

## Décryptage

# RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE : QUELS IMPACTS POUR LA SANTÉ AU TRAVAIL ?

Pour limiter les effets du dérèglement climatique néfastes pour l'Homme et pour l'environnement, les États ont fixé des objectifs de neutralité carbone à l'horizon 2050. Cet engagement conduit à des mutations du monde du travail qui impactent la gestion des risques professionnels. Cet article décrypte des moyens d'action pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, leur incidence sur les conditions de travail et les pistes envisagées pour préserver la santé et la sécurité au travail.

*REDUCING GREENHOUSE GAS EMISSIONS: THE IMPACT ON OCCUPATIONAL HEALTH – To limit the dangerous effects of climate change on people and the environment, countries have set carbon neutrality goals for 2050. This commitment has led to changes in the world of work that affect occupational risk management. This article decrypts the means of action to limit greenhouse gas emissions, their effect on work conditions and possible solutions for preserving safety and health at work.*

ÉRIC  
SILVENTE,  
STÉPHANE  
MIRAVAL  
INRS,  
département  
Expertise  
et conseil  
technique

### Contexte

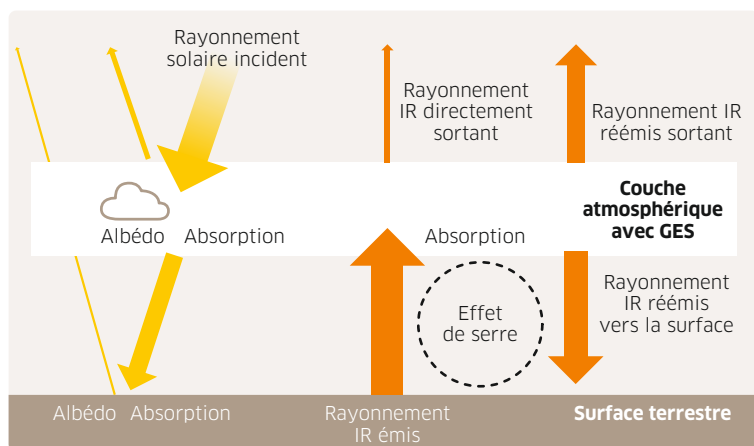
Selon le Giec<sup>1</sup>, la limitation du réchauffement climatique à +1,5°C est essentielle pour éviter des conséquences désastreuses pour la vie humaine et l'environnement. L'objectif est d'atteindre la neutralité carbone<sup>2</sup> dès 2050. Plusieurs scénarios ont été étudiés pour y parvenir et impliquent des mutations tant sur le plan humain que sur le plan technologique.

La réduction de la demande en énergie, répartie entre sobriété et efficacité énergétique, l'évolution de l'industrie *via* la décarbonation de sa production, le développement de puits de carbone artificiels, la nécessité d'augmenter la part du recyclage, la décarbonation de la production d'énergie *via* les énergies renouvelables, sont des exemples de facteurs pris en compte pour atteindre la neutralité carbone.

Le monde du travail est ainsi de plus en plus impacté par les évolutions associées au changement climatique, à travers l'apparition de nouveaux risques liés aux évolutions technologiques et organisationnelles qui sont progressivement



© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2023



**↑ FIGURE 1**  
Principe de l'effet de serre [1]. À gauche, est représenté le rayonnement solaire (vers la surface de la Terre, réfléchi vers l'espace, ou absorbé par l'atmosphère). Au centre, le rayonnement infrarouge émis par la terre ; une autre absorbée par l'atmosphère à un niveau dépendant de la concentration en GES. À droite, le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère ; une partie est renvoyée vers la terre, une autre vers l'espace.

prises en place pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES).

### Les gaz à effet de serre

Les GES sont les gaz présents dans les basses couches de l'atmosphère terrestre qui retiennent une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, suite à son échauffement par le soleil. L'effet de serre est un phénomène naturel qui influe sur la température globale d'équilibre de la Terre, dans la mesure où il module la quantité d'énergie renvoyée par la terre dans l'espace. Il est amplifié par les émissions de GES d'origine anthropique (dues à l'activité humaine) et cette accentuation est à l'origine du réchauffement climatique (Cf. Figure 1).

Les GES ont des propriétés radiatives et des temps de vie dans l'atmosphère variables. Différentes grandeurs sont définies afin de comparer la contribution de ces GES (Cf. Tableau 1) :

- le potentiel de réchauffement global (PRG) est une mesure de la quantité d'énergie absorbée par l'émission d'une tonne d'un gaz sur une période donnée, par rapport à l'émission d'une tonne de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Plus le PRG est élevé pour un gaz donné, plus il réchauffe la Terre par rapport au CO<sub>2</sub> sur cette période. Le PRG dépend

des propriétés radiatives et des durées de vie des gaz dans l'atmosphère.

