

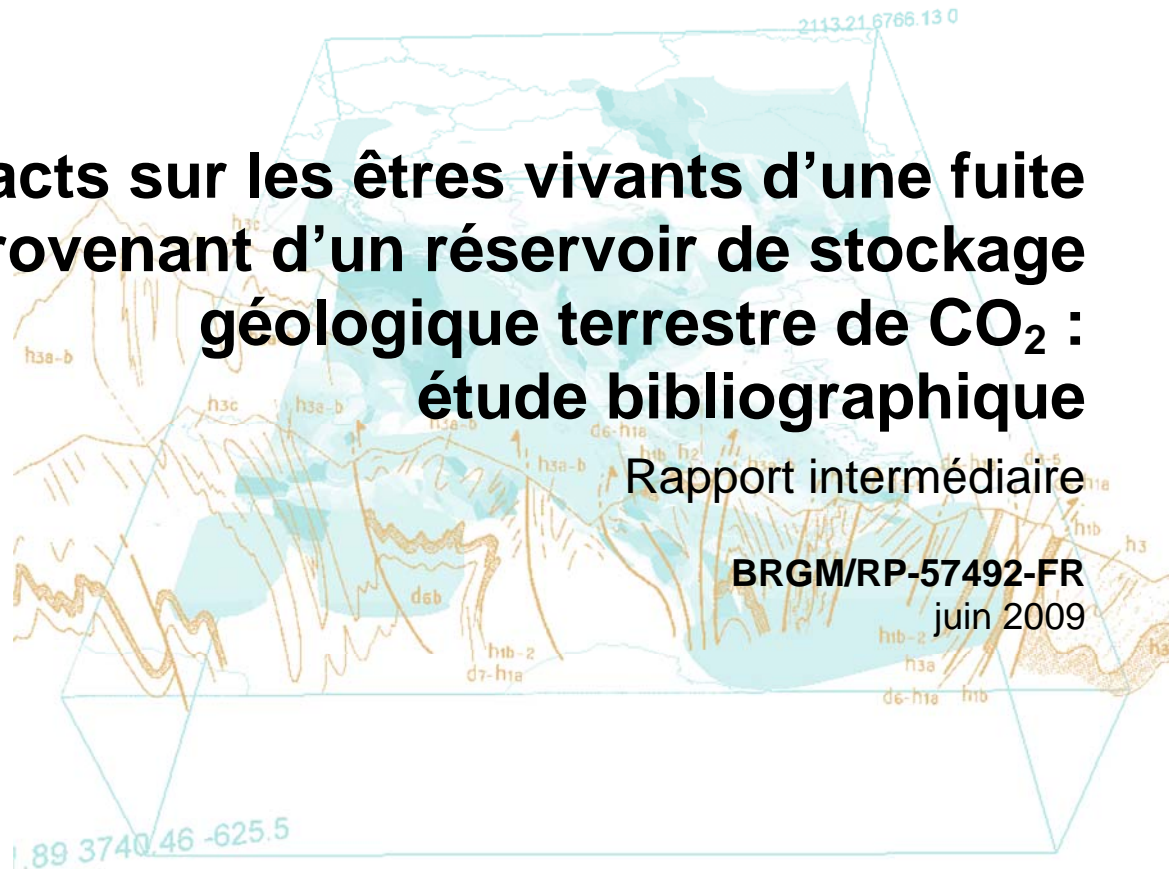


Impacts sur les êtres vivants d'une fuite provenant d'un réservoir de stockage géologique terrestre de CO₂ : étude bibliographique

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-57492-FR

juin 2009



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Impacts sur les êtres vivants d'une fuite provenant d'un réservoir de stockage géologique terrestre de CO₂ : étude bibliographique

Rapport intermédiaire

BRGM/RP-57492-FR

juin 2009

Étude réalisée dans le cadre des
projets de Recherche du BRGM 2009

L. De Lary

Vérificateur :

Nom : O. BOUC

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : H. MODARESSI

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : CO₂, Stockage géologique, Impacts, Environnement, Gestion des risques, Cibles, Récepteurs, Êtres vivants.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

De Lary L. (2009) – Impacts sur les êtres vivants d'une fuite provenant d'un réservoir de stockage géologique terrestre de CO₂ : étude bibliographique. BRGM/RP-57492-FR, 84 p., 17 ill., 1 ann.

Synthèse

Des recherches récentes ont montré que le stockage géologique de CO₂ pouvait être une technologie sûre et efficace pour diminuer rapidement les émissions anthropiques de CO₂. Néanmoins, le développement du stockage de CO₂ à grande échelle suppose d'évaluer précisément les impacts potentiels d'une telle activité sur la santé et l'environnement. Afin de préparer des investigations dans ce domaine, cette étude bibliographique tente de faire une synthèse des informations existantes sur les impacts d'une fuite provenant d'un réservoir de stockage géologique terrestre de CO₂ sur les êtres vivants.

La Convention OSPAR, le Protocole de Londres et la Directive européenne sur le stockage géologique de CO₂ soulignent l'importance d'évaluer les effets potentiels de fuites sur la biosphère. De plus, ces effets doivent être évalués de sorte à fournir des données d'entrée au développement d'une méthodologie de gestion des risques.

La toxicité du CO₂ s'explique par ses effets sur la physiologie de la respiration, sur les équilibres chimiques de l'organisme et sur le contrôle du pH.

Les effets du CO₂ sur l'homme sont bien documentés. Jusqu'à 1 % de CO₂ en volume, quasiment aucun effet physiologique n'est remarqué. L'organisme s'adapte sans conséquence préjudiciable à long terme à des teneurs inférieures à 3 %. Au dessus de 5 %, le CO₂ entraîne des effets irréversibles allant de l'atteinte des capacités mentales et physiques à la perte de conscience. À partir de 10 %, la perte de conscience est rapide et la mort est imminente à des concentrations de 25 à 30 %.

Peu de données existent sur l'impact du CO₂ sur les animaux de surface. Toutefois, d'après plusieurs sources, les seuils déterminés pour l'homme pourraient être des approximations appropriées. Les insectes de surface résistent habituellement aux effets létaux du CO₂ jusqu'à des concentrations de 30 à 100 %. Ils sont néanmoins sensibles à des variations très faibles de concentrations en CO₂. Les animaux vivant dans le sol pourraient commencer à subir des effets physiologiques négatifs à partir de 2 % et des concentrations de 15 % pourraient être létales pour certains d'entre eux.

Chez les micro-organismes une concentration en CO₂ de 50 % a généralement un effet inhibiteur significatif si ce n'est léthal. Toutefois, les tolérances semblent extrêmement contrastées. Le CO₂ peut impacter le cycle de l'azote dans les sols.

Les végétaux seraient, en général, bien plus tolérants que les animaux à des expositions extrêmement fortes en CO₂ sur de courtes durées. La croissance des végétaux peut être stimulée par une augmentation de la concentration en CO₂ dans l'air, néanmoins, elle risque d'être compromise par une augmentation bien plus importante dans les sols. Le seuil de toxicité pour les plantes semble se trouver autour de 20 ou 30 % de CO₂ dans les sols en fonction de l'espèce. Les monocotylédones

seraient plus résistantes que les dicotylédones au CO₂. Sur les zones d'émissions naturelles de CO₂, la diversité des végétaux semble impactée.

En fonction du combustible et du procédé utilisés, différentes impuretés peuvent être présentes dans le CO₂ injecté : H₂S, SO₂, NOx, H₂, CO, N₂, O₂, Ar, CH₄, CN, H₂O, NH₃, Hg, As, Se, Cd et d'autres substances traces. Une fois injectées, le devenir de ces impuretés est indéterminé. De plus, une fuite de CO₂ pourrait entraîner des gaz se trouvant dans le sous-sol comme des sulfures, du radon et du méthane.

L'étude des impacts potentiels de ces substances est complexe car, contrairement au CO₂, elles peuvent entraîner des effets de type cancer, atteinte du système immunitaire, malformation à la naissance, atteinte de la fécondité, effets neurologiques et endocriniens... Certaines substances peuvent être dangereuses à des doses très faibles. Différentes voies d'administration peuvent être envisagées : l'inhalation, l'ingestion et la voie cutanée. Dans les sols, ces substances pourraient modifier la disponibilité des minéraux ainsi que les équilibres microbiens, renforcer la mobilisation des métaux dangereux et atteindre la chaîne alimentaire. Des valeurs limites d'exposition aux impuretés gazeuses sont utilisées dans le cadre de la réglementation du travail, de la qualité de l'air, des études de dangers, des études de risques sanitaires. Pour le CO₂, la seule limite d'exposition dans la législation Française est une valeur limite d'exposition professionnelle indicative (moyenne sur 8 h) fixée à 0,5 %.

L'évaluation de l'exposition (en intensité et durée) des écosystèmes au CO₂ et aux substances associées en cas de fuites semble un défi majeur. Peu de données existent à ce propos. Sur les zones d'émissions géologiques naturelles de CO₂ ou « analogues naturels », les concentrations dans la porosité des sols peuvent être très élevées (jusqu'à 95 % en CO₂) sur des surfaces restreintes. Les êtres vivants des sols seraient donc les plus exposés à des teneurs élevées en CO₂. Une fois à l'air libre, le CO₂ se disperserait rapidement, ainsi les concentrations d'exposition dans l'atmosphère seraient beaucoup moins élevées que dans les sols. Toutefois, le CO₂ étant un gaz assez lourd, il aura tendance à s'accumuler dans des zones basses, en particulier pendant les périodes sans vent et dans les espaces confinés.

Il existe très peu d'études sur l'exposition à long terme des écosystèmes à de faibles concentrations en CO₂. Les zones d'émission naturelle de CO₂ fournissent des exemples intéressants mais leur représentativité peut être remise en question étant donné que les êtres vivants pourraient s'être adaptés. Peu de données sont disponibles sur les impacts indirects d'une fuite sur les êtres vivants (infiltrations d'eaux salines, pollution des ressources en eaux, acidification des milieux...).

Les limites acceptables pour un écosystème pourraient dépendre des différentes formes de vie présentes et donc des conditions locales propres à chaque site. Actuellement, il n'existe pas de méthode ni de programme de recherche pour déterminer des espèces indicatrices et des seuils appropriés pour chaque écosystème.

Les études d'impacts de projets de stockage géologique de CO₂ montrent des tentatives d'évaluations des impacts de fuites, toutefois, aucune étude ne semble quantifier précisément l'ensemble des impacts envisageables.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. RÉGLEMENTATION ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX	12
1.2. GESTION DES RISQUES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX.....	13
1.3. PRÉOCCUPATIONS ENVIRONNEMENTALES ET PERCEPTION DU STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO ₂	14
2. Effets du CO₂ sur les êtres vivants	17
2.1. GÉNÉRALITÉS SUR LES EFFETS DU CO ₂	17
2.2. EFFETS DU CO ₂ SUR L'HOMME	19
2.2.1. Physiologie de la respiration.....	19
2.2.2. Effets chroniques de faibles concentrations en CO ₂	20
2.2.3. Exposition à des concentrations aiguës en CO ₂	21
2.2.4. Réglementations concernant le CO ₂	22
2.3. EFFETS DU CO ₂ SUR LES ÊTRES VIVANTS DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE DE SURFACE	23
2.3.1. Les vertébrés.....	23
2.3.2. Les insectes.....	24
2.3.3. Les végétaux : impacts sur les parties aériennes.....	25
2.4. EFFETS DU CO ₂ SUR LES ETRES VIVANTS DES SOLS.....	26
2.4.1. Généralités sur le sol.....	26
2.4.2. Les animaux du sol.....	27
2.4.3. Les parties souterraines des Végétaux	28
2.4.4. Les micro-organismes du sol.....	32
2.4.5. Les Mycètes (ou champignons).....	33
2.5. EFFETS DU CO ₂ SUR LES ÊTRES VIVANTS DU SOUS-SOL.....	33
2.6. EFFETS DU CO ₂ SUR LES ÊTRES VIVANTS DES EAUX DOUCES SUPERFICIELLES	34
2.6.1. Particularités des milieux aquatiques	34
2.6.2. Les poissons.....	35
2.6.3. Végétaux aquatiques et algues	36
2.6.4. Invertébrés et autres êtres vivants aquatiques.....	36

2.7. CONCLUSION SUR LES EFFETS DU CO ₂	36
3. Effets des impuretés sur les êtres vivants	37
3.1. LES IMPURETÉS D'UNE FUITE DE CO ₂	37
3.1.1. Les impuretés injectées avec le CO ₂	37
3.1.2. Les impuretés entraînées par le flux de CO ₂ et obtenues par réactions chimiques	38
3.2. LES EFFETS DES IMPURETÉS	38
3.2.1. Généralités	39
3.2.2. Effets sur l'homme	40
3.2.3. Effets sur les êtres vivants autres que l'homme.....	40
3.3. VALEURS LIMITES D'EXPOSITION AUX IMPURETÉS	41
3.3.1. Valeurs limites d'exposition de l'homme aux impuretés.....	41
3.3.2. Valeurs limites d'exposition des êtres vivants autres que l'homme aux impuretés.....	47
4. Impacts potentiels d'une fuite.....	49
4.1. IMPACTS SUR LES ÉCOSYSTÈMES.....	49
4.1.1. Évaluation de l'exposition des écosystèmes.....	49
4.1.2. Effets sur les écosystèmes	51
4.1.3. Impacts indirects	53
4.1.4. Résilience des écosystèmes et responsabilités en cas d'impacts sur l'environnement.....	54
4.1.5. Limites acceptables pour un écosystème	54
4.2. PRISE EN COMPTE DES IMPACTS DANS LES PROJETS PILOTES DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO ₂	55
4.2.1. Études d'impact du projet d'injection dans le réservoir géologique de Rousse, France.....	55
4.2.2. Évaluation des impacts du projet de Weyburn, Canada	56
4.2.3. Étude d'impact du projet FutureGen, États-Unis.....	57
4.2.4. Étude d'impact du projet Gorgon, Australie	58
4.3. ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ POUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO ₂	59
5. Conclusion.....	63
6. Bibliographie	65

Liste des illustrations

Illustration 1 - Les différents récepteurs vivants potentiels envisagés dans ce rapport.....	18
Illustration 2 - Concentrations habituelles de CO ₂ dans différents milieux.	18
Illustration 3 - Volume moyen d'air respiré par minute chez l'homme en fonction de la concentration en CO ₂ de l'air (d'après Hepple, 2005).....	19
Illustration 4 - Effets du manque d'O ₂ sur l'homme (d'après Hepple, 2005).....	20
Illustration 5 - Effets sur l'homme d'une exposition aiguë au CO ₂ (d'après Hepple, 2005).	21
Illustration 6 - Seuils d'effets aigus du CO ₂ (d'après Note du 16/11/07 du Ministère chargé de l'Écologie relative à la concentration à prendre en compte pour l'O ₂ , le CO ₂ , le N ₂ et les gaz inertes).	22
Illustration 7 - Exemples de Valeurs Limites d'exposition professionnelle au CO ₂ dans différents pays.	23
Illustration 8 - Effets du CO ₂ sur la photosynthèse des plantes en C3 et C4 (Wolfe et Erickson, 1993).....	25
Illustration 9 - Site d'émission naturelle de CO ₂ sur la caldeira de Latera en Italie (d'après Beaubien <i>et al.</i> , 2008).	30
Illustration 10 - Exemples de sites d'émission naturelle de CO ₂ et ordres de grandeurs de débits mesurés et de surfaces impactées.	31
Illustration 11 - Le Cycle de l'azote (d'après US EPA).....	33
Illustration 12 - Concentrations en impuretés dans du CO ₂ déshydraté capturé en sortie de centrales au charbon ou au gaz exprimées en % du volume total (GIEC, 2005).	38
Illustration 13 - Niveaux maximum d'impuretés dans du CO ₂ déshydraté capturé en sortie de centrales au charbon ou au gaz, exprimés en proportion du volume, dans les conditions d'exploitation les plus défavorables par rapport aux procédés et aux combustibles (d'après IEA GHG and SNC-Lavalin Inc, 2004).	38
Illustration 14 - Exemples de valeurs limites pour certaines substances chimiques.	44
Illustration 15 - Profil de risque environnemental pour le stockage géologique de CO ₂ (U.S. EPA, 2008 d'après Benson, 2007).....	53
Illustration 16 - Exposition au H ₂ S et au CO ₂ pour les scénarios puits éruptif du site de Rousse dans les conditions les plus majorantes (d'après Total E&P France, 2008).	56
Illustration 17 - Modèle conceptuel du cadre d'évaluation de la vulnérabilité (VEF) développé par l'U.S. EPA (U.S. EPA, 2008).	61

Liste des annexes

Annexe 1 - Liste des effets du CO ₂ évoqués dans ce rapport.....	73
---	----

1. Introduction

Le stockage géologique du CO₂ a le potentiel de devenir une technologie répandue pour réduire les émissions de CO₂. Réalisé dans des conditions appropriées, le stockage géologique du CO₂ ne devrait pas présenter plus de risques pour l'homme et l'environnement que d'autres technologies déjà utilisées depuis longtemps telles que le stockage de gaz naturel. Il semble néanmoins nécessaire de comprendre et d'évaluer précisément les impacts qu'une telle activité pourrait avoir sur l'homme et l'environnement.

Une fuite provenant d'un réservoir de stockage géologique de CO₂ peut avoir deux types d'impacts :

- des impacts globaux qui résultent d'une non-réduction de l'effet de serre dus à l'émission du CO₂ dans l'atmosphère ;
- des impacts locaux sur l'environnement du site de stockage dus aux effets potentiellement néfastes du CO₂ injecté ou des substances associées.

Cette étude bibliographique tente de rassembler les données existantes en ce qui concerne les impacts locaux sur les êtres vivants d'une fuite provenant d'un réservoir géologique terrestre de CO₂. La fuite est ici définie comme une migration du CO₂ injecté hors du système de stockage. Seuls les impacts directs liés à la présence des gaz de la fuite seront considérés dans cette étude.

Les organismes vivants potentiellement exposés à ces substances seront appelés les récepteurs. Tous les êtres vivants appartenant aux 5 règnes sont susceptibles d'être des récepteurs : les animaux, les végétaux, les champignons (ou mycètes), les protistes (ou organismes simples) et les bactéries. Les deux derniers règnes sont souvent réunis sous le nom de micro-organismes.

La première partie de ce rapport précise la place de l'étude des impacts du stockage géologique de CO₂ sur la biosphère dans différents cadres réglementaires et dans la démarche de gestion des risques menée actuellement au BRGM.

La deuxième partie est une étude bibliographique des effets du CO₂ sur les êtres vivants.

La troisième partie s'intéresse aux effets des impuretés.

La dernière partie traite de l'exposition des écosystèmes et des impacts envisageables en cas de fuites.

Les limites sur l'état des connaissances sont présentées au fur et à mesure du développement.

1.1. RÉGLEMENTATION ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

La nécessité d'évaluer les impacts sur la biosphère d'un projet de stockage géologique de CO₂ a été appréhendée par différents cadres réglementaires. Seuls les textes qui concernent la France sont pris en compte dans ce paragraphe.

D'après la Convention Oslo-Paris (OSPAR) pour la Protection du milieu marin de l'Atlantique du nord-est, la caractérisation des risques du stockage géologique de CO₂ doit mener au développement d'une « hypothèse d'impact » décrivant les conséquences attendues du projet notamment en termes d'effets sur la santé humaine, les zones sensibles et les communautés biologiques (OSPAR, 2007). Cette hypothèse constitue la base de la décision d'approbation ou de rejet du projet de stockage et de la définition des exigences de surveillance environnementale. La Convention précise que des critères de performances qualitatifs et quantitatifs doivent être définis pour les éléments de l'hypothèse d'impact. Ces critères doivent être comparés aux résultats des procédures d'évaluation et de surveillance afin de déterminer si le système dévie du comportement anticipé. La convention OSPAR a valeur juridique contraignante pour les parties contractantes.

Le Protocole de Londres¹ amendé précise dans son Annexe I que le stockage géologique de CO₂ peut être envisagé. Des lignes directrices spécifiques ont été établies pour déterminer les modalités de confinement du CO₂ (International Maritime Organization, 2007). Elles précisent que l'évaluation des effets potentiels devrait porter sur les risques posés par une fuite qui se produirait en raison du processus de séquestration du CO₂. L'évaluation doit prendre en compte les effets du CO₂ et des substances associées ainsi que des déplacements d'eau salée. Comme pour la Convention OSPAR, la caractérisation des risques devrait déboucher sur une « hypothèse d'impact » nécessaire à l'évaluation du projet et à la définition du programme de surveillance.

La Directive européenne 2009/31/CE du 23 avril 2009 (Commission européenne, 2009) établit un cadre juridique pour le stockage géologique du CO₂ « en toute sécurité pour l'environnement ». Elle précise qu'une évaluation des risques liés au stockage devra être menée. Cette évaluation constituera un des critères permettant de déterminer si un site potentiel est apte à servir de site de stockage. L'évaluation des risques comprendra une évaluation des effets basée sur la sensibilité d'espèces et d'habitats particuliers aux fuites potentielles envisagées. Il y aura lieu, si c'est pertinent, de tenir compte des effets d'une exposition à des concentrations élevées de CO₂ et d'un pH réduit dans la biosphère (y compris dans le sol et les eaux benthiques). L'évaluation portera également sur les effets d'autres substances éventuellement présentes dans le flux de CO₂. Ces effets seront envisagés pour différentes échelles spatiales et temporelles et seront associés à des fuites d'ampleur variable.

¹ Protocole de Londres de 1996 à la Convention de 1972 sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets, dit « Protocole de Londres ».

En France, le projet de loi Grenelle II prévoit d'insérer dans le code de l'environnement un cadre réglementaire pour les opérations pilotes de recherche sur le stockage géologique de CO₂ (inférieures à 500 000 tonnes). D'après le projet de loi, ces opérations seront soumises à une demande d'autorisation contenant une étude de dangers.

D'une manière générale, l'évaluation des impacts potentiels sur l'homme ou l'environnement a un usage réglementaire pour certaines installations industrielles, notamment pour les ICPE² et les établissements classés SEVESO³. Ainsi, bien que le cadre réglementaire auquel le stockage géologique de CO₂ est susceptible d'appartenir ne soit pas encore déterminé, il semble néanmoins nécessaire d'évaluer les impacts potentiels de cette activité en vue de futures autorisations.

