

Défaut d'oxygène : mesures de prévention

L'oxygène est indispensable à la vie humaine. Dans certaines situations professionnelles, l'atmosphère de travail est susceptible d'être appauvrie en oxygène de manière volontaire ou involontaire. De graves altérations de la santé allant jusqu'au décès peuvent alors survenir. Il est donc indispensable de repérer les situations à risque et de prendre les mesures de prévention nécessaires pour une intervention en sécurité.

1. Cycle de l'oxygène dans l'organisme

L'air respirable est composé d'environ 78 %¹ d'azote (N_2) et d'oxygène (O_2), pour 21 %. Le 1% restant se compose de dioxyde de carbone (CO_2), d'hydrogène (H_2), de vapeur d'eau, de gaz rares et de polluants atmosphériques. Lorsque l'altitude s'élève, la proportion d'oxygène reste constante alors que sa pression partielle décroît de manière exponentielle. Il en résulte qu'à 1 700 m d'altitude, la pression partielle d'oxygène équivaut à une concentration au niveau de la mer égale à 17 %.

L'air inspiré entre dans les voies respiratoires et est transporté aux alvéoles pulmonaires dont les parois sont couvertes de capillaires sanguins. L'oxygène ayant une pression partielle plus élevée dans l'air que dans le sang, il

diffuse des alvéoles pulmonaires vers le sang, jusqu'à ce qu'un équilibre soit atteint. Dans sa grande majorité, l'oxygène dans le sang se fixe à l'hémoglobine des globules rouges pour être transporté aux cellules du corps où il sera consommé ; le sang reçoit, en échange, le dioxyde de carbone produit dans les cellules par la consommation d'oxygène. Revenu aux poumons, le sang se décharge de ce dioxyde de carbone, éliminé ensuite dans l'air expiré et le cycle recommence.

L'oxygène est un comburant et un oxydant puissant qui réagit avec les sucres que nous assimilons. Ces réactions d'oxydation libèrent de l'énergie qui est dépensée pour assurer la synthèse de molécules biologiques comme les protéines ou lors de processus physiques tels que la contraction musculaire.

2. Manque d'oxygène et conséquences sur la santé

Lorsqu'une personne pénètre dans une atmosphère fortement appauvrie en oxygène, la concentration en oxygène dans le sang artériel chute en quelques secondes. La différence de pression partielle d'oxygène entre les tissus cellulaires et le sang qui les irrigue ne favorise plus le transfert d'oxygène entre le sang et les cellules. Les organes ne disposent plus de l'énergie nécessaire à leur fonctionnement. La charge de travail cardiaque augmente pour pallier le déficit d'oxygène accélérant ainsi sa consommation. L'abaissement du taux d'oxygène peut donc se traduire par de sérieuses conséquences sur la santé de l'individu qui en est victime (voir tableau 1 page suivante). Ce déficit en oxygène altère aussi bien le fonctionnement des organes que les fonctions cognitives.

1. Dans l'ensemble du document, les teneurs en gaz sont exprimées en pourcentage volumique.

L'**hypoxie** désigne une diminution de la quantité d'oxygène distribuée par le sang aux tissus et l'**anoxie** correspond à un arrêt complet temporaire ou définitif de ce transport.

L'**asphyxie** regroupe les conséquences physiologiques d'une hypoxie ou d'une anoxie.

Un individu atteint d'asphyxie rapide est incapable de reconnaître les faits et la gravité de sa situation. L'asphyxie provoque une dépression progressive des fonctions du système nerveux central, affectant aussi bien les possibilités d'introspection et de discrimination que la logique et le jugement. Des vertiges et de l'euphorie peuvent être ressentis par l'individu et l'empêcher de reconnaître une hypoxie grave.

Au fur et à mesure que l'asphyxie se développe, les fonctions sensorielles diminuent avec une baisse des acuités visuelle et auditive. Une faiblesse musculaire survient ensuite avec une absence de coordination des mouvements accompagnée d'une perte de conscience. En général, cette séquence de réactions anormales dure quelques minutes tout au plus et passe inaperçue pour la victime.