- le forçage radiatif (W/m<sup>2</sup>) est la différence entre l'énergie radiative reçue et l'énergie radiative émise par la Terre sous l'effet de facteurs d'évolution du climat, tels que la variation de la concentration en GES. Un forçage radiatif positif induit par un GES indique une contribution positive de ce gaz au réchauffement climatique. L'ensemble du forçage radiatif d'origine anthropique s'élève à +3,8 W/m<sup>2</sup> pour les GES en 2019 par rapport à 1750 [2].

Le dioxyde de carbone est le plus important contributeur à l'amplification de l'effet de serre à l'échelle mondiale, du fait des importantes quantités émises dont une part importante est liée aux activités humaines. En France, les principales sources anthropiques d'émissions de GES générés par l'activité humaine sont identifiées dans le Tableau 2.

En France, les émissions de GES relevant des activités industrielles ou tertiaires sont liées pour une majeure partie aux secteurs des transports (33 %), de l'industrie manufacturière et la construction (18 %) et l'industrie de l'énergie (11 %) (Cf. Figure 2). Afin de respecter les accords signés lors de la COP-21<sup>3</sup> (accords de Paris), la France s'est engagée au travers de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) dans un plan de réduction annuelle de ces émissions de GES, avec pour objectif une baisse de 55 % par rapport à 1990 d'ici 2030.

La SNBC vise à actionner entre autres les leviers suivants pour atteindre une économie qualifiée « bas-carbone » :

- la sobriété énergétique en diminuant les consommations et en améliorant l'efficacité énergétique ;
- le recours à une énergie décarbonée par la promotion des énergies renouvelables et de leur stockage ;
- la réduction des émissions des gaz à effet de serre, et en particulier celle du CO<sub>2</sub>.

Ces moyens d'action sont applicables à la majorité des secteurs industriels, avec une efficacité

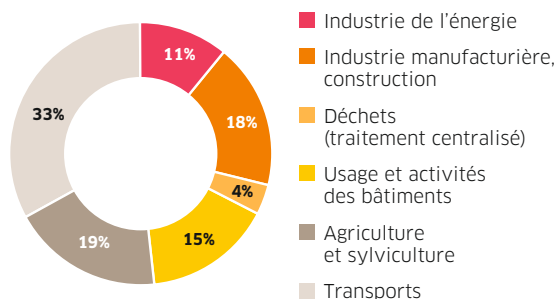
**↓ TABLEAU 1**  
Grandeurs d'impact climatique des GES inscrits au Protocole de Kyoto [2].

GAZ À EFFET DE SERRE	PRG À 100 ANS	CONTRIBUTION À LA MODIFICATION DU FORÇAGE RADIATIF EN 2022 PAR RAPPORT À 1750 (W/M <sup>2</sup> )	DURÉE DE VIE ATMOSPHÉRIQUE (ANS)	CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE EN 2022 (PPB)
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	1	+ 2,17	100	417 000
Méthane (CH <sub>4</sub> )	28	+ 0,65	12	1 912
Protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	265	+ 0,19	120	336
Hydrofluorocarbures (HFC)	De < 1 à 12 400	+ 0,05	100	0,255
Perfluorocarbures (PFC)	De < 1 à 11 100		52	0,092
Hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> )	23 500		3 200	0,011
Trifluorure d'azote (NF <sub>3</sub> )	16 100		740	0,003

GAZ À EFFET DE SERRE (GES)	PRINCIPALES SOURCES DES ÉMISSIONS DE GES
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	Utilisation d'énergies fossiles (transports, procédés industriels, résidentiel / tertiaire...), traitement des déchets (incinération)
Méthane (CH <sub>4</sub> )	Agriculture (fermentation entérique, déjections animales), traitement des déchets, activités gazières
Protoxyde d'azote (N <sub>2</sub> O)	Agriculture (utilisation d'engrais azotés, déjections animales), procédés industriels
Hydrofluorocarbures (HFC)	Réfrigération et climatisation, fabrication de mousses isolantes, propulsion pour aérosols, protection incendie, agroalimentaire
Perfluorocarbures (PFC)	Émissions industrielles spécifiques (semi-conducteurs, panneaux photovoltaïques, métallurgie des métaux non ferreux)
Hexafluorure de soufre (SF <sub>6</sub> )	Production d'électricité, biens d'équipement et matériels de transport (composés électriques et électroniques)
Trifluorure d'azote (NF <sub>3</sub> )	Fabrication de composants électroniques

← TABLEAU 2  
Principales sources anthropiques d'émissions de GES en France en 2020.

FIGURE 2 → Répartition des émissions de gaz à effet de serre en équivalents CO<sub>2</sub> en France (d'après [1]).



néanmoins variable. Cet article vise à détailler ces différents leviers, leur incidence en matière de risques professionnels et les pistes envisagées pour les prévenir.

### La sobriété énergétique

Les leviers d'action sur la réduction des consommations et l'amélioration de l'efficacité énergétique sont principalement liés à :

- l'intégration d'éléments techniques et organisationnels permettant aux entreprises de diminuer leur consommation énergétique tout en poursuivant leur activité ;
- la mise en œuvre de matériaux biosourcés dans le cadre du développement d'une construction durable.