1.2. GESTION DES RISQUES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Les effets d'une fuite potentielle doivent être évalués à la fois pour fournir des données d'entrée au développement d'une méthodologie de gestion des risques et pour fournir des informations nécessaires à l'établissement d'un cadre réglementaire (West *et al.*, 2005).

En considérant la définition du risque suivante (Bouc *et al.*, 2006) :

Risque = combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences

il apparaît que la gestion des risques, dont l'objectif est de réduire et de maîtriser les risques, ne peut être menée de façon intégrale si les conséquences ne sont pas identifiées.

Depuis 2006, le BRGM œuvre à l'identification de critères de sécurité pour le stockage géologique de CO₂ à travers un projet spécifiquement dédié, le projet CSICO2 « Critères de sécurité et impacts du stockage géologique de CO₂ ». Les critères de sécurité se définissent comme les exigences qui garantissent la maîtrise des impacts du stockage géologique de CO₂ sur les personnes, les biens et l'environnement à court, moyen et long terme (Bouc *et al.*, 2006). Le travail déjà effectué a permis d'identifier plusieurs scénarios de fuites et de distinguer 9 types de cibles dont certaines sont ou contiennent des êtres vivants (Bouc, 2008). Actuellement, des investigations doivent être menées afin de déterminer les impacts potentiels d'une fuite sur ces cibles et ainsi pouvoir évaluer les conséquences des scénarios de risque dans leur environnement.

L'évaluation des impacts d'une fuite potentielle est donc nécessaire :

- à la définition des critères de sécurité. Bouc *et al.* (2006) précisent que la considération des impacts d'une fuite constitue un chaînon crucial et manquant qui

² Installations Classées pour la Protection de l'Environnement.

³ Établissements visés par la Directive 96/82/CE du Conseil du 9 décembre 1996 concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses.

doit être placé au cœur des travaux à venir. L'identification de seuils d'effets sur les différentes cibles doit permettre de rendre compte si une situation est acceptable ou non ;

- à la réflexion sur la mise en place de mesures de réparation. Cette réflexion suppose, au préalable, de savoir quels types d'impacts sont envisageables afin de déterminer des actions adaptées ;
- pour aider à la décision de mise en œuvre de mesures correctives. Le Guénan (2008) précise en effet que l'impact sur l'environnement est à comparer avec le coût d'intervention de la mesure et avec son efficacité.

1.3. PRÉOCCUPATIONS ENVIRONNEMENTALES ET PERCEPTION DU STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO₂

D'après l'IEA GHG⁴ (2007), les fuites de CO₂ en surface constituent une préoccupation majeure pour les associations environnementales et pour ceux qui élaborent la réglementation. Ainsi, la communauté scientifique du stockage de CO₂ doit pouvoir être en mesure de dire quels seraient les impacts de fuites potentielles.

Afin de mieux connaître la perception du stockage géologique de CO₂ par le public, Shackley *et al.* (2004) ont audité 212 personnes en entretiens individuels au Royaume-Uni. Après une brève introduction à la technologie, ils ont demandé l'opinion des personnes rencontrées sur l'intérêt du stockage géologique de CO₂. Ils ont remarqué que la majorité des personnes n'avait pas d'opinion du tout ou était quelque peu sceptique. Quand ils ont demandé quels étaient les effets négatifs imaginables, la réponse la plus fréquente était les fuites (49 %). Ensuite ont été mentionnés les effets sur les écosystèmes (dans 31 % des réponses), l'aspect non éprouvé de la technologie (dans 23 % des réponses) et les effets sur la santé humaine (dans 18 % des réponses).

En France, Ha-Duong *et al.* (2007) ont montré, suite à un sondage sur un échantillon représentatif de la population, que seulement 6% des personnes interrogées étaient capables de proposer une définition convenable de la capture et du stockage géologique de CO₂. Après une brève présentation de la technologie, il a été demandé aux personnes auditées si elles approuvaient son utilisation en France. D'après les résultats de l'enquête, 59 % des personnes approuvent la technologie. Cependant, quand plus d'informations sont données sur les conséquences négatives potentielles (principalement : fuites, impacts sur l'homme, l'environnement et les eaux souterraines), alors seulement 38 % des personnes se montrent favorables. L'étude conclut que le stockage géologique ne semble pas rejeté à priori mais que cette technologie doit gagner la confiance du public.

Le groupe TOTAL a lancé un projet-pilote d'injection de 120 000 tonnes de CO₂ en 2 ans sur la commune de Jurançon dans le Sud-ouest de la France. Au cours de

⁴ International Energy Agency Greenhouse Gas R&D Programme : programme de recherche et développement sur les gaz à effets de serre de l'Agence Internationale de l'Énergie.

l'enquête publique de ce projet, 12 % des observations du public ont émis un avis favorable et 65 % un avis défavorable (Préfecture des Pyrénées-Atlantiques, 2008a). Les autres intervenants concernés (23 %) ont émis un avis sous réserves. La commission d'enquête a constaté une participation du public contrastée et globalement modérée (Préfecture des Pyrénées-Atlantiques, 2008b). Les thèmes abordés dans les avis favorables s'articulent principalement autour de la lutte contre les changements climatiques, l'apport de données scientifiques et la démonstration de la faisabilité industrielle. Les principaux thèmes abordés dans les avis défavorables concernent la sismicité de la zone et d'étanchéité du stockage (22 % des cas), la sécurité des populations (15 %), le choix du site (11 %), les impacts sur l'environnement (7 %), la valeur du patrimoine (7 %)... Suite à l'enquête publique, la commission d'enquête a donné un avis favorable au projet.

Au regard de ces quelques exemples, il semble que la sécurité du stockage géologique de CO₂ et la possibilité d'impacts sur l'environnement jouent un rôle déterminant dans la perception de cette technologie par le public.

2. Effets du CO₂ sur les êtres vivants

2.1. GÉNÉRALITÉS SUR LES EFFETS DU CO₂

L'exposition au CO₂ peut être dangereuse pour deux raisons (Hepple, 2005) :

- toxicité du dioxyde de carbone ;
- baisse induite de la concentration en oxygène.

Le premier point s'explique par le fait que, comme l'oxygène, le CO₂ est un gaz actif sur le plan physiologique qui peut être létal à fortes concentrations (Hepple, 2005).

Le deuxième point est basé sur le fait que le CO₂ est plus dense que l'air (densité = 1.5). Ainsi, en milieu peu ventilé, un volume de CO₂ aura tendance à chasser un volume d'air équivalent ce qui induira donc une baisse de la concentration en O₂. Puisque l'air contient environ un cinquième d'O₂ en pourcentage de volume, la réduction de la quantité d'O₂ dans l'air se fera approximativement dans un rapport de 1 pour 5 comparativement à la quantité introduite de CO₂⁵ (Farrar *et al.*, 1999). Toutefois, il semblerait (au moins pour l'homme) que l'exposition à des concentrations élevées en CO₂ ait des effets physiologiques significatifs avant que la dilution de l'oxygène n'en ait (Benson *et al.*, 2002).

D'après Hepple (2005) la toxicité du CO₂ s'explique par son effet sur la physiologie de la respiration, sur la capacité à maintenir les équilibres chimiques de l'organisme (c'est-à-dire l'homéostasie⁶) et sur le contrôle du pH sanguin. Le CO₂ n'a pas d'effet toxicologique connu du type cancer, atteinte du système immunitaire ou malformation à la naissance.

Les effets du CO₂ sur les êtres vivants dépendent de sa concentration, de la durée d'exposition et de la sensibilité de l'individu exposé (Hepple, 2005 ; U.S. EPA, 2008).

Dans cette étude bibliographique, les impacts d'une fuite de CO₂ vont être analysés sur les différentes cibles identifiées lors de travaux antérieurs (Bouc, 2008) et qui sont ou qui contiennent des récepteurs vivants (Illustration 1) : l'homme, l'environnement de surface, les eaux superficielles et le sol.

⁵ Par exemple, dans une atmosphère contenant initialement 20 % d'oxygène et 80 % d'azote en pourcentage de volume : si la concentration en CO₂ atteint 25 %, la concentration en O₂ baissera de 5 % et donc sera de l'ordre de 15% tandis que la concentration en azote sera de 60 %.

⁶ Homéostasie : capacité de l'organisme à maintenir un état de stabilité relative des différentes composantes de son milieu interne et ce, malgré les variations constantes de l'environnement externe.

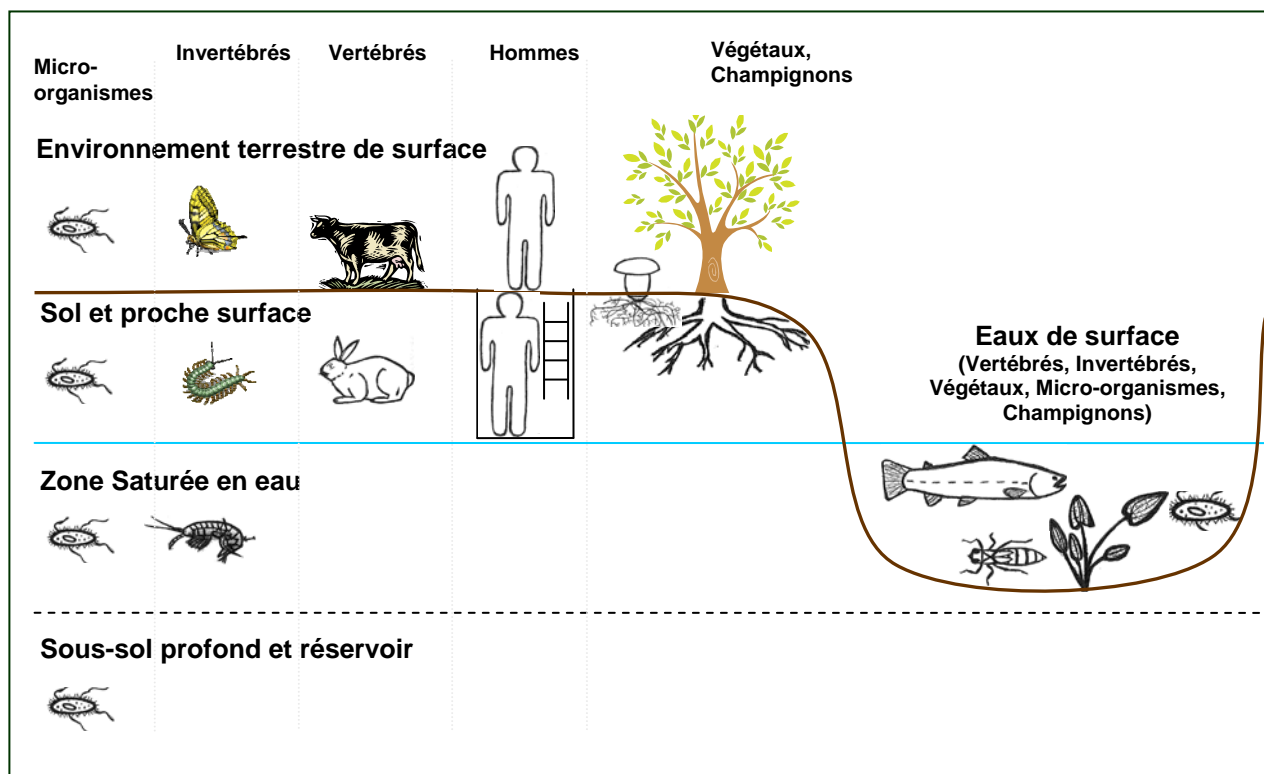


Illustration 1 - Les différents récepteurs vivants potentiels envisagés dans ce rapport.

La concentration actuelle en CO₂ dans l'atmosphère se situe aux alentours de 380 ppm ou 0,038 % de volume (GIEC, 2005). Cette concentration varie faiblement dans l'espace et dans le temps en raison de l'efficacité du brassage atmosphérique. Elle est néanmoins influencée par l'activité biologique des êtres vivants (respiration, photosynthèse, décomposition de la matière organique) et les émissions d'origine humaine. D'après Stupfel et Le Guern (1989), des concentrations en CO₂ jusqu'à 600 ou 700 ppm (0,06 à 0,07 %) peuvent être rencontrées dans des zones urbaines où le trafic routier est intense. Les valeurs « habituelles » de CO₂ dans différents milieux sont rappelées dans l'illustration 2.

Milieu	Atmosphère	Sol	Eau douce (20°C, en équilibre avec l'atmosphère)
Concentration en CO ₂	380 ppm ou 0,038 % vol. ^a	0,2 à 4 % vol. ^b	0,6 mg/L

^{a,b} D'après GIEC (2005).

Illustration 2 - Concentrations habituelles de CO₂ dans différents milieux.

2.2. EFFETS DU CO₂ SUR L'HOMME

2.2.1. Physiologie de la respiration

Chez l'homme, le CO₂ est le premier régulateur de la respiration. L'organisme contrôle la pression partielle de CO₂ dans le sang par l'intermédiaire de récepteurs (les chémorécepteurs centraux) situés dans le liquide extracellulaire du cerveau (Sherwood et Lockhart, 2006). Ces récepteurs ne surveillent pas directement la pression partielle du CO₂, mais ils sont sensibles aux changements de concentration des ions H⁺. Une augmentation de la pression partielle du CO₂ entraînera une baisse du pH au niveau des récepteurs qui réagiront en augmentant la fréquence et le volume respiratoire. Ainsi, le volume d'air respiré par minute augmente quand la concentration en CO₂ dans l'air s'accroît : c'est la stimulation réflexe normale de l'activité respiratoire (Illustration 3).

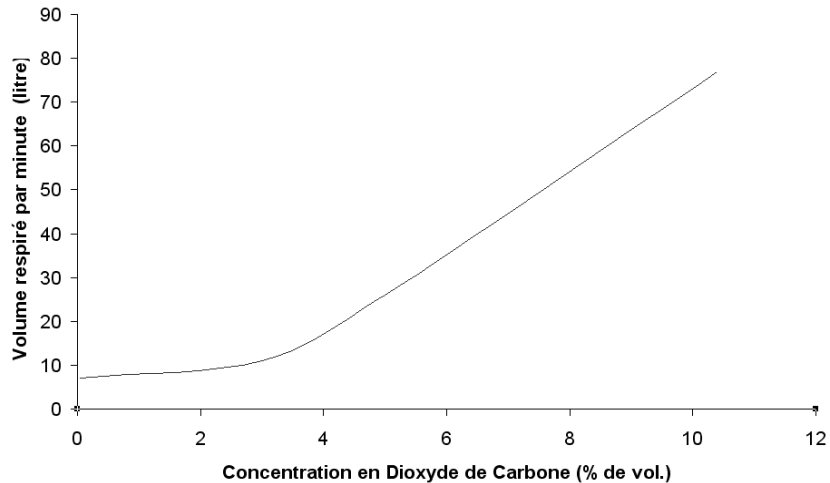


Illustration 3 - Volume moyen d'air respiré par minute chez l'homme en fonction de la concentration en CO₂ de l'air (d'après Hepple, 2005).

Cependant, une augmentation trop forte de la pression partielle de CO₂ dans le sang ne stimule plus la ventilation mais au contraire déprime directement le cerveau et les centres respiratoires entraînant un ralentissement ou un arrêt de la respiration (Sherwood et Lockhart, 2006). Ce phénomène pourrait arriver en quelques minutes pour des concentrations en CO₂ supérieures à 15 % (Illustration 5).

La toxicité du CO₂ est vraisemblablement due à son influence sur le pH sanguin. Une baisse de pH de 0.04, par rapport à la valeur habituelle de 7.4, est considérée comme une acidose aiguë (Hepple, 2005). De plus, le CO₂ agit comme un vasodilatateur (il dilate les vaisseaux sanguins), ce qui pourrait expliquer de nombreux symptômes associés au CO₂ comme la dépression du système nerveux central, les maux de tête et les vertiges.

Le taux d'oxygène du sang est contrôlé au niveau de l'aorte et des carotides, toutefois, il n'influe sur la respiration que s'il est dangereusement bas, comme à très haute altitude par exemple.

Les effets du manque d'oxygène (hypoxie) sont présentés à l'illustration 4.

Concentration en O ₂	Effets sur l'homme
16 à 17 %	Baisse de la vision nocturne, augmentation de la fréquence respiratoire, du volume respiratoire et du rythme cardiaque
14 à 16 %	Atteinte de la coordination des mouvements, fatigue, respiration intermittente
6 à 10 %	Nausées, vomissements et perte de conscience
<6 %	Perte rapide de conscience puis mort en quelques minutes

Illustration 4 - Effets du manque d'O₂ sur l'homme (d'après Hepple, 2005).

2.2.2. Effets chroniques de faibles concentrations en CO₂

Les conséquences sur l'homme d'une exposition chronique au CO₂ sont bien documentées. Toutefois, il convient de noter que les études ont été menées uniquement sur des sujets en bonne santé (IEA GHG, 2007). Aucune étude épidémiologique n'a été réalisée pour étudier les effets d'une exposition à long terme sur une large population (enfants, personnes âgées ou malades) (West *et al.*, 2005). Les enfants seraient plus sensibles que les adultes étant donné qu'ils respirent plus proportionnellement à leur poids (Stenhouse *et al.*, 2008). L'U.S. EPA (2008) suggère d'établir des seuils d'expositions plus contraignants dans des endroits où sont présents des enfants (école, garderie) que pour la population en général.

Selon Santé Canada⁷, la concentration minimale de CO₂ à laquelle des effets négatifs ont été observés sur les êtres humains est 0,7 % (7 000 ppm). A cette concentration, une augmentation de l'acidité du sang a été constatée après plusieurs semaines d'exposition continue.

Au dessus de 1 %, le CO₂ stimule la respiration. Une exposition chronique entre 1,5 et 3 % provoque une hypercapnie (niveau de CO₂ important dans le sang) et une baisse du pH sanguin. La réaction immédiate de l'organisme se traduit par une augmentation de l'activité respiratoire, par des échanges ioniques notamment au niveau des os et des reins (excrétion de H⁺ et bicarbonates pour réduire le pH), par des maux de tête modérés et de la sudation. Toutefois, ces effets de court terme sont réversibles. L'organisme parvient à trouver un nouvel équilibre tant que la teneur en CO₂ de l'air ne

⁷ D'après le site : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/exposure-exposition/non-carcino-eng.php>.

dépasse pas 3 %. Aucun effet préjudiciable à long terme n'a été constaté pour des expositions chroniques à des teneurs en CO₂ inférieures ou égales à 3 % (Hepple, 2005).

2.2.3. Exposition à des concentrations aiguës en CO₂

Exposition au CO ₂	Effets sur l'homme
> 3 %	Maux de tête, détérioration de la vue et de l'ouïe, confusion mentale, difficultés à respirer
4 à 5 % pendant quelques minutes	Vertiges, accroissement de la pression sanguine, difficultés à respirer
7 à 10 % pendant plusieurs minutes à une heure	Vertiges, accroissement du rythme cardiaque, manque de souffle, inconscience totale ou partielle
10 %	Tremblement des yeux, contractions musculaires rapides, vertiges, difficultés à respirer, hypersudation, agitation générale, confusion mentale, étourdissement
10 à 15 % pendant une ou plusieurs minutes	Vertiges, somnolence, tremblements musculaires sévères, perte de conscience
> 15 %	Perte de conscience en moins d'une minute puis arrêt du système respiratoire, convulsions, coma et mort due à la dépression du système nerveux central
30 % pendant quelques minutes	Mort

Illustration 5 - Effets sur l'homme d'une exposition aiguë au CO₂ (d'après Hepple, 2005).

Hepple (2005) rapporte que la plus basse concentration létale pour l'homme publiée dans la littérature est de 9 % de CO₂ pendant 5 minutes.

Le Ministère chargé de l'Écologie précise dans la note du 16 novembre 2007 les seuils d'effets aigus du CO₂ qui représentent correctement l'état des connaissances sur le sujet (Illustration 6). Ces seuils sont destinés à être pris comme références pour juger de la pertinence des études de dangers des établissements abritant notamment des stockages de gaz de l'air.

Effets	Effets létaux significatifs	Premiers effets létaux	Effets irréversibles
Concentration en CO ₂	20 %	10 %	5 %

Illustration 6 - Seuils d'effets aigus du CO₂ (d'après Note du 16/11/07 du Ministère chargé de l'Écologie relative à la concentration à prendre en compte pour l'O₂, le CO₂, le N₂ et les gaz inertes).

2.2.4. Réglementations concernant le CO₂

La seule limite fixée pour le CO₂ dans la législation française est une Valeur Limite de Moyenne d'Exposition (VME⁸) professionnelle indicative de 0,5 % de volume (Arrêté du 26 octobre 2007 en application de la Directive européenne 2006/15/CE). L'article R. 4412-150 du Code du Travail précise que les VME professionnelles indicatives constituent « des objectifs de prévention ». L'Arrêté du 30 juin 2004 ajoute que « les concentrations doivent être maintenues à des niveaux aussi faibles que possible, les valeurs fixées ne présentant qu'un objectif minimal ».

Toutefois, il convient ici de remarquer que la VME est une valeur indicative (et non contraignante) établie pour un contexte professionnel, c'est-à-dire pour des personnes adultes en bonne santé. En France, aucune valeur limite d'exposition à court terme (VLTC), indicative ou non, n'est fixée pour le CO₂.

D'autres pays ont fixé des limites d'exposition professionnelle au CO₂ (Illustration 7).

⁸ Deux types de seuils d'exposition aux agents chimiques dans l'atmosphère du lieu de travail sont fixés pour l'homme en France par le Ministère du Travail (et dans de nombreux autres pays) (INRS, 2005) :

- **valeur limite de moyenne d'exposition (VME)** : valeur limite établie pour une durée d'exposition égale à la journée de travail et correspondant aux risques à long terme. La VME peut être dépassée sur de courtes périodes, à condition de ne pas dépasser la VLCT (si elle existe) ;
- **valeur limite d'exposition à court terme (VLCT ou VLE)** : valeur plafond qui ne doit jamais être dépassée mesurée sur une durée maximale de 15 minutes. Elle a pour but de prévenir les risques d'effets toxiques immédiats ou à court terme.

