potentiellement importante.

Exposition typique dans la production de blocs de mousse

Les responsables des usines doivent avoir une bonne connaissance de l'exposition (potentielle) aux produits chimiques dangereux utilisés dans le moussage. EUROPUR a mené une vaste campagne de mesures de TDI dans quatre usines de mousse en blocs aux Pays-Bas [8]. Dans trois de ces usines, des données représentatives des conditions normales de fonctionnement ont été collectées. Dans la quatrième usine, un incident s'est produit pendant la mesure, fournissant des données représentatives de cette situation. Ce rapport est disponible pour les membres d'EUROPUR sur l'extranet dédié et pour les autres producteurs de mousse sur demande. Les statistiques récapitulatives (Tableau 3) et quelques observations clés sur les écarts constatés dans un hall de moussage de blocs fonctionnant en conditions normales sont présentées ci-dessous.

Tableau 3 Statistiques récapitulatives de l'exposition au TDI pour diverses activités dans les usines de blocs de mousse flexible, mesurées en 2020-2021. Les valeurs de µg NCO/m³ peuvent être converties en µg TDI/m³ en les multipliant par 2,07. Source : [8]

Activité/lieu	Statique / Personnel	Moyenne (µg NCO/m³ ppb)	90e percentile (µg NCO/m³ ppb)	Maximum (µg NCO/m³ ppb)
Déchargement et stockage TDI	Statique	0,14 0,04	0,22 0,07	0,25 0,07
Mousse de Slabstock	Personnel	8,9 2,6	21,3 6,2	33,3 9,7
Manipulation de la mousse non polymérisée	Mélanger	4,0 1,2	9,5 2,8	20,4 5,9
Manipulation de mousse durcie	Mélanger	0,022 0,006	0,031 0,050	0,170 0,050
Nettoyage	Personnel	3,0 0,9	7,4 2,1	8,9 2,6
Opérations de laboratoire	Personnel	1,6 0,5	2,9 0,8	3,2 0,9

Au point de dispersion sur les plateformes de mélange, la concentration de diisocyanate dans le liquide versé est maximale. Pourtant, à cet endroit, les concentrations mesurées dans l'air étaient faibles. Les mesures statiques ont révélé des concentrations de 0,004, 0,268 et 0,663 ppb de TDI. Ce résultat semble paradoxal compte tenu de la forte concentration de diisocyanates dans le liquide réactionnel. Deux



facteurs peuvent expliquer ce phénomène. Premièrement, le système de ventilation par extraction aspire l'air du tunnel, qui aspire lui-même l'air de la zone autour de la plateforme de mélange. Deuxièmement, la volatilité des diisocyanates est liée à la température, généralement ambiante lors du mélange et encore relativement basse lors de la dispersion.

Vers la fin de la ligne de production de mousse, la situation s'inverse. La concentration de diisocyanates dans la mousse a fortement diminué, mais la température à cœur a augmenté à des niveaux qui accroissent considérablement la volatilité. Dans l'usine A, l'extrémité de la ligne de production de mousse était confinée dans un grand espace clos où les personnes pouvaient se déplacer avec un équipement de protection respiratoire adapté. Dans cette zone, une mesure individuelle a révélé des concentrations dans l'air de 7,5 ppb, tandis qu'une mesure statique a révélé 3,1 ppb. L'usine B disposait de systèmes d'enceintes étanches autour de la ligne, ce qui signifie qu'aucune mesure n'a été effectuée sur les activités ou les zones à l'intérieur de ces enceintes. Cependant, une mesure effectuée à un poste de dévidage de papier – où le papier est déchiré de la mousse, créant des ouvertures par lesquelles les diisocyanates peuvent s'échapper – a révélé une enceinte sous-optimale, comme l'a démontré une mesure statique de 6,3 ppb. L'usine D possédait un tunnel extrêmement long où se trouvait, à mi-chemin, un poste de dévidage de papier. Une mesure statique y a révélé une concentration de 5 ppb. Cependant, à l'extrémité du tunnel, une mesure de la zone de sciage a révélé une concentration relativement faible de 0,7 ppb.

Covestro, un producteur d'isocyanates, a développé un modèle basé sur des expériences en laboratoire et des données clés telles que la diminution de la concentration en NCO, la montée en mousse et la température. Ce modèle permet d'estimer la pression de vapeur du TDI à la surface et au cœur d'un échantillon de mousse chaude fraîche (figure Figure 7. Bien que les détails précis de ce modèle n'aient pas été divulgués, il est clair qu'il prend en compte la concentration résiduelle de diisocyanate, car la « pression de vapeur » sur l'axe des abscisses secondaire ne semble pas être exclusivement liée à la température de surface et au cœur de l'échantillon.

Le modèle indique que la pression de vapeur du TDI en surface augmente avec le temps, parallèlement à l'élévation de la température. Ensuite, elle diminue et met un certain temps avant d'atteindre un niveau similaire à celui observé au point de dispersion. De plus, le modèle indique que la température au cœur de la mousse reste plus élevée, et donc que la pression de vapeur y demeure supérieure à celle en surface. Par conséquent, toute action exposant davantage le cœur de la mousse augmente le risque d'exposition, comme par exemple le déroulement du papier, qui arrache des morceaux de mousse, ou le découpage de la mousse en blocs plus ou moins longs.



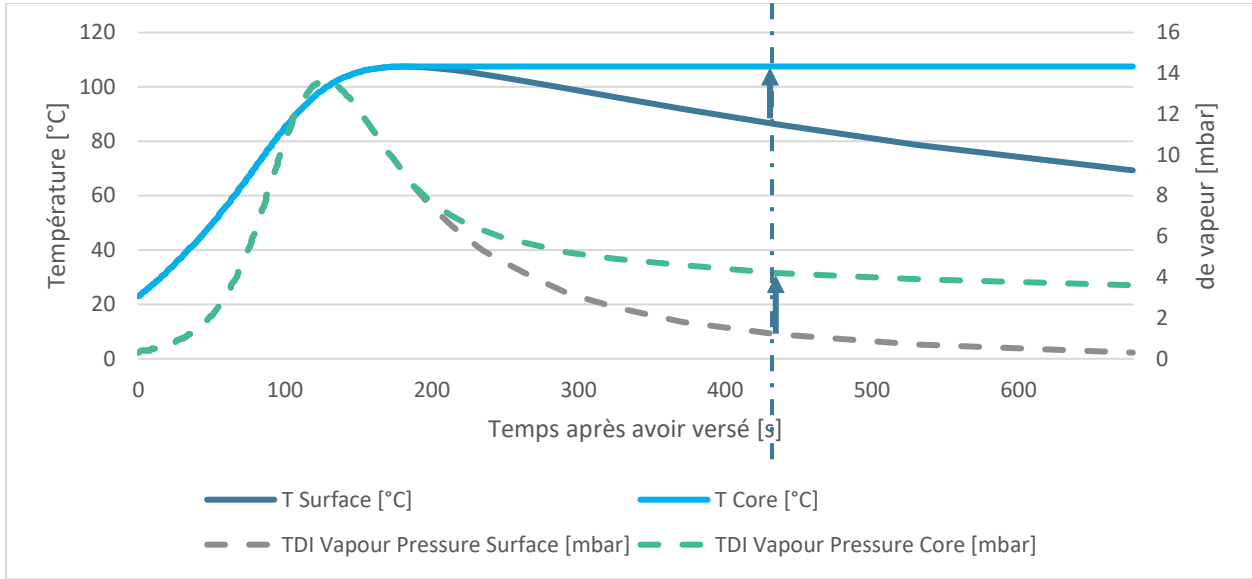


Figure 7 Températures mesurées en surface et à cœur et leur effet théorique sur la pression de vapeur du TDI. Le modèle de pression de vapeur suppose que tout le TDI résiduel dans la mousse pourrait s'évaporer sans interaction avec celle-ci et surestime donc légèrement l'évaporation effective du TDI. La ligne pointillée représente la découpe dans un bloc. Source : Covestro

Ce modèle présente un certain intérêt explicatif, mais ne doit pas être considéré comme une vérité absolue. Différentes formulations engendreront des profils de température et de réaction différents. De plus, la pression, la température et l'humidité ambiantes peuvent influencer le processus de moussage, nécessitant parfois de légers ajustements ponctuels des formulations standard et ayant donc un impact sur le risque d'exposition. Il explique pourquoi, même si une grande partie des diisocyanates a déjà réagi, la mousse représente toujours un danger dans le tunnel de production de blocs et en bout de ligne.

Enfin, le modèle ne prend en compte que les propriétés intrinsèques de la réaction et non les mesures de gestion des risques liés à l'exposition professionnelle. Pour reprendre l'exemple des faibles expositions sur la plateforme de mélange, il ne faut pas conclure à l'absence totale de risque, car le modèle montre que la pression de vapeur est plus faible au point de dispersion. Comme expliqué précédemment, le système d'extraction d'air aspire également l'air de cette zone. Si les fenêtres le long de la ligne de production de mousse restent ouvertes,¹⁷ ce courant d'air sur la plateforme de mélange sera certainement moins puissant.

Comme indiqué dans la section B, une fois la mousse durcie, tous les diisocyanates ont réagi et la mousse est exempte de tout danger lié à ces composés. Les mesures le confirment, puisque de nombreuses mousses durcies analysées présentaient des concentrations inférieures au seuil de détection. Celles légèrement supérieures à ce seuil affichaient des valeurs qui ne doivent pas être

¹⁷ Les opérateurs de lignes de mousse doivent souvent effectuer certaines opérations pendant ces périodes, comme la correction du décalage latéral du papier. Il est impératif de refermer ces fenêtres ensuite, mais le respect de cette pratique est rarement optimal.



considérées comme pertinentes pour la santé humaine, mais plutôt comme témoignant de l'extrême sensibilité de la méthode de mesure. Ces résultats pourraient également être dus à une faible diffusion, même limitée, de la zone de moussage vers d'autres endroits.

Potentiel d'exposition typique dans la production de mousse moulée

EURO-MOULDERS a mené une campagne de mesures en 2017 dans quatre usines de mousse moulée en Allemagne, en Pologne et en Slovaquie, selon une méthodologie similaire [9]. Les données ont été réanalysées en 2021 et un rapport est disponible pour tous les membres d'EURO-MOULDERS sur l'extranet ; pour les non-membres, il peut être obtenu sur demande [10]. Des statistiques descriptives ainsi que quelques observations pertinentes sont présentées ci-dessous.

*Tableau 4 Récapitulatif des concentrations de TDI mesurées dans l'air des usines de mousse moulée. *Le coulage a été effectué automatiquement dans des cabines de coulage fermées, c'est-à-dire sans opérateur et hors des lieux de travail. Le coulage manuel existe, mais ces mesures ne sont pas représentatives de cette activité. Les valeurs de $\mu\text{g NCO}/\text{m}^3$ peuvent être converties en $\mu\text{g TDI}/\text{m}^3$ en les multipliant par 2,07. Source : [10]*

Activité/lieu	Statique / Personnel	Moyenne ($\mu\text{g NCO}/\text{m}^3$ ppb)	90e percentile ($\mu\text{g NCO}/\text{m}^3$ ppb)	Maximum ($\mu\text{g NCO}/\text{m}^3$ ppb)
Verser*	Statique à l'intérieur de la cabine de coulée	11,3 3,30	21,9 6,38	46,3 13,5
Démoulage	Personnel	0,63 0,18	1,40 0,41	2,08 0,61
Après le traitement	Statique	0,27 0,08	0,45 0,13	0,73 0,21

Il convient de noter que toutes ces usines étaient des fournisseurs de l'industrie automobile et produisaient donc d'importants volumes, le coulage automatique étant la norme. Ce coulage s'effectue dans des espaces clos (« cabines de coulage ») sans la présence d'opérateurs. Les mesures effectuées dans cette cabine sont présentées ici à titre d'explication du profil de libération du TDI. Dans les usines de mousse moulée destinées à l'ameublement, aux transports publics et/ou à d'autres productions à plus petite échelle, le coulage manuel est également pratiqué. Les résultats des mesures effectuées dans la cabine de coulage présentée ci-dessus ne sont en aucun cas représentatifs des opérations de coulage manuel, car on s'attendrait à y utiliser du MDI et/ou à la présence d'un système d'extraction d'air beaucoup plus spécifique.

Dans les usines à coulée automatique, le premier point d'exposition aux diisocyanates est le poste de démoulage, où les pièces de mousse sont détachées. À ce stade, la température de surface de la mousse est généralement tiède (entre 40 et 75 °C¹⁸ environ). Cependant, le cœur du bloc de mousse peut atteindre des températures légèrement supérieures. Les pièces de mousse étant beaucoup plus petites, la température y diminue beaucoup plus rapidement et uniformément que dans la mousse en blocs. Cette différence explique **en partie** pourquoi les concentrations dans l'air sont généralement plus

¹⁸ Dans le procédé de moulage à chaud, la température du moule peut dépasser 100 °C. Ce procédé n'a pas été utilisé sur les sites étudiés.



faibles lors de la production de mousse moulée que lors de la production de mousse en blocs. L'autre facteur déterminant est le système de ventilation par extraction installé au poste de démoulage pour prévenir toute exposition.

Une autre étape importante à mentionner est le broyage, qui intervient relativement rapidement après le démoulage. Lors de cette opération, la mousse est broyée afin d'ouvrir les cellules de sa structure interne. Les cellules fermées s'ouvrent ainsi et le gaz est expulsé de la mousse. Ces postes doivent être aussi isolés que possible (notamment pour des raisons de sécurité) et il est recommandé d'utiliser un système d'extraction d'air ou un système de broyage sous vide.

D1.2 Autres substances utilisées intentionnellement

Chaque usine de mousse isolante doit tenir un inventaire de tous les produits (substances ou mélanges) dangereux présents et le maintenir à jour. De tels inventaires peuvent déjà exister, car ils constituent une exigence pour l'obtention d'un permis. Cet inventaire doit inclure les éléments suivants :

- Fiche de données de sécurité de la substance ou du mélange
- Classification des dangers de la substance, du mélange et des substances constituant le mélange
- L'objectif du produit, par exemple :
 - Composant de la formulation
 - Matière première pour polyol
 - Matière première diisocyanate
 - catalyseurs aminés
 - retardateur de flamme
 - Agents de nettoyage
 - Autres (par exemple, peinture pour marquage au sol)
 - Carburant (par exemple pour les chariots élévateurs)
- Quantité stockée (idéalement suivie, ou à défaut une moyenne ou une fourchette)
- Emplacement de stockage dans l'usine
- Type d'emballage (ex. réservoir, GRV, fût, big bag, petits sacs)
- Département d'utilisation.
- Valeurs limites d'exposition professionnelle ou valeurs équivalentes (par exemple DNEL)

Il convient de prendre des précautions lors du stockage de ces produits chimiques et d'appliquer un zonage approprié. Par exemple, les substances comburantes ne doivent pas être stockées à proximité de liquides inflammables (comme certains agents de démoulage). De plus, les contenants ne doivent pas être réutilisés, mais éliminés conformément à la législation nationale (voir chapitre F).

Pour toutes les activités impliquant des agents chimiques susceptibles de générer un risque pour la santé et la sécurité, en particulier les substances classées comme dangereuses pour la santé humaine, une évaluation des risques doit être effectuée.

Un guide pratique pour ces évaluations a été élaboré au Royaume-Uni : [« Guide étape par étape pour l'évaluation COSHH »](#). Il explique principalement que la plupart des évaluations peuvent être réalisées en combinant les propriétés des substances ou du mélange, telles qu'indiquées dans la fiche de



données de sécurité, avec l'expertise d'une personne compétente. La plupart des évaluations des risques professionnels peuvent et doivent être effectuées de cette manière.

Il peut toutefois exister des situations plus complexes ou l'utilisation de substances présentant un profil toxicologique plus critique, pour lesquelles une évaluation quantitative plus détaillée peut s'avérer nécessaire.

Une approche rentable pour estimer l'exposition consiste à utiliser des outils de modélisation de l'exposition tels que [ECETOC TRA](#) , [Stoffenmanager](#) et [Advanced REACH Tool \(ART\)](#) . Ces outils fournissent une estimation prudente de l'exposition dans le pire des cas, basée sur des paramètres spécifiques au scénario et à la substance. Cette estimation peut être comparée aux valeurs de référence toxicologiques figurant dans le tableau récapitulatif des substances utilisées (par exemple , les VLEP et les DNEL). Par exemple, si une matière première en poudre non volatile, classée comme cancérigène de classe 2, est introduite dans une trémie, ART peut être alimenté avec des informations sur la granulométrie de la poudre, la hauteur de chute et d'autres mesures de gestion des risques afin d'estimer l'exposition. Si cette estimation est inférieure à la valeur de référence, l'utilisation peut être considérée comme sûre.

Ces modèles sont cependant très conservateurs, car ils tendent à surestimer considérablement l'exposition. Une autre approche consiste à effectuer des mesures d'exposition sur le lieu de travail afin de générer des données pour l'évaluation des risques. Plusieurs méthodes sont expliquées dans la section D2. Ces méthodes tendent à fournir l'estimation la plus fiable de l'exposition, car elles prennent en compte tous les paramètres des lieux de travail existants. Toutefois, elles sont souvent gourmandes en ressources et devraient être réservées aux substances (par exemple, les diisocyanates) et aux procédés les plus critiques.