Ces différentes actions ont potentiellement des impacts sur la prévention des risques professionnels.

### Réduction des consommations énergétiques

Le Gouvernement français a établi en 2022 un plan de sobriété énergétique pour les entreprises afin de réduire leur consommation [3]. En complément des mesures générales présentées dans ce plan, les entreprises doivent recenser leurs consommations énergétiques afin de mettre en œuvre des mesures complémentaires de réduction, pertinentes et en adéquation avec leur activité.

Lorsque les entreprises engagent ces mesures, par exemple la modification d'équipements, de procédés ou d'organisation du travail, elles cherchent à en limiter les impacts sur leur productivité, ce qui peut les conduire à ne pas évaluer l'ensemble des risques associés et leurs conséquences sur la santé des salariés.

Pour chaque mesure de réduction d'énergie envisagée, une évaluation *a priori* des risques professionnels doit en effet être effectuée pour s'assurer que la nouvelle mesure *a minima* ne dégrade pas le niveau de protection des travailleurs.

Par exemple, les systèmes de chauffage, climatisation et ventilation des lieux de travail doivent être optimisés pour diminuer les consommations énergétiques, tout en préservant le confort thermique et la sécurité des salariés, notamment vis-à-vis de l'exposition à certains polluants atmosphériques.

L'amélioration de procédés, par une modification par exemple des conditions opératoires visant à réduire les émissions de polluants, doit permettre d'atteindre le double objectif de réduction des consommations et de protection des salariés. La gestion des systèmes de protection collective en assurant leur entretien régulier ou en améliorant leur efficacité répond à ce même besoin.

Parmi les mesures prises, le recyclage de l'air d'un local de travail peut être envisagé. Cette technique permet de réduire fortement les déperditions de chaleur dues au renouvellement de l'air du local. L'air extrait doit alors être épuré par une technique adaptée aux polluants présents, avant d'être réintroduit dans le local ou à proximité. Un renouvellement d'air minimal doit cependant y être associé afin d'évacuer la chaleur, l'humidité et le CO<sub>2</sub>. Cette mesure présente cependant un risque non négligeable de réintroduire une partie des polluants que l'on cherche à éliminer dans le local, faute de maintenance suffisante du système d'épuration. Son application reste conditionnée à un respect strict de la réglementation (articles R. 4222-14





© Guillaume J. Plisson pour l'INRS / 2021

Projection dans un moule d'un enduit composé de chanvre, de terre et de chaux pour la fabrication d'un panneau isolant.

à R. 4222-17 du Code du travail) ; en particulier, les systèmes d'épuration doivent être efficaces et en adéquation avec les polluants émis, régulièrement contrôlés, et le système de surveillance de ces dispositifs d'épuration doit prévenir de tout défaut ou dysfonctionnement.

Tout manquement à ces règles entraînerait une exposition aux polluants émis des salariés présents dans les locaux concernés.

Il convient également d'intégrer à la réflexion un objectif de réduction des consommations énergétiques sur le long terme, au travers d'investissements pertinents : récupération de calories d'un local de travail ou d'un procédé, isolation thermique de bâtiments, installation de panneaux photovoltaïques...

#### **Utilisation de matériaux biosourcés pour l'isolation des bâtiments**

L'impact environnemental et énergétique est un enjeu important dans le domaine du bâtiment, que ce soit dans les constructions neuves ou dans la rénovation du parc existant. Des objectifs

d'amélioration et de performance des bâtiments visent à favoriser le recours aux matériaux présentant une faible empreinte carbone, ainsi qu'aux énergies renouvelables et peu carbonées.

La filière des matériaux biosourcés utilisés pour l'isolation des bâtiments a de ce fait connu un développement important ces dernières années. Le terme « biosourcé » se réfère à l'origine de la matière première : la biomasse. Les isolants biosourcés peuvent être divers : bois, chanvre, lin, paille, liège, coco, ouate de cellulose...

Ces produits offrent de nombreux bénéfices au regard de cette problématique, en comparaison des matériaux minéraux (laine de verre, de roche ou de laitier) ou des isolants synthétiques issus de la pétrochimie (polystyrène, polyuréthane) ; ils présentent une faible empreinte carbone, de bonnes performances thermiques, hygrothermiques et acoustiques et, sous leur forme non traitée, émettent peu de composés organiques volatils. L'utilisation de matières naturelles ne doit cependant pas occulter les possibles risques que ces isolants peuvent induire. En effet, il est

important de se questionner sur les impacts possibles en matière de santé et de sécurité qu'ils peuvent engendrer lors de leur cycle de vie, depuis leur production et leur mise en œuvre jusqu'à leur retrait, leur élimination et leur recyclage, mais aussi sur la qualité de l'air intérieur des bâtiments isolés par ces matériaux.