	Valeur limite de moyenne d'exposition (VME)	Valeur limite d'exposition à court terme (VLCT)
France, Union européenne, Italie	0,5 %	Pas de limite fixée
Allemagne, Autriche, Danemark, Suède	0,5 %	1 %
Espagne, Royaume-Uni	0,5 %	1,5 %
États-Unis, Canada, Belgique	0,5 %	3 %

Illustration 7 - Exemples de Valeurs Limites d'exposition professionnelle au CO₂ dans différents pays.

Aux États-Unis, le Ministère de la Santé a fixé le seuil immédiatement dangereux pour la vie et la santé à 4 %.

Santé Canada a fixé une limite d'exposition à long terme à 0,35 % pour les habitations résidentielles. Il s'agit de la concentration pour laquelle, considérant l'état des connaissances actuelles, une personne peut être exposée durant toute sa vie sans risque pour la santé. La détermination de cette limite a pris en compte une marge de sécurité pour tenir compte des individus les plus sensibles⁹.

2.3. EFFETS DU CO₂ SUR LES ÊTRES VIVANTS DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE DE SURFACE

2.3.1. Les vertébrés

Peu de données sont disponibles sur les seuils de toxicité des animaux vivant en surface. Néanmoins, la réponse de l'homme à une augmentation de CO₂ est un modèle très utile pour connaître celle des autres mammifères, et de tous les animaux qui respirent dans l'atmosphère en général, en raison de la nature universelle de la respiration. Ainsi, tous les animaux qui respirent dans l'air (et l'homme) ont d'une manière générale des tolérances assez similaires au CO₂ (Benson *et al.*, 2002). En conséquence, une exposition prolongée à des concentrations élevées en CO₂, au dessus de 20-30 %, pourrait tuer virtuellement tout type de vie sauf des microbes, des champignons et des invertébrés (Benson *et al.*, 2002).

D'après Sage (2002), le CO₂ entraîne une atteinte du système respiratoire de tous les animaux, mais cet effet ne se produit généralement pas tant que les concentrations en CO₂ restent inférieures à 5 %.

Les reptiles ont probablement une tolérance bien plus grande au CO₂ que les mammifères (Benson *et al.*, 2002). Pour les lézards et les serpents, des concentrations

⁹ D'après le site : <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/air/exposure-exposition/non-carcino-eng.php>.

en CO₂ de 1 à 6 % entraînent une baisse de la fréquence respiratoire (Gratz, 1979 ; Abe and Johansen, 1987 ; FutureGen Alliance, 2006).

Le CO₂ est utilisé pour l'étourdissement et la mise à mort des animaux dans les abattoirs. Afin de limiter toute souffrance, la Directive 93/119/CE précise que l'étourdissement des porcs doit être réalisé dans une atmosphère contenant plus de 70 % de CO₂. Dans ces conditions, les animaux perdent conscience en 15 secondes (Stupfel et Le Guern, 1989).

Le rapport IEA GHG (2007) a fait remarquer que les impacts potentiels d'une fuite n'ont pas été étudiés sur les oiseaux.

2.3.2. Les insectes

Les insectes vivant en surface résisteraient aux effets létaux du CO₂ jusqu'à des concentrations de 30 à 100 % (FutureGen Alliance, 2006 d'après Nicolas et Sillans, 1989). Une forte concentration en CO₂ entraîne généralement un « arrêt cardiaque » qui ne cause pas forcément de dommages chez les insectes car leur système circulatoire ne contribue pas ou peu aux échanges gazeux. Ainsi, le CO₂ est couramment utilisé en entomologie pour anesthésier temporairement les insectes (Nicolas et Sillans, 1989).

Néanmoins, le CO₂ agit sur le système respiratoire des insectes. Des concentrations supérieures à 1 % entraînent une modification de l'ouverture des orifices respiratoires (Sage, 2002).

De nombreux insectes possèdent des récepteurs spécifiques au CO₂. Ils sont capables de détecter de très faibles variations de concentrations (parfois 0,5 ppm seulement). Ces variations de concentrations entraînent des stimulations olfactives qui peuvent provoquer de nombreux changements comportementaux et physiologiques notamment en ce qui concerne la localisation de la nourriture, la locomotion, la reproduction, la mémoire, le comportement social et la régulation des échanges gazeux (Nicolas et Sillans, 1989). En conséquence, certains insectes pourraient être affectés par une augmentation faible de la concentration en CO₂ (Sage, 2002).

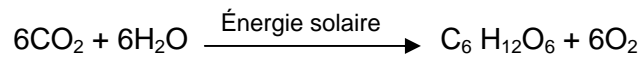
Les expériences menées sur la conservation des aliments montrent que les insectes ont des tolérances bien plus élevées au CO₂ que les vertébrés. Ainsi, une concentration en CO₂ de 40 % est utilisée de façon standard pour préserver la nourriture des insectes (Hepple, 2005).

Les insectes qui se nourrissent d'excréments (coprophages) sont particulièrement résistants au manque d'oxygène et à l'excès de CO₂ en raison de leur mode de vie. Ils s'adaptent généralement à des concentrations en CO₂ de l'ordre de 20% (Hepple, 2005 ; Holter, 1994).

2.3.3. Les végétaux : impacts sur les parties aériennes

Les impacts potentiels du CO₂ sur les parties souterraines des végétaux sont présentés dans la partie concernant les sols.

Les végétaux chlorophylliens utilisent le CO₂ de l'atmosphère comme unique source de carbone. La photosynthèse est le procédé par lequel les plantes capturent l'énergie solaire et la transforment en énergie chimique sous forme de liaisons dans du glucose (C₆ H₁₂O₆). La réaction chimique associée est la suivante :



Comme le montre l'illustration 8, la disponibilité du CO₂ est souvent un facteur limitant de l'activité photosynthétique des plantes en C3¹⁰ (Hopkins et Evrard, 2003). En conséquence, une élévation de la quantité de CO₂ dans l'air ambiant peut accélérer la croissance de ces plantes (Qi *et al.*, 1994 ; GIEC, 2005) pourvu que les autres ressources nécessaires soient disponibles en quantité suffisante. Néanmoins, la croissance des plantes à photosynthèse en C4 et CAM¹¹ n'est pas limitée par la disponibilité du CO₂, leur réponse est donc plus complexe et de moindre ampleur (Benson *et al.*, 2002).

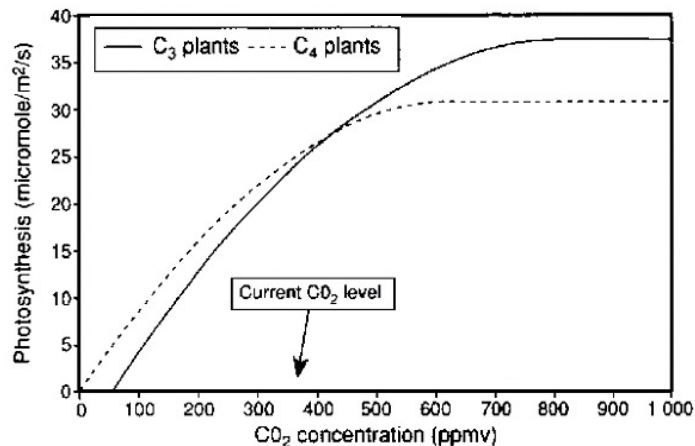


Illustration 8 - Effets du CO₂ sur la photosynthèse des plantes en C3 et C4 (Wolfe et Erickson, 1993).

À partir d'un certain seuil de concentration en CO₂, la plante arrive à un point de saturation : la photosynthèse n'augmente plus (Illustration 8). Ce seuil se situe aux

¹⁰ La majorité des plantes vivant en climat tempéré, dont tous les arbres, ont une photosynthèse dite « en C3 ». Elles fixent le CO₂ en formant des acides organiques à 3 carbones.

¹¹ Les plantes « en C4 » et les plantes « CAM » fixent le CO₂ en formant des acides à 4 carbones. Les plantes « CAM » sont les crassulacées (plantes grasses). Les « C4 » sont des plantes originaires de milieux tropicaux ou arides comme par exemple : le sorgho, le maïs, la canne à sucre.

alentours de 1 000 à 1 300 ppm (0,1 % à 0,13 %) dans les conditions idéales selon Khosla (2002). De plus, quand la concentration en CO₂ dépasse 0,1 à 0,2 %, les stomates de la plante (qui sont de petits orifices permettant les échanges gazeux) se ferment (Stupfel et Le Guern, 1989). D'après Bunce (1994), la respiration des plantes est souvent réduite au-delà de 700 ppm (0,07 %) en CO₂ ce qui pourrait avoir des répercussions sur la maintenance de la biomasse existante et la synthèse de nouveaux tissus. Les causes de cette baisse de respiration n'ont pas été expliquées.

À l'échelle de dizaines ou de centaines d'années, de faibles changements dans la concentration en CO₂ de l'air pourraient modifier la composition des peuplements végétaux peut-être en faveur des plantes en C3 (Hepple, 2005).

Toutefois, d'une manière générale, il est difficile d'estimer les impacts du CO₂ sur la photosynthèse car d'autres facteurs peuvent être limitants comme : le rayonnement solaire, la température, les ressources minérales, les conditions sanitaires, la pollution et la disponibilité des composés qui sont impliqués dans la fixation du CO₂ dans la feuille (Hopkins et Evrard, 2003 ; Khosla, 2002).

En agronomie, l'enrichissement des serres en CO₂ est devenu une technique courante pour augmenter les rendements. Dans la pratique, la concentration en CO₂ est souvent multipliée par deux (Hopkins et Evrard, 2003). D'après Khosla (2002), l'apport de CO₂ peut améliorer le rendement en fruits, la vigueur des tiges, la taille des fleurs et la précocité des cultures. Pour la majorité des cultures de serres une concentration en CO₂ de 1 000 ppm (soit 0,1 % de CO₂) fait augmenter la photosynthèse de 50 %.

Une augmentation modérée de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère entraîne généralement une hausse des rendements agricoles. Différentes expériences relatées par Ziska et Bunce (2007) ont montré qu'à 700 ppm le rendement du blé est 19 à 47 % fois plus élevé qu'à 370 ppm. Pour le soja et pour le riz, l'accroissement de rendement serait du même ordre de grandeur.

Les végétaux seraient bien plus tolérants que les animaux à des expositions extrêmement fortes en CO₂ sur de courtes durées, comme en témoigne l'absence de végétation morte après l'émission de CO₂ du Lac Nyos en 1986¹² (Stupfel et Le Guern, 1989 ; Hepple, 2005).

2.4. EFFETS DU CO₂ SUR LES ETRES VIVANTS DES SOLS

2.4.1. Généralités sur le sol

Les concentrations de CO₂ dans la porosité du sol varient habituellement de 0,2 à 4 % (GIEC, 2005). Toutefois, dans certains sols très peu aérés et saturés en eau la

¹² En 1986, environ 0,24 millions de tonnes de CO₂ ont été émises naturellement du lac Nyos en quelques heures causant la mort de plus de 1 700 personnes et de nombreux animaux à plus de 14 km aux alentours (Hepple, 2005).

concentration en CO₂ peut dépasser 10 %. La diffusion est le premier mécanisme de transport du CO₂ et de l'O₂ dans le sol (Hepple, 2005).

La concentration en CO₂ dans le sol dépend de la profondeur (elle augmente avec la profondeur), de l'humidité du sol, de l'activité biologique, de la teneur en matière organique et des matériaux présents. Il semblerait que la concentration en CO₂ varie plus dans les premiers mètres de sol en raison des variations saisonnières d'activité biologique qu'en profondeur où elle est relativement constante (FutureGen Alliance, 2006).

D'après GIEC (2005), en cas de fuites de CO₂, les concentrations rencontrées dans les sols seront généralement nettement supérieures à celles présentes dans l'atmosphère. À ce titre, les études sur l'impact des projets de stockage géologique de CO₂ FutureGen (FutureGen Alliance, 2006) et Gorgon (Chevron Australia, 2005) indiquent que les récepteurs qui pourraient être les plus impactés en cas de fuites du réservoir sont ceux qui vivent dans le sol et en particulier ceux qui sont les moins mobiles (cf. partie 4.2).

Un sol émet naturellement du CO₂. En effet, le CO₂ est assimilé par les plantes lors de la photosynthèse puis le carbone est transféré au sol sous forme organique dans les débris végétaux formant la litière. Ensuite, la décomposition de la matière organique, la respiration des êtres vivants du sol et des racines des plantes restituent le CO₂ dans l'atmosphère. Ce flux naturel est appelé le flux biologique de CO₂. Il peut être compris entre 0 et 15 g/m²/jour (Rogie *et al.*, 2001 ; Beaubien *et al.*, 2008 ; Stenhouse *et al.*, 2008).

2.4.2. Les animaux du sol

Les animaux vivant dans le sol pourraient commencer à subir des effets physiologiques négatifs à partir de 2 % et des concentrations de 15 % pourraient être létales (U.S. EPA, 2008 d'après Benson *et al.*, 2002). Toutefois, d'une manière générale, les animaux souterrains semblent relativement méconnus.

Les études sur l'impact des projets de stockage géologique de CO₂ FutureGen et Gorgon indiquent que les conséquences pourraient être importantes sur les animaux du sol en cas de fuites (cf. partie 4.2.). Ceux vivant dans la zone non saturée en eau risqueraient l'asphyxie tandis que ceux vivant dans la zone saturée (stygofaune¹³) pourraient être atteints par une baisse du pH. L'étude d'impact du projet Gorgon précise que les animaux souterrains sont une composante importante de la biodiversité régionale en raison de leur haut degré d'endémisme (c'est-à-dire que les groupes biologiques ont tendance à être présents exclusivement dans une région géographique délimitée).

¹³ La stygofaune est majoritairement composée de petits crustacés mesurant rarement plus de 5 mm. Les eaux souterraines peuvent aussi abriter d'autres êtres vivants comme des mollusques, des acariens, des vers ainsi que d'autres groupes jusqu'à des poissons dans certains cas particuliers.

D'après Hepple (2005), parmi les vertébrés, ceux qui vivent dans le sol sont les plus résistants car ils ont des adaptations physiologiques et morphologiques pour tolérer des concentrations élevées en CO₂. Ainsi, des teneurs en CO₂ allant jusqu'à 4 % ont été observées dans des trous de rongeurs, et jusqu'à 9 % dans des nids d'oiseaux souterrains.

Parmi les animaux du sol, les invertébrés sont les plus étudiés. Sustr et Simek (1996) ont étudié la réponse au CO₂ d'une large gamme d'invertébrés du sol appartenant à des groupes biologiques et des habitats variés et ont obtenu les résultats suivants :

- de 2 à 39 % de CO₂ suivant les espèces : modification dans la coordination des mouvements jusqu'à la paralysie temporaire ;
- à 30 % la moitié des espèces est paralysée ;
- de 11 à 50 % un effet léthal a été observé chez quelques-unes des espèces étudiées ;
- des isopodes¹⁴ et certaines collembolés¹⁵ se sont révélés être très sensibles au CO₂ alors qu'une résistance élevée a été notée chez des myriapodes (ou mille-pattes), des enchytréides¹⁶, des vers de terre et des insectes.

Zinkler et Platthaus (1996) ont montré qu'à 10 % de CO₂, la moitié des spécimens de collembolés de surface (*A. fusca*, *T. Flavescens*) meurent en quelques heures, tandis que les spécimens d'une espèce vivant en profondeur (*F. Candida*) résistent plus de 6 semaines à cette concentration. Cette variation de tolérance pourrait être une conséquence directe de l'adaptation des invertébrés à leur habitat.

2.4.3. Les parties souterraines des Végétaux

Généralités

En cas de fuites, les parties souterraines des végétaux semblent susceptibles d'être exposées à des concentrations plus élevées en CO₂ que les parties aériennes du fait de l'accumulation du CO₂ dans les sols avant dispersion dans l'atmosphère. Ainsi, même si une augmentation de la concentration en CO₂ dans l'air peut favoriser la croissance des plantes, une telle « fertilisation » sera généralement contrebalancée par l'effet préjudiciable du CO₂ dans le sol (GIEC, 2005).

En règle générale, on observe pour les plantes (GIEC, 2005) (Saripalli *et al.*, 2003) :

- au-dessus de 5 % de CO₂ dans le sol les premiers effets nocifs ;
- au-dessus de 20 % un effet toxique ;

¹⁴ Les isopodes sont par exemple représentés par les cloportes.

¹⁵ Les collembolés sont des petits invertébrés (2 à 3 mm habituellement) ressemblant souvent à des petites crevettes et vivant dans la litière du sol.

¹⁶ Les enchytréides sont de minuscules vers blancs du sol.

- au-dessus de 30 % un effet létal.

La concentration de CO₂ dans la zone racinaire qui entraîne la mort des plantes dépend de nombreux facteurs dont la durée d'exposition, l'humidité des sols, la disponibilité des substances nutritives et l'espèce concernée (Farrar *et al.*, 1999).

Une combinaison de stress sur un écosystème est bien plus préjudiciable que l'action d'un seul stress, d'autres facteurs peuvent donc aggraver l'impact direct du CO₂ (sécheresse, hiver particulièrement rude, invasion d'insectes) (Martini et Silver, 2002).

Effets physiologiques sur les plantes

Les premiers impacts du CO₂ sur les parties racinaires des plantes ont été mis en évidence au dessus de décharges d'ordures ménagères (Chang et Loomis, 1945). Le mécanisme d'action du CO₂ du sol sur les végétaux n'est pas connu (Beaubien *et al.*, 2008). Toutefois un excès de CO₂ dans le sol affecte :

- la croissance des végétaux en général (Vodnik *et al.*, 2006) ;
- la respiration des racines (Macek *et al.*, 2005) ;
- le développement des racines ainsi que l'absorption racinaire de l'eau et des minéraux au dessus de 10-20 % (Farrar *et al.*, 1999) ;
- la photosynthèse nette (Pfanzen *et al.*, 2007) ;
- la quantité de chlorophylle des feuilles (Vodnik, 2006 ; Flower *et al.*, 1981).

Globalement, les effets du CO₂ sur les végétaux peuvent s'apparenter à ceux d'un excès d'eau (Leone *et al.*, 1980). L'état de stress entraîne une modification de la réflectance de la végétation, qui peut être mise en évidence par des techniques d'imagerie hyperspectrale (Projet CO₂MONITOR).

Cependant, les tolérances au niveau des racines semblent très variables d'une espèce à l'autre (Flower *et al.*, 1981). Ainsi, d'après Qi *et al.* (1994), la respiration du Douglas décroît exponentiellement quand la concentration en CO₂ dans le sol passe de 0,013 % à 0,7 %. Bunnell *et al.* (2002) ont montré qu'à partir de 2,5 % de CO₂ dans le sol la masse et la profondeur des racines de gazon sont réduites. A partir de 10% de CO₂ la qualité du gazon est inacceptable principalement en raison d'une réduction de croissance et d'un changement de couleur. Geisler (1963) a constaté chez le pois un effet opposé : une augmentation de la concentration en CO₂ dans le sol jusqu'à 12% peut stimuler la croissance des racines (longueur et masse totale). Néanmoins, au-delà, un effet inhibiteur est observé.

L'accumulation de CO₂ dans le sol pourrait être préjudiciable aux cultures. Flower *et al.* (1977) ont constaté différents cas de cultures atteintes par des gaz (en particulier du CO₂) provenant de décharges situées parfois à plus de 200 m de la zone impactée. De plus, une baisse de pH dans les sols de seulement une unité peut diminuer les rendements agricoles (Saripalli *et al.*, 2003).

Les effets constatés sur des sites où du CO₂ est émis

Aucun exemple d'impact de fuite provenant de réservoir de stockage géologique de CO₂ n'a été rencontré lors de cette étude bibliographique. Cette partie s'intéresse donc aux effets constatés sur des sites où du CO₂ est émis à la surface à partir de réservoirs naturels dans des situations géologiques particulières (zone très fracturées, volcanisme, thermalisme). Ces sites sont parfois appelés « analogues naturels au stockage géologique de CO₂ », bien que l'analogie soit discutable.



Illustration 9 - Site d'émission naturelle de CO₂ sur la caldeira de Latera en Italie (d'après Beaubien et al., 2008).

Sur certains sites, l'impact visuel du CO₂ sur les plantes est très net. Par exemple, au cœur d'une zone d'émission naturelle du site de Latera en Italie, aucune végétation ne survit sur un diamètre d'environ 6 m (Illustration 9). Autour de ce cœur se trouve une zone de transition d'environ 18 m de large où l'impact sur la végétation décroît, jusqu'à ce que le sol retrouve ses conditions d'origine (Beaubien *et al.*, 2008).

Des ordres de grandeur de surfaces impactées sont donnés dans l'illustration 10 pour quelques sites. Ces valeurs peuvent varier de façon importante en fonction des sources.

À Horseshoe Lake (Illustration 10), la végétation commence à montrer des signes de stress quand la concentration de CO₂ du sol atteint 20% (Farrar *et al.*, 1999). Dans les zones où les arbres sont morts, le flux de CO₂ émis par le sol est généralement supérieur à 100 ou 500 g/m²/jour tandis que la concentration dans le sol varie de 30 % à plus de 95 % (Farrar *et al.*, 1999 ; Gerlach *et al.*, 1999).

Lieu du site	Surface impactée (ordre de grandeur en m ²)	Débit total en tonne/j	Débit sur la zone impactée en g/m ² /jour			Impacts constatés	Sources
			moyen	mini	maxi		
Horseshoe Lake, Mammoth Mountain, Etats-Unis	120 000	93	775	100	>10 000	Hommes, forêt, oiseaux, rongeurs	Gerlach <i>et al.</i> , 1999, Farrar <i>et al.</i> , 1999
Ciampino, Cava dei Selci, Italie	10 000	20	2000		108 000	Hommes, 30 vaches, moutons	Carapezza <i>et al.</i> , 2003
Latera, Italie	250	0,22	900		>3 000	Végétation, micro- organismes	Beaubien <i>et al.</i> , 2008
Flux biologique « normal »			0 à 15				Rogie <i>et al.</i> , 2001 ; Beaubien <i>et al.</i> , 2008 ; Stenhouse <i>et al.</i> , 2008

Illustration 10 - Exemples de sites d'émission naturelle de CO₂ et ordres de grandeurs de débits mesurés et de surfaces impactées.