3. Situations d'appauvrissement de la teneur en oxygène

Différents phénomènes ou situations amènent à une diminution de la teneur en oxygène dans l'air inhalé.

• **La respiration** : la qualité de l'air se dégrade par production de dioxyde de carbone. La diminution de la concen-

tration en oxygène dépend du nombre de personnes dans la zone considérée, de leur débit respiratoire qui augmente avec l'intensité de leurs efforts et du renouvellement de l'air de la zone.

• **La combustion** : cette réaction produit majoritairement du dioxyde et du monoxyde de carbone qui possèdent une toxicité intrinsèque. Le phénomène de combustion intervient régulièrement sur un lieu de travail lors de travaux par points chauds (soudage, meulage, tronçonnage...), d'utilisation de moteurs thermiques (chariots, groupes électrogènes, outils portatifs...) ou d'appareils de chauffage (chaudières, chauffages radiants...). Il survient aussi lors d'incidents comme les incendies.

• **La corrosion de surfaces métalliques** : cette réaction d'oxydation lente produit de l'hydrogène en présence d'eau. La diminution de la teneur en oxygène s'opère principalement dans des capacités (bidons, réservoirs, réacteurs, bacs de stockage...). La production éventuelle d'hydrogène peut être à l'origine d'un risque d'explosion en cas de présence d'une source d'inflammation (travaux par points chauds, par exemple).

• **L'adsorption sur un support adapté** : certains médias sont utilisés dans l'objectif de capter l'azote ou l'oxygène. L'azote ou l'oxygène peuvent être séparés par adsorption sur tamis moléculaire ou par passage au travers d'une membrane spécifique. En fonction de l'objectif de l'opération, une atmosphère appauvrie ou enrichie en oxygène est présente. Les variations de température ou le vieillissement du média adsorbant peuvent entraîner

une désorption de l'azote aboutissant à un appauvrissement en oxygène dans le réseau et la capacité contenant le média.

• **La présence de certains micro-organismes** : ils consomment l'oxygène pour dégrader la matière organique (copeaux de bois, céréales, eaux usées...) stockée, par exemple, dans des silos, des cales de navires ou des réservoirs d'eaux usées. En l'espace de quelques jours, l'oxygène est consommé et des gaz toxiques sont formés.

• **L'utilisation de dioxyde de carbone**, sous forme supercritique ou à l'état solide sous forme de glace carbonique. Le dioxyde de carbone supercritique est un état physique du dioxyde de carbone atteint lorsque sa température et sa pression sont supérieures à celles de son point critique, respectivement 74 bars et 31 °C. Ces conditions lui confèrent des propriétés de diffusion ou de viscosité proches de celles des gaz, une densité proche de celle des liquides et un pouvoir solvant voisin de celui des solvants organiques. Il est utilisé par exemple pour :

- l'extraction d'agents aromatiques, d'antioxydants ou de polluants dans l'industrie agroalimentaire, cosmétique ou pharmaceutique,
- l'imprégnation du bois ou du cuir,
- la production de poudres pharmaceutiques en tant que solvant ou comme milieu de synthèse,
- la substitution des solvants chlorés dans le nettoyage à sec ou dans le secteur de la mécanique.

Dans ces différentes applications, les machines utilisant du dioxyde de carbone supercritique sont réputées

Tableau 1 – Teneurs en oxygène dans l'air et effets sur l'homme
(données valables à une altitude inférieure à 700 mètres)

Teneurs de l'atmosphère en oxygène (en %) à pression atmosphérique	Effets sur l'homme
17-12	Accélération du rythme cardiaque et respiratoire, troubles de la vigilance, euphorie, céphalées, légère incoordination.
12-10	Altération du jugement, incoordination, fatigue musculaire, cyanose.
10-6	Nausées, vomissements, léthargie, incoordination importante, ralentissement du rythme respiratoire, coma.
< 6	Respiration irrégulière et haletante, convulsions, coma, décès.

étanches. Néanmoins, des fuites ne peuvent être écartées du fait de la présence de soupapes ou d'évents de surpression.