Les risques liés à ces matériaux sont notamment d'ordre chimique, du fait d'éventuels traitements pesticides réalisés au cours de leur culture, mais également de l'ajout de divers additifs (ignifugeants, antifongiques, rodenticides, liants) lors du procédé de fabrication, afin de leur conférer des propriétés mécaniques, biocides ou de résistance au feu (ces matériaux étant, à l'état non traité, combustibles voire facilement inflammables).

Les matériaux biosourcés étant par ailleurs, et pour la plupart, hygroscopiques et putrescibles, ils peuvent absorber l'humidité de l'air, se décomposer et exposer les salariés à un risque biologique (mycotoxines dues au développement de moisissures, par exemple) lors des phases de stockage, de pose et de retrait. Les émissions de poussières au cours des phases de découpe, de pose ou de retrait doivent donc être étudiées et leur impact sur la santé des salariés doit être évalué.

## Le recours à une énergie décarbonée et son stockage

Si les énergies à faible empreinte carbone sont multiples, de nombreuses questions se posent avant tout sur leur stockage, qu'il soit électrochimique ou *via* le vecteur énergétique qu'est l'hydrogène.

### Stockage électrochimique

Le stockage électrochimique de l'énergie, et en particulier son stockage *via* des batteries au lithium, est un ingrédient incontournable de la transition énergétique. Il permet entre autres de pallier l'intermittence des énergies renouvelables tels le solaire et l'éolien (stockage stationnaire) et également, de favoriser le nomadisme et la mobilité (stockage embarqué dans les véhicules).

Une des conséquences majeures du développement du stockage électrochimique est la diminution du recours aux énergies fossiles.

Les risques liés à l'utilisation, à la charge/décharge et au stockage des batteries au lithium sont maintenant bien connus et les mesures de prévention bien documentées.

Si les risques d'émissions de polluants (particules et gaz) et d'emballage thermique restent les risques prépondérants en cas de dysfonctionnement de la batterie (résultant d'un dommage mécanique, thermique ou électrique), le risque électrique ne doit pas être oublié pour les batteries de forte puissance, comme celles utilisées pour la mobilité des véhicules et engins.

La problématique des déchets et du recyclage des batteries au lithium doit également être prise en considération. De très nombreux dépôts de feu sont dénombrés chaque année dans les centres de collecte et de traitement, du fait d'erreurs de tri ou de la présence fortuite de batteries dans les flux de déchets traités. En effet, les batteries présentes dans les équipements électriques et électroniques, soit indissociables de l'équipement, soit non retirées avant recyclage, peuvent générer des incidents depuis le site de collecte (enseignes, déchetterie) jusqu'au centre de traitement.

De plus, la réglementation européenne impose que, d'ici moins de dix ans, des taux *minima* de matériaux issus de la valorisation des déchets (lithium, nickel, cobalt...) entrent dans la fabrication de nouvelles batteries. Ces obligations réglementaires vont avoir un impact fort dans le secteur du recyclage, qui est ainsi susceptible de se développer fortement et rapidement. L'exposition des salariés dans ce type d'activité pourrait être importante, dans le cas où la prévention des risques pour la santé et la sécurité n'est pas correctement intégrée à la conception de ces unités de revalorisation. En effet, lors de la phase de recyclage, les batteries sont initialement broyées afin d'obtenir une poudre noire, appelée « *black mass* », contenant des composés métalliques toxiques).

Selon les engagements actuels de l'Union européenne, la vente de véhicules thermiques sera interdite en 2035. La part de véhicules électriques va donc très fortement augmenter ces prochaines années, et engendrer des changements importants pour tous les acteurs de la chaîne automobile.

L'augmentation importante du nombre de ces véhicules électriques va non seulement avoir un impact sur les infrastructures, mais également sur certains métiers (garagistes et dépanneurs, amenés à intervenir sur des véhicules électriques accidentés ou abîmés), nécessitant de nouvelles compétences. Les surfaces des zones de stockage en sécurité de ces véhicules électriques accidentés, dont la batterie peut s'enflammer à tout instant si elle a été abîmée, vont devoir être augmentées. Une des possibles conséquences sera une réorganisation du secteur de l'entretien et de la réparation de véhicules, avec des garages spécialement dédiés aux véhicules électriques, qui devront présenter les garanties de sécurité (infrastructures, compétences techniques, équipements adaptés...), indispensables pour réaliser en toute sécurité des interventions sur ce type de véhicule.

### Hydrogène

L'hydrogène ou dihydrogène (H<sub>2</sub>) est l'un des moyens disponibles pour atteindre l'objectif de la neutralité carbone de la France à l'horizon 2050. Si l'hydrogène existe à l'état naturel (on parle



alors d'hydrogène naturel ou natif), sa production à l'échelle industrielle devrait prendre plusieurs années, les connaissances sur les mécanismes de formation, les réserves disponibles et les méthodes d'exploitation devant encore progresser.

En France, l'hydrogène est aujourd'hui essentiellement produit à partir d'hydrocarbures. Il peut également être obtenu par électrolyse de l'eau, à partir d'électricité d'origine nucléaire ou provenant d'énergies renouvelables. L'hydrogène doit alors être stocké avant d'être utilisé.

