

## Décryptage

# MÉTROLOGIE EN TEMPS RÉEL DE SUBSTANCES CHIMIQUES AU POSTE DE TRAVAIL: INTÉRÊTS ET LIMITES

Les gaz, vapeurs et aérosols peuvent aujourd'hui être mesurés en temps réel à un poste de travail. Les techniques utilisées sont nombreuses et, pour certaines, de plus en plus simples à utiliser. Après avoir présenté les enjeux liés à l'utilisation de ces techniques pour la sécurité et la santé au travail, cet article en explique les intérêts et les limites par type de substances chimiques (gaz/vapeurs et aérosols).

**REAL-TIME METROLOGY OF CHEMICALS AT THE WORK STATION: ADVANTAGES AND LIMITATIONS - Gases, vapours, and aerosols can now be measured in real time at a work station. Numerous techniques are used, and some of them are increasingly simple to use. After presenting the issues related to using these techniques for occupational safety and health, this article explains the advantages and limitations of them by type of chemical substance (gases/vapours and aerosols).**

SÉBASTIEN  
BAU,  
OLIVIER  
WITSCHGER  
INRS,  
département  
Métrologie  
des polluants

BRUNO  
GALLAND,  
PATRICK  
MARTIN  
INRS,  
département  
Ingénierie  
des procédés

L'essor des techniques, associé à une baisse des coûts et une miniaturisation des composants, permet de disposer aujourd'hui d'une offre commerciale assez large d'appareils de mesure en temps réel de substances chimiques. Un effort particulier des fabricants pour produire des appareils de plus en plus simples à utiliser et toujours plus attrayants a conduit des utilisateurs à s'en équiper, sans toujours bien appréhender les avantages, inconvénients et limites de ces outils. Les techniques de mesure en temps réel de composés chimiques dans l'atmosphère des lieux de travail permettent de répondre à des enjeux:

- de sécurité des opérateurs et des installations;
- de prévention, à travers les études de postes, l'aide à la stratégie de prélèvements, l'aide à la validation de protections collectives et la recherche de fuites.

### La sécurité, un enjeu majeur pour les personnes et les installations

L'objectif est de détecter le plus rapidement possible l'émergence d'un danger pour les personnes ou les installations. Les trois principaux risques qui font l'objet d'une surveillance constante sont le manque d'oxygène, la présence de composés toxiques, irritants ou corrosifs et enfin la présence d'une atmosphère inflammable ou explosive. Qu'ils soient à poste

fixe ou portables, ces appareils ont pour unique mission de détecter la concentration d'une substance et de déclencher des alarmes et des actionneurs dès qu'un seuil est atteint. L'offre commerciale concerne pour l'essentiel les substances chimiques sous forme de gaz et vapeurs.

Bien qu'assurer la sécurité soit un objectif bien défini et compréhensible par tous, le choix des technologies, le nombre et le positionnement des détecteurs doivent faire l'objet d'une étude rigoureuse permettant l'élaboration d'un cahier des charges précis et documenté.

### La prévention, un enjeu majeur pour l'amélioration des conditions de travail

La métrologie en temps réel offre également de nombreuses applications en prévention des risques professionnels. Sans être exhaustif, il est possible de distinguer au moins trois applications intéressantes.

### Les études de postes

Équiper un opérateur d'un appareil de mesure individuel doté d'un enregistreur de données interne permet de réaliser un profil d'exposition au cours du temps. Ce dernier peut être corrélé aux différentes activités ou tâches réalisées en synchronisant des images vidéo aux valeurs de concentration mesurées grâce à l'utilisation d'outils informatiques tels

que Captiv<sup>1</sup>. Il est alors possible de mettre en évidence l'origine des pics d'exposition de l'opérateur. De même, le couplage de mesures en temps réel obtenues à l'aide d'un ou de plusieurs appareils placés en différents points d'un local de travail permet de déterminer un profil spatial de pollution en fonction des procédés qui s'y déroulent.

La réglementation étant actuellement fondée sur le prélèvement des substances chimiques et leur analyse en différé (Cf. Encadré 1), l'usage des techniques de mesure en temps réel ne permet pas de statuer sur le respect ou non des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP).