La glace carbonique (appelée aussi glace sèche, neige carbonique ou carboglace) est régulièrement utilisée pour son action de maintien au froid, le transport d'échantillons biologiques ou de produits alimentaires, la surgélation d'aliments et le refroidissement de réactions chimiques. La glace carbonique est aussi projetée sous forme de granulés, pour nettoyer les équipements électroniques ou électriques ou les monuments (voir photo 1).

- **La formation de vapeurs** : les liquides émettent plus ou moins de vapeurs en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques : un litre d'eau surchauffée à 180 °C produit ainsi 233 l de vapeur à pression atmosphérique.
- **L'utilisation de gaz** : ils sont généralement mis en œuvre sous pression, sous forme liquide sous pression (gaz liquéfié), ou sous forme cryogénique. Par exemple :
 - une bouteille d'un litre d'azote comprimé à 200 bars libère 200 l d'azote gazeux à la pression atmosphérique,
 - un litre de gaz de pétrole liquéfié ou GPL (mélange de butane et propane) à environ 6 bars produit 250 l de gaz à pression atmosphérique,
 - un litre d'azote liquide produit 693

litres d'azote gazeux à 20 °C à pression atmosphérique.

Certains gaz et vapeurs ont également des effets sur la santé, voire des propriétés d'inflammabilité, qui ajoutent des risques toxicologiques ou d'incendie/explosion au risque d'anoxie. Les gaz ou vapeurs ont une grande variété d'usages :

- comme gaz inertes (azote, argon, hélium...) à des fins d'appauvrissement en oxygène pour limiter le risque d'incendie/explosion dans un local ou une capacité (réacteurs, silos...). Ils sont utilisés aussi pour éviter l'oxydation des surfaces ou des milieux réactionnels (procédés de soudage, fabrication additive...). Les gaz inertes peuvent aussi alimenter des actionneurs pneumatiques soit directement, soit en tant que secours du réseau d'air comprimé,
- comme réactifs pour la fabrication de molécules dans l'industrie pharmaceutique, chimique ou pétrochimique,
- comme carburants pour alimenter les moteurs thermiques (méthane, propane, butane, essence, fuel...),
- sous forme cryogénique, dans les activités de laboratoire, lors de préparations culinaires en restauration, pour la conservation d'échantillons biologiques, le refroidissement de matériaux pour faciliter leur fragmentation (cryobroyage) (voir photo 2), la maintenance de canalisations pour intervenir sur des conduits impossibles à isoler

par vannes ou le maintien de propriétés supraconductrices des aimants (IRM, accélérateurs de particules).

Les conditions de mise en œuvre (pression et température) ont une forte incidence sur la capacité à générer une atmosphère appauvrie en oxygène. Par exemple, le déversement d'un litre de produit peut générer, à pression atmosphérique et à température ambiante, un volume de gaz de plusieurs centaines de litres (voir tableau 2).

Tableau 2 – Point d'ébullition et volume de gaz après évaporation d'1 litre de liquide cryogénique à 20 °C, 1 atm

Fluide cryogénique	Température d'ébullition (en °C)	Volume de gaz (en l)
Hélium	-269	750
Azote	-196	693
Argon	-186	839
Méthane	-161	635

Différents scénarios aboutissent à une réduction du taux d'oxygène d'un local ou d'une zone de travail, notamment :

- les phases de remplissage ou de vidange des capacités, à la sortie des événements de respiration ou de surpression, lors de purges ou de prises d'échantillon,
- dans le cas d'un liquide cryogénique, le débordement d'un contenant en phase de remplissage,
- la rupture accidentelle d'un contenant de transport,
- la fuite ou la rupture d'un équipement ou d'une tuyauterie.

- **Les espaces confinés** : ce sont des espaces où l'atmosphère peut présenter des risques pour ceux qui y pénètrent de par leur configuration, leur manque d'aération, les composés chimiques présents, les équipements y fonctionnant ou les travaux s'y déroulant. Les espaces confinés sont fréquemment le siège d'accidents graves voire mortels, causés notamment par le manque d'oxygène. Leur gravité est accentuée par une accessibilité restreinte, défavorable à une libre circulation de l'air et à l'intervention des secours.