D1.3 Substances utilisées non intentionnellement

La production de mousse de polyuréthane flexible est un processus chimique complexe impliquant l'interaction de nombreuses matières premières entre elles et avec l'environnement. Il convient de noter que ce type de processus peut entraîner la formation de nouvelles substances, non présentes dans la formulation initiale.

Amines aromatiques

Lors du processus de production, de l'eau est ajoutée à la formulation afin qu'elle réagisse avec les groupes isocyanates pour former un groupe amine et du CO₂. Ce CO₂ est le principal agent gonflant et confère sa structure à la mousse. Les groupes amine réagissent ensuite avec les groupes isocyanates pour former une liaison urée. L'affinité des groupes isocyanates pour les groupes amine est nettement supérieure à celle des isocyanates pour les groupes hydroxyle du polyol. Par conséquent, la concentration de groupes amine résiduels est faible. Cependant, les diisocyanates totalement hydrolysés, des diamines aromatiques, peuvent persister dans une certaine mesure dans la mousse flexible ; notamment dans la surface des mousses moulées, leur concentration peut atteindre des niveaux de l'ordre du ppm dans les mousses fraîchement produites. Ces concentrations diminuent avec le temps, d'abord assez rapidement, mais peuvent mettre plusieurs semaines à devenir indétectables.



Les mousses à base de diisocyanate de toluène (TDI) contiennent de la toluènediamine (TDA) et celles à base de diisocyanate de méthylènediphényle (MDI) contiennent de la méthylènediphényldiamine (MDA). L'isomère 2,4-TDA est un cancérogène avéré (contrairement au 2,6-TDA). Des études de cancérogénicité chronique ont été menées sur le 4,4'-MDA, démontrant sa cancérogénicité (voir Tableau 5). Aucune étude de ce type n'a été réalisée pour les autres isomères, mais des tests *in vitro* suggèrent qu'ils pourraient être moins dangereux. Par ailleurs, ces amines sont connues pour être sensibilisantes pour la peau. De ce fait, les isocyanates aromatiques et les amines aromatiques présentent des exigences de manipulation similaires.

Tableau 5 Classification des dangers des isomères du TDA et du 4,4'-MDA

	2,4-TDA	2,6-TDA	4,4'-MDA
Nom	4-méthyl-m-phénylènediamine	2-méthyl-m-phénylènediamine	4,4'-méthylènedianiline
Cas	95-80-7	823-40-5	101-77-9
CE	202-453-1	212-513-9	202-974-4
Indice CLP	612-099-00-3	612-111-00-7	612-051-00-1
Classification harmonisée	Carc . 1B Muta. 2 Rép . 2 Toxicité aiguë . 3 Toxicité aiguë . 4 STOT RE 2 Sensibilité cutanée 1 Chronique aquatique 2	Muta. 2 Toxicité aiguë . 4 * Toxicité aiguë . 4 * Sensibilité cutanée 1 Chronique aquatique 2	Carc . 1B Toxicité aiguë . 3 Muta. 2 Sensibilité cutanée 1 STOT SE 1 STOT RE 2 Aiguë aquatique 1 Chronique aquatique 2
Pression de vapeur à température ambiante	0,017 Pa	0,029 Pa	0,00025 Pa

La pression de vapeur de ces amines est généralement plus de dix fois inférieure à celle des diisocyanates correspondants. Lors des deux campagnes de mesures, portant sur la mousse en blocs et la mousse moulée, le TDA et le MDA ont été inclus dans l'analyse des échantillons. Aucune concentration de TDA ou de MDA dans l'air n'a été détectée lors de la production de mousse en blocs. Lors de la production de mousse moulée, seul le 2,6-TDA a été détecté lors d'une unique mesure de l'air effectuée pendant une opération de démoulage dans l'une des usines, à une concentration de 1,63 µg /m³. De manière générale, l'exposition par inhalation aux diamines aromatiques est moins préoccupante lors de la production de mousse flexible en blocs et de mousse moulée.

L'exposition cutanée est particulièrement préoccupante lors de la production de mousse moulée, car la concentration initiale d'amines aromatiques est plus élevée au contact de la peau. Des recommandations spécifiques concernant la protection cutanée lors de la manipulation de mousse de polyuréthane flexible moulée sont disponibles dans la section D3.2.



Formaldéhyde

Le formaldéhyde est une substance qui peut être émise par la mousse de polyuréthane flexible, mais qui n'est pas utilisée intentionnellement. On pense qu'il est présent comme impureté dans certaines matières premières (par exemple, certains catalyseurs aminés) ou qu'il est généré par photodégradation ou oxydation partielle du squelette polymère. Parmi les réactions connues générant du formaldéhyde, on peut citer la dégradation des catalyseurs aminés (à ne pas confondre avec les amines aromatiques) contenant des groupes méthylamino et la photodégradation des polyols (et, de manière générale, de toute matière organique).

Le formaldéhyde est généralement détecté lors des analyses de COV effectuées dans le cadre des certifications de mousses flexibles, comme CertiPUR, à des niveaux ne présentant pas de risque pour l'exposition des consommateurs. Cependant, la production de mousses flexibles se déroule généralement à des températures plus élevées et la quantité de formaldéhyde susceptible de se dégrader est plus importante, la mousse étant fraîchement produite. Par conséquent, des mesures de gestion des risques, telles qu'une ventilation par extraction performante, doivent être mises en place. À l'heure actuelle, les connaissances relatives à ce type d'exposition sont moins approfondies qu'en ce qui concerne les diisocyanates et les diamines aromatiques. Si l'évaluation des risques sur le lieu de travail révèle une exposition au formaldéhyde, une série de mesures ciblées pourrait être réalisée pendant la production et/ou le stockage de la mousse.

D2 Surveillance de l'exposition

La surveillance de l'exposition est un aspect essentiel de l'hygiène industrielle, notamment pour les substances dangereuses dont l'innocuité ne peut être démontrée par une évaluation des risques standard ou par une modélisation de l'exposition (voir section D1.2); elle doit être réservée aux substances critiques dans les procédés critiques. Les diisocyanates sont les plus importants pour l'industrie des mousses flexibles, car ce sont des substances présentant les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) les plus basses. La méthode la plus courante de mesure de l'exposition professionnelle est une campagne d'échantillonnage. Pour certaines substances, notamment les diisocyanates, des instruments à lecture directe ont été mis au point, permettant une détermination (quasi) en temps réel des concentrations dans l'air. Ces deux méthodes sont expliquées ci-dessous, ainsi que les bonnes pratiques relatives à leur utilisation. La biosurveillance et les dosimètres constituent également des méthodes d'évaluation de l'exposition aux diisocyanates.

D2.1 Campagnes d'échantillonnage de l'air

Lors des campagnes de prélèvement d'air, l'air est pompé sur une cartouche conçue pour retenir une substance spécifique. En mesurant la quantité de cette substance sur la cartouche et en connaissant le volume d'air ayant transité pendant une période définie, il est possible de calculer la concentration de la substance dans l'air durant cette période. Compte tenu des efforts que cela implique, ces mesures sont généralement effectuées peu fréquemment (par exemple , une fois par an ou tous les deux ans).

Contexte juridique local

chargé de ces mesures dépendra fortement du contexte national. Dans certains pays, les autorités se rendent sur place et effectuent les mesures afin de vérifier la conformité aux valeurs limites nationales



(par exemple, en Pologne). Dans d'autres pays, il est possible de contacter des organismes ou instituts indépendants (par exemple, les Berufsgenossenschaften en Allemagne) pour la réalisation de ces mesures. Dans d'autres pays encore, l'entreprise est simplement tenue de fournir la preuve que le risque d'exposition professionnelle est maîtrisé, ce qui peut être démontré de manière optimale par des mesures (par exemple, aux Pays-Bas et en Italie).

De même, l'interprétation des résultats de ces campagnes de prélèvement d'air peut fortement dépendre des pratiques nationales. Dans certains pays, il est possible qu'une fois les mesures indiquant des concentrations atmosphériques inférieures à la VLEP, aucune autre mesure ne soit nécessaire.

Cependant, une campagne de prélèvement d'air ne constitue qu'une mesure ponctuelle et ne permet pas de saisir la variabilité de l'exposition professionnelle au cours de l'année. C'est pourquoi, dans certains pays, il est d'usage de classer le niveau mesuré par rapport à la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) selon l'échelle suivante : < 10 % de la VLEP (vert), < 50 % de la VLEP (jaune), < 100 % de la VLEP (orange) et > 100 % de la VLEP (rouge)¹⁹. Cette classification détermine si des mesures correctives (immédiates) sont nécessaires, telles que le renforcement des mesures de gestion des risques, et/ou la date de la prochaine campagne de prélèvement.

La norme EN 482, largement appliquée et recommandée par le présent guide,²⁰ spécifie les exigences de performance de base des méthodes de mesure. Plus précisément, elle stipule que la méthode choisie doit présenter une limite de quantification (LoQ) au moins 10 fois inférieure à la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) à long terme et au moins 2 fois inférieure à la limite d'exposition à court terme (LECT).

Dans certains pays (Pays-Bas et Belgique, par exemple), une méthodologie plus scientifique est exigée : l'évaluation de la conformité définie dans la norme EN 689.²¹ Cette méthode consiste à regrouper les travailleurs selon des niveaux d'exposition similaires, pour lesquels les concentrations mesurées dans l'air doivent suivre une distribution normale, et à réaliser une analyse statistique détaillée. Un test est ensuite effectué pour vérifier si l'exposition mesurée se situe entre 10 et 20 % de la VLEP, en fonction du nombre de mesures. Dans le cas contraire, un test statistique est réalisé afin de déterminer si la conformité à la VLEP peut être établie avec un certain degré de certitude. Bien que cette méthode d'évaluation puisse être considérée comme plus scientifique, elle ne s'applique pas lorsqu'il est impossible de regrouper les travailleurs selon des niveaux d'exposition similaires **et suivant une distribution normale**. **Ce point est pertinent pour la production de mousse en blocs. Le rapport EUROPUR sur les mesures effectuées dans quatre usines néerlandaises de production de mousse en blocs** [8] apporte un éclairage plus approfondi sur ce sujet ADDIN EN.CITE <EndNote><Cite><Author>De Kort</Author><Year>2021</Year><IDText>Air Sampling of Diisocyanates

¹⁹ Les seuils exacts peuvent être différents et la méthode de catégorisation peut être différente (par exemple A, B, C, F au lieu de vert, jaune, orange, rouge).

²⁰ EN 482:2021 Exposition en milieu de travail - Procédures de détermination de la concentration des agents chimiques - Exigences de performance de base

²¹ EN 689:2018 Exposition en milieu professionnel - Mesure de l'exposition par inhalation à des agents chimiques - Stratégie de contrôle de la conformité aux valeurs limites d'exposition professionnelle



and Aromatic Amines at Four Flexible Polyurethane Foam Plants in the Netherlands: Diisocyanates Analysis Report</IDText><DisplayText>[8]</DisplayText><record><titles><title>Air Sampling of Diisocyanates and Aromatic Amines at Four Flexible Polyurethane Foam Plants in the Netherlands: Diisocyanates Analysis Report</title></titles><contributors><authors><author>De Kort, Patrick</author></authors></contributors><added-date format="utc">1660199267</added-date><ref-type name="Report">27</ref-type><dates><year>2021</year></dates><rec-number>406</rec-number><publisher>EUROPUR</publisher><last-updated-date format="utc">1660199315</last-updated-date></record></Cite></EndNote>. Pour la mesure de la production de mousse moulée, des campagnes conformes à la norme EN 689 seraient probablement plus réalisables, mais elles nécessitent davantage de mesures et sont donc nettement plus coûteuses. Même si les campagnes de mesure ne sont pas entièrement conformes à la norme EN 689, cette dernière offre un bon aperçu de la théorie sous-jacente aux campagnes d'échantillonnage de l'air et devrait être connue des responsables HSE.

Comment réaliser des campagnes d'échantillonnage de l'air

Pour réaliser une campagne d'échantillonnage de l'air, il convient de faire appel à un consultant en hygiène industrielle possédant l'expérience et les compétences requises. Ce dernier se déplacera sur le site, généralement moyennant des honoraires. En concertation avec la direction locale, il élaborera une stratégie d'échantillonnage, effectuera les prélèvements d'air sur cassettes/tubes et les enverra pour analyse. L'hygiéniste industriel rédigera ensuite un rapport expliquant si l'exposition est correctement maîtrisée et pourra formuler des recommandations, le cas échéant.

Selon le contexte juridique local et parfois même les relations avec l'inspection du travail locale, les mesures effectuées par le personnel de l'usine lui-même, sans intervention extérieure, peuvent être acceptées comme preuve de conformité. Cependant, les autorités et les représentants des travailleurs privilégient généralement un rapport établi par un organisme externe.

mesures à court terme

Pour certaines substances, l'exposition maximale est également préoccupante. C'est notamment le cas des diisocyanates, et c'est pourquoi des limites d'exposition à court terme (LECT) sont généralement établies. Les activités/phases du procédé présentant le potentiel d'exposition le plus élevé doivent être identifiées en collaboration avec l'hygiéniste industriel afin d'être intégrées au plan d'échantillonnage. Cependant, la vérification de la conformité à ces valeurs LECT par des techniques d'échantillonnage de l'air représente un défi tant sur le plan analytique que pratique.

D'un point de vue pratique, il est beaucoup plus difficile de garantir la capture du moment d'exposition maximal. Pour minimiser ces difficultés, il est utile de choisir un hygiéniste industriel ayant une certaine expérience des procédés spécifiques de fabrication de mousses flexibles et d'examiner les procédés ensemble ou d'avoir des discussions préalables approfondies avant le jour de la campagne de mesures.

Du point de vue analytique, le laboratoire effectuant l'analyse définit généralement une limite de quantification (LoQ) par échantillon. La LoQ dans l'air est calculée en divisant par le volume total d'air ayant traversé le tube/la cassette d'échantillonnage. Le débit étant généralement fixe pour la méthode, une durée d'échantillonnage plus courte entraîne une forte réduction de la LoQ. Cette réduction est



partiellement compensée par une exigence de LoQ plus faible, seulement deux fois inférieure à la VLE (Valeur Limite d'Exposition) contre dix fois inférieure à la VME (Valeur Moyenne des Moyennes) sur 8 heures, comme spécifié dans la norme EN 482 (facteur 5). Cette compensation reste toutefois partielle, car le volume d'air pouvant traverser le dispositif d'échantillonnage lors de mesures de longue durée (par exemple, de 4 à 8 heures) est encore 16 à 24 fois supérieur à celui pouvant être échantillonné sur une courte période de 15 minutes.

De telles mesures exigent donc des méthodes d'analyse beaucoup plus sensibles que les mesures à long terme. Ces méthodes peuvent ne pas être disponibles partout et/ou être (relativement) plus coûteuses.

Les activités opérationnelles normales suivantes peuvent entraîner des pics d'exposition à court terme et devraient idéalement être mesurées lorsque cela est possible :

- Dans la production de mousse en blocs :
 - Les opérations impliquant la tête de mélange, telles que la récupération de la première fraction de matériau dans un sac en plastique, opération requise sur certaines lignes de production de mousse en blocs, ou le nettoyage de la tête de mélange qui est normalement effectué en fin de journée.
 - Ouverture des fenêtres pour effectuer des manipulations manuelles dans le tunnel.
 - Opérations autour des zones d'enroulement du papier (par exemple, remplacement des rouleaux).
 - Opérations à l'intérieur des enceintes.
 - Opérations dans la zone de séchage, y compris la zone de découpe.
- Dans la production de mousse moulée :
 - Tirs au seau/sac (par exemple pour effectuer des tests de montée)
 - Prises de vue d'étalonnage TDI

Compte tenu de ces difficultés pratiques et analytiques, il est pertinent d'envisager l'utilisation d'instruments de lecture directe (DRI) pour appuyer la vérification de la conformité aux limites limites d'exposition professionnelle (LLEP) (voir D2.2). Bien que ces instruments aient tendance à être moins précis que les campagnes d'échantillonnage, ils excellent par leur résolution temporelle et leur faible coût marginal par mesure (c'est-à-dire qu'ils fournissent une lecture toutes les quelques secondes à un coût quasi nul). Si, notamment pour les diisocyanates, une campagne d'échantillonnage de l'air devrait inclure au moins quelques mesures de VLE pour les opérations à forte exposition, une entreprise qui effectue régulièrement des mesures rigoureuses avec un DRI et tient des registres précis devrait pouvoir s'en servir pour démontrer sa conformité aux valeurs de VLE.

D2.2 instruments de lecture directe

Les instruments à lecture directe (DRI) mesurent les concentrations de substances dans l'air en temps quasi réel et fournissent une lecture directe. Cette technologie n'est pas encore disponible pour un grand nombre de substances sous forme de méthodes d'échantillonnage ; toutefois, elle a été développée pour le TDI et le MDI et son utilisation est fortement recommandée.



La technologie la plus courante utilise une cassette ou un rouleau de papier contenant un ruban qui change de couleur au contact des diisocyanates présents dans l'air. En faisant circuler un flux d'air constant sur le papier et en contrôlant son mouvement, la concentration de diisocyanates est déterminée par spectrophotométrie. D'autres technologies, basées sur l'infrarouge ou la mobilité ionique, sont en cours de développement et pourraient permettre de détecter simultanément plusieurs substances et de mesurer un plus large éventail de composés.

