

# PRESENTATION DETAILLEE

## LE CO<sub>2</sub> : SON CAPTAGE, SON STOCKAGE ET SA VALORISATION

**Coordinateurs :** Elise El Ahmar (CTP), Irina Sin (Géosciences)

**Centres de recherche concernés :** Centre Thermodynamique des Procédés (CTP) et Centre de Géosciences

**Lieu :** 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau, France

### RESUME :

Depuis plus d'un siècle, les activités humaines ont provoqué un accroissement des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), ce qui entraîne une augmentation de la part de rayonnement retenue dans l'atmosphère et un surplus d'effet de serre. Même si le CO<sub>2</sub> n'a pas le pouvoir de réchauffement global le plus important, la quantité de ses émissions fait de lui le GES le plus nuisible. Son captage, stockage géologique et sa valorisation (CSCV) consiste à récupérer le CO<sub>2</sub> émis en grande quantité lors de processus industriels tels que la production d'électricité, d'acier ou de ciment, pour le stocker dans le sous-sol afin de l'isoler de l'atmosphère, ou le réutiliser. Le CO<sub>2</sub> ainsi capté ne vient donc plus s'accumuler dans l'atmosphère et ne contribue plus à l'effet de serre ni au changement climatique.

Les élèves seront amenés à découvrir cette solution technologique prometteuse qui, allié à d'autres mesures, permet de réduire massivement le CO<sub>2</sub> émis par l'industrie et le secteur énergétique.

### CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE :

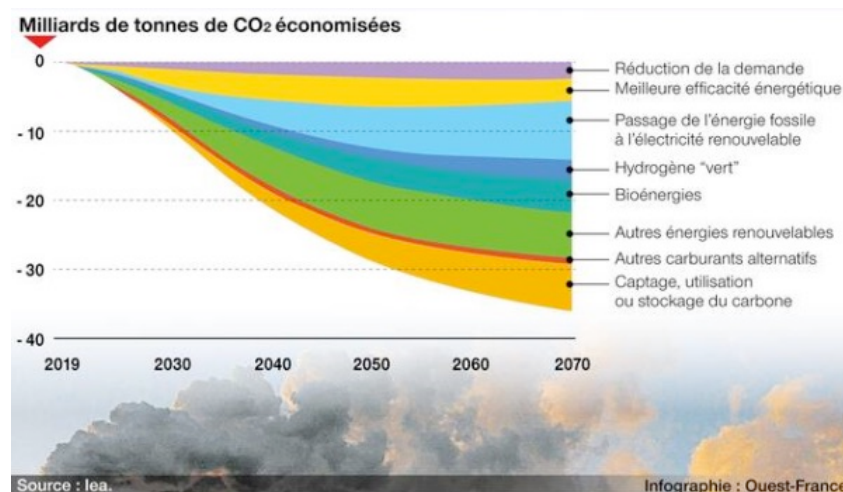
Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est un gaz incolore, inerte et non toxique, est le principal gaz à effet de serre (GES) à l'état naturel, avec la vapeur d'eau. Il représente 77% des émissions de GES d'origine humaine. Il résulte essentiellement de la combustion des énergies fossiles et du changement d'utilisation des sols (agriculture et déforestation). Il est surtout issu du secteur des transports (combustion de carburants), de l'industrie (utilisation d'énergies fossiles) et de l'habitat (utilisation d'énergie pour le chauffage, l'éclairage, ...). Sa durée de vie dans l'atmosphère est d'environ 100 ans. En cinquante ans, la quantité de CO<sub>2</sub> que l'humanité disperse chaque année dans l'air est passée de 15 à 36,8 milliards de tonnes. Dans ce total, la France pèse un peu plus de 1 % et la Chine presque 30 %.



Ce polluant peut-il être une ressource ?

Dans son scénario visant la neutralité carbone de la planète en 2070, l'agence internationale de l'énergie (AIE) estime qu'on ne pourra neutraliser totalement certains gros émetteurs de CO<sub>2</sub> : centrales à charbon, à fuel ou à gaz, usines produisant des métaux, des engrais, du ciment, raffineries pétrolières. Ceci parce que les équipements sont trop récents pour être retirés rapidement, ou bien parce que le processus chimique de production est émetteur (cas du ciment et de l'acier). Or elles émettent 20 % du CO<sub>2</sub> global (contre moins de 3 % pour le transport aérien).

Une des solutions proposées (Figure 1) pour parvenir à la neutralité carbone en 2070 selon l'AIE est de capter le CO<sub>2</sub> émis à la cheminée des usines et le neutraliser. Ce qu'on appelle le CSCV pour captage, stockage et valorisation du dioxyde de carbone. Il n'existe que 21 sites dans le monde équipés de CSCV, dont la moitié aux États-Unis d'Amérique. La neutralité carbone des activités humaines ne pourra être atteinte qu'en récupérant la part incompressible de CO<sub>2</sub>, selon l'AIE.