Photo 1 – Nettoyage cryogénique à la carboglace de moules en plasturgie

Exemples de calcul de teneur résiduelle en oxygène dans un volume

Exemple 1 : 50 litres d'azote comprimé à 200 bars équivalent à 10 m³ d'azote gazeux pur à la pression normale. Si une bouteille renfermant ce volume d'azote sous pression se vide dans un local de 5 x 5 x 2,60 m, soit 65 m³, la concentration en oxygène de ce local, en l'absence d'apport d'air neuf, est calculée de la manière suivante :

$$C_{O_2} = 0,21 \times \left(1 - \frac{10}{65}\right) \times 100, \text{ soit une teneur en oxygène de } 17,8 \, \%.$$

Si la pièce avait des dimensions de 3 x 3 x 2,60 m, soit 23,4 m³, la teneur en oxygène ne serait plus que de 12 %.

Exemple 2 : l'argon est utilisé comme gaz protecteur en soudage. Si un poste de soudage consomme de l'argon à un débit de consigne de 40 l.min⁻¹ et est utilisé dans une capacité de 6 m³, le volume d'argon présent est de 4,4 m³ au bout de 1 h 50. En l'absence d'apport d'air neuf, la teneur maximale en argon est donc de 4,4/6*100 = 73 %. La concentration minimale d'oxygène est alors égale à :

$$C_{O_2} = 0,21 \times \left(1 - \frac{4,4}{6}\right) \times 100, \text{ soit une teneur en oxygène de } 5,6 \, \% \text{ dans le volume considéré après } 1 \text{ h } 50.$$

4. Démarche de prévention

Si l'inhalation d'un air fortement appauvri en oxygène aboutit systématiquement à des dommages irréversibles sur la santé, les conséquences d'une exposition chronique à une atmosphère légèrement déficitaire en oxygène sont encore mal appréhendées. Quelle que soit la situation d'exposition à une atmosphère appauvrie en oxygène, l'adoption de mesures de prévention s'avère donc nécessaire.

Une analyse préalable de la situation de travail et de ses risques aidera à définir l'organisation à mettre en place en matière de procédures à respecter et de moyens à engager pour intervenir en toute sécurité.

La démarche de prévention la plus efficace est d'intégrer la prise en compte des risques, le plus en amont possible, dès la phase de conception d'un bâtiment ou d'une installation. Elle sera déclinée de la manière suivante :

- supprimer le risque par un changement de procédé par exemple,
- sinon supprimer ou limiter l'exposition en privilégiant la protection collective (ventilation mécanique),
- si ces mesures sont insuffisantes, équiper les intervenants avec un appareil de protection respiratoire isolant à adduction d'air.

Les mesures de prévention doivent être adaptées aux différentes situations détaillées dans le chapitre précédent.

Les locaux et situations de travail doivent être conçus de manière à respecter les dispositions aération et assainissement du Code du travail (articles R. 4222-1 à R. 4222-26).

Utilisation de gaz

La mise en œuvre de gaz doit respecter les recommandations relatives à leur production, leur stockage, leur transfert et leur utilisation, à savoir :

- Connaître les caractéristiques physico-

chimiques du produit, sa toxicité et son inflammabilité.

- Concevoir une installation adaptée au gaz prenant en compte sa compatibilité vis-à-vis des matériaux et ses conditions de mise en œuvre.

- Privilégier des réseaux de canalisations rigides et fixées dont les raccords sont soudés et limiter au maximum les tuyaux flexibles.

- Identifier les différents réseaux par un marquage indélébile et installer des détrompeurs pour éliminer le risque d'erreur de connexions.

- Concevoir l'installation de manière à faciliter toutes les interventions, notamment de maintenance. Installer une vanne de sectionnement au départ d'un réseau et à la jonction avec un tuyau flexible. Disposer d'éléments d'isolement avant l'entrée dans chaque local. Pour chaque réseau, mettre en place une vanne de sectionnement d'urgence accessible hors du bâtiment.