Ces dispositifs ont un rôle à jouer dans la détection des fuites, principalement dans les parcs de stockage où ils doivent être raccordés à un système de signalisation à l'entrée (ou aux entrées) du parc et à un système d'alerte. De plus, ces dispositifs peuvent être utilisés au niveau ou à proximité de la tête de mélange pour détecter les erreurs de dosage, c'est-à-dire les incidents où un mélange incomplet (par exemple sans polyol) est dispersé, entraînant des concentrations élevées dans l'air susceptibles d'avoir des conséquences sanitaires immédiates⁴.

Cependant, ces dispositifs peuvent également s'avérer extrêmement précieux dans le domaine de l'hygiène industrielle, car ils permettent d'obtenir une vision temporelle précise de l'exposition, difficilement accessible par des campagnes d'échantillonnage, aussi bien pour les durées d'exposition courtes que longues. Les opérateurs peuvent ainsi réagir rapidement en cas de pics inhabituels et bénéficier d'un retour d'information immédiat une fois le problème résolu. Vous trouverez ci-dessous quelques bonnes pratiques et exemples pour les industries des mousses en blocs et des mousses moulées.

La limite de détection de ces appareils varie entre 0,5 et 1 ppb pour les diisocyanates. Cependant, il convient d'interpréter ces résultats avec prudence, car à proximité de la limite de détection, la précision diminue et peut être influencée par des facteurs tels que les NO_x, l'humidité et la poussière, dont l'influence devient plus marquée. L'entretien doit être effectué conformément aux instructions du fabricant.

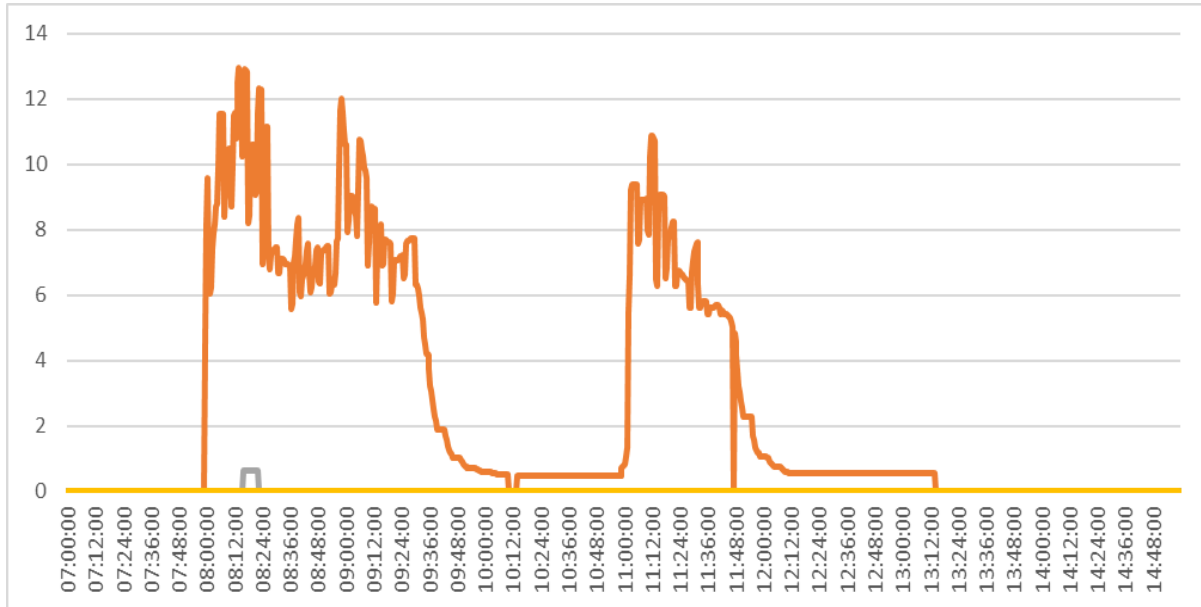
Production de mousse en blocs

À minima, un appareil mobile de mesure de l'exposition aux polluants atmosphériques (DRI) devrait être utilisé pour cartographier spatialement l'exposition lors des cycles de production normaux. Ceci devrait permettre de comprendre clairement les concentrations de polluants dans l'air dans les différentes zones de l'atelier de production.

Il est recommandé de placer des indicateurs statiques de rayonnement (DRI) à quelques endroits stratégiques de l'atelier de production, là où l'exposition est probable. Par exemple : un près de la tête de mélange, un près du panneau de commande à hauteur de respiration, un près de l'enrouleur de papier et de la scie de découpe (si celle-ci n'est pas correctement encapsulée), et un dans la zone de séchage. Idéalement, ces indicateurs devraient être positionnés entre le poste de travail habituel des opérateurs et le processus de production. Ces indicateurs statiques de rayonnement devraient être reliés à un système d'acquisition de données afin d'obtenir un suivi temporel du processus de production.



Un exemple de ce type de relevé est présenté à La figure 10 représente Dans ce cas précis, l'usine a constaté qu'après l'arrêt de la production, la concentration de diisocyanates dans l'air ne s'annule que bien après l'arrêt de la production dans une grande zone confinée où se trouvaient la scie et l'enrouleur de papier. Cette observation a conduit à l'instauration d'une règle imposant le port systématique d'un équipement de protection respiratoire (EPR) lors de l'entrée dans la zone confinée, même en l'absence de mousse isolante. Par ailleurs, la mesure effectuée à l'extérieur de l'enceinte permet de détecter d'éventuelles fuites provenant de la zone confinée, fuites qui se sont produites brièvement pendant la production lorsqu'une porte est restée ouverte.



La figure 10 représente la concentration de TDI (en ppb) mesurée par un DRI statique lors de deux cycles de production de feuilles de papier. La ligne jaune indique la plateforme de mélange. La ligne orange représente la concentration à l'intérieur d'une grande zone encadrée contenant la scie à découper et l'enrouleuse de papier. La ligne grise correspond à un point de mesure situé à l'extérieur de cette zone, près d'une porte y donnant accès.

Un autre fabricant de mousse en blocs a également constaté que toutes les mousses ne présentent pas le même potentiel d'exposition. La mousse éther standard à base de TDI, de faible densité, présente un potentiel d'exposition plus élevé que la mousse HR haute densité à base de MDI. Ce fabricant produisait des blocs courts sur sa ligne de production et les transportait par un long convoyeur jusqu'à une station de basculement. Là, les blocs étaient redressés puis déplacés par chariots élévateurs vers une salle de polymérisation. Deux opérateurs travaillaient à proximité immédiate de la mousse à la station de basculement. L'utilisation de l'indice DRI a permis à l'entreprise de déterminer pour quelles qualités de mousse le port d'un équipement de protection respiratoire (EPR) était requis.

Dans l'atelier de production de mousse, le port d'un équipement de protection respiratoire (EPR) en cas de hausse inattendue de la concentration de polluants doit être signalé par un système d'alerte visuel et/ou sonore. Par exemple, si un certain seuil est dépassé sur un indicateur statique de concentration (DRI) situé sur le panneau de commande d'une ligne de production de mousse, un voyant jaune peut indiquer la nécessité de porter un EPR. Ce seuil peut être fixé à la valeur limite d'exposition



professionnelle (VLEP) applicable localement. Le choix des **valeurs seuils** peut s'appuyer sur les VLEP locales et/ou sur les données historiques des opérations normales. Voir Exemple 6.

Exemple 6de tableau de réaction avec valeurs seuils à utiliser pour les systèmes d'alarme en combinaison avec la technologie DRI dans la production de mousse en blocs.

Niveau	Couleur	Son	Déclencheur possible	Conséquence possible
1	Vert	-	Concentration inférieure à la moyenne pondérée dans le temps sur 8 heures (TWA) pour le TDI ou le MDI (ou une autre concentration choisie en fonction des données historiques de fonctionnement normal).	
2	Orange	Petit signal sonore qui peut être désactivé après l'installation de l'EPR.	Concentration entre la VME et le niveau d'exposition à court terme de 15 minutes (STEL) ou la valeur plafond (ou une autre concentration choisie en fonction des données historiques).	Toute personne présente dans la zone doit porter un appareil de protection respiratoire.
3	Rouge	Signal sonore plus fort	Concentration supérieure au niveau d'exposition à court terme de 15 minutes (STEL) ou à la valeur plafond (ou à une autre concentration choisie en fonction des données historiques).	Arrêtez immédiatement le mousage (c'est-à-dire dans les 5 minutes) et évacuez la salle où le mousage a lieu.

Il convient de noter qu'à des niveaux très faibles, proches de la limite de détection de l'indicateur de résistance à l'oxygène (DRI), la précision de l'appareil diminue. L'utilisation du DRI seul est insuffisante pour vérifier la conformité aux valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) lorsque ces valeurs sont proches de la limite de détection du DRI. Cependant, une augmentation du DRI dans cette plage peut permettre de déterminer si un événement inhabituel se produit.

Une autre bonne pratique consiste à utiliser l'indicateur de concentration de particules (ICP) pour générer des données à des fins de formation. Prenons l'exemple d'une usine où une station d'enroulement de papier était fermée. Lors d'une production, un opérateur devait s'équiper d'un appareil de protection respiratoire (APR) et changer le rouleau d'enroulement une ou deux fois, une opération d'environ 5 minutes. Après cette opération, les opérateurs ne prenaient pas toujours soin de refermer le système de fermeture. Le responsable HSE a donc placé un ICP mobile devant la station, fermeture fermée, et a pris une photo montrant une concentration de 0 ppb, puis une autre, fermeture partiellement ouverte, montrant une concentration de 4 ppb. Ces résultats ont été présentés lors d'une



courte formation aux opérateurs, qui ont ainsi compris l'importance de bien refermer les systèmes de fermeture.

Un exemple plus grave concerne la pratique des ouvriers expérimentés du secteur qui ouvrent les fenêtres du tunnel, prennent une grande inspiration et effectuent quelques travaux manuels la tête à l'intérieur, puis la retirent pour reprendre leur respiration. Un fabricant de mousse en blocs a un jour utilisé un analyseur de gaz de combustion mobile dans le tunnel et a constaté que l'appareil indiquait une concentration de 200 ppb ²². La présentation de telles données à l'opérateur pourrait l'inciter à réfléchir à deux fois avant d'entreprendre une activité aussi risquée.

Production de mousse moulée

Le choix d'un système de mise en place statique de DRI doit reposer sur une évaluation des risques liés aux concentrations attendues en conditions normales d'exploitation et à la probabilité d'incidents de sécurité des procédés. Ces deux paramètres sont influencés par la pression de vapeur du diisocyanate ; par conséquent, la priorité doit être accordée aux lignes de production en mousse moulée utilisant du TDI, pour lesquelles la technologie de mise en place statique de DRI est indispensable.

Un détecteur statique de défauts (DRI) peut être installé entre le point de coulée et l'opérateur le plus proche (dans la mesure du possible) et/ou au point d'ouverture du moule. Le premier permettra de détecter les problèmes de confinement dans la cabine de coulée, tandis que le second assurera la détection précoce des erreurs de coulée ²³. La zone du concasseur pourrait également être un emplacement approprié pour un tel dispositif.

Il est recommandé que cet indicateur de concentration (DRI) fonctionne en continu ou, à défaut, qu'il s'active automatiquement dès la mise en service de la ligne et qu'il puisse enregistrer les concentrations sur une période donnée. Les appareils de mesure doivent être installés entre 1,2 et 1,5 m de hauteur. Cet indicateur statique doit être relié à un système d'alarme comportant des signaux visuels et/ou sonores déclenchant des mesures organisationnelles. Un exemple de ce type de système est présenté dans Exemple 7.

²² Dans ce cas, 200 ppb était la valeur maximale que l'appareil pouvait afficher, ce qui signifie que la concentration était probablement >200 ppb.

²³ Un incident lié à la sécurité des procédés survient lorsqu'un mélange réactionnel mal dosé est versé dans le moule. Dans le pire des cas, des diisocyanates purs sont versés dans le moule encore chaud.



Exemple 7 de tableau de réaction avec valeurs seuils à utiliser pour les systèmes d'alarme en combinaison avec la technologie DRI dans la production de mousse moulée.

Niveau	Couleur	Son	Déclencheur possible	Conséquence possible
1	Vert	-	Concentration inférieure à la moyenne pondérée dans le temps sur 8 heures (TWA) pour le TDI (ou une autre concentration choisie en fonction des données historiques de fonctionnement normal).	
2	Orange	Petit signal sonore qui peut être désactivé après l'installation de l'EPR.	Concentration entre la VME et le niveau d'exposition à court terme de 15 minutes (STEL) ou la valeur plafond (ou une autre concentration choisie en fonction des données historiques).	L'évaluation par les pairs (EPP) devrait être utilisée pour examiner et résoudre la situation.
3	Rouge	Signal sonore plus fort	Concentration supérieure au niveau d'exposition à court terme de 15 minutes (STEL) ou à la valeur plafond (ou à une autre concentration choisie en fonction des données historiques).	Arrêtez immédiatement le versement du mélange réactionnel (c'est-à-dire dans les 5 minutes) et évacuez la zone de production concernée.

Le DRI mobile est moins utile dans la production de mousse moulée, mais on peut l'utiliser pour vérifier périodiquement le confinement des zones fermées telles que la cabine de coulée, le concasseur et l'efficacité de la ventilation du carrousel ; en particulier lors de l'utilisation de TDI.

D2.3 Biosurveillance

La biosurveillance urinaire a été mise au point pour contrôler l'exposition aux diisocyanates. Ces méthodes mesurent les produits d'hydrolyse chimique des métabolites des diisocyanates dans l'urine, quantifiés sous forme de divers isomères de MDA et de TDA. La détection de l'un de ces isomères dans l'urine (par exemple , le 2,4-TDA et le 2,6-TDA) ne permet pas de déterminer si ces substances sont présentes suite à une exposition au 2,4-TDI et au 2,6-TDI, au 2,4-TDA et au 2,6-TDA, ou à une combinaison de diisocyanates et de diamines. Il est également impossible de différencier si l'exposition se fait par inhalation ou par absorption cutanée. Ceci est particulièrement pertinent pour les employés susceptibles d'avoir un contact cutané avec la mousse moulée, où les concentrations de diisocyanates dans l'air peuvent être faibles, tandis que la concentration de diamines sur la peau manipulant la mousse peut être relativement élevée.

Bien qu'il faille en tenir compte lors de l'évaluation des résultats, la biosurveillance urinaire peut constituer une méthode complémentaire non invasive de suivi de l'exposition. Elle permet d'identifier



les comportements individuels, qu'ils soient appropriés ou non. Par exemple, si plusieurs personnes occupent un poste similaire, mais qu'une seule présente un taux de TDA urinaire élevé, une enquête plus approfondie peut révéler que cette personne ne changeait pas assez souvent de gants, considérant cela comme un gaspillage, ou qu'elle les rangeait dans ses poches pour les réutiliser, entraînant ainsi un contact direct de la peau avec l'extérieur des gants.

La concentration d'amines dans l'urine après hydrolyse peut être quantifiée en $\mu\text{g/L}$ d'urine ou en $\mu\text{mol/mol}$ de créatinine ²⁴. Bien que cette méthode puisse être reproduite par d'autres laboratoires, le HSE Science and Research Centre, un organisme semi-gouvernemental britannique, propose ce service d'analyse. Ce service peut être étendu au-delà des frontières du Royaume-Uni. D'autres services publics et privés peuvent également le proposer.

Le Royaume-Uni applique une valeur guide de surveillance biologique (VGSB) de 1 μmol de diamine dérivée d'isocyanate par mole de créatinine. Les recommandations britanniques relatives à la surveillance biologique [11] précisent que cette VGSB n'est pas juridiquement contraignante et que son dépassement n'implique pas nécessairement un dépassement des concentrations atmosphériques ni l'apparition de problèmes de santé. De même, le respect de cette valeur ne signifie pas qu'aucune réduction supplémentaire de l'exposition aux polluants atmosphériques n'est nécessaire, car elle ne remplace pas les valeurs de surveillance de la qualité de l'air.

Les autres valeurs limites indicatives comprennent :

- L'indice d'exposition biologique (IEB) établi par l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) pour la dose journalière admissible (DJA) est de 5 μg de TDA/g de créatinine (\approx 5 $\mu\text{mol/mol}$ de créatinine). Selon l'ACGIH, cet indice repose sur une corrélation entre l'exposition au TDI dans l'air et les concentrations urinaires de TDA ; la valeur de 5 μmol de TDA/mol de créatinine devrait correspondre à un niveau de DJA dans l'air de 1 ppb.
- L'Allemagne a établi une valeur BAT (« Biologischer Arbeitsstoff - Toleranz -Wert » : valeur de tolérance biologique pour les expositions professionnelles) pour MDI de 10 μg 4,4'-MDA/L d'urine, basée sur une limite aéroportée de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (\approx 4,9 ppb).

À l'heure actuelle, et à notre connaissance, aucune valeur limite biologique n'est juridiquement contraignante. Cependant, les usines qui pratiquent la surveillance biologique auront une meilleure compréhension des profils d'exposition des travailleurs ²⁵ que celles qui ne la pratiquent pas. La mise en œuvre d'une biosurveillance et la tenue de registres détaillés pourraient s'avérer utiles lors des échanges avec les autorités réglementaires.