### Les principales techniques de captage du CO<sub>2</sub>

Plusieurs procédés industriels de captage existent, en fonction de la nature des fumées à traiter (composition, température, pression). Ils relèvent de **trois catégories** principales (Figure 2) :

#### -**Captage postcombustion**

L'objectif est d'extraire le CO<sub>2</sub> dilué dans les fumées de combustion. Ce procédé peut s'intégrer aux installations existantes, en tenant compte de la place disponible au sol et des modifications de rendement induites.

#### -**Captage par oxycombustion**

Il s'agit de produire une fumée concentrée en CO<sub>2</sub> en modifiant le procédé de combustion qui repose sur l'utilisation d'oxygène pur à la place de l'air.

#### -**Captage précombustion**

Avec ce type de procédé, l'objectif est de produire et de capter le CO<sub>2</sub> avant même la phase de combustion. A partir du combustible, d'oxygène et de vapeur d'eau, on forme du dihydrogène H<sub>2</sub> qui alimente la combustion et du CO<sub>2</sub> qui est isolé.

Lors du traitement des fumées issues des combustions, **quatre technologies principales** sont utilisées :

-L'absorption : le gaz contenant les espèces à séparer est envoyé dans une colonne où il est mis en contact avec un solvant liquide qui dissout le gaz à séparer et permet de l'isoler du reste des fumées.

-L'adsorption : le procédé est le même que pour l'absorption mais le solvant est remplacé par un adsorbant solide et il y a passage du gaz à séparer vers l'adsorbant.

-La diffusion membranaire : sélection des molécules de CO<sub>2</sub> grâce à une membrane ne laissant passer que les molécules d'une certaine taille.

-La distillation cryogénique : manipulation des conditions de température et de pression des gaz pour aboutir à la liquéfaction du CO<sub>2</sub>.

L'absorption et l'adsorption sont aujourd'hui les deux technologies les plus développées industriellement.

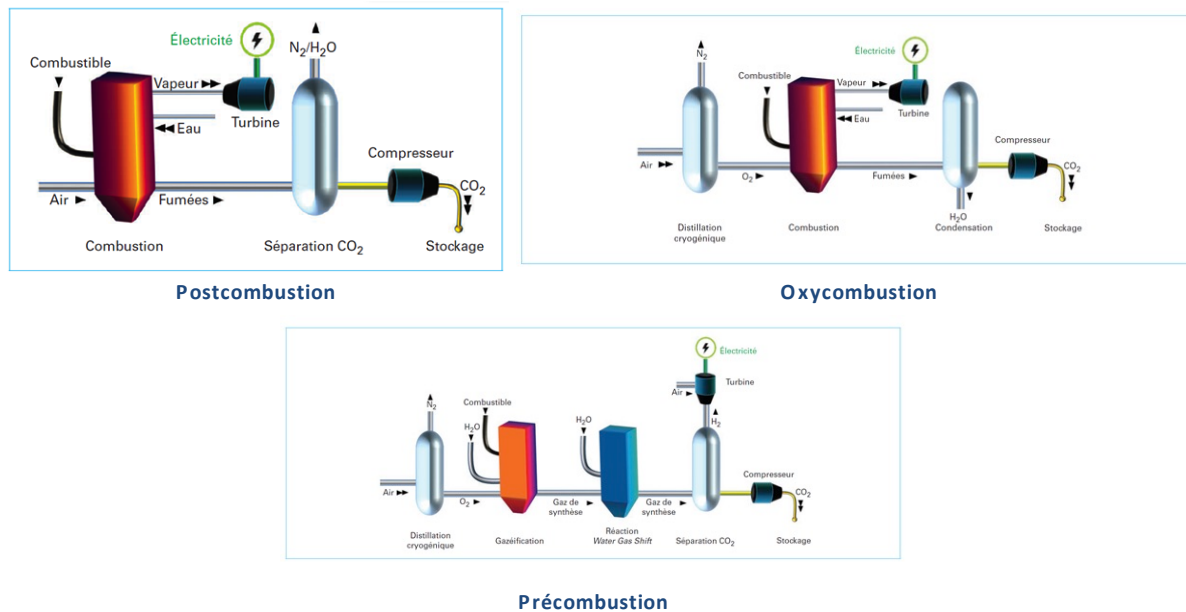


Figure 2. Principe d'un procédé de captage en post, oxy et précombustion (Techniques de l'ingénieur, Captage du CO<sub>2</sub> - Technologie pour la transition énergétique, Mai 2020).