D'après Beaubien *et al.* (2008), sur un site de Latera la composition du peuplement végétal change à partir d'une concentration de 5 % en CO₂ et 20 % de O₂ mesurée à 10 cm de profondeur dans le sol (ou de 20 % en CO₂ et de 17% en O₂ à 20 cm de profondeur). À partir de cette concentration, seules des monocotylédones¹⁷ sont présentes et le pH est inférieur à 4,5. En effet, le trèfle et les autres espèces disparaissent, ce qui entraîne une baisse de la diversité. Une espèce (*A. capillaris*) a été identifiée comme capable de survivre à des concentrations extrêmement élevées en CO₂ (15 à 40 % à 10 cm de profondeur). Le trèfle, qui est une légumineuse¹⁸, pourrait être affecté par une baisse de l'activité des bactéries symbiotiques fixatrices d'azote qu'il héberge (Illustration 11).

Néanmoins, les changements dans la composition du peuplement végétal semblent être différents d'un site à l'autre. En effet, sur le site de Laacher See en Allemagne, Kruger *et al.* (2009) ont remarqué que deux espèces de dicotylédones¹⁹ (dont *P. arenastrum*) étaient prédominantes au-dessus de 20 % de CO₂ à 15 cm de profondeur alors qu'elles étaient absentes à des concentrations inférieures. Ces espèces pourraient être utilisées comme bio-indicateurs d'une augmentation de la concentration en CO₂.

La comparaison entre les effets constatés sur les sites d'émission naturelle de CO₂ et ceux qui pourraient être envisagés en cas de fuites d'un réservoir de stockage géologique présente plusieurs limites :

¹⁷ Parmi les plantes à fleurs, les monocotylédones présentent une plantule à un seul cotylédon sur l'embryon, qui évolue en donnant une préfeuille. Ces plantes ne présentent généralement pas de ramification ni de bois, exemple : l'herbe, le blé, le maïs.

¹⁸ Les légumineuses ont la particularité d'héberger dans leur système racinaire des bactéries qui transforment l'azote de l'air en composés azotés directement utilisables par la plante.

¹⁹ Parmi les plantes à fleurs et à l'opposé des monocotylédones, les dicotylédones présentent une plantule à deux cotylédons sur l'embryon. Exemple : tous les arbres, le haricot, le trèfle.

- le flux de CO₂ contient souvent d'autres gaz qui peuvent être nocifs pour les êtres vivants à très faibles concentrations (comme le H₂S). Il est donc difficile d'individualiser les effets du CO₂ par rapport à ceux des autres gaz ;
- la réponse des écosystèmes montre de nombreuses différences d'un site à l'autre ;
- il est probable que les êtres vivants qui ont été exposés pendant longtemps à des concentrations élevées en CO₂ se soient adaptés (Beaubien *et al.*, 2008). Dans ce cas, la réponse des êtres vivants ne serait pas équivalente à celle obtenue sur un site n'ayant pas été soumis à des émissions de CO₂ auparavant.

En ce qui concerne le dernier point, le projet ASGARD a été créé pour s'affranchir de l'adaptation des êtres vivants. Après 19 semaines d'injection de CO₂ dans une prairie, West *et al.* (2008) ont remarqué qu'au-delà de 75 % aucune plante ne survit et que les monocotylédones sont dominantes au-delà de 45 % de CO₂ mesuré à 20 cm de profondeur. De plus, le CO₂ semble impacter la diversité des peuplements, car les zones où du CO₂ est injecté montrent une proportion moins importante en végétaux minoritaires que les zones témoins.

2.4.4. Les micro-organismes du sol

D'une manière générale, 50 % de CO₂ a un effet inhibiteur significatif, si ce n'est léthal sur les micro-organismes. Toutefois, la variabilité des réponses est très grande chez les micro-organismes. En effet, certains peuvent mourir en présence de 10 % de CO₂ alors que d'autres peuvent survivre dans un univers à quasiment 100 % de CO₂ à partir du moment où quelques molécules de O₂ sont disponibles (Benson *et al.*, 2002).

Les études effectuées sur le site de Latera et le site du projet ASGARD montrent qu'au cœur de la zone d'émission de CO₂, le nombre de bactéries décroît fortement ainsi que leur activité (West *et al.*, 2008 ; Beaubien *et al.*, 2008). Sur le site d'émission naturelle de CO₂ de Laacher See en Allemagne, Kruger *et al.* (2009) ont remarqué que le nombre d'eubactéries²⁰ diminue au cœur de la zone d'émission tandis que celui d'archéobactéries augmente.

Sur les sites de Latera et de Laacher See, les bactéries anaérobies (les sulfato-réductrices et les archéobactéries méthanogènes) semblent tirer profit des conditions réductrices du milieu qui augmentent leur activité (Beaubien *et al.*, 2008 ; Kruger *et al.*, 2009).

En influant sur les communautés bactériennes, le CO₂ pourrait impacter le cycle de l'azote (Illustration 11). Sur le site de Latera, Dictor *et al.* (2008) ont remarqué que l'activité des bactéries nitrifiantes (qui transforment l'ammoniaque en nitrate, la principale forme de l'azote assimilable par les plantes) est très faible dans un sol contenant 25,5 % de CO₂, voire nulle à 65,8 %. L'activité des bactéries dénitrifiantes (qui transforment les nitrates en diazote gazeux) est diminuée d'un facteur 4 à 10

²⁰ Parmi les « bactéries », on distingue traditionnellement les archéobactéries (primitives, vivant dans des milieux extrêmes) des eubactéries (ou bactéries vraies).

lorsqu'un échantillon de sol habituellement peu exposé au CO₂ est incubé dans une atmosphère contenant plus de 20 % de CO₂.

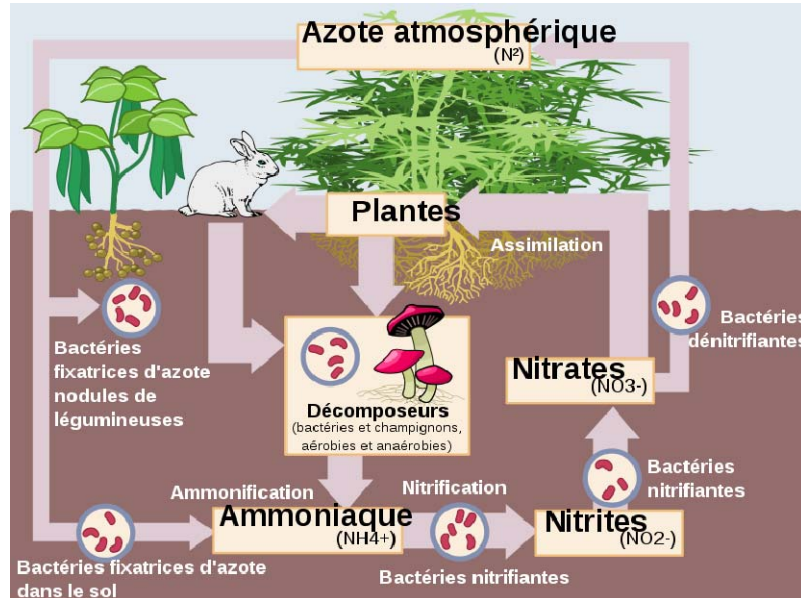


Illustration 11 - Le Cycle de l'azote (d'après US EPA).

La diversité du métabolisme des bactéries d'un échantillon de sol habituellement peu exposé au CO₂ est affectée lorsque la concentration en CO₂ dépasse 50 % (Dictor et al., 2008).

2.4.5. Les Mycètes (ou champignons)

Les mycètes vivent majoritairement dans le sol ou sur la matière organique en décomposition où les concentrations en CO₂ sont habituellement élevées. Ainsi, ils sont relativement peu sensibles à une augmentation de la concentration en CO₂ (Sage, 2002). Néanmoins, une concentration en CO₂ de 40 % est utilisée de façon standard pour préserver la nourriture des mycètes (Hepple, 2005). Des études ont été faites pour deux types de mycètes : entre 15 et 20 % de CO₂ la croissance et la germination des spores sont inhibées, à 30 % de CO₂ aucune croissance n'est mesurée et à 50 % aucune spore ne germe (Hepple, 2005).

2.5. EFFETS DU CO₂ SUR LES ÊTRES VIVANTS DU SOUS-SOL

Des découvertes récentes montrent que des micro-organismes vivent dans le sous-sol jusqu'à au moins 3,2 km sous la surface (Onstott, 2005). Suivant les auteurs, la limite viable pour les microbes se trouverait entre 4 km et 10 km de profondeur car, au-delà, la température semble trop élevée (Gold, 1992 ; Whitman et al., 1998). Les micro-organismes sont donc présents à toutes les profondeurs de stockage, notamment dans les formations salines et les réservoirs de gaz et de pétrole (GIEC, 2005). L'identité de ces micro-organismes est largement méconnue (Hepple, 2005).

La quantité de micro-organismes varie de plus de 10⁸ cellules par gramme de terre en surface à 10²-10⁶ cellules par gramme de roche à 3 km de profondeur. La grande majorité des bactéries présentes sur notre planète se trouverait dans le sous-sol (Whitman *et al.*, 1998) et la masse de matière vivante du sous sol serait comparable à celle présente sur l'ensemble de la surface de la terre (Gold, 1992).

Les micro-organismes des profondeurs ont recours à des voies anaérobies qui les rendent auto-suffisants en termes de minéraux et de source d'énergie (Onstott, 2005). Ils pourraient être impactés par la baisse du pH et une modification du potentiel redox (Onstott, 2005). Certaines communautés de micro-organismes pourraient être stimulées (notamment les bactéries Fe³⁺ réductrices). Globalement l'injection de CO₂ pourrait augmenter la disponibilité de l'azote et du phosphore (Onstott, 2005). Les impacts du CO₂ sur les populations microbiennes des grandes profondeurs sont peu étudiés (GIEC, 2005). Ils peuvent être forts mais les conséquences sont inconnues (Hepple, 2005 ; Johnston et Santillo, SD). Peu de données sont disponibles sur les conséquences d'un impact sur ces organismes et sur l'importance de les protéger.

2.6. EFFETS DU CO₂ SUR LES ÊTRES VIVANTS DES EAUX DOUCES SUPERFICIELLES

2.6.1. Particularités des milieux aquatiques

À une température de 20°C, l'eau en équilibre avec l'atmosphère a une concentration en CO₂ d'environ 0,6 mg/l. Toutefois, les eaux douces sont en général sur-saturées en CO₂ (Jones *et al.*, 2003). Des études effectuées sur un grand nombre de lacs ont montré que la pression partielle de CO₂ dans l'eau douce est en moyenne trois fois plus élevée que dans l'atmosphère²¹, elle est donc égale en moyenne à 1 100 µatm (~100 Pa ou encore 2 mg/l) (Cole *et al.*, 1994). Contrairement aux océans, les eaux douces seraient donc des sources de CO₂.

Dans les eaux courantes (rivières, ruisseaux) le mode de transport préférentiel du CO₂ est l'advection tandis que dans les lacs la diffusion et la dispersion dominent (Saripalli *et al.*, 2003).

Les êtres vivants aquatiques ont la particularité d'être en contact direct avec l'eau et doivent lutter en permanence pour maintenir une différence de concentrations en solutés entre la solution de leur corps et l'eau qui les entoure. Beaucoup d'êtres vivants aquatiques ont des exigences relativement strictes en termes de valeur et de stabilité de pH (FutureGen Alliance, 2006). Des variations de pH de quelques dixièmes pourraient être très stressantes si ce n'est létales (Hepple, 2005). De plus, les eaux douces n'ont pas un pouvoir tampon très grand (par rapport à l'eau de mer), et donc des émissions de CO₂ pourraient faire varier leur pH de façon très significative (Benson

²¹ Deux explications peuvent être données à ce phénomène : soit l'eau collectée dans le lac s'est préalablement chargée en CO₂ lors de son trajet à travers le sol, soit le CO₂ est produit dans le lac (ce qui est le cas quand la production de CO₂ par respiration des êtres vivants est plus importante que la capture de CO₂ par la photosynthèse des plantes aquatiques).

et al., 2002). D'après Saripalli *et al.* (2003), quand la pression partielle de CO₂ est multipliée par 10 dans l'eau, le pH baisse de 0,7 unités.

Le faible nombre d'animaux aquatiques présents dans ou à proximité des sources gazeuses suggère que les fuites de CO₂ peuvent avoir des impacts localisés significatifs (Benson *et al.*, 2002).

D'après Saripalli *et al.* (2003), des concentrations en CO₂ à partir de 20 à 110 mg/l entraînent des perturbations pour les êtres vivants aquatiques.

Peu d'informations sont disponibles sur les effets d'une augmentation de la concentration en CO₂ sur les lacs et les rivières. La plupart des études se concentrent sur l'augmentation de la concentration atmosphérique et sur les changements climatiques plutôt que sur les fuites venant du fond (IEA GHG, 2007).

2.6.2. Les poissons

D'après Saripalli *et al.* (2003), les effets physiologiques d'une fuite de CO₂ sur les poissons pourraient être considérés comme représentatifs des conséquences sur les êtres vivants aquatiques en général.

Selon Ishimatsu *et al.* (2005), les poissons (et d'autres animaux qui respirent dans l'eau) sont plus vulnérables à une augmentation de la concentration en CO₂ que les animaux terrestres. En effet, la différence de pression partielle en CO₂ entre le fluide du corps et le milieu ambiant est bien plus faible pour les poissons (quelques millimètres de mercure seulement soit quelques centaines de Pascal) que pour les animaux terrestres (habituellement 30-40 mmHg soit 4 000 à 5 000 Pa). Ainsi, une augmentation, même faible, de la concentration de CO₂ dans l'eau pourrait inverser les gradients de concentrations et donc faire diffuser le CO₂ depuis l'eau vers l'intérieur du poisson. L'hypercapnie affecte les fonctions vitales physiologiques des poissons comme la respiration, la circulation, le métabolisme, la croissance, la reproduction.

Au-dessus de 35 mg/l, la vie des poissons peut être mise en danger (Saripalli *et al.*, 2003). Néanmoins, suivant les espèces, les poissons réagiraient différemment : les poissons d'eau vive, comme la truite, seraient plus sensibles que des poissons de fond comme l'anguille (FutureGen Alliance, 2006).

De jeunes esturgeons exposés à des concentrations élevées en CO₂ (40-60 mg/l) montrent rapidement des signes d'hyperventilation, d'hypercapnie et d'acidose qui ne sont pas compensés durant la durée d'exposition (96 heures) (Crocker et Cech, 1996).

Dans certains cas, les poissons pourraient s'adapter à une augmentation de la concentration en CO₂ (FutureGen Alliance, 2006). Néanmoins, peu d'informations sont disponibles à ce propos.

2.6.3. Végétaux aquatiques et algues

D'une manière générale, l'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'eau a tendance à stimuler la croissance des végétaux aquatiques et des algues (FutureGen Alliance, 2006). Par exemple, Titus et Pagano (2002) ont montré que des plantes aquatiques (des vallisnéries) étaient bien plus grandes après 14 semaines de croissance dans un milieu à environ 7 mg/l qu'à 0,8 mg/l de CO₂. Toutefois, certaines espèces montreraient peu d'augmentation de croissance avec un enrichissement en CO₂.

L'injection de CO₂ dans l'eau est quelque chose de très courant dans les aquariums afin de stimuler la croissance des plantes aquatiques. A titre d'exemple, une association aquariophile²² précise que la bonne concentration en CO₂ se trouve aux alentours de 30 mg/l car des concentrations supérieures pourraient être néfastes aux poissons. En cas d'injection de CO₂, la surveillance du pH de l'aquarium est préconisée.

2.6.4. Invertébrés et autres êtres vivants aquatiques

Les études concernant les effets du CO₂ sur les invertébrés aquatiques sont rares (FutureGen Alliance, 2006).

2.7. CONCLUSION SUR LES EFFETS DU CO₂

L'annexe 1 rassemble sous forme de tableau les effets du CO₂ évoqués précédemment.

Si les effets du CO₂ semblent bien documentés pour l'homme, il existe beaucoup d'inconnues concernant de nombreuses espèces d'êtres vivants. De plus, cette étude bibliographique montre une très grande variabilité des réponses en fonction des espèces et des milieux de vie considérés. Ainsi, il semble difficile de tirer des conclusions générales sur les effets du CO₂ sur les êtres vivants. D'autant plus qu'en cas de fuites, le CO₂ pourrait être associé à d'autres gaz.

²² D'après le site http://www.aquariophilie.org/pages/technique_co2.php.

3. Effets des impuretés sur les êtres vivants

3.1. LES IMPURETÉS D'UNE FUITE DE CO₂

L'annexe I de la Directive européenne sur le stockage géologique de CO₂ précise que l'évaluation des effets d'une fuite doit aussi porter sur les autres substances présentes dans les flux de CO₂ qui s'échappent (Commission européenne, 2009). Ces « autres substances » seront ici appelées impuretés.

Les impuretés qui peuvent être présentes dans une fuite de CO₂ arrivant en surface sont :

- les impuretés injectées avec le CO₂ ;
- les gaz du sous-sol entraînés par le flux de CO₂ ;
- les éventuels produits de réaction de ces substances au cours du stockage ou du transport.

3.1.1. Les impuretés injectées avec le CO₂

D'après le rapport du GIEC (2005), la plupart des études d'évaluation de risques ont considéré que seulement du CO₂ était stocké. Toutefois, le CO₂ capturé peut contenir dans certaines circonstances les impuretés suivantes : H₂S, SO₂, NO_x, H₂, CO, N₂, O₂, Ar, CH₄, CN, H₂O, NH₃, Hg, As, Se, Cd et d'autres substances traces (GIEC, 2005 ; IEA GHG and SNC-Lavalin Inc, 2004 ; IEA GHG, 2007 ; U.S. DOE, 2007). Le rapport du GIEC (2005) indique des valeurs de concentrations en impuretés dans du CO₂ capturé par différents procédés (Illustration 12). Les teneurs en impuretés varient de façon très importante en fonction du combustible, du procédé et du type de capture.

Les teneurs maximales en impuretés dans les conditions les plus défavorables par rapport aux procédés et aux combustibles sont présentées à l'illustration 13. Il est précisé que ces valeurs ont un haut degré d'incertitude et que des études supplémentaires doivent être menées pour évaluer de façon plus précise les teneurs probables en éléments traces.

	SO ₂	NO	H ₂ S	H ₂	CO	CH ₄	N ₂ /Ar/O ₂	Total
COAL FIRED PLANTS								
Post-combustion capture	<0.01	<0.01	0	0	0	0	0.01	0.01
Pre-combustion capture (IGCC)	0	0	0.01-0.6	0.8-2.0	0.03-0.4	0.01	0.03-0.6	2.1-2.7
Oxy-fuel	0.5	0.01	0	0	0	0	3.7	4.2
GAS FIRED PLANTS								
Post-combustion capture	<0.01	<0.01	0	0	0	0	0.01	0.01
Pre-combustion capture	0	0	<0.01	1.0	0.04	2.0	1.3	4.4
Oxy-fuel	<0.01	<0.01	0	0	0	0	4.1	4.1

Illustration 12 - Concentrations en impuretés dans du CO₂ déshydraté capturé en sortie de centrales au charbon ou au gaz exprimées en % du volume total (GIEC, 2005).

Les concentrations sont basées sur l'utilisation d'un charbon contenant 0,86 % de soufre. Les concentrations des composés soufrés sont directement proportionnelles à la teneur en soufre du combustible.

Impuretés	H ₂ S	SO ₂	NOx	H ₂	CO	Hg	As	Se
Teneur maximale	3,4 %	2,9 %	0,14 %	1,8 %	0,2 %	5,6*10 ⁻⁵ g/Nm ³	8,6*10 ⁻⁴ g/Nm ³	3,2*10 ⁻⁵ µg/Nm ³

Nm³ : Normal m³ (c'est-à-dire 1 m³ dans les conditions normales de température et de pression).

Illustration 13 - Niveaux maximum d'impuretés dans du CO₂ déshydraté capturé en sortie de centrales au charbon ou au gaz, exprimés en proportion du volume, dans les conditions d'exploitation les plus défavorables par rapport aux procédés et aux combustibles (d'après IEA GHG and SNC-Lavalin Inc, 2004).

3.1.2. Les impuretés entraînées par le flux de CO₂ et obtenues par réactions chimiques

Peu de données existent. De plus, il semblerait que les conditions locales propres à chaque site (contexte géologique, géochimie...) aient une importance déterminante dans ce domaine.

Le CO₂ peut se comporter comme un transporteur d'autres gaz, tels que des sulfures (dont le H₂S), du radon, du méthane et d'autres éléments traces (IEA GHG, 2007). Dans certains cas, une fuite de CO₂ pourrait entraîner une mobilisation des métaux lourds dans les sols par baisse du pH (GIEC, 2005).

3.2. LES EFFETS DES IMPURETÉS

Il conviendrait de se demander au préalable quelles impuretés sont susceptibles d'atteindre un récepteur et sous quelle forme (par exemple, le mercure peut se trouver sous la forme de vapeurs de mercure, d'oxydes de mercure, de chlorures de mercure

etc.). De façon générale, la quantité de substance mise en contact avec l'organisme s'appelle la dose²³.

Toutefois, il semblerait qu'aucun type de recherche n'ait encore déterminé ne serait-ce que le devenir des éléments injectés avec le CO₂ (IEA GHG, 2007). Ainsi, le rapport du GIEC (2005) précise que les informations disponibles sont insuffisantes pour évaluer le risque associé aux impuretés. Des travaux sont en cours afin d'améliorer la connaissance de cette problématique.