²⁴ La créatinine est un produit de dégradation musculaire et son élimination du corps humain vers l'urine est relativement stable. Ce flux étant plus stable que celui de l'eau, elle est fréquemment utilisée comme dénominateur dans les analyses urinaires.

²⁵ Les données de biosurveillance peuvent constituer des informations confidentielles entre le service médical et le travailleur concerné et ne peuvent être traitées par l'usine de mousse que de manière anonyme ; veuillez consulter la législation locale.



Avant de participer à une biosurveillance, il est important de consulter la législation locale relative à la biosurveillance, à la protection de la vie privée et aux données personnelles. Dans certains pays, l'autorisation des comités d'entreprise peut être requise pour la biosurveillance urinaire. Dans d'autres pays, comme le Royaume-Uni, de tels organismes n'existent pas, mais la réglementation stipule qu'en aucun cas les travailleurs ne peuvent être contraints de fournir des échantillons d'urine pour ces campagnes ; la participation doit être volontaire. Dans la plupart des pays, les travailleurs doivent être informés précisément du traitement qui sera effectué avec l'urine fournie et des analyses qui seront réalisées. Ils peuvent refuser de participer. Les informations recueillies peuvent être considérées comme personnelles et des règles peuvent encadrer la communication des résultats aux travailleurs.

Lors de la campagne de biosurveillance, il est important de recueillir les urines en fin de semaine de travail (ou sur une période équivalente de plusieurs jours consécutifs), à la fin du poste. Ceci permet de s'assurer que les résultats correspondent au scénario le plus défavorable en cas d'accumulation de métabolites durant la semaine de travail.

Enfin, il est possible d'utiliser la biosurveillance urinaire après un incident lié à la sécurité des procédés pour déterminer le degré de surexposition survenu, en prélevant un échantillon d'urine quelques heures après l'incident.

D2.4 Dosimètres

Les dosimètres sont des badges que les travailleurs peuvent porter sur leurs vêtements et qui se décolorent au contact des vapeurs d'une substance particulière. Le degré de décoloration permet de calculer une mesure d'exposition sous la forme concentration dans l'air x temps (par exemple, ppm*heures). En divisant cette valeur par la durée d'exposition, on obtient une estimation approximative de la concentration moyenne dans l'air à laquelle le travailleur était exposé. Cette méthode ne permet pas d'évaluer l'exposition maximale et ne fournit qu'une estimation relativement grossière. Des badges spécifiques aux diisocyanates ont été mis au point. À l'heure actuelle, leur efficacité et leur fiabilité restent incertaines.

D3 Équipement de protection individuelle

D3.1 Équipement de protection respiratoire

Il existe d'excellentes directives générales disponibles en anglais auprès du [UK HSE](#) et des directives encore plus élaborées en allemand [DGUV Regel 112-190 Benutzung von Atemschutzgeräten](#). [12, 13]. Les spécificités du RPE utilisé dans la production de mousse PU flexible sont discutées ci-dessous.

Types de masques

Il existe différents types de masques, chacun présentant des avantages et des inconvénients en termes de niveau de protection, de confort et de coût. Les principaux types de masques seront présentés ci-dessous.

Les appareils respiratoires non motorisés fonctionnent grâce à la respiration de l'utilisateur pour faire passer l'air à travers un filtre. Il en existe deux types : les demi-masques (voir (figure) 8) et les masques complets (voir Figure : 9. Correctement utilisés , les demi-masques offrent un niveau de protection



adapté à certaines situations. Cependant, leur ajustement n'est pas obligatoire pour toutes les morphologies faciales (par exemple, selon la norme EN 140, le masque doit convenir à seulement 8 sujets sur 10). Il est donc impératif de réaliser des tests d'ajustement conformément aux instructions du fabricant. Les masques complets offrent généralement une meilleure étanchéité, ce qui réduit les risques de fuite et limite les risques d'erreur d'ajustement.

Les deux types de respirateurs non motorisés filtrent l'air insufflé à l'utilisateur, ce qui crée une résistance respiratoire supplémentaire. Si cela peut convenir pour des interventions de courte durée à faible intensité, l'inconfort devient disproportionné lors d'un port prolongé ou d'une activité physique plus soutenue. L'utilisateur peut alors retirer son masque en raison de cette gêne.



(figure) 8. À gauche, avec filtres à particules ; à droite, avec filtres à gaz. Source : HSE (Royaume-Uni) [12]



Figure : 9 Masques faciaux complets. À gauche, avec filtres à particules ; à droite, avec filtres à gaz. Source : HSE (Royaume-Uni) [12]

Les appareils respiratoires à ventilation assistée utilisent un moteur pour faire passer l'air à travers un filtre avant de l'acheminer vers un masque ou une cagoule (avec ou sans casque). Des exemples



sont visibles sur (figure) 10 Ces appareils sont plus coûteux que les appareils respiratoires non motorisés. Cependant, ils ne nécessitent pas d'effort de l'utilisateur pour aspirer l'air à travers les filtres et sont donc beaucoup moins contraignants à porter. Les appareils respiratoires à ventilation assistée avec cagoule (avec ou sans casque) offrent le plus grand confort, car aucun masque serré n'exerce de pression sur le visage et de l'air frais et propre est insufflé ²⁶. Ces caractéristiques permettent un port prolongé.



(figure) 10. À gauche : masque intégral ; à droite : cagoule/casque. Source : HSE [12]

Il existe également **des appareils respiratoires à adduction d'air** qui nécessitent une infrastructure de production pour acheminer l'air des zones non contaminées jusqu'aux masques. On peut en voir des exemples à Figure : 11 De même, contrairement aux appareils respiratoires à ventilation assistée, les utilisateurs n'ont pas à aspirer l'air à travers des filtres, ce qui réduit considérablement la gêne occasionnée. Le confort des systèmes à cagoule est également supérieur à celui des demi-masques ou des masques complets. Comparés aux appareils respiratoires à ventilation assistée, ils sont généralement plus légers à porter puisqu'il n'est pas nécessaire de transporter un moteur avec des cartouches filtrantes. En revanche, la liberté de mouvement est quelque peu restreinte car la tuyauterie d'air est reliée à l'infrastructure de production.

Lors de l'utilisation d'appareils respiratoires à adduction d'air, il est impératif que l'air fourni soit traité par des filtres et que sa qualité soit fréquemment contrôlée afin de s'assurer de l'absence d'huile, d'humidité, de poussière et d'autres contaminants, et que l'air soit sans danger pour la respiration.

²⁶En effet, certains fabricants de mousse flexible en blocs ont rapporté que leurs employés les gardent même dans des zones ou lors d'activités ne nécessitant pas leur utilisation. Interrogés sur les raisons de ce choix, ils ont indiqué que l'air était plus frais et qu'ils appréciaient la sensation du flux d'air sur leur visage.





Figure : 11 Appareil respiratoire à débit d'air constant. À gauche : demi-masque (usage léger) ; au centre : masque facial complet ; à droite : cagoule/casque. Source : HSE [10]

Concernant les appareils respiratoires à ventilation assistée ou à adduction d'air frais, notamment ceux munis d'une cagoule, en cas d'apport d'air insuffisant, l'utilisateur aspirera l'air ambiant non filtré. Le débit d'air requis est au moins trois fois supérieur à la fréquence respiratoire moyenne ²⁷, laquelle dépend de l'intensité du travail. Les fréquences respiratoires et les débits d'air minimaux requis pour chaque niveau d'activité sont indiqués dans Tableau8.

Tableau8 : Fréquence respiratoire, débit d'air requis et facteur d'ajustement de la durée de port pour différents niveaux d'activité. D'après les recommandations britanniques et allemandes [12, 13].

Niveau d'activité	Description	Fréquence respiratoire (l/min)	Débit d'air requis (l/min)	facteur d'ajustement du temps de port
Lumière	Travail sédentaire : assemblage ou tri de matériaux légers, travail des bras et des jambes, perçage.	20	60	1.5

²⁷Cela s'explique par le fait que les humains inspirent pendant 1/3 du temps et expirent pendant 2/3 du temps, ce qui signifie que le taux d'inspiration est 3 fois supérieur au taux respiratoire moyen.



Niveau d'activité	Description	Fréquence respiratoire (l/min)	Débit d'air requis (l/min)	facteur d'ajustement du temps de port
Moyen	Travaux manuels et des bras soutenus : sciage, rabotage ou ciseau du bois, plâtrage, limage, travail avec un marteau pneumatique, manutention ou transport intermittent de matériaux moyennement lourds, pelletage, travail au marteau de forgeron, pose de blocs de béton, poussée ou traction d' une charrette à bras lourdement chargée .	20 – 40	120	1
Lourd	Travaux manuels pénibles : pelleter ou creuser, grimper, utiliser des rampes ou des échelles.	40 – 60	180	0,7

Enfin, il existe des appareils respiratoires autonomes alimentés en air comprimé par une bouteille. Un exemple de ce type de système est présenté à Figure 12. Ces systèmes offrent un niveau de protection supérieur, mais sont coûteux, lourds, encombrants et nécessitent une formation. Souvent, selon la législation locale, un examen médical est requis pour déterminer l'aptitude à utiliser ce type d'équipement. Ils sont généralement réservés aux situations d'urgence, comme la gestion des déversements.



Figure 12 Appareil respiratoire autonome. Source : HSE du Royaume-Uni [12]



Le niveau de protection offert par les différents types de masques peut être exprimé par un facteur de protection. Ce facteur permet, dans le cadre d'évaluations quantitatives des risques, de prédire le niveau d'exposition dans l'air respiré en fonction de la concentration de polluants dans l'air extérieur au masque. Il existe des facteurs de protection nominaux (FPN), basés sur les normes relatives aux appareils de protection respiratoire²⁸(APR). Par ailleurs, il existe des facteurs de protection assignés (FPA), déterminés par divers organismes en tenant compte de différents facteurs, tels qu'une utilisation intensive ou inappropriée des APR.

Ces facteurs de protection individuelle (FPI) varient généralement d'un pays à l'autre, tant par leur valeur que par leur statut. Dans certains pays, ces facteurs ont été définis et intégrés à la documentation officielle (par exemple, au Royaume-Uni), dans d'autres, il s'agit de simples guides élaborés par l'association locale d'hygiénistes industriels (par exemple, aux Pays-Bas), et dans d'autres encore, ils sont établis par des organismes dont la position se situe entre ces deux extrêmes. Un aperçu de ces facteurs pour la plupart des types de masques mentionnés ci-dessus est disponible dans Tableau 9. Cependant, dans la plupart des pays, aucun facteur de protection n'a été défini. Dans ces pays, il est possible d'utiliser les facteurs allemands, car les recommandations expliquent que leur définition prend en compte la fuite maximale admissible et d'autres facteurs influents, tels que la résistance respiratoire à volumes respiratoires élevés ou la protection résiduelle en cas de dysfonctionnement du dispositif.

Tableau 9 Facteurs de protection nominaux et assignés des masques utilisables dans la production de mousse flexible. D'après [14-16]. FPN : facteur de protection nominal. * L'efficacité de l'ARI dépend de certaines conditions ; voir [16].

Standard	Description	Classe	NPF	FI	DE	IL	SE	GB	NL	FR
EN 149	demi-masque respiratoire jetable	FFP1	4	4	4	4	4	4	4	10
		FFP2	12	10	10	10	10	10	10	
		FFP3	50	20	30	30	20	20	20	
EN 140	demi-masques respiratoires réutilisables	P1	4	4	4	4	4	4	4	10
		P2	12	10	10	10	10	10	10	
		P3	48		30	30		20	20	
		Gaz	50	20	30	30	30	10	10	
EN 136	masques respiratoires à visage complet	P1	5	4	4	4	4	4	4	30
		P2	16	15	15	15	15	10	10	
		P3	1000	500	400	400	500	40	40	
		Gaz	2000	500	400	400	500	20	20	
EN 12941	Appareils respiratoires motorisés avec cagoules/casques	TH1	10	5	5	5	5	10	10	40
		TH2	50	20	20	20	20	20	20	
		TH3	500	200	100	200	200	40	40	
EN 12942	Appareils respiratoires motorisés avec masques	TM1	20	10	10	10	10	10	10	60
		TM2	200	100	100	100	100	20	20	
		TM3	2000	1000	500	400	1000	40	40	
		TM3 P (120 l/min)								

²⁸Par exemple, la norme EN 12941 stipule que le taux de fuite maximal admissible est de 10 %, 2 % et 0,2 % pour les masques TH1, TH2 et TH3, ce qui donne un NPF de 10, 50 et 500, en supposant que les filtres fonctionnent parfaitement.



Standard	Description	Classe	NPF	FI	DE	IL	SE	GB	NL	FR
		TM3 P (160 l/min)								100
EN 137	Appareil respiratoire autonome (ARA)	Demande	2000	500	>1000	1000		2000	2000*	

L'utilisation d'EPI respiratoires pour des opérations non standard (par exemple, la maintenance) ou pour se prémunir contre les incidents liés à la sécurité des procédés (par exemple, les fuites lors du déchargement) est généralement considérée comme acceptable. Cependant, le port prolongé d'EPI respiratoires lors des tâches quotidiennes courantes n'est pas conforme à la hiérarchie des mesures de contrôle et doit être réduit au minimum. Ce principe général reste valable ; toutefois, des durées maximales de port autorisées plus précises ont été établies en Allemagne et peuvent servir de référence dans l'industrie des mousses de polyuréthane flexibles.

Le Tableau 9 décrit les durées maximales de port continu (DMC), les temps de récupération et les durées totales de port (DTP) pour différents types et classes de masques. La DMC correspond à la durée pendant laquelle un masque peut être porté sans interruption. Le temps de récupération est la période durant laquelle le travailleur doit se retirer de la situation d'exposition où le port d'un équipement de protection respiratoire (EPR) est obligatoire. La DTP correspond à la durée totale pendant laquelle un EPR donné peut être porté au cours d'un poste de travail complet.

Le CWT du Tableau 9 correspond à une charge de travail moyenne. En cas de charge de travail légère ou importante, les valeurs de CWT doivent être multipliées par le facteur de correction du temps de port indiqué dans le Tableau 8. De plus, en cas de travail dans des conditions chaudes, froides, humides ou inconfortables, le CWT doit être réduit d'un facteur à déterminer, en fonction de la sévérité des conditions.

*Tableau 9 Durée de port pour différents types de masques. * Si la durée totale de port par poste est utilisée, le dispositif ne doit pas être porté plus de deux jours ouvrables consécutifs ni plus de quatre jours par semaine. * Combinaison de filtres à gaz et à particules ** La durée de port des appareils respiratoires autonomes (ARA) pesant moins de 5 kg dépend de l'autonomie de l'appareil en air. D'après les recommandations britanniques et allemandes [12, 13].*

Standard	Description	Classe	Durée de port continu ; DPC (minutes)	Temps de récupération (minutes)	Durée totale de port ; TWT (minutes)
EN 149	demi-masque respiratoire jetable	FFP1 ou FFP2	75	30	360*
		FFP3	150	30	420
EN 140	demi-masques respiratoires réutilisables	P1 ou P2	150	30	420
		P3 ou gaz	135	30	420
		Combinaison +	120	30	360
EN 136	masques respiratoires à visage complet	P1 ou P2	135	30	420
		P3 ou gaz	120	30	360
		Combinaison +	105	30	300
EN 12941	Appareils respiratoires motorisés avec cagoules/casques	<3 kg	Aucune limite		
		>3 kg	180	30	450



Standard	Description	Classe	Durée de port continu ; DPC (minutes)	Temps de récupération (minutes)	Durée totale de port ; TWT (minutes)
EN 12942	Appareils respiratoires motorisés avec masques	<3 kg	150	30	420
		>3 kg	120	30	420
EN 137	Appareil respiratoire autonome (ARA)	<5 kg	Dépendant du périphérique **		
		>5 kg	60	30	240*

Les conseils suivants concernant le type de masque à utiliser lors des activités de production de mousse flexible sont d'ordre général et peuvent être adaptés en fonction des conditions locales de l'usine et de la législation/réglementation applicable localement :

- Lors du déchargement de TDI, le port d'un appareil respiratoire (généralement un masque facial complet conforme à la norme EN 136) est obligatoire pour une première protection en cas d'incident ²⁹. Toutefois, en cas d'incident plus important (par exemple, une fuite entraînant un déversement majeur), les travailleurs doivent évacuer la zone et une équipe spécialisée équipée d'appareils respiratoires autonomes (ARA) doit intervenir.
- Lors de toute activité impliquant la manipulation de poudre et la formation de poussière ou d'aérosol (par exemple, l'alimentation de grands ou petits sacs dans une trémie), des respirateurs munis de filtres à poussière doivent être portés, sauf si des mesures ou une modélisation démontrent que cela n'est pas nécessaire.
- Lors d'activités impliquant des diisocyanates, le port d'un appareil respiratoire adapté à l'activité réalisée est obligatoire. Par exemple, le démontage et le nettoyage d'une tête de mélange rincée, susceptible de contenir des traces de diisocyanates résiduels, peuvent être effectués avec un demi-masque. En revanche, le remplacement d'un filtre TDI dans le parc de stockage nécessite le port d'un masque complet.
- Dans l'atelier de production de mousse en blocs, des respirateurs sont utilisés :
 - lors du démarrage pour des raisons de sécurité des procédés,
 - lors de l'exécution d'activités présentant un potentiel d'exposition plus élevé connu (par exemple, changer les rouleaux de papier latéraux, entrer dans la zone d'encapsulation, travailler autour de la scie à découper au bout de la ligne de mousse)
 - si les instruments de lecture directe indiquent des concentrations anormalement élevées.