### L'aide à la mise en place d'une stratégie de prélèvement

Mener une campagne de mesures d'exposition à une substance chimique donnée doit répondre à différents critères détaillés notamment dans les fiches MétroPol<sup>2</sup>. Une question récurrente concerne la stratégie de prélèvement, en particulier en termes de positionnement et de période d'échantillonnage. L'utilisation d'un appareil de mesure en temps réel permet de réaliser, par exemple, une estimation des quantités de polluants présents aux postes de travail en fonction des moments de la journée et des procédés actifs. Ainsi, la personne en charge de la campagne de prélèvements disposera d'informations pertinentes quant à l'emplacement et à la période des mesures d'exposition à effectuer.

### L'aide à la validation de systèmes de protection collective

Sans constituer une méthode métrologique de qualification d'un système de protection collective, les appareils de mesure en temps réel permettent de s'assurer de l'efficacité d'un système de captage. De plus, le recours à des appareils à temps de réponse court permet de localiser d'éventuelles fuites ou procédés émissifs et d'apporter une réponse rapidement, à condition que l'instrument soit bien choisi et l'interprétation de son signal aisée.

### Gaz et vapeurs

Les technologies employées et les différences de comportement entre les particules et les gaz conduisent à distinguer, d'une part, les appareillages destinés à la mesure des gaz et vapeurs et, d'autre part, ceux pour la mesure des aérosols. L'offre commerciale en détection et analyse en temps réel de gaz et de vapeurs dans l'atmosphère est abondante. Seuls les détecteurs sont traités dans cet article. Les analyseurs, comme les chromatographes en phase gazeuse ou infrarouge transportables, nécessitant encore souvent du personnel très qualifié pour leur mise en œuvre et des installations de laboratoire pour leur entretien et étalonnage, ne sont pas abordés.



© B. Galland pour l'INRS

Les diverses technologies disponibles (Cf. Tableau 1) couvrent de nombreux composés gazeux d'une atmosphère, pour des mesures exprimées le plus souvent en concentration volumique, du ppb<sub>v</sub><sup>3</sup> au %<sub>v</sub><sup>4</sup>. Il est ainsi possible de détecter avec suffisamment de précision et de rapidité la concentration de composés ayant un impact sur la santé ou la sécurité des opérateurs, allant de la mesure du taux d'oxygène à celle d'un composé toxique ou inflammable, pour des coûts d'acquisition des appareils de quelques centaines à quelques milliers d'euros. Les applications en hygiène du travail de tels systèmes sont en plein essor.

Même si les appareils semblent d'utilisation aisée et répondre aux besoins des acteurs de la prévention, il est impératif, avant toute acquisition, de se poser un certain nombre de questions afin d'établir un cahier des charges. Outre les caractéristiques métrologiques des détecteurs, il convient de définir le champ d'utilisation et les variables d'environnement qui pourraient dégrader leurs performances, voire rendre l'appareil inopérant. Par exemple, un capteur catalytique, qui détecte la présence de certains composés inflammables, fonctionne sur le principe de la détection d'une oxydation au niveau de son élément sensible. Or, pour que cette oxydation se réalise et soit détectée, il faut au minimum entre 10 et 12% d'oxygène dans l'atmosphère investiguée. Par conséquent, vérifier la présence de gaz ou de vapeurs inflammables, avec un détecteur à technologie catalytique, dans une cuve préalablement rendue inerte avec un gaz neutre comme l'azote, est inutile, voire dangereux. Le recours à un détecteur infrarouge, dont la mesure est indépendante du taux d'oxygène présent, constitue alors une solution mieux adaptée.

Investigation de la quantité de polluant dans un conteneur maritime avec un détecteur à photo-ionisation portable. L'opérateur est également équipé d'un détecteur personnel de sécurité porté à la ceinture.



Une autre difficulté majeure est de s'assurer que la présence éventuelle d'autres composés gazeux ne viendra pas interférer avec la mesure ou détériorer l'élément sensible du capteur ( vapeurs de silicone pour certains capteurs catalytiques). De manière générale, les technologies mises en œuvre par les fabricants ne sont pas totalement sélectives. S'il est couramment admis qu'un détecteur à photo-ionisation mesure une grande partie des vapeurs de solvants, il est aussi fréquent de constater que les détecteurs de CO ou d'H<sub>2</sub>S, par exemple, sont considérés comme sélectifs, ce qui est loin d'être le cas. Un interférent peut avoir un effet positif (majoration de la concentration lue) ou négatif (minoration de la concentration lue) sur la réponse d'un capteur. À noter que les fabricants de capteurs disposent de plusieurs modèles d'une même technologie pour la mesure d'un gaz donné, chaque modèle étant destiné à une application particulière.