### Transport du CO<sub>2</sub>

Après son captage, le CO<sub>2</sub> doit être dirigé vers son lieu de stockage ou d'utilisation. Compte tenu des volumes, les seules solutions possibles à grande échelle passent par l'utilisation des gazoducs (pipelines) ou des navires (le transport par camion ou train étant réservé à des volumes limités).

-Le transport de CO<sub>2</sub> par pipeline est prouvé depuis des décennies, notamment aux Etats-Unis d'Amérique avec plus de 6000 km de pipeline CO<sub>2</sub> en opération.

-Le transport maritime de CO<sub>2</sub> est quant à lui moins mature et actuellement seulement 5 navires au monde transportent de petits volumes de CO<sub>2</sub> (capacité des navires environ 1500 m<sup>3</sup>) pour l'industrie agroalimentaire. Une fois capté, le CO<sub>2</sub> doit être liquéfié afin de pouvoir le transporter de manière efficace. A la sortie de l'usine de liquéfaction, le CO<sub>2</sub> liquide est stocké dans des réservoirs de stockage temporaires. De ces réservoirs, il est chargé sur des navires de transport dédiés via un système de chargement puis transporté jusqu'à sa destination. Dans le cas d'un transport maritime de port à port, le CO<sub>2</sub> est déchargé dans un terminal à terre dans des réservoirs de stockage temporaires. Il est ensuite pompé et chauffé puis transporté par pipeline vers un site de stockage géologique.

### Stockage géologique du CO<sub>2</sub>

Le CO<sub>2</sub> capté et transporté est ensuite piégé dans des roches réservoirs, dans la structure géologique.

Types de stockages :

#### - Les aquifères salins profonds

Ces réservoirs d'eau salée impropre à la consommation représentent la capacité de stockage la plus importante allant jusqu'à 10 000 Gt de CO<sub>2</sub> d'après le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). A contrario, leurs structures sont souvent mal connues et nécessitent des études poussées, notamment pour vérifier l'intégrité du stockage sur le long terme.

#### - Les gisements d'hydrocarbures épuisés

Ces gisements de pétrole et de gaz naturel épuisés sont des pièges d'hydrocarbures qui se sont montrés efficaces pendant des millions d'années et dont la structure est mieux renseignée. Mais ils présentent des volumes de stockage moindre que ceux des aquifères salins.

Par ailleurs, le CO<sub>2</sub> peut également être utilisé pour améliorer la récupération de certains hydrocarbures. La technique CO<sub>2</sub>-EOR/EGR (Enhanced Oil Recovery/Enhanced Gas Recovery) est mise en place sur de nombreux sites d'exploitation.

#### - Les veines de charbon profondes inexploitées

Ces veines de charbon constituent un piège du méthane au sein de leurs matrices solides. Le méthane adsorbé peut être récupéré en utilisant du CO<sub>2</sub> qui restera fixé en retour, la technique est appelée CO<sub>2</sub>-ECBM (Enhanced Coal Bed Methane).

Indépendamment du type de stockage, sa faisabilité techniques et l'intégrité sur le long terme doivent être démontrées en considérant les risques opérationnels ainsi que l'impact environnemental potentiel. Depuis ces trente dernières années, le stockage géologique de CO<sub>2</sub> a donné lieu à de nombreuses études et à la mise en place d'une vingtaine de projets dans le monde, dont la majorité est associée à l'exploitation d'hydrocarbures. Aujourd'hui, d'autres techniques, alternatives au stockage massif, sont également proposées pour des stockages à plus petite échelle : stockage dans les cavités salines et stockage de CO<sub>2</sub> dissous en aquifère.

Néanmoins, le stockage géologique pourra-t-il être suffisant ? En 2017, les émissions de CO<sub>2</sub> en France étaient de 350 Mt ; dans le monde à ce jour, les installations permettent de stocker 23 MtCO<sub>2</sub>/an (source : ADEME).

### **Valorisation et utilisation du CO<sub>2</sub>**

Principalement issu jusque-là des activités de reformage de gaz naturel, le CO<sub>2</sub> est historiquement utilisé pour la production d'urée (57%) et pour la récupération assistée de pétrole (34%). Le restant (9%) est majoritairement employé pour des applications dans l'agro-alimentaire et la métallurgie (AIE, 2018). Mais avec le déploiement des nouvelles technologies de captage de CO<sub>2</sub>, de nouvelles voies de valorisation du CO<sub>2</sub> émergent avec de nouveaux débouchés pour les industriels tels que l'utilisation du CO<sub>2</sub> comme matériaux de construction ou comme substitut de ressources fossiles pour la production de matières plastiques et de carburants synthétiques, etc...