²⁹Bien que les recommandations d'ISOPA ne préconisent pas cette pratique pour les inhalateurs-doseurs, il peut être utile d'exiger le port d'un équipement de protection respiratoire lors de leur déchargement, en fonction d'une évaluation locale des risques. Ceci est particulièrement important si la température de l'inhalateur à décharger est élevée.



Un choix peut être fait, et une évaluation des risques est nécessaire pour justifier ce choix entre les demi-masques respiratoires, les masques respiratoires complets, les appareils respiratoires à ventilation assistée et les appareils respiratoires à alimentation en air frais.

- Dans la production de mousse moulée, et selon une évaluation des risques, le port d'équipements de protection respiratoire peut être nécessaire pour les interventions à proximité de conduites ou de systèmes haute pression. Dans nombre de ces zones, une fuite peut entraîner un déversement important en raison de la haute pression des systèmes de mélange ou de la pression dans les réservoirs de stockage.
- Dans les deux formats de stock en blocs et des incidents peuvent survenir dans les halls de production de mousse moulée nécessitant une évacuation (par exemple , un versement raté dans la production moulée ou un mauvais rapport de mélange du dépôt liquide dans la production de plaques) ; dans ces cas, les travailleurs équipés d'un appareil respiratoire autonome doivent résoudre la situation d'incident, à moins que l'ampleur de l'incident ne permette des niveaux de protection respiratoire inférieurs.
- Le port d'un équipement de protection respiratoire (EPR) est recommandé dans la zone de durcissement d'une usine de mousse en blocs, sauf si des mesures démontrent que la présence de mousse fraîche dans la zone ne présente aucun risque pour la santé humaine.

Taux de sélection et de remplacement des filtres

Un élément essentiel des appareils respiratoires (à ventilation assistée) est le filtre, car il détermine les substances éliminées de l'air ambiant avant l'inhalation. Un aperçu des principaux types de filtres est présenté dans Tableau 10.

Tableau 10 Récapitulatif des types de filtres et des gaz modèles utilisés pour les tests.

Taper	Utiliser	Gaz modèle utilisé pour les essais (EN 14387)
UN	Pour une utilisation contre certains gaz et vapeurs organiques dont le point d'ébullition est supérieur à 65 °C.	Cyclohexane
B	Pour une utilisation contre certains gaz et vapeurs inorganiques	Chlore sulfure d'hydrogène Cyanure d'hydrogène
E	Pour une utilisation contre le dioxyde de soufre et autres gaz et vapeurs acides	dioxyde de soufre
K	Pour une utilisation contre l'ammoniac et les dérivés organiques de l'ammoniac	Ammoniac
P	Pour une utilisation contre les particules	

Il existe également des filtres combinant ces différents types. Les filtres AP et ABEK en sont des exemples courants : ils filtrent à la fois les composés organiques volatils et les particules, ou encore



une combinaison de gaz. Les lettres d'indication du type peuvent être suivies d'un chiffre (1, 2 ou 3) précisant la capacité de filtration (faible, moyenne ou élevée). Par exemple, les filtres A2P2 ont une capacité moyenne pour les vapeurs et les particules. En l'absence de chiffre après l'indicateur de type, la capacité de filtration est de 1 (par exemple, un filtre A2P a une capacité moyenne pour les vapeurs organiques et une faible capacité pour les particules).

Les filtres peuvent se saturer, entraînant une perte d'efficacité. La vitesse à laquelle ce phénomène se produit dépend de la concentration des substances filtrées dans l'air, de l'humidité, de la température, de la durée d'utilisation et du rythme respiratoire de l'utilisateur. Les instructions des fabricants d'appareils de protection respiratoire indiquent souvent que les filtres doivent être remplacés immédiatement dès qu'une odeur de contaminant est détectée. Bien que techniquement exact, ce principe est très inapproprié, car de nombreuses substances, notamment les diisocyanates, provoquent des effets indésirables à des concentrations bien inférieures au seuil de perception olfactive.

Pour mieux comprendre quand changer les filtres, il est essentiel de comprendre comment ils sont testés. La norme EN 14387 stipule que de l'air contenant un gaz modèle donné (voir Tableau 10) à une concentration définie doit traverser le filtre pendant une durée déterminée, et que la concentration à la sortie du filtre ne doit pas dépasser un certain seuil. En multipliant le temps de passage minimal par la concentration du gaz de test, on calcule la capacité du filtre, exprimée en ppm*minutes.

Étant donné que la plupart des substances présentes dans l'air des usines de mousse flexible peuvent être considérées comme des composés organiques (semi-)volatils (COV), le filtre de type A est le plus approprié. Tableau : 11 indique le temps de filtration minimal et la concentration de gaz de test pour les différents niveaux de filtration de type A. La capacité du filtre A2 est 2,5 fois supérieure à celle du filtre A1, et celle du filtre A3 est presque 3 fois supérieure. Théoriquement, **si l'on suppose** que tous les COV se comportent comme du cyclohexane et que leur concentration dans l'air est connue, on peut calculer une durée de vie maximale. Par exemple, si la concentration de COV est de 3 ppm, la durée de vie maximale d'un filtre A1 est de 388 heures. En supposant une utilisation du masque 2 heures par jour, le filtre doit être remplacé tous les six mois. Bien entendu, cela reste théorique, car tous les COV semi-volatils ne se comportent pas comme le cyclohexane, le niveau total de COV semi-volatils sur les lieux de travail est souvent inconnu, les tests sont effectués dans des conditions de laboratoire idéales et d'autres facteurs mentionnés précédemment, tels que l'humidité, ne sont pas pris en compte. De plus, toutes sortes de substances présentes dans l'air d'un lieu de travail sont à considérer pour une telle évaluation, notamment les catalyseurs, les tensioactifs, les agents de démoulage, les diisocyanates et les polyols.

Tableau : 11 Durée de vie calculée selon la norme EN 14387 pour les filtres de type A

Taper	Temps de percée minimum (min)	Concentration du gaz testé (ppm)	Capacité (ppm*min)
A1	70	1000	70 000
A2	35	5000	175 000
A3	65	8000	520 000



En ce qui concerne le type de filtre à utiliser, les recommandations suivantes s'appliquent :

- Lors de la manipulation de diisocyanates purs (par exemple, lors du remplacement des filtres de parcs de stockage) ou pour se protéger contre une exposition potentielle à ces diisocyanates (par exemple, lors du déchargement de camions-citernes), des filtres de type AP sont nécessaires. Il est recommandé d'utiliser au minimum des filtres de niveau A2P.
- Lors de la production de mousse en blocs, des filtres de type AP sont nécessaires pour se protéger contre l'exposition aux diisocyanates et couvrent également la plupart des autres substances utilisées. Il convient toutefois d'examiner si d'autres types de filtres sont nécessaires en fonction des formulations utilisées et des substances susceptibles d'être présentes dans l'air.
- Lors de certaines opérations de conversion impliquant une combustion limitée et contrôlée de mousse (par exemple, la lamination à la flamme et/ou la réticulation), des composés organiques volatils, des particules dangereuses et du cyanure d'hydrogène peuvent se former, nécessitant des filtres de type APB.
- Il convient de noter que le chlorure de méthylène (MC) est susceptible de traverser la plupart des filtres classiques. Les utilisateurs de MC doivent contacter leur fournisseur de filtres afin de déterminer si celui-ci propose des filtres AX spécifiques protégeant contre le MC ou opter pour des solutions ne nécessitant pas de filtration, telles que les appareils respiratoires à adduction d'air ou les ARI (appareils respiratoires autonomes), lors de l'utilisation de MC.

Il convient de consulter les fournisseurs de filtres afin de déterminer la fréquence de remplacement adéquate. En l'absence de recommandations plus précises de leur part, les règles générales suivantes s'appliquent, lesquelles peuvent être adaptées en fonction des évaluations des risques :

- Lors de la manipulation de diisocyanates purs et de diisocyanates dans un mélange non réactif, les filtres doivent être remplacés tous les 15 jours ou après des expositions importantes.
- Les filtres utilisés dans la production régulière de mousse en blocs doivent être remplacés tous les 15 jours, mais également après des événements d'exposition importants.

Conseils d'utilisation et d'entraînement

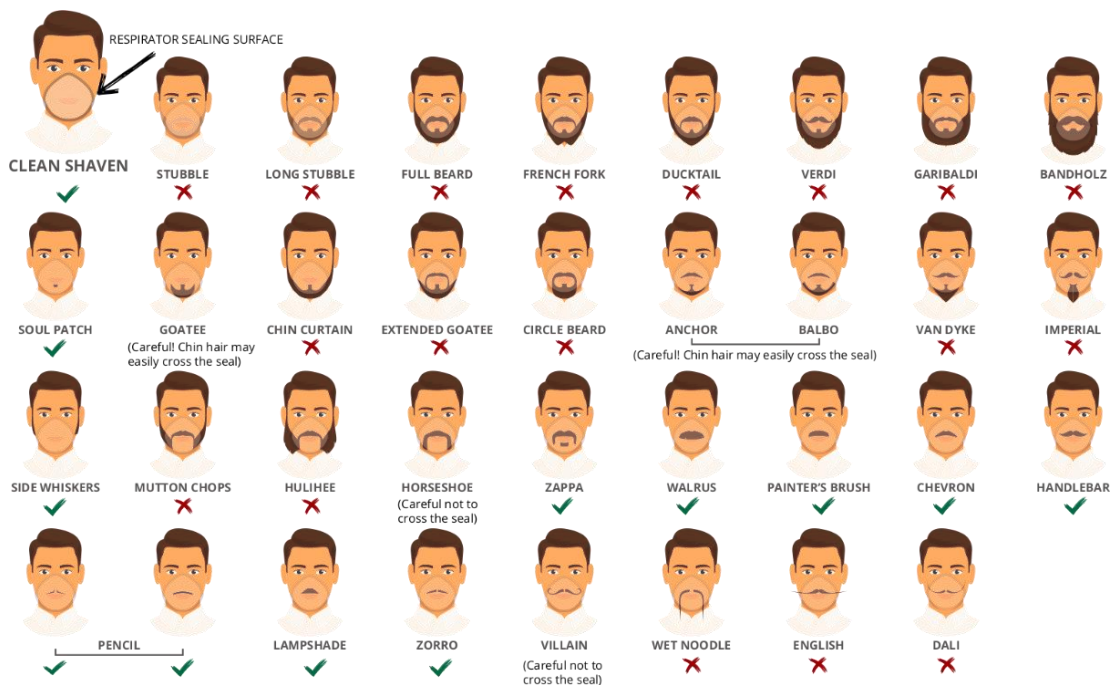
En ce qui concerne l'utilisation des appareils de protection respiratoire, il est impératif de suivre les instructions du fabricant. De plus, les pratiques suivantes doivent être observées :

- Tous les équipements de protection respiratoire doivent être personnels et chaque employé qui doit utiliser un équipement de protection respiratoire doit recevoir un système dédié, à ranger dans un conteneur personnel scellé dédié.
- Avant d'utiliser un appareil de protection respiratoire (APR), un test d'ajustement facial doit être effectué en fonction du type de masque. Ce test peut être qualitatif : il consiste à vaporiser une substance ayant un goût ou une odeur particulière pour vérifier l'étanchéité du masque. Pour les



masques complets et les appareils respiratoires autonomes (ARA), une analyse quantitative est réalisée à l'aide d'équipements calibrés et certifiés. Tous les tests d'ajustement facial doivent être effectués par des professionnels qualifiés.

- La pilosité faciale peut nuire au bon fonctionnement des appareils de protection respiratoire (APR) en compromettant l'étanchéité. barbe 13 illustre les styles de pilosité faciale susceptibles de perturber l'étanchéité des demi-masques respiratoires. Idéalement, les travailleurs devant utiliser ce type d'APR devraient être rasés de près ou, à tout le moins, adopter un style de pilosité faciale qui ne gêne pas le fonctionnement de l'APR et avoir le reste du visage fraîchement rasé. Une étude de la HSE britannique a démontré que même une légère repousse de barbe dans les 24 heures suivant le rasage peut compromettre la protection conférée [17]. Alternativement, pour les employés qui ont une pilosité faciale comme caractéristique protégée (par exemple pour des raisons religieuses), un EPR compatible avec la pilosité faciale peut être envisagé (par exemple, des respirateurs motorisés avec capuche).



barbe 13 et masques respiratoires filtrants : pour les travailleurs qui portent des masques respiratoires étanches. Source : [CDC des États-Unis](#)

D3.2 Protection cutanée

Pour certaines substances, comme les diisocyanates, le contact cutané doit être évité.

Gants

Les gants résistants aux produits chimiques (norme EN 374) doivent être portés par les personnes manipulant des substances pures ou des mélanges présentant un risque de contact cutané. La fiche de données de sécurité de la substance ou du mélange précise le matériau des gants à utiliser pour garantir un temps de pénétration suffisant lors de la manipulation de la substance pure.



Pour les opérations avec contact potentiel avec le mélange réactionnel liquide (c'est-à-dire le matériau sortant de la tête de mélange dans les installations de mousse flexible), des gants épais en nitrile conformes à la norme EN 374 doivent être utilisés.

Pour les opérations susceptibles d'entraîner un contact avec un mélange réactionnel (semi-)solide (par exemple, en fin de ligne de production de mousse en blocs), des gants épais en nitrile conformes à la norme EN 374 peuvent être utilisés. Cependant, pour les opérations de très courte durée (quelques secondes à une minute) avec contact cutané, telles que le prélèvement d'un échantillon de mousse à des fins de contrôle qualité (inspection visuelle et ³⁰**tactile de la mousse**), il est préférable d'utiliser des gants plus fins, à usage unique. Dans la mesure du possible, il est recommandé d'utiliser des gants en nitrile.

Lors des opérations avec de la mousse non polymérisée, notamment de la mousse moulée, il convient de noter le risque d'exposition aux amines aromatiques (voir D1.3. Par conséquent, le port de gants résistants aux produits chimiques est indispensable lors du démoulage des pièces en mousse moulée. Si nécessaire, des gants résistants à la chaleur et/ou aux contraintes mécaniques peuvent être portés par-dessus les gants résistants aux produits chimiques.

Deux études de l'Institut international des isocyanates (III) ont démontré que certains types de gants non résistants aux produits chimiques peuvent également offrir une certaine protection. Ces études – le rapport III 11667 ³¹portant sur le MDI/MDA et le rapport III 11787 ³²sur le TDI/TDA – sont disponibles auprès de tout fournisseur de diisocyanates membre de l'III. Après un examen attentif de ces rapports et une évaluation des risques, il est possible de s'affranchir du port de gants résistants aux produits chimiques lors de la manipulation de pièces de mousse non polymérisée et d'opter pour des gants non résistants aux produits chimiques, évalués et renouvelés régulièrement. Cela peut notamment s'avérer pertinent pour le raffinage de coussins en mousse moulée ou la manutention de blocs de mousse en cours de polymérisation.

Si l'exigence de porter des gants résistants aux produits chimiques était modifiée, il serait judicieux de recueillir des données selon une méthodologie similaire afin d'évaluer la sécurité de cette modification, notamment pour les types de gants n'ayant pas encore fait l'objet d'une évaluation. Une autre possibilité serait de réaliser une biosurveillance avant et après le passage à des gants non résistants aux produits chimiques afin d'en vérifier l'efficacité.

Autres vêtements de travail

En ce qui concerne les autres vêtements de protection, les normes ISO 13688 et EN 340 décrivent les exigences générales. La norme ISO 13688 contient un tableau avec des icônes expliquant les risques contre lesquels ces vêtements protègent. La protection contre les produits chimiques liquides est

³⁰ Il s'agit d'une pratique relativement courante qui permet d'apporter de légères corrections à la formulation, améliorant ainsi la qualité et évitant la formation de mousse de mauvaise qualité, voire de déchets de mousse.

³¹ Vangronsveld et Ahrika (2015) - Évaluation de l'efficacité des gants avec MDI et MDA lors du moulage de mousse flexible. III Rapport 11667

³²mousse PU flexible fraîche



notamment pertinente. Selon les spécificités du site, d'autres risques peuvent nécessiter une protection (par exemple, dans les zones ATEX, le port de vêtements de travail protégeant contre les décharges électrostatiques et conformes à la norme EN 1149 peut être requis).

Pour toutes les opérations impliquant un mélange liquide contenant une substance présentant un risque cutané (par exemple, chaque opérateur de ligne de mousse en blocs), des vêtements de travail conformes aux exigences de la norme EN 13034 doivent être portés.

Lors d'activités à haut risque impliquant des diisocyanates purs ou d'autres substances présentant un risque cutané (par exemple, le déchargement de camions-citernes), le port d'une combinaison intégrale (type 3 ou 4) conforme à la norme EN 14605 est fortement recommandé. À défaut, le port d'une combinaison conforme à la norme EN 13034 (type 6) peut être jugé suffisant après évaluation des risques.