Son stockage est réalisé, à l'heure actuelle, sous forme de gaz comprimé dans un réservoir (350 à 1000 bars). D'autres techniques de stockage, sous forme liquide, comme la cryogénie (-253 °C),

ou sous forme solide, absorbé sur un hydrure métallique, sont en cours de développement. Son utilisation permet de récupérer de l'énergie, suivant deux voies :

- sous forme d'électricité, *via* une pile à combustible (dans un véhicule, sur le réseau électrique...);
- sous forme de chaleur *via* sa combustion (dans le réseau gaz, en mélange avec le méthane ou directement dans un moteur thermique).

Ce vecteur énergétique peut donc être un élément important dans la décarbonation des transports, supprimant les inconvénients du stockage électrochimique, à savoir une limitation de l'autonomie et un long temps de charge.

Si l'hydrogène apparaît comme une solution séduisante, il faut prendre en compte les risques liés aux caractéristiques de ce gaz et à ses applications.

L'hydrogène est la plus petite molécule existante, ce qui confère à ce gaz des caractéristiques particulières : il est particulièrement mobile et présente une forte capacité à fuir. Du fait de sa petite taille, beaucoup de matières sont poreuses à l'hydrogène, amenant la fragilisation et le risque de rupture. C'est également un gaz extrêmement inflammable, avec une énergie d'inflammation très faible (17 µJ) et qui forme des atmosphères explosives sur une très grande plage de concentrations dans l'air, à partir de 4 % et jusqu'à 75 %. Sa combustion génère une flamme invisible et extrêmement chaude (plus de 2000 °C).

Au-delà de ses caractéristiques intrinsèques d'inflammabilité, générant un risque d'incendie/explosion élevé, ses diverses applications présentent des risques spécifiques, comme ceux liés aux équipements sous pression ou ceux liés à la manipulation de récipients cryogéniques.

La production, le stockage et l'emploi de l'hydrogène doivent par conséquent s'accompagner de mesures de prévention des risques professionnels très strictes.

### Photovoltaïque

En France, en 2022, 14 % de la consommation d'énergie primaire (énergie naturellement disponible dans notre environnement et obtenue sans transformations préalables) provenaient d'énergies renouvelables. Dans ce cadre, l'énergie solaire photovoltaïque, en fort développement depuis 2009, a connu une accélération ces cinq dernières années. Elle devrait encore progresser [2].

La croissance rapide de ce marché crée une demande très importante en main-d'œuvre et une multiplication des acteurs intervenants.

Une concurrence accrue et des chantiers de courte durée, fragilisant les mesures de sécurité mises en place, ainsi qu'une formation limitée des intervenants, peuvent avoir pour conséquence une accidentalité importante.

Remplissage d'hydrogène pour les piles à combustible utilisées sur des chariots en préparation de commandes.



© Guillaume J. Plisson pour l'INRS / 2016

Les risques liés au photovoltaïque sont bien identifiés : risques de chutes de hauteur et de chutes d'objet, risque d'électrification et de brûlures, risques liés à la manutention des panneaux et au travail en extérieur... Pourtant, les mesures de prévention ne sont pas toujours mises en œuvre sur les chantiers, par manque de temps ou de connaissances de l'activité. Il convient donc de porter une attention particulière à la mise en place d'accès en hauteur sécurisés, à la présence d'équipements de manutention et de protection contre les chutes de hauteur, à l'existence de chemins de circulation en toiture... Les risques liés aux conditions météorologiques doivent également être anticipés : risques liés aux fortes chaleurs, aux rayonnements solaires, risques de glissade en cas d'intempéries, de chute en cas de vent.

Par ailleurs, la durée de vie d'un panneau photovoltaïque étant estimée entre 20 et 30 ans, la filière du recyclage en France est aujourd'hui peu développée et un nombre très limité d'acteurs sont présents sur ce marché. Avec la très forte progression du photovoltaïque, et considérant les perspectives à venir, les besoins en recyclage vont fortement augmenter d'ici 2050. De nouvelles technologies sont en développement, adaptant et modifiant des procédés thermiques, mécaniques ou chimiques déjà existants afin de les rendre plus performants mais aussi, d'améliorer le taux et la qualité du recyclage. La récupération sélective des différents métaux stratégiques (silicium, argent, cuivre, indium, gallium, étain, tellure) ou dangereux (plomb, cadmium) qui composent la cellule représente l'un des objectifs majeurs.

Ces procédés de recyclage peuvent exposer les salariés à des produits chimiques, à des émissions gazeuses résultant de la dégradation thermique de certains matériaux et à des poussières lors des phases de broyage mécanique. Il est donc important d'anticiper ces risques lors de la conception de ces nouveaux procédés et de mettre en place des mesures de prévention adaptées (automatisation, travail en systèmes clos, encoffrement, captage, ventilation...).

## La réduction des émissions de GES par les procédés industriels

La réduction des émissions de GES des procédés industriels peut s'effectuer en modifiant les procédés à la source ou en agissant sur les puits de carbone.