- Éprouver l'installation avant mise en service pour s'assurer de son étanchéité.

- Mettre en place une ventilation adaptée. Elle permettra de maintenir à tout instant un taux d'oxygène supérieur à 19 % ; le cas échéant, l'associer à de la détection.

- Ne manipuler les produits sous pression ou sous forme cryogénique, que dans des récipients, des équipements ou des lignes de transfert prévus à cet effet et contrôlés régulièrement.



© C. Almodovar/NRS/2022

■ Photo 2 – Récupération de rebus d'outils par trempe à l'azote liquide

- Ne transporter les produits que dans des récipients et véhicules adaptés.
- Signaler le risque au niveau des accès des zones de travail et de stockage à l'aide de pictogrammes spécifiques (voir encadré *Signalisation*).
- Établir les protocoles d'intervention lors de la maintenance.
- Former et informer les opérateurs sur les risques associés à l'utilisation de gaz et sur les protocoles mis en place en cas d'incident/accident.

Outre le risque d'anoxie, les gaz peuvent présenter d'autres risques spécifiques liés à leur toxicité, à la pression ou la température de mise en œuvre. Notamment dans le cas de gaz liquéfiés ou de fluides cryogéniques, les températures extrêmement basses peuvent générer des brûlures. Ces risques doivent être pris en compte, mais ne sont pas traités dans ce document.

Espaces confinés

Les interventions en espaces confinés (voir photo 3) répondent à un cahier des charges strict en matière de prévention, détaillé dans la brochure ED 6184 (voir *Pour en savoir plus*). Elles doivent notamment respecter les dispositions suivantes en termes de prévention du manque d'oxygène :

- Évaluer la nécessité d'intervenir dans l'espace confiné.
- Élaborer des procédures d'intervention en espace confiné.
- Établir, en cas d'intervention d'entreprise extérieure, un plan de prévention stipulant le risque d'appauvrissement en oxygène, de présence de gaz dangereux pour la santé ou susceptible de générer une atmosphère explosive.
- Désigner une personne en charge de la surveillance qui reste en sécurité en dehors de l'espace confiné.
- Repérer et baliser la zone de travail.
- Consigner les énergies et les fluides.
- Mettre en place une ventilation mécanique adaptée.
- Vérifier au préalable le taux d'oxygène et la teneur en gaz et équiper les intervenants avec des détecteurs de gaz avec alarme, régulièrement vérifiés et calibrés.



■ Photo 3 – Intervention en réseau d'eau

- Établir, à destination des intervenants, un permis de pénétrer reprenant les dispositions du plan de prévention ou celles propres à l'entreprise en cas d'opération faite en interne.
- Si les mesures techniques et organisationnelles ne permettent pas d'exclure le risque d'apparition soudaine d'une atmosphère dangereuse, équiper les intervenants d'un appareil d'évacuation d'urgence (cagoule d'évacuation ou masque autosauveur).

- Si les mesures techniques et organisationnelles ne permettent pas d'exclure la présence d'une atmosphère dangereuse, équiper les intervenants d'un appareil de protection respiratoire isolant (appareil à adduction d'air par exemple).
- Former les intervenants au travail en espace confiné et aux différents équipements nécessaires.

Signalisation

Quelques exemples de panneaux de signalisation à utiliser dans les zones de travail où l'atmosphère peut être appauvrie en oxygène.

■ Pictogramme atmosphère asphyxiante selon la norme NF EN ISO 7010*

■ Autres panneaux non normalisés



**DANGER !
ESPACE CONFINÉ**



* NF EN ISO 7010 : Symboles graphiques
- Couleurs de sécurité et signaux de sécurité -
Signaux de sécurité enregistrés