D4 Amélioration continue

Au moment de la rédaction du présent document, le Comité consultatif sur la santé et la sécurité au travail (ACSH), organe européen représentant les syndicats, les employeurs et les gouvernements, a adopté l' [avis](#) selon lequel des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) devraient être fixées à l'échelle de l'UE pour tous les diisocyanates, exprimées en $\mu\text{g NCO}/\text{m}^3$. Cet avis servira de base à une procédure réglementaire visant à établir des VLEP contraignantes à l'échelle de l'UE.

Les valeurs proposées sont généralement inférieures aux limites actuellement en vigueur dans différents États membres de l'UE, à savoir la moyenne pondérée sur 8 heures (TWA) et la valeur limite d'exposition à court terme (VLE-CT) de 10 ou 20 ppb (voir Tableau 12 du MDI, il convient de noter qu'ils sont soumis au principe ALARA/ALARP et que l'exposition doit **être** réduite **au** niveau **le plus** bas raisonnablement **possible** .

Tableau 12 Valeurs limites futures attendues pour les diisocyanates après la finalisation de la procédure réglementaire. Bien que très improbable, les valeurs finales issues de ce processus pourraient différer et prévaudraient naturellement sur les valeurs présentées ici. Les valeurs en $\mu\text{g NCO}/\text{m}^3$ peuvent être converties en $\mu\text{g TDI}/\text{m}^3$ ou en $\mu\text{g MDI}/\text{m}^3$ en les multipliant respectivement par 2,07 ou 2,98.

Période	TWA ($\mu\text{g NCO}/\text{m}^3$ ppb)	STEL ($\mu\text{g NCO}/\text{m}^3$ ppb)
Après l'adoption de la législation jusqu'au 31 décembre 2028	10 2,9	20 5,8
À compter du 1er janvier 2029	6 1,7	12 3,5

Compte tenu des niveaux d'exposition actuels, notamment dans la production de mousse en blocs, il est prévu que des mesures de réduction de l'exposition soient mises en œuvre. Ces mesures doivent respecter la hiérarchie des contrôles.

En matière de **substitution** , les **diisocyanates étant un ingrédient essentiel** à la production de mousse de polyuréthane flexible, les possibilités sont généralement très limitées . Le polyuréthane sans



isocyanate (NIPU) reste pour l'instant cantonné au monde universitaire et n'a pratiquement aucune application industrielle.

Technique Des **dispositifs de contrôle** tels que les enceintes de confinement, les systèmes d'extraction d'air spécifiques et la ventilation générale sont déjà largement utilisés dans la production de mousse de polyuréthane flexible. Cependant, leur efficacité peut être améliorée. Des bureaux d'études spécialisés, voire les inspections du travail locales, peuvent apporter leur expertise pour analyser la situation actuelle et formuler des recommandations d'amélioration. Par ailleurs, certaines compétences peuvent être développées ou mises en œuvre au sein même de l'usine. Par exemple, les responsables HSE peuvent collaborer avec les services techniques et réaliser des tests de fumée pour cartographier les flux d'air dans l'atelier de production ou encore examiner la situation globale à l'aide d'un analyseur de flux d'air mobile.

La réglementation REACH devrait permettre une nette amélioration grâce à la mise en place d'une formation uniforme de haut niveau, qui constitue une mesure de contrôle **organisationnel**. La formation ne doit cependant pas être la seule source d'amélioration. D'autres améliorations spécifiques à l'usine pourraient être envisagées. Par exemple, l'observation visuelle par caméra nécessaire à la production de mousse flexible peut être effectuée à plus grande distance du processus de production, réduisant ainsi l'exposition. Les travailleurs devraient être formés à l'utilisation de ces systèmes spécifiques à l'usine.

Enfin, bien que les équipements de protection **individuelle** (EPI) soient une mesure moins prioritaire dans la hiérarchie des contrôles, il n'en demeure pas moins que des améliorations peuvent être apportées. En particulier, le passage des appareils respiratoires non motorisés aux appareils respiratoires motorisés ou aux appareils respiratoires à adduction d'air pourrait améliorer la protection contre l'exposition, réduire la pénibilité du travail et optimiser la durée de port lors des cycles de production.

Pour illustrer ce qui précède par un exemple concret, la plupart des lignes de production de mousse en blocs sont équipées d'une enceinte tunnel avec des fenêtres ouvrables permettant d'observer la mousse et d'effectuer les corrections nécessaires (par exemple, pour corriger la dérive du papier). Lorsque les fenêtres sont fermées, l'air est aspiré par des points d'extraction situés aux extrémités de l'enceinte tunnel, assurant ainsi la protection des opérateurs au niveau de la tête de mélange. En revanche, lorsque les fenêtres sont ouvertes, l'air est aspiré par ces ouvertures, réduisant l'extraction aux extrémités de l'enceinte tunnel (voir Figure : 14) et augmentant potentiellement les concentrations de diisocyanates dans l'air sur la plateforme de mélange. D'où l'importance cruciale de fermer les fenêtres de la ligne de production de mousse lorsqu'elles ne sont pas nécessaires. Une mesure organisationnelle déjà mise en œuvre consiste en des instructions de travail précisant aux opérateurs de fermer ces fenêtres lorsqu'elles ne sont pas nécessaires. Toutefois, cette mesure peut être renforcée par une formation comportementale expliquant aux opérateurs que si les fenêtres restent ouvertes, leurs collègues situés à d'autres points de la ligne seront moins protégés. Une mesure de contrôle technique pourrait également être introduite sous la forme d'une fermeture automatique des fenêtres. Cependant, cette solution présente un risque physique de blessure pour les opérateurs lors de la



fermeture des fenêtres. Une mesure technico-organisationnelle consisterait à alerter les travailleurs en début ou en fin de chaîne par un signal lumineux indiquant qu'un collègue a ouvert une fenêtre, leur permettant ainsi de prendre des précautions telles que le port d'un équipement de protection respiratoire et d'interpeller leur collègue si la fenêtre reste ouverte.

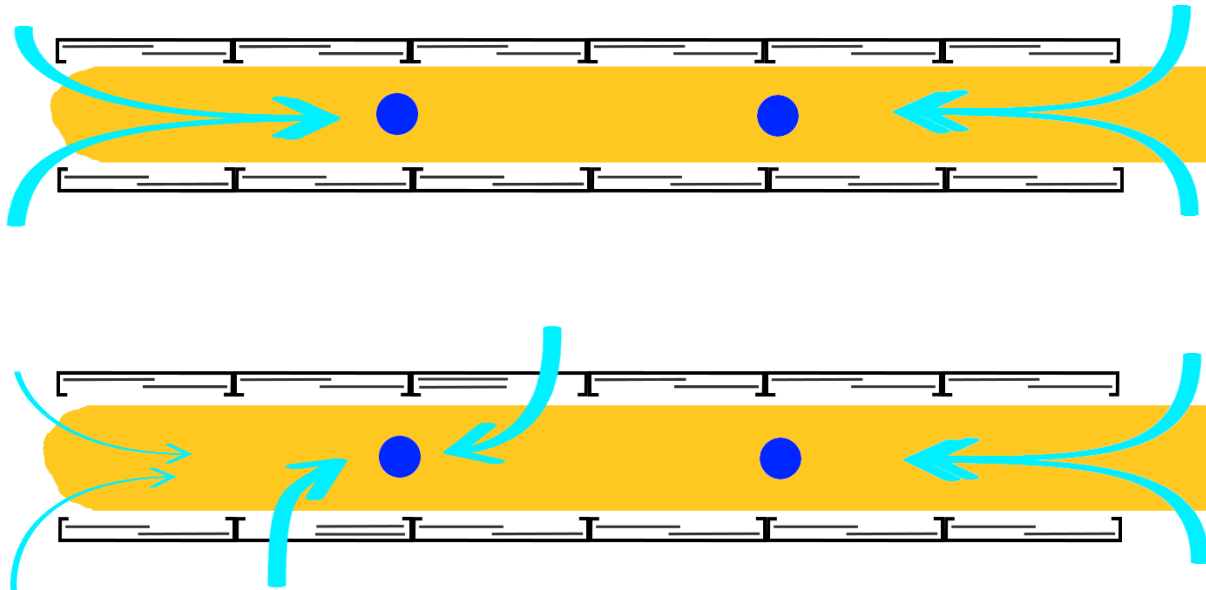


Figure : 14 Illustration graphique du flux d'air relatif. Image du haut : toutes les fenêtres sont fermées, l'air entre dans le tunnel par les extrémités . Image du bas : deux fenêtres sont ouvertes, le flux d'air à l'entrée du tunnel est réduit.

Les conséquences des modifications apportées à de tels systèmes sont toujours, dans une certaine mesure, imprévisibles et relèvent d'un processus itératif. Ce n'est qu'après la mise en œuvre des modifications et la réalisation des mesures que l'on peut évaluer leur efficacité. C'est pourquoi il est recommandé d'établir un plan d'amélioration continue prévoyant l'intégration d'améliorations techniques entre les campagnes de mesures régulières, dans le but de réduire l'exposition.



E surveillance sanitaire

Ce chapitre est exclusivement consacré aux risques sanitaires des diisocyanates. D'autres substances pourraient nécessiter une attention particulière en matière de surveillance sanitaire, de même que d'autres aspects à prendre en compte pour la surveillance de la santé des travailleurs. Ce chapitre expliquera brièvement, en termes simples, le mécanisme d'action des diisocyanates sur la santé humaine, les outils de surveillance médicale disponibles et le type de surveillance médicale à mettre en œuvre.

E1 Mécanisme d'action des diisocyanates

En ce qui concerne les diisocyanates et leurs effets sur l'organisme, il est important de comprendre que, dans le contexte de la sécurité des procédés, des surexpositions peuvent survenir et entraîner des conséquences sanitaires immédiates. Par ailleurs, le phénomène de sensibilisation peut également se manifester, même à des niveaux de surexposition plus faibles, relevant des conditions normales d'exploitation et d'hygiène industrielle. Enfin, les surexpositions liées à la sécurité des procédés peuvent induire une sensibilisation ultérieure. Tous ces points seront abordés ci-dessous.

Lors d'incidents liés à la sécurité des procédés, les concentrations de diisocyanates dans l'air peuvent rapidement dépasser de plusieurs ordres de grandeur toutes les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP), établies pour contrôler l'exposition en conditions normales d'exploitation, compte tenu de l'effet de sensibilisation. Le Tableau : 13 présente les effets aigus de ces fortes concentrations de TDI sur des volontaires humains dans les années 1960.

Tableau : 13 Effets aigus observés chez 6 volontaires humains exposés à différentes concentrations de TDI. Six volontaires masculins sains ont été exposés à une concentration différente chaque jour, de manière aléatoire. À titre de référence, la VLEP médiane actuelle sur 8 heures dans l'UE est de 5 ppb (0,035 mg/m³). Source : données de Henschler et al., 1962, reproduites dans [18].

Concentration		Effets aigus pendant ou après une exposition au TDI
ppb	mg/m ³	
10 ou 20	0,07 ou 0,14	2,4/2,6 ; 2,4 ; 2,6 : aucune perception d'odeur, aucun effet aigu
50	0,36	2,4/2,6 : une odeur a été perçue immédiatement en entrant dans la pièce ; après environ 5 minutes d'exposition, 3/6 volontaires ont ressenti une légère sensation de « picotement » aux yeux décrite comme une envie de larmoyer sans larmes.
		2,4 : faible perception des odeurs, aucune irritation oculaire
		2,6 : l'odeur était plus forte que celle de l'isomère 2,4.
75	0,53	2,6/2,4 : l'odeur s'est intensifiée ; une légère sensation de brûlure oculaire est apparue après 1 à 6 minutes, sans larmoiement ; en respirant plus profondément, les volontaires ont ressenti des chatouillements ou une légère douleur lancinante au niveau du nez.
80	0,57	2,4 : légère irritation conjonctivale et picotements du nez
		2,6 : l'irritation des yeux et du nez est plus sévère qu'avec la même concentration de l'isomère 2,4 ; les effets sur la gorge sont perçus comme une sensation de sécheresse et non de picotement.



Concentration		Effets aigus pendant ou après une exposition au TDI
ppb	mg/m ³	
100	0,71	2,4/2,6 : l'irritation des yeux et du nez s'est aggravée, décrite comme ressemblant à un rhume (catarrhe).
		2,4 : irritation conjonctivale plus prononcée et picotements du nez
		2,6 : l'irritation des yeux et du nez est plus sévère qu'avec la même concentration de l'isomère 2,4 ; les effets sur la gorge sont perçus comme une sensation de sécheresse et non de picotement.
200	1.4	2,4 : l'irritation oculaire a été perçue par 2/5 comme une sensation de picotement et d'inconfort.
		2,6 : l'irritation des yeux et du nez est plus sévère qu'avec la même concentration de l'isomère 2,4 ; les effets sur la gorge sont perçus comme une sensation de sécheresse et non de picotement.
500	3.6	2,4/2,6 : larmoiement, mais l'irritation oculaire restait supportable ; l'un d'eux présentait une rhinorrhée abondante associée à une douleur nasale lancinante ; tous ressentait des picotements et des brûlures à la gorge, sans toux.
		2,4 : l'irritation oculaire a été perçue par tous comme une sensation de brûlure et d'inconfort accompagnée de larmoiement.
		2,6 : effets similaires à ceux de l'isomère 2,4
1300	9.2	2,4/2,6 : deux personnes ont pu rester dans la pièce pendant 10 minutes ; l'irritation était intolérable ; plusieurs heures plus tard, des symptômes grippaux accompagnés de toux persistaient.

Concernant ces effets aigus, il convient de noter qu'un délai d'apparition des symptômes a été observé, ceux-ci pouvant se manifester quelques minutes, voire quelques heures, après l'exposition. Il est donc impératif de maintenir sous observation les travailleurs impliqués dans un incident de sécurité des procédés pendant une période suivant l'incident.

Sur la base du tableau ci-dessus et d'autres données, l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) a élaboré des niveaux guides d'exposition aiguë (AEGL). Ces niveaux sont utilisés par les responsables de la planification et de l'intervention d'urgence dans le monde entier comme référence pour gérer les rejets rares, généralement accidentels, de substances chimiques dans l'air. Les AEGLS sont exprimés en concentrations spécifiques de substances chimiques en suspension dans l'air susceptibles d'avoir des effets sur la santé. Ils ne possèdent pas de statut juridique formel dans la législation de l'UE, mais peuvent être pertinents pour l'élaboration d'une politique de prévention des accidents majeurs, conformément à la directive Seveso (2012/18/UE).

Tableau 14 des niveaux guides d'exposition aiguë pour le TDI en ppb. Basé sur [18]

Classification	10 min	30 min	1 h	4 h	8 h	Point final



AEGL-1 (Non invalidant)	20	20	20	10	10	Sensation d'oppression thoracique, irritation des yeux et de la gorge
AEGL-2 (Désactivation)	240	170	83	21	21	Irritation sévère des yeux et de la gorge, larmolement
AEGL-3 (Létal)	650	650	510	320	160	LC50 à 4 h chez la souris

Outre ces effets aigus liés à une surexposition importante, il existe également un effet chronique de sensibilisation qui peut survenir à des niveaux de surexposition (pic) bien inférieurs. Le texte qui suit est une explication simplifiée du phénomène de sensibilisation respiratoire.

Lorsqu'ils sont inhalés, les diisocyanates réagissent avec les molécules présentes dans les voies respiratoires. Le glutathion, en particulier, est le partenaire privilégié des diisocyanates. Cette réaction permet la liaison des diisocyanates à l'albumine, une protéine. Le glutathion et l'albumine peuvent tous deux transporter les diisocyanates hors des poumons par voie sanguine, où ils sont excrétés sous une forme liée relativement inoffensive. Cependant, la quantité de glutathion dans la muqueuse des voies respiratoires, bien que constamment produite par celle-ci, n'est pas illimitée. Une surexposition, même ponctuelle, peut saturer ce mécanisme d'élimination naturel, entraînant des réactions avec l'eau qui conduisent à la formation de particules solides de polyurée, ainsi que des réactions aboutissant à la liaison directe des diisocyanates à l'albumine et à d'autres protéines.

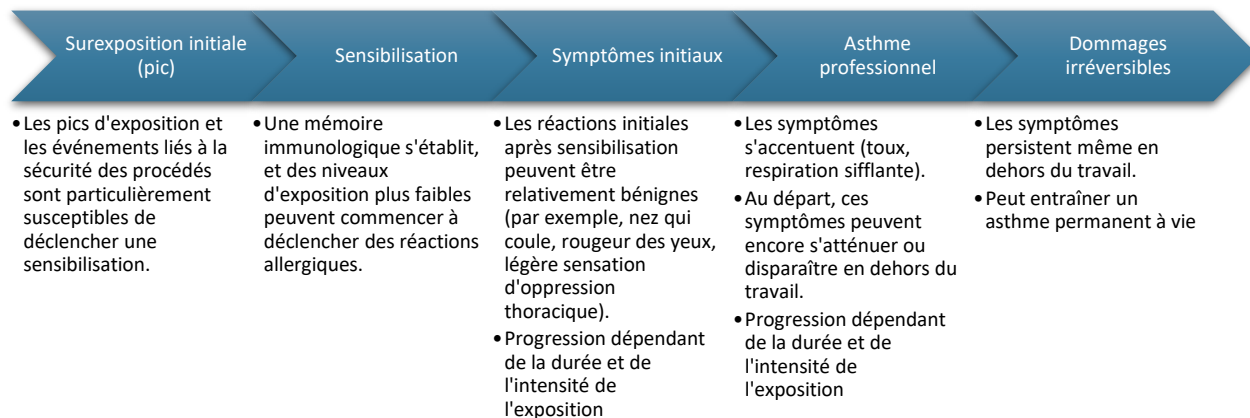
Dans des conditions normales, les protéines en général sont constamment dégradées et reconstruites ; les conjugués diisocyanate-protéine (tels que les conjugués albumine-diisocyanate) ne font pas exception et seraient normalement éliminés au fil du temps. En cas de déclenchement, le système immunitaire peut développer une immunité spécifique à ces conjugués diisocyanate-protéine. Une fois cette mémoire immunologique établie, la personne est sensibilisée.