L'intensification des procédés est un exemple de rupture technologique, permettant de coupler la rentabilité économique et la réduction à la source de l'empreinte carbone. Des secteurs comme la chimie ou la pharmacie se sont ainsi engagés depuis plus d'une trentaine d'années dans cette voie, qui consiste souvent à passer de procédés

*batch* à des procédés continus, de plus petite taille, à meilleur rendement, permettant une suppression ou un recours réduit aux solvants, des gains énergétiques et une diminution de la production de sous-produits.

Cette approche a nécessité le développement de nouveaux concepts et outils pour le génie des procédés basés sur la multifonctionnalité, la flexibilité, l'utilisation de nouvelles sources d'énergie (lumière, ultrasons par exemple), la miniaturisation et l'optimisation de la structuration interne des réacteurs. Aussi a-t-on vu l'émergence d'une nouvelle génération d'appareils comme les mélangeurs statiques, ou les réacteurs échangeurs caractérisés par une grande complexité de fabrication.

L'intensification des procédés est associée à un meilleur contrôle des paramètres de conduite que sont la température ou les quantités de matière mises en jeu. Les échanges de chaleur comme de matière sont facilités, permettant de mieux contrôler les réactions et de prévenir ou stopper leur emballement. La mise en jeu de volumes réactionnels et de flux de matières plus faibles lors des transports dans les tuyauteries représente autant de facteurs d'amélioration de la fiabilité en matière de sécurité.

L'intensification des procédés permet donc souvent une réduction, voire une suppression du risque lié à l'exposition à des produits chimiques potentiellement dangereux.

Les progrès apportés par l'intensification des procédés présentent toutefois quelques limites. La complexité des modules thermiques ou réactionnels est un facteur défavorable à leur maintenance et à leur nettoyage. Leur encrassement est alors générateur de zones de surchauffe et de surpression néfastes à la conduite du procédé. Il peut aussi être source d'accidents, en phase de post-production, provoqués par la difficulté d'accéder à certaines zones du procédé. Par ailleurs, le recours à des sources d'activation plus intenses comme les ultrasons, le plasma froid ou les micro-ondes, induit de nouveaux risques, associés par exemple aux rayonnements ou aux fréquences sonores, qu'il est nécessaire d'évaluer. Enfin, la conduite des équipements multifonctionnels nécessite une attention plus soutenue. Cette haute technicité est renforcée par un changement d'échelle temporelle avec des temps caractéristiques, passant de l'heure à la seconde voire moins. Elle s'accompagne donc d'une charge mentale plus lourde pour les opérateurs affectés au contrôle de telles installations.

Par ailleurs, et même si la réduction à la source des émissions de CO<sub>2</sub> reste la priorité, la recherche de puits de carbone pour les émissions résiduelles est nécessaire. Elle passe notamment par le déploiement du CCUS (*Carbon Capture, Utilisation and Storage*), qui repose sur un processus composé



VALORISATION SANS TRANSFORMATION	VALORISATION PAR TRANSFORMATION CHIMIQUE	VALORISATION PAR TRANSFORMATION BIOLOGIQUE
<p><b>Utilisation industrielle :</b> agent neutralisant du pH, utilisation alimentaire, CO<sub>2</sub> supercritique, fluide caloporteur, agent d'inertage</p> <p><b>Récupération assistée d'hydrocarbures :</b> amélioration des rendements d'extraction du pétrole ou du gaz</p> <p><b>Récupération de la chaleur de géothermie profonde</b> (encore au stade recherche)</p>	<p><b>Synthèse organique par carboxylation :</b> urée, acide salicylique, carbonates cycliques utilisés en tant que monomères</p> <p><b>Production de méthane, méthanol et d'additifs de carburants</b> selon différentes voies (hydrogénation, réformage, réduction électrolytique, thermochimie) (étape pilote)</p> <p><b>Minéralisation</b> (étape pilote)</p>	<p><b>Culture de microalgues :</b> production de biomasse valorisable en secteur agroalimentaire, pharmaceutique ou de l'énergie</p> <p><b>Biocatalyse :</b> production de molécules organiques à haute valeur ajoutée dans le domaine des carburants ou de la pharmacie (encore au stade recherche).</p>

↑ TABLEAU 3  
Voies de valorisation du CO<sub>2</sub>.