3.2.1. Généralités

L'étude de l'impact des impuretés sur les êtres vivants présente de nombreuses difficultés. Quelques-unes sont listées ci-dessous :

- contrairement au CO₂ dont les effets toxiques agissent principalement sur la respiration et les équilibres chimiques de l'organisme, certaines impuretés peuvent avoir de nombreux autres effets du type cancer, atteinte du système immunitaire, malformation à la naissance, atteinte de la fécondité, effets neurologiques et endocriniens... ;
- de nombreuses inconnues existent encore sur la toxicité des substances chimiques pour l'homme et les êtres vivants ;
- la toxicité des impuretés dépend souvent grandement de la forme chimique sous laquelle se trouvent les substances ;
- l'inhalation n'est pas la seule voie d'administration à considérer. Une étude complète de la toxicité de certaines substances supposerait des investigations approfondies sur l'ensemble des voies possibles c'est à dire l'inhalation, l'ingestion et la voie cutanée ;
- pour le CO₂, les effets apparaissent à partir d'un certain seuil, pour les impuretés on distingue les effets avec seuil et sans seuil²⁴ ;
- certaines substances (le cadmium, le sélénium, le mercure et l'arsenic) peuvent s'accumuler dans les chaînes trophiques (bioaccumulation) ;

²³ Dose : Quantité d'une substance mise en contact avec l'organisme. Elle s'exprime en milligramme ou microgramme par kilogramme de poids corporel et par jour. À défaut de précision, la dose est externe ou administrée. D'après le glossaire du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, <http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr/GlossaireA-C.asp>.

²⁴ Les effets avec seuil ne surviennent que si une certaine dose est atteinte et dépasse les capacités de détoxification, de réparation ou de compensation de l'organisme : il existe donc une dose limite en dessous de laquelle le danger ne peut apparaître. Les effets sans seuil pourraient apparaître quelle que soit la dose reçue par l'organisme (principalement : effets cancérogènes). D'après le glossaire du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de la Mer, <http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr/GlossaireA-C.asp>

- certaines substances ont une persistance élevée, c'est-à-dire que leur dégradation complète ou partielle est lente, à la différence du CO₂ qui est rapidement inclus dans des processus biogéochimiques ;
- il existe des effets de synergies entre substances ;
- certaines impuretés (O₂, H₂, N₂) n'ont à priori pas d'effet tant qu'elles restent dans de faibles proportions.

3.2.2. Effets sur l'homme

La littérature du CO₂ se concentre principalement sur les effets du H₂S. Le H₂S est considérablement plus toxique que le CO₂ (GIEC, 2005). En France, la Valeur Limite de Moyenne d'Exposition (VME) au H₂S est de 5 ppm (ou 0,0005 %) soit une valeur mille fois inférieure à celle du CO₂ (5 000 ppm ou 0,5 %).

Shuler et Tang (2005) ont contacté un certain nombre d'opérateurs pratiquant actuellement l'injection de CO₂ dans le cadre de la récupération assistée du pétrole afin de connaître leurs priorités en termes de monitoring. Ils ont remarqué que le monitoring du CO₂ semble une assez faible priorité pour les exploitants étant donné que ce gaz est considéré comme peu toxique²⁵. En revanche, pour les projets où du H₂S est présent avec le CO₂, des efforts assez importants portent sur la prévention de l'exposition au H₂S.

L'INERIS met en ligne sur son site internet²⁶ des fiches de données toxicologiques et environnementales rassemblant l'état des connaissances sur les effets de nombreux composés chimiques sur l'homme et les êtres vivants.

3.2.3. Effets sur les êtres vivants autres que l'homme

Le rapport du GIEC (2005) fait remarquer que si des impuretés sont capturées avec le CO₂ cela aura pour avantage de réduire les émissions vers l'atmosphère, mais qu'en contrepartie il peut en résulter des impacts environnementaux locaux au niveau du site de stockage.

L'IEA GHG (2007) souligne que la plupart des gaz injectés avec le CO₂ sont actifs d'un point de vue biogéochimique et peuvent impacter les populations microbiennes à la fois dans le réservoir et, en cas de fuites, en surface. De plus, le H₂S, les SO_x et les NO_x peuvent modifier le pH et les conditions oxydo-réductrices du sol s'ils sont co-transportés avec le panache de CO₂. Ceci pourrait changer la disponibilité des

²⁵ Remarque : Le CO₂ injecté sur le site de Weyburn contient environ 2 % de H₂S (GIEC, 2005). Supposons qu'une fuite advienne avec un tel pourcentage de H₂S. Pour que la concentration dans l'atmosphère soit inférieure à la VME du H₂S (5 ppm), il faut un facteur de dilution de 4 000. Pour que la concentration dans l'atmosphère soit inférieure à la VME professionnelle indicative du CO₂ (5 000 ppm), il suffit d'un facteur de dilution de 200 environ.

²⁶ Disponible sur http://www.ineris.fr/index.php?module=cms&action=getContent&id_heading_object=3.

minéraux nécessaires aux plantes et modifier l'habitat ainsi que la diversité des communautés microbiennes et des plantes.

Le rapport du GIEC (2005) ajoute que le SO₂ est un acide bien plus fort que celui obtenu par dissolution du CO₂. Ainsi, il pourrait renforcer la mobilisation de métaux traces dangereux.

3.3. VALEURS LIMITES D'EXPOSITION AUX IMPURETÉS

3.3.1. Valeurs limites d'exposition de l'homme aux impuretés

En France, des valeurs limites d'exposition sont utilisées dans différents cadres. L'illustration 14 est une brève synthèse de certaines valeurs limites recensées lors de cette étude bibliographique. Elle se concentre essentiellement sur la voie d'administration par inhalation. Néanmoins, certaines valeurs limites d'exposition par voie orale (ingestion) et voie cutanée sont données à titre d'exemple. Les parties 3.3.1. et 3.3.2. décrivent les origines des valeurs présentées dans l'illustration 14.

Valeurs limites utilisées en milieu de travail

L'Institut National de Recherche et de Sécurité a rassemblé dans un aide mémoire technique (INRS, 2008) les agents chimiques pour lesquels le Ministère du Travail a fixé des valeurs limites réglementaires ou de recommandations d'exposition professionnelle dans l'atmosphère du lieu de travail (VME et VLCT, cf. 2.2.4). Le site du BGIA (homologue allemand de l'INRS) héberge une base de données²⁷ donnant accès aux valeurs limites de nombreux pays. Ces valeurs, conçues pour des personnes en activité, ne s'adapteraient pas à une population plus large (présence d'enfants et de personnes fragiles) (U.S. DOE, 2007 ; Circulaire DGS\SD.7B n° 2006/05/06).

Valeurs seuils de référence utilisées pour les études de dangers

Les valeurs seuils de toxicité aiguë françaises (VSTAF) sont les valeurs d'expositions accidentelles de référence pour les installations classées stockant, produisant ou employant des substances toxiques. A partir des scénarios de phénomènes dangereux mis en évidence dans les études de dangers, elles sont utilisées pour déterminer les zones des effets létaux, irréversibles et réversibles. L'utilisation de ces valeurs est encadrée par un arrêté du Ministère chargé de l'Écologie²⁸.

²⁷ Consultable en ligne : http://www.dguv.de/bgia/en/gestis/limit_values/index.jsp.

²⁸ Arrêté du 29/09/05 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation.

Cadre dans lequel est utilisée la valeur	HOMME						AUTRES ETRES VIVANTS		
	Valeurs limites d'exposition professionnelle fixées par le Ministère du Travail (INRS, 2008)	Etudes de dangers Toxicité aiguë (INERIS ^d , Note du 16/11/07 ^b)	Qualité de l'air Décret 2002-213 du 15/02/2002	Evaluations des risques sanitaires Valeurs Toxicologiques de Référence	Type d'effet (INERIS ^c)	PNEC Concentrations sans effet prévisible pour l'environnement (INERIS ^c)	Qualité de l'air Décret 2002-213 du 15/02/2002		
Substance	VME	VLCT	Effets sur l'Homme	Seuil d'effets irréversibles 30 min	Valeur limite pour la protection de la santé humaine	Seuil d'alerte	Exemples de VTR proposées par l'INERIS ^c par voie d'administration	Substance à seuil ou sans seuil	Valeur limite pour la protection des écosystèmes
CO ₂	5 000 ppm (0,5%)	Pas de limite	Toxique par inhalation	50 000 ppm (5 %)	Pas de limite	Pas de limite	Pas de valeur proposée	Seuil	Pas de limite
H ₂ S	5 ppm	10 ppm	Très toxique par inhalation	100 ppm	Pas de limite	Pas de limite	Pas de valeur proposée		
SO ₂	2 ppm	5 ppm	Toxique par inhalation		350 µg/m ³ (0,13 ppm) en moyenne horaire (24h de dépassement autorisées/an)	500 µg/m ³ (0,19 ppm) en moyenne horaire si dépassé pendant 3 h consécutives	Inhalation aiguë MRL = 0,01 ppm	Seuil (et sans seuil ?)	20 µg/m ³ (0,008 ppm) en moyenne annuelle
NO ₂	Pas de limite	3 ppm		50 ppm	40 µg/m ³ (0,02 ppm) en moyenne annuelle	400 µg/m ³ (0,21 ppm) en moyenne horaire	Inhalation aiguë REL = 0,25 ppm pour les effets à seuils	Seuil (et sans seuil?)	
NOx	25 ppm	Pas de limite	Très toxique par inhalation		Pas de limite	Pas de limite	Pas de valeur proposée	Seuil (et sans seuil?)	30 µg/m ³ de NOx en moyenne annuelle (pour la végétation)
H ₂	Pas de limite	Pas de limite			Pas de limite	Pas de limite	Pas de valeur proposée		
CO	50 ppm	Pas de limite	Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant, toxique par inhalation		Pas de limite	10 mg/m ³ (8,8 ppm) max journalier sur une fenêtre glissante de 8 h	Pas de valeur proposée		

Cadre dans lequel est utilisée la valeur	HOMME					AUTRES ETRES VIVANTS	
	Valeurs limites d'exposition professionnelle fixées par le Ministère du Travail (INRS, 2008)	Etudes de dangers Toxicité aiguë (INERIS ^a ; Note du 16/11/07 ^b)	Qualité de l'air Décret 2002-213 du 15/02/2002	Evaluations des risques sanitaires Valeurs Toxicologiques de Référence	Type d'effet (INERIS ^c)	PNEC Concentrations sans effet prévisible pour l'environnement (INERIS ^c)	Qualité de l'air Décret 2002-213 du 15/02/2002
Substance	VME VLCT Effets sur l'Homme	Seuil d'effets irréversibles 30 min	Valeur limite pour la protection de la santé humaine	Exemples de VTR proposées par l'INERIS ^c par voie d'administration	Substance à seuil ou sans seuil	Valeur limite pour la protection des écosystèmes	
NH₃	10 ppm 20 ppm	500 ppm	Pas de limite	Pas de valeur proposée		Pas de valeur fixée	
Cyanures, en CN	5 mg/m ³ Pas de limite		Pas de limite	Orale DJT = 12 µg/kg	Seuil (et sans seuil?)	PNEC eau = 0,114 µg/L	
Hg (vapeur)	0,05 mg/m ³ Pas de limite		Pas de limite	Inhalation TCA = 3.10 ⁻⁷ mg/m ³	Seuil (et sans seuil?)	PNEC eau = 0,24 µg/L pour les effets directs, PNEC sed = 9,3 mg/kg poids sec, PNEC sol = 27 µg/kg poids sec	
AsH₃	0,2 mg/m ³ 0,8 mg/m ³ Très toxique par inhalation	0,6 mg/m ³	Pas de limite	Inhalation sans seuil ERU = 4,3.10 ⁻³ (µg/m ³) ⁻¹ Orale aiguë MRL = 5.10 ⁻³ mg/kg/j Orale MRL = 3.10 ⁻⁴ mg/kg/j, Orale sans seuil ERU = 1,5 (mg/kg/j) ⁻¹	Seuil et sans seuil	PNEC eau = 4,4 µg/L, PNEC sol = 1,8 mg/kg	
As₂O₃, en As	0,2 mg/m ³ Pas de limite Très toxique, cancérigène		Pas de limite	Inhalation sans seuil ERU = 4,3.10 ⁻³ (µg/m ³) ⁻¹ , Orale aiguë MRL = 5.10 ⁻³ mg/kg/j Orale MRL = 3.10 ⁻⁴ mg/kg/j, Orale sans seuil ERU = 1,5 (mg/kg/j) ⁻¹	Seuil et sans seuil	Pas de valeur fixée	
Cd	0,05 mg/m ³ Pas de limite Nocif en cas d'ingestion, toxique, possibilité d'effets irréversibles		Pas de limite	Inhalation seuil REL = 2.10 ⁻² µg/m ³ , Inhalation sans seuil ERU = 4,2.10 ⁻³ (µg/m ³) ⁻¹ Orale seuil RfD = 5.10 ⁻⁷ mg/kg/j	Seuil et sans seuil	PNEC eau = 0,34 (D/50)0,7852, avec D= dureté de l'eau.	

		HOMME					AUTRES ETRES VIVANTS	
Cadre dans lequel est utilisée la valeur	Valeurs limites d'exposition professionnelle fixées par le Ministère du Travail (INRS, 2008)		Etudes de dangers Toxicité aiguë (INERIS ^a ; Note du 16/11/07 ^b)	Qualité de l'air Décret 2002-213 du 15/02/2002		Evaluations des risques sanitaires Valeurs Toxicologiques de Référence	Type d'effet (INERIS ^c)	PNEC Concentrations sans effet prévisible pour l'environnement (INERIS ^c)
	VME	VLCT		Valeur limite pour la protection de la santé humaine	Seuil d'alerte			
Substance			Seuil d'effets irréversibles 30 min			Exemples de VTR proposées par l'INERIS ^c par voie d'administration		Valeur limite pour la protection des écosystèmes
H₂Se	0,07 mg/m ³	0,17 mg/m ³		Pas de limite	Pas de limite	Orale chronique RID = 5.10 ⁻³ mg/kg/j	Seuil	PNEC _{eau} = 0,88 µg/L, PNEC _{mes-eau} = 558,4 µg/kg MES sec, PNEC _{sol} = 92,5 µg/kg sol sec, PNEC _{orale} = 118 µg/kg nourriture sèche
SeF₆	0,2 mg/m ³ de Se	Pas de limite		Pas de limite	Pas de limite	Orale chronique RID = 5.10 ⁻³ mg/kg/j	Seuil	PNEC _{eau} = 0,88 µg/L, PNEC _{mes-eau} = 558,4 µg/kg MES secs, PNEC _{sol} = 92,5 µg/kg sol sec, PNEC _{orale} = 118 µg/kg nourriture sèche
Se (sous forme particulaire dans l'air)	0,2 mg/m ³	Pas de limite		Pas de limite	Pas de limite	Inhalation chronique REL = 20µg/ m ³	Seuil	PNEC _{eau} = 0,88 µg/L, PNEC _{mes-eau} = 558,4 µg/kg MES secs, PNEC _{sol} = 92,5 µg/kg sol sec, PNEC _{orale} = 118 µg/kg nourriture sèche

Illustration 14 - Exemples de valeurs limites pour certaines substances chimiques.

^a : Données issues des propositions de seuils de toxicité aiguë disponibles sur :

<http://chimie.ineris.fr/lien/expositionaccidentelle/seuiletoxite/rapportscientifique.php>

^b : Note du 16/11/07 relative à la concentration à prendre en compte pour l'O₂, le CO₂, le N₂ et les gaz inertes (Ministère chargé de l'Écologie)

^c : Données issues des fiches toxicologiques de l'INERIS disponibles sur :

http://www.ineris.fr/index.php?module=cms&action=getContent&id_heading_object

Abréviations utilisées, d'après INERIS (2005) :

- *DJT : Dose Journalière Tolérable : estimation de la dose qui peut être absorbée pendant toute la vie sans risque appréciable pour la santé.*
- *ERU : Excès de Risque Unitaire (Probabilité supplémentaire, par rapport à un sujet non exposé, qu'un individu a de contracter un cancer s'il est exposé toute sa vie à une unité de dose de toxique).*
- *MRL : Minimum Risk Level (niveau de risque minimum : estimation de la concentration d'exposition journalière à une substance chimique qui est probablement sans risque appréciable d'effets néfastes non cancérogènes sur la santé pour une durée spécifique d'exposition).*
- *PNEC : Predicted No Effect Concentration (concentration sans effet prévisible pour l'environnement). Définie pour un compartiment (eau, sol, matières en suspension, sédiments, environnement terrestre etc.).*
- *REL : Reference Exposure Level (dose d'exposition de référence : concentration ou dose pour laquelle ou en dessous de laquelle des effets néfastes ne sont pas susceptibles de se produire, pour des conditions spécifiques d'exposition).*
- *RfD : Dose de Référence : estimation (avec une certaine incertitude qui peut atteindre un ordre de grandeur) de l'exposition journalière d'une population humaine (y compris les sous-groupes sensibles) qui, vraisemblablement, ne présente pas de risque appréciable d'effets néfastes durant une vie entière.*
- *TCA : Tolerable Concentration in Air (concentration tolérable dans l'air).*

Des valeurs numériques sont proposées sur le site de l'INERIS²⁹ pour NH₃, AsH₃, NO₂, NO et H₂S pour des durées d'exposition de 1 à 60 minutes. Pour d'autres substances, des organismes étrangers sont indiqués. Pour le CO₂, les valeurs sont indiquées par la note du 16 novembre 2007 du Ministère chargé de l'Ecologie (Illustration 6).

Valeurs utilisées dans le cadre de la surveillance de la qualité de l'air

Le Décret n° 2002-213 du 15 février 2002 relatif à la surveillance de la qualité de l'air fixe des seuils d'alerte et des valeurs limites³⁰ pour certains polluants.

Valeurs Toxicologiques de Référence utilisées dans le cadre d'évaluations de risques sanitaires

Des Valeurs Toxicologiques de Référence³¹ (VTR) sont habituellement utilisées dans les études d'impacts d'évaluation quantitative des risques sanitaires auxquels est soumise une population exposée à une pollution d'origine industrielle ou naturelle. Les VTR sont des valeurs à priori prudentes et intègrent des facteurs de sécurité (INERIS, 2006).

Différentes VTR sont utilisées en fonction de la durée et de la voie d'exposition et des objectifs de l'étude. Dans un type de démarche destiné à prévenir une possibilité d'effet, les VTR sont généralement obtenues à partir des NOEL (No Observed Effect Level) ou NOAEL (No Observed Adverse Effect Level), issues d'études chez l'animal ou chez l'homme, auxquels sont appliqués des facteurs d'incertitudes (INERIS, 2005). Il n'existe pas de structure française construisant de telles valeurs, toutefois, pour certaines substances, l'INERIS propose des valeurs issues d'autres organismes sur des fiches toxicologiques disponibles sur internet³².

La Circulaire DGS\SD.7B n° 2006/05/06 de la Direction Générale de la Santé précise les VTR à utiliser dans le cadre d'évaluations de risques sanitaires.

²⁹ Disponible sur : <http://chimie.ineris.fr/fr/lien/expositionaccidentelle/seuildetoxicite/rapportscientifique.php>.

³⁰ La Directive Cadre 96/62/CE du 27 septembre 1996 concernant l'évaluation et la gestion de la qualité de l'air ambiant définit ces notions de la façon suivante : **Valeur limite** : un niveau fixé sur la base de connaissances scientifiques, dans le but d'éviter, de prévenir ou de réduire les effets nocifs sur la santé humaine et/ou l'environnement dans son ensemble ; **Seuil d'alerte** : un niveau au-delà duquel une exposition de courte durée présente un risque pour la santé humaine et à partir duquel les États membres prennent immédiatement des mesures.

³¹ Valeurs toxicologiques de référence : Appellation générique regroupant tous les types d'indices toxicologiques qui permettent d'établir une relation entre une dose et un effet (si toxique avec effet de seuil) ou entre une dose et une probabilité d'effet (si toxique sans effet de seuil). D'après : <http://www.sites-pollues.ecologie.gouv.fr/GlossaireA-C.asp>.

³² Disponible sur : http://www.ineris.fr/index.php?module=cms&action=getContent&id_heading_object=3.

3.3.2. Valeurs limites d'exposition des êtres vivants autres que l'homme aux impuretés

D'après Roman *et al.* (1997), les méthodes d'évaluation de risques écotoxicologiques consistent habituellement à comparer la concentration au-dessus de laquelle une substance pourrait avoir des effets négatifs sur l'environnement (la PNEC : predicted no-effect concentration) avec la concentration prédite ou mesurée dans l'environnement (la PEC : predicted environmental concentration). Les conclusions de l'évaluation se basent sur le ratio de risque PEC/PNEC. Ces calculs tiennent compte, lorsqu'il est significatif, du fond géochimique, c'est-à-dire de la concentration naturellement présente dans l'environnement.

L'INERIS propose des valeurs de PNEC, lorsqu'il existe suffisamment de données, sur les fiches toxicologiques de son site internet³³. Habituellement, plusieurs valeurs sont données en fonction du compartiment considéré (eau, sol, sédiments, etc.). De telles valeurs n'existent que pour quelques substances étant donné l'état actuel des connaissances.

Concernant la qualité des eaux de surface, la Directive européenne 2008/15/CE a fixé des Normes de Qualité Environnementale (NQE) pour 33 substances chimiques (dont le mercure et le cadmium) (Commission européenne, 2008). Les NQE sont des concentrations de polluants ou de groupes de polluants dans l'eau, les sédiments ou les êtres vivants qui ne doivent pas être dépassées, afin de protéger la santé humaine et l'environnement. Elles sont parfois issues directement des PNEC. Des NQE vont prochainement être fixées pour d'autres substances.

Pour les eaux potables, il existe aussi des normes de qualité. Toutefois, cet aspect n'est pas détaillé dans ce rapport qui s'intéresse uniquement aux effets directs d'une fuite.

³³ Cf. note 32.

4. Impacts potentiels d'une fuite

4.1. IMPACTS SUR LES ÉCOSYSTÈMES

Les impacts potentiels d'une fuite dépendront :

- du niveau d'exposition aux substances dangereuses (intensité et durée) ;
- de la réponse des récepteurs présents.

Les parties précédentes ont abordé la réponse des récepteurs au CO₂ et aux impuretés. Cette partie tente de rassembler les informations disponibles sur l'exposition des récepteurs et aborde les impacts potentiels.

4.1.1. Évaluation de l'exposition des écosystèmes

Objectif et état des connaissances

L'évaluation de l'exposition a pour but d'évaluer les concentrations (ou doses) auxquelles les récepteurs présents sont susceptibles d'être exposés.