Pour en savoir plus

Publications INRS

- Ventilation des espaces confinés. Guide pratique de ventilation. ED 703
- Prévention du risque chimique dans les espaces confinés. NT 102, HST
- Les espaces confinés. Assurer la sécurité et la protection de la santé des personnels intervenants. ED 6184
- Espaces confinés. Dossier web INRS, consultable sur www.inrs.fr
- Le stockage des produits chimiques au laboratoire. ED 6015
- Consignations et déconsignations. ED 6109
- Travaux dans une atmosphère appauvrie en oxygène. Préconisations pour la protection des travailleurs et prévention. ED 6126
- Les bouteilles de gaz. Identification, prévention lors du stockage et de l'utilisation. ED 6369
- Aération et assainissement. Aide-mémoire juridique. TJ 5

Autres publications

- Cuves et réservoirs, interventions à l'extérieur ou à l'intérieur des équipements fixes utilisés pour contenir ou véhiculer des produits gazeux, liquides ou solides. Cnam, R 435
- Prévention des accidents lors des travaux en espaces confinés. Cnam, R 447
- Risques sanitaires liés à l'utilisation de l'azote liquide dans le cadre des activités d'assistance médicale à la procréation. Afsset

Fiche INRS élaborée par
E. Silvente et B. Sallé
avec la participation de B. Galland

Détection de l'oxygène

Les capteurs doivent être adaptés à l'environnement dans lequel ils vont être utilisés (température, humidité, polluants présents potentiellement interférents...). Ils doivent être vérifiés au moyen d'un gaz étalon et faire l'objet d'un protocole d'exploitation, notamment pour la gestion des alarmes.

Pour les capteurs d'oxygène, le gaz étalon est en général un mélange de gaz contenant 18 % d'oxygène permettant le déclenchement de l'alarme, généralement réglé à une teneur en oxygène de 19 %.

Les capteurs d'oxygène doivent être préservés d'exposition à de fortes concentrations de solvants et de gaz acides (SO₂, CO₂...). De plus, un fonctionnement prolongé en environnement chaud et sec peut induire un séchage de la cellule par évaporation de l'électrolyte.

Une exposition transitoire à de l'éthanol ou à une forte concentration de dioxyde de carbone peut induire une majoration temporaire de la concentration en oxygène et un long temps de retour du capteur : l'utilisation de solutions hydroalcooliques ou de lingettes désinfectantes à base d'éthanol pour le nettoyage/désinfection est à proscrire, ainsi que l'utilisation de ces détecteurs dans des ambiances où le taux de CO₂ est supérieur à 0,5 %.

Récits d'accidents suite à un manque d'oxygène

issus de la base de données d'accidents du travail Épicéa de l'INRS

• Intervention dans une enceinte où l'oxygène a été consommé par corrosion

Un soudeur et un ouvrier étaient chargés de l'ouverture des trous d'homme d'une barge qui devait subir une révision générale. Le soudeur est descendu récupérer un couvercle tombé au fond du caisson lors de son démontage. Le caisson étant étanche et l'oxygène de l'air ayant été consommé par corrosion, le soudeur a perdu connaissance en raison du manque d'oxygène. L'événement ayant eu lieu pendant la pause déjeuner, son collègue n'a trouvé personne pour prévenir les secours et a tenté de lui porter assistance, mais il a succombé à son tour par asphyxie en descendant dans le caisson. Lors de la reprise du travail, les corps inanimés ont été découverts. Prévenus immédiatement, les secours n'ont pas pu ranimer les deux victimes.

• Manipulation d'azote liquide

Un employé remplissait des réservoirs de stockage d'échantillons biologiques avec de l'azote liquide, dans une salle de stockage non ventilée. De l'azote s'est évaporé lors de ces manipulations et a entraîné une réduction du taux d'oxygène dans le local. L'employé est retrouvé décédé par asphyxie.



Institut national de recherche et de sécurité
pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles
65, boulevard Richard-Lenoir 75011 Paris • 01 40 44 30 00 • info@inrs.fr

Édition INRS ED 155

1^{re} édition | janvier 2024 | 1 000 ex. | ISBN 978-2-7389-2867-2
Mise en page : Valérie Latchague-Causse | Imprimeur : Monsoise

L'INRS est financé par la Sécurité sociale
Assurance maladie - Risques professionnels

www.inrs.fr   