sur un poste de travail est un objectif auquel les détecteurs de gaz répondent parfaitement. L'évolution des connaissances concernant les effets sur la santé d'un composé chimique à partir d'un certain seuil de concentration a récemment conduit à la notion de valeur plafond. La surveillance du non-dépassement de cette valeur ne peut être réalisée qu'à l'aide d'outils temps réel à lecture directe, comme les détecteurs de gaz. Pour exemple, l'Anses<sup>5</sup> a récemment conseillé une valeur plafond pour le monoxyde de carbone de 200 ppm<sub>v</sub> et recommande le recours à des détecteurs équipés d'une cellule électrochimique pour la surveillance de ce seuil. Enfin, les performances satisfaisantes de ces appareils permettent d'estimer l'exposition d'opérateurs à des polluants, dans la mesure où les règles de bonnes pratiques sont respectées et les appareils étalonnés.

**TABLEAU 1** →  
Principales technologies pour la détection de gaz et de vapeurs.

EXEMPLES DE TECHNOLOGIE	OXYGÈNE	GAZ INORGANIQUES	GAZ / VAPEURS ORGANIQUES	GAZ / VAPEURS INFLAMMABLES
Détecteur électrochimique à électrolyte liquide ou solide	++	++	-	--
Détecteur à photo-ionisation (PID)	--	-	++	+
Détecteur catalytique	--	--	--	++
Détecteur infrarouge (IR)	--	+	-	++
Détecteur semi-conducteur (SC)	--	+	++	+

++ Adapté + Quelques applications particulières - Peu adapté -- Non adapté

Un autre point sensible est la vérification et le calibrage des appareils, étapes primordiales pour assurer la validité des résultats obtenus avec les appareillages à lecture directe. La fréquence de cette vérification n'est pas réglementairement fixée; de nombreux fabricants ont développé des solutions permettant à leurs clients de vérifier eux-mêmes le fonctionnement d'un détecteur de gaz, tel que la station de test automatisée. Au contraire, le calibrage d'un détecteur nécessite de disposer d'installations de laboratoire et ne doit être réalisé que si sa vérification a révélé une réponse hors tolérances ou si le détecteur a subi un incident de fonctionnement.

Les avantages de ces technologies, notamment leur capacité à estimer en temps réel une concentration de gaz dangereux, rendent incontournable leur utilisation en tant que système de sécurité. Pour ce qui est d'une utilisation en hygiène du travail, les avantages sont aussi nombreux. La mesure de la concentration d'un composé chimique par une technique en temps réel est moins précise que lorsque celle-ci est réalisée par un laboratoire d'analyses. En revanche, elle procure à l'utilisateur une réactivité certaine pour modifier un poste de travail ou agir sur un procédé. Pouvoir fournir rapidement des pistes d'amélioration sur un procédé émissif ou

### Aérosols

Sur leur lieu de travail, de nombreux salariés ont été, sont et seront exposés à des polluants sous forme de particules dispersées dans l'air (aérosols) qui peuvent entraîner des effets néfastes sur leur santé. Ces particules présentes dans les atmosphères de travail diffèrent de par leur état (solide ou liquide), leur nature (inorganique ou organique) et leur origine (non biologique ou biologique). Elles montrent également une grande diversité en taille, en forme, en composition et en concentration dans l'air.

La taille des particules auxquelles les salariés sont exposés est un élément essentiel à considérer dans l'évaluation des expositions par inhalation aux aérosols, car elle est déterminante dans leur pénétration et leur dépôt dans les voies respiratoires. La gamme de tailles des particules s'étend sur cinq ordres de grandeur, de 10<sup>-3</sup> µm (1 nm) à 100 µm. La taille des particules dépend du processus d'émission, mais également de différents phénomènes physiques entrant en jeu durant leur transport dans l'air, de la source jusqu'à la zone respiratoire des salariés (Cf. Figure 1, partie supérieure). Les particules de combustion ou issues de procédés thermiques (soudage, découpe laser, métallisation, etc.) sont majoritairement ultrafines (10 à 50 nm)