La Directive européenne sur le stockage géologique de CO₂ (Commission européenne, 2009) précise dans son Annexe I que l'évaluation des risques liés au stockage doit comprendre une évaluation de l'exposition basée sur le devenir du CO₂ qui s'échappe et sur les caractéristiques des éléments potentiellement exposés.

Différents scénarios de fuites ont déjà été identifiés (Bouc, 2008). Néanmoins, les modèles de fuite développés sont destinés à fournir des valeurs de débit de fuite de CO₂, or, les impacts potentiels dépendent de la concentration et de la durée d'exposition. Ainsi, de nombreuses interrogations persistent encore sur l'exposition des différentes cibles en cas de fuites.

À ce titre, le rapport du GIEC (2005) précise que « le principal challenge en matière d'évaluation des risques liés à une fuite de CO₂ provenant d'un réservoir de stockage réside dans l'estimation de la distribution spatiale et temporelle des flux atteignant la surface et dans la prédiction des concentrations en CO₂ à partir d'un flux donné ».

La variabilité spatiale des émissions est souvent très grande sur les sites où du CO₂ d'origine géologique s'échappe naturellement. Sur le site de Ciampino en Italie les flux de CO₂ varient de 4 puissances de 10 sur une distance de 160 m jusqu'à atteindre des valeurs extrêmes d'environ 100 000 g/m²/jour (Carapezza *et al.*, 2003).

Globalement, il manque actuellement de données sur les modes d'exposition au CO₂ et aux impuretés (Bouc *et al.*, 2006). En particulier, il existe peu de résultats sur les concentrations et les durées d'exposition envisageables dans les différents milieux

(sol, air, eau) en cas de fuites. Les quelques informations recensées sont présentées ci-dessous.

Exposition dans les sols

En cas de fuites, les êtres vivants des sols pourraient être exposés à des concentrations en CO₂ très fortes sur des surfaces restreintes (FutureGen Alliance, 2006 ; Chevron Australia, 2005). Au cœur des zones d'émissions naturelles de CO₂ des sites de Latera et Horseshoe Lake, la concentration en CO₂ dans la porosité du sol peut dépasser 95 % (Farrar et al., 1999 ; Beaubien *et al.*, 2008).

Exposition dans l'atmosphère

Il semblerait que le CO₂ émis par le sol se dissipe rapidement dans l'atmosphère. En effet, Farrar *et al.* (1999) ont constaté sur le site d'Horseshoe Lake que même si à certains endroits la teneur en CO₂ du sol et les flux atteignent des valeurs extrêmement élevées (plusieurs milliers de fois les valeurs habituelles), la concentration dans l'atmosphère à 1 ou 2 m au-dessus de ces endroits ne dépasse généralement pas 2 ou 3 fois la concentration habituelle de 360 ppm. Oldenburg et Unger (2004) tirent les mêmes conclusions après avoir effectué des études de modélisation de fuites de CO₂ dans le sol et dans l'atmosphère. Ils remarquent en effet que la concentration en CO₂ augmente très fortement au dessous de la surface du sol tandis que la concentration dans l'atmosphère augmente de façon négligeable.

Néanmoins, la concentration de CO₂ dans l'air est très influencée par la topographie et le vent (Chow *et al.*, 2008). Le CO₂ étant 50 % plus dense que l'air, il a tendance à migrer vers le bas, à couler le long des pentes et à s'accumuler dans des dépressions du relief en créant localement des zones à concentrations élevées (GIEC, 2005). Ce phénomène est accentué si le débit de fuite est important, durant les périodes sans vent et dans les endroits confinés. Le H₂S, qui est aussi un gaz lourd (densité = 1,19), a aussi tendance à s'accumuler avec le CO₂ (Carapezza *et al.*, 2003). Sur la zone d'émission naturelle de Horseshoe Lake, des oiseaux et des rongeurs ont été trouvés morts dans des bas-fonds. Quatre skieurs sont morts d'asphyxie après être tombés dans des trous du manteau neigeux contenant du CO₂ et du H₂S.

Hepple (2005) a fait remarquer qu'aux États-Unis, une raffinerie moyenne du groupe Chevron émet 2 millions de tonnes de CO₂ par an (soit environ 5 500 tonnes/jour) et que le CO₂ émis ne pose pas de danger immédiat pour l'homme et l'environnement parce qu'il est dispersé par de hautes cheminées. Cet exemple montre qu'en raison des phénomènes de dilution et de transport dans l'atmosphère la connaissance du débit d'une fuite de CO₂ ne suffit pas pour évaluer l'impact sur les cibles.

Dans d'autres domaines que le stockage géologique de CO₂, lorsque la quantification de l'exposition à une substance est nécessaire, les études de dangers ou d'impacts comprennent habituellement des études de dispersion atmosphérique. La dispersion atmosphérique désigne les mécanismes physiques de mélange d'une substance dans l'air de l'atmosphère. Elle a pour but de caractériser le devenir dans le temps et dans

l'espace des substances dangereuses rejetées de façon chronique ou accidentelle. La dispersion est principalement régie par la densité des gaz, les conditions d'émission (durée, géométrie de la source, quantité de mouvement initiale, etc.), les conditions météorologiques et les conditions orographiques (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, 2006).

Aines *et al.* (2009) ont étudié la dispersion du CO₂ dans l'atmosphère pour une éruption de puits d'injection considérée comme très majorante (20 000 tonnes/jour) en terrain plat et pour différentes conditions météorologiques. Ils concluent qu'il existe une zone de dangers significatifs autour du puits, en particulier par temps calme, toutefois, les seuils de 3 % et 4 % de CO₂ ne sont dépassés que dans les premières centaines de mètres autour du puits. L'étude de l'éruption du puits de Rousse prévoit elle aussi une zone de dangers significatifs mais sur des surfaces très limitées (cf. 4.2.1.).

Des recherches sont en cours afin de déterminer les concentrations auxquelles sont susceptibles d'être exposés les récepteurs de surface en cas de fuites à l'aide de modèles de dispersion atmosphérique (Bogen *et al.*, 2006 ; Chow *et al.*, 2008). À partir d'un SIG, Bogen *et al.* (2006) ont élaboré une méthode préliminaire pour identifier les zones où le CO₂ aura le plus de chance de s'accumuler en cas de fuites.

La dispersion du CO₂ dans l'atmosphère a aussi été étudiée au niveau de geysers émettant naturellement du CO₂ (Gouveia *et al.*, 2005 ; Bogen *et al.*, 2006).

Exposition dans les eaux de surface

Il ne semble pas y avoir de données sur l'exposition au CO₂ ou aux impuretés dans les milieux aquatiques en cas de fuites.

4.1.2. Effets sur les écosystèmes

Effets sur la biodiversité

L'exposition au CO₂ est à même d'influencer la diversité et la composition des écosystèmes (IEA GHG, 2007 ; Beaubien *et al.*, 2008 ; West *et al.*, 2008). Des changements dans les processus biogéochimiques présents en surface pourraient avoir des effets négatifs sur les populations microbiennes du sol entraînant des modifications dans les minéraux et les substances disponibles susceptibles de remonter la chaîne alimentaire et d'affecter l'écosystème en entier.

En effet, si une espèce est affectée par une augmentation de la concentration en CO₂, cela pourra avoir des effets indirects sur les autres espèces (IEA GHG, 2007). Ainsi, les êtres vivants qui ont besoin des végétaux pour leur nourriture, leur couvert, leur nid ou leur reproduction pourraient souffrir des effets secondaires de la perte de végétation (U.S. EPA, 2008).

La société Quintessa développe un modèle de transport de CO₂ dans le sous-sol et le sol qui inclut les impacts sur la végétation (Maul *et al.*, 2008). Ce modèle tient compte

des effets stimulants et toxiques du CO₂ sur les plantes et le cycle du carbone. D'après Maul *et al.* (2008) la comparaison des résultats du modèle avec les observations de terrain à Latera semble montrer que les processus clefs du transport du CO₂ et des impacts sur la végétation sont bien compris.

Répartition spatiale des effets

En cas de fuites, les êtres vivants se trouvant les plus près du point d'émission pourraient être impactés par des concentrations en CO₂ aiguës voire létales. En s'éloignant de la zone d'émission, les concentrations d'exposition passeraient d'aiguës à chroniques jusqu'à ce que les effets ne soient plus perceptibles (IEA GHG, 2007).

Ampleur des effets

Beaubien *et al.* (2008) ont fait remarquer que si on appliquait un taux de fuite annuel de 10⁻⁴ par an à un réservoir hypothétique de 10 millions de tonnes (Mt) de CO₂, il en résulterait une émission de CO₂ d'environ 2 700 kg/jour³⁴. Or, ceci correspond approximativement à 10 fois la quantité totale émise naturellement sur un site à Latera (220 kg/j) où des impacts sur des surfaces restreintes (250 m²) sont très nets (Illustration 9 et Illustration 10).

Ceci est à comparer avec la position du GIEC (2005) qui suggère de retenir 1 000 ans comme durée de stockage pour satisfaire les objectifs de lutte contre les changements climatiques (ce qui correspond à un taux de fuite annuel d'environ 10⁻³). Les impacts locaux d'une fuite de CO₂ provenant d'un réservoir de stockage géologique pourraient donc être plus critiques que les impacts globaux liés à une moindre réduction de l'effet de serre. Ainsi, les taux de fuite satisfaisant les objectifs de lutte contre les changements climatiques pourraient être différents de ceux permettant de limiter les impacts locaux du stockage géologique sur l'environnement.

Toutefois, d'après West *et al.* (2005), il est difficile de comparer les impacts observés sur les sites où du CO₂ s'échappe naturellement avec ceux qui pourraient être envisageables en cas de fuites d'un réservoir de stockage géologique de CO₂ (cf. 2.4.3.). De plus, les taux de fuite avancés sont arbitraires et ne correspondent pas à des réalités géologiques.

Le nombre et la taille des différents chemins de fuites vers la surface pourraient grandement influencer les impacts sur les écosystèmes de surface (Beaubien *et al.*, 2008). Ainsi, à flux total constant, une augmentation du nombre de points d'émission pourrait :

- soit réduire les impacts potentiels (en diminuant les débits en chaque point jusqu'à rendre les effets de chacun négligeables) ;
- soit augmenter les impacts potentiels en augmentant la surface affectée.

³⁴ Dans cet exemple, le débit de fuite annuel est constant et dépend uniquement de la quantité initiale de CO₂. Débit de fuite = 10*10⁶*10⁻⁴ = 1 000 tonnes/an = 2 700 kg/jour.

Évolution du risque

Au cours de la durée de vie d'un projet de stockage géologique de CO₂, le risque d'impacts est globalement amené à diminuer (Illustration 15) notamment en raison de la baisse des pressions, des mécanismes de piégeage secondaire et l'amélioration de la connaissance du site (U.S. EPA, 2008).

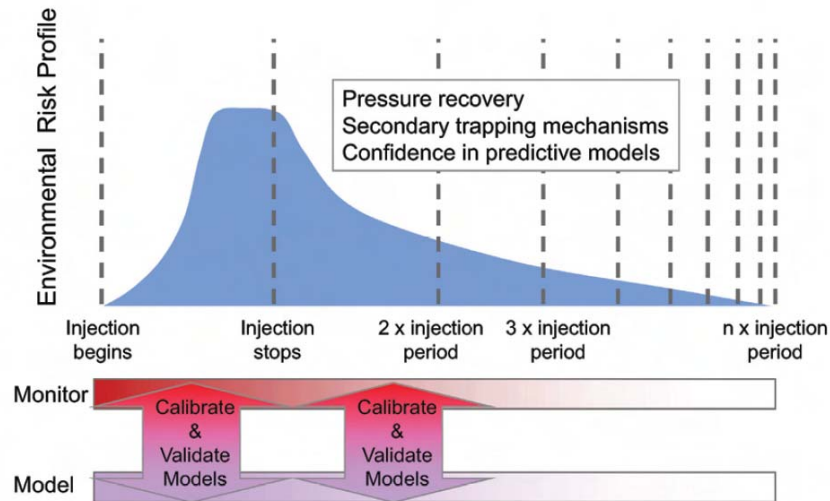


Illustration 15 - Profil de risque environnemental pour le stockage géologique de CO₂ (U.S. EPA, 2008 d'après Benson, 2007).

Limites dans l'état des connaissances sur les effets

Les impacts sur l'homme sont bien documentés. Cependant, les impacts du CO₂ sur l'écosystème pris comme un tout, ou sur une espèce prise individuellement parmi l'écosystème, sont inconnus. De plus, peu de données sont disponibles sur les surfaces susceptibles d'être impactées. Il y a très peu d'études sur l'exposition à long terme de l'intégralité des écosystèmes à de faibles concentrations en CO₂ (< 10 %) (West *et al.*, 2005).

4.1.3. Impacts indirects

D'autres impacts d'une fuite provenant d'un réservoir de stockage géologique sur les êtres vivants peuvent être considérés. Par exemple, les infiltrations d'eau saline en surface pourraient impacter les habitats et l'agriculture et polluer les eaux de surface (GIEC, 2005). Les ressources en eaux souterraines destinées à la consommation humaine sont susceptibles d'être impactées par une baisse du pH entraînant une mise en solution de contaminants (GIEC, 2005).

Pour les écosystèmes, l'acidification des milieux et la possibilité de mobilisation de métaux lourds sont souvent évoquées, mais peu de données sont disponibles à ce propos (IEA GHG, 2007). Néanmoins, Beaubien *et al.* (2008) ont remarqué que même

au cœur de la zone d'émission naturelle de CO₂ de Latera, il ne semble pas y avoir un important lessivage des métaux traces, car ceux-ci seraient immobilisés par une augmentation de la capacité d'échange cationique et de la quantité de matière organique totale due au faible pH (autour de 4) et aux conditions anoxiques.

D'une manière générale, les impacts indirects d'une fuite sont peu documentés, faute d'exemple.

4.1.4. Résilience des écosystèmes et responsabilités en cas d'impacts sur l'environnement

Très peu de données existent sur la résilience³⁵ des écosystèmes suite à des impacts causés par une fuite.

D'après la Directive européenne sur le stockage géologique de CO₂ (Commission européenne, 2009), la responsabilité pour les dommages causés à l'environnement (aux espèces et aux habitats naturels protégés, aux eaux et aux sols) est régie par la directive 2004/35/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale (Commission européenne, 2004) qui devrait s'appliquer à l'exploitation des sites de stockage de CO₂. D'après cette Directive, lorsqu'il existe une menace imminente de dommage environnemental l'exploitant doit prendre sans retard les mesures préventives nécessaires. Lorsqu'un dommage s'est produit, l'exploitant doit prendre toutes les mesures pratiques en vue de limiter ou prévenir de nouveaux dommages environnementaux ainsi que les mesures de réparation nécessaires.

4.1.5. Limites acceptables pour un écosystème

Les limites acceptables pour un écosystème pourraient dépendre des différentes formes de vie présentes et seraient donc liées aux conditions locales propres à chaque site. L'IEA GHG (2007) fait remarquer que si des êtres humains sont présents sur la zone, les seuils doivent être fixés bien plus bas que si l'usage prédominant est l'agriculture car pour les plantes, la concentration critique semble être autour de 20 ou 30 % de CO₂.

L'U.S. EPA (2008) précise que, pour l'homme, le seuil d'exposition approprié peut être défini comme la plus basse concentration identifiée par une agence de réglementation, pouvant causer des effets préjudiciables sur la santé. En France, la concentration en CO₂ à ne pas dépasser en moyenne, vis-à-vis de la santé humaine, pourrait être la Valeur Limite de Moyenne d'Exposition professionnelle (VME) de 0,5 %. Il convient toutefois de rappeler que cette valeur a été établie pour un cadre professionnel

³⁵ La résilience écologique est la capacité d'un écosystème, d'un habitat, d'une population ou d'une espèce à retrouver un fonctionnement et un développement normal après avoir subi une perturbation importante.

(population en bonne santé). Si cette valeur est retenue, elle devrait être complétée par des seuils d'effets aigus.

D'après plusieurs sources, les seuils déterminés pour l'homme pourraient être des valeurs appropriées aux animaux vivant en surface (U.S. EPA, 2008 d'après Benson *et al.*, 2002 et GIEC, 2005). Le fait que des animaux et des hommes soient trouvés morts aux mêmes endroits après l'émission de CO₂ du lac Nyos (Cameroun) en 1986 semble renforcer cette idée.

Habituellement, pour protéger l'ensemble d'un écosystème, il est d'usage de définir les seuils à ne pas dépasser par rapport aux espèces les plus sensibles. Ainsi, des espèces indicatrices, particulièrement sensibles au CO₂ et jouant le rôle de sentinelles, pourraient être identifiées et être utilisées dans le cadre du monitoring. Actuellement, il n'existe pas de méthode ni de programme de recherche pour déterminer ces espèces indicatrices et surtout les seuils appropriés pour chacune d'elles ainsi que pour la totalité de l'écosystème (IEA GHG, 2007).

D'après IEA GHG (2007), l'utilisation de valeurs seuils pour la gestion des risques a l'avantage de s'articuler de façon très claire avec les actions de monitoring (dans la définition d'actions spécifiques une fois les seuils dépassés) et de formuler des objectifs précis en termes de réparation.

4.2. PRISE EN COMPTE DES IMPACTS DANS LES PROJETS PILOTES DE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO₂

Cette partie s'intéresse à la façon dont les impacts sur l'environnement sont traités dans les projets de stockage géologique de CO₂.

4.2.1. Études d'impact du projet d'injection dans le réservoir géologique de Rouse, France

La société Total E&P France développe actuellement un projet pilote de captage et de stockage géologique de CO₂ (Total E&P France, 2008). Le projet prévoit d'injecter une quantité de 120 000 tonnes de CO₂ en l'espace de deux ans dans un gisement de gaz naturel en fin d'exploitation, situé à environ 4 500 m de profondeur. D'après les études d'impacts accompagnant les demandes d'autorisations, il n'y a pas de communication naturelle entre le CO₂ injecté dans le réservoir et l'extérieur de la structure. Le risque principal identifié est donc réduit à celui de l'éruption libre du puits, ce qui correspond à un évènement extrêmement improbable et très majorant.

Les conséquences sur l'homme ont été étudiées dans l'étude de dangers pour deux scénarios :

- une éruption contenant 90 % de gaz injecté et 10 % de gaz brut de Rouse ;
- une éruption contenant uniquement du gaz brut.

L'étude suppose que le gaz injecté est dépourvu de H₂S et qu'il contient 95 % de CO₂ tandis que le gaz brut contient 6 % de CO₂ et 1 % de H₂S.

Les calculs de dispersion des gaz dans l'atmosphère ont été conduits à l'aide du logiciel PHAST v6.51 (Process Hazard Analysis Software Tool) qui tient compte de la densité des gaz. L'étude utilise les valeurs de seuils d'effets de référence des études de dangers (cf. partie 3.3.1.). Elle en déduit que les effets liés à la toxicité du H₂S et du CO₂ s'appliquent sur des domaines limités (Illustration 16), les risques générés sont donc considérés comme acceptables.

Gaz émis	Concentration	Effets sur l'homme	Distance maximale atteinte par cette concentration (par rapport au point d'émission)
H ₂ S	182 ppm	Effets létaux pour une exposition de 8h	10 m environ
	39 ppm	Effets irréversibles pour une exposition de 8h	40 m environ
	10 ppm	Seuil du « plan secours »	120 m environ
CO ₂	20 %	Effets létaux significatifs pour une exposition de 30 mn	Quelques mètres
	10 %	Premiers effets létaux pour une exposition de 30 mn	Quelques mètres
	5 %	Effets irréversibles pour une exposition de 30 mn	Quelques mètres
	0,5 %	Valeur Limite d'exposition professionnelle indicative 8 h	30 m environ

Illustration 16 - Exposition au H₂S et au CO₂ pour les scénarios puits éruptif du site de Rousse dans les conditions les plus majorantes (d'après Total E&P France, 2008).

4.2.2. Évaluation des impacts du projet de Weyburn, Canada

Sur le site de Weyburn, le CO₂ est injecté à environ 1 450 m de profondeur dans un réservoir de pétrole dans un but de récupération assistée du pétrole. Le CO₂ injecté est transporté depuis les États-Unis par un pipeline de plus de 300 km de long. Le projet a aussi pour objectif de stocker de façon permanente la quasi-totalité du CO₂ injecté (1 à 2 Mt/an). Pour cela, le CO₂ extrait avec le pétrole est séparé et réinjecté dans le réservoir (GIEC, 2005).

Un important programme d'études et de recherches a été lancé dès le début de l'injection en 2000. La phase 1 (2000-2004)³⁶ de ce programme avait pour objectif d'évaluer la capacité d'un réservoir de pétrole à stocker du CO₂ de façon sûre et économiquement viable (Petroleum Technology Research Centre, 2004). Cette phase comportait une évaluation des risques à long terme. Elle comprenait une étude préliminaire dont l'objectif était de déterminer les flux de fuites de CO₂ qui pourraient être considérés comme « acceptables » du point de vue des impacts.

³⁶ La phase finale est actuellement en cours (2005-2011).

Deux modes d'impacts du CO₂ ont été ainsi étudiés (Stenhouse *et al.*, 2008) :

- émission dans une habitation provenant d'un puits abandonné. Le cas le plus conservateur a été pris en compte : le calcul considère que la totalité du CO₂ qui s'échappe du puits entre dans l'habitation par le sol sans résistance ni atténuation. Pour une habitation d'un volume de 250 m³ et dont l'air se renouvelle 3,1 fois par jour, lorsque la fuite dépasse 5,4 kg/jour, la concentration en CO₂ à l'intérieur de l'habitation dépasse 3 500 ppm, ce qui est la limite définie par Santé Canada pour les habitations résidentielles ;
- fuite dans un aquifère d'eau potable due à un puits abandonné. L'étude s'intéresse uniquement à la mobilisation de plomb par acidification de l'aquifère. Elle fixe arbitrairement la concentration initiale en plomb à une valeur dix fois inférieure à la limite fixée pour l'eau potable par Santé Canada (0,01 mg/l). D'après les résultats de la modélisation lorsque la fuite de CO₂ dépasse $1,7 \cdot 10^{-4}$ kg/jour, la concentration en plomb dans l'aquifère dépasse la limite de consommation. Stenhouse *et al.* (2008) précisent toutefois que ce résultat est obtenu à partir d'un modèle conceptuel très simplifié et que de nombreuses hypothèses ont été faites pour la modélisation (dont : conditions initiales, présence de calcite, perméabilité).