### **OBJECTIFS, TRAVAIL ET ORGANISATION :**

Le MIG sera piloté conjointement par deux centres de recherche de Mines ParisTech : Le Centre Thermodynamique des Procédés et le centre de Géosciences. Le tableau ci-après présente le programme provisoire des trois semaines bloquées. Les élèves sont encouragés à poser leurs questions aux conférenciers, qui pourront les aider à acquérir les bases scientifiques, techniques, économiques, etc. Lors des synthèses de fin de semaine, chaque groupe devra présenter aux autres groupes l'avancée de ses travaux. 4 à 5 transparents seront demandés.

### **MINI-PROJETS**

Les élèves devront se répartir en 5 groupes afin de travailler sur différents aspects concernant le CSCV en répondant à différentes questions.

Groupe 1 : Décarbonation des procédés industriels (Adaptation des procédés qui permettent de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>) : Aspects économiques et environnementaux.

Groupe 2 : Captage, purification et valorisation du CO<sub>2</sub> : Quelles sont les verrous technico-économiques des techniques de captage ? Quelles pourraient être les nouvelles applications afin d'augmenter la part de CO<sub>2</sub> actuellement valorisé comme matière première.

Groupe 3 : Stockage géologique du CO<sub>2</sub> : Quelles leçons avons-nous appris après trente années de recherche et de développement ? Quels sont les verrous techniques ?

Groupe 4 : Captage et stockage du CO<sub>2</sub> : Quels scénarios pourraient être envisagés pour des émetteurs en France ? Comment et où stocker en France ?

Groupe 5 : CSCV : Combien coûte 1 tCO<sub>2</sub> capté, acheminé et stocké ? Évaluer la faisabilité technico-économique des scénarios.

### **LES VISITES**

- Visite de SAS Méthatreil (première unité de production de biométhane en France à récupérer le CO<sub>2</sub> pour le réutiliser en culture maraîchère grâce au procédé Carlboliq développé par Cryocollect, Machecoul-Saint-Même).
- Visite de plateformes d'essais et d'équipements (BRGM, Orléans).
- Visite de Cryopur (entreprise qui transforme le biogaz, issu des déchets organiques, directement en bio-GNL (biométhane liquide) et en CO<sub>2</sub> liquide grâce à son procédé Cryo pur ; Massy).
- Visite des installations d'essais du centre de recherche Paris-Saclay (Air Liquide, Jouy-en-Josas).
- Visite des installations d'essais (Holcim, Lyon).

## PROGRAMME PREVISIONNEL

Jours	Semaine 1 (du 15/11 au 19/11)	Semaine 2 (du 22/11 au 26/11)	Semaine 3 (du 29/11 au 03/12)
Lundi	9h00-17h30 / Mines Paris M : Présentation du MIG AM : CSCV (TOTAL)	9h30-17h30 / Mines Paris M : Captage et valorisation du CO <sub>2</sub> (ENGIE) AM : Travail de groupe	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau M : Visite du CTP AM : Travail de groupe
Mardi	9h30-17h00 /Machecoul-Saint-Même Visite de Méthatreil : Procédé Carbolig	9h30-17h30 / Holcim (Lyon) Rencontre avec des experts du CSCV Visite des installations	9h00-17h00 / Air liquide (Saclay) Rencontre avec des experts du CSCV Visite des installations d'essais
Mercredi	09h00-18h00 / Mines Fontainebleau M : Présentation et discussion autour du développement durable (C. Descamps-Large, Mines ParisTech) AM : Recherche de documentaire	9h30-17h30 / Mines Fontainebleau M : Analyse du cycle de vie (P. Perez-Lopez, Mines parisTech) AM : Travail de groupe	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau Travail de groupe
Jeudi	9h00-17h00 / BRGM (Orléans) Rencontre avec des experts du CSCV Visite de plateformes d'essais et d'équipements	9h00-17h30 M : Travail de groupe (Mines Paris) AM : Visite Cryopur et présentation de la technologie (Massy)	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau Travail de groupe
Vendredi	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau M : Propriétés et diagrammes de phases de CO <sub>2</sub> (E. El Ahmar) + Stockage géologique (I. Sin) AM : Travail de groupe+ Bilan 1ère semaine	9h00-18h00 / Mines Fontainebleau M : Travail de groupe AM : Bilan 2 <sup>ème</sup> semaine	9h00-15h00/ Mines Paris Présentation des résultats

### DETAILS PRATIQUES POUR LES ELEVES / CONTACT(S)

Dr. Elise El Ahmar  
Centre Thermodynamique des Procédés - CTP – Mines ParisTech  
e-mail : elise.el\_ahmar@mines-paristech.fr  
Portable : + 33 6 88 08 58 81

Dr. Irina Sin  
Centre de Géosciences – Mines ParisTech  
e-mail : irina.sin@mines-paristech.fr  
Portable : + 33 6 34 61 81 65