et se combinent rapidement à d'autres particules pour former des particules plus grosses (agglomérats). Les aérosols d'origine biologique, tels que les bactéries, levures ou moisissures en suspension dans l'air, sont généralement produits à la suite du brassage d'un matériau pulvérulent, de sorte que les particules émises sont supérieures à 0,2 µm. Les opérations de mise en œuvre de poudres manufacturées produisent des particules sur une large gamme de tailles, comprises entre 0,01 et 20 µm. Ces particules peuvent être composées d'agrégats de particules inférieures à 100 nm s'il s'agit de nanomatériaux. Les opérations mécaniques - usinage, ponçage, polissage, perçage... - sont à l'origine de particules, d'agrégats et/ou d'agglomérats, sur la gamme 0,1 à 20 µm, auxquels de nombreux opérateurs sont potentiellement exposés.

L'échelle des concentrations est extrêmement vaste: elle comprend huit ordres de grandeur pour les concentrations en masse (entre  $10^{-6}$  mg/m<sup>3</sup> et  $10^2$  mg/m<sup>3</sup>) et cinq ordres de grandeur pour les concentrations en nombre (entre  $10^2$ /cm<sup>3</sup> et  $10^7$ /cm<sup>3</sup>).

Finalement, sur un lieu de travail donné, l'aérosol auquel les salariés sont exposés est un mélange complexe de particules très diverses et seule une fraction de cet aérosol (l'aérosol cible), de composition chimique donnée, demande à être mesurée et caractérisée. Cette distinction entre l'aérosol cible et le reste (l'aérosol de fond) est un élément indispensable à considérer dans une stratégie de mesurage des expositions.

La grande diversité et la complexité des aérosols impliquent qu'il n'existe pas de technique de mesure unique ou de méthode universelle pour les caractériser. La combinaison de différentes méthodes pour la classification et la détection des particules conduit à une grande variété d'instruments (Cf. Figure 1, partie inférieure). Outre la gamme de tailles des particules analysées et le signal de base mesuré, le caractère individuel, portable ou transportable des différents instruments disponibles sur le marché est également indiqué. Deux grandes catégories sont définies: les instruments à visée terrain et ceux à visée recherche qui requièrent un haut degré d'expertise, tant pour leur mise en œuvre que pour l'interprétation des résultats de mesures.

Les techniques de mesure des aérosols en temps réel reposent sur des principes plus ou moins complexes et certaines ont été développées il y a plusieurs dizaines d'années. Toutes sont fondées sur un prélèvement dit actif, c'est-à-dire que l'échantillon d'aérosol est aspiré au sein de l'instrument par l'intermédiaire d'une pompe. Pour les techniques de mesure dites intégrales (ne donnant pas d'information quant à la granulométrie de l'aérosol, en bleu sur la figure 1), la détection des particules peut se faire suivant une méthode optique, électrique, jauge

bêta ou encore piézo-électrique. Les techniques de mesure résolues en taille intègrent, quant à elles, une étape de classification en dimension préalablement à la détection (en vert sur la figure 1). Cette classification peut se faire suivant une méthode inertielle, électrique ou encore optique.

Une des caractéristiques partagées par la quasi-totalité des techniques de mesure en temps réel est leur non-spécificité par rapport à la nature chimique des particules. En d'autres termes, aucune des techniques présentées dans la figure 1 ne permet de déterminer, dans l'aérosol mesuré, la fraction des particules cibles. Or, pour toutes les substances chimiques sous forme d'aérosol, la composition chimique reste une caractéristique essentielle à déterminer.

En règle générale, les instruments sont calibrés en taille et/ou en concentration à l'aide d'aérosols de référence. Par conséquent, leur réponse pour des aérosols réels est sensiblement différente, car de