Au regard de ces deux types d'impacts, Stenhouse *et al.* (2008) concluent que la fuite de CO₂ dans l'aquifère constitue le cas limitant dans les conditions de l'étude.

Concernant l'étanchéité du réservoir, les résultats de l'étude indiquent que les émissions moyennes cumulées dans la biosphère au bout de 5 000 ans sont évaluées à 0,2 % de la quantité initiale de CO₂. L'étude conclut que le réservoir présente des capacités importantes pour empêcher la migration de CO₂ vers la biosphère.

4.2.3. Étude d'impact du projet FutureGen, États-Unis

Le projet FutureGen comprenait dans sa conception initiale la création d'une centrale de production d'électricité à partir de charbon et d'un dispositif de stockage géologique de CO₂ (1 à 3 Mt CO₂/an). Une étude d'impact et un rapport d'information environnemental (destiné à fournir des données à l'étude d'impact) ont été effectués pour quatre sites candidats (FutureGen Alliance, 2006). En ce qui concerne les impacts potentiels d'une fuite provenant du réservoir de stockage géologique, l'étude d'impact fait référence à une étude d'évaluation des risques réalisée pour chaque site (US DOE, 2007).

La démarche adoptée dans l'évaluation des risques comprend les étapes suivantes (US DOE, 2007) :

- recueil de données toxicologiques sur le CO₂ et les impuretés. Pour les personnes travaillant sur le site, les seuils retenus sont ceux fixés par la législation du travail. Pour la population en général, les seuils d'exposition aiguë ont été recherchés parmi les données concernant les émissions accidentelles de substances chimiques. Les seuils chroniques proviennent de plusieurs sources (standards de qualité de l'air, seuils d'effets chroniques de l'U.S. EPA et critères de qualité de l'air intérieur de

Santé Canada). Pour les êtres vivants, des seuils d'effets physiologiques et comportementaux ont été recensés ;

- estimation des débits de fuites et des scénarios envisageables à l'aide d'une base de données d'« analogues naturels » (cf. 2.4.3.), l'utilisation de modèles et l'avis d'experts. En fonction des scénarios et des sites envisagés les valeurs s'échelonnent de 0 à 660 g/m²/jour ;
- recensement des récepteurs potentiellement exposés ;
- évaluation de l'exposition aiguë et chronique en cas de fuites. Ici, seule l'exposition par inhalation par l'atmosphère est considérée. Le mélange de gaz stocké est supposé contenir 95 % de CO₂ et 0,01 % de H₂S en volume. À partir d'un modèle de dispersion atmosphérique de l'US EPA (SCREEN3), les concentrations de CO₂ et H₂S dans l'air ont été comparées aux seuils d'effets sur les êtres vivants à des distances du point d'émission de 1 et 100 m (seul l'homme est concerné par le H₂S par manque de critères de toxicité pour les autres êtres vivants) ;
- caractérisation des conséquences d'une fuite par calcul de ratios de risque déterminés en divisant la concentration prédite par les valeurs des seuils d'effets. Les résultats diffèrent peu d'un site à l'autre. Pour l'homme tous les ratios sont inférieurs à 1 sauf pour l'exposition chronique au H₂S (seuil extrêmement bas : 0,0014 ppm) jusqu'à 227 m du point d'émission. Pour les autres êtres vivants, tous les ratios de risque d'exposition au CO₂ sont aussi inférieurs à 1 sauf pour les effets comportementaux sur certains insectes jusqu'à au moins 2 km du point d'émission (seuil extrêmement bas : 0,5 ppm, cf. partie 2.3.2) ;
- conclusion de l'étude. Une fuite chronique de H₂S pourrait affecter la population en général dans un périmètre restreint. Sur les écosystèmes, aucun effet significatif n'est attendu.

4.2.4. Étude d'impact du projet Gorgon, Australie

Ce projet d'injection de 3 Mt par an de CO₂ se situe dans une réserve naturelle, l'étude d'impacts est donc particulièrement détaillée (Chevron Australia, 2005). Les récepteurs considérés sont les espèces classées, rares ou endémiques et quelques espèces largement répandues représentatives du milieu. L'étude considère que le risque de migration du CO₂ vers la surface est très improbable. Toutefois, dans le cas où une fuite se produirait, elle aurait le plus de chance d'avoir lieu le long de la plus grande faille identifiée. L'étude d'impact se réfère aux travaux de Benson (2004) pour donner des ordres de grandeur de l'ampleur des impacts. Ainsi, le flux pourrait être compris entre 4*10² et 4*10⁶ g/m²/jour en cas de fuites par faille mais sur des zones restreintes et à proximité de la faille. Des surfaces de 1 000 à 100 000 m² pourraient potentiellement être impactées. Les fuites à travers la roche couverture argileuse devraient être très faibles (moins de 4 g/m²/jour).

Les impacts attendus en cas de fuite du réservoir sont décrits qualitativement et pour le CO₂ uniquement :

- flore : les fuites par failles pourraient avoir des impacts localisés sur la flore sur des surfaces allant de 1 000 à 100 000 m². En fonction de la durée d'exposition au CO₂

différents effets sont envisagés. Les plantes pourraient montrer une augmentation ou une réduction de croissance à proximité de la fuite. Une exposition prolongée à une forte concentration pourrait entraîner la mort de végétaux sur des surfaces limitées. Si la zone impactée contient uniquement des espèces communes, les conséquences seront mineures. En revanche, si la zone contient des espèces rares les conséquences seront plus importantes mais restent toutefois qualifiées de modérées. L'étude prévoit de cartographier les espèces rares et d'en tenir compte dans les mesures d'urgences ;

- faune de surface : le principal risque énoncé dans l'étude est que le CO₂ émis s'accumule dans des zones basses en l'absence de vent. Ceci pourrait causer la mort d'animaux ou entraîner des effets physiologiques préjudiciables, notamment sur les tissus respiratoires. Une importante émission de CO₂ ou de H₂S pourrait causer localement et sur le long terme une baisse de l'abondance des animaux rares. Néanmoins, la viabilité des populations locales ne devrait pas être affectée et les conséquences sont donc qualifiées de modérées. Les impacts indirects sur le règne animal par l'intermédiaire des effets sur les plantes sont considérés comme mineurs ;
- faune du sol : l'étude insiste sur le fait que les animaux vivant ou se réfugiant dans le sol sont les plus exposés en cas de fuites de CO₂ provenant du réservoir géologique. Dans la zone géographique du site, les animaux souterrains constituent une composante importante de la biodiversité régionale. De plus, certains sont considérés comme de véritables reliques et proviendraient de lignées d'animaux primitifs qui peuplaient notre Terre aux origines. La présence de karsts pourrait amplifier les impacts en raison de la faune particulière qu'ils abritent. Les conséquences pourraient donc être importantes sur les animaux vivant dans la zone non saturée qui risqueraient l'asphyxie et ceux vivant dans la zone saturée qui pourraient être atteints par une baisse du pH.

En conclusion, le risque résiduel est considéré comme bas pour la végétation et la faune terrestre, moyen pour la faune du sol.

4.3. ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ POUR LE STOCKAGE GÉOLOGIQUE DE CO₂

L'U.S. EPA (2008) a développé un cadre d'évaluation de la vulnérabilité (Vulnerability Evaluation Framework ou VEF) afin d'identifier de façon systématique les conditions qui peuvent augmenter ou diminuer la prédisposition à des impacts négatifs dus au stockage géologique de CO₂. Ce cadre a pour objectif d'aider les autorités réglementaires et les experts à réaliser une sélection des critères pertinents pour une évaluation de la vulnérabilité correspondant aux situations locales. Il a aussi pour objectif la définition de zones clefs qui nécessitent une évaluation et une gestion des risques approfondie. Il ne s'agit pas d'un outil d'évaluation quantitative des risques. Le VEF fournit des diagrammes pour identifier des seuils de vulnérabilité et des approches systématiques pour évaluer les impacts potentiels.

L'approche adoptée comprend les 3 étapes suivantes représentées à l'illustration 17 :

- identification des caractéristiques du système de stockage qui pourraient augmenter sa prédisposition à des fuites, des changements de pressions ou des migrations imprévues ;
- délimitation de l'aire susceptible d'être impactée et sur laquelle se focalisent les actions d'évaluation, de caractérisation et de monitoring. Cette aire est appelée l'empreinte du stockage géologique (Geological Storage footprint en anglais). Elle se définit comme la somme de la surface comprenant le panache de CO₂ et de la surface dont la pression a été suffisamment modifiée pour pouvoir causer d'éventuels impacts négatifs. La délimitation de l'empreinte évolue donc avec le temps. Le VEF précise qu'il peut être pertinent d'étendre la zone de caractérisation et de monitoring au-delà de l'empreinte (notamment : en fonction des vents dominants, de la présence de dépressions topographiques, de la proximité d'espèces en danger ou si l'évaluation s'intéresse aussi aux éventuels déplacements de saumures dans des aquifères cibles) ;
- identification des récepteurs clefs, des impacts potentiels sur l'empreinte et du niveau de vulnérabilité (2 classes sont envisagées : forte ou faible). La vulnérabilité d'un site de stockage géologique aux impacts négatifs est une fonction de la vulnérabilité du système de stockage à une fuite (ou une migration imprévue ou un changement de pression) et de la vulnérabilité des récepteurs. Ainsi, le plus haut degré de vulnérabilité est atteint quand il y a un haut potentiel de fuite ou de migration imprévue en présence de récepteurs particulièrement vulnérables. Cependant, si le risque de fuites est faible, la vulnérabilité aux impacts négatifs sera relativement faible même si des récepteurs sensibles sont présents.

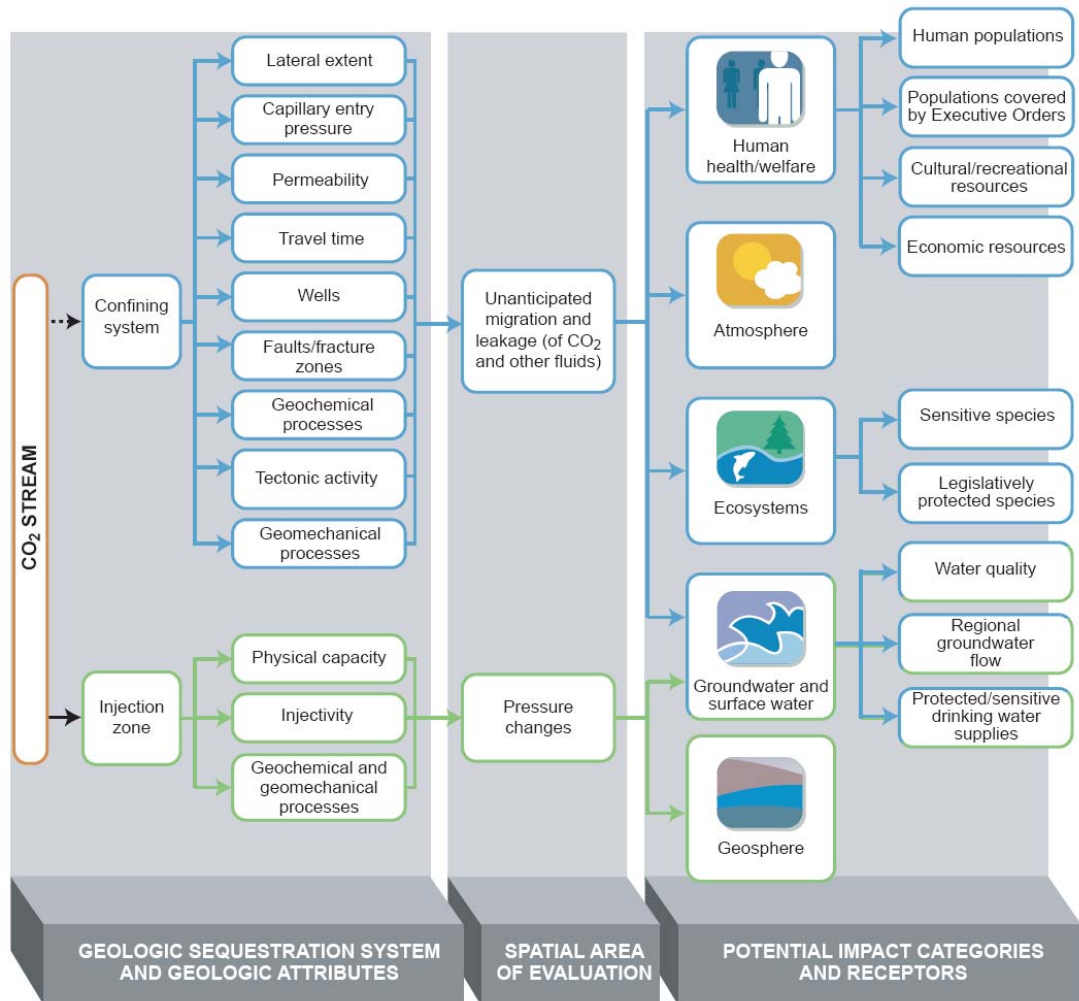


Illustration 17 - Modèle conceptuel du cadre d'évaluation de la vulnérabilité (VEF) développé par l'U.S. EPA (U.S. EPA, 2008).

5. Conclusion

Le tableau ci-dessous résume l'état des connaissances des effets du CO₂ sur les différentes cibles.

Cibles	État des connaissances des effets du CO ₂
Homme	Très bonnes connaissances pour les sujets sains adultes. Peu de connaissances pour les sujets sensibles (enfants, personnes âgées ou malades).
Environnement terrestre de surface	Connaissances pour certains taxons ³⁷ uniquement. Grande variabilité des réponses.
Sols et Sous-sols	Connaissances pour certains taxons uniquement. Grande variabilité des réponses. Très peu de connaissances sur le sous-sol.
Eaux de surface	Connaissances pour quelques taxons uniquement. Grande variabilité des réponses.

Cette étude bibliographique montre que l'effet du CO₂ a été étudié pour quelques espèces seulement et qu'il existe une grande variabilité dans leurs réponses. Néanmoins, quelques conclusions d'ordre général ont été tirées par certains auteurs :

- les seuils d'effets du CO₂ sur l'homme sont bien connus et d'après certains auteurs peuvent être des approximations convenables pour les animaux vivant en surface ;
- les êtres vivants du sol seraient les plus exposés à des concentrations élevées en CO₂ en cas de fuites. Les animaux du sol pourraient commencer à subir des effets physiologiques négatifs à partir de 2 % de CO₂ en volume et des concentrations de 15 % pourraient être létales pour certains. Toutefois, les résistances sont très variables d'une espèce à l'autre ;
- les insectes de surface résistent habituellement aux effets létaux du CO₂ jusqu'à 30 ou 100 %. Néanmoins, leur comportement peut être influencé par des variations de concentrations en CO₂ de l'ordre de quelques ppm ;
- pour les plantes, le seuil de toxicité semble se trouver autour de 20 ou 30 % de CO₂ dans le sol en fonction de l'espèce ;
- chez les micro-organismes, une concentration en CO₂ de 50 % a généralement un effet inhibiteur significatif si ce n'est léthal ;

³⁷ Taxon : entité conceptuelle qui est censée regrouper tous les organismes vivants possédant en commun certains caractères bien définis. Ex. : vertébré, mammifère, chien...

- d'une manière générale, une exposition prolongée à des concentrations élevées en CO₂, au dessus de 20-30 %, pourrait tuer virtuellement tout type de vie sauf des microbes, des invertébrés et des champignons.

Au cours de cette étude bibliographique, d'autres limites dans l'état des connaissances ont été rencontrées notamment en ce qui concerne les impacts au niveau de l'écosystème, les impacts des impuretés, les impacts indirects des fuites et les vitesses de rétablissement des écosystèmes.

Les limites acceptables pour un écosystème pourraient dépendre des différentes formes de vie présentes et donc des conditions locales propres à chaque site.

D'après cette étude bibliographique, les impacts d'une fuite de CO₂ sur la biosphère dépendent de la concentration et de la durée d'exposition. Or, les modèles de fuites développés actuellement permettent de prédire des débits de fuites. Ainsi, il semble nécessaire de développer une approche permettant de déduire des concentrations en CO₂ et des durées d'exposition à partir d'un flux donné. Il s'agit là d'une étape cruciale et manquante dans l'évaluation des conséquences des scénarios de risque.

Afin de déterminer l'impact net du stockage géologique de CO₂, les impacts locaux potentiellement négatifs de la séquestration du CO₂ devraient être mis en regard avec les impacts globaux du changement climatique. Ce type de comparaison ne semble pas avoir été effectué.

6. Bibliographie

Abe A. S., Johansen K. (1987) - Gas-Exchange and Ventilatory Responses to Hypoxia and Hypercapnia in *Amphisbaena-Alba* (Reptilia, Amphisbaenia). *J. Exp. Biol.* 127:159-172.

Aines R. D., Leach M. J., Weisgraber T. H., et al. (2009) - Quantifying the potential exposure hazard due to energetic releases of CO₂ from a failed sequestration well. *Energy Procedia* 1 (2009) 2421-2429.

Beaubien S.E., Ciotoli G., Coombs P., et al. (2008) - The impact of a naturally-occurring CO₂ gas vent on the shallow ecosystem and soil chemistry of a Mediterranean pasture (Latera, Italy). *Int. J. Greenhouse Gas Control*, vol. 2(3), 373-387.

Benson S. M. (2007) - Addressing Long-term Liability of Carbon Dioxide Capture and Geological Sequestration. World Resource Institute (WRI) Long-term liability Workshop, June 7th, 2007. Washington D.C.

Benson S.M. (2004) - Monitoring Protocols and Life-Cycle Costs for Geologic Storage of Carbon Dioxide. Paper presented at the Carbon Sequestration Leadership Forum, September 2004, Melbourne, Vic.

Benson S.M., Hepple R., Apps J., et al. (2002) - Lessons learned from natural and industrial analogues for storage of carbon dioxide in deep geologic formations, Lawrence Berkeley National Laboratory Report, LBL-51170, Berkeley, CA.

Bogen K.T., Homann S.G., Gouveia F.J., et al. (2006) – Prototype Near-Field/GIS Model for Sequestered-CO₂ Risk Characterization and Management. In International Symposium on Site Characterization for CO₂ Geological Storage – Berkeley – USA – 20-22/03/2006.

Bouc O., Audigane P., Bellenfant G., et al. (2008) - Determining safety criteria for CO₂ geological storage. In 9th International Conference on Greenhouse Gas Technologies - Washington – USA – 16-20/11/2008.

Bouc O. (2008) – Construction de scénarios d'évolution pour le stockage géologique du CO₂ : méthode et application. BRGM/RP-56592-FR, 108p., 23 ill., 3ann.

Bouc O., Bellenfant G., Fauconnier D., et al. (2006) – Critères de sécurité pour le stockage géologique de CO₂. Rapport BRGM/RP-55158-FR, 186 p.

Bunce J. A. (1994) - Response of respiration to increasing atmospheric carbon dioxide concentrations. *Physiologica Plantarum* 90: 427-430.

Bunnell T., McCarty L. B., Dodd R. B., et al. (2002) - Creeping Bentgrass Growth Response to Elevated Soil Carbon Dioxide. *HortScience* 37(2):367-370.

Carapezza M. L., Badalamenti B., Cavarra L., et al. (2003) - Gas hazard assessment in a densely inhabited area of Colli Albani Volcano (Cava dei Selci, Roma). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123(1-2), 81-94.

Chang H. T., Loomis W. E. (1945) - Effect of carbon dioxide on absorption of water and nutrients by roots. *Plant Physiol.* 20 (2): 221.

Chevron Australia (2005) - Draft Environmental Impact Statement/Environmental Review and Management Programme for the Proposed Gorgon Development: Main Report. ISBN 0-9757659-1-4.

Chow F., Granvold P., Oldenburg C. (2008) – Modeling the effects of topography and wind on atmospheric dispersion of CO₂ surface leakage at geologic carbon sequestration sites. In 9th International Conference on Greenhouse Gas Technologies - Washington – USA – 16-20/11/2008.

Cole J.J., Caraco N. F., Kling G.W., et al (1994) - Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes. *Science* 265: 1568-1570.

Commission européenne (2009) – Directive 2009/31/CE du parlement européen et du conseil du 23 avril 2009 relative au stockage géologique du dioxyde de carbone et modifiant la directive 85/337/CEE du Conseil, les directives 2000/60/CE, 2001/80/CE, 2004/35/CE, 2006/12/CE et 2008/1/CE et le règlement (CE) no 1013/2006 du Parlement européen et du Conseil.

Commission européenne (2008) - Directive 2008/105/CE du parlement européen et du conseil du 16 décembre 2008 établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau, modifiant et abrogeant les directives du Conseil 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE, 86/280/CEE et modifiant la directive 2000/60/CE.

Commission européenne (2004) – Directive 2004/35/CE du parlement européen et du conseil du 21 avril 2004 sur la responsabilité environnementale en ce qui concerne la prévention et la réparation des dommages environnementaux.

Crocker C.E., Cech J.J. (1996) - The Effects of Hypercapnia on the Growth of Juvenile White Sturgeon, *Acipenser Transmontanus*. *Aquaculture* 147(3-4):293-299.

Dictor M.C., Joulian C., Coulon S., et al. (2008) - Impact du CO₂ sur les écosystèmes terrestres. Etude du site de Latera (Italie). Rapport BRGM/RP-56461-FR, 67 p., 17 ill., 4 ann.

Farrar C.D., Neil J.M., Howle J.F. (1999) - Magmatic carbon dioxide emissions at Mammoth Mountain, California. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 98-4217, 34 p.

Flower F.B., Leone I.A., Gilman E.F., et al. (1977) - Vegetation Kills in Landfill Environs. Proceedings of the Third Annual Municipal Solid Waste Research Symposium (USEPA Report #600/9-77-026), p. 218-236.

Flower F.B., Gilman E.F., Leon I.A. (1981) - Landfill Gas, What It Does To Trees And How Its Injurious Effects May Be Prevented. *Journal of Arboriculture*, 7(2), 43–52.