Même une exposition ultérieure à très faible dose (par exemple, inférieure aux VLEP normalement applicables) peut provoquer chez une personne sensibilisée une réaction immunologique spécifique, dont les symptômes peuvent inclure : rougeur des yeux, écoulement nasal, éternuements, oppression thoracique, toux, respiration sifflante et essoufflement³³. Au début, les symptômes peuvent être bénins (par exemple, un écoulement nasal), mais plus la personne sensibilisée reste exposée, plus les symptômes s'aggravent. C'est pourquoi un travailleur qui constate la réapparition de ces symptômes doit consulter un médecin du travail afin d'en déterminer la cause. Si la personne sensibilisée présentant des symptômes continue de travailler dans la même situation d'exposition trop longtemps,

³³De plus, ces types de réactions peuvent se manifester tardivement, parfois après la fin du poste de travail. Il est important d'en tenir compte, car les travailleurs peuvent développer des symptômes à domicile après le travail sans les associer immédiatement à leur activité professionnelle. Lors d'une consultation chez un médecin généraliste présentant ces symptômes, celui-ci peut ignorer l'exposition professionnelle et prescrire un traitement symptomatique pour une rhinite, un asthme et/ou un rhume des foins, permettant ainsi au travailleur de poursuivre son activité dans ce contexte d'exposition pendant un certain temps.



Les symptômes peuvent devenir permanents et perturber durablement le fonctionnement du système respiratoire.



schématique 15de la progression de la maladie chez les sensibilisants respiratoires en général

Les premiers symptômes sont très similaires à ceux du rhume des foins, ce qui est tout à fait logique puisque ce dernier résulte également d'une immunité spécifique à certains pollens. Si les mécanismes déclenchant l'immunité spécifique aux pollens restent encore mal compris, il est clair que les diisocyanates eux-mêmes constituent un facteur déclenchant potentiel de l'immunité spécifique aux conjugués protéine-diisocyanate.

Ici, les données scientifiques deviennent quelque peu floues, mais les déclencheurs potentiels sont des concentrations trop élevées de conjugués protéine-diisocyanate, une irritation locale, des particules de polyuréthane ou une combinaison de ces facteurs. Quel que soit le mécanisme, le niveau d'exposition nécessaire pour déclencher la réponse immunitaire spécifique et induire une sensibilisation ne doit pas nécessairement atteindre celui qui provoquerait les symptômes aigus d'incidents liés à la sécurité des procédés. Ainsi, une légère surexposition (par exemple, légèrement supérieure aux VLE) pourrait déclencher une sensibilisation en l'absence de symptômes d'irritation manifestes, comme décrit dans

Tableau : 13.

Enfin, bien qu'une surexposition aiguë liée à la sécurité des procédés ne soit pas nécessaire pour provoquer une sensibilisation, elle constitue assurément un facteur de risque très important. Il peut être judicieux d'accorder une période de repos avant de reprendre le travail avec des diisocyanates et de surveiller attentivement la santé des travailleurs impliqués dans de tels incidents lors de leur retour au travail.



E2 Outils utilisés en surveillance médicale

Vous trouverez ci-dessous une brève description des outils de diagnostic que peuvent utiliser les médecins du travail :

- **L'entretien sur les antécédents professionnels** est un outil précieux pour recueillir des informations sur les emplois précédents du travailleur. Il est pertinent car la sensibilisation aux diisocyanates ne disparaît pas et peut engendrer une mémoire immunologique aux conjugués diisocyanate-protéine suite à des expositions antérieures. Cet entretien devrait notamment porter sur la survenue éventuelle de réactions allergiques cutanées ou pulmonaires.
- Un **questionnaire** peut être utilisé pour interroger précisément la personne sur la présence de symptômes pouvant être liés aux diisocyanates et sur leur disparition en dehors du travail. Ce questionnaire devrait également inclure des questions sur les réactions cutanées allergiques. L'outil présente une bonne spécificité et une bonne sensibilité.
- Les réponses immunitaires spécifiques peuvent être médiées par des anticorps, également appelés immunoglobulines. L'immunoglobuline E (IgE) est généralement associée aux réactions allergiques. Un **dosage sanguin standard des IgE** peut être réalisé. Un résultat élevé peut être dû à des réactions allergiques induites par des diisocyanates ou à des réactions allergiques à d'autres allergènes (par exemple, le pollen). De plus, une personne sensibilisée et symptomatique peut présenter un résultat faible si la réponse immunitaire n'est pas médiée par les IgE . Par conséquent, cette méthode présente une faible sensibilité et une faible spécificité. Le test est cependant largement disponible et peu coûteux, et peut constituer un élément utile au diagnostic pour le médecin.
- Il existe également **des tests sanguins spécifiques de dosage des IgE** permettant de déterminer la présence d'IgE dans le sang réagissant aux conjugués TDI-HSA ou MDI-HSA ³⁴. Un résultat positif indique une sensibilisation quasi certaine au diisocyanate spécifique. Ce test présente une spécificité remarquable pour la sensibilisation. Cependant, la personne peut avoir développé d'autres IgE spécifiques réagissant à d'autres protéines auxquelles les diisocyanates peuvent se lier, ou une réponse immunitaire non humorale. Un résultat négatif n'exclut pas la possibilité d'une sensibilisation, ce qui explique la faible sensibilité du test. De plus, ce test est généralement peu répandu et peut nécessiter la collaboration de laboratoires situés hors de l'État membre où se trouve l'usine.
- **La spirométrie** , également appelée exploration fonctionnelle respiratoire, permet d'évaluer la fonction pulmonaire et de la comparer aux valeurs statistiques en fonction du sexe, de l'âge, de la taille et de l'origine ethnique. La fonction pulmonaire peut être altérée par d'autres facteurs (comme le tabagisme) et, prise isolément, elle n'est pas très informative. Cependant, réalisée avant et après l'administration de salbutamol, un bronchodilatateur (substance qui dilate les bronches), elle peut aider à diagnostiquer l'asthme. Ce test ne permet pas de déterminer si l'asthme est d'origine

³⁴ L'HSA, ou albumine sérique humaine, est une protéine relativement abondante dans le sang et pouvant être synthétisée artificiellement. La réaction entre l'HSA et un diisocyanate forme un conjugué diisocyanate-protéine.



professionnelle, mais il contribue au diagnostic.

De plus, la valeur des mesures spirométriques augmente avec leur réalisation régulière ; une baisse plus importante que la normale est également un indicateur. La spirométrie est un examen courant et largement accessible.

- Le **test de provocation à la méthacholine** est une variante de la spirométrie classique, où la fonction pulmonaire est mesurée avant et après l'inhalation de doses croissantes de méthacholine. La méthacholine peut provoquer une hyperréactivité bronchique non spécifique, c'est-à-dire qu'à un certain seuil, elle peut entraîner une diminution importante ou non de la fonction pulmonaire. Ce test est généralement utilisé pour diagnostiquer une hyperréactivité bronchique non spécifique, symptôme possible de l'asthme professionnel lié aux diisocyanates. Il est largement disponible et contribue au processus diagnostique.
- Lors d'un **test de provocation spécifique (TPS)**, le sujet est exposé à une concentration connue et artificielle de l'allergène (par exemple , la dose journalière admissible [DJA]) et sa fonction pulmonaire est surveillée régulièrement pendant plusieurs heures. Ce test est la méthode de référence pour le diagnostic de l'asthme professionnel. Cependant, il est très exigeant en ressources (une journée en clinique) et donc coûteux. De plus, cette technique n'est pas disponible dans tous les pays (voir Figure 19 présentant 16). Enfin, il convient bien sûr d'éviter d'exposer délibérément un individu à une substance sensibilisante. C'est pourquoi le TPS, lorsqu'il est utilisé, est réservé aux étapes finales du diagnostic.





Figure 19 présentant 16 centres européens où des tests de provocation bronchique spécifiques sont utilisés pour le diagnostic de l'asthme professionnel. La taille de chaque cercle est proportionnelle au nombre de patients testés chaque année. Le plus grand cercle (Helsinki) représente 136 patients par an et le plus petit (Aarhus) un patient par an. Ces informations proviennent d'une enquête en ligne menée en 2012 auprès des membres du groupe « Asthme professionnel et environnemental » de la Société européenne de pneumologie. Les centres suivants sont indiqués : Institut finlandais de la santé au travail, Helsinki, Finlande ; Institut Nofer de médecine du travail, Łódź, Pologne ; Hôpital Vall d'Hebron, Barcelone, Espagne ; Fondation Jiménez Díaz, Madrid, Espagne ; CHU de Strasbourg, Strasbourg, France ; Centre Hospitalier Hôpital universitaire de Mont- Godinne, Yvoir, Belgique ; Hôpital universitaire général de Prague, République tchèque ; Hôpital Birmingham Heartlands, Birmingham, Royaume-Uni ; Institut de prévention et de médecine du travail de l'Assurance sociale allemande contre les accidents du travail, Bochum, Allemagne ; Hôpital central de Seinäjoki, Seinäjoki, Finlande ; Hôpital universitaire d'Oulu, Oulu, Finlande ; Hôpital Royal Brompton, Londres, Royaume-Uni ; Hôpital universitaire central d'Helsinki, Helsinki, Finlande ; Hôpital universitaire Ziekenhuis, Bruxelles, Belgique ; Université de Padoue, Padoue, Italie ; Institut de médecine du travail et maritime, Hambourg, Allemagne ; Université de Pise, Pise, Italie ; Fondazione Salvatore Maugeri, Pavie, Italie ; Université de Munich, Munich, Allemagne ; North Manchester General Hospital, Manchester, Royaume-Uni ; Hôpitaux universitaires de Louvain, Louvain, Belgique ; Hôpital républicain de Klaipeda, Klaipeda, Lituanie ; Hôpital universitaire Haukeland, Bergen, Norvège ; Université d'Aarhus, Aarhus, Danemark. Extrait de [19].

- Une alternative au contrôle des symptômes (SIC) consiste à effectuer des mesures **répétées du débit expiratoire de pointe (DEP)** pour confirmer le diagnostic. Le travailleur est alors formé à l'utilisation d'un appareil de mesure du DEP et invité à consigner ses mesures, idéalement toutes les 3 à 4 heures pendant ses heures d'éveil, sur une période de plusieurs semaines. Dans ce registre, il note ses jours de travail, les activités réalisées, ainsi que la présence éventuelle de symptômes et la prise de médicaments. Les résultats sont ensuite analysés visuellement ou



statistiquement afin de déterminer si les valeurs du DEP diminuent pendant les heures de travail par rapport aux périodes de repos.

E3 Surveillance médicale

Une surveillance médicale doit être mise en place pour tous les travailleurs susceptibles de développer une sensibilisation au travail et un asthme professionnel. Elle peut être obligatoire dans certains pays. Pour déterminer quels travailleurs répondent à ce critère, il convient d'évaluer leur risque d'exposition à des incidents liés à la sécurité des procédés et aux concentrations générales de substances en suspension dans l'air sur le lieu de travail. Cette surveillance est justifiée par une raison très simple :

Plus tôt une personne sensibilisée est éloignée de la situation d'exposition, meilleures sont ses chances de guérison complète.

L'inverse est également vrai : plus une personne sensibilisée travaille longtemps dans la situation d'exposition, plus le risque de dommages permanents et graves est élevé (voir Encadré 1 pour la description d'une étude qui appuie cela).

Il est parfois possible d'éloigner la personne de la situation d'exposition en la transférant dans un autre service. Par exemple, on peut affecter un opérateur de démoulage au conditionnement dans la production de mousse moulée ou limiter le travail d'un technicien de laboratoire sensibilisé aux tests des propriétés physiques et mécaniques de la mousse durcie.

Dans cette sous-section, nous aborderons ce qui doit être fait lors des examens préalables à l'embauche (E3.1) et de la surveillance médicale régulière (E3.2), et enfin comment confirmer un cas de sensibilisation et/ou d'asthme professionnel (E3.3).

Encadré 1 : Rapport de synthèse d'une étude démontrant l'importance de l'arrêt précoce de l'exposition après sensibilisation.

Pistati et al. have demonstrated that the duration of symptomatic exposure at work is the most important prognostic variable in determining if clinical symptoms continue after cessation of exposure [2]. They found 25 workers that were willing to undergo a specific inhalation challenge (SIC) years after they were diagnosed with occupational asthma and recorded whether they had symptoms in daily life with a questionnaire. In a SIC the person is exposed to the allergen and the decline in lung function is measured. Those that responded to the SIC and had symptoms affecting them in daily life had worked on average 4 years with symptoms in the exposure situation, those that did not respond to the SIC but had symptoms in daily life 2.1 years, and finally those that did not respond to the SIC and no longer had any symptoms had worked on average for a period of 0.6 years in the exposure situation.

E3.1 Examens préalables à l'embauche

Les examens médicaux d'embauche sont des contrôles effectués avant la signature d'un contrat de travail afin de déterminer si une personne est apte à exercer un emploi spécifique. La plupart des pays disposent d'une législation spécifique relative aux examens médicaux d'embauche, qui implique



généralement l'établissement d'un protocole et la justification de chaque examen réalisé. Dans la mesure du possible, il est fortement recommandé de procéder à des examens médicaux d'embauche pour tous les candidats amenés à manipuler des diisocyanates. Ces examens devraient comprendre :

- L'anamnèse professionnelle et un questionnaire permettent de déterminer si la personne est déjà sensibilisée aux diisocyanates ou si elle souffre d'autres affections respiratoires et/ou allergiques préexistantes. Les personnes déjà sensibilisées doivent être exclues du marché du travail, car une exposition ultérieure entraînerait l'apparition de symptômes et, à terme, des lésions irréversibles. Des affections respiratoires et/ou allergiques préexistantes peuvent être le signe d'une atopie ; le médecin doit alors évaluer l'aptitude de la personne à occuper un emploi (voir Encadré 2).
- Une spirométrie est réalisée pour établir la fonction pulmonaire de base. Si les résultats indiquent une fonction pulmonaire réduite par rapport aux valeurs attendues, le test peut être répété après inhalation de salbutamol afin de déterminer si la personne souffre d'asthme, une contre-indication à la manipulation de diisocyanates nécessitant une évaluation médicale. Les résultats de la fonction pulmonaire de base doivent être conservés dans le dossier de la personne embauchée pour servir de référence lors des suivis médicaux réguliers.

Encadré 2 explicatif de l'atopie

Atopy is the tendency to produce an exaggerated IgE immune response to otherwise harmless substances in the environment [1]. There is no real perfect test for such a status and the diagnosis of this is a bit subjectively based on things like whether the individual has many other allergies (e.g. hay fever), spirometry, general IgE blood tests and simply asking questions about previous respiratory system ailments. Since the atopy status is subjective there can also be degrees in this. An individual allergic to pollen, nuts, and dust mite; in combination with a statement from the individual that he has been in and out of treatment facilities for related respiratory issues his entire life, might not be suitable for working with diisocyanates. A person that has well controlled hay fever for a few weeks per year, might still be able to work in a flexible polyurethane foam production plant. Here the case should be left to the discretion of the occupational physician evaluating the candidate's status.

E3.2 Surveillance médicale régulière

Un suivi médical régulier doit être effectué au moins tous les deux ans, une fréquence annuelle étant considérée comme optimale. Lors de ce suivi, les méthodes de dépistage suivantes doivent être appliquées :

- Un questionnaire demandant si le travailleur a présenté des symptômes respiratoires ou des réactions cutanées allergiques et si ceux-ci disparaissent ou s'atténuent lorsqu'il est absent du travail.
- La spirométrie compare la fonction pulmonaire aux valeurs moyennes, mais surtout aux années précédentes, afin de déterminer s'il y a un déclin de la fonction pulmonaire supérieur à la normale.

Si ces méthodes laissent penser que la personne pourrait être sensibilisée aux diisocyanates, des méthodes plus spécifiques doivent être utilisées pour déterminer si tel est effectivement le cas.



E3.3 Guide diagnostique

Le Dr David I. Bernstein a élaboré, pour l'Institut international des isocyanates (III), un guide à l'intention des médecins généralistes sur l'évaluation des travailleurs exposés aux diisocyanates et présentant des symptômes respiratoires bas. Ce guide est disponible [en ligne](#)³⁵ ou peut être obtenu auprès du secrétariat d'EUROPUR/EUROMOULDERS ou de toute entreprise membre de l'III fournissant des diisocyanates. Une [formation en ligne](#) relative à ce guide a également été créée. Cette ressource devrait être mise à la disposition du médecin assurant le suivi médical des travailleurs exposés aux diisocyanates.