## ENCADRÉ 1

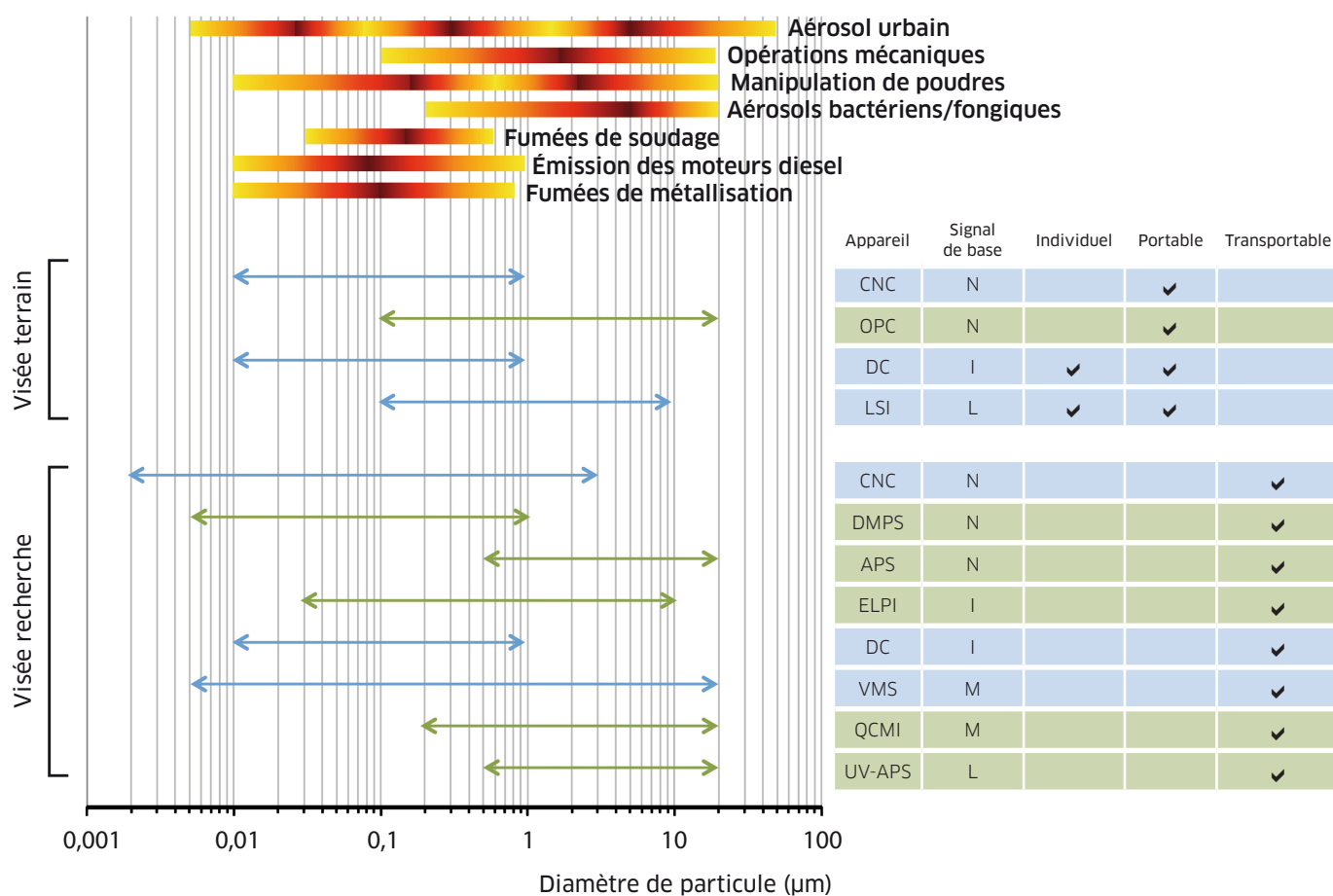
### CONTEXTE RÉGLEMENTAIRE

**Les mesures d'exposition professionnelle aux agents chimiques sont basées sur un prélèvement du composé concerné pendant une période de temps donnée (15 minutes ou 8 heures) dans la zone respiratoire du salarié. La concentration moyenne du polluant, résultant de l'analyse en différé de l'échantillon, est comparée à la VLEP correspondante, valeur réglementaire pouvant être contraignante ou indicative.**

**Ces valeurs sont rassemblées dans l'aide-mémoire technique INRS (ED 984, 28 p., 2012). L'ensemble des méthodes et des dispositions relatives à l'évaluation, au contrôle et à la maîtrise du risque chimique reposent sur ces principes fondamentaux (concentration massique, composition chimique).**

nombreux paramètres influent: taille, forme, densité, état de charge électrique, état d'agrégation, niveau de concentration, indice de réfraction, etc. L'étude de la réponse de ces techniques vis-à-vis d'aérosols d'essais représentatifs repose sur des travaux certes complexes, mais indispensables en vue de proposer demain des méthodes de mesure en temps réel adaptées. Ces travaux ne sont cependant généralement pas conduits par les sociétés qui développent et commercialisent ces techniques, mais par les laboratoires de recherche en métrologie des aérosols. Par ailleurs, l'échantillonnage des aérosols ainsi que les pertes dans les lignes de prélèvement étant des problématiques générales à la mesure des aérosols, elles concernent également la métrologie en temps réel. Si ce point est souvent négligé, notamment en raison de la facilité avec laquelle une mesure peut être réalisée à l'aide d'un instrument en temps réel, il est important de noter que le résultat peut être fortement biaisé par ces phénomènes.