FutureGen Alliance (2006) - Heart of Brazos Site Environmental Information Volume. 505p. <http://www.futuregenalliance.org/news/evi.stm>

Geisler T. (1963) - The Influence of CO₂ and HCO₂ on Roots. *Plant Physiol.* 38:77.

Gerlach T.M., Doukas M.P., McGee K.A., et al. (1999) - Soil efflux and total emission rates of magmatic CO₂ at the Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California, 1995–1999. *Chemical Geology*, 177, 101–116.

GIEC (2005) - IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 p.

Gold T. (1992) - The deep, hot biosphere. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 89, 6045–6049.

Gouveia F.J., Johnson M.R., Leif R.N. et al. (2005) - Aerometric measurement and modelling of the mass of CO₂ emissions from Crystal Geyser, Utah. Lawrence Livermore National Laboratory. UCRL-TR-211870.

Gratz R. K. (1979) - Ventilatory response of the diamondback water snake, *Natrix rhombifera* to hypoxia, hypercapnia and increased oxygen demand. *J. comp. Physiol.* 129, 105-110.

Ha-Duong M., Nadaï A., Campos A.S. (2007) – A survey on the public perception of CCS in France. <http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00200894/fr/>

Hepple R.P. (2005) - Human Health and Ecological Risks of Carbon Dioxide. In Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations – Results from the CO₂ Capture Project, Vol. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, Benson S.M., Oldenburg C., Hoverstein M., Imbus S. (eds). Elsevier Publishing: Oxford; 1143–1172.

Holter P. (1994) - Tolerance of dung insects to low oxygen and high carbon dioxide concentrations. *European Journal of Soil Biology* 30.4:187-193.

Hopkins W. G., Evrard C. (2003) - Physiologie végétale » De Boeck Université, 532 p.

IEA GHG and SNC-Lavalin Inc (2004) – Impact of impurities on CO₂ capture, transport and storage. Report Number PH4/32.

IEA Greenhouse Gas R&D Programme (2007) - Study of Potential Impacts of Leaks From Onshore CO₂ Storage Projects on Terrestrial Ecosystems, 2007/3, July 2007.

INERIS (2005) – Méthodologie Fiche de données toxicologiques et environnementales des substances chimiques. INERIS –DRC-01-25590-99dh283.doc.

INERIS (2006) - Pratique INERIS de choix des valeurs toxicologiques de référence dans les évaluations de risques sanitaires. Rapport d'étude. N° INERIS-DRC-05-41113-ETSC/R01a.

INRS (2005) - Fiche Technique A2. Disponible sur : <http://www.inrs.fr/dossiers/vle.html>

INRS (2008) - Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France. ED 984. 20 p. Disponible sur : <http://www.inrs.fr/dossiers/vle.html>

International Maritime Organization (2007) - Report of the twenty-ninth consultative meeting and the second meeting of contracting parties. Numéro de référence : LC 29/17.

Ishimatsu A., Hayashi M., Lee K-S. (2005) - Physiological effects on fishes in a high-CO₂ world. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, 110 9, p. 1-8.

Johnston P., Santillo D. (SD) - Carbon Capture and Sequestration: Potential Environmental Impacts. Greenpeace Research Laboratories, University of Exeter, Prince of Wales Road, Exeter, EX4 4PS.

Jones J., Stanley E., Mulholland P. (2003) - Long-term decline in carbon dioxide supersaturation in rivers across the contiguous United States, *Geophys. Res. Lett.*, 30(10), 1495, doi:10.1029/2003GL017056.

Khosla S. (2002) – Le gaz carbonique dans les serres. Fiche technique. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario. Disponible sur : <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/00-078.htm>.

Kruger M., West J., Frerichs J., et al. (2009) - Ecosystem effects of elevated CO₂ concentrations on microbial populations at a terrestrial CO₂ vent at Laacher See, Germany. *Energy Procedia* 1 (2009) 1933-1939.

Le Guéan T. (2008) - Mesures correctives pour le stockage géologique du CO₂. Etat de l'art. BRGM/RP-57009-FR, 95p., 20 ill, 3 ann.

Leone I.A., Gilman E.F., Telson M.F., et al. (1980). - Selection of trees and planting techniques for former refuse landfills. *Metro Tree Impr. Alliance (Metria) Proc.* 3: 107-117.

Macek I., Pfanz H., Francetic V., et al. (2005) - Root respiration response to high CO₂ concentrations in plants from natural CO₂ springs. *Env. Exp. Bot.* 54, 90–99.

Martini B., Silver E. (2002) - The evolution and present state of tree kills on Mammoth Mountain, California: tracking volcanogenic CO₂ and its lethal effects. Proceedings of the 2002 AVIRIS Airborne Geoscience Workshop, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA.

Maul P., Beaubien S. E., Bond A., et al. (2008) - Modelling the fate of carbon dioxide in the near-surface environment at the Latera natural analogue site. In 9th International Conference on Greenhouse Gas Technologies - Washington – USA – 16-20/11/2008.

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (2006) – Compréhension des phénomènes et modélisation : la dispersion atmosphérique. Version du 28 décembre 2006. Disponible sur : http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/fiche2_phenom-dispersion_atmo.pdf.

Mitchell AC., Phillips AJ., Hiebert R., et al. (2008) - Biofilm enhanced geologic sequestration of supercritical CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*. Volume 3, Issue 1, January 2009, Pages 90-99, Doi: 10.1016/j.ijggc.2008.05.002.

Nicolas G., Sillans D. (1989) - Immediate and Latent Effects of Carbon-Dioxide on Insects. *Annu. Rev. Entomol.* 34:97-116.

Oldenburg C., Unger A. (2004) - Coupled Vadose Zone and Atmospheric Surface-Layer Transport of CO₂ from Geologic Carbon Sequestration Sites. Lawrence Berkeley National Laboratory. Paper LBNL-55510.

Onstott T. (2005) - Impact of CO₂ injections on deep subsurface microbial ecosystems and potential ramifications for the surface biosphere, Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geologic Formations - Results from the CO₂ Capture Project, v. 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, S.M. Benson (ed.), Elsevier Science, London, p. 1217–1250.

OSPAR (2007) - Lignes directrices OSPAR pour l'évaluation et la gestion des risques du stockage des flux de CO₂ dans les structures géologiques. Convention OSPAR pour la Protection du milieu marin de l'Atlantique du nord-est. Numéro de référence : 2007-12.

Petroleum Technology Research Centre (2004) – IEA GHG Weyburn CO₂ Monitoring & Storage Project Summary Report 2000-2004. 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, 5-9 September, 2004, Vancouver, Canada.

Pfanz H., Vodnik D., Wittmann C., et al. (2007) - Photosynthetic performance (CO₂-compensation point, carboxylation efficiency, and net photosynthesis) of timothy grass (*Phleum pratense* L.) is affected by elevated carbon dioxide in post-volcanic mofette areas. *Environmental and Experimental Botany* 61,41–48.

Prat L. (SD) – Droit de l'air : cadre national. Techniques de l'Ingénieur.

Préfecture des Pyrénées-Atlantiques (2008a) - Rapport Général de la Commission d'enquête. Demande d'autorisation d'exploiter une unité pilote de captage de CO₂ depuis l'usine de Lacq, de transport par les canalisations existantes, puis injection aux fins de stockage de CO₂, dans le puits dit de Rousse 1 sur la commune de Jurançon. Projet pilote de TOTAL : captage, transport et injection de CO₂. AP : 08/IC/132 du 24.06.2008 TA : E 08 000 107/64 du 26.05.2008.

Préfecture des Pyrénées-Atlantiques (2008b) - Conclusions motivées et avis de la Commission d'Enquête. Demande d'autorisation d'exploiter une unité pilote de captage de CO₂ depuis l'usine de Lacq, de transport par les canalisations existantes, puis injection aux fins de stockage de CO₂, dans le puits dit de Rousse 1 sur la commune de Jurançon. Projet pilote de TOTAL : captage, transport et injection de CO₂. AP : 08/IC/132 du 24.06.2008 TA : E 08 000 107/64 du 26.05.2008.

Projet CO2MONITOR - Essai d'utilisation de l'imagerie hyperspectrale pour la détection des fuites de CO₂ – Bourguignon A., Chevrel S., 52p.

Qi J., Marshall J.D., Mattson K.G. (1994) - High soil carbon-dioxide concentrations inhibit root respiration of Douglas-fir. *New Phytol.* 128, 435–442.

Rogie J.D., Kerrick D.M., Sorey M.L. et al. (2001) - Dynamics of carbon dioxide emission at Mammoth Mountain, California. *Earth and Planetary Science Letters*, 188, 535–541.

Roman G., Isnard P., Jouany J.-M. (1997) - Critical Analysis of Methods for Assessment of Predicted No-Effect Concentration. *Ecotoxicology and Environmental Safety* Volume 43, Issue 2, June 1999, p. 117-125.

Sage F. (2002) - How Terrestrial Organisms Sense, Signal, and Respond to Carbon Dioxide. *Integrative and Comparative Biology* 2002 42(3):469-480.

Saripalli K.P., Mahasenan N.M., Cook E.M. (2003) – Risk and Hazard Assessment for Projects Involving the Geological Sequestration of CO₂. In: Gale, J, Kaya, Y, editors. Sixth International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies; Pergamon: 2003; Vol. I, p. 511-516.

Shackley S., McLachlan C., Cough C. (2004) - The Public Perceptions of Carbon Capture and Storage, Tyndall Working Paper 44.

Sherwood L., Lockhart A. (2006) - Physiologie humaine. Edition: 2. Publié par De Boeck Université, 768 pages.

Shuler P., Tang Y. (2005) - Atmospheric CO₂ Monitoring Systems. In Results from the CO₂ Capture Project. V 2: Geologic Storage of Carbon Dioxide with Monitoring and Verification, S.M. Benson (ed.). Elsevier, London, UK, p. 1015-1030.

Stenhouse M., Arthur R., Zhou W. (2008) - Assessing environmental impacts from geological CO₂ storage. Int. J. Greenhouse Gas Control. In 9th International Conference on Greenhouse Gas Technologies - Washington – USA – 16-20/11/2008.

Stupfel M., Le Guern F. (1989) - Are there biomedical criteria to assess an acute carbon dioxide intoxication by a volcanic emission? *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 39 (1989) 247-264.

Sustr V., Simek M. (1996) - Behavioural Responses to and Lethal Effects of Elevated Carbon Dioxide Concentration in Soil Invertebrates. *European Journal of Soil Biology* 32(3):149-155.

Titus J. E., Pagano A. M. (2002) - Decomposition of Litter from Submersed Macrophytes: The Indirect Effects of High [CO₂]. *Freshwater Biology* 47(8):1367-1375.

Total E&P France (2008) – Projet Pilote. Présentation Générale du Projet. Demande d'autorisation d'exploiter. Demande d'autorisation de travaux miniers. Rapport numéro : EP/ECA/TEPF/DT/Pilote CO₂.

Turley C., Nightingale P., Riley N., et al. (2004) - Literature Review: Environmental impacts of a gradual or catastrophic release of CO₂ into the marine environment following carbon dioxide capture. Plymouth Marine Laboratory.

U.S. DOE (2007) - FutureGen Project Final Environmental Impact Statement (DOE/EIS-0394). Disponible sur : <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/futuregen/EIS/>.

U.S. EPA (2008) – Vulnerability Evaluation Framework for Geologic Sequestration of Carbon Dioxide. EPA430-R-08-009.

Vodnik D., Kastelec D., Pfanz H., et al. (2006) - Small-scale spatial variation in soil CO₂ concentration in a natural carbon dioxide spring and some related plant responses, *Geoderma* 133, 309-319.

West J.M., Pearce J.P., Bentham M. (2005) - Issue Profile: Environmental Issues and the Geological Storage of CO₂. *European Environment* 2005; 15; 250–259.

West J.M., Pearce J.M., Coombs P., et al. (2008) - The impact of controlled injection of CO₂ on the soil ecosystem and chemistry of an English lowland pasture. In 9th International Conference on Greenhouse Gas Technologies - Washington – USA – 16-20/11/2008.

Whitman W.B., Coleman D.C., Wiebe W.J. (2001) - Prokaryotes: The unseen majority. *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, 95(12), 6578–6583.

Wolfe D.W., Erickson J.D. (1993) - Carbon dioxide effects on plants: uncertainties and implications for modelling crop response to climate change in *Agricultural Dimensions of Global Change*. H.M. Kaiser and T.E. Drennen (eds.). pp. 153-178.

Zinkler D., Platthaus J. (1996) - Tolerance of soil-Dwelling Collembola to high carbon dioxide concentrations. *Eur. J. Entomology*. 93: 443-450.

Ziska L.H., Bunce J.A. (2007) - Predicting the impact of changing CO₂ on crop yields: some thoughts on food, *New Phytologist* 175, 607-618

Annexe 1

Liste des effets du CO₂ évoqués dans ce rapport

Cible	Groupe biologique concerné	Taxon (si précisé)	Concentrations Exprimées en % de volume (air)	Durée d'exposition	Effets	Références
Homme	Homme	Homme	0,5 %		Valeur limite d'exposition professionnelle indicative (8 h)	Arrêté du 26 Octobre 2007 Santé Canada
			0,70 %	Chronique	Augmentation de l'acidité du sang	Hepple, 2005
			< 1 %	Chronique	Stimule la respiration	Hepple, 2005
			1,5 % à 3 %	Chronique	Hypercapnie, acidose, hausse de l'activité respiratoire, maux de tête, sudation	Hepple, 2005
			> 3 %	Aiguë	Détérioration de la vue et de l'ouïe, confusion mentale, difficultés à respirer	Hepple, 2005
			5 %	30 minutes	Effets irréversibles. Au bout de quelques minutes : vertiges, difficultés à respirer	Note du 16/11/2007 ^a Hepple, 2005
			7 % à 8 %	Aiguë	Au bout de plusieurs minutes à une heure : vertiges, manque de souffle, inconscience totale ou partielle	Hepple, 2005
			10 %	30 minutes	Premiers effets létaux	Note du 16/11/2007 ^a
			10 % à 15 %	Aiguë	Après une ou plusieurs minutes : somnolence, tremblements musculaires sévères et perte de conscience	Hepple, 2005
			> 15 %	Aiguë	Perte de conscience en moins d'une minute. Si l'exposition se prolonge : somnolence, arrêt du système respiratoire, coma et la mort	Hepple, 2005
			20 %	30 minutes	Effets létaux significatifs	Note du 16/11/2007 ^a
			30 %	Aiguë	Au bout de quelques minutes : mort	Hepple, 2005

Cible	Groupe biologique concerné	Taxon (si précisé)	Concentrations Exprimées en % de volume (air)	Durée d'exposition	Effets	Références	
Environnement de surface	Vertébrés ou Invertébrés		> 5 %		Atteinte du système respiratoire, étouffement	Sage, 2002	
	Mammifères	Porc	70 %	Aiguë	Perte de conscience en 15 secondes	Directive 93/119/CE ; Stupfel et Le Guern, 1989	
	Reptiles		1 % à 6 %		Baisse de la fréquence respiratoire	Gratz, 1979 ; Abe and Johansen, 1987 ; FutureGen Alliance, 2006	
	Végétaux (atmosphère)	Blé		0,07 %		Rendement agricole 19 à 47 % supérieur par rapport à 370ppm	Liska et Bunce, 2007
		Soja		0,07 %		Rendement agricole 28 à 40 % supérieur par rapport à 370 ppm	Liska et Bunce, 2007
		Riz		0,07 %		Rendement agricole 19 à 44 % supérieur par rapport à 370 ppm	Liska et Bunce, 2007
				> 0,07 %		Respiration souvent réduite	Bunce, 2004

Cible	Groupe biologique concerné	Taxon (si précisé)	Concentrations Exprimées en % de volume (air)	Durée d'exposition	Effets	Références	
Environnement de surface	Végétaux (atmosphère)		> 0,1 % ou 0,13 %		La photosynthèse n'augmente plus dans la majorité des cas	Khosla, 2002	
			> 0,1 % ou 0,2 %		Fermeture des stomates des plantes (orifices permettant les échanges gazeux)	Stupfel et Le Guern, 1989	
			0,0005 % à 0,5 %		Influence possible sur le comportement	Sage, 2002	
					Modification de l'ouverture des orifices respiratoires	FutureGen Alliance, 2006	
		Insectes	Charançon (Cryptolestes ferrugineus)	15 %	42 jours	Létal	West, 2005
			Charançon (Cryptolestes ferrugineus)	100 %	2 jours	Létal	West, 2005
				30 % à 100 %		Létal	FutureGen Alliance, 2006 d'après Nicolas et Sillans, 1989

Cible	Groupe biologique concerné	Taxon (si précisé)	Concentrations Exprimées en % de volume (air)	Durée d'exposition	Effets	Références
Sol	Vertébrés ou Invertébrés		2 % à 39 %		Modification dans la coordination des mouvements jusqu'à la paralysie	Sutr et Siemk, 1996
	Vertébrés ou Invertébrés		2 %		Effets physiologiques négatifs possibles	U.S. EPA, 2008 d'après Benson et al., 2002
	Vertébrés ou Invertébrés		15 %		Mort possible de certains animaux du sol	U.S. EPA, 2008 d'après Benson et al., 2002
	Vertébrés	Gophers fouisseurs (air du sol)	4 %		Observés dans leurs terriers à cette concentration	West, 2005
	Vertébrés	Oiseaux fouisseurs (air du sol)	9 %		Observés dans leurs nids à cette concentration	West, 2005
	Invertébrés du sol	Collembole (<i>A fusca</i> , <i>T flavescens</i>)	10 %	Quelques heures	Létal pour la moitié des individus	Zinkler et Platthaus, 1996
	Invertébrés du sol		11 % à 50 %		Létal pour certaines espèces	Sutr et Siemk, 1996
	Invertébrés du sol		30 %		Paralysie de la moitié des espèces étudiées	Sutr et Siemk, 1996
	Végétaux (sol)	Gazon	2,50 %		Réduction de la masse et de la profondeur des racines	Bunnell et al., 2002
	Végétaux (sol)		2,50 %		Réduction de la biomasse et de la profondeur des racines	FutureGen Alliance, 2006

Cible	Groupe biologique concerné	Taxon (si précisé)	Concentrations Exprimées en % de volume (air)	Durée d'exposition	Effets	Références
Sol	Végétaux (sol)		5 %		Survie des plantes menacée	GIEC, 2005 Saripalli <i>et al.</i> , 2003
	Végétaux (sol)	Gazon	10 %		Baisse de la croissance, chlorose, qualité inacceptable	Bunnel <i>et al.</i> , 2002
	Végétaux (sol)		>10 %		Asphyxie des racines, mort de la plante	IEA GHG, 2007
	Végétaux (sol)	Pois	< 12 %		Stimulation de la croissance (longueur, masse) des racines, effet inhibiteur au-delà	Geisler, 1963
	Végétaux (sol)		> 15 ou 20 %		Létal pour certaines plantes	Chang et Loomis, 1945
	Végétaux (sol)		10 à 20 %		Létal en fonction de la durée d'exposition	FutureGen Alliance, 2006
	Végétaux (sol)		10 ou 20 %		Baisse de l'absorption racinaire de l'eau et des minéraux et baisse du développement des racines	Farrar <i>et al.</i> , 1999
	Végétaux (sol)		20 %		Toxique	GIEC, 2005
	Végétaux (sol)	Végétation forestière	20 %		La végétation montre des signes de stress à Horseshoe Lake (USA)	Farrar <i>et al.</i> , 1999
	Végétaux (sol)		> 5 % à 10 cm de profondeur ou > 20 % à 20 cm de profondeur		La composition du peuplement végétal change sur un site à Latera (Italie), seules des monocotylédones sont présentes	Beaubien <i>et al.</i> , 2008
	Végétaux (sol)		> 30 %		Mort des plantes en général, Mort des arbres à Horseshoe Lake	Gerlach <i>et al.</i> , 1999 ; Saripalli <i>et al.</i> , 2003

Cible	Groupe biologique concerné	Taxon (si précisé)	Concentrations Exprimées en % de volume (air)	Durée d'exposition	Effets	Références
Sol	Végétaux (sol)		45 % à 20 cm de profondeur		Seules des monocotylédones sont présentes sur le site ASGARD	West <i>et al.</i> , 2008
	Végétaux (sol)		75 %		Aucune plante ne survit sur le site ASGARD	West <i>et al.</i> , 2008
	Bactéries	Dénitrifiante	20 %		L'activité dénitrifiante diminue d'un facteur 4 à 10	Dictor <i>et al.</i> , 2008
	Bactéries	Nitrifiante	25,50 %		Activité nitrifiante faible sur le site de Latera	Dictor <i>et al.</i> , 2008
	Bactéries		50 %		Diversité métabolique affectée	Dictor <i>et al.</i> , 2008
	Micro-organismes		50 %		Effet inhibiteur ou léthal	Hepple, 2005
	Mycètes (champignons)		15 % à 20 %		Inhibition significative de la croissance des spores pour deux types de mycètes	West, 2005
	Mycètes (champignons)		30 %		Pas de croissance de spore	West, 2005
	Mycètes (champignons)		40 %		Léthal ou absence de développement	Hepple, 2005
	Mycètes (champignons)		50 %		Pas de germination de spore	West, 2005

Cible	Groupe biologique concerné	Taxon (si précisé)	Concentrations Exprimées en mg/l (eau)	Durée d'exposition	Effets	Références
Eaux de surface	Etres vivants aquatiques en général		20 à 110 mg/l		Perturbation voire mort	Saripalli <i>et al.</i> , 2003
	Poissons		35 mg/l		Possibilité d'effets létaux	Saripalli <i>et al.</i> , 2003
	Poissons	Esturgeon	40 à 60 mg/l	96 heures	Acidose, hypercapnie, hyperventilation	Crocker et Cech, 1996
	Végétaux aquatiques	Vallisnérie	7 mg/l	98 jours	Augmentation de la croissance (par rapport à une solution contenant 0,8 mg/l de CO ₂)	Titus et Pagano, 2002

^a Note du 16/11/07 relatif à la concentration à prendre en compte pour l'O₂, le CO₂, le N₂ et les gaz inertes (Ministère chargé de l'Écologie)



Centre scientifique et technique
Service Risques naturels et sécurité du stockage de CO₂
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34