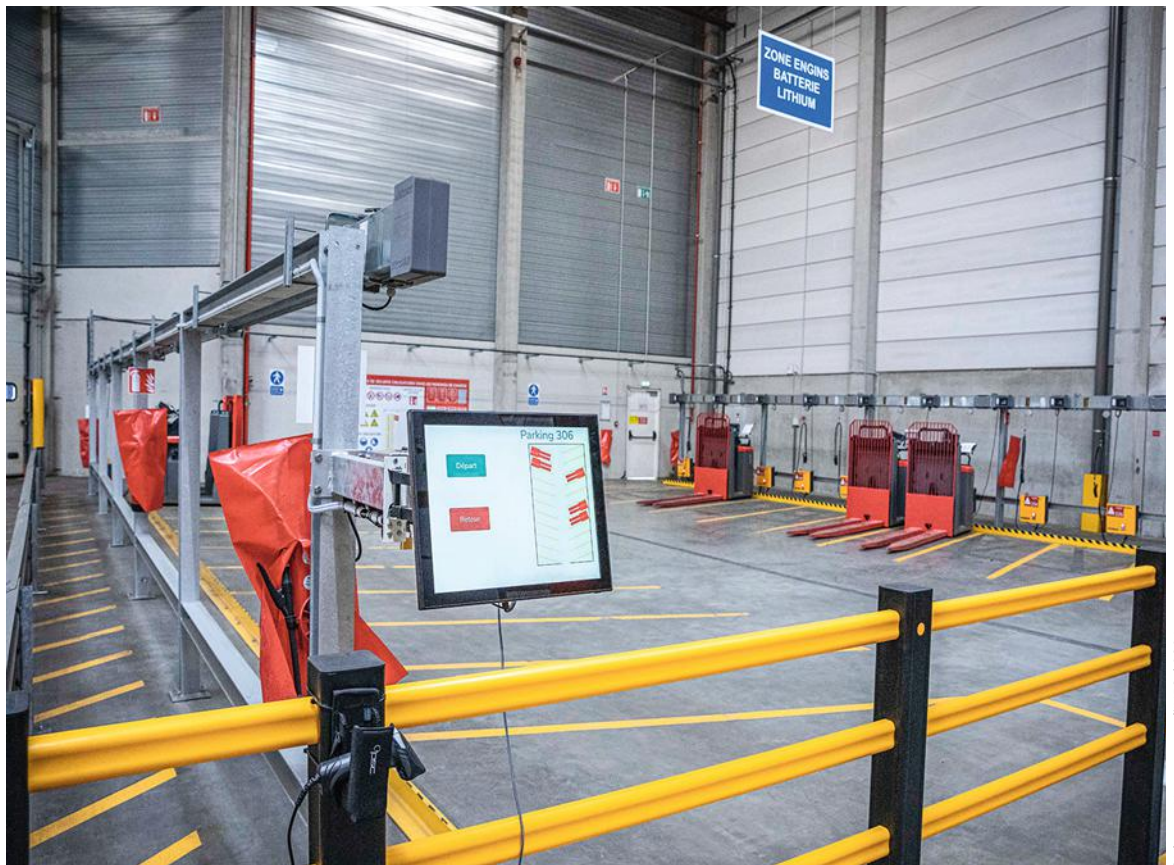
d'une étape de captage du CO<sub>2</sub> à la source d'émission, d'une étape de transport sous forme liquéfiée ou à l'état supercritique, et d'une étape de stockage avant utilisation en tant que ressource ou, sur du long terme, dans des sites adaptés. C'est un des leviers permettant de réduire l'émission de CO<sub>2</sub> des secteurs industriels fortement émetteurs de carbone, comme la métallurgie, la chimie, la pétrochimie ou les cimenteries.

Le captage du CO<sub>2</sub> dans l'industrie peut s'effectuer selon trois approches :

- en pré-combustion, par séparation de l'hydrogène du composé carboné source d'énergie;
- en post-combustion, par traitement des fumées;
- par oxy-combustion, par remplacement de l'air

par l'oxygène seul, permettant de concentrer le CO<sub>2</sub> pour faciliter sa séparation de la vapeur d'eau.

La nature des solvants mis en jeu en pré- ou en post-combustion va varier en fonction des conditions de pression en CO<sub>2</sub>. En pré-combustion, la capture du CO<sub>2</sub> fait appel préférentiellement à des solvants comme le méthanol, le glycérol ou à des composés CMR (cancérogènes, mutagènes ou reprotoxiques) comme la N-méthyl-2-pyrrolidone. En post-combustion, l'usage de solvants aqueux à base d'amines ou d'ammoniac est cité pour atteindre une bonne séparation du CO<sub>2</sub>. Outre leur toxicité propre, ils peuvent aboutir à la formation de composés cancérogènes comme les nitrosamines [4].



Zone de parking et de rechargement de chariots à batteries au lithium.

© Vincent Nguyen pour IINRS / 2024



La valorisation du CO<sub>2</sub> en tant que ressource s'effectue par différentes voies plus ou moins matures technologiquement dont quelques illustrations sont données dans le *Tableau 3* [5]. On distinguera deux modes de valorisation : la valorisation sans transformation, comme l'utilisation du CO<sub>2</sub> sous forme supercritique, et la valorisation avec transformation, qu'elle soit chimique ou biologique.

À l'horizon 2050, la minéralisation et l'hydrogénation représentent les voies à plus fort potentiel de valorisation.