CNC: condensation nucleus counter (compteur de noyaux de condensation)  
 OPC: optical particle counter (compteur optique de particules)  
 DC: diffusion charger (chargeur par diffusion)  
 LSI: light scattering instrument (photomètre)  
 DMPS: differential mobility particle sizer (spectromètre de mobilité électrique)  
 ELPI: electrical low pressure impactor (impacteur basse pression à mesure électrique)  
 APS: aerodynamic particle sizer (spectromètre aérodynamique)  
 VMS: vibrating mass sensor (microbalance vibrante)  
 QCMD: quartz crystal microbalance impactor (impacteur en cascade à microbalance)  
 UV-APS: ultra-violet aerodynamic particle sizer (spectromètre à fluorescence)  
 N: nombre  
 I: courant électrique  
 L: intensité lumineuse  
 M: masse

du moins concentré  
 au plus concentré

**FIGURE 1 ↑**  
 Gammes de tailles des aérosols pouvant être rencontrés et techniques de mesure en temps réel disponibles dans le commerce. En bleu: technique de mesure intégrale; en vert: technique de mesure résolue en taille.

### Conclusion

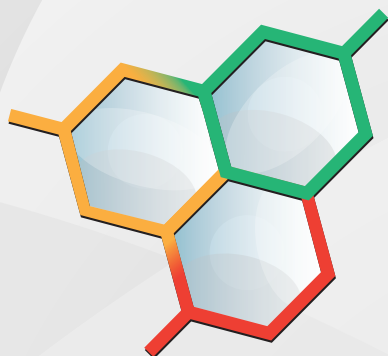
Au-delà de la question des performances, les travaux réalisés par les laboratoires de métrologie doivent également aboutir à des modes opératoires pertinents pour les utilisateurs, intégrant des protocoles pour la vérification et le nettoyage des instruments.

Par ailleurs, la métrologie des substances chimiques en temps réel ne saurait être véritablement déployée en hygiène du travail sans que des outils opérationnels d'interprétation des données ne soient développés en laboratoire, validés sur le terrain et testés par les futurs utilisateurs.

Ainsi, faire progresser la connaissance dans le domaine de la métrologie en temps réel des subs-

tances chimiques au poste de travail et promouvoir son déploiement et ses applications concrètes de prévention sont essentiels dans le processus de compréhension, de gestion et d'information sur les risques professionnels d'exposition par inhalation. ●

1. Centrale d'acquisition de la pollution au travail informé par vidéo.
2. La base de données MétroPol est un recueil de méthodes de prélèvement et d'analyse de l'air pour l'évaluation de l'exposition professionnelle aux agents chimiques. Elle est consultable sur [www.inrs.fr](http://www.inrs.fr).
3. ppb<sub>v</sub>: partie par milliard volumique.
4. %<sub>v</sub>: pourcentage volumique.
5. Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.



# SEIRICH

## Évaluer le risque chimique

# PARTICIPEZ À LA JOURNÉE NATIONALE D'INFORMATION

LE 15 SEPTEMBRE 2015, DE 10 H 00 À 17 H 00

CNAMTS 50 avenue du Professeur André Lemierre 75986 Paris cedex 20

Inscription sur [www.inrs-seirich2015.fr](http://www.inrs-seirich2015.fr)

Contact [seirich2015@inrs.fr](mailto:seirich2015@inrs.fr)

*Vous aimeriez avoir un logiciel gratuit compatible avec le règlement CLP pour...*

- ✓ réaliser votre inventaire des produits chimiques et des procédés émissifs
- ✓ hiérarchiser vos situations de travail, produits et procédés selon leur niveau de risque
- ✓ obtenir des conseils techniques et réglementaires
- ✓ suivre vos actions de prévention

**SEIRICH est fait pour vous !**