Ce guide utilise une combinaison d'entretien sur les antécédents professionnels, de questionnaire, de spirométrie, de mesures répétées du DEP et de tests de provocation à la méthacholine. Toutes ces méthodes sont largement disponibles.

F Gestion des déchets

F1 Déchets chimiques

Toutes les usines de mousse de polyuréthane flexible génèrent des déchets chimiques. Le principal risque lié à la sécurité des procédés de manipulation de ces déchets est la réaction potentiellement violente entre les diisocyanates et d'autres substances, notamment l'eau (de pluie) et le polyol. Lors de l'élaboration ou de la révision des programmes de gestion des déchets chimiques, il est essentiel de séparer les déchets contenant des diisocyanates de ceux qui n'en contiennent pas.

Bien que les diisocyanates soient particulièrement réactifs, d'autres combinaisons de produits chimiques peuvent également présenter des risques. Les informations relatives aux incompatibilités devraient figurer dans la section 7 de la fiche de données de sécurité (FDS), mais il convient de noter que les informations de cette section ne sont pas exhaustives. La fiche d'évaluation de la réactivité chimique est un outil permettant d'évaluer les risques de réactivité entre différents produits chimiques³⁶. Veuillez noter qu'il n'est pas possible de sélectionner « polyol » dans cet outil. Il est toutefois possible de simuler cette réactivité en sélectionnant une molécule comme la glycérine.

Dans un programme de gestion des déchets chimiques, il est essentiel d'identifier la nature des déchets produits et leur traitement. Un **exemple** de matrice de gestion des déchets est présenté dans Tableau 15. Cette matrice varie d'une installation à l'autre et dépend des équipements et des substances utilisés.

³⁵ <https://www.americanchemistry.com/industry-groups/diisocyanates-dii/environmental-health-and-safety/worker-industry-health-and-safety-guidance/diisocyanate-related-asthma/a-guide-for-the-primary-care-physician-in-evaluating-diisocyanate-exposed-workers-for-occupational-asthma>

³⁶ <https://www.aiche.org/ccps/resources/crw-overview>



Tableau 15 Exemple de matrice de gestion des déchets chimiques

Déchets	Source	Collecte et tri	Élimination
Matériau contenant des diisocyanates	Déversement dû au changement de filtre	Doit être collecté dans un seau refermable et transporté (fermé) vers une zone de collecte des déchets dédiée où il est déversé dans le GRV étiqueté « ISO-Déchets ». En cas de stockage de déchets contenant du TDI à l'intérieur, une ventilation par aspiration locale doit être mise en place à proximité du lieu de stockage et il est préférable de stocker les déchets dans un fût plutôt que dans un GRV.	À remettre à l'entreprise chargée de l'élimination des déchets dangereux.
MDI Solvant	+ Après le moussage au MDI, la tête de moussage est rincée au solvant.	Les déchets doivent être collectés dans un seau muni d'un couvercle. Après la collecte, le couvercle doit être remis en place sur le seau, qui sera ensuite transporté vers la zone de collecte des déchets et vidé dans le conteneur IBC étiqueté « ISO-Déchets ».	Les conteneurs ISO-Waste IBC, lorsqu'ils sont remplis à 75 %, sont transportés vers la zone dédiée X et une entreprise d'élimination des déchets dangereux est contactée pour organiser la collecte.
Catalyseurs aminés	Avant le moussage, les circuits d'amines sont amorcés avec les amines. Ce liquide est recueilli comme déchet d'amines.	À collecter dans un seau et à transporter vers la zone de collecte des déchets, puis à déverser dans un IBC étiqueté « Polyol + Additifs ».	Les IBC usagés lorsqu'ils sont remplis à 90 % sont transportés vers une zone dédiée X et une entreprise spécialisée dans l'élimination des déchets est contactée pour organiser la collecte.
Déchets de polyol	Avant le moussage, les circuits de polyol sont amorcés avec le polyol. Ce liquide est ensuite récupéré comme déchet de polyol.	À collecter dans un seau et à transporter vers la zone de collecte des déchets, puis à déverser dans un IBC étiqueté « Polyol + Additifs ».	Les IBC usagés lorsqu'ils sont remplis à 90 % sont transportés vers une zone dédiée X et une entreprise spécialisée dans l'élimination des déchets est contactée pour organiser la collecte.



Déchets	Source	Collecte et tri	Élimination
Polyol + solvant	Après la dernière production, les circuits de polyol sont remplis d'un mélange solvant-polyol. Ce mélange est évacué du système chaque matin.	À recueillir dans un seau et à transporter vers la zone de collecte des déchets, puis à déverser dans un IBC étiqueté « Polyol + solvant ».	Les IBC usagés lorsqu'ils sont remplis à 90 % sont transportés vers une zone dédiée X et une entreprise spécialisée dans l'élimination des déchets est contactée pour organiser la collecte.
Autres déchets ou résidus chimiques		Les résidus chimiques ou les déchets sont collectés autant que possible dans leur emballage d'origine. Si un autre emballage est utilisé, il doit être étiqueté.	À acheminer vers la zone de stockage X pour évaluation par le responsable de la gestion des déchets.

Pour les déchets chimiques produits régulièrement en quantités suffisantes, une infrastructure de collecte dédiée peut être mise en place à proximité du lieu de production. Un exemple est présenté Figure : 17 Une quantité maximale, déterminée par une évaluation des risques, doit être fixée. Une fois ce seuil atteint, la collecte est vidée vers des conteneurs situés dans une zone dédiée.

Enfin, si le stockage des déchets a lieu à l'intérieur d'un bâtiment, une ventilation par aspiration locale doit être mise en place en cas de collecte de déchets contenant des substances dangereuses volatiles comme les résidus de TDI.



Figure : 17 Infrastructure de collecte des déchets dédiée. Dans cette installation, certains flux de déchets liquides sont collectés dans des conteneurs fixes et, une fois un certain niveau atteint, sont pompés dans des GRV dédiés qui sont ensuite acheminés vers un site de stockage des déchets dédié.



F2 Déchets d'emballages chimiques

Les emballages chimiques usagés sont soumis à la directive relative aux emballages et aux déchets d'emballages (DPDE ; 94/62/CE) et à sa mise en œuvre (parfois plus stricte) dans les États membres de l'UE. La DPDE ne précise pas le traitement des emballages chimiques usagés, car il s'agit d'une directive générale applicable à tous les emballages. Dans le cadre des plans nationaux de gestion des déchets, la réglementation encourage généralement l'acheminement des emballages vers des installations de décontamination spécialisées ³⁷ en vue de leur recyclage, chaque fois que cela est possible. Les informations qui suivent sont fournies à titre indicatif ; certaines dispositions peuvent être obligatoires dans certains pays ou régions.

F2.1 Conteneurs de produits chimiques liquides

Selon la quantité résiduelle de produit dans le conteneur chimique, il peut être approprié de la transvaser dans un conteneur pour déchets chimiques. La directive ISOPA relative au transport, au déchargement et au stockage en toute sécurité du TDI et du MDI conditionnés ³⁸ décrit une procédure de vidange des GRV et des fûts contenant des diisocyanates, applicable à d'autres produits chimiques liquides. Lors de cette opération, il convient d'éviter tout contact entre les diisocyanates et d'autres substances, comme expliqué dans la F1. Toutefois, des mélanges de substances autres que les diisocyanates peuvent être préparés en vue de leur élimination en tant que déchets chimiques (par exemple, des mélanges de polyol, de polyol avec un catalyseur amine ou de polyol avec des solvants).

Il est généralement impossible de vider complètement les contenants de produits chimiques liquides sur place. Ces contenants vides doivent être remis à des entreprises de gestion des déchets spécialisées dans leur traitement. Pour ces entreprises, il est impératif que les étiquettes d'origine restent apposées sur l'emballage et ne doivent donc pas être retirées.

Pour les fûts vides ayant contenu des diisocyanates, la procédure de ³⁸. Ce procédé permet de laisser les diisocyanates résiduels réagir de manière contrôlée avec des composés de polyurée/polyuréthane et du CO₂. Il convient de discuter avec l'entreprise spécialisée dans la gestion des déchets afin de déterminer si elle préfère réaliser cette procédure elle-même ou la faire effectuer sur le site de production de mousse.

Si l'usine se situe dans une zone où les infrastructures de gestion des déchets sont limitées et où il n'existe pas d'entreprises spécialisées, les emballages doivent être incinérés. Dans tous les cas, la procédure de décontamination/neutralisation des fûts de diisocyanate vides doit être appliquée lorsqu'ils ne sont pas confiés à des entreprises spécialisées.

³⁷ Par exemple, les Pays-Bas ont repris les principes de diverses directives européennes sur les déchets pour adopter une législation qui est ensuite précisée dans un instrument réglementaire appelé Plan national de gestion des déchets (Landelijk). Plan Afval ; LAP). Le [plan sectoriel 43](#) couvre « l'emballage d'autres substances dangereuses », mais lorsque cet emballage est correctement décontaminé (*schud- , schrap- en schraapleeg*) le [plan sectoriel 41](#) sur « l'emballage général » devient applicable.

³⁸ Disponible sur : <https://www.isopa.org/documentation/> (Liens directs : [EN] [DE] [ES] [IT] [FR] [NL])



F2.2 Conteneurs chimiques solides

L'utilisation de matières premières solides est limitée dans la production de mousse de polyuréthane flexible. Ces matières premières peuvent être livrées par camion-citerne, big bags ou petits sacs. Ces deux derniers types de conditionnement génèrent des déchets d'emballage contenant des résidus. Il convient donc de faire une distinction en fonction du contenu initial. Les emballages ayant initialement contenu des substances non dangereuses (par exemple, le carbonate de calcium comme charge) doivent être séparés de ceux ayant contenu des substances dangereuses, notamment celles présentant un impact environnemental.

Les contenants vides renfermant des matières non dangereuses, notamment du carbonate de calcium, peuvent être éliminés conformément à la réglementation locale relative aux déchets d'emballages courants. Il est recommandé de privilégier la réutilisation ou, à défaut, le recyclage de ces sacs.

Pour les grands sacs et les petits sacs vides ayant contenu des matières dangereuses ou présentant un impact environnemental particulier, il convient de contacter les fournisseurs afin de connaître l'existence de programmes ou de recommandations spécifiques concernant ces déchets (par exemple , des programmes de reprise). À défaut, ces sacs doivent être soigneusement pliés et placés dans un second sac plastique scellé. Ce second emballage scellé doit être incinéré.

F3 Autres déchets

Divers autres types de déchets sont générés. Un exemple de matrice de gestion des déchets est présenté dans **Exemple** de tableau : 16Il convient d'identifier les risques spécifiques liés aux différents types de déchets. Par exemple, les bobines de papier contenant de la mousse non polymérisée constituent une source d'émission de diisocyanates.

Exemple de tableau : 16Matrice de gestion des déchets autres que les déchets

Déchets	Source	Collecte et tri	Élimination
Vêtements, textiles et EPI contaminés par l'ISO	Après le nettoyage d'une tête de mélange, les chiffons peuvent contenir des diisocyanates résiduels.	Chaque article contaminé doit être placé dans un seau en plastique muni d'un couvercle et étiqueté avec son contenu. Les seaux doivent être placés dans un fût dans la zone A dédiée, sous système d'aspiration activé. Le couvercle doit être posé sur le seau sans être hermétiquement fermé.	Selon le degré de contamination, les déchets sont éliminés comme déchets dangereux ou non dangereux.
Papier côté, dessus et dessous contaminé par de la mousse non polymérisée.	Au cours de la production, le papier contaminé par de la mousse non polymérisée est retiré de la ligne A.	Le rouleau de papier contenant de la mousse non polymérisée est une source d'émission de diisocyanates et est donc placé dans une zone extérieure dédiée, à l'écart du hall de production.	Une fois la mousse durcie, elle est éliminée comme déchet industriel non dangereux.



Déchets	Source	Collecte et tri	Élimination
Papier sans mousse sur les côtés, le dessus et le dessous	Lors de la production, le papier est retiré de la ligne B, mais la couche de plastique intérieure est laissée sur la mousse, garantissant ainsi qu'aucune mousse ne se trouve sur le papier retiré.	de papier usagé est laissé à côté de la ligne jusqu'à la fin de la production.	Collectées séparément et envoyées à une entreprise de recyclage du papier.
Première fraction de la production	La première fraction de matériau sortant de la tête de mélange de la ligne de production de blocs est recueillie dans un sac en plastique.	Un sac en plastique est placé à l'extérieur et on le laisse réagir et durcir pendant une journée.	Une fois le matériau durci, il est éliminé comme déchet industriel non dangereux.
Déchets de mousse PU	Blocs endommagés, pièces qui s'effondrent, segments de transition.	Les matériaux présentant un risque d'incendie sont stockés dans des emplacements dédiés jusqu'à leur durcissement. Les autres matériaux sont simplement laissés à durcir.	Après durcissement, éliminer comme déchet industriel non dangereux, sauf si le matériau possède une structure alvéolaire suffisante pour être vendu comme sous-produit de finition.

G Références

- [1] SH Ralston, ID Penman, MWJ Strachan, RP Hobson, R. Britton et LS Davidson, *Davidson's principles and practice of medicine*, 23e édition. Édinburgh : Elsevier (en anglais), 2018.
- [2] G. Pisati, A. Baruffini, F. Bernabeo, S. Cerri et A. Mangili, « Réexposition de sujets atteints d'asthme professionnel dû au diisocyanate de toluène (TDI), après une longue période d'élimination de l'exposition », *Archives internationales de la santé au travail et de l'environnement*, vol. 80, n° 4, pp. 298-305, 2007/02/01 2007, doi : 10.1007/s00420-006-0134-3.
- [3] G. Brereton *et al.*, "Polyuréthanes", *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, pp. 1-76, 2019/07/23 2019, doi: doi:10.1002/14356007.a21_665.pub3.
- [4] SM Arnold *et al.*, "Évaluation des risques liés à l'exposition des consommateurs au diisocyanate de toluène (TDI) dérivé de la mousse flexible de polyuréthane," (en anglais), *Regul Toxicol Pharmacol*, vol. 64, no. 3, pp. 504-15, déc. 2012, doi: 10.1016/j.yrtph.2012.07.006.



- [5] Cefic, « Guide Cefic pour la communication des données relatives à l'indicateur de sécurité des procédés harmonisé à l'échelle mondiale de l'ICCA », 2016. [En ligne]. Disponible : <https://cefic.org/app/uploads/2019/02/Cefic-ICCA-Guidance-on-Process-Safety-Performance-Indicators.pdf>
- [6] ISOPA. « One Step Ahead - Exotherm management in flexible slabstock foam. » <https://www.isopa.org/product-stewardship/one-step-ahead/> (consulté le 28 juillet 2022).
- [7] ECHA, « ANNEXE 1 à l'appui du Comité d'évaluation des risques (CER) pour l'évaluation des valeurs limites des diisocyanates sur le lieu de travail », 2020. [En ligne]. Disponible : <https://echa.europa.eu/oels-activity-list/-/substance-rev/41207/term>
- [8] P. De Kort, « Échantillonnage de l'air des diisocyanates et des amines aromatiques dans quatre usines de mousse de polyuréthane flexible aux Pays-Bas : rapport d'analyse des diisocyanates », EUROPUR, 2021.
- [9] IFKAN, « Échantillonnage de l'air des isocyanates et des amines dans quatre usines de polyuréthane (PUR) différentes pendant le moulage de mousse PUR à base de TDI », 2017.
- [10] P. De Kort, « Échantillonnage de l'air des diisocyanates et des amines aromatiques dans quatre usines de mousse de polyuréthane moulée flexible : rapport d'analyse des diisocyanates », EURO-MOULDERS, 2021.
- [11] HSE, *EH40/2005 Limites d'exposition sur le lieu de travail*. 2020.
- [12] HSE, « Équipements de protection respiratoire au travail », dans *Un guide pratique*, éd., 2013.
- [13] DGUV, « Regel 112-190 Benutzung von Atemschutzgeräten », 2021. [En ligne]. Disponible : <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/1011>
- [14] INRS, « Les appareils de protection respiratoire : Choix et utilisation », 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206106>
- [15] « EN 529:2005 Appareils de protection respiratoire - Recommandations pour le choix, l'utilisation, l'entretien et la maintenance - Document d'orientation », éd.
- [16] "SELECTIE EN GEBRUIK VAN ADEMHALINGSBESCHERMINGSMIDDELEN" Nederlandse Vereniging voor Arbeidshygiëne, 2001. [En ligne]. Disponible : http://www.arbokennisnet.nl/images/dynamic/Dossiers/Machineveiligheid/D_Persoonlijke_beschermingsmiddelen.pdf
- [17] HSE, « L'effet de la barbe naissante du porteur sur la protection offerte par les masques filtrants de classe 3 (FFP3) et les demi-masques », éd., 2015.
- [18] L. National Research Council Subcommittee on Acute Exposure Guideline, in *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 4*. Washington (DC): National Academies Press (US) Copyright 2004 by the National Academy of Sciences. All rights reserved., 2004.
- [19] H. Suojalehto et P. Cullinan, « Tests de provocation par inhalation spécifiques pour l'asthme professionnel en Europe : une enquête », *European Respiratory Review*, vol. 23, n° 132, p. 266, 2014, doi : 10.1183/09059180.00000414.