Cependant, cette solution ne permet pas une consommation suffisante des quantités de CO<sub>2</sub> émises. Le recours au stockage géologique de CO<sub>2</sub> est une alternative possible, mais ne doit être envisagé qu'en dernière étape dans une stratégie de décarbonation, d'après l'Ademe [6]. Il s'agit alors d'exploiter des gisements d'hydrocarbures taris, ou des réservoirs d'eau salée situés en grande profondeur. Ces solutions se heurtent néanmoins à une forte opposition sociétale et peu de zones géographiques d'implantation sont en mesure d'accueillir de telles installations.

Si l'évaluation des risques professionnels et les démarches de prévention à mettre en œuvre dans le cadre du CCUS sont semblables pour les secteurs de l'énergie, de la pétrochimie ou de la chimie, la gestion du CO<sub>2</sub> nécessite une attention particulière. Pour effectuer son transfert depuis l'installation de capture vers la zone de valorisation ou de stockage, il est généralement comprimé pour atteindre l'état supercritique. Une perte de confinement peut survenir par rupture d'appareil ou de canalisations suite à des surpressions ou à de la corrosion due à la présence d'impuretés (espèces soufrées, eau). Les conséquences, aussi bien en matière de santé et sécurité au travail qu'environnementales, peuvent alors être graves. En effet, le CO<sub>2</sub> présente un danger à des concentrations élevées par appauvrissement de l'oxygène et du fait de sa toxicité propre. Sa valeur limite d'exposition professionnelle indicative sur la durée d'un poste de travail de 8 heures est de 5000 ppm. Lorsque la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air augmente, des céphalées surviennent et peuvent aboutir à des étourdissements. Le système cardiovasculaire peut aussi être atteint, avec apparition de palpitations et d'une élévation de la pression artérielle. L'exposition à une forte concentration peut s'avérer mortelle, avec des effets sur l'amplitude et la fréquence respiratoires, qui peuvent évoluer vers des convulsions voire un coma. La mise en place du CCUS doit donc s'accompagner d'un renforcement de la maîtrise du risque CO<sub>2</sub>, en particulier en phase dense ou supercritique.

## Conclusion

Les entreprises sont de plus en plus impactées par le réchauffement climatique et la limitation des

émissions de GES. Que ce soit d'un point de vue réglementaire, économique, environnemental ou sociétal, elles ont l'obligation de mettre en place des mesures pour réduire leur empreinte carbone. Cette prise en compte ne doit pas se faire au détriment de la santé et de la sécurité des salariés ; les logiques environnementales et de prévention des risques professionnels doivent se compléter et non s'opposer.

Il est primordial d'accompagner les salariés et les employeurs impactés dans leur quotidien par ces changements profonds, qu'ils en soient acteurs ou non. Cette démarche passe par une identification des conséquences en matière de risques professionnels sur un large périmètre d'activités, en particulier celles en forte mutation et évolution, avec pour objectif de proposer, non seulement des mesures de prévention, mais aussi des approches adaptées à tous les acteurs et permettre ainsi de coupler décarbonation et santé et sécurité au travail. ●

1. Giec: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

2. La neutralité carbone implique un équilibre entre les émissions de carbone et l'absorption du carbone de l'atmosphère par les puits de carbone. On estime que les puits naturels de carbone (sols, forêts, océans...) éliminent entre 9,5 et 11 gigatonnes (Gt) de CO<sub>2</sub> par an (voir: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626092/IPOL\\_STU\(2018\)626092\\_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2018/626092/IPOL_STU(2018)626092_EN.pdf)), alors que les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> ont atteint 37,8 Gt en 2021.

3. COP-21 : 21<sup>e</sup> Conférence des Parties, Paris, 2015.

## BIBLIOGRAPHIE

[1] CITEPA – Émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France 1990-2023. Rapport Secten, édition 2024. Accessible sur : [https://ressources.citepa.org/Comm\\_Divers/Secten/Citepa\\_Secten%202024.pdf](https://ressources.citepa.org/Comm_Divers/Secten/Citepa_Secten%202024.pdf)

[2] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE – Data Lab : Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2024 et DATA LAB : Chiffres clés du climat, édition 2023. Accessible sur : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energies-renouvelables-2024/livre> et: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-du-climat-2023/livre>

[3] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE – Plan de sobriété énergétique : une mobilisation générale. Dossier de presse, octobre 2022. Accessible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/dp-plan-sobriete.pdf>

[4] KOORNNEEF J. ET AL. – The environmental impact and risk assessment of CO<sub>2</sub> capture, transport and storage. An evaluation of the knowledge base. *Progress in energy and combustion science*, 2012, pp. 62-86.

[5] VALORISATION DU CO<sub>2</sub> – Parties 1 et 2 : voies directes et voies par transformations biologiques ou chimiques. *Techniques de l'ingénieur*, 2016.

[6] ADEME – Le captage et stockage géologique du CO<sub>2</sub> (CSC) en France. Le CSC, un potentiel limité pour la réduction des émissions industrielles. Ademe, 2020. Accessible sur : <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/81-captage-et-stockage-geologique-de-co2-csc-en-france.html>